

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments

Avis de l'Anses
Rapports d'expertise collective

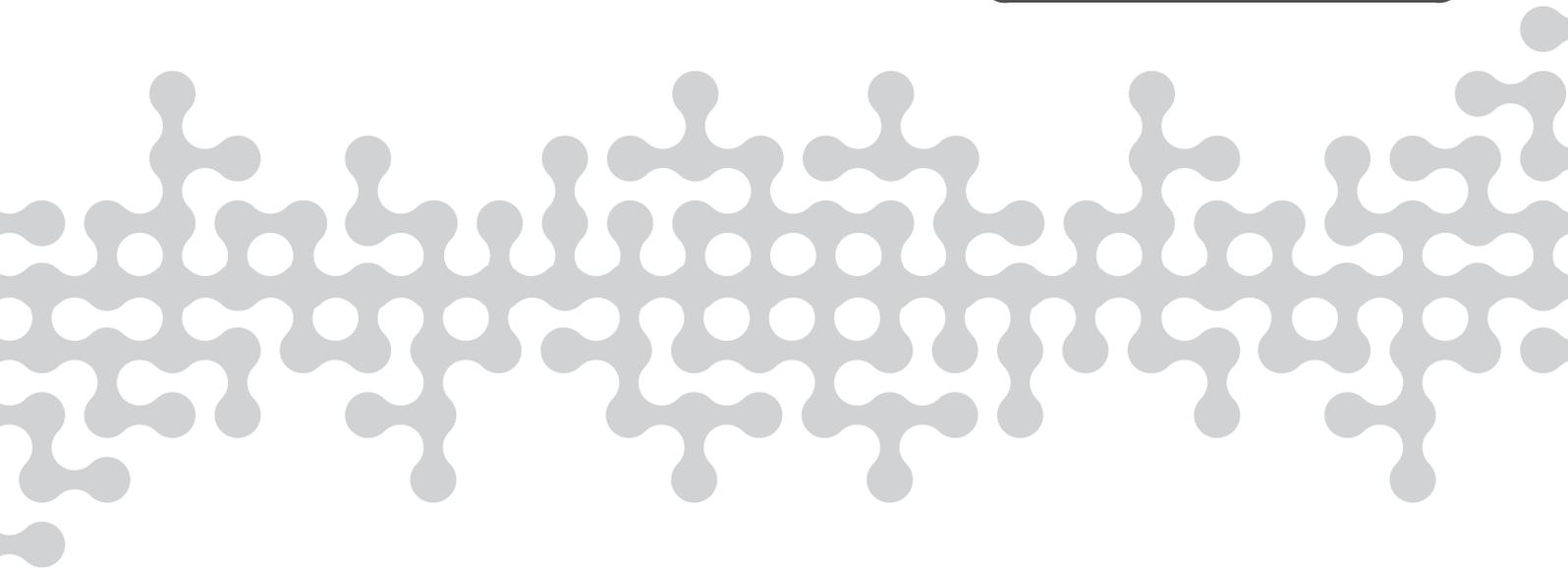
Mai 2019 - Édition scientifique



Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments

Avis de l'Anses
Rapports d'expertise collective

Mai 2019 - Édition scientifique



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 23 mai 2019

AVIS¹

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à « la caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L. 1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie en avril 2016 par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGE), la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), la Direction générale du travail (DGT), la Direction générale de la santé (DGS) et la Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP) sur la question de la caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue une préoccupation de santé publique en France et dans de nombreux pays du fait de situations d'exposition à divers contaminants chimiques, microbiologiques, ou agents physiques, pouvant présenter des effets sur la santé. Différentes sources d'émission peuvent être à l'origine de la présence de ces différents contaminants dans l'air intérieur : des sources propres au bâti, à son environnement extérieur, à ses équipements ou aux comportements de ses occupants. La qualité de l'air intérieur est ainsi conditionnée par la pollution en provenance de sources multiples et notamment de l'air extérieur.

Les effets sur la santé des contaminants présents dans l'air, varient selon leur nature et les expositions depuis la simple gêne (olfactive, somnolence, irritation des yeux et de la peau) jusqu'à l'apparition ou l'aggravation de pathologies aiguës ou chroniques (allergies respiratoires, asthme, cancer, intoxication mortelle ou invalidante, etc.). Il ressort d'une étude de 2013 conduite par l'Anses et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), que le coût socio-économique annuel de la pollution de l'air intérieur pour la collectivité est évalué à 19 milliards d'euros.

¹ Annule et remplace l'avis du 17 avril 2019 (cf. annexe 1)

Différentes campagnes de mesures de la qualité de l'air à l'intérieur de bâtiments, notamment à l'intérieur d'établissements recevant du public, ont mis en évidence une contribution pouvant être significative de la pollution de l'air extérieur, selon la situation et/ou le polluant considéré. Ces transferts de l'air extérieur vers l'intérieur de locaux semblent favorisés dans certaines conditions, par exemple pour des bâtiments situés à proximité d'importantes sources extérieures d'émissions de polluants.

Il est ainsi apparu nécessaire d'effectuer une revue des connaissances disponibles sur les relations entre l'air extérieur et l'air intérieur de bâtiments, qu'il s'agisse de locaux à usage d'habitation, de travail, ou d'établissements recevant du public (crèches, établissements scolaires, établissements médico-sociaux, ...).

C'est dans ce contexte que l'expertise de l'Anses a été sollicitée sur les transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments afin d'analyser les différents résultats de mesures obtenus au cours des dernières années en France voire dans d'autres pays, incluant les données issues de la littérature grise et scientifique.

L'objectif était de déterminer les polluants (chimiques et biologiques) et les situations, à l'extérieur comme à l'intérieur des bâtiments, les plus favorables au transfert, dans des zones exposées de façon récurrente à la pollution de l'air extérieur. Les situations de pollution accidentelle ou intentionnelle ne faisaient pas partie du champ à investiguer. Outre la hiérarchisation des polluants de l'air extérieur les plus contributeurs à la dégradation de l'air intérieur, l'analyse bibliographique devait également permettre d'établir une liste exhaustive de facteurs et de situations favorisant le transfert de l'air extérieur vers l'intérieur de bâtiments, selon les polluants considérés. L'information sur l'origine des polluants de l'air extérieur, à savoir ceux produits localement et ceux provenant d'autres régions, voire d'autres pays, en lien avec des conditions météorologiques ponctuelles ou habituelles, était demandée. Enfin, dans les différents volets de cette saisine, les particularités éventuelles relatives à l'outre-mer étaient à prendre en compte, dans la mesure du possible.

Les questions et le périmètre de l'expertise ont été redéfinis suite aux échanges entre l'Anses et les représentants des directions ministérielles concernées et précisées dans le contrat de saisine.

L'expertise conduite considère en priorité les polluants réglementés dans l'air ambiant (air extérieur), ainsi que les moisissures et les pollens. Il s'agit plus précisément, pour les polluants réglementés, du dioxyde de soufre (SO₂), du dioxyde d'azote (NO₂), des particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), de l'ozone (O₃), du benzène, du monoxyde de carbone (CO), du benzo(a)pyrène, de l'arsenic (As), du cadmium (Cd), du mercure (Hg), du nickel (Ni) et du plomb (Pb).

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ».

L'instruction des travaux d'expertise de l'Anses s'est articulée en deux phases :

- Une première phase visant à réaliser une revue des données de mesure permettant des comparaisons entre concentrations de polluants mesurées à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiments ;
- Une seconde phase d'analyse des données collectées en vue d'identifier les facteurs ou situations les plus déterminants dans ce type de transfert.

La première phase a pris la forme d'une revue bibliographique couplée à une consultation d'organismes ciblés.

Pour la seconde phase, l'Anses a mandaté cinq experts rapporteurs *intuitu personae*, pour appuyer l'unité d'évaluation des risques liés à l'air dans l'analyse des données collectées.

Lors d'une réunion de présentation intermédiaire des travaux avec les commanditaires de l'expertise, et compte tenu des éléments réunis au cours de la première phase, il a été demandé que les travaux abordent, au-delà de la question des phénomènes de transfert concernant l'enveloppe du bâtiment, des facteurs plus globaux influençant le transfert tels que l'urbanisme ou l'aménagement du territoire. L'expertise scientifique et technique sur ces deux derniers points étant limitée au sein du CES en charge du suivi de l'instruction de cette expertise, l'Anses a proposé, avec l'appui des experts rapporteurs, d'alimenter les travaux sur ces deux points par le recensement d'initiatives documentées dans la littérature ou au cours d'auditions.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 19 mai 2016 et le 17 janvier 2019 et ont été adoptés par le CES lors de la séance du 07 février 2019. Le rapport produit par l'Anses et les experts rapporteurs tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DU CES

I. Méthode

La collecte des connaissances disponibles a reposé principalement sur la réalisation d'une consultation d'organismes français et internationaux ainsi qu'une convention de recherche et développement (CRD) contractée avec le CSTB. En complément, des acteurs du terrain ont été auditionnés afin de partager leurs expériences sur la prise en compte de la problématique du transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur et d'illustrer les possibilités d'actions.

• Recueil de la littérature scientifique sur les transferts de polluants

La majorité des données relatives à l'impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air intérieur, est issue de la CRD Anses-CSTB menée afin de recueillir et analyser les données de la littérature scientifique.

Les objectifs de cette étude étaient de :

- Faire un état des connaissances sur les comparaisons ou ratios de concentrations des polluants d'origine extérieure entre les environnements intérieurs et extérieurs ;
- Faire une revue de la littérature visant à identifier les facteurs et situations influençant le transfert des polluants de l'air extérieur dans les environnements intérieurs ainsi qu'à déterminer leur contribution.

Les études françaises ont été visées en priorité puis complétées au besoin par d'autres études internationales.

La démarche suivie de revue de la littérature afin de documenter les indicateurs de transfert et les données relatives au transfert « extérieur vers intérieur » des polluants ciblés est décrite dans la Figure 1.

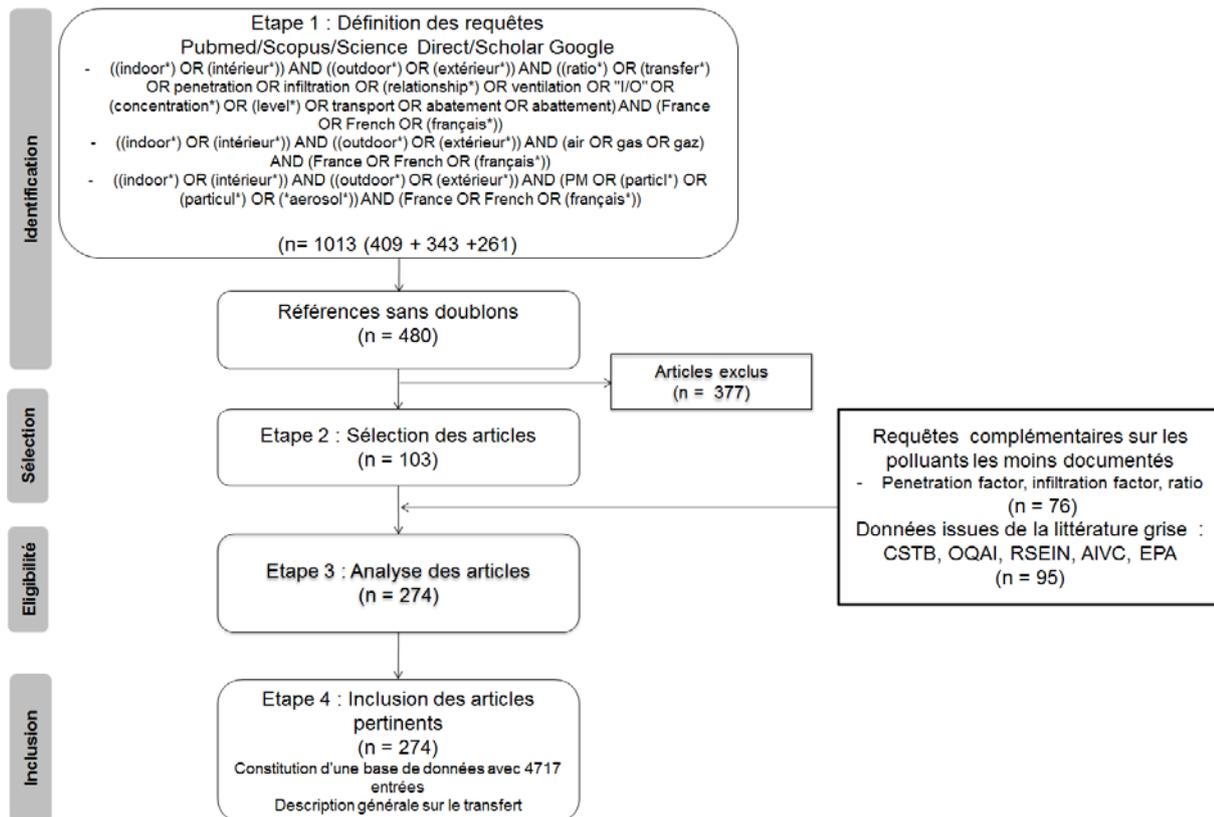


Figure 1 : Processus de sélection des articles conduit dans l'étude commanditée par l'Anses auprès du CSTB

En suivant ce processus de sélection, 274 publications ont été analysées. Les données qu'elles contenaient ont été compilées dans une base de données spécifique réalisée afin d'en permettre des analyses croisées. Les publications couvrent la période 1981–2017 avec des données de mesures allant de 1978 à 2015.

Une consultation a également été réalisée auprès d'organismes analogues à l'Anses, principalement européens et nord-américains afin de recueillir des informations sur les phénomènes de transfert. Ainsi, l'agence a contacté 29 organismes ou réseaux regroupant différentes entités à l'étranger. Onze réponses ont été reçues correspondant à 4 pays européens : l'Allemagne, la Finlande, la Norvège et les Pays-Bas. En France, l'Agence a contacté 13 organismes ou fédérations pour recueillir également des informations. Quatre réponses ont été reçues.

Par ailleurs, l'Agence a réalisé une consultation spécifique des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Cette consultation a été réalisée avec le concours de la fédération ATMO France sur la base d'un questionnaire préparé par l'Anses. Celui-ci visait à compléter les données issues de la littérature scientifique (française) avec les données d'études

spécifiques réalisées par des AASQA, sur l'étude ou la caractérisation du transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur de bâtiments.

- **Analyse des données et formulation de recommandations/pistes d'action**

L'analyse des données de la littérature scientifique concerne plus particulièrement la question des phénomènes de transfert de polluants au niveau du bâtiment. Elle constitue le socle des résultats et contribue au fondement de recommandations. Celles-ci correspondent principalement à des recommandations d'orientation générale des politiques publiques.

La question des autres facteurs influençant le transfert, notamment l'urbanisme, a quant à elle été abordée par le référencement de guides, de projets et d'études spécifiques concernant à la fois l'aménagement du territoire et de la ville et les outils disponibles de modélisation ou d'urbanisme dit opérationnel. Elle repose sur les connaissances des experts rapporteurs, confortées par la documentation recueillie et la conduite d'auditions spécifiques sur cette problématique. Ainsi, deux auditions ont été organisées avec pour objectif un partage d'expériences et/ou de données en présence d'acteurs de terrain en vue d'identifier des préconisations visant à limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur. Pour l'une, plusieurs AASQA ayant travaillé dans ce domaine ont été contactées ainsi que l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) en lien notamment avec le dispositif d'analyse environnementale de l'urbanisme (AEU) et le programme d'aide pour les actions des collectivités territoriales et locales en faveur de l'air (AACT'AIR). Une autre audition d'acteurs a également été organisée avec l'appui d'EKOPOLIS² et associant l'Ademe Ile de France, l'Agence régionale de santé (ARS) Ile de France, le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) Ile de France et un bureau d'études spécialisé dans le développement durable pour la construction de la ville. Ces éléments collectés ont ainsi permis l'identification de pistes d'action.

II. Résultats

1) Etat du parc de bâtiments français et réglementations relatives à la construction et l'urbanisme

- **Réglementations de la construction en lien étroit avec les transferts de polluants**

Parmi les caractéristiques techniques du parc de bâtiments susceptibles de jouer un rôle dans le transfert, **l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et les caractéristiques (type et dimensionnement) du système de ventilation apparaissent cruciales.**

Au niveau de la construction, les exigences réglementaires issues des engagements du Grenelle de l'environnement (2007) reposent sur la réglementation thermique RT 2012 qui s'applique depuis le 1er janvier 2013 à toutes les constructions neuves (sauf quelques cas particuliers). Le ministère chargé de l'environnement affiche l'objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments en suscitant une évolution technologique pour les filières du bâti et des équipements et une qualité énergétique du bâti. La RT 2012 se fonde sur des exigences de résultats pour la performance énergétique du bâtiment et sur quelques exigences de moyens

² L'association Ekopolis a pour objet d'encourager le développement durable dans les champs de l'aménagement et de la construction, notamment du renouvellement urbain et de la réhabilitation, et de mobiliser les acteurs concernés de la région Ile-de-France dans cette optique. Ekopolis est une association francilienne soutenue par l'ADEME, les CAUE (conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement), l'Ordre des architectes, les services de l'Etat et ses adhérents.

(perméabilité à l'air attestée, traitement des ponts thermiques, recours aux énergies renouvelables, surface minimale de baies vitrées, etc.).

La loi sur l'évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (loi ELAN) introduit, à son article 181, des dispositions en faveur de la préservation et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur comme un objectif que la réglementation des constructions neuves. L'article 182 de la loi ELAN introduit également l'obligation de création, pour tout logement, d'un carnet numérique d'information, de suivi et d'entretien. Ce carnet devra notamment permettre de connaître l'état du logement et du bâtiment, lorsque le logement est soumis au statut de la copropriété, ainsi que le fonctionnement de leurs équipements et d'accompagner l'amélioration progressive de leur performance environnementale.

Au niveau de la ventilation, le cadre réglementaire dans les bâtiments a évolué depuis le début du 20^{ème} siècle, notamment avec la prise de conscience de l'importance d'une bonne ventilation pour ne pas nuire à la santé des occupants et assurer la pérennité du bâti, avec des textes définissant des prescriptions spécifiques datant des années 1980. Les sujets énergétiques ont également modifié l'orientation des textes en voulant limiter les pertes thermiques par renouvellement d'air. Des réglementations successives sont venues renforcer le niveau d'exigence. Des réglementations différentes s'appliquent aux logements, aux locaux de travail et aux établissements recevant du public. D'une manière générale, ces réglementations mettent l'accent sur le renouvellement de l'air en considérant un air extérieur « neuf » et propre.

- **Caractéristiques du parc de bâtiments français**

En 2013, les logements représentaient une part importante du parc des bâtiments avec 73% des 3,5 milliards de mètres carrés du parc de bâtiments résidentiels et tertiaires. En moyenne, le parc de bâtiments tertiaires croît chaque année de moins de 1% en volume. Le parc de logements croît également lentement. A titre d'exemple, en 2013 plus de 82% des mètres carrés de logements datent d'avant 1999. Entre 1999 et 2013, la surface de logements a par conséquent augmenté à raison de 1,3% par an en moyenne. Ainsi, le faible taux de construction induit que le parc de bâtiment en France est relativement ancien et se renouvelle lentement.

Concernant la ventilation, les constats réalisés par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) et lors des contrôles d'application du règlement de la construction révèlent de nombreuses non-conformités, y compris dans les bâtiments récents. Ces non-conformités se traduisent par des dysfonctionnements des systèmes avec des débits de renouvellement d'air parfois très inférieurs (ou très supérieurs) au niveau réglementaire attendu. Si l'on ajoute à ces éléments les travaux réalisés par les occupants de bâtiment eux-mêmes et l'incidence des pratiques de maintenance, il est très aléatoire de chercher à caractériser un bâtiment à partir de quelques éléments simples tels que le type d'occupation et sa date de construction.

La présence de systèmes de ventilation dans le parc de logements est principalement liée aux réglementations relatives à l'aération et à la ventilation depuis 1958. Il convient de ne pas perdre de vue que ces réglementations ne couvrent que l'habitat neuf. Des systèmes de ventilation sont également présents dans des bâtiments anciens pour lesquels ces systèmes n'étaient pas demandés par la réglementation antérieure (OQAI, 2009). Près de 12% (9,3 % individuel et 2,5 % collectif) des logements construits après 1990 ne disposent d'aucun système de ventilation ou sont ventilés par ventilation partielle (moteurs de ventilateurs dans quelques pièces), et ne sont pas conformes à la réglementation. Ce constat peut aussi être fait sur les classes 1975-1981 et 1982-1989 : près de 18 % des logements construits dans ces deux périodes sont dans la même situation ne respectant pas le principe de la ventilation générale et permanente (15,8 % individuel et 2,2 % collectif) (OQAI, 2009).

Concernant les bâtiments récents, les données de l'Observatoire de la RT2012 (<http://observatoire.rt-2012.com/>) portant sur plus de 30 000 études font état d'une large prédominance de systèmes de ventilation mécanique (VMC) simple-flux avec donc des entrées d'air réparties sur les façades, contre seulement 17,8% de VMC double-flux³.

- **Réglementation et politique publique en matière d'urbanisme**

L'urbanisme constitue l'ensemble des règles et les outils de l'aménagement du territoire, par lesquels sont dessinés les espaces, les volumes, les infrastructures, les flux de personnes, les lieux de vie etc. d'un territoire. La conception des espaces à aménager induit ainsi des projets d'infrastructures et de construction sur les territoires qui peuvent concentrer ou disperser des sources d'émissions de polluants atmosphériques. Les enjeux entre « densification » urbaine et « concentration des sources de pollution » sont régulièrement en interaction dans les projets d'urbanisme. La lutte contre l'étalement urbain, confrontée à des objectifs d'économie des sols, de préservation des espaces naturels et agricoles ou de compacité des formes urbaines à laquelle les documents de planification conduisent, et donc l'obligation de « densifier » l'habitat par exemple, peut conduire à accentuer des expositions aux polluants atmosphériques sur des secteurs urbains du fait de la concentration de sources, et contribuer ainsi aux transferts de l'air extérieur à l'intérieur d'établissements de proximité (habitat, secteur tertiaire). La pollution de l'air extérieur peut devenir dès lors particulièrement contributrice à la pollution de l'air intérieur. Aussi des conditions d'occupation des sols et l'aménagement de l'espace de façon à les rendre conformes aux objectifs d'aménagement des collectivités publiques peuvent être fixées au niveau de l'urbanisme dit de planification⁴ ou de l'urbanisme opérationnel⁵.

La loi n°2015-992 concernant la transition énergétique⁶ vient renforcer la prise en compte de la qualité de l'air dans les documents d'urbanisme et les plans de déplacement urbains et particulièrement dans les Plans de Déplacements Urbains (PDU) et Plans Locaux d'Urbanisme (PLU ou PLUi).

Les outils de planification dont certains intègrent indirectement la qualité de l'air sont représentés dans la figure 2.

³ VMC double flux comporte un réseau d'extraction de l'air comme le système de VMC simple flux et un réseau destiné à l'insufflation d'air.

⁴ le schéma de cohérence territoriale ou SCOT ; le plan local d'urbanisme ou PLU ; le Programme local de l'habitat ou PLH ; le Plan de déplacements urbains ou PDU ; la carte communale ; le règlement national d'urbanisme ; la règle de constructibilité limitée.

⁵ le permis de construire ; le permis de lotir ; le permis d'aménager ; le permis de démolir.

⁶ Loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV).

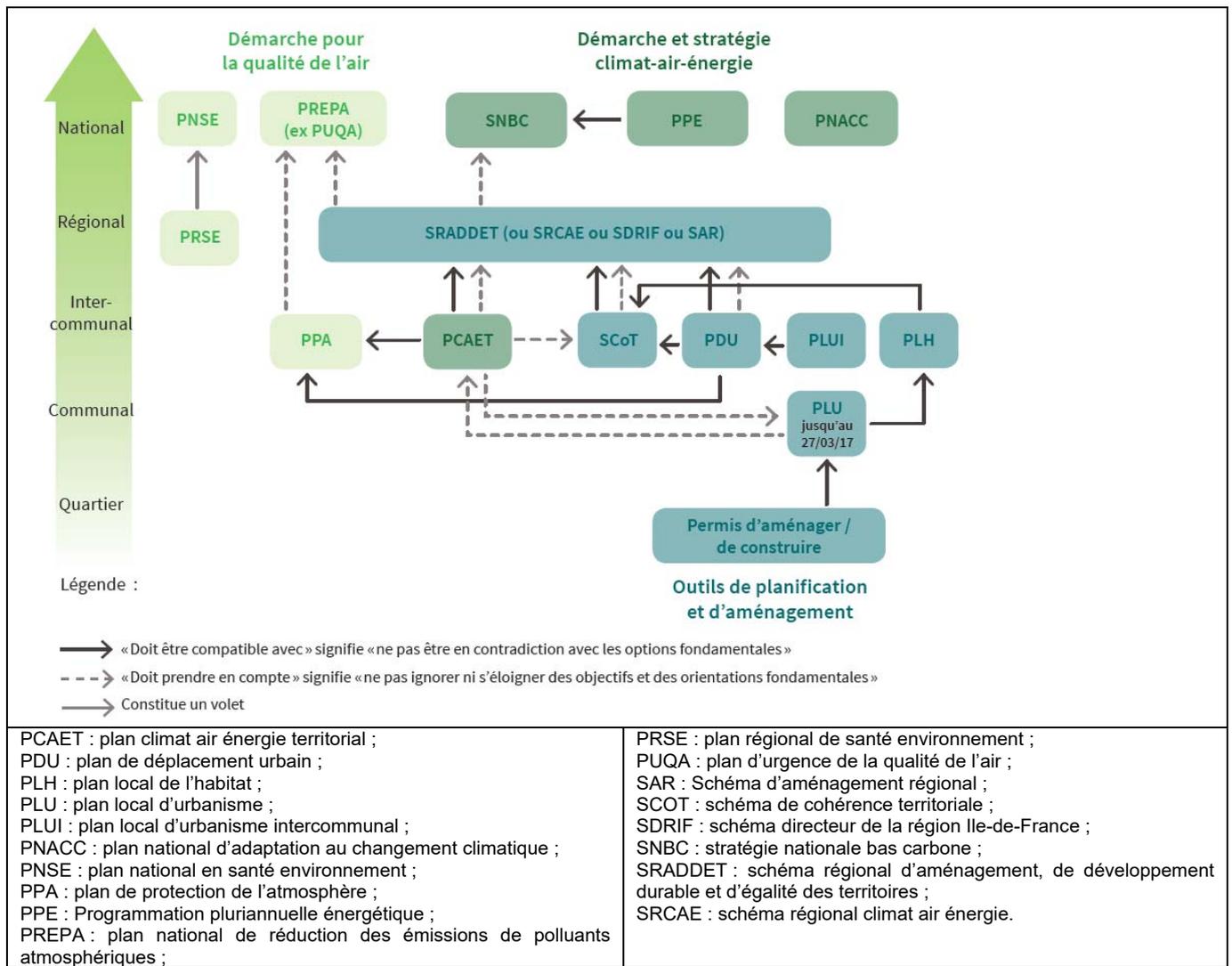


Figure 2 : Articulation entre le PCAET et les outils de planification et les documents d'urbanisme réglementaires (source : Ademe)

2) Analyse des connaissances sur le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur

L'étude des transferts de polluants de l'air extérieur à l'intérieur des bâtiments suppose de considérer que ces polluants proviennent exclusivement du compartiment extérieur, ou à défaut de ne considérer que la part de concentration intérieure dont l'origine est extérieure. Cette analyse s'avère difficile. En effet, une partie des polluants réglementés dans l'air extérieur peuvent également être directement émis par des sources internes au bâtiment : matériaux, équipements, activités humaines, combustion, etc. Ces émissions sont potentiellement variables dans le temps, souvent difficiles à quantifier précisément, et il n'est dès lors pas aisé d'isoler, pour un polluant donné, la part de concentration intérieure qui résulte des seuls transferts depuis l'extérieur.

Par ailleurs, la remise en suspension de particules déposées à la surface des matériaux, par les mouvements des occupants, peut constituer un déterminant majeur des concentrations intérieures en particules dans les bâtiments à forte densité d'occupation comme les écoles.

Enfin, la plupart des données pertinentes provient d'études nord-américaines. Les caractéristiques de construction et d'utilisation du conditionnement d'air varient entre les différentes régions des Etats-Unis, mais également par rapport à la France. La transposabilité des informations sur le transfert observées outre-Atlantique à la situation en France peut s'avérer hasardeuse, notamment durant l'été où l'utilisation intensive du conditionnement d'air modifie les pratiques d'aération entre les Etats-Unis et la France. Cela souligne d'autant plus la nécessité de produire des données de transfert propres au parc de bâtiments européens et français.

- **Les facteurs influençant le transfert**

Un facteur (ou paramètre) influençant le transfert représente au sens large toute composante (par exemple une composante structurelle du bâtiment, une composante environnementale...) susceptible de favoriser ou réduire le passage de polluants atmosphériques depuis l'extérieur vers l'intérieur de bâtis.

La revue de la littérature conduite dans le cadre de la CRD Anses-CSTB propose une description des facteurs affectant le transfert en distinguant les paramètres extérieurs au bâtiment et ceux associés aux bâtiments. Ces facteurs comprennent :

- A l'extérieur du bâtiment, la distance par rapport aux sources émettrices, l'orientation et les dimensions de l'édifice (hauteur, rapport hauteur-largeur de la voie, etc.), la forme urbaine (bâtiments avec espaces intermédiaires, non contigus), les aménagements à proximité (effets écrans de bâtiments et espaces végétalisés pouvant jouer un rôle de barrière et sur la dispersion des polluants) et les conditions météorologiques (direction et vitesse du vent, température extérieure, etc.) ;
- Les caractéristiques propres du bâtiment notamment le type de construction qui influe sur les caractéristiques de l'enveloppe (infiltrations mais également étanchéité à l'air avec un équilibrage des pressions entre les différentes pièces d'un bâtiment) ou la nature des matériaux de construction et de décoration (adsorption/ désorption ou réactivité de surface) ;
- La présence de systèmes de ventilation, de systèmes de filtration apparait le plus souvent, comme un paramètre crucial puisqu'il définit notamment une localisation de la (des) prise(s) d'air neuf et la présence ou non de filtres au passage de l'air dans le bâtiment où à l'intérieur du bâtiment ainsi que le taux de renouvellement d'air, la différence de pression avec l'extérieur et le transport des contaminants entre les compartiments intérieurs ;
- Le comportement des occupants influe également sur les transferts à travers la fréquence et la durée d'aération par ouverture des ouvrants (fenêtres et portes).

Il convient aussi de souligner que d'autres vecteurs de pénétration des polluants atmosphériques peuvent, en certaines circonstances, se superposer aux transports par les flux d'air échangés entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments. Il s'agit notamment :

- Des transports par les occupants et les animaux, qui se déplacent entre l'intérieur et l'extérieur, ou entre plusieurs bâtiments : poussière collectée sous les chaussures, pollens et autres allergènes adhérant aux vêtements, etc.
- De la diffusion à travers la dalle des bâtiments de polluants initialement contenus dans le sol ou ayant été transférés dans le sol depuis le compartiment atmosphérique.

- **Indicateurs de transfert**

Trois indicateurs permettent de caractériser les transferts de polluants de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments :

Le facteur de pénétration (P)

Le facteur de pénétration (ou efficacité de transfert) décrit le passage d'un agent extérieur à travers l'enveloppe et/ou le réseau de ventilation d'un bâtiment. Il correspond à la fraction de la concentration extérieure non éliminée ou captée au passage d'une voie d'air, et est défini par le rapport entre la concentration au débouché de cette voie d'air ($C_{s,int}$), et la concentration extérieure (C_{ext}).

Le ratio de concentration intérieur / extérieur (I/E)

Le ratio I/E se déduit directement de mesures de concentration réalisées en simultanément à l'intérieur (concentration intérieure C_{int}) et à l'extérieur (concentration extérieure C_{ext}), sur une durée définie qui peut être très variable selon les études. Il caractérise les transferts des polluants au passage de l'enveloppe et du réseau de ventilation, ainsi que tous les phénomènes qui se produisent au sein des ambiances intérieures pour définir au final la concentration C_{int} .

Le facteur d'infiltration (F_{inf})

Le facteur d'infiltration F_{inf} correspond également au rapport entre les concentrations à l'intérieur (C_{int}) et à l'extérieur (C_{ext}) d'un bâtiment, dans le cas où il n'y a pas de source interne des polluants transférés.

Le facteur de pénétration P ou le facteur d'infiltration F_{inf} peuvent être considérés comme étant plus spécifiques que le ratio I/E pour caractériser les transferts dans le sens où ils ciblent spécifiquement le passage des polluants de l'air extérieur à l'air intérieur, mais ces paramètres sont très peu documentés dans les études conduites en France. La majorité des études ont exprimé le transfert uniquement à travers le ratio I/E.

Les divers et nombreux paramètres présentés précédemment, incluant l'extérieur du bâtiment, les caractéristiques propres du bâtiment, la présence de systèmes de ventilation ou de filtration ou encore le comportement des occupants, influencent directement le calcul de ces indicateurs de transfert. La revue de la littérature a permis de mesurer l'étendue des paramètres d'influence et le fait qu'ils sont également inter-dépendants les uns des autres.

- **Phénomènes influençant le transfert des particules et agents biologiques (moisissures et pollens)**

Les données renseignant le transfert de l'air extérieur vers l'air intérieur pour les particules sont nombreuses, mais rares pour ce qui concerne plus spécifiquement la composition physico-chimique ou biologique. L'abattement des concentrations en particules lors de leur transfert de l'extérieur vers l'intérieur résulte en premier lieu des dépôts à la surface des voies d'air de l'enveloppe du bâtiment (fissures correspondant aux défauts d'étanchéité, entrées d'air des systèmes de ventilation mécanique par extraction) puis à la surface des matériaux constitutifs du mobilier et des parois qui délimitent les pièces. Pour le domaine des particules de diamètre inférieur à 10 μm , les dépôts sont maximaux pour les plus grosses particules et les particules ultrafines, et minimaux dans la gamme de diamètre située entre 0,1 et 1,0 μm . La distribution granulométrique de l'aérosol apparaît de fait comme un facteur de variabilité des transferts de particules.

Parallèlement aux dépôts sur les parois, les particules en suspension dans l'air intérieur ont une tendance naturelle à se regrouper pour en former de plus grosses, par des phénomènes dits de coagulation ou de coalescence des particules liquides. Ces phénomènes conduisent à une variation temporelle de la distribution granulométrique de l'aérosol en faveur des plus grandes tailles de particules.

Les particules et les substances en phase particulaire se caractérisent par des valeurs d'indicateur de transfert qui varient dans une large gamme et sont très variables selon les situations (types de bâtiments par exemple). Les plus petites particules affichent en général un facteur de pénétration P inférieur à 1, et un facteur d'infiltration F_{inf} encore plus faible du fait des dépôts sur les surfaces internes. A l'opposé, le ratio I/E pour les particules de diamètre supérieur à $2,5 \mu\text{m}$ est souvent supérieur à 1 compte tenu des émissions internes et/ou de la remise en suspension de particules déposées qui peut être très importante dans les environnements intérieurs comme les écoles où la densité d'occupation est forte.

Vis-à-vis des transferts, les moisissures et les pollens s'apparentent à des particules inertes de même taille (1 à $30 \mu\text{m}$ pour les spores fongiques, 5 à $250 \mu\text{m}$ pour les pollens), à la nuance près que leurs propriétés électrostatiques peuvent se traduire par des vitesses de dépôt sur les surfaces plus élevées (pouvoir d'adhésion plus important). Il est également nécessaire de différencier le comportement des moisissures et des pollens. Les moisissures une fois adhérentes aux surfaces sont susceptibles de s'y développer si les conditions hydriques et la présence de nutriments sont optimales, si bien que l'enveloppe du bâtiment comme les surfaces intérieures jouent le rôle de sources secondaires de spores de moisissures. Les pollens, une fois pénétrés dans le bâtiment tendent à se déposer rapidement sur les surfaces. Mais, l'occupation et les mouvements d'air peuvent les remettre en suspension. Dans les deux cas, cela conduit à un effet de rémanence qui impacte directement l'exposition des occupants.

- **Phénomènes influençant le transfert de composés gazeux inorganiques (ozone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre)**

Les phénomènes d'absorption ou d'adsorption des composés gazeux inorganiques avec les matériaux, au cours de leur passage à travers l'enveloppe du bâtiment ou à l'intérieur même des pièces, sont eux aussi couramment assimilés à des dépôts. Ces derniers peuvent ainsi contribuer à abaisser les concentrations intérieures des polluants par rapport à leur niveau extérieur. Dans les faits, les phénomènes mis en jeu sont le plus souvent des réactions chimiques de surface. A l'instar de ce qui se produit dans l'atmosphère, les polluants inorganiques réagissent également chimiquement entre eux, avec des radicaux libres ou avec des composés organiques, dans l'air intérieur. Selon l'implication des polluants transférés comme réactifs ou comme produits de réaction, cette réactivité homogène (deux phases identiques) ou hétérogène (deux phases distinctes) contribue à diminuer ou, au contraire, augmenter leur concentration à l'intérieur des bâtiments.

Les données disponibles sont rares, mais elles indiquent que le facteur de pénétration P est inférieur à 1 et que le facteur d'infiltration F_{inf} serait inférieur à P du fait des interactions avec les surfaces décrites ci-dessus ($F_{inf} < P < 1$).

- **Phénomènes influençant le transfert de composés organiques volatils (COV) et semi-volatils (COSV)**

Lors de leur transfert dans les bâtiments, les composés organiques volatils interagissent avec les matériaux par des processus de sorption qui sont dans la grande majorité des cas de type

physique, c'est-à-dire réversibles (adsorption / désorption). Si les concentrations dans l'air sont invariantes dans le temps, il s'instaure un équilibre de sorption entre les surfaces solides et la phase aérienne, qui se traduit par l'absence de flux dans un sens ou dans l'autre (de l'air vers la surface ou vice-versa). Si les concentrations fluctuent dans le temps, les phénomènes d'adsorption / désorption induits par les surfaces confèrent au bâtiment une inertie qui se manifeste par une moindre amplitude des variations de concentration à l'intérieur qu'à l'extérieur, ainsi qu'un possible déphasage temporel des pics de concentrations. Dans les deux cas, sur des périodes longues, les interactions avec les matériaux n'impactent donc pas de manière importante les transferts de polluants de l'extérieur vers l'intérieur.

A titre d'exemple pour le benzène, pour lequel peu de données sont disponibles, sa faible réactivité laisse supposer que le facteur de pénétration P est proche du facteur d'infiltration F_{inf} et voisin de 1 ($P \sim F_{inf} \sim 1$). Cette hypothèse reste néanmoins à vérifier. Le ratio I/E en absence de sources connues reste légèrement supérieur à 1, autour de 1,2 en tendance centrale.

Les COSV présents dans la phase particulaire sont, pour leur part, sujets aux phénomènes de dépôt auxquels sont soumises les particules qui les portent. Dans le cas spécifique des COSV, les différences de température entre l'extérieur et l'intérieur peuvent occasionner une modification du partitionnement entre les phases gazeuse et particulaire. Les changements de phase des polluants, lorsqu'ils pénètrent dans les environnements intérieurs, peuvent donc impacter leurs transferts si ceux-ci sont caractérisés à partir des mesures de concentration dans une seule phase.

3) Enseignements de l'analyse des données et difficultés rencontrées

Le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur dépend de divers phénomènes et mécanismes détaillés dans la littérature scientifique. Les résultats issus de campagnes de mesure, d'études expérimentales ou de simulation mettent en évidence que les facteurs influençant le transfert dépendent de la situation et du polluant étudiés.

Par conséquent, les données bibliographiques disponibles font ressortir l'importance d'analyser les situations de transfert de polluants au cas par cas. Elles ne permettent pas de mettre en exergue de façon générale les facteurs de transfert ni les polluants les plus contributeurs à la dégradation de la qualité de l'air intérieur pour lesquels des recommandations fondées exclusivement sur un corpus scientifique et technique pourraient être formulées. De plus, il est également ressorti de l'examen effectué que le sens d'influence (favorable ou défavorable) d'un paramètre donné était fortement dépendant d'autres facteurs et pouvait s'inverser d'une situation à une autre. Aussi, il n'est pas apparu faisable, sur la base des connaissances actuelles, d'isoler et de hiérarchiser de manière scientifique le degré d'influence de chaque paramètre associé à tel polluant, à telle caractéristique du bâtiment ou encore à telle situation d'implantation d'un bâtiment.

Compte tenu de ce constat posé à l'issue de l'analyse bibliographique réalisée sur la thématique, les experts rapporteurs ont proposé d'appréhender la thématique du transfert de la pollution atmosphérique extérieure à l'intérieur des bâtiments par une approche plus globale que l'étude des seuls phénomènes de transfert. Après avoir acté cette évolution, tant sur la méthodologie que sur les types de résultats atteignables, avec les commanditaires lors de la réunion de présentation intermédiaire des travaux, l'expertise a été poursuivie par les experts rapporteurs en intégrant le cadre d'aménagements urbains, d'implantation d'infrastructures, de construction ou de réhabilitation de bâtiments, ou encore l'occupation même des bâtiments.

C'est dans ce cadre qu'ont été identifiées des pistes d'actions pour limiter le transfert à partir de retours d'expérience recueillis à l'occasion des auditions, mais également sur la base d'exemples ou de projets initiés par des collectivités, des bailleurs sociaux, etc., de projets de recherche en cours ou à venir, ou encore de guides de bonnes pratiques, des stratégies proposées par le rapport TN 58 de l'Air Infiltration and Ventilation Center⁷.

III. Conclusions du CES

Considérant les données collectées et analysées dans le cadre de ces travaux d'expertise, le CES retient que :

Données de la littérature sur le transfert de l'air extérieur dans les environnements intérieurs

- Les études sur le transfert, y compris celles conduites en France, attestent et soulignent la contribution de la pollution de l'air extérieur à la dégradation de la qualité de l'air intérieur ;
- En France, de nombreuses études ont exprimé le transfert à travers le ratio entre les concentrations intérieure et extérieure (ratio I/E). Ce dernier intègre les transferts proprement dits, c'est-à-dire le passage des polluants de l'extérieur à l'intérieur, mais aussi la contribution des phénomènes physico-chimiques qui se produisent à l'intérieur du bâtiment et impactent les concentrations en polluants : émissions des matériaux, dépôts sur les surfaces, remise en suspension, réactivité chimique, etc. Il est, à ce titre, moins spécifique que les deux autres facteurs (P et Finf), notamment le facteur de pénétration P qui renseigne précisément sur le phénomène de transfert à travers l'enveloppe du bâtiment et/ou son système de ventilation ;
- Les fortes variabilités de valeurs du *ratio* I/E pour les différents polluants étudiés, et le fait que ces *ratios* puissent être supérieurs à 1 pour certains polluants, indiquent que les transferts sont au moins autant influencés par les phénomènes auxquels sont soumis les polluants une fois qu'ils ont pénétré dans les bâtiments (émissions internes, réactivité, remise en suspension) que par les phénomènes qui conduisent à l'abattement de leurs concentrations au passage de l'enveloppe du bâtiment et/ou du système de ventilation.

Caractéristiques du parc de bâtiments français et réglementation

- Le parc de bâtiments en France incluant notamment les logements, les espaces recevant du public et les locaux du secteur tertiaire, est relativement ancien en raison du faible taux de construction. Il se renouvelle donc lentement. Un tiers des logements existants est équipé système de ventilation mécanique contrôlée (VMC) et à l'opposé, un cinquième des logements ne dispose d'aucun dispositif de ventilation particulier. Par ailleurs, des taux élevés de non-conformités par rapport aux prescriptions de ventilation demandées par le règlement de la construction et des dysfonctionnements récurrents conduisant dans la majorité des cas à de la sous ventilation ont été observés même dans les logements neufs. Ces derniers doivent, en principe, être équipés de ventilation générale et permanente ;
- A ce jour, la réglementation tant pour la construction que pour l'urbanisme n'intègre pas explicitement la question de la qualité de l'air intérieur et notamment celle du transfert de la pollution de l'air extérieur dans les environnements intérieurs. En fixant des critères d'étanchéité à l'air de l'enveloppe des bâtiments, la réglementation thermique est indirectement susceptible de jouer un rôle positif dans la réduction des transferts à condition que la ventilation soit correctement dimensionnée, installée et maintenue. En revanche, jusqu'à la

⁷ Sherman M.H., Matson N.E., 2003. TN 58: Reducing indoor residential exposures to outdoor pollutants. AIVC Technical Note 58, 2003, 36 pp

récente loi 2018-1021 (loi ELAN), la préservation et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur n'étaient pas explicitement mentionnées comme un objectif à atteindre dans la réglementation des constructions neuves. En attendant d'autres dispositions, la réglementation sur la ventilation vise actuellement à renouveler l'air intérieur et à évacuer des émanations.

Paramètres influençant le transfert de la pollution de l'air extérieur dans les environnements intérieurs

- L'analyse de la littérature souligne la complexité et la multiplicité des paramètres qui interviennent et influent de manière positive ou négative sur le transfert de polluants issus de l'air extérieur dans les environnements intérieurs. Par ailleurs, les données disponibles ne permettent pas d'isoler et de caractériser précisément le degré d'influence de chaque paramètre associé à tel polluant ou à telle caractéristique du bâtiment. Seules des hypothèses et orientations générales peuvent être énoncées ;
- Des tendances se dégagent par famille de polluants :
 - Pour les particules, en l'absence de filtres dans le système mécanique de ventilation, le transfert dépend en premier lieu de la distribution granulométrique de l'aérosol. En effet, celui-ci est fortement conditionné par les dépôts à la surface des voies d'air de l'enveloppe du bâtiment (fissures correspondant aux défauts d'étanchéité, entrées d'air des systèmes de ventilation mécanique par extraction) et à la surface des matériaux constitutifs du mobilier et des murs. Les vitesses de dépôts varient en fonction de la taille des particules et sont minimales entre 0,1 et 1,0 μm ;
 - Les moisissures et les pollens sont soumis aux mêmes phénomènes que les particules inertes (3 à 20 μm pour les spores fongiques, 10 à 100 μm pour les pollens), à la nuance près que leurs propriétés d'adhésion peuvent se traduire par des vitesses de dépôt sur les surfaces plus élevées ;
 - Pour les substances inorganiques, le transfert dépend en premier lieu de la réactivité chimique de surface avec les matériaux au cours de leur passage à travers l'enveloppe du bâtiment ou à l'intérieur même des pièces. Ce phénomène contribue à faire diminuer ou augmenter leur concentration à l'intérieur des bâtiments selon que le polluant est le réactif dans l'air et sur les surfaces, ou le produit de réaction dans l'air ;
 - Pour les composés organiques volatils (COV), le transfert est affecté par les processus d'adsorption et de désorption avec la surface des matériaux. Ces phénomènes ont un effet double : atténuer les variations de concentrations intérieures en polluants, et retarder légèrement les pics de concentration intérieure qui résultent des variations de concentrations extérieures ou des émissions par les sources. Les composés organiques semi volatils (COSV) présents dans la phase particulaire sont pour leurs parts sujets à des dépôts sur les matériaux qui tendent à abaisser leur concentration intérieure par rapport à l'extérieur. Pour ces polluants, les différences de température entre l'extérieur et l'intérieur peuvent également occasionner une modification du partitionnement entre les phases gazeuse et particulaire.
- Les paramètres influençant le transfert de la pollution de l'air extérieur dans les environnements intérieurs comprennent les facteurs suivants :
 - A l'extérieur du bâtiment, le transfert dépend de la distance par rapport aux sources émettrices, de l'orientation et des dimensions de l'édifice (hauteur, rapport hauteur-largeur de la voie, etc.), de la forme urbaine (bâtiments avec espaces intermédiaires, non contigus), des aménagements à proximité (configuration des bâtiments

environnants et des espaces végétalisés) et des conditions météorologiques (direction et vitesse du vent, température extérieure, etc.) ;

- Les caractéristiques propres du bâtiment notamment la position des prises d'air neuf à l'extérieur, le type de construction qui influe sur les caractéristiques de l'enveloppe et notamment les infiltrations à travers les défauts d'étanchéité des bâtiments, les matériaux de construction et de décoration (adsorption/ désorption ou réactivité de surface) ;
 - Le type de ventilation ou de climatisation apparaît comme un paramètre crucial puisqu'il définit notamment une localisation de la (des) prise(s) d'air neuf et la présence ou non de filtres au passage de l'air dans le bâtiment où à l'intérieur du bâtiment (unités de climatisation). La qualité de la maintenance de ces installations complexes peut également influencer sur le transfert ;
 - Le comportement des occupants influe également sur les transferts à travers la fréquence et la durée d'aération par ouverture des ouvrants (fenêtres et portes).
- D'autres paramètres que ceux associés au transfert de la pollution de l'air extérieur concourent à la présence des polluants dans les environnements intérieurs et complexifient fréquemment l'interprétation des études. Ils incluent les sources internes (émissions propres des matériaux de construction et de décoration, du mobilier, des produits de consommation, combustion notamment liée à la cuisine, à l'utilisation d'encens, au tabagisme, etc.), le transport de polluants par les personnes, la pollution des sols, etc.

Le périmètre de l'expertise incluait le territoire métropolitain mais également les territoires ultramarins. Aucune donnée n'a été recensée sur la question des transferts de la pollution de l'air extérieur dans les environnements intérieurs dans les territoires ultramarins. Par ailleurs, il est difficile de transposer *stricto sensu* les constats et les recommandations formulées étant donné que ces territoires peuvent présenter des spécificités tant en termes de climat et de pollution de l'air extérieur avec des sources naturelles telles que les brumes de sable et des poussières volcaniques ou des différences concernant les implantations, les formes d'aménagement, le type de construction et l'usage des bâtiments.

IV. Recommandations du CES

L'analyse conduite permet d'envisager des leviers d'actions afin d'encourager la mobilisation des acteurs en vue d'améliorer la qualité de l'air intérieur. Une attention particulière a été portée au fait que ces recommandations puissent se concilier avec celles proposées actuellement sur la qualité de l'air intérieur notamment au regard de la ventilation et de l'aération.

Les recommandations s'articulent suivant différents thèmes, présentés par ordre de priorité d'action. Elles sont fléchées vers les acteurs qui apparaissent les plus pertinents pour les mettre en œuvre.

Il est à noter que le rapport d'expertise rédigé avec l'appui d'experts rapporteurs présente un champ plus large de préconisations avec une description d'autres actions à conduire et l'illustration par des initiatives recueillies lors de ces travaux. Le CES Air a retenu la majorité de celles-ci à l'exception de quelques-unes et ce pour deux raisons. D'une part, les orientations en termes d'outils règlementaires pour la planification territoriale en faveur de la qualité de l'air et pour l'urbanisme dépassent les compétences du CES Air nommé par l'Anses. Ainsi, seules des recommandations d'orientation générale des politiques publiques sont proposées ci-après. D'autre part, le CES Air a souhaité limiter ses recommandations au phénomène de transfert dans les environnements intérieurs conformément au périmètre de la demande.

Le CES Air souligne que les recommandations formulées sont cohérentes et convergentes avec celles publiées en 2016 dans le cadre de l'expertise de l'Anses relative aux moisissures dans le bâti⁸.

Enfin, les préconisations présentées ci-dessous sont issues des deux phases de l'expertise décrites précédemment. Elles s'appuient sur des fondements distincts.

D'une part, les « recommandations » découlent directement de l'analyse de la littérature scientifique ou s'inscrivent dans la continuité de travaux antérieurs de l'Anses sur la qualité de l'air.

D'autre part, les « pistes d'actions » s'appuient principalement sur les auditions, l'analyse d'expériences conduites sur le territoire national, la réglementation et les guides existants et enfin les dires d'experts. Compte tenu de la durée de l'expertise et de la méthode retenue, il n'a pas été conduit d'analyse d'impact ou d'efficacité. Pour autant, celles-ci sont apparues tout à fait légitimes et peuvent davantage s'entendre comme des outils pour mettre en œuvre les principes issus des recommandations.

Celles-ci sont identifiées par les acronymes (R) pour recommandation et (PA) pour piste d'action dans ce qui suit.

Considérant les résultats de l'expertise, le CES émet les préconisations suivantes :

1) Actions sur la source de pollution de l'air extérieur

A l'attention des pouvoirs publics

- Veiller d'une part à la mise en œuvre des réglementations existantes sur la qualité de l'air ambiant et d'autre part poursuivre et intensifier le déploiement de toute action visant à réduire les émissions de polluants dans l'air, issues du trafic, de l'industrie, du chauffage, de l'agriculture, etc ; (R)
- Introduire explicitement la prise en compte des transferts de la pollution de l'air extérieur dans les environnements intérieurs au sein des outils règlementaires pour la planification territoriale en faveur de la qualité de l'air. (R)

2) Action sur l'urbanisme et la planification territoriale

A l'attention des pouvoirs publics

- Inscrire les risques sanitaires liés à l'environnement, en particulier la question de la pollution de l'air ambiant et de son transfert dans le bâti, dans les documents d'urbanisme (R), et ce :
 - de manière réglementaire : à l'échelle d'un grand territoire ou bassin de vie, *via* le Schéma de cohérence territoriale (SCOT) (planification) ; à l'échelle d'un projet urbain, *via* le plan local d'urbanisme (PLU) et/ou le PLU intercommunal (PLUi) (planification) ; à l'échelle d'un secteur en amont des opérations d'aménagement, *via* la procédure de zone d'aménagement concerté (ZAC) (urbanisme opérationnel) ; à l'échelle d'une parcelle (urbanisme opérationnel) (PA) ;
 - de manière globale et coordonnée : par exemple, en considérant une approche incluant les enjeux d'émissions et d'exposition à la pollution de l'air (extérieur et intérieur) dans les différents documents de planification et de procédures d'aménagement (ATMO Grand Est, 2015) (PA) ;

⁸ <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0016Ra.pdf>

- de manière volontaire : par exemple à travers 3 démarches illustrant les pratiques françaises visant à améliorer les politiques publiques dans le champ de l'urbanisme, à savoir l'évaluation environnementale stratégique (EES), l'évaluation d'impact sur la santé (EIS) et l'approche environnementale de l'urbanisme (AEU2) (HCSP, 2018) (PA).
- Encourager le développement d'outils cartographiques permettant d'orienter le développement de l'urbanisme en intégrant le diagnostic de la qualité de l'air dans les documents de planification. Cette initiative concerne toutes les agglomérations d'intérêt en fonction de leurs connaissances locales sur la pollution de l'air extérieur. A ce titre, les Cartes Stratégiques Air (CSA)⁹ constituent une opportunité intéressante, sous réserve d'une méthodologie d'élaboration validée et homogène au niveau du territoire. Ces cartes proposent actuellement d'agrèger, avec un historique de 5 ans, les concentrations de NO₂ et de PM₁₀. Elles devraient inclure systématiquement celles de PM_{2.5} (R).

A l'attention de tous les acteurs concernés par les projets d'aménagement, d'urbanisme et de construction :

- Accroître la dispersion atmosphérique des polluants par l'intermédiaire des formes urbaines et donc réduire leur accumulation et les transferts dans les bâtiments (R).
 - ✓ En plaçant des obstacles verticaux (occlusivité) pour empêcher des flux d'air pollué, et faire barrage aux sources d'émissions comme par exemple le long des axes routiers (PA) ;
 - ✓ En plaçant des obstacles horizontaux (rugosité), formant des barrages ou des couloirs de flux d'air, selon les hauteurs des obstacles (PA) ;
 - ✓ En considérant les proportions entre l'écartement des établissements et leur hauteur, par exemple à l'aide d'outils de modélisation de flux (PA) ;
- Recourir à la modélisation de la qualité de l'air pour la planification en complément de celle du bruit, de la chaleur urbaine et des formes urbaines (approche intégrée) (R).

3) Action sur l'hygiène et la salubrité publique

A l'attention des pouvoirs publics :

- Faire évoluer la réglementation à différents niveaux : national, régional et départemental comme par exemple le règlement sanitaire départemental (RSD) type ou par département en incluant la question des risques sanitaires en lien avec l'air (PA) ;
- S'assurer de l'harmonisation entre les RSD et de la cohérence entre le RSD type et les PLU au regard des risques sanitaires en lien avec l'air (PA).

4) Action pour la construction et l'usage des bâtiments

A l'attention des pouvoirs publics :

- Intégrer la problématique du transfert des polluants de l'air extérieur dans les environnements intérieurs dans le cadre de la transposition en droit français de la Directive européenne 2018/844/UE relative à la performance énergétique des bâtiments et au niveau national dans les textes d'application de la loi sur l'évolution du logement, de l'aménagement et du

⁹ Carte Stratégique Air – Guide méthodologique d'élaboration, Atmo France, mai 2015.

numérique (ELAN) et de la loi pour un Etat au service d'une société de confiance (ESSOC) (R) ;

- Etendre les exigences réglementaires applicables aux bâtiments résidentiels, en matière d'étanchéité à l'air de l'enveloppe, aux bâtiments à usage autre que l'habitation et imposer leur mesure à la réception (R) ;
- Poursuivre la mise en place de la filtration de l'air par un système mécanique de ventilation, en tenant compte de la qualité de l'air extérieur dans les prescriptions réglementaires relatives à l'aération/ventilation des constructions neuves et l'étendre aux bâtiments existants. Il s'agit de cibler en priorité les bâtiments les plus exposés à la pollution de l'air extérieur, en termes de nature et de niveaux d'exposition aux polluants. Par analogie, l'arrêté de 1982 modifié¹⁰ exige le fonctionnement permanent du système de ventilation tout au long de l'année pour les logements les plus exposés au bruit, considérant l'ouverture limitée des fenêtres dans ces zones. Lorsqu'ils existent, les outils cartographiques de diagnostic de la qualité de l'air cités précédemment (cf. point 2) pourraient servir de référence afin d'identifier les zones prioritaires (PA).

A l'attention des concepteurs :

- Prendre en compte le transfert de la pollution de l'air extérieur au même titre que les autres facteurs (acoustique, luminosité, etc.) pour la conception de constructions neuves ou la réhabilitation des bâtiments, au besoin en recourant à la modélisation de la qualité de l'air intérieur (R) ;
- Privilégier si possible la localisation de pièces de services (cuisines, sanitaires) sur les façades exposées aux nuisances (acoustiques et pollution de l'air extérieur) dans les rénovations lourdes qui impliquent une redistribution des locaux et pour des constructions neuves (PA).

A l'attention des propriétaires et des exploitants :

- Veiller à ce que les investissements dans la rénovation des bâtiments ne se limitent pas à la rénovation énergétique celle-ci devant être couplée entre autres à la mise en place d'une ventilation adéquate pour une amélioration globale du bâti intégrant la qualité de l'air intérieur (PA).

A l'attention des pouvoirs publics, concepteurs, entrepreneurs, exploitants :

- S'assurer du respect de la réglementation et des règles de l'art des systèmes de ventilation, en demandant des contrôles de bon fonctionnement à leur livraison (PA) ;
- Renforcer les exigences d'entretien et de maintenance des systèmes de ventilation (PA).

¹⁰

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000862344&fastPos=3&fastReqId=1020794859&categorieLien=cid&oldAction=rechTexte>

5) Actions pour les usagers

A l'attention des pouvoirs publics (PA) :

- Sensibiliser les usagers sur la question du transfert de la pollution de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments en l'introduisant dans les recommandations actuelles sur la qualité de l'air intérieur notamment au regard de la ventilation et de l'aération.

A l'attention des occupants et/ou propriétaires (PA) :

- Entretien et maintenir le système de ventilation ;
- Aérer les locaux conformément aux recommandations actuelles¹¹ ;
- Adapter les pratiques d'aération dans les bâtiments à proximité de sources de pollution (adapter les horaires, privilégier l'ouverture des fenêtres sur cour, etc.).

6) Acquisition de connaissances (R)

- Evaluer les méthodes de mesure en temps réel permettant d'appréhender la dynamique du transfert sur un pas de temps court (par exemple des analyseurs en lignes, micro-capteurs, etc.) ainsi que leur condition d'application ;
- Favoriser la réalisation d'études spécifiques sur la problématique des transferts par exemple à travers le financement d'appels à projets, et ce afin de :
 - Déterminer l'influence sur le transfert de paramètres en lien d'une part avec l'intérieur des bâtiments, tels que le volume, la surface des revêtements, la fréquence d'aération, le chauffage, la ventilation et la climatisation, etc., et d'autre part avec les aménagements urbains tels que les écrans végétalisés. La question des territoires ultramarins constitue une thématique de recherche spécifique ;
 - Evaluer les bénéfices des matériaux de revêtement intérieur présentant un fort pouvoir de décomposition de l'ozone et des oxydes d'azote au regard du risque par exemple de formation de composés réactifs secondaires ou bien de constitution d'un réservoir d'allergènes (si revêtement textile) ;
 - Synthétiser et développer les connaissances sur les effets des matériaux de revêtement dépolluants d'usage extérieur (enduits ou peintures de façade, revêtements routiers) en termes de capacité à réduire la pollution au voisinage des bâtiments et de risques de production de composés réactifs secondaires.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions, recommandations et pistes d'action du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ».

L'expertise des données de la littérature scientifique n'a pas permis pas de dégager une hiérarchisation des facteurs de transfert ou des polluants atmosphériques les plus contributeurs à la dégradation de la qualité de l'air intérieur du fait de transferts de polluants issus de l'air ambiant.

¹¹ Cf chapitre 5.5 « Actions pour les usagers » du rapport d'expertise Anses

Les exemples du terrain mettent en évidence l'importance d'analyser les données liées à l'environnement externe et aux facteurs propres au bâti à l'échelle locale et la nécessité d'une action coordonnée sur l'urbanisme, la construction ou la réhabilitation mais également sur les règles d'occupation des logements afin de limiter les conséquences possibles sur la santé associées à des transferts de polluants de l'air ambiant vers l'intérieur des bâtiments.

Les recommandations formulées répondent à une démarche structurante et ordonnant les actions à entreprendre, en premier lieu sur la source de pollution de l'air extérieur ; puis sur l'urbanisme et la planification territoriale ; sur l'hygiène et la salubrité publique ; pour la construction et l'usage des bâtiments et au final pour les usagers. Compte tenu des éléments collectés et analysés dans le cadre de cette expertise, il apparaît que l'approche de la problématique du transfert des polluants atmosphériques extérieurs vers l'intérieur des bâtiments doit être large et intégrative plutôt que de ne considérer que certains paramètres isolément.

Concernant plus spécifiquement la question de l'urbanisme et de la planification territoriale, l'Anses suggère un renforcement du rôle des agences régionales de santé (ARS) dès l'élaboration des documents de planification jusqu'à l'émission d'avis sanitaires prescriptifs ou informatifs.

Par ailleurs, l'Agence souligne l'intérêt des outils cartographiques permettant d'identifier les zones à enjeux air/urbanisme, et ainsi d'orienter le développement de l'urbanisme en intégrant le diagnostic de la qualité de l'air dans les documents de planification. Les Cartes Stratégiques Air (CSA) ou cartes équivalentes constituent une opportunité intéressante, sous réserve d'une méthodologie validée et homogène au niveau du territoire et élaborée en concertation avec les acteurs concernés, dont le ministère de la transition écologique et solidaire, les AASQA et le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA).

Cette expertise s'inscrit pleinement dans les réflexions sur la question de l'habitat favorable à la santé, qu'elles soient actuelles dans le cadre par exemple de propositions pour la révision du règlement sanitaire départemental type par le Haut conseil de la santé publique (HCSP), ou futures dans le cadre de l'élaboration du prochain plan national santé environnement.

Compte tenu des constantes de temps propres à la construction du parc immobilier, il est enfin de première importance que le sujet d'une prise en compte conjointe de la qualité de l'air intérieur - et de la contribution des transferts à celle-ci – et des autres paramètres (confort, isolation, ...) soit faite dans les phases de concertation et de définition de la future réglementation environnementale des bâtiments neufs (RE2020) annoncée sur l'année 2019.

Dr Roger Genet

MOTS-CLÉS

Transfert, air ambiant, air extérieur, air intérieur, pénétration, infiltration
Transfer, ambient air, outdoor air, indoor air, penetration, infiltration

ANNEXE 1 : SUIVI DES ACTUALISATIONS DE L'AVIS

Date	Version	Page	Description de la modification
Avril 2019	01		Première version signée de l'avis de l'Anses
Mai 2019	02	6, 14 et 18	Précisions/corrections apportées dans la partie 3 de l'avis sur des formulations portant sur la réglementation relative à l'aération et à la ventilation.

Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur

Saisine « n°2016-SA-0068 - Transferts »

RAPPORT d'expertise collective

Comité d'Experts Spécialisé « Évaluation des risques liés aux milieux aériens »

Février 2019

Mots clés

Transfert, air ambiant, air extérieur, air intérieur, pénétration, infiltration

Transfer, ambient air, outdoor air, indoor air, penetration, infiltration

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

RAPPORTEURS

M. ALLEMAN Laurent – Enseignant chercheur (Institut Mines Télécom Lille-Douai). Compétences : chimie, géochimie, nanoparticules, polluants inorganiques de l'air

M. BLONDEAU Patrice – Enseignant chercheur (Université de la Rochelle). Compétences : qualité de l'air intérieur - ventilation - épuration - modélisation

M. DELLERSNYDER Laurent – Chef de l'unité Maîtrise de l'Énergie et Transfert d'Air dans les bâtiments (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement). Compétences : Bâtiment, ventilation et transferts aérauliques, énergie

Mme JENNESON Bérénice –Ingénieur d'études – Référente Bâtiments (ATMO Grand Est) et référente sur l'air intérieur au sein de la fédération ATMO. Compétences : qualité de l'air intérieur, métrologie

M. Cyrille HARPET – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique). Compétences : Science humaine et sociale, santé environnement, urbanisme

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens (2014-2017) – 19 mai, 16 juin et 14 octobre 2016

Président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Lorraine EA7298 INGRES, – Centre hospitalier universitaire de Nancy). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles.

Vice-présidente

Mme Séverine KIRCHNER – Directrice adjointe de la Direction santé confort (Centre scientifique et technique du bâtiment), coordinatrice de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur – Spécialités : chimie et pollution de l'atmosphère, air intérieur, expologie.

Membres

M. Gille AYZOZ – Chef de service qualité de l'air (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) - Spécialités : physico-chimie de l'atmosphère, rejets atmosphériques. (Démission le 24 mars 2016).

Mme Armelle BAEZA – Professeur des universités (Université Paris Diderot) – Spécialité : toxicologie.

M. Claude BEAUBESTRE – Chef de département (Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris) - Spécialités : pollution de l'air intérieur, microbiologie.

M. Olivier BLANCHARD – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Patrick BROCHARD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université Bordeaux II – Centre hospitalier universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine du travail, évaluation des risques sanitaires, agents polluants.

M. Denis CHARPIN – Professeur des universités, praticien hospitalier (Aix Marseille Université) – Spécialités : médecine, agents polluants et allergènes, épidémiologie des risques liés à l'environnement.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : Santé travail, pneumologie.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Lille) – Spécialités : Ecologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : expologie, évaluation des risques sanitaires.

Mme Muriel ISMERT – Responsable unité impact sanitaire et exposition (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : écotoxicologie, évaluation des risques sanitaires, qualité de l'air intérieur (Démission le 26 novembre 2014).

M. Eddy LANGLOIS – Ingénieur, responsable de laboratoire (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : métrologie des polluants, air des lieux de travail (santé travail), surveillance et méthodes d'analyse.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen) – Spécialités : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Chef de projets (Institut universitaire romand de santé au travail) – Spécialités : Santé travail, bioaérosols.

M. Loïc PAILLAT – Ingénieur, responsable technique (Laboratoire central de la préfecture de police) – Spécialités : métrologie des polluants, air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail.

Mme Mathilde PASCAL – Chargée de projets (Institut de veille sanitaire) – Spécialités : épidémiologie, santé environnement, air et climat.

M. Emmanuel RIVIERE – Directeur adjoint (Association pour la surveillance et l'étude de la pollution atmosphérique en Alsace) – Spécialités : Méthode d'analyse et de surveillance, modélisation des émissions, évaluation de l'exposition.

Mme Sandrine ROUSSEL – Ingénieur hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Besançon) – Spécialités : microbiologie, pathologies respiratoires et allergiques, microorganisme de l'environnement.

M. Rémy SLAMA – Directeur de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Epidémiologie environnementale, reproduction et fertilité, santé des enfants, milieux aériens et environnement, perturbateurs endocriniens

- CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens (2017-2020) – le 15 décembre 2017 ; 15 juin et le 23 novembre 2018, le 17 janvier et le 7 février 2019

Présidente

Mme Rachel NADIF – Chargée de Recherche (INSERM – Directrice adjointe UMR-S 1168) – Spécialité : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Inserm U1085 IRSET – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, santé au travail.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Enseignant chercheur, maître de conférence (Université Paris Descartes) – Spécialité : toxicologie environnementale.

Mme Christina ASCHAN-LEYGONIE – Enseignant-chercheur (Université Lumière Lyon 2 - UMR 5600 Environnement Ville Société - EVS) - Spécialités : géographie, milieux urbains, inégalités de santé.

M. Denis BÉMER – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : physique et métrologie des aérosols - filtration de l'air.

Mme Valérie BEX – Responsable de la cellule santé habitat (Service parisien de santé environnementale) – Spécialités : métrologie des polluants biologiques, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Denis CAILLAUD – Professeur des universités, praticien hospitalier (CHU de Clermont-Ferrand) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie-environnement (pollens, moisissures).

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : santé travail, pneumologie.

M. Marc DURIF – Responsable de Pôle (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, caractérisation des expositions.

Mme Emilie FREALLE – Praticien Hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Ghislaine GOUPIL – Chef de département, adjoint au chef du pôle environnement (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants (air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail), techniques d'analyses, réglementation air.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Docteur en Chimie – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (INSERM) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

M. Fabien MERCIER – Ingénieur de recherche, Responsable R&D (Ecole des hautes études en santé publique / Laboratoire d'étude et de recherche en environnement et santé) – Spécialités : métrologie des polluants, méthodes d'analyse, air intérieur.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen Normandie) – Spécialité : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Doctent & Maître d'Enseignement et de Recherche (Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne) – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Responsable de service (Airparif) – Spécialités : surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

Mme Chantal RAHERISON - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie. (Démission le 7 novembre 2018)

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme Carole LEROUX – coordinateur d'expertise collective - Direction de l'évaluation des risques (avril 2016 à octobre 2017)

Mme Marion KEIRSBULCK – coordination d'expertise collective - Direction de l'évaluation des risques (octobre 2017 à décembre 2018)

Contribution scientifique

Mme Salma ELREEDY – Adjointe au chef de la Direction des affaires européennes et internationales

Mme Marion KEIRSBULCK – Direction de l'évaluation des risques

M Guillaume BOULANGER – Direction de l'évaluation des risques

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Audition du 14 septembre 2018 à l'ANSES

AIRPARIF

Mme Cécile HONORE – Responsable du service Etude

Air Pays de la Loire

Mme Karine PIERRE – Responsable Partenariat et organisation

ATMO Sud

M. Mathieu IZARD – Ingénieur d'étude Qualité de l'air intérieur

Audition du 14 septembre 2018 à EKOPOLIS

Ademe Ile de France

Mme Natacha MONNET – Ingénieur / Management des collectivités et urbanisme durable

ARS Ile de France

M. Nicolas NOTIN – Chef de projet Grand Paris / Urbanisme et Santé

Cerema Ile de France

Mme Marion BENOIST-MOUTON – Chef d'Unité Département Ville Durable

EKOPOLIS / Pôle de ressources francilien pour l'aménagement et la construction durables

Mme Julia MALINVERNO – Chargée de mission aménagement

VIZEA

M. Jonathan COULET – Responsable Pole urbanisme

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU COLLECTIF

Impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air intérieur. - Olivier Ramalho, Jacques Ribéron, Wenjuan Wei, Corinne Mandin - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - Direction Santé-Confort / Division Expologie – Février 2018 - Rapport final n° CSTB/DSC/2017-105b-Convention de recherche et développement ANSES/CSTB 2017-CRD-01

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	11
Liste des tableaux	14
Liste des figures	14
1 Contexte et objet	16
1.1 Contexte	16
1.2 Objet de la saisine	16
2 Méthode d'expertise	18
2.1 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation	18
2.2 Collecte de données	18
2.2.1 Données de la littérature	19
2.2.2 Consultation	22
2.2.3 Conduite d'auditions.....	23
2.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts	23
3 Quelques repères sur la pollution de l'air, les règles d'urbanisme et de construction.....	24
3.1 Pollution atmosphérique	24
3.1.1 Généralités sur les principaux polluants de l'air extérieur.....	24
3.1.2 Niveaux de concentration et sources	26
3.1.3 Réglementation et politiques publiques	27
3.2 Pollution de l'air intérieur	32
3.2.1 Généralités sur les polluants de l'air intérieur	32
3.2.2 Sources	33
3.2.3 Réglementation et politiques publiques	34
3.3 Construction	37
3.3.1 Le parc français : volume et évolution.....	37
3.3.2 Réglementations de la construction en lien étroit avec les transferts de polluants.....	37
3.3.3 Caractéristiques techniques du parc.....	39
3.4 Urbanisme	42
3.4.1 Généralités sur l'urbanisme	42
3.4.2 Réglementation et politique publique	43
4 Caractérisation du transfert de l'air extérieur vers l'air intérieur	50
4.1 Facteurs affectant le transfert intérieur/extérieur	51
4.1.1 Les paramètres extérieurs au bâtiment.....	51
➤ La concentration extérieure de polluant	51
➤ Les conditions météorologiques.....	52

➤	La végétation urbaine.....	52
4.1.2	Les paramètres propres au bâtiment.....	54
➤	Le type de bâtiment.....	54
➤	Le type de construction.....	55
➤	Les caractéristiques de l'enveloppe.....	55
➤	Etanchéité à l'air de l'enveloppe et équilibrage des pressions.....	56
➤	La prise d'air neuf.....	57
➤	La présence d'une cheminée ou d'autres conduits vers l'extérieur.....	58
➤	Les espaces adjacents ou attachés au bâtiment.....	58
➤	Le type de ventilation.....	58
➤	La filtration de l'air.....	60
➤	Le taux de renouvellement d'air.....	61
➤	La constante de dépôt.....	61
➤	Les réactions chimiques en phase gazeuse.....	62
4.2	Phénomènes physico-chimiques définissant les transferts.....	62
4.2.1	Particules et agents biologiques (moisissures et pollens).....	62
4.2.2	Composés gazeux inorganiques (ozone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre).....	64
4.2.3	Composés organiques volatils et semi-volatils.....	65
4.2.4	Emissions internes et autres vecteurs de transfert.....	65
4.3	Indicateurs de transfert.....	66
4.3.1	Facteur de pénétration (P).....	67
4.3.2	Ratio de concentration intérieur / extérieur (I/E).....	68
4.3.3	Facteur d'infiltration (F_{inf}).....	68
4.4	Données issues de la littérature.....	68
4.5	Données des AASQA.....	76
5	Constats et pistes d'action visant à limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'intérieur du bâti.....	78
5.1	Constats.....	78
5.2	Actions sur la source de pollution.....	79
5.3	Action sur l'urbanisme et la planification territoriale.....	82
5.4	Action sur l'hygiène et la salubrité publique.....	91
5.5	Action pour la construction et l'usage des bâtiments.....	92
5.5.1	Socle général.....	92
5.5.2	Enveloppe.....	95
5.5.3	Matériaux.....	96
5.5.4	Systèmes techniques.....	98
5.5	Actions pour les usagers.....	103
5.6	Recommandations en matière d'acquisition de connaissances.....	108
6	Bibliographie.....	111
6.1	Articles scientifiques.....	111
6.2	Rapports.....	113
6.3	Textes réglementaires.....	115
ANNEXES.....		117

Annexe 1 : Lettre de saisine	118
Annexe 2 : Liste des organismes et pays ciblés dans la consultation internationale et au niveau français de l'Anses sur la thématique « Transfert extérieur/intérieur »,....	121
Annexe 3 : Questionnaire soumis dans le cadre de la consultation internationale	122
Annexe 4 : Questionnaire pour le recueil des données des AASQA	123
Annexe 5 : Documents collectés dans le cadre des consultations de l'Anses	126
Annexe 6 : Compte-rendu de l'audition organisée le 14 septembre 2018	130
Annexe 7 : Connaissances sur les sources et niveaux de concentrations des polluants de l'air.....	138
Annexe 8 : Le parc français : volume et évolution	144
Annexe 9 : Réglementations en lien étroit avec les transferts de polluants.....	145
Annexe 10 : Caractéristiques techniques du parc.....	150
Annexe 11 : Recours aux servitudes à visée de santé publique.....	158
Annexe 12 : Rapport de convention recherche et développement (CRD) Anses-CSTB Impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air intérieur.....	163

Sigles et abréviations

AASQA : Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air

Ademe : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AEU : Analyse environnementale de l'urbanisme

AEU2 : Approche environnementale de l'urbanisme

ALUR : Loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APR CORTEA : Appel à projets de recherche / Connaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air

ARS : Agence régionale de santé

ATD : Agence technique départementale

ATREUS: Advanced Tools for Rational Energy Use towards Sustainability

BAM : Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (Institut fédéral allemand sur la recherche et les essais sur les matériaux)

BBC : Bâtiment basse consommation

BPCO : bronchopneumopathie chronique obstructive

BTEX : Benzène, toluène, ethylbenzène, xylènes

CCFAT : Commission Chargée de la Formulation des Avis Techniques

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CES : Comité d'experts spécialisé

C_{ext} : Concentrations à l'extérieur

C_{int} : Concentrations à l'intérieur

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CO : Monoxyde de carbone

COSV : Composé organique semi volatil

COV : Composé organique volatil

CPE : Cahier de prescriptions environnementales

CSA : Carte Stratégique Air

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

DAE : Débit d'air épuré

DGEC : Direction générale de l'énergie et du climat

DGPR : Direction générale de la prévention des risques

DGS : Direction générale de la santé

DGT : Direction générale du travail

DHUP : Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages

DOO : Document d'Orientations et d'Objectifs

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DROM : Département et région d'outre-mer
DTU : Document technique unifié
EE : Evaluation environnementale
EES : Evaluation environnementale stratégique
EIS : Evaluation d'impact sur la santé
ELAN : Loi sur l'évolution du logement, de l'aménagement et du numérique
ENE : Loi portant Engagement National pour l'Environnement
EPA : Etablissement public d'aménagement
EPCI : Etablissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre
ERP : Etablissement recevant du public
ESSOC : Loi pour un Etat au service d'une société de confiance
Facteur F : facteur d'infiltration
Facteur P : Facteur de pénétration
 F_{inf} : Facteur d'infiltration
HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCSP : Haut conseil de la santé publique
HDR : Habilitation à diriger des recherches
HEPA : High Efficiency Particulate Air signifiant [filtre] à particules aériennes à haute efficacité
INPES : Institut national de prévention et d'éducation pour la santé
INRS : Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
IPP : Indice Pollution Population
LAURE : Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie
MAPTAM : Loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles
NOTRE : Loi portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République
OAP : Orientations d'Aménagement et de Programmation
OMS : Organisation mondiale de la santé
OQAI : Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur
PCAET : Plan Climat Air Energie Territorial
PCET : Plan Climat Energie Territoire
PDIA : Plan de déplacements d'entreprises ou d'administrations
PDIE : Plan de déplacements inter-entreprises
PDU : Plan de déplacements urbains
PICADA : Photocatalytic Innovative Coverings Application for Depollution Assessment
PLH : Programme local de l'habitat
PLU : plan local d'urbanisme
PLUi : PLU intercommunal
PNSE : Plan national santé environnement
PPA : plan de protection de l'atmosphère
PREPA : Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques

PRQA : Plan régional de qualité de l'air
PUGA : Plan d'urgence pour la qualité de l'air
RAGE : Programme Règles de l'Art Grenelle Environnement
Ratio I/E : Ratio intérieur/extérieur
RE2020 : Réglementation environnementale des bâtiments neufs 2020
RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Institut néerlandais de Santé Publique et Environnement)
RNSA : Réseau national de surveillance aérobiologique
RSD : Règlement Sanitaire Départemental
RT 2012 : Réglementation thermique RT 2012
SCHS : Service communal d'hygiène et de salubrité, de santé publique
SCOT : Schéma de cohérence territoriale
SINTEF : Institut norvégien sur la construction et les infrastructures
SPF : Santé publique France
SPLA : Société publique locale d'aménagement
SRADDET : Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SRCAE : Schéma régional climat air énergie
SRDEEI : Schéma Régional de Développement Économique, d'Innovation et d'Internationalisation
SRU : Loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains
UBA : Umweltbundesamt (Agence fédérale allemande de l'environnement)
UERA : Unité d'évaluation des risques liés à l'air
VMC : Ventilation mécanique centralisée
VTT : Centre finlandais de recherche technique
ZAC : Zone d'aménagement concerté
ZAG : Zone à risques – agglomérations
ZAR : Zone à risques – hors agglomérations
ZCR : Zone à circulation restreinte
ZR : Zone régionale

Liste des tableaux

Tableau 1 : Distribution représentée des logements pour chaque type de ventilation en fonction des classes d'âges de fin de construction. En pourcentage par colonne (Source : OQAI, 2009)	41
Tableau 2 : Parts représentées des logements pour chaque classe de fin de construction en fonction des types de ventilation. En pourcentage par lignes. (Source : OQAI, 2009)	42
Tableau 3 : Synthèse des indicateurs de transfert (facteur d'infiltration F_{inf} et ratio I/E) pour les polluants traités dans l'expertise	69
Tableau 4 : Paramètres influençant le transfert des polluants issus de l'analyse du CSTB : facteurs influençant le transfert en lien avec le bâtiment	72
Tableau 5 : Paramètres influençant le transfert des polluants issus de l'analyse du CSTB : autres types de facteurs	73

Liste des figures

Figure 1 : Processus de sélection des articles conduit dans l'étude commanditée par l'Anses auprès du CSTB (Cf. Annexe 12)	20
Figure 2 : Extraction des données pertinentes des documents analysés (CSTB, 2018)	21
Figure 3 : Evolution des concentrations en SO ₂ , NO ₂ , O ₃ et PM ₁₀ sur la période 2000-2017 (CGDD 2018)	26
Figure 4 : Panorama des normes de qualité de l'air définies dans la réglementation française pour les polluants réglementés	28
Figure 5 : Zones de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA, 2016)	29
Figure 6 : Outils de planification en France contribuant à la mise en œuvre de la politique relative à la qualité de l'air (source : Ademe, 2016)	30
Figure 7 : Grandes lignes de la réglementation française pour certains polluants et celle faisant suite aux engagements du Grenelle de l'environnement	35
Figure 8 : Synthèse des bons gestes à chaque étape d'un projet de construction ou de rénovation pour prendre en compte la qualité de l'air (Source : MEDDE, 2013)	38
Figure 9 : Schéma des enjeux à l'échelle d'un grand territoire via le SCOT ; d'un projet urbain via le PLU ; et d'une opération d'aménagement via la procédure de ZAC (ADEME, 2015)	46
Figure 10 : Démarche d'évaluation environnementale dans les documents d'urbanisme (source : CGDD, 2011)	48
Figure 11 : Articulation et liens entre certains documents de planification	49
Figure 12 : Différentes répartitions de la concentration extérieure en CO dans une rue entre deux immeubles de 8 étages, de même hauteur selon la largeur de la rue et la présence d'une route surélevée ou non, sous un même vent dominant (Hang et al., 2017).	51
Figure 13 : Exemple de gradient de concentration de différents polluants avec la distance à un axe routier à Los Angeles (Fujita et al., 2014)	52

Figure 14 : Distribution 2D des concentrations de particules (fractions PM_{10} , $PM_{2.5}$ et PM_{10}) et du ratio de concentration entre la maison non protégée (house 25) et la maison protégée par une rangée d'arbres (house 31) avant et après la mise en place de cette dernière (Maher et al., 2013).....	54
Figure 15 : Représentation schématique des contributions intérieure et extérieure des particules selon le type de bâtiment (Morawska et al., 2017).....	55
Figure 16 : Evolution de la perméabilité à l'air des logements en France (Bailly et al., 2015). Maisons individuelles en vert et appartements en bleu	57
Figure 17 : Constante de dépôt des particules sur les parois d'une pièce en fonction de la taille des particules (compilation d'après Abadie, 2000)	63
Figure 18 : Schématisation de la problématique du transfert intérieur/extérieur et des 3 indicateurs de transfert considérés : le facteur de pénétration P, le facteur d'infiltration F_{inf} et le ratio intérieur/extérieur (I/E). Les 3 indicateurs se réfèrent à la concentration extérieure (C_{ext}) qui dépend d'autres paramètres (Source : rapport de CRD Anses-CSTB en Annexe 12)	67
Figure 19 : Grands principes de l'urbanisme et de ses potentiels impacts sur la qualité de l'air (adapté du rapport DREAL Nord-Pas-de-Calais – Picardie, 2016).....	82
Figure 20 : Approche globale de la méthode de management de la qualité de l'air intérieur (ADEME, 2017).....	86
Figure 21 : approche globale et inclusion des enjeux de la qualité de l'air ambiant dans les documents de planification et de procédures d'aménagement : exemple de Strasbourg Eurométropole (ATMO Grand Est, 2015).....	87
Figure 22 : Illustration de l'impact que peut avoir le choix des matériaux de revêtement intérieur sur les ratios I/E de l'ozone et du NO_2 . Les graphiques en parties haute et basse correspondent respectivement aux plus fortes et plus faibles vitesses de dépôt mesurées par Grontoft et Raychaudhuri (2004).....	97
Figure 23 : Illustration des effets combinés du taux de renouvellement d'air et des dépôts sur les ratios I/E de l'ozone et du dioxyde d'azote.....	98
Figure 24 : Ratios I/E en fonction de la classe du filtre mis en place dans le système de ventilation double-flux d'une école maternelle (d'après Ginestet et al, 2015).....	100
Figure 25 : Simulation d'un pic de pollution extérieure (C_{ext}) et incidence sur la concentration intérieure selon différents scénarios de renouvellement d'air par ventilation mécanique sans ou avec ouverture de fenêtres (gauche et droite respectivement). D'après Kirchner et al, (2001).....	105

1 Contexte et objet

1.1 Contexte

La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue une préoccupation de santé publique en France et dans de nombreux pays. En effet, l'environnement intérieur offre une grande diversité de situations d'exposition à de nombreux agents physiques et contaminants chimiques ou microbiologiques, dont les conséquences sur la santé sont variables et peuvent s'avérer importantes notamment pour les populations sensibles et vulnérables en fonction des bâtiments considérés et de leur utilisation. Différentes sources peuvent être à l'origine de la présence de polluants dans l'air intérieur : des sources propres au bâti, à son environnement, à ses équipements ou aux comportements de ses occupants.

L'exposition aux polluants présents dans l'air intérieur est susceptible d'avoir des effets sur la santé, documentés essentiellement pour des expositions par inhalation. Parmi les symptômes associés à une pollution de l'air intérieur, les pathologies du système respiratoire (rhinites, bronchites, asthme, etc.) sont celles les plus souvent rapportées. Des effets irritatifs, toxiques voire cancérigènes sont également associés à l'exposition aux polluants de l'air intérieur. Il ressort d'une étude de 2013 de l'Anses et du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), que le coût socio-économique annuel de la pollution de l'air intérieur pour la collectivité est évalué à 19 milliards d'euros.

La qualité de l'air intérieur est influencée par la pollution en provenance de sources multiples et notamment de l'air extérieur. En effet, différentes campagnes de mesures de la qualité de l'air à l'intérieur des locaux, notamment à l'intérieur d'établissements recevant du public, ont mis en évidence une contribution de la pollution de l'air extérieur pouvant être significative suivant la situation et/ou le polluant considéré. Ces transferts de l'air extérieur vers l'air intérieur semblent notamment avoir lieu dans certaines conditions, par exemple pour des bâtiments situés à proximité d'importantes sources extérieures de pollution. Une étude menée en 2001 par le CSTB a souligné que les polluants de l'air extérieur se comportent différemment lors de ce transfert. Différents paramètres régissent ce phénomène : les conditions de ventilation du logement, la saison, le niveau de pollution à l'extérieur, la présence de matériaux adsorbants et réactifs à l'intérieur du logement, etc. La différence entre les niveaux de pollution à l'extérieur et à l'intérieur est aussi fonction du polluant considéré.

Il est nécessaire de disposer d'une revue des connaissances disponibles sur les interrelations entre l'air extérieur et l'air intérieur, qu'il s'agisse de locaux à usage d'habitation, de travail, ou d'établissements recevant du public (crèches, établissements scolaires, établissements médico-sociaux, ...).

1.2 Objet de la saisine

L'Anses a été saisie par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), la Direction générale du travail (DGT), la Direction générale de la santé (DGS) et la Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP) afin de **caractériser les transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments**.

La demande porte sur l'analyse des différents résultats de mesures obtenus au cours des dernières années en France voire dans d'autres pays, incluant les données issues de la littérature grise et scientifique. L'objectif était de déterminer les polluants (chimiques et biologiques) et les situations, à l'extérieur comme à l'intérieur des bâtiments, les plus favorables au transfert, dans

des zones exposées de façon récurrente à la pollution de l'air extérieur. Les situations de pollution accidentelle ou intentionnelle ne font pas partie du champ à investiguer.

Outre la hiérarchisation des polluants de l'air extérieur les plus contributeurs à la dégradation de l'air intérieur, l'analyse bibliographique devait permettre **d'établir une liste exhaustive de facteurs et de situations favorisant le transfert de l'extérieur vers l'intérieur de bâtiments, selon les polluants considérés**. L'information sur l'origine des polluants de l'air extérieur, à savoir ceux produits localement et ceux provenant d'autres régions, voire d'autres pays, en lien avec des conditions météorologiques ponctuelles ou habituelles, était demandée mais ces éléments étaient peu renseignés dans la littérature scientifique. Enfin, dans les différents volets de cette saisine, les particularités éventuelles relatives à l'outre-mer étaient à considérer dans la mesure du possible.

Les questions et le périmètre de l'expertise ont été discutés avec les représentants des directions ministérielles concernées lors de la séance du comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » du 19 mai 2016 pour le cadrage des travaux d'expertise. Après discussion lors de cette séance, les polluants à considérer dans les travaux ont été définis. L'Anses a proposé de considérer en priorité les polluants réglementés dans l'air ambiant, ainsi que les moisissures et les pollens. Il s'agit plus précisément, pour les polluants réglementés, du dioxyde de soufre (SO₂), du dioxyde d'azote (NO₂), des particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), de l'ozone (O₃), du benzène, du monoxyde de carbone (CO), du benzo(a)pyrène, de l'arsenic (As), du cadmium (Cd), du mercure (Hg), du nickel (Ni) et du plomb (Pb).

La demande indiquait que si d'autres polluants étaient identifiés via l'analyse de la littérature, ils pourraient être intégrés à l'expertise s'il existe des « signaux d'alerte » quant à leur contribution à la dégradation de l'air intérieur tant en termes de concentration et/ou d'impact sur la santé.

Il est à noter que l'Anses participe avec Santé publique France à l'élaboration d'une étude sur l'exposition des riverains de zones agricoles, comprenant des campagnes de mesures de pesticides épanchés à proximité de leur habitat, incluant donc la question du transfert de telles substances dans les environnements intérieurs. Le cas échéant, ces travaux pourront apporter des réponses complémentaires.

2 Méthode d'expertise

2.1 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine.

L'instruction des travaux d'expertise de l'Anses a été articulée en deux phases :

- Une première phase de recueil d'informations visant d'une part à réaliser une revue des données de ratios de concentrations de polluants en air intérieur/air extérieur et/ou des mesures comparatives entre les environnements intérieurs et extérieurs et d'autre part à identifier les facteurs et situations influençant le transfert ;
- Une seconde phase d'analyse des données collectées en vue d'identifier les facteurs ou situations les plus déterminants dans ce type de transfert.

Cette saisine a été instruite par l'unité d'évaluation des risques liés à l'air (UERA), avec l'appui de cinq experts rapporteurs nommés *intuitu personae* spécifiquement pour la seconde phase d'analyse des données dans le cadre de ces travaux d'expertise. Leurs domaines de compétences sont les suivants : dynamique des flux- ventilation - transfert de contaminants, surveillance de la qualité de l'air, réglementation, urbanisme/habitat.

La collecte des informations nécessaires à la réalisation de cette expertise a reposé sur la réalisation d'une consultation d'organismes français et internationaux ainsi que sur la contractualisation d'une convention de recherche et développement avec le CSTB. Les modalités d'organisation de ces investigations sont décrites dans la partie 2.2.1.

Les 5 experts rapporteurs ont été nommés en avril 2018 jusqu'à la fin de l'année 2018 afin d'apporter leur expertise sur l'analyse des données puis de formuler des préconisations pour limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur.

Les travaux d'expertise des experts rapporteurs ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par les experts rapporteurs tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) »

2.2 Collecte de données

Les données collectées lors de la première phase d'expertise font l'objet d'un rapport de CRD Anses-CSTB qui figure en Annexe 12 du rapport.

Les experts rapporteurs ont analysé les données en s'intéressant plus particulièrement au bâtiment en conditions réelles de fonctionnement et d'utilisation. Cette analyse a constitué le cœur de l'expertise, l'objectif initial visant principalement la question du transfert de polluants en relation avec le bâtiment. La question de l'urbanisme a cependant également été introduite par le référencement d'études et d'exemples spécifiques concernant à la fois l'aménagement du territoire et de la ville et les outils disponibles de modélisation ou d'urbanisme dit opérationnel.

2.2.1 Données de la littérature

Une partie des données présentées par la suite, relatives à l'impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air intérieur, est issue de la convention recherche et développement (CRD) Anses-CSTB.

Les objectifs de cette étude étaient de :

- Faire un état des connaissances sur les comparaisons ou ratios de concentrations des polluants d'origine extérieure entre les environnements intérieurs et extérieurs ;
- Faire une revue de la littérature visant à identifier les facteurs et situations influençant le transfert des polluants de l'air extérieur dans les environnements intérieurs et, si possible, à déterminer leurs contributions respectives : typologie et localisation des sources à l'extérieur, conditions climatiques, implantation des bâtiments mais aussi configuration et orientation, particularités géographiques locales, matériaux de construction, configuration et exposition des logements, type d'ouvrants, modes d'aération, taux de renouvellement d'air...

La méthode de recherche et d'analyse a été définie en 5 étapes :

- 1) La définition des équations de recherche bibliographique en sélectionnant et combinant les différents mots clés à entrer dans les différents moteurs de recherche ;
- 2) Le choix des moteurs de recherche consultés et la mise en œuvre des requêtes ;
- 3) L'export des résultats dans une librairie / gestionnaire de références bibliographiques ;
- 4) Le tri et la sélection des articles pertinents à analyser plus en détail ;
- 5) La récupération et l'analyse en détail des articles sélectionnés.

Les études françaises ont été visées en priorité puis complétées au besoin par d'autres études internationales.

La démarche suivie de revue de la littérature afin de documenter les indicateurs de transfert et les données relatives au transfert extérieur/intérieur des polluants ciblés est décrite dans la Figure 1.

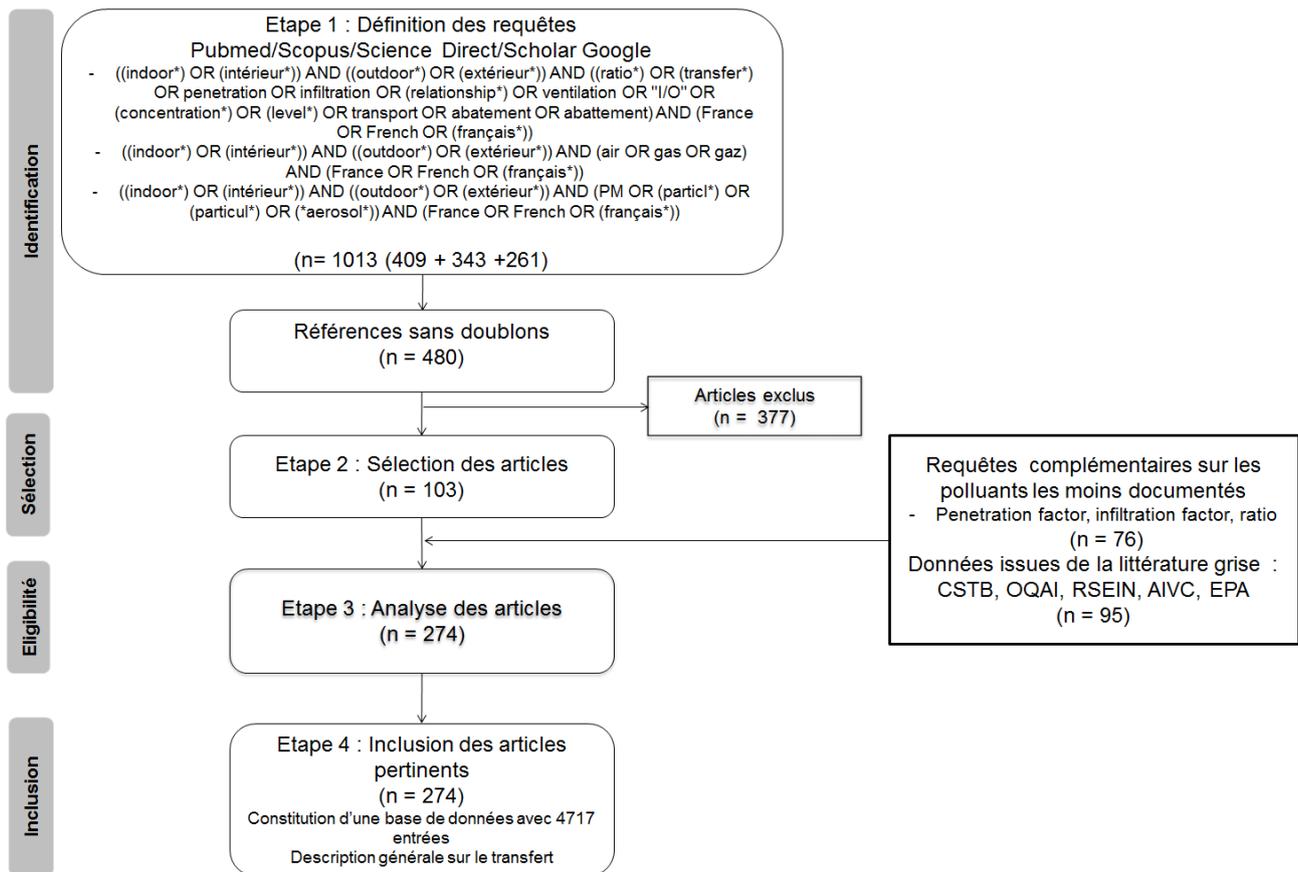


Figure 1 : Processus de sélection des articles conduit dans l'étude commanditée par l'Anses auprès du CSTB (Cf. Annexe 12)

Les 377 articles exclus sur la base de leurs titres et résumés l'ont été en raison des critères suivants :

- 334 articles ont été exclus principalement du fait de l'absence de données de transfert ou de données à la fois intérieures et extérieures. De nombreuses études génériques ou ciblant les effets sanitaires de la pollution atmosphérique entrent dans cette catégorie. Le second motif concerne tous les articles qui couvrent un autre champ scientifique sans rapport avec la pollution de l'air, mais qui ont identifié l'influence de l'air extérieur sur leur thématique particulière. Quarante-cinq études dans des pays au climat spécifique, comme la Chine, la Turquie, Singapour ont également été rejetées. A noter que les études ayant eu lieu en Australie ou Nouvelle-Zélande ont été retenues car leur climat a été jugé proche de celui des Etats-Unis. Les études ciblant d'autres types d'environnement, comme les habitacles, les trains et les aéroports représentent moins de 4 %.
- 43 articles ont été définis comme non prioritaires car reportant des niveaux intérieurs et extérieurs de polluants non réglementaires en air extérieur comme les composés organiques volatils (COV) (hors benzène), en particulier les aldéhydes, ou comme les substances semi-volatiles (pesticides, retardateurs de flammes, phtalates, ...). A noter que les études retenues pour analyse ciblant le benzène comportent pratiquement toujours des données sur d'autres COV en particulier toluène, éthylbenzène, xylènes (BTEX). De même, les études retenues ciblant le benzo(a)pyrène contiennent également systématiquement des données sur les autres hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), voire d'autres composés organiques semi volatils (COSV).

L'analyse des articles avait pour but de collecter, au sein de chaque publication, l'ensemble des informations pertinentes relatives aux données de concentrations intérieures et extérieures de chaque polluant visé par cette expertise, aux données de transfert et aux facteurs y contribuant. Les données pouvaient être représentées sous des formes différentes : tableaux de valeurs, graphiques ou valeurs disséminées dans le texte ou dans le matériel supplémentaire. Un travail d'extraction des informations a été réalisé pour homogénéiser les données et établir une base de données Excel (cf. Figure 2).

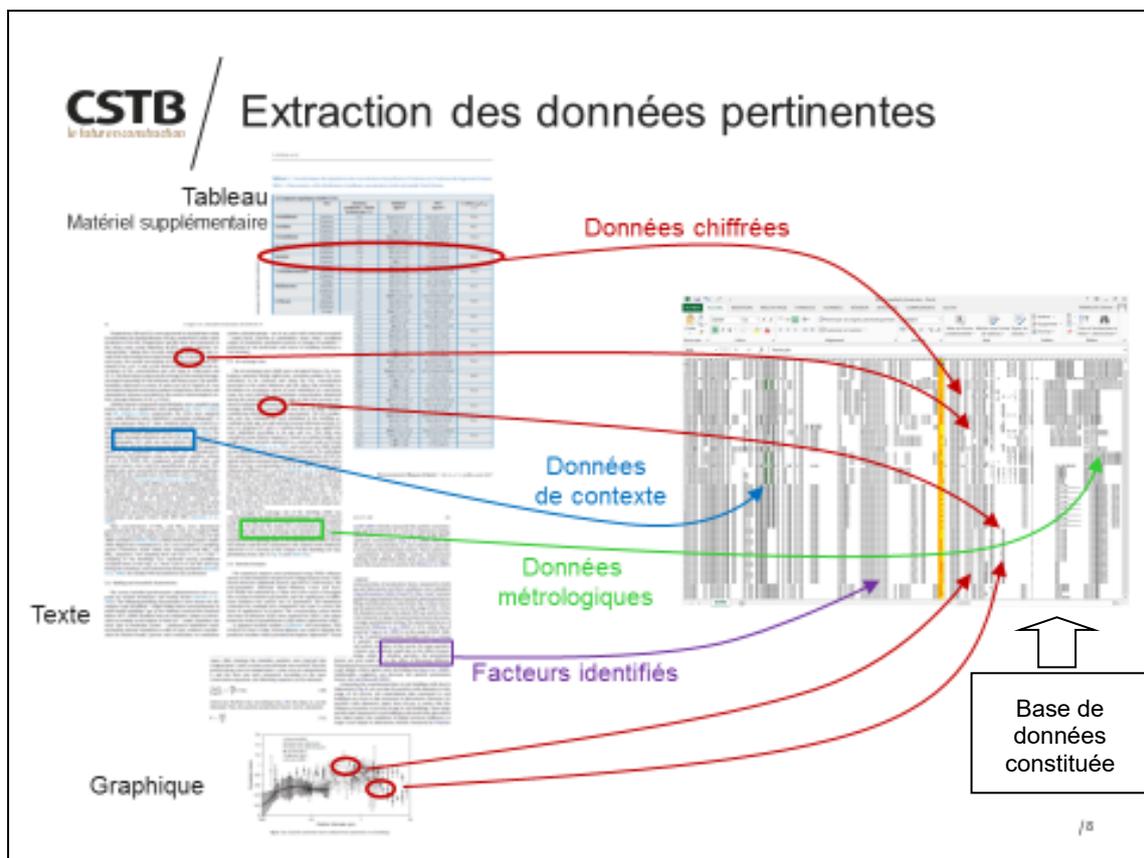


Figure 2 : Extraction des données pertinentes des documents analysés (CSTB, 2018)

Les articles inclus correspondent aux 241 publications pour lesquelles des données ont été transposées dans la base et les 33 références générales sur le transfert. La base de données constituée inclut 4717 entrées sur 80 colonnes décrivant les différentes situations où un paramètre est renseigné dans une situation donnée et pour un polluant réglementaire identifié (concentrations intérieures et extérieures, facteur de pénétration, facteur d'infiltration, ratios I/E).

Les publications couvrent la période 1981 – 2017 avec des données mesurées allant de 1978 à 2015. Les études américaines au nombre de 81 sont majoritaires. Pour la France, 71 études comportant des informations relatives au transfert intérieur/extérieur ont été identifiées. A noter que les études françaises ont été recherchées spécifiquement dans les modalités de recherche bibliographique représentées dans la Figure 1. Cette recherche spécifique ne permet pas de considérer la France comme le second pays en termes d'effort de recherche sur l'étude du transfert.

Le type de bâtiment le plus représenté est le logement avec 141 études dont 30 en France. Les bâtiments d'éducation, de la maternelle à l'université, sont couverts par 65 études (25 en France). D'autres types de bâtiments sont peu représentés comme les hôpitaux (11), les maisons de

retraite (3), des environnements industriels ou assimilés (5), des lieux publics (bibliothèques, musées, mairies, etc.) (12), des salles de sports (y compris patinoires et piscines) (6), des bâtiments et centres commerciaux (6), des cafés ou restaurants (10) ou des données couvrant des environnements multiples (4). Il a également été identifié quelques études expérimentales et des études de modélisation (6).

2.2.2 Consultation

Une consultation a été réalisée en collaboration avec la Direction des affaires européennes et internationales de l'Anses auprès d'organismes analogues à l'Anses, principalement européens et nord-américains. L'objectif était de recueillir des informations, notamment sur la prise en compte des phénomènes de transferts dans les documents d'urbanisme.

L'agence a contacté 29 organismes ou réseau regroupant différents organismes à l'étranger (cf. Annexe 2). Ceux-ci ont été invités à répondre à un questionnaire (cf. Annexe 3). En septembre 2017, 11 réponses ont été reçues après une consultation de 6 mois correspondant à 4 pays européens : l'Allemagne, la Finlande, la Norvège et les Pays-Bas. Des documents ont été transmis par 5 organismes (UBA¹, BAM², RIVM³, SINTEF⁴, VTT⁵).

Toujours en 2017, l'agence a contacté 13 organismes français ou fédérations regroupant différents organismes en France métropolitaine (liste en Annexe 2). Quatre réponses ont été reçues et des documents ont été transmis.

L'agence a par ailleurs réalisé une consultation spécifique des associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) dans le but :

- De compléter les données françaises avec les données d'études spécifiques qui auraient été réalisées par ces AASQA, plus particulièrement sur l'étude ou la caractérisation du transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur de bâtiments ;
- D'évaluer les autres données d'AASQA issues de différentes campagnes de mesures conduites sur des polluants réglementés avec la réalisation de mesures en parallèle dans l'air intérieur et dans l'air ambiant extérieur.

Le recueil spécifique des données des AASQA a été réalisé en 2018 par la Fédération ATMO sur une durée de 1 mois (février à mars 2018) à la demande de l'Anses sur la base d'un questionnaire présenté en Annexe 4.

Onze questionnaires renseignés ont été transmis à l'Anses correspondant à 10 régions et 1 département et région d'outre-mer (DROM) (Bretagne, Ile-de-France, Pays de la Loire, Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est, Haut de France, Normandie, Nouvelle Aquitaine, Centre-Val de Loire, Mayotte), soit 65 % des 17 AASQA couvrant le territoire français.

L'annexe 5 compile l'ensemble des éléments transmis dans le cadre des consultations présentées précédemment. Cette annexe distingue les articles scientifiques publiés dans une revue, les thèses ou habilitation à diriger des recherches (HDR), les études réalisées par des organismes nationaux ou locaux ainsi que des guides ciblant principalement l'urbanisme.

¹ UBA : Umweltbundesamt (Agence fédérale allemande de l'environnement)

² BAM : Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Institut fédéral allemand sur la recherche et les essais sur les matériaux)

³ RIVM : Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (Institut néerlandais de Santé Publique et Environnement)

⁴ SINTEF : institut norvégien sur la construction et les infrastructures

⁵ VTT : Centre finlandais de recherche technique

2.2.3 Conduite d'auditions

Une audition a été organisée le 14 septembre 2018 ayant pour objectif un partage d'expériences et/ou de données avec des acteurs de terrain en vue d'identifier des préconisations visant à limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur. Plusieurs AASQA ayant travaillé dans ce domaine ont été contactées ainsi que l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) en lien notamment avec le dispositif d'analyse environnementale de l'urbanisme (AEU) et le programme d'aide pour les actions des collectivités territoriales et locales en faveur de l'air (AACT'AIR).

Le compte rendu de cette audition est consultable en Annexe 6.

Une autre audition a également été organisée le 14 septembre 2018 avec un objectif similaire de partage d'expériences et/ou de données avec des acteurs de terrain en vue d'identifier des préconisations visant à limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur. Les différents acteurs conviés par EKOPOLIS⁶ pour répondre aux demandes de l'Anses étaient l'Ademe Ile de France, l'Agence régionale de santé (ARS) Ile de France, le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) Ile de France et un bureau d'études spécialisé dans le développement durable pour la construction de la ville.

2.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'agence (www.anses.fr).

⁶ L'association Ekopolis a pour objet d'encourager le développement durable dans les champs de l'aménagement et de la construction, notamment du renouvellement urbain et de la réhabilitation, et de mobiliser les acteurs concernés de la région Ile-de-France dans cette optique. Ekopolis est une association francilienne soutenue par l'ADEME, les CAUE (conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement), l'Ordre des architectes, les services de l'Etat et ses adhérents.

3 Quelques repères sur la pollution de l'air, les règles d'urbanisme et de construction

3.1 Pollution atmosphérique

L'air extérieur est susceptible d'être pollué par des substances chimiques, des bio-contaminants ou des particules et fibres pouvant nuire à la santé. Ces polluants peuvent être d'origine naturelle (pollens, émissions marines, forestières ou volcaniques, etc.), ou être liés à l'activité humaine (polluants issus des activités industrielles, de l'agriculture ou du transport routier, etc.). La qualité de l'air fait l'objet de préoccupations croissantes depuis plusieurs années et apparaît aujourd'hui comme un enjeu majeur de santé publique.

Les éléments présentés dans ce chapitre sont largement extraits de plusieurs rapports de l'Anses relatif à la pollution atmosphérique (Anses, 2017a ; 2018a et 2018b).

3.1.1 Généralités sur les principaux polluants de l'air extérieur

La connaissance des effets sanitaires et environnementaux de la pollution de l'air ambiant par un grand nombre de polluants chimiques est bien établie depuis de nombreuses années. Les premières lignes directrices relatives à la qualité de l'air ont été établies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en 1987. Elles ont été révisées à plusieurs reprises (1997 et 2005) afin de prendre en compte les nouvelles études concernant les effets de la pollution de l'air sur la santé publiées dans la littérature scientifique (OMS, 2000 ; 2006). La réglementation européenne visant à améliorer la qualité de l'air ambiant a découlé de ces connaissances.

Les polluants de l'air sont reconnus pour avoir des effets chroniques et des effets aigus sur la santé.

Par effets chroniques, est entendue la contribution de la pollution de l'air au développement de pathologies chroniques (ex cardiovasculaires, respiratoires, neurologiques, cancers...), et l'ensemble des conséquences sanitaires qui en découlent : recours aux soins, perte de qualité de vie, diminution de l'espérance de vie, et mortalité. Ces effets s'observent après plusieurs années d'exposition à long terme à une pollution de l'air.

Par effets aigus, est entendue l'apparition de symptômes cliniques de type irritatifs, ou de décompensation de pathologies chroniques préexistantes, comme par exemple la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) ou l'asthme. Ces effets peuvent se traduire au minimum par des gênes, du recours aux soins, et au maximum des hospitalisations et des décès. Ils surviennent quelques heures à quelques jours après l'exposition.

En 2017, dans ses travaux d'expertise relatifs aux normes de qualité de l'air ambiant, l'Anses soulignait à nouveau l'importance de poursuivre les efforts dans la mise en œuvre de politiques publiques de long terme en faveur de l'amélioration de la qualité de l'air. Compte tenu des nouvelles données disponibles relatives aux effets sur la santé, il est pertinent de réviser les normes pour les particules PM₁₀ et PM_{2,5}, le NO₂, le SO₂ et l'O₃. L'OMS a engagé en 2016 un processus de révision de ses valeurs guides prioritairement pour les particules PM₁₀ et PM_{2,5}, le NO₂, le SO₂, l'O₃ et le CO ; les résultats sont attendus pour 2020 (Anses, 2017a).

Si un besoin d'études complémentaires demeure pour confirmer et quantifier des liens entre certains polluants et certains effets sanitaires (OMS 2013a, b), les données disponibles aujourd'hui permettent d'ores et déjà de conclure que la diminution de l'exposition quotidienne à la pollution de l'air, y compris à des niveaux inférieurs aux seuils réglementaires européens, se traduirait par des bénéfices sanitaires très importants partout dans le monde (OMS 2016a).

Les données de 2016 de Santé publique France issues de la surveillance sanitaire confirment le poids de la pollution atmosphérique en France : 48 000 décès anticipés par an sont estimés uniquement du fait de la pollution particulaire aux PM_{2,5} correspondant à une perte d'espérance de vie pouvant dépasser 2 ans dans les villes les plus exposées, et au-delà pour des grandes villes (SpFrance, 2016a). Ces données sont cohérentes avec les estimations faites dans les études européennes annonçant pour la France en 2013 un nombre de 45 120 décès prématurés imputables aux concentrations en particules fines, 1 780 aux concentrations en O₃ et 8 230 aux concentrations en NO₂ (COM, 2017).

Santé publique France a par ailleurs étudié la part des épisodes de pollution (définis par le dépassement des seuils d'alerte) dans les effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé dans les villes du programme de surveillance Air et santé. Dans les 17 villes du programme de surveillance « Air et santé », de 2007 à 2010, entre 85 % (Nancy) et 99 % (Bordeaux) des décès toutes causes (hors causes accidentelles) et des hospitalisations pour causes cardiaques attribuables aux effets aigus des PM₁₀ sont associés à des niveaux journaliers de PM₁₀ inférieurs au seuil d'alerte de 80 µg.m⁻³. Les pics contribuent peu à l'exposition à long terme, qui est principalement une exposition à des concentrations inférieures aux seuils réglementaires européens, mais supérieures aux recommandations de l'OMS. La contribution des pics aux effets chroniques est donc faible. De même, leur contribution aux effets aigus est également faible, car les effets aigus peuvent également survenir en dehors des pics de pollution. Cette étude a montré que la réduction des niveaux des PM₁₀ uniquement en cas d'épisode de pollution ne permettait pas d'assurer une prévention efficace des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique (SpFrance, 2016b).

Ces résultats soulignent que la mise en place d'actions visant à réduire durablement la pollution atmosphérique permettrait d'améliorer de façon considérable la santé et la qualité de vie de la population.

Enfin, il faut également considérer que les effets chroniques et aigus ne sont pas indépendants, dans la mesure où une pathologie favorisée par la pollution sur le long-terme peut être décompensée lors d'une période de pic de pollution sur le court-terme ou par un autre facteur.

En France, l'attention de la population et des pouvoirs publics est souvent portée sur des épisodes de forte pollution de l'air ambiant, avec éventuellement un dépassement des seuils d'information et d'alerte, réglementaires, appelé « pic de pollution⁷ ». Si lors des pics de pollution, l'attention est particulièrement portée sur les effets aigus, il ne faut toutefois pas oublier que ces épisodes peuvent contribuer également à l'exposition à long terme et donc aux effets chroniques.

Les recommandations sanitaires en vue de prévenir les effets de la pollution de l'air sur la santé lors des épisodes de pollution définies par arrêté⁸ ont été rappelées dans les travaux d'expertise relatifs aux masques dits « antipollution » (Anses, 2018b) . Il a été recommandé aux pouvoirs publics d'informer également la population générale notamment en établissant des recommandations sur les comportements individuels à adopter pour réduire ou limiter son exposition quotidienne.

⁷ **Arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant** : période au cours de laquelle la concentration dans l'air ambiant d'un ou plusieurs polluants atmosphériques est supérieure au seuil d'information et de recommandation ou au seuil d'alerte définis à l'article R. 221-1 du code de l'environnement, dans les conditions prévues à l'article 2.

⁸ **Arrêté du 13 mars 2018** modifiant l'arrêté du 20 août 2014 relatif aux recommandations sanitaires en vue de prévenir les effets de la pollution de l'air sur la santé, pris en application de l'article R. 221-4 du code de l'environnement

3.1.2 Niveaux de concentration et sources

Les éléments rapportés dans ce chapitre sont largement extraits du bilan de la qualité de l'air en France en 2017 (CGDD, 2018) établi principalement à partir des données de surveillance de la qualité de l'air issues des AASQA.

Le bilan de la qualité de l'air en France en 2017, publié en 2018 par le Commissariat général au développement durable (CGDD), indique que les concentrations des différents polluants ont diminué, mais le plus souvent dans des proportions plus faibles que pour les émissions.

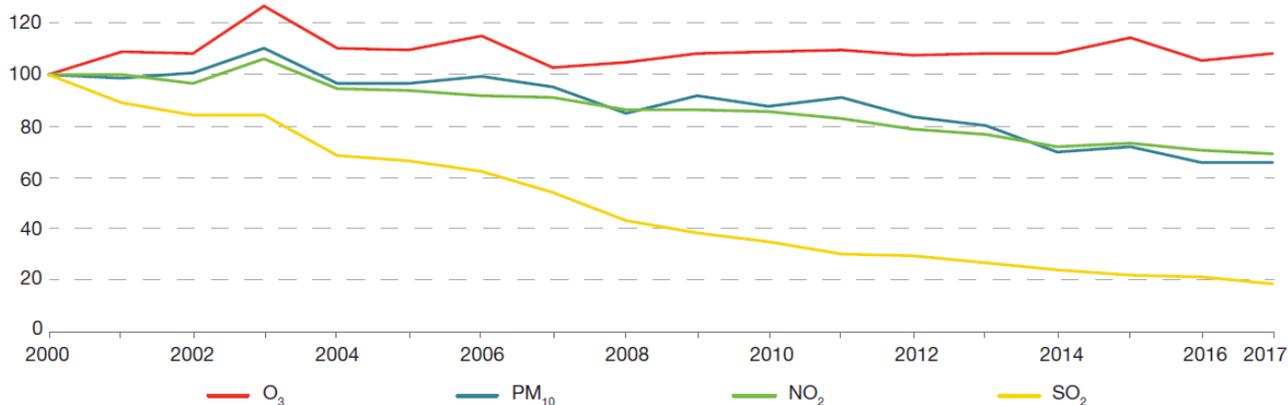
En France, les concentrations moyennes annuelles en PM_{10} sont en baisse de plus de 30 % et de près de 30 % pour le NO_2 à l'échelle nationale entre 2000 et 2017. Les concentrations moyennes annuelles en $PM_{2,5}$ sont également en baisse de plus de 30 % à l'échelle nationale entre 2009 et 2017. Les concentrations sont plus élevées à proximité du trafic routier (2 fois plus élevées pour le NO_2 et 1,2 fois pour les PM_{10} et $PM_{2,5}$) par rapport au fond urbain.

En situation de fond urbain, les concentrations moyennes annuelles en SO_2 ont fortement baissé sur la même période (80 %). Les concentrations maximales en SO_2 sont mesurées à proximité d'industries et sont en moyenne annuelle 1,8 fois plus élevées que celles mesurées en fond urbain.

L' O_3 est une problématique très marquée dans les pays de la zone méditerranéenne en raison de conditions météorologiques plus favorables à sa formation (émissions naturelles de composés organiques volatils, transport longue distance de pollution, rayonnement solaire et températures élevées). Les concentrations moyennes estivales en O_3 à l'échelle nationale sont en progression d'environ 10 % entre 2000 et 2017.

La Figure 3 présente l'évolution des concentrations en SO_2 , NO_2 , O_3 et PM_{10} sur la période 2000-2017 (CGDD, 2018).

En indice base 100 des concentrations en 2000



Notes : pour l' O_3 , les concentrations utilisées sont celles des périodes estivales (moyenne du 1^{er} avril au 30 septembre) ; la méthode de mesure des PM_{10} a évolué en 2007 afin d'être équivalente à celle définie au niveau européen. Malgré ce changement, la construction de l'indicateur ci-dessus permet de ne pas avoir de rupture de série.

Champ : France métropolitaine hors Corse.

Source : Géod'Air, juillet 2018. Traitements : SDES, 2018

Figure 3 : Evolution des concentrations en SO_2 , NO_2 , O_3 et PM_{10} sur la période 2000-2017 (CGDD, 2018)

Des épisodes de pollution surviennent chaque année en France et à des périodes différentes selon les polluants, caractérisés par le dépassement des seuils d'information ou d'alerte (cf. chapitre suivant 3.1.3) pour les indicateurs de pollution suivant : PM_{10} , NO_2 , SO_2 et O_3 . Parmi ces polluants, les épisodes les plus fréquents concernent les PM_{10} et surviennent en général en hiver et au printemps. Pour le NO_2 , ils sont en général observés en hiver mais sont peu fréquents.

Généralement, aucun épisode important au SO₂ n'est constaté. En effet, les hausses de concentrations observées se limitent aux zones industrielles et leurs durées n'excèdent pas quelques heures, ou sont liées à des événements naturels (éruptions volcaniques). Pour l'O₃, les épisodes interviennent de mai à septembre durant les périodes de fort ensoleillement.

L'Annexe 7 synthétise les connaissances sur les sources et niveaux de concentrations pour les polluants prioritaires traités dans cette expertise.

3.1.3 Réglementation et politiques publiques

Il existe différents outils réglementaires qui visent *in fine* à réduire la pollution de l'air. A la base, le droit européen fixe pour tous les États membres des obligations en matière de réduction des émissions et de respect de concentrations maximales dans l'atmosphère pour les principaux polluants.

La réglementation définit des valeurs contraignantes et des obligations, relevant du rôle de l'Etat. La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (appelée LAURE) n°96-1236 a transposé en droit français la directive communautaire 96/62/CE qui introduit un cadre pour le développement de la législation communautaire de la surveillance de la qualité de l'air. Elle a défini des outils de planification ainsi que le cadre de la surveillance en France. A la suite, des valeurs limites réglementaires (en moyenne annuelle, voir en période de pic) ont été fixées pour les polluants suivants : SO₂, NO₂, particules (PM₁₀), O₃, benzène, CO, benzo(a)pyrène (traceur du risque cancérigène des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)), As, Cd, Hg, Ni et Pb.

En 2008, la législation européenne s'est simplifiée et clarifiée en matière de qualité de l'air avec la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008 qui fusionne dans un seul acte la directive cadre de 1996 et 3 de ses directives filles (99/30/CE, 2000/69/CE et 2002/3/CE). Cette directive prévoit également des mesures relatives aux particules fines (PM_{2,5}). La dernière directive fille 2004/107/CE du 15 décembre 2004 relative à la fixation de valeurs limites pour les HAP et les métaux lourds est restée quant à elle en vigueur. En plus du benzo(a)pyrène, la réglementation demande de mesurer six autres HAP : benzo(a)anthracène, le benzo(b)fluoranthène, le benzo(j)fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène, l'indéno(1,2,3,c,d)pyrène et le dibenzo(a,h)anthracène.

Ces deux directives, modifiées à la marge (annexes) par la directive 2015/1480, fixent pour les polluants réglementés des objectifs pour la protection de la santé : valeurs limites, valeurs cibles, seuils d'information et de recommandation, seuils d'alerte, etc.

Le terme « Normes de qualité de l'air ambiant » fait référence à la réglementation française notamment aux articles L221-1 et R.221-1 du code de l'environnement. Il englobe différents types de valeurs réglementaires qui sont appliquées pour différents polluants atmosphériques et pour différents pas de temps (Figure 4). La surveillance de la qualité de l'air et donc du respect ou du dépassement de ces normes est confiée à des organismes agréés sur l'ensemble du territoire national, selon les objectifs de qualité et d'exigences européennes.

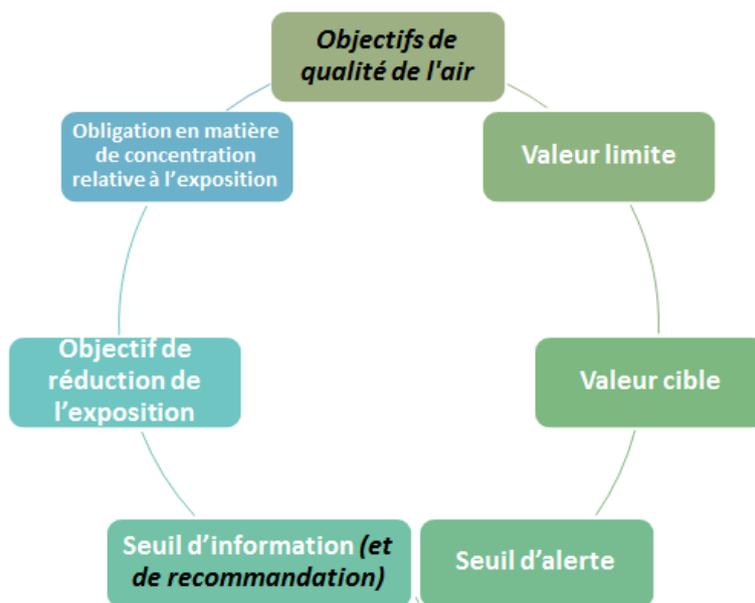


Figure 4 : Panorama des normes de qualité de l'air définies dans la réglementation française pour les polluants réglementés

Ces normes proviennent de la transposition des directives européennes mais également de spécificités françaises.

En 2016, 24 pays de l'Union européenne n'ont pas respecté au moins l'une des normes réglementaires de qualité de l'air pour la protection de la santé à long terme fixées pour les PM₁₀, le NO₂ ou l'O₃. À l'inverse, seuls 4 États membres ne dépassent aucune de ces normes. Les dépassements des normes en PM_{2,5} et en B[a]P sont plus importants dans les pays de l'Europe centrale et de l'Est.

En France, pour les PM₁₀, entre 2007 et 2016, jusqu'à 30 agglomérations françaises (3 en 2017) ont été annuellement concernées par des dépassements des valeurs limites annuelles pour la protection de la santé humaine. Pour le NO₂, entre 2000 et 2017, entre 12 et 37 agglomérations françaises (12 en 2017) ont présenté des dépassements des valeurs limites annuelle et horaire pour la protection de la santé humaine.

Les grandes agglomérations (de plus de 250 000 habitants), et dans une moindre mesure celles de taille moyenne (50 000 à 250 000 habitants), sont les plus concernées par ces dépassements de normes pour les PM₁₀ et le NO₂, majoritairement sur des stations situées à proximité du trafic routier.

Le SO₂ ne présente plus de dépassement depuis 2009, à l'exception d'un cas d'origine naturelle en 2015. Pour l'O₃, entre 25 et plus de 100 agglomérations françaises (28 en 2017) ont été annuellement concernées par des dépassements de la valeur cible pour la protection de la santé humaine. Contrairement au NO₂ et aux PM₁₀, les agglomérations les plus touchées sont celles de moyenne et de petite taille (de moins de 50 000 habitants).

Des recours en contentieux d'infraction à la réglementation européenne ont été lancés contre la France qui a reçu plusieurs avertissements de la Commission européenne (mise en demeure, avis motivé, saisine de la Cour de justice de l'Union européenne) entre 2009 et 2011 pour le non-respect des normes sanitaires de qualité de l'air fixées pour les PM₁₀. En février 2013, la Commission européenne a adressé à la France une mise en demeure complémentaire et a élargi ses griefs contre elle. Désormais, il est reproché à la France de ne pas se conformer aux niveaux réglementaires de concentrations de particules dans l'air et de ne pas mettre en place de plans

d'action répondant aux ambitions de la directive. La France a reçu un avis motivé en avril 2015 pour 10 zones⁹.

Concernant le NO₂, la France a reçu en février 2017 un avis motivé de la part de la Commission européenne pour dépassement des normes et insuffisance des plans d'action pour 13 zones¹⁰.

Dans sa décision du 12 juillet 2017, le Conseil d'État a enjoint à l'État de prendre, d'ici le 31 mars 2018, toutes les mesures nécessaires pour que soient respectées les normes de la qualité de l'air dans le délai le plus court possible.

Dans le cadre de la surveillance réglementaire, des zones ont été définies par arrêté¹¹ prenant en compte le nombre d'habitants ou une densité d'habitants au kilomètre carré ainsi que le dépassement potentiel des normes de qualité de l'air présentés précédemment (Figure 5). Dans les zones à risques (ZAG et ZAR) vivent une population totale de plus de 34 millions d'habitants avec une densité de plus de 100 habitants par km².

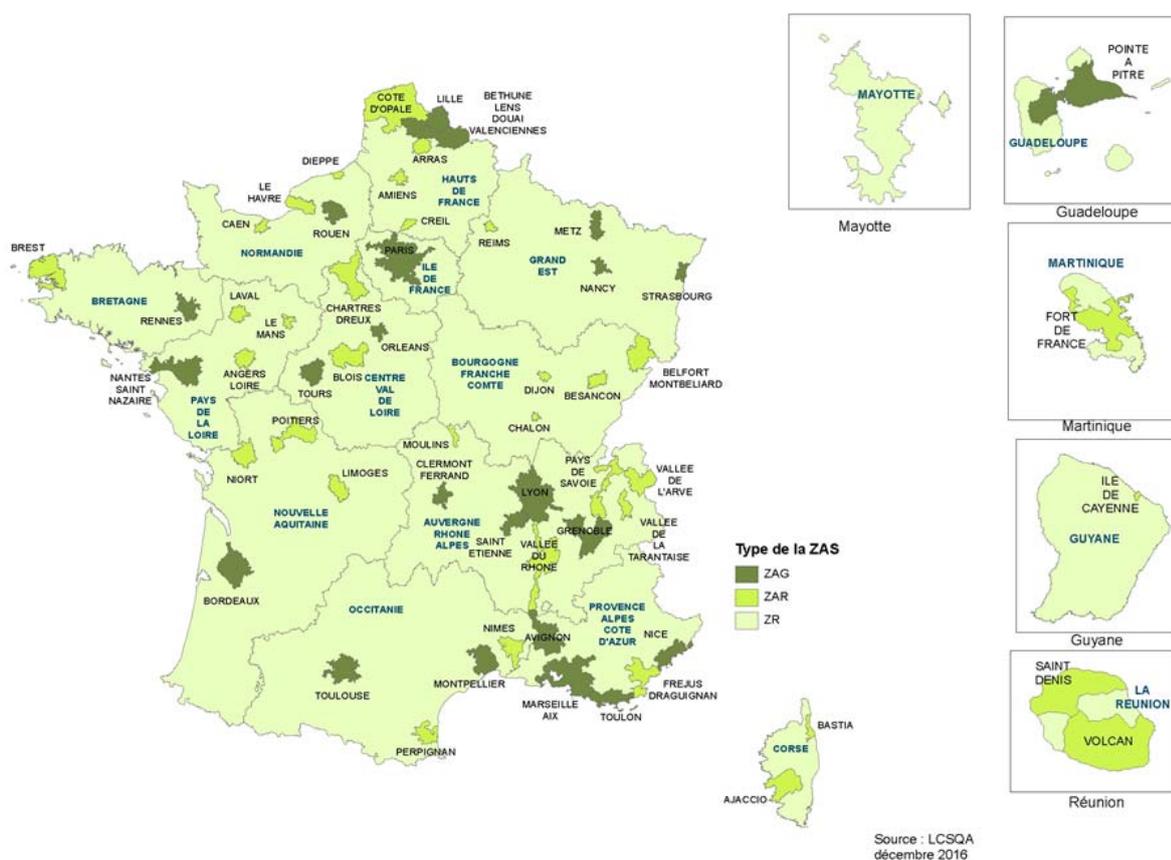


Figure 5 : Zones de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA, 2016)

ZAG : Zone à risques – agglomérations ; ZAR : Zone à risques – hors agglomérations ; ZR : Zone régionale

⁹ Douai-Béthune-Valenciennes, Grenoble, Lyon, Marseille, la Martinique, Nice, Paris, Toulon, la zone urbaine régionale Provence-Alpes- Côte d'Azur et la zone urbaine régionale de Rhône-Alpes

¹⁰ Paris, Lyon, Grenoble, Vallée de l'Arve, Saint-Etienne, Clermont-Ferrand, Marseille, Toulon, Nice, Strasbourg, Toulouse, Montpellier, Reims.

¹¹ Arrêté du 26 décembre 2016 relatif au découpage des régions en zones administratives de surveillance de la qualité de l'air ambiant

Concernant les pollens et moisissures dans l'air ambiant, ceux-ci font l'objet d'une surveillance réglementaire depuis 2016¹², notamment coordonnée par le Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA).

Outre la fixation de valeurs limites dans l'air ambiant et des objectifs à respecter en matière d'émissions de polluants à l'atmosphère, en particulier issus de directives européennes, la réglementation combine aussi des mesures fiscales, incitatives, des outils de planification à destination des collectivités, et une sensibilisation des acteurs. La Cour des comptes a évalué en 2016 les politiques publiques de lutte contre la pollution de l'air dressant notamment les mesures d'action initiées en France dans tous les secteurs d'activité (transports, industrie, agriculture, résidentiel) (Cour des comptes, 2015). Il est repris ci-dessous les actions aux différents niveaux qui sont également représentées sur la Figure 6 avec les multiples outils de planification dont certains intègrent indirectement la qualité de l'air.

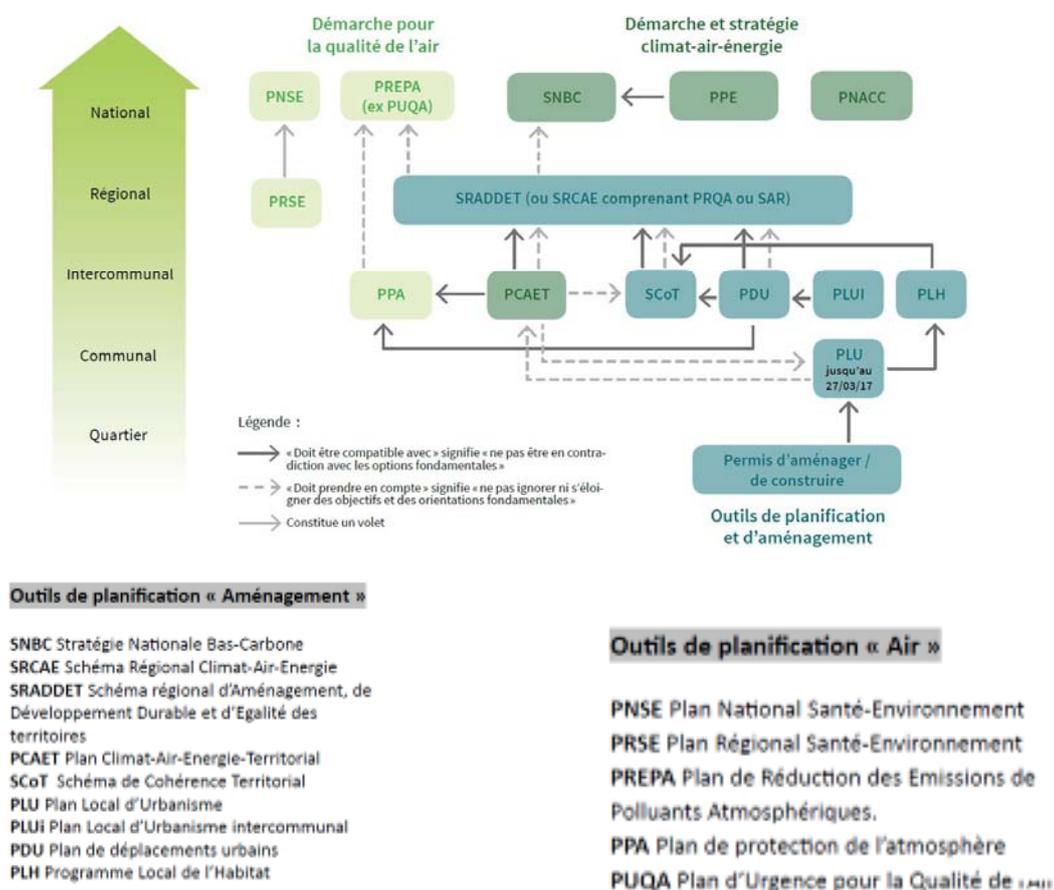


Figure 6 : Outils de planification en France contribuant à la mise en œuvre de la politique relative à la qualité de l'air (source : Ademe, 2016a)

¹² La loi de modernisation du système de santé et l'arrêté du 5 août 2016

Au-delà, la lutte contre la pollution atmosphérique a une dimension très fortement locale car les collectivités (régions, départements, groupements intercommunaux, communes) contribuent, en fonction de leurs compétences, à surveiller et à améliorer la qualité de l'air (organisation des transports, schéma régional climat air énergie, plan climat air énergie territorial, financements...) :

- Au niveau régional : A la suite des lois n°2014/58, appelée MAPTAM¹³ et n°2015/991, appelée NOTRe¹⁴, le Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) (élaboré par le Président du Conseil Régional), sous le pilotage du préfet de région et du président du conseil régional, est un document obligatoire de planification dont les règles générales sont prescriptives sur les documents d'urbanisme et de planification de rang inférieur. Le Conseil régional doit d'abord débattre des objectifs du schéma. Des acteurs du territoire (cf. Art. L. 4251-5.I du CGCT) sont associés à l'élaboration du projet de schéma et le Conseil régional peut consulter d'autres organismes ou personnes. Le projet est soumis pour avis aux métropoles et EPCI compétents en matière de PLU et PCAET, à l'autorité administrative de l'Etat compétente en matière d'environnement (DREAL) et à la Conférence territoriale de l'action publique, puis à enquête publique. Le schéma adopté (dans les trois années suivant la publication de l'ordonnance d'application), doit être approuvé par arrêté du représentant de l'Etat dans la région (Préfet).
- Au niveau local, les plans de protection de l'atmosphère (PPA) sont publiés par les préfets après concertation avec les collectivités locales et les parties prenantes. Les PPA définissent au niveau local¹⁵ les objectifs et les mesures, permettant de ramener, à l'intérieur des agglomérations de plus de 250 000 habitants et des zones où les valeurs limites réglementaires sont dépassées ou risquent de l'être, les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur à ces valeurs.

Les dispositions législatives les plus récentes dans le domaine de la pollution atmosphérique ont mis l'accent sur la réduction des émissions avec la mise en œuvre du plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (Prepa) depuis mai 2017 et des PPA.

En mars 2018, des feuilles de route ont été proposées au niveau local à la demande du ministre d'État en charge de l'écologie, pour compléter les PPA en réponse à la Commission européenne suite à la réunion du 30 janvier 2018 des ministres de l'écologie de l'Union européenne¹⁶ et au Conseil d'Etat suite à sa décision contentieuse du 12 juillet 2017¹⁷. Leurs objectifs sont de définir des actions concrètes de court terme permettant d'enregistrer rapidement des progrès, en renforçant les moyens mobilisés en faveur de la qualité de l'air. Les feuilles de route portent sur

¹³ Loi du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM)

¹⁴ Loi du 7 août 2015 portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe)

¹⁵ les zones concernées par un PPA sont : Auvergne-Rhône-Alpes : Chambéry, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, Saint-Etienne, Vallée de l'Arve ; Bretagne : Rennes ; Bourgogne-Franche-Comté : Belfort, Dijon, Chalon-sur-Saône ; Centre-Val de Loire : Orléans, Tours ; Corse : Bastia ; Grand-Est : Reims, Trois-Vallées, Nancy, Strasbourg ; Hauts-de-France : Creil, Nord-Pas de Calais ; Ile de France ; Martinique ; Normandie : Eure et Seine-Maritime ; Nouvelle Aquitaine : Bayonne, Bordeaux, Dax, Niort, Pau, Poitiers ; Occitanie : Montpellier, Nîmes, Toulouse ; Pays de la Loire : Nantes-Saint-Nazaire, Provence-Alpes-Côte d'Azur : Alpes-Maritimes du Sud, Avignon, Bouches du Rhône, Toulon

¹⁶ https://ec.europa.eu/commission/commissioners/2014-2019/vella/announcements/press-statement-commissioner-karmenu-vella-following-air-quality-ministerial-meeting-brussels-30_en

¹⁷ <http://www.conseil-etat.fr/Decisions-Avis-Publications/Decisions/Selection-des-decisions-faisant-l-objet-d-une-communication-particuliere/CE-12-juillet-2017-Association-Les-Amis-de-la-Terre-France>

une série d'actions dans tous les domaines d'activité, notamment : transports, chauffage, urbanisme, agriculture, industrie, sensibilisation des acteurs.

Le site du ministère chargé de l'écologie donne les exemples suivants de mesures réglementaires figurant dans les PPA prises par arrêté préfectoral :

- réduction pérenne de la vitesse sur des tronçons autoroutiers ;
- interdiction des feux de forêt et de l'écobuage dans le périmètre du PPA ;
- abaissement des valeurs limites à l'émission applicables aux installations soumises à déclaration sous la rubrique n°2910 et utilisant de la biomasse (installations de combustion).
- mise en place de plans de déplacement d'entreprises ;
- renforcement de la prise en compte de la qualité de l'air dans les plans de déplacement urbains ;
- création et aménagement des aires de covoiturage ;
- mise en place d'un fonds de renouvellement des appareils de chauffage peu performants ;
- sensibilisation des acteurs locaux.

Les collectivités ont la possibilité de créer des zones à circulation restreinte (ZCR¹⁸) pour les véhicules les plus polluants, sur tout ou partie de leur territoire. Cela a été mis en place à Paris, Strasbourg et Grenoble avec des interdictions de circulation en journée dans le cas de Paris.

3.2 Pollution de l'air intérieur

A la différence de la pollution de l'air extérieur, plus médiatisée, celle de l'air intérieur est restée relativement méconnue jusqu'au début des années 2000.

Pourtant, en climat tempéré, nous passons en moyenne 85 % de notre temps dans des environnements clos : habitat (temps majoritaire), locaux de travail ou destinés à recevoir du public, moyens de transport, espaces récréatifs dans lesquels nous pouvons être exposés à de nombreux polluants.

Les éléments présentés dans ce chapitre sont largement extraits de travaux antérieurs de l'Anses (Anses, 2017b).

3.2.1 Généralités sur les polluants de l'air intérieur

La qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments constitue une préoccupation de santé publique en France et dans de nombreux pays. En effet, l'environnement intérieur offre une grande diversité de situations d'exposition à de nombreux agents physiques et contaminants chimiques ou microbiologiques, dont les conséquences sur la santé sont variables. Différentes sources peuvent être à l'origine de la présence de polluants dans l'air intérieur : des éléments du bâti, des équipements intérieurs, le comportement et les activités des occupants, l'environnement extérieur.

Depuis quelques années, une attention croissante est portée à la question de la qualité de l'air dans les bâtiments avec en particulier la mise en place d'une surveillance dans certains établissements recevant du public (ERP). Les mesures de politiques publiques pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur se sont déclinées depuis 2004 dans le cadre du plan national santé environnement (PNSE). Les différents plans (PNSE 1 2004-2008 ; PNSE 2 2009-2014 ; PNSE3

¹⁸ Décret n° 2016-847 du 28 juin 2016 relatif aux zones à circulation restreinte. Le projet de loi d'orientation des mobilités renommara ce dispositif en « zone à faibles émissions » (ZFE).

2015-2019) ont intégré des actions qui visaient à améliorer les connaissances dans ce domaine et à limiter les sources de pollution à l'intérieur des bâtiments, mais aussi des actions sur la construction des bâtiments et la maîtrise des installations de ventilation et de climatisation. Des actions à court, moyen et long terme afin d'améliorer la qualité de l'air dans les espaces clos ont été proposées en octobre 2013 par les ministères chargés des questions relatives à l'écologie et à la santé lors du lancement du Plan d'actions sur la qualité de l'air intérieur aux deuxièmes assises nationales de la qualité de l'air. Celles-ci constituent le volet sur l'air intérieur du troisième Plan national santé-environnement (PNSE3 2015-2019).

Les problèmes de santé liés à la pollution de l'air intérieur recouvrent un large spectre de manifestations cliniques, qui sont pour la plupart non spécifiques. On recense des manifestations allergiques, des problèmes inflammatoires, des infections et des troubles cardiovasculaires ou neurologiques et des intoxications létales ou invalidantes. Certains des polluants identifiés dans l'air l'intérieur sont par ailleurs classés comme des cancérogènes avérés ou probables par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC).

Les effets sur la santé se distinguent selon le type d'exposition :

- les effets souvent immédiats liés à une exposition de courte durée à de fortes concentrations en polluants. Les intoxications aiguës au monoxyde de carbone en sont la principale illustration,
- les effets apparaissant suite à une exposition de longue durée à de faibles concentrations de polluants ou suite à une accumulation de la substance dans l'organisme.

Les études épidémiologiques sur le lien entre pollution de l'environnement intérieur et effets sanitaires se développent depuis quelques années. Elles ont tout d'abord porté sur les expositions à la fumée de tabac environnementale et aux biocontaminants, principalement les allergènes et les moisissures, et plus récemment sur les polluants chimiques comme les aldéhydes. Ces études suggèrent un lien entre l'exposition à des polluants de l'air intérieur en France et la survenue d'effets respiratoires (Annesi-Maesano *et al.* 2012, Billionnet *et al.* 2011).

Enfin, une étude exploratoire du coût socio-économique de la pollution de l'air intérieur a été conduite par l'Anses, l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) et Pierre Kopp, Professeur d'économie de l'université Sorbonne Panthéon I, estimant à environ 19 milliards d'euros pour une année le coût de la pollution de l'air intérieur (Anses 2014c). Cette étude illustre bien les conséquences de cette pollution pour la collectivité, correspondant aux coûts de l'impact sanitaire généré par les 6 polluants retenus¹⁹ (coût estimé des décès prématurés, de la prise en charge des soins, des pertes de productions, etc.).

3.2.2 Sources

La qualité de l'air intérieur dépend de l'intensité des émissions provenant des sources de pollution présentes à l'intérieur comme à l'extérieur, du taux de renouvellement de l'air et des réactions physico-chimiques pouvant se produire dans l'air intérieur.

Outre la pollution d'origine extérieure (polluants atmosphériques urbains en général, mais aussi radon, pollens et micro-organismes), les sources de pollution intérieure sont multiples :

- Les équipements fonctionnels : appareils à combustion (chaudière, cuisinière à gaz, chauffe-eau : émissions de monoxyde de carbone et, de dioxyde d'azote), appareils de chauffage (émission d'HAP lors de la combustion de bois, de charbon), équipements électriques (production d'ozone par des imprimantes laser) ;

¹⁹ Benzène, trichloroéthylène, radon, monoxyde de carbone, particules et fumée de tabac environnementale

- Les constituants structurels du bâtiment : matériaux isolants et faux plafonds, revêtements de sols, plaques murales...;
- Les éléments décoratifs et mobilier (formaldéhyde et autres composés organiques volatils (COV) émis par exemple par les panneaux en bois agglomérés, les moquettes ; phtalates émis par les sols et les papiers muraux plastifiés ; acariens présents dans les poussières de literies et de moquette...).
- Les occupants et leurs activités : tabagisme, utilisation de produits ménagers, bricolage, animaux de compagnie, *etc.*
 - La fumée de tabac environnementale (ou tabagisme passif) en particulier est exhalée par le fumeur ou émise par des cigarettes, pipes ou cigares qui se consomment. Cette fumée contient plus de 4 000 substances : monoxyde d'azote, benzène, monoxyde de carbone, ammoniac, acide cyanhydrique, métaux lourds, *etc.*
 - Les produits ménagers sont d'importantes sources de COV ; l'emploi de produits biocides (ex : produits de traitement du bois) et/ou de produits phytosanitaires (traitement des plantes) constituent notamment des sources d'émissions polluantes. Les désodorisants d'intérieur, les bougies, encens *etc.* sont également des sources de pollution susceptibles de libérer entre autres, des COV.
 - Le bricolage conduit à l'usage de peintures, laques, résines, papiers, vernis, colle, et autres produits susceptibles de libérer des COV ainsi que des particules (ponçage, perçage, ...) et des fibres.

Des travaux d'expertise de l'Anses axés sur la réduction des émissions de polluants à leur source ont été réalisés. Il s'agit par exemple de la procédure de qualification des émissions de composés organiques volatils par les matériaux de construction et produits de décoration (Afsset 2006 ; 2009c) qui permet de valoriser les matériaux « faiblement émissifs » sur la base d'essais normalisés. Dans la continuité de ces travaux, et dans un contexte d'élaboration de la réglementation applicable aux meubles, l'Anses a également travaillé sur les substances émises par les produits d'ameublement (Anses, 2015).

3.2.3 Réglementation et politiques publiques

La réglementation française dans le domaine de la qualité de l'air intérieur repose à la fois sur la prévention de la santé publique associée à certains polluants (amiante, radon, monoxyde de carbone (CO), tabagisme passif) mais aussi sur les engagements du Grenelle de l'environnement suivants (Figure 7).



Figure 7 : Grandes lignes de la réglementation française pour certains polluants et celle faisant suite aux engagements du Grenelle de l'environnement

La surveillance de la qualité de l'air intérieur dans les établissements recevant du public a été mise en place progressivement notamment dans les établissements accueillant des enfants²⁰. L'évaluation des moyens d'aération²¹, la mesure de polluants (formaldéhyde, benzène et éventuellement tétrachloroéthylène si l'établissement est contigu à une installation de nettoyage à sec) et du dioxyde de carbone en tant qu'indicateur de confinement sont proposés avec des dispositions particulières de prévention de la qualité de l'air²².

²⁰ Décret 2011-1728 du 2 décembre 2011 et décret n° 2015-1000 du 17 août 2015

²¹ Décret n° 2015-1926 du 30 décembre 2015

²² <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/sites/default/files/Guide-complet-QAI-web.pdf>

D'autres établissements seront également visés par la réglementation à d'autres échéances (Article R221-3 du code de l'environnement). Il s'agit des structures sociales et médico-sociales et les structures de soins de longue durée; des établissements pénitentiaires pour mineurs, des quartiers pour mineurs des maisons d'arrêt ou des établissements pour peines et enfin des établissements d'activités physiques et sportives couverts dans lesquels sont pratiquées des activités aquatiques, de baignade ou de natation.

L'étiquetage obligatoire des produits de construction et d'ameublement ainsi que des revêtements muraux et de sol, des peintures et vernis qui émettent des substances dans l'air a été proposé et inscrit dans le code de l'environnement²³.

La réglementation en France concerne pour le moment les produits de construction et de décoration et les produits désodorisants à combustion avec un étiquetage obligatoire mais dont les modalités sont différentes :

- Pour les produits de construction et de décoration, il s'agit d'une information sur les **émissions en COV** ;
- Pour les produits désodorisants à combustion²⁴, il s'agit d'une information sur les **précautions d'usage**.

Une étude de benchmark international des politiques publiques pour améliorer la qualité de l'air intérieur financée par l'Ademe a permis de recenser 265 programmes issus de 24 pays et d'analyser une dizaine d'actions ou incitations pour réduire l'exposition des populations à la pollution de l'air intérieur (Ademe, 2017a).

La prise en compte de la pollution atmosphérique ressort dans les actions relatives à la construction et à la rénovation des bâtiments ainsi que celles relatives à la surveillance de la qualité de l'air intérieur :

- Exigences en termes de conception et de vérification des installations de ventilation : en Finlande et aux Etats-Unis d'Amérique avec des distances minimales entre par exemple la bouche d'aération et des sources de pollution à respecter ;
- Surveillance systématique et périodique obligatoire de la qualité de l'air intérieur : Portugal avec la mesure des PM_{2,5}, PM₁₀ et moisissures et la Corée du Sud avec la mesure des PM₁₀, ainsi que NO₂ et O₃, par rapport aux polluants traités en priorité dans cette expertise. Ces dispositifs de surveillance concernent différents types de bâtiments recevant du public. Un focus particulier sur les espaces ferroviaires souterrains au regard des valeurs maximales fixées en Corée du Sud a été fait par rapport à la surveillance des concentrations particulières.

²³ Article L221-10

²⁴ <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/affichage-d-informations-sur-les-precautions-d-a1283.html>

3.3 Construction

3.3.1 Le parc français : volume et évolution

L'annexe 8 présente des données détaillées quant au parc de bâtiments français et à son évolution. En 2013, les logements représentaient environ 73% des 3,5 milliards de mètres carrés du parc de bâtiments résidentiels et tertiaires²⁵.

En moyenne, le parc de bâtiments tertiaires croît chaque année de moins de 1% en volume.

En l'absence de données quant à l'évolution du parc de logements en mètres carrés, un examen de la répartition des logements par tranche d'âge permet d'établir qu'en 2013 plus de 82% des mètres carrés de logements datent d'avant 1999. Entre 1999 et 2013, la surface de logements a par conséquent augmenté à raison de 1,3% par an en moyenne.

Le faible taux de construction induit que **le parc de bâtiment en France est relativement ancien et se renouvelle lentement.**

3.3.2 Réglementations de la construction en lien étroit avec les transferts de polluants

Parmi les caractéristiques techniques du parc susceptibles de jouer un rôle dans le transfert, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et les caractéristiques (type et dimensionnement) du système de ventilation apparaissent cruciales. Des éléments d'information plus détaillés sont fournis en Annexe 9.

Au niveau de la construction, les exigences réglementaires issues des engagements du Grenelle de l'environnement (2007) reposent sur la réglementation thermique RT 2012 qui s'applique depuis le 1^{er} janvier 2013 à toutes les constructions neuves (sauf quelques cas particuliers). Le ministère chargé de l'environnement affiche l'objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments en suscitant une évolution technologique pour les filières du bâti et des équipements et une qualité énergétique du bâti.

La RT 2012 se fonde sur des exigences de résultats pour la performance énergétique du bâtiment et sur quelques exigences de moyens (perméabilité à l'air attestée, traitement des ponts thermiques, recours aux énergies renouvelables, surface minimale de baies vitrées...) :

- Dans le secteur résidentiel, elle prescrit un niveau d'étanchéité à l'air à atteindre soumis à des vérifications par mesures à réception. Les mesures à réception systématiques peuvent être remplacées par une démarche qualité certifiée ;
- Dans le secteur non-résidentiel, la réglementation incite à une amélioration de l'étanchéité à l'air en permettant aux constructeurs de remplacer, par une valeur plus favorable, la valeur par défaut du calcul réglementaire. Dans ce cas, la valeur de substitution doit être confirmée par une mesure à la réception.

²⁵ Le secteur tertiaire est composé d'une part du tertiaire principalement marchand (commerce, transports, activités financières, services rendus aux entreprises, services rendus aux particuliers, hébergement-restauration, immobilier, information-communication) et d'autre part du tertiaire principalement non-marchand (administration publique, enseignement, santé humaine, action sociale). Le périmètre du secteur tertiaire est de fait défini par complémentarité avec les activités agricoles et industrielles (secteurs primaire et secondaire).

La performance énergétique repose sur la consommation d'énergie primaire conventionnelle limitée à 50 kWhep/m².an définie comme la valeur moyenne du label « bâtiments basse consommation » (BBC), et qui constitue à présent la référence dans la construction neuve.

Le chapitre 2 du Titre IV de la loi 2018-1021 du 23/11/2018 sur l'évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (loi ELAN) comporte plusieurs modifications de la partie législative du code de la construction et de l'habitation. En particulier, en son article 181, elle ajoute la préservation et l'amélioration de la qualité de l'air intérieur comme un objectif que la réglementation des constructions neuves doit poursuivre.

L'article 182 de la loi ELAN introduit l'obligation de création pour tout logement d'un carnet numérique d'information, de suivi et d'entretien de ce logement. Ce carnet devra notamment permettre de connaître l'état du logement et du bâtiment, lorsque le logement est soumis au statut de copropriété, ainsi que le fonctionnement de leurs équipements, et d'accompagner l'amélioration progressive de leur performance environnementale. La mise en œuvre de ces dispositions relève de futurs décrets qui doivent être proposés en conseil d'Etat.

L'article 49 de la loi pour un Etat au service d'une société de confiance (ESSOC) promulguée en aout 2018 habilite le gouvernement pour prendre, dans un délai de 18 mois, toute mesure relevant du domaine de la loi visant à faciliter la réalisation de projets de construction. Une nouvelle rédaction des règles de construction devrait, à terme, mieux expliciter les objectifs poursuivis. Il n'est pas, *a priori*, envisagé dans ce cadre de renforcer les exigences en faveur de la qualité de l'air intérieur.

Le guide « Construire sain » des ministères chargés de l'écologie et du logement présente les textes de référence ainsi que les méthodes à appliquer aux différentes étapes d'un projet de construction ou de rénovation (MEDDE, 2013). Les points clés des préconisations formulées dans ce guide pour prendre en compte la qualité de l'air sont synthétisés dans la Figure 8.

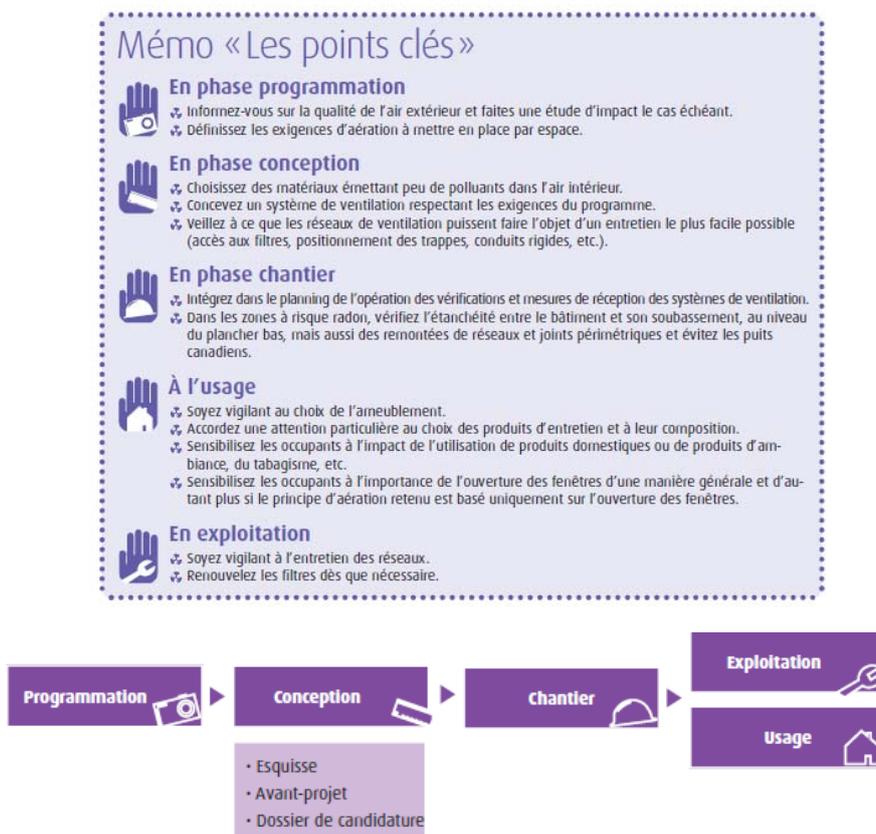


Figure 8 : Synthèse des bons gestes à chaque étape d'un projet de construction ou de rénovation pour prendre en compte la qualité de l'air (Source : MEDDE, 2013)

Le cadre réglementaire de l'aération et de la ventilation dans les bâtiments a beaucoup évolué depuis le début du 20^{ème} siècle, notamment avec la prise de conscience de l'importance d'une bonne ventilation pour préserver la santé des occupants et la pérennité du bâti. Le premier texte remonte à 1955 (Décret 55-1394) ; il prévoit une aération pour la cuisine et la pièce principale et l'obligation d'aération permanente lorsque les baies du logement donnent sur une même façade. Les dispositions en matière d'aération consistent notamment en des tailles minimales d'ouvrants ou des volumes minimaux de locaux, des exigences relatives aux grilles d'entrée ou de sortie d'air, aux conduits de ventilation naturelle, ainsi que des valeurs de débits minimaux d'air extrait (habitat) ou d'air neuf entrant (bâtiments autres que d'habitation). Les sujets énergétiques ont également modifié l'orientation des textes en voulant limiter les pertes thermiques par renouvellement d'air. Des réglementations successives (Cf. Annexe 9) sont venues renforcer le niveau d'exigence. Des réglementations différentes s'appliquent aux logements, aux locaux de travail et aux établissements recevant du public.

Sauf exception, les réglementations mises en place successivement s'appliquent uniquement aux bâtiments qui sont construits postérieurement. Ainsi, bien que nécessaires, les exigences réglementaires applicables à la construction des bâtiments neufs nécessitent plusieurs décennies pour se généraliser. La recherche d'**une augmentation rapide des performances du parc de bâtiments impose une action sur les bâtiments existants, par nature plus complexe, techniquement et politiquement**. Cette complexité n'est pas sans conséquence d'un point de vue économique, tant pour les acteurs privés que pour les dépenses publiques qui interviennent dans le cadre d'incitations financières.

3.3.3 Caractéristiques techniques du parc

Comme indiqué précédemment, la réglementation applicable à un bâtiment donné dépend de sa typologie et de sa date de construction. Cependant, un même niveau réglementaire peut être atteint avec des systèmes variés (systèmes par extraction auto-réglable ou hygro-réglables, double-flux, etc.) ayant un comportement probablement différent d'un point de vue des transferts extérieur-intérieur.

Les constats réalisés par l'OQAI et lors des contrôles d'application du règlement de la construction révèlent de nombreuses non-conformités, y compris dans les bâtiments récents. Ces non-conformités se traduisent par des dysfonctionnements des systèmes avec des débits de renouvellement d'air parfois très inférieurs (ou très supérieurs) au niveau réglementaire attendu.

Si l'on ajoute à ces éléments les travaux réalisés par les occupants de bâtiment et l'incidence des pratiques de maintenance, **il est très aléatoire de chercher à caractériser un bâtiment à partir de quelques éléments simples tels que le type d'occupation et sa date de construction**.

L'annexe 10 présente néanmoins quelques bribes de connaissances, d'une part, sur les niveaux d'étanchéité de l'enveloppe et les causes les plus fréquentes de défaut d'étanchéité, et d'autre part, sur les systèmes de ventilation couramment rencontrés.

Concernant plus spécifiquement les systèmes de ventilation, un bâtiment répond fondamentalement à l'objectif de créer un environnement protégé des éléments extérieurs. Les exigences sur cet environnement intérieur portent en particulier sur le confort (température, humidité, etc.) et sur la santé (qualité de l'air intérieur, etc.).

Si l'air intérieur n'est pas suffisamment renouvelé, l'enveloppe du bâtiment peut créer un environnement confiné qui n'élimine pas les pollutions produites à l'intérieur du bâtiment. Outre les conséquences sur la santé des occupants, l'accumulation d'humidité et les phénomènes de condensation peuvent altérer le bâtiment dans le temps.

Dans le même temps, un renouvellement d'air trop important peut altérer la performance énergétique des bâtiments. Par ailleurs, les systèmes qui assurent le renouvellement d'air doivent prendre en considération d'autres facteurs comme la sécurité incendie ou le confort acoustique.

➤ Principe général de fonctionnement de la ventilation

Le renouvellement de l'air intérieur peut se faire, de manière concomitante ou pas, :

- par un transfert d'air via les fuites d'étanchéité résiduelles de l'enveloppe,
- par aération, par exemple par l'ouverture volontaire d'une fenêtre,
- par un système de ventilation visant à produire un renouvellement d'air maîtrisé, utilisant des dispositifs prévus à cet effet, tels que des conduits, des bouches, etc.

Dans les bâtiments anciens, l'aération constituait, avec les fuites d'étanchéité de l'enveloppe, le mode principal du renouvellement d'air. Dans les bâtiments actuels qui disposent d'un véritable système de ventilation, l'aération demeure un complément nécessaire à la ventilation lors d'épisodes plus intenses de pollution intérieure qui ne peuvent être évités (entretien ménager, travaux engendrant des poussières, etc.).

Le principe général du renouvellement d'air consiste en :

- Une amenée d'air frais (air extérieur) dans des zones à pollution non spécifique, c'est-à-dire les locaux dans lesquels la pollution est liée à la seule présence humaine,
- Un transfert d'air depuis les zones à pollution non spécifique vers les zones à pollution spécifique²⁶, c'est-à-dire les locaux dans lesquels gaz, vapeurs, aérosols solides ou liquides autres que ceux qui sont liées à la seule présence humaine sont susceptibles d'être émis.
- Une évacuation de l'air vicié dans les zones à pollution spécifique.

Ce sens de circulation permet de limiter la contamination de parties *a priori* non-polluées.

A l'intérieur du bâtiment, les mouvements d'air sont engendrés par des différences de pressions (déplacement depuis les hautes pressions vers les basses pressions). Ces différences de pressions peuvent avoir différentes origines, naturelles et/ou mécaniques.

- Le tirage thermique : si l'air dans un conduit est plus chaud et plus léger que l'air extérieur, il s'échappe en partie haute et instaure une dépression en partie basse, proportionnelle à la hauteur du conduit et à la différence de température entre intérieur et extérieur ;
- L'effet du vent : quand il rencontre un bâtiment, le vent comprime l'air sur les parois qui lui font face et crée des dépressions sur les autres. Les entrées d'air et débouchés de conduits en toiture sont alors soumis à des pressions différentes, qui entretiennent une mise en mouvement de l'air dans le bâtiment ;
- Des dispositifs mécaniques : un équipement, le plus souvent un ventilateur, crée une dépression à la sortie d'air ou une surpression à l'entrée d'air, voire une combinaison des deux.

²⁶ La terminologie employée de « locaux à pollution spécifique/non-spécifique » vise à généraliser les concepts applicables aux logements, locaux de travail et ERP. Il est rappelé la définition des locaux à pollution spécifique de l'Article 63.1 du RSDT. Les locaux dits « à pollution spécifique » : cuisines, salles d'eau, cabinets d'aisances et tous autres locaux où existent des émissions de produits nocifs ou gênants autres que ceux liés à la seule présence humaine (notamment certains laboratoires et locaux où fonctionnent des appareils susceptibles de dégager des polluants gazeux non rejetés directement à l'extérieur, tels le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone, l'ammoniac, l'ozone).

➤ Typologies de systèmes

On distingue 4 principaux types de systèmes :

- les systèmes de ventilation naturelle, pour lesquels l'amenée d'air se fait généralement en façade et l'évacuation de l'air vicié par des conduits verticaux en toiture,
- les systèmes de ventilation par insufflation, pour lesquels l'amenée d'air est forcée par un dispositif mécanique, et l'évacuation de l'air vicié se fait par des grilles en façade et/ou par des conduits verticaux,
- les systèmes de ventilation par extraction, pour lesquels l'évacuation est forcée par un dispositif mécanique et l'entrée d'air se fait par la façade,
- les systèmes de ventilation double-flux, où insufflation et extraction se font par un dispositif mécanique.

Les dispositifs mécaniques d'extraction peuvent être centralisés et raccordés aux locaux par des conduits, ou se matérialiser par des petits moteurs intégrés aux bouches et grilles disposées en façade.

➤ Répartition des types de systèmes dans les logements

L'OQAI a réalisé une étude statistique des systèmes de ventilation présents dans le parc de logement français. La répartition des systèmes, par type de système et par tranche d'âge, est présentée dans le Tableau 1 (distribution de chaque type de système par tranche d'âge) et le Tableau 2 (distribution des systèmes dans chaque tranche d'âge).

Tableau 1 : Distribution représentée des logements pour chaque type de ventilation en fonction des classes d'âges de fin de construction. En pourcentage par colonne (Source : OQAI, 2009)

Fin de construction	Aucun dispositif	Ventilation naturelle	Moteurs dans quelques pièces	Ventilation mécanique (simple et double flux)
Avant 1871	9,9	4,9	14,7	1,3
De 1871 à 1914	25,8	15,2	16,0	6,0
De 1915 à 1948	26,8	11,3	21,4	4,9
De 1949 à 1961	12,1	16,0	12,3	4,8
De 1962 à 1967	4,5	11,9	3,2	4,9
De 1968 à 1974	4,5	21,9	10,1	12,5
De 1975 à 1981	6,1	10,5	9,5	18,2
De 1982 à 1989	5,4	7,5	8,0	17,0
De 1990 à 2003	4,8	0,9	4,9	30,5
TOTAL (Colonnes)	100	100	100	100

Tableau 2 : Parts représentées des logements pour chaque classe de fin de construction en fonction des types de ventilation. En pourcentage par lignes. (Source : OQAI, 2009)

Fin de construction	Aucun dispositif	Ventilation naturelle	Moteurs dans quelques pièces	Ventilation mécanique (simple et double flux)	TOTAL (Lignes)
Avant 1871	37,9	23,7	8,3	30,2	100
De 1871 à 1914	38,7	36,6	10,1	14,6	100
De 1915 à 1948	43,2	29,2	14,6	12,9	100
De 1949 à 1961	23,9	50,7	10,2	15,3	100
De 1962 à 1967	13,6	58,1	4,1	24,2	100
De 1968 à 1974	7	54,7	6,6	31,7	100
De 1975 à 1981	10,8	29,8	7	52,4	100
De 1982 à 1989	11,2	24,9	6,9	57	100
De 1990 à 2003	8,3	2,4	3,5	85,8	100

Les systèmes de ventilation existants dans le parc de logement sont fondamentalement liés aux réglementations depuis 1958. Toutefois il convient de ne pas perdre de vue que ces réglementations ne couvrent que l'habitat neuf et qu'une partie du parc a été réhabilitée. De ce fait, des systèmes de ventilation sont présents dans des tranches d'âge de logements pour lesquelles ces systèmes n'étaient pas demandés par la réglementation (OQAI, 2009).

Parmi les logements construits après 1990, près de 12 % (9,3 % individuel + 2,5 % collectif) ne disposent d'aucun système de ventilation ou sont ventilés par ventilation partielle (moteurs de ventilateurs dans quelques pièces), et ne sont pas réglementaires. Ce constat peut aussi être fait sur les périodes 1975-1981 et 1982–1989 : près de 18 % des logements construits dans ces deux périodes sont dans la même situation ne respectant pas le principe de la ventilation générale et permanente (~15,8 % individuel + ~2,2 % collectif) (OQAI, 2009).

Concernant les bâtiments récents, les données de l'observatoire de la RT 2012 (<http://observatoire.rt-2012.com/>) portant sur plus de 30 000 études font état d'une large prédominance de systèmes de ventilation mécanique simple-flux (11,8 % de type hygro A et 70,4% de type hygro B contre seulement 17,8% de VMC double-flux), avec donc des entrées d'air réparties sur les façades.

3.4 Urbanisme

3.4.1 Généralités sur l'urbanisme

L'urbanisme constitue les règles et les outils de l'aménagement du territoire, par lesquels sont dessinés les espaces, les volumes, les infrastructures, les flux de personnes, les lieux de vie etc. d'un territoire (Roue-Le Gall et al., 2014). La conception des espaces à aménager induit ainsi des projets d'infrastructures et de construction sur les territoires qui peuvent concentrer ou étaler des sources d'émissions de polluants atmosphériques. Les tensions entre « densification » urbaine et « concentration des sources de pollutions » sont régulièrement observables dans les projets d'urbanisme. La lutte contre l'étalement urbain, à laquelle les documents de planification conduisent, et donc l'obligation de « densifier » l'habitat par exemple, peut conduire à accentuer des expositions aux polluants atmosphériques sur des secteurs urbains, et à augmenter des transferts dans les établissements de proximité (habitat, secteur tertiaire). C'est en conséquence la qualité de l'air extérieur (sources de pollution urbaine) dégradée qui peut contribuer à la qualité de l'air intérieur par voie de transfert.

Il est à noter que le code de l'urbanisme spécifie les règles relatives à la construction en tant que structures dans le cas de l'absence d'un plan local d'urbanisme (PLU) ou document de planification. Les règles générales du code de l'urbanisme portent sur :

- la localisation et la desserte des constructions (prise en compte de la sécurité, de la salubrité, des **mesures du bruit et de la voirie** et des réseaux divers) ;
- les conditions **d'implantation** et le volume des constructions ;
- les règles relatives à l'aspect des constructions (notamment pour préserver les sites et les paysages naturels, agricoles ou urbains).

Le code de la construction et de l'habitation présente des règles relatives à la conception des bâtiments en s'en tenant à leur alignement (aucune construction ne peut être élevée en bordure d'une voie publique sans être conforme à l'alignement), à leur empiètement possible sur la voirie publique dans la partie législative. Seuls les aspects « qualité environnementale » (origine des matériaux de construction)²⁷ et d'« efficacité énergétique » et donc de confort thermique font l'objet de règles de diagnostic (Articles R131-25 à R131-28-6). Par ailleurs, il existe des sanctions possibles relatives aux manquements à des mesures de contrôle applicables à toutes les catégories de bâtiments quant aux risques d'intoxications par le monoxyde de carbone (Article R*152-11). La question de la qualité de l'air n'y apparaît donc pas véritablement, hormis le risque lié au monoxyde de carbone.

Il est intéressant de noter que l'établissement des cartes de bruit, par les collectivités locales de plus de 100 000 habitants (directive 2002/49/CE) permet de visualiser les secteurs les plus exposés à des niveaux sonores, lesquels sont très similaires aux niveaux d'exposition les plus élevés aux polluants atmosphériques liés au trafic motorisé (le NO₂ étant traceur spécifique de ces secteurs à haut trafic)²⁸. Ainsi, les zones ou parties de zones délimitées par un document d'urbanisme (PLU par exemple), telles que des zones à trafic élevé, des zones industrielles, peuvent voir interdire ou autoriser certaines constructions pour des niveaux de nuisances réglementées, dont le bruit²⁹. Les facteurs environnementaux que sont le bruit et la pollution atmosphérique sont désormais qualifiés de déterminants pour la santé publique. L'exposition des populations à des niveaux élevés de nuisances, du fait des aménagements et des implantations, induit des risques sanitaires avérés. Le Haut conseil de la santé publique (HCSP) a présenté les différents liens existants entre l'aménagement du territoire et la santé. **Il met en évidence l'importance de promouvoir la santé des habitants dans les documents de planification et les outils associés (HCSP, 2018).**

3.4.2 Réglementation et politique publique

Le ministère en charge de l'écologie souligne l'enjeu prioritaire de l'aménagement urbain pour améliorer la qualité de vie et pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les politiques publiques reposent notamment sur la mise en œuvre de la Ville durable, en préservant les

²⁷ Les bâtiments nouveaux intégrant un taux minimal de matériaux biosourcés et répondant aux caractéristiques associées à ces matériaux peuvent prétendre à l'obtention d'un label "bâtiment biosourcé". Un arrêté du ministre chargé de la construction détermine les conditions d'attribution de ce label (Article R111-22-3).

²⁸ Le projet ORHANE en région Rhône-Alpes-Auvergne présente deux cartographies : l'une à l'échelle régionale, caractérisant l'état moyen (annuel) de la co-exposition air-bruit sur tout point de la région, avec l'intensité de la nuisance air-bruit traduite par un indice allant d'une « zone très peu altérée » à une « zone hautement dégradée ». La seconde cartographie caractérise pour chaque commune l'état de l'exposition (en pourcentages et nombre d'habitants) de la population à la nuisance air-bruit (routier, ferroviaire, aéroportuaire), sous forme de camembert (Ex : X % de la population communale vit en zone dégradée...). Les éléments polluants pris en compte dans la modélisation sont la moyenne annuelle de dioxyde d'Azote NO₂ et le nombre annuel de dépassements du seuil journalier en particules PM₁₀.

²⁹ Voir le site du Centre d'information sur le Bruit- CIDB : <http://www.bruit.fr/tout-sur-les-bruits/activites-bruyantes/reglementation/le-droit-de-l-urbanisme.html>. Les textes de référence du code de l'urbanisme précisent les conditions : article R 1113-1 du code de l'urbanisme pour les communes sans POS ou PLU ou/et article R 111-2 du code de l'urbanisme applicable sur tout le territoire national y compris en présence d'un POS ou d'un PLU.

ressources, les paysages et le territoire. Les démarches d'éco quartier, d'écocités ainsi que le réseau Vivapolis sont des exemples posant les principes de la ville durable.

L'urbanisme est confronté à des objectifs d'économie des sols, de préservation des espaces naturels et agricoles ou de compacité des formes urbaines.

Aussi faut-il préciser les deux dimensions sur lesquelles l'urbanisme fixe les conditions d'occupation des sols et l'aménagement de l'espace de façon à les rendre conformes aux objectifs d'aménagement des collectivités publiques, à savoir l'urbanisme dit de planification à distinguer de l'urbanisme opérationnel.

L'urbanisme dit de planification comprend ainsi les **principaux documents d'urbanisme** que sont :

- le schéma de cohérence territoriale ou SCOT
- le plan local d'urbanisme ou PLU
- le Programme local de l'habitat ou PLH
- le Plan de déplacements urbains ou PDU
- la carte communale
- le règlement national d'urbanisme
- la règle de constructibilité limitée.

Et en matière d'urbanisme opérationnel, il s'agit d'autorisations d'urbanisme telles que :

- le permis de construire
- le permis de lotir
- le permis d'aménager
- le permis de démolir.

Au niveau du **SCOT**, document d'urbanisme qui détermine, à l'échelle de plusieurs communes ou groupements de communes, un projet de territoire visant à mettre en cohérence l'ensemble des politiques sectorielles notamment en matière d'habitat, de mobilité, d'aménagement commercial, d'environnement et de paysage, les choix stratégiques en matière de développement et d'organisation d'un territoire peuvent inclure les projets d'infrastructures. Celles-ci sont susceptibles d'être des nouvelles sources ou des sources renforcées en termes d'émissions de polluants (création ou élargissement d'infrastructures routières par exemple). Ces projets doivent avoir des objectifs chiffrés et être mentionnés dans le document d'orientations et d'objectifs (DOO).

Le DOO s'impose, à travers un lien de « compatibilité », à d'autres documents de planification (PLU, PLUI, cartes communales, etc.), aux documents de coordination et de programmation des politiques sectorielles (PDU, PLH) ainsi qu'à certaines opérations foncières et d'aménagement (Zones d'aménagement différées (ZAD), zones d'aménagement concerté (ZAC), lotissements ; etc.

Il s'agit de :

- déterminer les espaces et sites naturels, agricoles, forestiers ou urbains à protéger et possiblement d'en définir la localisation ou la délimitation ;
- définir les grands projets d'équipement et de services ;
- déterminer les secteurs où l'ouverture à l'urbanisation de nouvelles zones est subordonnée à leur desserte par les transports collectifs ;

- déterminer les secteurs dans lesquels l'ouverture de nouvelles zones à l'urbanisation est subordonnée à l'obligation, pour les constructions, travaux, installations et aménagements, de respecter des performances énergétiques et environnementales renforcées.

Le SCOT³⁰ demeure le principal document supra-communal auquel le PLU doit se référer lorsqu'il existe, puisqu'il assure la prise en compte de la plupart des documents de rang supérieur et peut fixer des objectifs qualitatifs et quantitatifs aux collectivités dans l'aménagement de leur territoire. En l'absence d'un SCOT, le PLU devra assurer la prise en compte et la compatibilité directe avec les plans et programmes de rang supérieur.

Depuis la loi n°2010/788, appelée ENE³¹, le **PLU** est un outil central en matière de planification. En effet, il peut comporter des analyses approfondies en matière de déplacement et/ou d'habitat qui peuvent être traduites en Orientations d'Aménagement et de Programmation (OAP³²) thématiques. Ce document de synthèse de l'aménagement relatif notamment à des quartiers à mettre en valeur, réhabiliter, restructurer ou aménager, intègre les dispositions des programmes locaux de l'habitat et des plans de déplacements urbains, dans le cas où le PLU est élaboré au niveau intercommunal³³.

Le PLU comporte un règlement qui fixe les règles générales et les servitudes d'utilisation du sol permettant d'atteindre les objectifs de développement durable. Aussi ce document peut-il :

- préciser l'affectation des sols (usage, nature des activités) ;
- définir les règles relatives aux constructions en fonction des situations locales ;
- déterminer les règles concernant l'aspect extérieur des constructions ;
- délimiter les zones ou parties de zones de reconstruction de bâtiments ;
- préciser le tracé et les caractéristiques des voies de circulation à conserver, modifier ou créer ;
- fixer les emplacements pour les voies et ouvrages publics, les installations d'intérêt général, les espaces verts ;
- localiser, dans les zones urbaines, les terrains cultivés à protéger et les terrains inconstructibles ;
- délimiter les secteurs dans lesquels l'octroi du permis de construire peut être subordonné à la démolition de constructions existantes ;
- fixer un coefficient d'occupation des sols dans les zones urbaines à urbaniser et dans les zones à protéger en raison de la qualité de leurs paysages, de leurs écosystèmes...
- déterminer des secteurs à l'intérieur desquels un dépassement des règles relatives au gabarit, à la hauteur, à l'emprise au sol et au coefficient d'occupation des sols est autorisé pour permettre la construction ou l'agrandissement de bâtiments à usage d'habitation ;
- imposer une densité minimale de construction dans des secteurs situés à proximité des transports collectifs existants et programmés ;
- délimiter, dans les zones urbaines ou à urbaniser, des secteurs dans lesquels les programmes de logements doivent comporter une proportion d'une taille minimale ou comporter un pourcentage affecté à des catégories de logement qu'il définit dans le respect des objectifs de mixité sociale.

Ce corpus de règles d'urbanisme induit en conséquence un aménagement des espaces construits, à reconstruire ou à occuper qui peut concentrer des sources d'émissions de polluants de l'air

³⁰ <https://www.collectivites-locales.gouv.fr/documents-durbanisme-et-regles-generales-durbanisme>

³¹ Loi portant Engagement National pour l'Environnement

³² Les AOP peuvent tenir lieu de PDU, si l'EPCI réalisant le PLU est compétent en matière de transports et déplacements (Autorité organisatrice de la mobilité), et/ou de PLH (CEREMA, 2017)

³³ <https://www.collectivites-locales.gouv.fr/documents-durbanisme-et-regles-generales-durbanisme>

(zones d'activités industrielles, voies de circulation), exposer les populations et contribuer aux transferts dans les établissements.

Au-delà du document que constitue le PLU, les annexes peuvent comprendre un certain nombre d'indications ou d'informations reportées pour information dans le PLU, et plus particulièrement :

- les servitudes d'utilité publique (Plan d'exposition au bruit, Plans de prévention des risques),
- les périmètres reportés à titre informatif, comme les zones d'aménagement concerté ou les zones où un droit de préemption s'applique,
- les schémas de réseaux d'eau potable et d'assainissement,
- toute information nécessaire à la bonne compréhension des choix faits dans le PLU.

Pour compléter les règles du PLU, des prescriptions supplémentaires font souvent l'objet de Cahiers de prescriptions environnementales (CPE) qui complètent et précisent les règles imposées par le document d'urbanisme local, vis-à-vis des maîtres d'œuvre des espaces publics et des opérateurs de la construction. Ils permettent d'assurer la cohérence entre les orientations d'aménagement d'ensemble et les réalisations sur les tenements privés, et d'en opérer le suivi. En matière de mobilité, ils visent plus particulièrement à limiter les impacts visuels, spatiaux et environnementaux des véhicules motorisés.

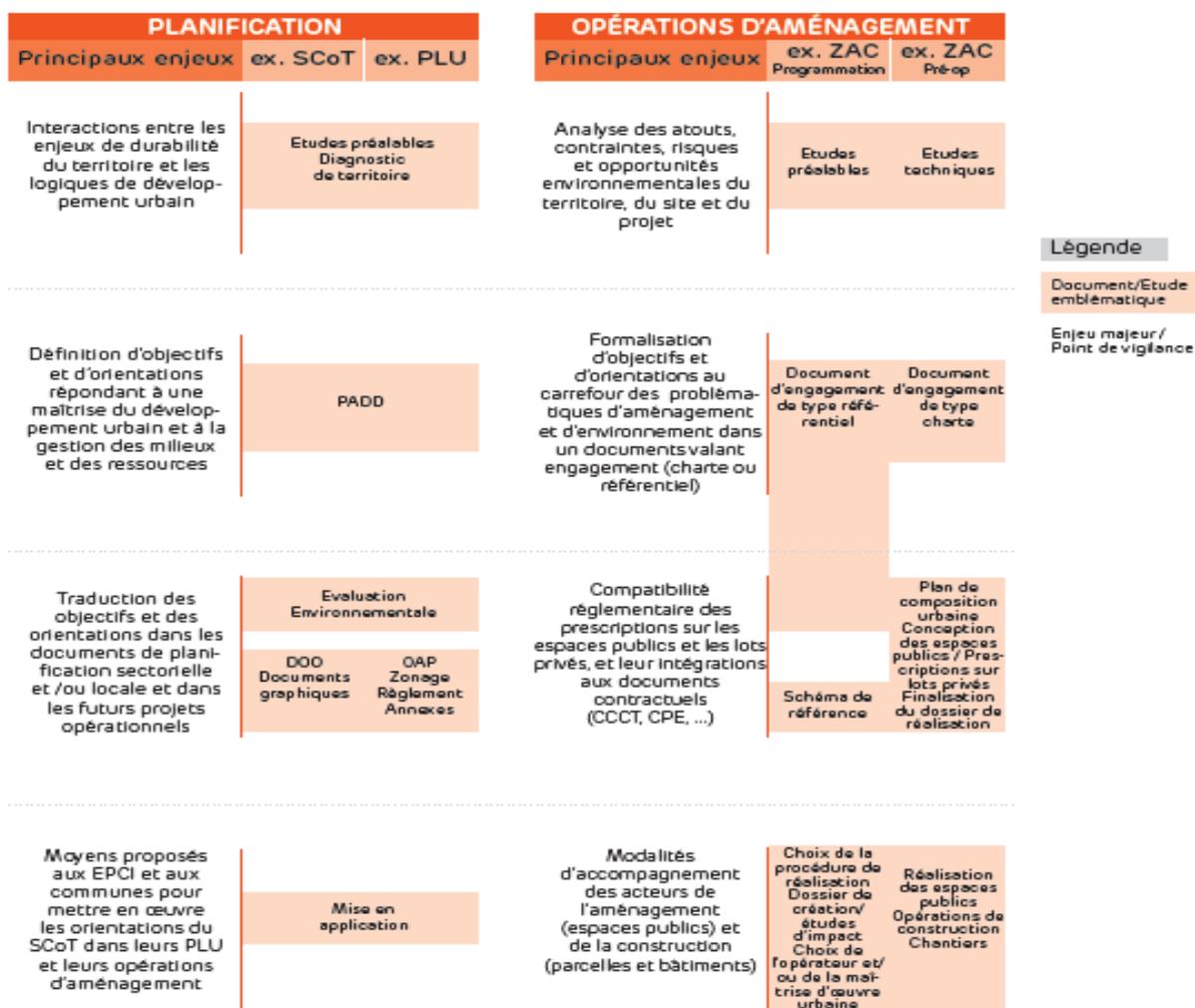


Figure 9 : Schéma des enjeux à l'échelle d'un grand territoire via le SCOT ; d'un projet urbain via le PLU ; et d'une opération d'aménagement via la procédure de ZAC (Ademe, 2015b).

Plusieurs guides communiqués dans le cadre de la consultation d'acteurs français mettent l'accent sur les PLU. Ces documents d'urbanisme présentent les orientations d'aménagement principalement sur l'occupation des sols au niveau d'une commune (PLU) ou d'une intercommunalité (PLUi) ainsi que des règles qui s'imposeront aux futures constructions. Ces guides visent notamment à intégrer les questions de santé et de pollution atmosphérique dans l'élaboration des PLU (EHESP, 2016 ; Ademe, 2015a).

Les enjeux portant sur les territoires entrent, depuis la loi n°2015/991 appelée NOTRe³⁴, dans les périmètres et compétences de l'intercommunalité (Etablissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre - EPCI). Une différence contrastée ressort entre les territoires métropolitains, périurbains ou ruraux.

Les documents de planification comme le « PLU intercommunal » (PLUi) sont à élaborer et à suivre par des EPCI de grande taille. En même temps, avec l'installation des nouvelles régions, les réflexions sur la planification à leur échelle en vue d'élaborer les SRADDET, les schémas régionaux de développement économique, d'innovation et d'internationalisation (SRDEE) et autres documents liés sont relancées.

Le guide « Agir pour un urbanisme favorable à la santé » proposé en 2014 repose sur la prise en compte des déterminants de santé à la fois aux niveaux individuels, sociaux économiques, environnementaux et politiques (Roué-Le Gall *et al.*, 2014). S'adressant en partie aux ARS pour l'approche de déterminants de santé dans les projets et documents d'urbanisme, à travers la rédaction des avis adressés au préfet, ce guide couvre l'ensemble des thématiques environnementales, dont la qualité de l'air.

A l'heure actuelle, l'ensemble des plans et schémas directeurs sur l'air élaborés ou révisés mettent l'accent sur la prise en compte de la qualité de l'air dans les documents et projets d'urbanisme et particulièrement dans les Plans de Déplacements Urbains (PDU) et Plans Locaux d'Urbanisme (PLU ou PLUi). Mais les orientations de ces plans/programmes récents nécessitent d'être traduits dans les outils de l'urbanisme (DREAL Nord-Pas-de-Calais, 2016).

La loi n°2015-992 concernant la transition énergétique³⁵ vient renforcer les outils de planification territoriale en faveur de la qualité de l'air : faciliter le suivi des plans de protection de l'atmosphère (PPA) et la mise à jour de la liste des communes concernées, ajouter un volet « air » aux plans Climat Energie Territoire (PCET) qui concerneront progressivement tous les établissements publics à fiscalité propre de plus de 20 000 habitants d'ici fin 2019, renforcement de la prise en compte de la qualité de l'air dans les documents d'urbanisme et les plans de déplacement urbains.

L'évaluation environnementale (EE) est un levier important pour prendre en compte la qualité de l'air à travers le diagnostic sur l'état initial mais également l'analyse de l'incidence du projet de territoire sur l'environnement (Ademe, 2016b) (Figure 10). Exigée par le code de l'urbanisme pour les SCoT, PDU ou PLUi, cette démarche s'inscrit en amont des choix stratégiques en identifiant les effets sur l'environnement d'un projet en considérant les enjeux de santé (exposition aux facteurs environnementaux, dont la pollution de l'air). Le rapport de présentation de tout document d'urbanisme doit contenir impérativement les éléments relatifs à l'évaluation environnementale listés aux articles R122-3 (relatif aux SCOT) et R123-2-1 (relatif aux PLU concernés par l'évaluation au sens de la directive européenne) du code de l'urbanisme. Son importance doit être proportionnelle aux enjeux, au degré de précision et au volume du document d'urbanisme.

³⁴ Loi du 7 août 2015 portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe)

³⁵ Loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV).

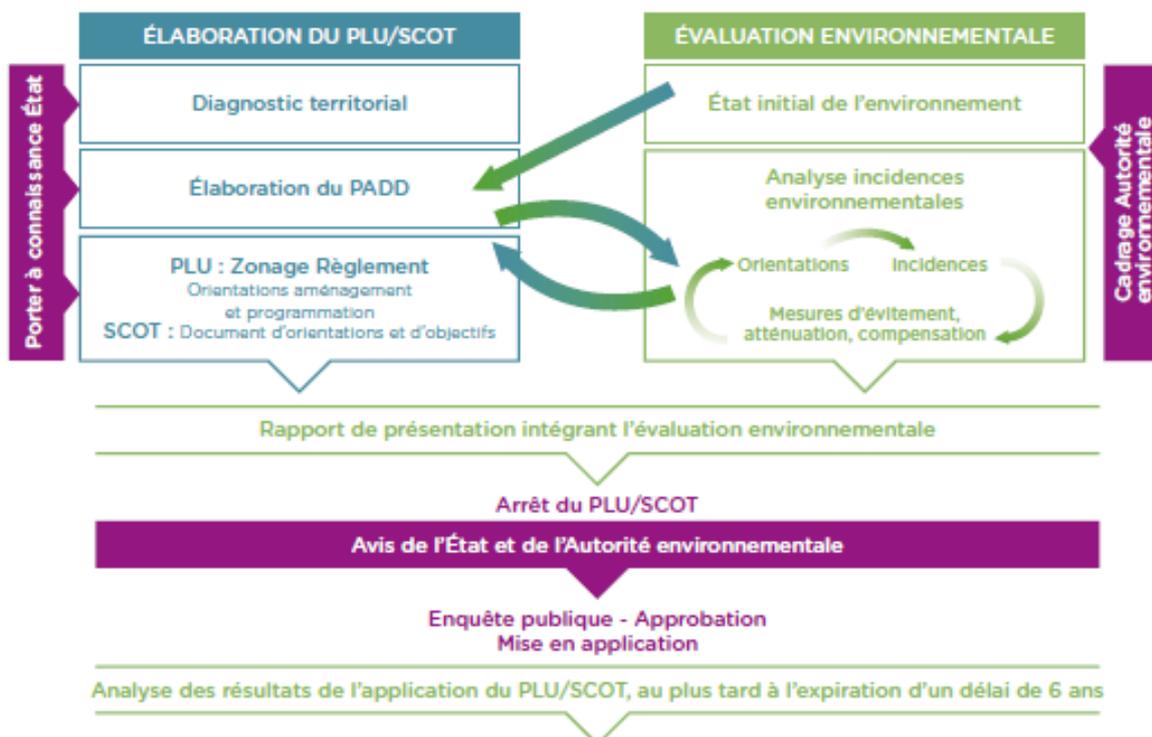


Figure 10 : Démarche d'évaluation environnementale dans les documents d'urbanisme (source : CGDD, 2011)

Les objectifs sont d'éviter l'implantation d'habitations nouvelles à proximité de sources de pollution, limiter voire diminuer les activités polluantes telles que celles issues du trafic automobile ou les activités industrielles à proximité d'établissements sensibles, d'espaces de loisirs extérieurs, d'espaces publics aménagés à destination des piétons et des cyclistes (Aurba, 2015). Les PLU portent également sur les formes urbaines qui peuvent aussi avoir une influence sur la qualité de l'air.

Toutefois, les documents réglementaires obligatoires que sont les documents d'urbanisme de planification (SCOT, PLU, PLUi), inscrivent la problématique de qualité de l'air de façon prescriptive uniquement pour les polluants réglementés, en s'en tenant aux valeurs limites. Or, les problématiques de santé environnement et de santé publique requièrent de s'en référer plutôt à des valeurs guides de l'OMS, fondées sur des travaux d'expertise scientifique.

Pour démontrer l'étendue de la législation, il est utile de rappeler que les cadres fixant des objectifs de réduction des pollutions de l'air ambiant et d'atteinte de qualité de l'air, relèvent en partie de plusieurs codes distincts (principe d'indépendance des codes)³⁶. Peuvent être mentionnés les textes relatifs à la protection de l'environnement (code de l'environnement), ceux relatifs à la santé publique (code de la santé publique), enfin ceux relatifs à l'urbanisme (code de l'urbanisme).

Les articulations entre les documents de planification avec les liens de compatibilité et de prise en compte sont représentées sur la Figure 11.

³⁶ Nous devons faire savoir que la question de l'air intérieur relèvera en partie du **Code de la construction et de l'habitation - CCH** – quant aux dispositions à prendre sur les normes d'hygiène et de sécurité. A ce titre, ce code regroupe les textes législatifs concernant l'obtention du permis de construire et le statut des personnes habilitées à construire un bâtiment (habitation, locaux professionnels...), la promotion immobilière, les logements sociaux. Il définit également les normes de constructions nécessaires pour assurer de bonnes conditions d'hygiène et de sécurité (protection contre les incendies, chauffage...) et les rapports contractuels entre constructeur et habitant.

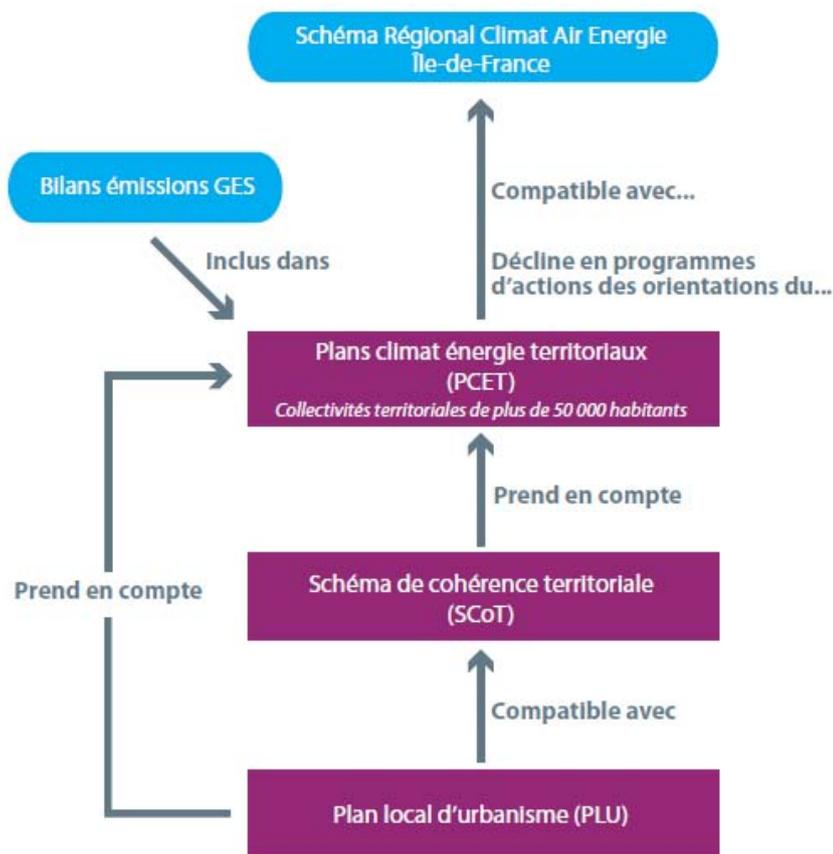


Schéma des relations entre plans et programmes : Source CR Île-de-France

Figure 11 : Articulation et liens entre certains documents de planification

Ces documents sont faits à des échelons différents (à l'échelle d'un territoire ou d'une région). Le SRCAE entretient un rapport de compatibilité avec le PCET. Mais par ailleurs, il n'est pas fait de lien juridique d'opposabilité directe entre le SRCAE et le Schéma de cohérence territoriale (SCoT), document de mise en cohérence des politiques publiques d'aménagement durable du territoire : ces derniers doivent seulement « prendre en compte » les orientations fondamentales des PCET. Il en est de même pour le PLU³⁷.

³⁷ La notion de « prise en compte » est en droit la notion de d'opposabilité la plus faible. Cette complexité est de nature à brouiller le rôle des documents d'urbanisme dans les stratégies locales d'adaptation au changement climatique.

4 Caractérisation du transfert de l'air extérieur vers l'air intérieur

Ce chapitre vise à synthétiser les connaissances sur les transferts de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur qui s'appuient sur les données collectées et analysées dans le cadre de la CRD Anses-CSTB dont le rapport figure en Annexe 12. Ainsi, plusieurs éléments présentés dans la suite sont directement extraits de ce rapport.

En premier lieu, les facteurs et situations influençant le transfert des polluants de l'air extérieur dans les environnements intérieurs identifiés dans la littérature sont décrits. Les phénomènes physico-chimiques et les données issues d'études de terrain ou expérimentales définissant les transferts sont ensuite considérés. En lien avec ces phénomènes, les données disponibles concernant les polluants réglementés et agents biologiques³⁸ à considérer en priorité ont fait l'objet d'un travail important de collecte et d'analyse rapporté ci-après.

La recherche bibliographique a permis également d'identifier des références reportant des niveaux intérieurs et extérieurs pour les COV (hors benzène), en particulier les aldéhydes, ou les substances semi-volatiles (pesticides, retardateurs de flammes, phtalates, ...). Des sources dans les environnements intérieurs pour ces familles de polluants peuvent contribuer de façon importante et majoritaire aux niveaux de concentrations dans l'air intérieur et complexifier ainsi l'analyse du transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur.

Ainsi, seuls les polluants réglementés et les agents biologiques cités précédemment ont été investigués. Cependant, de par leurs propriétés physico chimiques, les données de transfert relatives à ces polluants renseignent plus largement sur le comportement des substances à l'état gazeux ou des particules.

A noter qu'à la fin de ce chapitre, une analyse des données collectées auprès des AASQA est présentée en complément des éléments collectés dans la littérature dans le cadre de la CRD Anses-CSTB. Pour rappel, ce recueil spécifique visait à compléter les données françaises avec les données d'études spécifiques réalisées par ces organismes, plus particulièrement sur l'étude ou la caractérisation du transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur de bâtiments. Il s'agissait également d'évaluer les autres données d'AASQA issues de différentes campagnes de mesures conduites sur des polluants réglementés avec la réalisation de mesures en parallèle dans l'air intérieur et l'air ambiant.

³⁸ Dioxyde de soufre (SO₂), dioxyde d'azote (NO₂), particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), ozone (O₃), benzène, monoxyde de carbone (CO), benzo(a)pyrène, arsenic (As), cadmium (Cd), mercure (Hg), nickel (Ni), plomb (Pb), moisissures et pollens

4.1 Facteurs affectant le transfert intérieur/extérieur

Les facteurs affectant le transfert sont distingués selon qu'il s'agit de paramètres extérieurs au bâtiment ou de paramètres propres aux bâtiments. Le niveau de concentration dans l'air extérieur à proximité immédiate du bâtiment, qui détermine donc les transferts vers l'air intérieur, dépend de la distance aux sources émettrices et de l'orientation de l'édifice. La dispersion des polluants entre également en jeu et peut être induite par la forme urbaine (rue canyon, bâtiments avec espaces intermédiaires, non contigus), par les aménagements (effets écrans de bâtiments et espaces végétalisés), et par les conditions météorologiques, notamment la direction et la vitesse du vent.

4.1.1 Les paramètres extérieurs au bâtiment

➤ La concentration extérieure de polluant

La concentration extérieure du polluant intervient directement sur le ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur (nommé ratio I/E). En effet, plus la concentration extérieure augmente, plus sa contribution à l'exposition des occupants à l'intérieur augmente également.

La concentration extérieure varie sous l'effet conjugué de la présence d'une ou plusieurs sources, de leur distance par rapport au logement, de la situation du logement par rapport aux bâtiments environnants et des conditions météorologiques notamment la direction et la vitesse du vent. La Figure 12 illustre cette variation de la concentration extérieure selon différentes situations simulées. Les appartements au rez-de-chaussée les plus proches de la route, source ici de CO, et situées dans le bâtiment sous le vent, présentent les niveaux extérieurs en façade les plus élevés. A l'opposé, les appartements situés au niveau de la façade au vent et le plus éloignés de la source présentent les niveaux extérieurs les plus faibles.

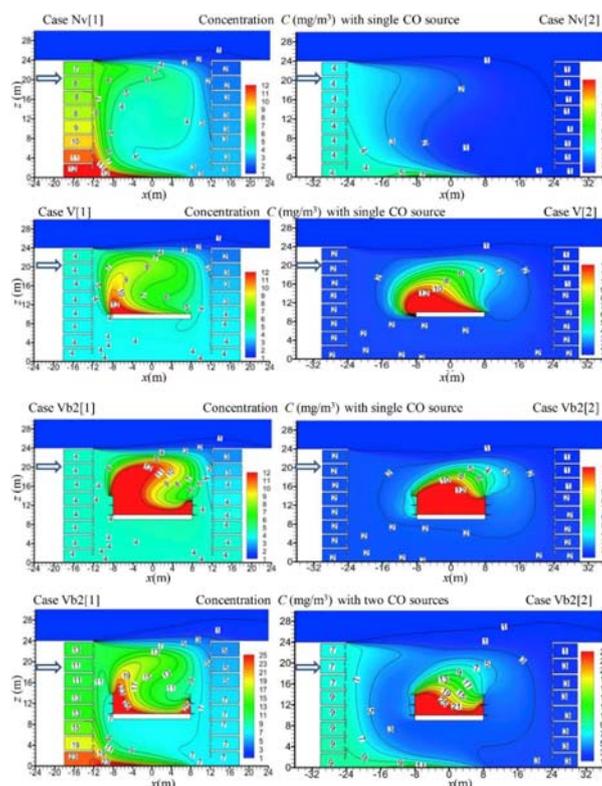


Figure 12 : Différentes répartitions de la concentration extérieure en CO dans une rue entre deux immeubles de 8 étages, de même hauteur selon la largeur de la rue et la présence d'une route surélevée ou non, sous un même vent dominant (Hang *et al.*, 2017).

Pour illustrer l'impact de la distance d'une source sur la concentration extérieure en polluant, les travaux de Fujita *et al.* (2014) montrent la variation de la concentration extérieure de différents polluants en fonction de la distance à une route à Los Angeles (cf. Figure 13).

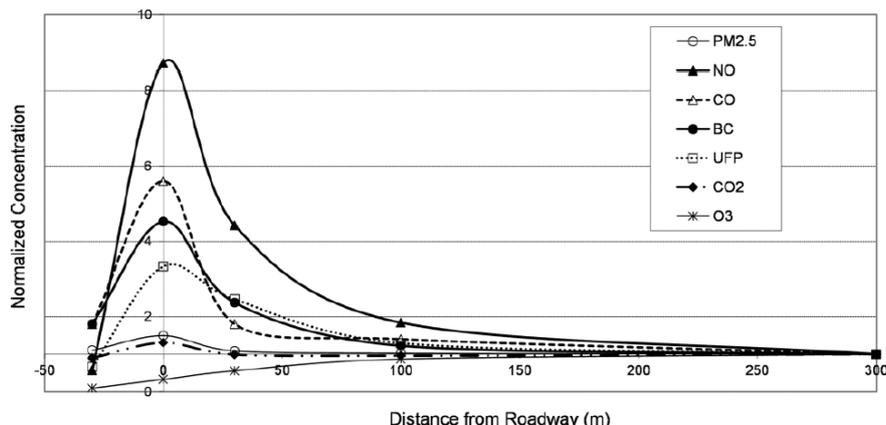


Figure 13 : Exemple de gradient de concentration de différents polluants avec la distance à un axe routier à Los Angeles (Fujita *et al.*, 2014)

➤ Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques affectent la dispersion des polluants extérieurs et par conséquent leur concentration. Des conditions de dispersion favorables conduisent à réduire la concentration extérieure des polluants ce qui se traduit par une augmentation du ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur (nommé ratio I/E). Cela peut également conduire à des variations de ce ratio entre le jour et la nuit, telles qu'observées par Sheldon *et al.* (1993) lors de la mesure dans l'air du benzo(a)pyrène dans 125 logements de Riverside en Californie avec un ratio I/E de 1,2 le jour et de 0,64 la nuit du fait de la forte augmentation de la concentration extérieure la nuit. La photodégradation du benzo(a)pyrène durant la journée peut également en partie expliquer ce phénomène.

La vitesse et la direction du vent en augmentant la pression au niveau de l'enveloppe peuvent influencer les conditions de transfert en favorisant le renouvellement d'air par infiltration. Le vent modifie également les mouvements d'air au voisinage immédiat du bâtiment.

De la même façon, une modification de la densité de l'air extérieur comme intérieur, liée à une variation de température, peut faire varier la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur et affecter les conditions de transfert.

Le débit d'air au travers d'une bouche d'entrée d'air ou au travers de fissures dans l'enveloppe du bâtiment est proportionnel à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur.

Lorsque les conditions extérieures modifient la différence de pression, cela se traduit donc par une modification du renouvellement d'air d'infiltration mais également par une modification de la vitesse d'air au travers de l'enveloppe, ce qui impacte le transfert des polluants.

➤ La végétation urbaine

La végétation présente autour d'un bâtiment peut jouer un rôle de barrière filtrante vis-à-vis de certains polluants extérieurs (Janhäll, 2015). En effet, la multiplicité des branches et des feuilles augmente la surface spécifique disponible pour le dépôt ou la sorption des polluants, tout en permettant les échanges d'air de part et d'autre des végétaux. De la même façon, la présence de végétation à proximité immédiate des sources de pollution peut permettre d'en diminuer l'impact.

Elle va jouer un rôle plus particulièrement sur les espèces susceptibles d'interagir avec les surfaces, comme les particules, l'ozone, le dioxyde de soufre et le dioxyde d'azote.

Pour les particules, la quantité déposée est proportionnelle au LAI (Leaf Area Index ou surface de végétation par m² de sol). La vitesse de dépôt est minimale pour des particules comprises entre 0,1 et 0,3 µm. Cette quantité est également variable selon les espèces végétales. Pour des vitesses de vent élevées, le dépôt des grosses particules au niveau des végétaux est plus important. Cependant, l'inverse est observé pour les particules ultrafines.

Une forte densité de végétation augmente la sorption des polluants, mais si elle est trop importante elle joue alors un rôle d'écran au transport des polluants vers le végétal. L'air et les polluants contournent alors l'obstacle pour retomber plus loin avec une concentration parfois plus importante. La barrière végétale doit donc être suffisamment poreuse pour laisser passer l'air mais également suffisamment compacte pour forcer l'air à passer à proximité des surfaces de feuilles et de branches.

La présence de végétaux modifie également les configurations de vent au sein des rues canyons et jouent donc un rôle sur la dispersion des polluants. Des arbres plus grands et plus denses réduisent fortement la dispersion des polluants, mais augmentent leur concentration dans des rues canyons à fort trafic. Au contraire, des barrières végétales de faible hauteur situées entre le trafic et les habitants exposés améliorent la qualité de l'air. Leur hauteur devrait être du même ordre que le panache associé au trafic. Lorsque l'écran végétal joue le rôle de déflecteur, elle protège ainsi les bâtiments qui sont situés immédiatement derrière mais repousse la pollution vers d'autres zones, urbaines ou non, plus loin sous le vent.

Le rôle barrière de la végétation non foliée en période hivernale reste encore à évaluer.

Par ailleurs, les espèces végétales émettent des composés organiques volatils, parmi lesquels des terpènes qui peuvent avoir une incidence non négligeable sur la photochimie atmosphérique et de surcroît à proximité immédiate des bâtiments (Churkina *et al.*, 2017).

Maher *et al.* (2013) ont étudié expérimentalement l'impact de la mise en place d'une rangée temporaire de jeunes bouleaux sur les concentrations de particules dans un logement situé en bordure d'une rue passante. Ils ont comparé les résultats observés avant et après la mise en place de cette rangée d'arbres par rapport à un autre logement situé dans la même rue à une vingtaine de mètres, mais non protégé par la végétation. Les auteurs observent une diminution des concentrations intérieures de particules de plus de 50 % dans le logement après la mise en place de la rangée de bouleaux. Ces observations sont également corroborées par un prélèvement des particules déposées à la surface du téléviseur et par l'analyse de la surface des feuilles des arbres couvertes de particules. La rangée d'arbres était disposée juste au bord de la route, à la limite du trottoir. Les jeunes bouleaux avaient une hauteur de 3 mètres en moyenne. Les arbres installés doivent être résistants à la pollution et ne pas empêcher la dispersion des particules par un houppier trop important. L'écorce et les branches représentent également des surfaces de dépôt disponibles qui assurent à la végétation un rôle de protection même une fois que les feuilles sont tombées.

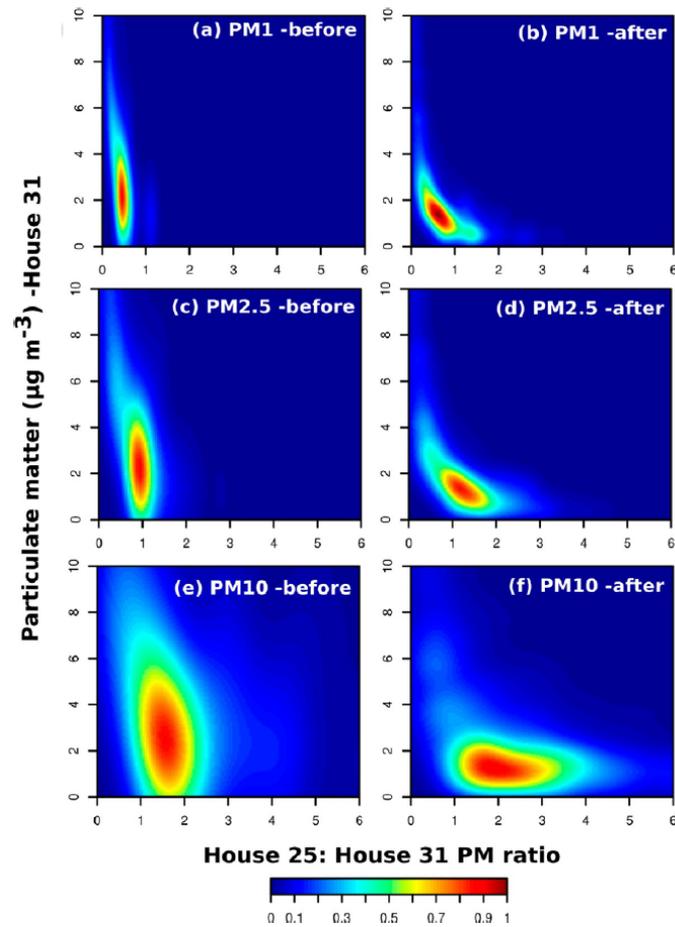


Figure 14 : Distribution 2D des concentrations de particules (fractions PM_1 , $PM_{2.5}$ et PM_{10}) et du ratio de concentration entre la maison non protégée (house 25) et la maison protégée par une rangée d'arbres (house 31) avant et après la mise en place de cette dernière (Maher *et al.*,2013)

4.1.2 Les paramètres propres au bâtiment

➤ Le type de bâtiment

Pour différents polluants, le type de bâtiment peut avoir une incidence sur le transfert correspondant le plus souvent à la présence différenciée de systèmes de ventilation, de systèmes de filtration ou encore des comportements d'aération différents, plus que de réelles différences dans le mode de construction et la perméabilité à l'air qui lui est associée.

Dans une revue de littérature internationale, Morawska *et al.* (2017) ont déterminé les concentrations moyennes pondérées de particules typiquement rencontrées à l'intérieur et à l'extérieur par type de bâtiment (logement, école, crèche, bureau). Les indicateurs renseignés étaient la concentration en nombre de particules (PN), les fractions massiques $PM_{2.5}$ et PM_{10} intégrées sur 24 heures ou déterminées en période exclusive d'occupation. Les études de tous les pays du monde sont prises en compte en excluant celles qui incluent la présence de fumeurs, l'absence d'occupants, les études en laboratoire. Au total, 58 études ont été retenues pour les logements, 50 pour les écoles, 12 pour les crèches et 3 pour les établissements de soins pour personnes âgées. Parmi les études recensées, seules 5 études françaises dans les écoles sont prises en compte dont deux seulement présentent des mesures simultanées en intérieur et

extérieur. Sur cette base, les auteurs concluent pour les logements que les fractions massiques $PM_{2.5}$ et PM_{10} sont principalement d'origine extérieure. Par contre, les sources intérieures représentent la contribution principale de la concentration en nombre de particules. Dans les écoles et crèches, c'est la situation inverse. $PM_{2.5}$ et PM_{10} sont plutôt liées aux sources intérieures et à la remise en suspension de particules par la présence des occupants, alors que l'extérieur contribue le plus aux PN. Pour les bureaux, les sources intérieures sont en général négligeables devant l'apport de l'air extérieur (PN, $PM_{2.5}$ et PM_{10}). Le peu d'études concernant les établissements de soins ne permet pas d'en tirer des conclusions générales. Le schéma ci-dessous résume les conclusions des auteurs.

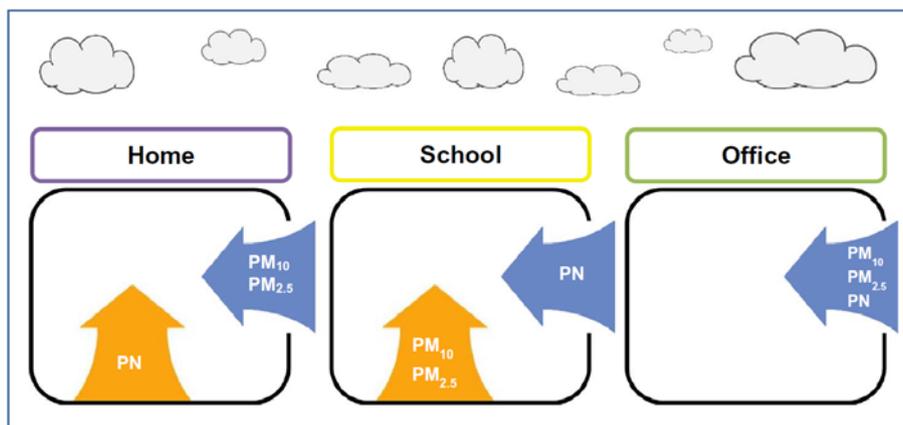


Figure 15 : Représentation schématique des contributions intérieure et extérieure des particules selon le type de bâtiment (Morawska et al., 2017)

➤ Le type de construction

Trop peu d'études décrivent le type de construction des bâtiments pour pouvoir établir des comparaisons. L'étude menée dans les bâtiments performants en énergie (Derbez et al., 2017) ne trouve pas de différences significatives dans les ratios entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur de benzène entre les maisons, les appartements neufs et les appartements rénovés.

Le type de construction et d'isolation vont définir le niveau de perméabilité de base du bâtiment. Cette perméabilité de base peut ensuite être altérée par les différentes petites modifications apportées à la structure soit lors des finitions associées à la fin de la phase de construction, soit par les occupants durant leur aménagement des locaux.

➤ Les caractéristiques de l'enveloppe

L'infiltration d'air au travers de l'enveloppe est au final caractérisée par différents paramètres :

- la localisation des trous et leur géométrie
- la coefficient de pression du vent C_p
- l'exposition du bâtiment (mono-exposition ou traversant)
- la pression du vent
- la perméabilité à l'air de la façade (surface de trou) : $Q@4Pa$
- le débit d'infiltration d'air
- la nature des matériaux de l'enveloppe
- le mode d'isolation et la nature du matériau isolant

En présence de grandes ouvertures au niveau de l'enveloppe, d'autres paramètres vont influencer sur le débit d'air entrant :

- Localisation des fenêtres et des portes
- Dimensions des grandes ouvertures : aire effective A, hauteur de tirage thermique h
- Exposition du bâtiment (mono-exposition ou traversant)
- Vitesse du vent
- Turbulence du vent
- Ecart de température intérieur/ extérieur
- Fréquence d'ouverture des ouvrants
- Durée d'ouverture des ouvrants
- Comportement des occupants
- Débit d'infiltration d'air

➤ Étanchéité à l'air de l'enveloppe et équilibrage des pressions

L'étanchéité à l'air du bâtiment au travers des murs, toit et fondations détermine le temps nécessaire à un polluant d'origine extérieure pour pénétrer dans le bâtiment tout comme celui nécessaire pour l'évacuer. Les bâtiments existants sont considérés fuyards, mais les réglementations de construction les plus récentes (notamment la réglementation thermique 2012) imposent des exigences en termes de perméabilité à l'air des bâtiments pour limiter leur consommation d'énergie. La perméabilité à l'air du bâti est caractérisée dans la réglementation thermique par un coefficient de perméabilité à l'air appelé Q4Pa-surf. Ce dernier représente le débit de fuite par m² de surface déperditive hors plancher bas sous une dépression de 4 Pa, et s'exprime en m³/(h.m²). Les seuils réglementaires sont les suivants :

- 0,6 m³/(h.m²) pour les maisons individuelles neuves
- 1 m³/(h.m²) pour les logements collectifs neufs

Les mesures effectives réalisées depuis plusieurs années en France montrent que les exigences sont bien atteintes à la construction des bâtiments (Figure 16). La perméabilité à l'air des bâtiments ne varie pas significativement selon la nature du matériau de construction, selon le système de ventilation installé, selon la position de l'isolant (externe, interne ou distribué) et ni selon la saison (Bailly *et al.*, 2016). Ces mêmes auteurs listent les fissures généralement observées durant la phase de réception des bâtiments. Elles se situent le plus souvent autour des composants électriques, des encadrements de portes et fenêtres, des conduits et gaines traversant l'enveloppe ou encore des coffres de volets roulants.

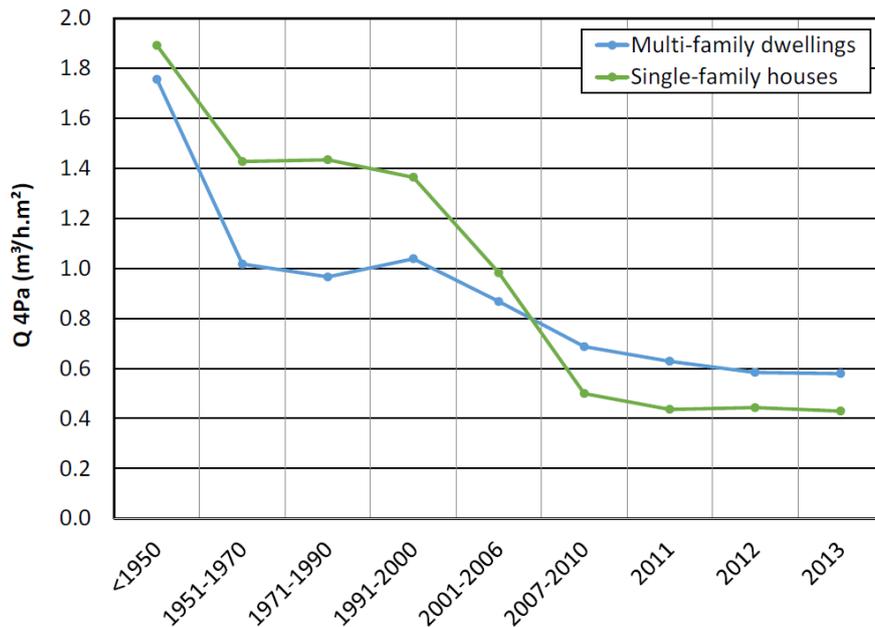


Figure 16 : Evolution de la perméabilité à l'air des logements en France (Bailly et al., 2015). Maisons individuelles en vert et appartements en bleu

Néanmoins, la perméabilité à l'air du bâti tend à augmenter dans le temps du fait de mouvements des éléments structuraux créant de nouvelles fissures, du rétrécissement des joints d'étanchéité notamment lors du premier épisode de chauffe du bâtiment, de l'installation de nouveaux équipements qui viennent rompre localement la barrière d'étanchéité (passage de gaines, tuyaux électriques, etc.), de défauts de conception ou de mise en œuvre et de l'altération des performances propre au vieillissement des matériaux (Leprince *et al.*, 2017). En France, cette augmentation est en moyenne de +50 % (perméabilité équivalente n_{50} de $1,8 \text{ h}^{-1}$), observée 5 à 6 ans après construction dans 30 maisons individuelles de basse Normandie construites en 2009.

Le contrôle du transfert intérieur/extérieur nécessite une bonne maîtrise de la perméabilité à l'air de l'enveloppe non seulement durant la construction du bâtiment, mais également durant sa vie en œuvre. Autant il apparaît facile de l'augmenter, la réduire de manière efficace nécessite des travaux de réhabilitation souvent lourds à réaliser.

Enfin, il est également important d'équilibrer les pressions entre les différentes pièces d'un bâtiment notamment lié à la présence de conduits de cheminée ou de ventilations qui peuvent devenir des voies privilégiées d'entrée à l'intérieur du bâtiment. La différence de pression au travers de l'ensemble de l'enveloppe doit être minimale pour minimiser l'infiltration des polluants extérieurs. Le vent et les différences de température intérieure/extérieure provoquant un tirage thermique vont toutefois venir perturber cette différence de pression et modifier les conditions d'infiltration.

Pour les bâtiments très fuyards, pour lesquels la remédiation entraînerait des coûts excessifs, une solution possible serait de pouvoir mettre en suppression une zone restreinte du bâtiment ou du logement (Fugler, 2014).

➤ La prise d'air neuf

La position des prises d'air neuf, que ce soient des éléments de ventilation ou des ouvrants, peut influencer le transfert intérieur/extérieur notamment en fonction de la direction et de la vitesse du

vent. Chang *et al.* (2003) ont montré au travers de différents scénarios de simulation, que positionner les ouvrants (fenêtres et portes) uniquement sur les façades de côté ou sous le vent permettaient de réduire la concentration de CO d'origine extérieure de 20 % à 60 % dans un bâtiment sans ventilation mécanique, par rapport à un scénario où les ouvrants sont uniformément répartis, et ceci en minimisant la baisse du taux de renouvellement d'air (de 20 % à 50 %).

➤ La présence d'une cheminée ou d'autres conduits vers l'extérieur

La présence d'une cheminée ou d'autres conduits vers l'extérieur représentent des voies privilégiées d'échange avec l'extérieur. Le plus souvent, elles tendent à créer un tirage thermique qui met en dépression le bâtiment et par voie de conséquence favorise l'infiltration de l'air extérieur (Fugler, 2014).

Par ailleurs, une cheminée en fonctionnement peut représenter une source plus ou moins importante de résidus de combustion (CO, NO₂, benzène, SO₂, particules) à l'intérieur qui peut modifier le ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur (ratio I/E).

➤ Les espaces adjacents ou attachés au bâtiment

L'air entrant dans le bâtiment peut provenir non pas directement de l'extérieur, mais d'un espace adjacent communiquant directement ou non avec le bâtiment (Fugler, 2014). Il peut s'agir d'un garage, d'un autre appartement du même immeuble ou encore d'un immeuble adjacent partageant un même mur, voire d'une partie non habitée du bâtiment (grenier non isolé, vide sanitaire, cave, etc.).

L'air neuf entrant au travers de ces zones se retrouve souvent chargé par la présence de sources de polluants qui se répercute alors dans le bâtiment. C'est le cas des garages communiquant notamment. Dans ce dernier cas, une mise en dépression du garage assurée par une extraction d'air mécanique permet d'isoler le garage du reste du bâtiment.

La présence d'un sous-sol peut représenter une voie d'infiltration plus ou moins importante, notamment pour tous les gaz qui transitent par le sol. Dans le cas d'une maison avec un sous-sol intégral, on estime jusqu'à 5 % la part des gaz provenant du sol par rapport à l'ensemble des infiltrations (Fugler, 2014).

Les solutions de remédiation utilisées pour le Radon, comme la mise en dépression du vide sanitaire, peuvent s'avérer utiles pour limiter les infiltrations par le sol et favoriser l'exfiltration des polluants intérieurs.

➤ Le type de ventilation

La présence et le type de système de ventilation vont définir le taux de renouvellement d'air, la différence de pression avec l'extérieur et le transport des contaminants entre les compartiments intérieurs mais également avec l'extérieur.

Dans de nombreux bâtiments existants, l'infiltration représente la contribution majoritaire au renouvellement d'air et par conséquent au transfert des polluants. La présence d'un système spécifique de ventilation peut avoir différents impacts sur le transfert selon son type.

Un système de ventilation par insufflation tend à maintenir une différence de pression positive avec l'extérieur, minimisant ainsi l'infiltration et forçant l'entrée d'air au travers de bouches et conduits

appropriés. L'adjonction d'un système de filtration assure alors une bonne maîtrise des conditions de transfert et une réduction de l'impact des contaminants extérieurs à l'intérieur. Néanmoins, l'extraction des polluants d'origine intérieure est moins maîtrisée et cette stratégie favorise leur exfiltration au travers des parois. Cela peut poser des problèmes de condensation au sein des parois, et accessoirement de développement de moisissures lorsqu'il s'agit d'humidité.

A l'inverse, un système de ventilation par extraction tend à maintenir le bâtiment avec une différence de pression négative par rapport à l'extérieur. La présence de bouches d'entrée d'air permet de modifier localement la différence de pression de certaines parois et ainsi plus facilement diriger l'air entrant vers certaines pièces, communément les pièces de vie. Le transfert des polluants extérieurs se fait préférentiellement au travers des entrées d'air existantes, mais également par infiltration au travers de l'enveloppe ou tout autre conduit voire cheminée communiquant avec l'extérieur. Plus généralement, la présence d'une cheminée favorise une différence de pression négative par rapport à l'extérieur du fait du tirage thermique et tend à augmenter l'infiltration.

La ventilation double flux couple les deux systèmes permettant de maintenir une différence de pression quasi-nulle avec l'extérieur. Elle est souvent couplée avec un système de récupération de chaleur. Elle peut également être associée à une recirculation de l'air vicié et filtré permettant de préchauffer l'air entrant. Si l'insufflation et l'extraction ne sont pas bien équilibrées, la différence de pression devient positive ou négative et on retombe dans l'un des deux cas précédents.

Les conduits de système de ventilation sont des zones où les particules les plus grosses si elles n'ont pas été filtrées au préalable se déposent et peuvent être remises en suspension en particulier lorsqu'une programmation du fonctionnement du système est mise en place. Par ailleurs, les conduits peuvent présenter des fuites notamment aux jonctions susceptibles d'influencer le transfert intérieur/extérieur. Une vérification et maintenance périodique du réseau de ventilation est nécessaire.

En présence d'un système spécifique de ventilation, plusieurs paramètres interviennent sur le débit d'air neuf entrant dans la pièce par les orifices d'entrée d'air (VMC simple flux) ou sur le débit d'insufflation d'air (double flux) :

- Localisation des orifices d'entrée d'air
- Localisation de la prise d'air neuf
- Niveaux de pollution au niveau des prises (orifices) d'air neuf
- Coefficient de pression au niveau des prises d'air (au vent, sous le vent)
- Dimensions des prises d'air
- Débit d'air extrait ou débit d'air insufflé
- Présence de filtres aux bouches d'insufflation d'air et le cas échéant à la recirculation d'air
- Présence de grilles (anti-moustique) au niveau des entrées d'air
- Présence d'obstacles à la circulation de l'air dans le réseau d'air
- Dépôt des polluants dans les conduits et éléments du réseau aéraulique

La présence d'un système spécifique de ventilation vient modifier la répartition des débits d'air neuf entre les voies d'infiltration (fissures et défauts présents au sein de l'enveloppe du bâtiment) et les voies d'entrée définies (bouches d'entrée d'air, grilles d'aération). L'air neuf est « forcé » au travers de ces dernières permettant un meilleur contrôle des zones à ventiler. Les débits d'air d'infiltration étant réduits, le facteur de pénétration des espèces réactives devrait également diminuer pour la seule voie d'infiltration. Mais, le facteur de pénétration au travers des entrées d'air définies devrait également évoluer. Au global, il est difficile à ce stade de déterminer l'impact du type de ventilation sur le transfert pour un même taux de renouvellement d'air.

Dans une étude de sensibilité, Powaga et Collignan (2016) montrent que le ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur de l'ozone diminue entre un logement ancien en ventilation naturelle par conduit (ou grilles) et un logement récent doté d'une ventilation mécanique double flux sans filtration (respectivement 0,53 et 0,28, soit -47 %). Une diminution plus faible est également observée pour la fraction massique PM_{2,5}, respectivement 0,91 et 0,85 soit -7 %. Cette diminution est toutefois essentiellement liée à une baisse correspondante du taux de renouvellement d'air de 3,8 à 1 h⁻¹, soit -74 %, du fait d'une meilleure maîtrise de la perméabilité de l'enveloppe.

A l'inverse, entre une école ancienne sans système de ventilation et une école récente en ventilation double flux sans filtration, le ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur augmente de 0,3 à 0,4 pour l'ozone et de 0,8 à 0,94 pour la fraction PM_{2,5} (respectivement +33 % et + 17 %). Cette augmentation est également liée à l'évolution du taux de renouvellement d'air de 1,2 à 2,4 h⁻¹. Cette étude de sensibilité ne tient toutefois pas compte du possible impact du taux de renouvellement d'air sur les facteurs de pénétration et les constantes de dépôt supposées invariables ni de son impact sur les concentrations en oxydes d'azote, lesquelles vont définir la réactivité en phase gazeuse de l'ozone et au final la valeur du ratio suscité.

➤ La filtration de l'air

La filtration de l'air entrant est souvent la seule solution possible pour réduire de manière efficace la concentration des contaminants qui persistent à l'extérieur. Elle n'a de sens que si toutes les voies d'entrées de l'air sont bien contrôlées et dirigées vers le système de filtration. L'ouverture des fenêtres vient perturber la distribution des pressions et ruine l'efficacité de la filtration durant cette période.

Dans une moindre mesure, la filtration de l'air intérieur, une fois que les contaminants extérieurs ont pénétré dans le bâtiment, permet également de réduire leur concentration. La filtration de l'air intérieur agit sur le transfert en augmentant la constante de pertes par sorption et par filtration. Ce type de système de filtration est à mettre en place préférentiellement dans la ou les pièces où les occupants passent le plus de temps. En effet, la filtration n'est réellement efficace qu'au niveau du filtre et peut ne pas avoir d'incidence dans les autres pièces du bâtiment. Le positionnement et le nombre d'unités de filtration à mettre en place sont déterminants et varient selon la configuration des bâtiments. La mise en place de ces solutions au sein du volume occupé requiert une maîtrise de l'encombrement et du niveau de bruit associé.

Différentes efficacités de filtration sont disponibles. Pour les particules, l'ASHRAE définit l'échelle MERV (minimum efficiency reporting value) et l'Union européenne une classification EU.

Une filtration efficace suppose également une ventilation permanente sans programmation ou une programmation adaptée aux épisodes de pollution extérieure. Et bien sûr, elle impose que portes et fenêtres soient maintenues fermées.

Par ailleurs, un filtre particulaire va voir s'accumuler de plus en plus de particules avec le temps. Il va alors devenir un réservoir de particules. Si ces particules présentent une fraction semi-volatile non négligeable (comme les suies de particules diesel par exemple), le filtre lui-même risque de devenir une source d'émission de ces substances vers l'environnement intérieur. De la même façon, des vibrations ou sollicitations mécaniques comme des variations brusques de débit lors des arrêts et mises en route du système de ventilation peuvent venir libérer une partie de la matière fixée sur le filtre qui peut alors se retrouver à l'intérieur d'un bâtiment.

De la même façon, les particules accumulées et immobilisées sur un filtre représentent des sites privilégiés de réaction avec les oxydants provenant de l'air extérieur (oxygène, ozone et radicaux libres notamment). Les produits de réaction peuvent en partie être volatils et s'introduire dans le volume intérieur (Hytinen *et al.*, 2003).

Le filtre sera également sollicité par des hydrométéores (gouttelettes de pluie, brume, flocons de neige) qui vont venir l'humidifier voire le mouiller. Cet excès d'humidité peut non seulement affecter l'efficacité du filtre, mais également favoriser le développement de spores fixées dans sa matrice. Ces conditions imposent une maintenance et un changement réguliers du système de filtration.

Pour les gaz, des filtres à base de charbon actif sont nécessaires. Ils sont relativement efficaces mais coûteux à leur mise en place et leur maintenance. Depuis plusieurs années, des systèmes plus élaborés combinant par exemple la filtration avec élimination de la matière organique adsorbée par photocatalyse sont à l'étude pour diminuer les coûts de maintenance (Huang *et al.*, 2016).

➤ Le taux de renouvellement d'air

Le taux de renouvellement d'air intervient sur le délai de transfert entre l'intérieur et l'extérieur. Ce délai est fonction du temps de parcours du polluant au sein de l'enveloppe et/ou du réseau de ventilation et du volume de l'espace considéré. Plus le taux de renouvellement d'air est grand, plus ce temps de parcours est raccourci et plus le délai est faible jusqu'à devenir nul.

Une augmentation du débit d'air neuf entrant accroît les vitesses d'air au niveau des conduits ou au sein des fissures en ce qui concerne l'infiltration et par conséquent augmente le transfert. L'ouverture des fenêtres, correspondant généralement à des taux de renouvellement d'air élevés, augmente la section de l'enveloppe communiquant directement avec l'extérieur, augmentant également le transfert.

Au niveau du dépôt, l'impact du taux de renouvellement d'air n'est significatif que dans les cas où le dépôt est limité par le transport du polluant vers la surface au travers d'une couche limite. Dans ce cas, une augmentation du taux de renouvellement d'air favorise le brassage et l'interaction des polluants avec la paroi et par conséquent tend également à augmenter la constante de dépôt jusqu'à une certaine limite. C'est généralement le cas pour les particules.

Rim *et al.* (2010) observent que l'ouverture des fenêtres ne fait pas varier la constante de dépôt des particules ultrafines comprises entre 20 et 100 nm. Par contre, la constante de dépôt diminue pour les particules plus fines. El Orch *et al.* (2014) appliquent quant à eux une augmentation de 70 % de la constante de dépôt lorsque les fenêtres sont ouvertes en grand par rapport aux périodes où elles restent fermées et de 23 % seulement lorsque les fenêtres sont entrouvertes.

Nicolas (2006) observe une augmentation du ratio journalier entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur d'ozone avec le taux de renouvellement d'air qui varie de 0,04 pour 0,5 h⁻¹ jusqu'à 0,21 pour 2,41 h⁻¹. Mais cette même configuration ne conduit pas à une variation significative du ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur de NO ou de NO₂.

➤ La constante de dépôt

La constante de dépôt k_d symbolise les pertes du polluant au niveau des surfaces selon différents procédés : pertes par diffusion, sédimentation, adsorption, condensation, réactions de surfaces, etc. Elle dépend elle-même de 3 paramètres : (a) une vitesse de dépôt v_d (m/h), fonction de la nature du polluant, du revêtement et des conditions thermo-aérauliques, (b) l'ensemble des surfaces disponibles pour chaque type de revêtement ou d'orientation (S) et (c) le volume de l'espace considéré (V).

➤ Les réactions chimiques en phase gazeuse

Mélanie Nicolas dans sa thèse (2006) a réalisé des mesures intérieures et extérieures d'ozone dans une chambre d'une maison expérimentale avec et sans revêtements intérieurs. Lors de la campagne de mesures de 2003, en pleine période de canicule estivale, elle observe une variation du ratio journalier entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur pour l'ozone de $0,08 \pm 0,01$ sans revêtements (béton brut et plâtre) à $0,10 \pm 0,02$ (avec des plaques de lambris en bois disposées au sol). Une variation similaire de ce ratio est observée en 2004 après introduction dans la pièce de lambris aux murs, de moquette au sol et de dalles polystyrènes au plafond (respectivement $0,08 \pm 0,01$ avant et $0,10 \pm 0,05$ après ajout des matériaux). Cette légère augmentation du ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur de l'ozone n'est pas liée à une modification de la surface de dépôt, mais plus à un changement de la nature des surfaces disponibles. La vitesse de dépôt apparente est globalement plus faible que celle initiale alors qu'expérimentalement ces mêmes matériaux affichaient des valeurs importantes.

Cette variation du ratio entre la concentration intérieure et celle à l'extérieur de l'ozone est en fait principalement liée aux émissions propres de composés organiques volatils par les revêtements sélectionnés (terpènes, hydrocarbures, styrène, aldéhydes, etc.). Ces substances réagissent à des degrés divers avec l'ozone, pour former des sous-produits réactionnels dont des radicaux libres, eux-mêmes susceptibles de réagir avec NO ou avec d'autres COV pour reformer de l'ozone. Au final, ce mélange de substances émises a pour effet d'augmenter légèrement le ratio I/E d'ozone. Mais cette conclusion va dépendre du mélange de substances proprement dit.

4.2 Phénomènes physico-chimiques définissant les transferts

Les transferts de polluants atmosphériques, caractérisés par les différences de concentrations entre l'air extérieur et intérieur, résultent des mouvements/flux d'air induits par la ventilation, l'aération ou les infiltrations à travers les défauts d'étanchéité des bâtiments, mais aussi et surtout des phénomènes physico-chimiques qui se produisent :

- Au passage de l'air extérieur à travers l'enveloppe des bâtiments ou leur réseau de ventilation,
- Et à l'intérieur des pièces qui composent le bâtiment.

Ces phénomènes contribuent à faire diminuer ou augmenter les concentrations intérieures de polluants par rapport aux niveaux extérieurs. Ils sont de nature et d'intensité différentes suivant les polluants.

4.2.1 Particules et agents biologiques (moisissures et pollens)

L'abattement des concentrations en particules lors de leur transfert de l'extérieur vers l'intérieur résulte en premier lieu des dépôts à la surface des voies d'air de l'enveloppe du bâtiment (fissures correspondant aux défauts d'étanchéité, entrées d'air des systèmes de ventilation mécanique par extraction) puis à la surface des matériaux constitutifs du mobilier et des parois qui délimitent les pièces.

Les flux surfaciques de particules déposées sont proportionnels à la concentration en particules dans l'air à proximité de la surface. La constante de proportionnalité, appelée vitesse de dépôt, dépend du régime d'écoulement d'air, de l'orientation de la surface (face libre orientée vers le haut, le bas ou le côté) et de la taille des particules. A l'intérieur d'une pièce, la synthèse des dépôts sur les murs, le plancher et le plafond contribue ainsi à définir une constante de dépôt, λ (en s^{-1} ou h^{-1}), dont l'évolution en fonction de la taille des particules est représentée sur la Figure 17. Celle-ci montre que dans le domaine des PM_{10} , les dépôts sont maximaux pour les plus grosses particules

(diamètre supérieur à 1 μm) et les nanoparticules (diamètre de 1 nm soit 0,001 μm), et minimaux dans la gamme située entre 0,1 et 1,0 μm .

La distribution granulométrique de l'aérosol apparaît de fait comme un facteur de variabilité des transferts de particules : à concentration massique égale, les dépôts seront plus importants pour un aérosol contenant de grosses particules que pour un aérosol constitué d'une grande fraction de $\text{PM}_{2.5}$. Les concentrations intérieures en PM_{10} à attendre, et par suite, le ratio entre concentrations intérieures et extérieures, peuvent être significativement plus faibles dans le premier cas que dans le second.

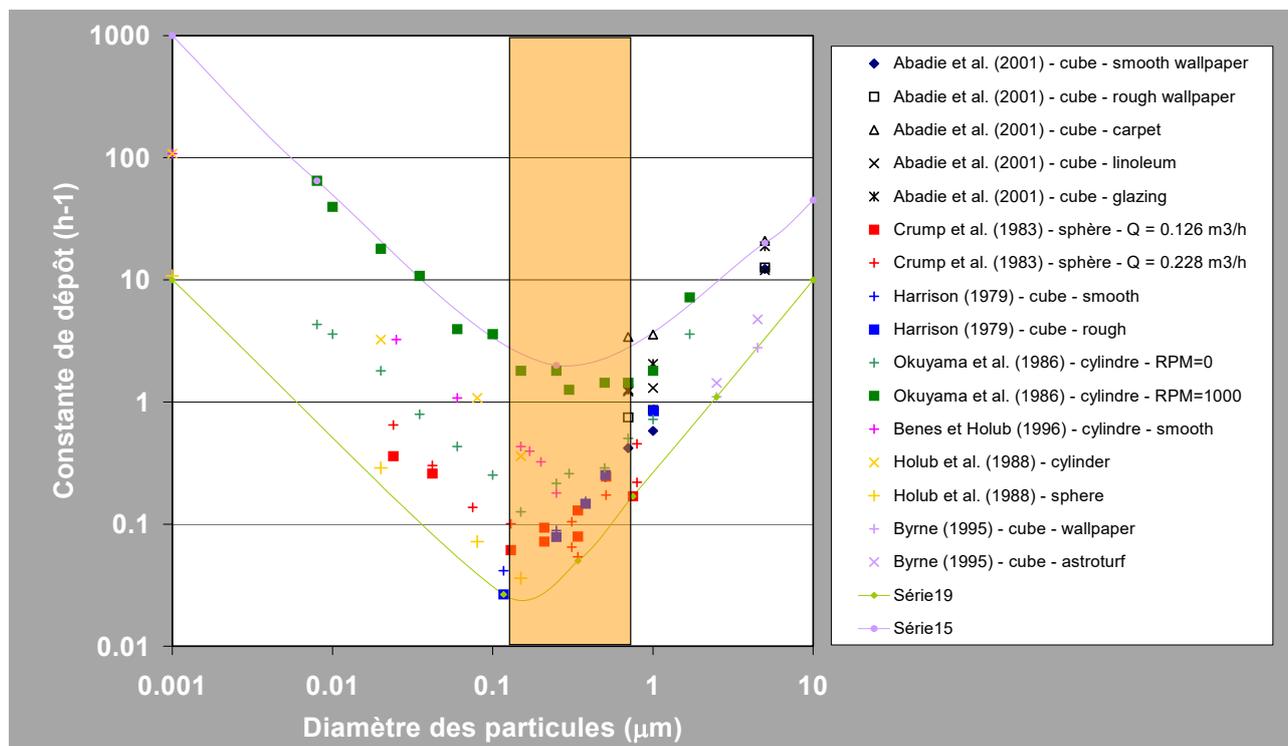


Figure 17 : Constante de dépôt des particules sur les parois d'une pièce en fonction de la taille des particules (compilation d'après Abadie, 2000)

Dans les bâtiments qui disposent d'un système de ventilation par insufflation - ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux ou centrale de traitement d'air (CTA) - les particules se déposent également à la surface des gaines et des équipements techniques du réseau aéraulique, à commencer par les filtres dont l'utilisation est vivement recommandée pour des questions de qualité sanitaire de l'air intérieur, mais avant tout pour éviter que le réseau de distribution de l'air ne s'encrasse et ne devienne un lieu de prolifération des microorganismes. Pour cette raison, des filtres à particules sont également quasi-systématiquement mis en place à l'entrée des systèmes qui fonctionnent par recyclage de l'air intérieur, comme les unités intérieures de climatisation.

L'abattement des concentrations intérieures en particules par les filtres dépend directement de leur efficacité intrinsèque, qui est repérée par leur appartenance à un groupe et une classe suivant les normes internationales en vigueur (ISO 16890 et ISO 1822). Dans tous les cas, la présence de filtres dans un bâtiment constitue évidemment le principal déterminant des transferts de $\text{PM}_{2.5}$ et PM_{10} .

Parallèlement aux dépôts sur les parois, les particules en suspension dans l'air intérieur ont une tendance naturelle à se regrouper pour en former de plus grosses, par des phénomènes dits de coagulation ou de coalescence pour les particules liquides. Ces phénomènes conduisent à une distorsion temporelle de la distribution granulométrique de l'aérosol dans le sens des plus grandes

tailles de particules. Des particules peuvent de cette manière sortir du champ des $PM_{2.5}$ ou des PM_{10} , avec donc pour conséquence directe d'abaisser les concentrations de ces fractions granulométriques dans l'air intérieur. Dans les faits, l'impact de la coagulation sur les transferts de $PM_{2.5}$ et de PM_{10} n'est toutefois véritablement significatif que dans les milieux très pollués, comme un local fumeur ou une gare ferroviaire souterraine par exemple, où la probabilité de collision entre particules est suffisamment élevée pour induire des flux coagulés qui peuvent être du même ordre de grandeur que les flux déposés ou véhiculés par la ventilation.

Vis-à-vis des transferts, les moisissures et les pollens s'apparentent à des particules inertes de même taille (1 à 30 μm pour les spores, 5 à 250 μm pour les pollens), à la nuance près que leurs propriétés électrostatiques peuvent se traduire par des vitesses de dépôt sur les surfaces plus élevées (pouvoir d'adhésion plus important).

4.2.2 Composés gazeux inorganiques (ozone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre)

Les interactions des composés gazeux inorganiques avec les matériaux, au cours de leur passage à travers l'enveloppe du bâtiment ou à l'intérieur même des pièces, sont-elles-aussi couramment assimilées à des dépôts et décrites en tant que tels par un modèle de vitesse de dépôt. Ce dernier établit que le flux surfacique de polluant déposé à la surface d'un matériau est proportionnel à la concentration du polluant dans l'air au voisinage de cette surface. Les dépôts contribuent ainsi à abaisser les concentrations intérieures des polluants par rapport à leur niveau extérieur.

Contrairement aux particules, la qualification comme dépôts des interactions entre les molécules gazeuses et les matériaux suscite cependant quelques précautions d'usage dans le sens où :

- Dans les faits, les phénomènes mis en jeu sont le plus souvent des réactions chimiques de surface, c'est-à-dire des processus qui n'ont pas nécessairement des cinétiques de réaction d'ordre 1 par rapport à la concentration de composé inorganique : le flux déposé ou décomposé dépend aussi de la concentration d'autres polluants présents à la surface du matériau. Par ailleurs, si elles sont bénéfiques vis-à-vis des polluants transférés, puisqu'elles contribuent à abaisser leur concentration intérieure, ces réactions peuvent donner lieu à l'émission dans l'air intérieur de composés secondaires dangereux pour la santé (Uhde & Salthammer, 2007).
- Les vitesses de dépôt, qui caractérisent ici la propension des polluants à se décomposer à la surface d'un matériau, dépendent du régime d'écoulement d'air à la surface mais aussi de la nature des matériaux et de leur âge. Ainsi, s'il est fréquemment recouru à la notion de constante de dépôt λ pour caractériser globalement les dépôts des composés inorganiques dans une pièce, la diversité des configurations architecturales et des matériaux utilisés induit que les valeurs de λ peuvent être difficiles à appréhender, et varier dans de très larges proportions d'un bâtiment ou d'une pièce à l'autre.

Pour un même matériau, les vitesses de dépôt de l'ozone sont dans la majorité des cas plus élevées que celles des oxydes d'azote (Grontoft & Raychaudhuri, 2004). Ainsi, dans un même bâtiment, le ratio entre concentrations à l'intérieur et à l'extérieur, qui est un indicateur des transferts (voir paragraphe 4.3), est généralement plus faible pour l'ozone que pour les oxydes d'azote. Le monoxyde et le dioxyde de carbone sont quant à eux réputés inertes au contact des matériaux.

A l'instar de ce qui se produit dans l'atmosphère, les polluants gazeux inorganiques réagissent également chimiquement entre eux, avec des radicaux libres ou avec des composés organiques, dans l'air intérieur. Suivant que les polluants transférés soient impliqués comme réactifs ou comme produits de réaction, cette réactivité homogène contribue à faire diminuer ou au contraire augmenter leur concentration à l'intérieur des bâtiments.

Peu de bâtiments sont équipés de filtres moléculaires (la plupart du temps en charbon actif) dans le réseau de ventilation ou à l'intérieur des unités de climatisation fonctionnant par recyclage

interne de l'air. Lorsqu'ils sont présents, ces filtres contribuent évidemment à abattre de manière substantielle les concentrations extérieures en ozone et en oxyde d'azote. Des études ont également montré que bien que ce ne soit pas leur fonction première, les filtres mécaniques à particules contribuent eux-aussi à réduire efficacement les concentrations en ozone, par la conjonction des grandes surfaces solides qu'offrent ces médias fibreux et des processus de dépôt (de réactivité de surface) décrits ci-dessus (Beko *et al.*, 2008).

4.2.3 Composés organiques volatils et semi-volatils

Les composés organiques volatils et semi-volatils en phase gazeuse interagissent avec les matériaux, lors de leur transfert dans les bâtiments, par des processus d'adsorption qui sont considérés comme physiques, c'est-à-dire réversibles. Si les concentrations dans l'air sont invariantes dans le temps, il s'instaure un équilibre d'adsorption entre les surfaces solides et la phase aérienne, qui se traduit par l'absence de flux dans un sens ou dans l'autre (de l'air vers la surface ou vice-versa). Si les concentrations fluctuent dans le temps, les phénomènes d'adsorption/désorption induits par les surfaces confèrent au bâtiment une inertie qui se manifeste par une moindre amplitude des variations de concentration à l'intérieur qu'à l'extérieur, ainsi qu'un possible déphasage temporel des pics de concentrations. Dans les deux cas, sur des périodes longues, les interactions avec les matériaux n'impactent donc pas de manière importante les transferts de polluants de l'extérieur vers l'intérieur.

Les COSV présents dans la phase particulaire sont pour leur part, sujets aux phénomènes de dépôt auxquels sont soumises les particules qui les portent (voir paragraphe 4.2.1).

Suivant les substances et les conditions environnementales, les réactions chimiques homogènes qui prennent place au passage de l'air à travers l'enveloppe du bâtiment ou le réseau de ventilation, et au sein même des pièces, peuvent contribuer à faire diminuer ou augmenter les concentrations des COV d'origine extérieure. L'impact de la réactivité chimique sur les transferts de composés organiques est toutefois à relativiser. Dans le cadre de l'étude MERMAID (Primequal, Ademe), des simulations avec un modèle détaillé intégrant une représentation fine de la réactivité chimique en air intérieur ont par exemple montré que dans des conditions environnementales très favorables, l'augmentation de concentration en formaldéhyde par la cinétique chimique n'excédait pas 20% (Schoemaeker *et al.*, 2015).

Dans le cas spécifique des COSV, les différences de température entre l'extérieur et l'intérieur peuvent occasionner une modification de la répartition entre les phases gazeuse et particulaire. Les changements de phase des polluants, lorsqu'ils pénètrent dans les environnements intérieurs, peuvent donc impacter leurs transferts si ceux-ci sont caractérisés à partir des mesures de concentration dans une seule phase.

4.2.4 Emissions internes et autres vecteurs de transfert

L'étude des transferts de polluants atmosphériques à l'intérieur des bâtiments suppose de considérer que ces polluants proviennent exclusivement du compartiment extérieur, ou à défaut de ne considérer que la part de concentration intérieure dont l'origine est extérieure. Une grande partie des polluants règlementés dans l'air extérieur sont cependant également sujets à des émissions internes par différents types de sources : matériaux, équipements, activités humaines, combustions, etc. Ces émissions sont potentiellement variables dans le temps, souvent difficiles à quantifier précisément, et il n'est dès lors pas aisé d'isoler la part de concentration intérieure qui résulte des seuls transferts depuis l'extérieur. De la même manière, la germination des spores déposées sur les surfaces, après leur pénétration dans les bâtiments, peut donner lieu à des émissions internes importantes de nouvelles spores.

La remise en suspension de particules déposées à la surface des matériaux, par les mouvements des occupants, peut constituer un déterminant majeur des concentrations intérieures dans les bâtiments à forte densité d'occupation comme les écoles. Souvent apparentée à une source interne, elle devrait pourtant être considérée comme un phénomène distinct et à part entière :

- D'une part parce qu'il ne s'agit pas à proprement parler d'une production de particules à l'intérieur des bâtiments, mais d'un transfert de particules des surfaces vers la phase aérienne ;
- D'autre part parce que les flux de particules remis en suspension dépendent des quantités déposées sur les surfaces. Ces dernières dépendent elles-mêmes des concentrations dans l'air intérieur (voir paragraphe 4.2.1), qui sont déterminées par chacun des phénomènes intervenant dans le transport de particules à l'intérieur des bâtiments : ventilation, émissions internes, dépôts, coagulation et remise en suspension. Les concentrations en particules dans l'air intérieur et à la surface des matériaux sont donc couplées et la remise en suspension dans l'air intérieur peut être considérablement limitée en nettoyant régulièrement les surfaces qui sont sujettes à ce phénomène (principalement le sol).

En définitive, la caractérisation fine des transferts de polluants d'origine atmosphérique nécessite de restreindre l'analyse aux seules données de concentrations intérieures que l'on juge peu impactées par les sources internes, par exemple parce qu'elles correspondent à des périodes d'inoccupation du bâtiment. Ce jugement d'expert contient nécessairement une part d'arbitraire et d'incertitude. Par ailleurs, les concentrations intérieures peuvent être influencées par des sources intérieures plusieurs heures après que celles-ci aient cessé d'émettre les polluants, du fait des vitesses de dépôt et des constantes de temps relatives au renouvellement complet de l'air dans les pièces.

Il convient aussi de souligner que d'autres vecteurs de pénétration des polluants atmosphériques peuvent en certaines circonstances se superposer aux transports par les flux d'air échangés entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments. Il s'agit notamment :

- Des transports par les occupants et les animaux, qui se déplacent entre l'intérieur et l'extérieur, ou entre plusieurs bâtiments : poussière collectée sous les chaussures, pollens et autres allergènes adhérant aux vêtements, etc.
- De la diffusion à travers la dalle des bâtiments de polluants initialement contenus dans le sol ou ayant été transférés dans le sol depuis le compartiment atmosphérique.

Ces deux cas ne rentrent pas dans le champ de l'étude mais il ne peut être exclu que des données utilisées pour calculer les indicateurs de transferts, définis dans le paragraphe qui suit, intègrent une contribution de ces transferts connexes.

4.3 Indicateurs de transfert

Trois indicateurs sont utilisés pour caractériser les transferts de polluants de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments.

Il s'agit du :

- facteur de pénétration (P) ;
- ratio intérieur/extérieur (I/E) ;
- facteur d'infiltration (F_{inf}).

Ces 3 indicateurs sont définis ci-après, par référence aux principes et phénomènes physico-chimiques énoncés dans le paragraphe précédent, et sont illustrés par la Figure 18.

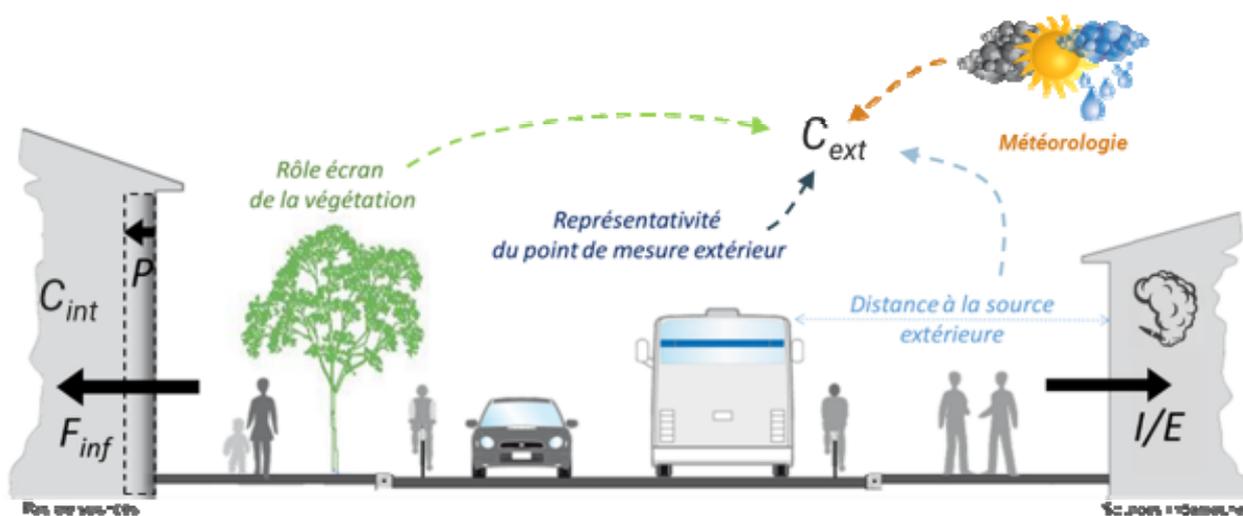


Figure 18 : Schématisation de la problématique du transfert intérieur/extérieur et des 3 indicateurs de transfert considérés : le facteur de pénétration P , le facteur d'infiltration F_{inf} et le ratio intérieur/extérieur (I/E). Les 3 indicateurs se réfèrent à la concentration extérieure (C_{ext}) qui dépend d'autres paramètres (Source : rapport de CRD Anses-CSTB en Annexe 12)

4.3.1 Facteur de pénétration (P)

Le facteur de pénétration (ou efficacité de transfert) décrit le passage d'un agent extérieur à travers l'enveloppe et/ou le réseau de ventilation d'un bâtiment. Il correspond à la fraction de la concentration extérieure non éliminée ou captée au passage d'une voie d'air, et est défini par le rapport entre la concentration au débouché de cette voie d'air ($C_{s,int}$), et la concentration extérieure :

$$P = \frac{C_{s,int}}{C_{ext}}$$

Aucun phénomène conduisant à une production des polluants transférés n'étant censé se produire au cours du passage de l'air à travers les composants d'enveloppe ou du système de ventilation (sauf éventuellement des réactions chimiques homogènes mais les temps de passage de l'air à travers ces composants sont suffisamment courts pour que les effets des phénomènes réactifs ne soient pas significatifs), P doit en principe être inférieur à l'unité dans une grande majorité des cas. Des valeurs proches de 1 sont par ailleurs à attendre pour des composants tels qu'une fenêtre ouverte ou une entrée d'air, où la surface de contact entre l'air et les matériaux est faible et la vitesse de passage de l'air élevée. A l'inverse, le facteur de pénétration peut présenter des valeurs proches de zéro dans les bâtiments qui disposent d'un système de ventilation mécanique par insufflation intégrant des filtres à haute efficacité.

Les concentrations $C_{s,int}$ peuvent être plus ou moins facilement mesurées au niveau des bouches terminales d'un réseau de ventilation par insufflation ou en aval des entrées d'air situées en façade si la ventilation du bâtiment se fait par extraction. En revanche, quand l'air n'est pas suffisamment canalisé ou que la section de passage de la voie d'air est petite (fenêtre ouverte, défaut d'étanchéité de type fissure, etc.), il devient techniquement impossible de les mesurer directement. La seule solution pour y accéder est alors de mesurer les concentrations en polluants dans le volume d'air de la pièce, C_{int} , en supposant qu'elles sont homogènes, et de recourir à un modèle de transfert pour retrancher les effets des phénomènes qui se produisent après que les polluants aient pénétré dans le compartiment intérieur (dépôts sur les parois, réactions chimiques dans l'air intérieur, émissions internes, etc.). L'incertitude sur la contribution exacte de ces phénomènes conduit inévitablement à une incertitude sur les valeurs de P obtenues.

4.3.2 Ratio de concentration intérieur / extérieur (I/E)

Le ratio I/E se déduit directement des mesures réalisées en simultanément à l'intérieur (concentration intérieure C_{int}) et à l'extérieur (concentration extérieure C_{ext}), sur une durée définie qui peut être très variable selon les études. Il caractérise les transferts des polluants au passage de l'enveloppe et du réseau de ventilation, ainsi que tous les phénomènes qui se produisent au sein des ambiances intérieures pour définir au final la concentration C_{int} . En conséquence, en l'absence de sources internes, les dépôts de polluants à la surface des parois doivent conduire à des ratios I/E qui sont inférieurs à P. De manière corollaire, l'obtention de ratios I/E supérieurs à P ou supérieurs à 1, sur une période d'intégration suffisamment longue, révèle l'existence de sources internes du polluant transféré. La caractérisation fine des transferts de polluants extérieur / intérieur par le ratio I/E nécessite donc que puissent être sélectionnées des données pour lesquelles la contribution des émissions internes est jugée nulle, ou à défaut faible.

4.3.3 Facteur d'infiltration (F_{inf})

Le facteur d'infiltration F_{inf} correspond également au rapport entre les concentrations à l'intérieur (C_{int}) et à l'extérieur (C_{ext}) d'un bâtiment, dans le cas où il n'y a pas de source interne des polluants transférés. Contrairement à une simple moyenne des deux séries de données, son mode de calcul, par une régression linéaire entre les valeurs mesurées de C_{int} et C_{ext} , permet de gommer les effets inertiels inhérents aux transferts, et éventuellement de filtrer les effets des émissions par les sources internes. En ce sens, le facteur d'infiltration peut être considéré comme un indicateur de transfert plus précis que le ratio I/E.

4.4 Données issues de la littérature

Les données collectées dans le cadre de la CRD Anses-CSTB et présentée dans le paragraphe 2.2.1 ont permis d'établir pour chacun des polluants ciblés, un ordre de grandeur pour chacun des indicateurs de transfert listés dans les paragraphes précédents. Elles ont été résumées pour chaque polluant dans un tableau en distinguant les données pour tous les pays confondus et les données françaises seules. L'Annexe 12 rassemble les valeurs médianes et moyennes des différents indicateurs de transfert pour tous les bâtiments et toutes les saisons. Le Tableau 3 présente une synthèse de ces résultats.

Tableau 3 : Synthèse des indicateurs de transfert (facteur d'infiltration F_{inf} et ratio I/E) pour les polluants traités dans l'expertise

Facteur d'infiltration F_{inf} en %	Occurrence	Ratio de concentrations intérieure/extérieure														
<p>Benzène CO NO₂ SO₂ O₃</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nombre d'occurrences</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>152</td></tr> <tr><td>7</td><td>25</td></tr> <tr><td>16</td><td>199</td></tr> <tr><td>5</td><td>20</td></tr> <tr><td>6</td><td>129</td></tr> </tbody> </table>	Nombre d'occurrences		1	152	7	25	16	199	5	20	6	129	<p>I/E > 1 I/E ~ 0,8 I/E ~ 1 I/E ~ 0,4 I/E ~ 0,3</p>		
Nombre d'occurrences																
1	152															
7	25															
16	199															
5	20															
6	129															
<p>PM₁₀ PM_{2,5} Particules 2,5 - 10 µm Particules 1 - 2,5µm Particules 0,01 - 1 µm Particules < 0,01 µm</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nombre d'occurrences</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>21</td><td>69</td></tr> <tr><td>157</td><td>137</td></tr> <tr><td>7</td><td>55</td></tr> <tr><td>4</td><td>54</td></tr> <tr><td>66/13</td><td>16/67</td></tr> <tr><td>7</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nombre d'occurrences		21	69	157	137	7	55	4	54	66/13	16/67	7		<p>I/E ~ 0,9 I/E ~ 0,9 I/E > 1 I/E > 1 I/E ~ 0,7-0,8</p>
Nombre d'occurrences																
21	69															
157	137															
7	55															
4	54															
66/13	16/67															
7																
<p>Benzo(a)pyrène Ni As Cd Pb</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nombre d'occurrences</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>/</td><td>11</td></tr> </tbody> </table>	Nombre d'occurrences		4	2	2	6	2	3	1	4	/	11	<p>I/E ~ 0,6 I/E ~ 0,7 I/E ~ 0,4 I/E ~ 1 I/E ~ 0,8</p>		
Nombre d'occurrences																
4	2															
2	6															
2	3															
1	4															
/	11															
<p>Moisissures Pollens</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nombre d'occurrences</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>/</td><td>6</td></tr> <tr><td>/</td><td>8</td></tr> </tbody> </table>	Nombre d'occurrences		/	6	/	8	<p>I/E ~ 0,5 I/E ~ 0,2</p>								
Nombre d'occurrences																
/	6															
/	8															

*Par analogie avec autre COV (MTBE)

A partir de l'analyse de la littérature, les travaux conduits dans le cadre de la CRD Anses-CSTB ont fait ressortir pour chaque polluant des facteurs influençant son transfert en première approche. Cependant, il faut être attentif au fait qu'il existe une hétérogénéité et un nombre variable de publications selon le polluant étudié. En effet, le rapport de la CRD Anses-CSTB indique que : « *Les principaux polluants réglementaires étudiés en terme de transfert intérieur/extérieur sont les particules, avec 70 études couvrant la fraction massique $PM_{2,5}$ (11 en France), 27 couvrant la fraction PM_{10} (5 en France), 37 la concentration en nombre de particules de différents diamètres (8 en France), 7 (1 en France) la fraction massique PM_1 et 22 (2 en France) d'autres indicateurs particulaires (fumées noires, carbone élémentaire, soufre/sulfates). Le benzène est le second polluant le plus étudié avec 63 études dont 23 françaises. Le dioxyde d'azote est représenté par 58 études dont 24 françaises. L'ozone est couvert par 34 études dont 12 françaises. Trente études dont 11 françaises abordent le transfert des moisissures. Tous les autres polluants sont représentés par moins d'une vingtaine d'études dont moins d'une dizaine en France.* »

La synthèse des connaissances sur le transfert intérieur/extérieur des polluants réglementaires ont été reportées de façon synthétique dans les tableaux ci-après afin d'identifier les facteurs de transferts communs et ceux potentiellement spécifiques aux polluants étudiés. Les cases vides (ou blanches) correspondent donc à une absence de documentation. Les facteurs recensés dans le cadre de cette expertise ont été identifiés à partir d'observations ou d'analyses statistiques conduites parfois sur un nombre réduit de données. En conséquence, les résultats font ressortir des facteurs pour lesquels le lien avec la phénoménologie des transferts décrite dans le paragraphe 4.2 n'est pas directe ou évidente, et/ou dont la réalité reste soumise à questionnement.

Le Tableau 4 présente les facteurs de transfert en lien avec le bâtiment (par exemple : la ventilation, la nature de l'isolant, le volume des pièces...). Le Tableau 5 concerne les autres types de facteurs de transfert (vent, saison, point de mesure...).

La première colonne de ces deux tableaux présente les différents types de facteurs (comme par exemple la température extérieure, la nature de l'isolant, la ventilation...) pouvant avoir un impact sur le transfert. Il est ensuite indiqué polluant par polluant, si le facteur concerné a une influence ou non sur le transfert int/ext du polluant en précisant en premier lieu quel facteur de transfert (ratio, facteur de pénétration ou d'infiltration) est concerné.

Le type de paramètre de transfert est donc indiqué au début de chaque case. Si aucun paramètre n'est présenté, cela signifie que l'influence du facteur concerne le transfert du polluant dans sa globalité. La façon dont le facteur de transfert influence le paramètre est ensuite indiquée (par exemple : augmentation, diminution, variation, pas de variation...).

Pour rappel :

- P : Facteur de pénétration ;
- I/E : Ratio de concentration ;
- F_{inf} : Facteur d'infiltration.

A noter que le symbole ↗ signifie augmentation ou augmente et le symbole ↘ signifie diminution ou diminue.

Par exemple, dans le Tableau 4 :

- le premier facteur est le type de bâtiment. Pour le benzène, le ratio I/E est plus élevé dans les bureaux que dans les autres types de bâtiments.
- Concernant l'enveloppe du bâtiment (et en particulier sa perméabilité), il n'y a pas, par exemple, de variation observée sur le transfert du NO_2 . Pour l'ozone le facteur de pénétration P et le ratio I/E augmentent en fonction de la perméabilité de l'enveloppe.

Pour plus de détails sur ces tableaux, il est conseillé de se référer au chapitre 5.16 intitulé « Synthèse des connaissances sur le transfert int/ext des polluants réglementaires » du rapport de CRD Anses-CSTB.

En termes d'interprétation, les informations relatives pour chaque facteur de transfert identifié et pour chaque polluant étudié donnent des indications isolées qui ne doivent pas être commentées de manière individuelle mais c'est bien l'ensemble des informations qui permet un éclairage sur les facteurs de transfert.

Tableau 4 : Paramètres influençant le transfert des polluants issus de l'analyse du CSTB : facteurs influençant le transfert en lien avec le bâtiment

Facteurs influençant le transfert	Benzène	CO	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}	Particules*	BaP	Métaux	Moisissures	Pollens
Type de bâtiments	I/E : Bureaux> autres	I/E : Logements/Bureaux> Ecoles		I/E : Ecoles> Logements/Bureaux	I/E : Logements/Bureaux> Ecoles		I/E : Logements/Ecoles>Bureaux				I/E : Logements > Bureaux	
Volume intérieur		I/E : Varie en fonction de l'homogénéité										
Enveloppe du bâtiment (Perméabilité ↗)				Pas de variation	P et I/E : ↗			P : varie				
Surface des revêtements intérieurs ↗ (en lien avec le dépôt)			Finf et I/E : ↘	Finf : ↘	Finf et I/E : ↘			Finf : variation				
Nature de l'isolant					P : varie							
Taux de renouvellement d'air ↗		I/E : ↗		Finf : ↗		I/E : faible influence	Finf : ↘	Finf : ↗				
Ouverture des fenêtres ↗			I/E : ↗		Finf et I/E : ↗		Finf : ↗	P et I/E : ↗				I/E : ↗
Ventilation ↗				Finf : avec ventilation mécanique > sans I/E : pas de variation		Finf : avec ventilation mécanique < sans (présence caisson)	Finf : pas d'influence I/E :				I/E : ↗ en fonction de la CTA	
Présence d'une climatisation			I/E : ↘	I/E : avec < sans	I/E : ↘	I/E : ↘	Finf : ↘					
Filtration				Variation dans le temps en fonction O ₃	I/E : varie	Finf : avec < sans	I/E et Finf : pas d'influence					
Présence d'un garage communiquant	I/E : avec > sans	I/E : ↗										

CTA : centrale de traitement d'air ; * autres fractions ou indicateurs

Tableau 5 : Paramètres influençant le transfert des polluants issus de l'analyse du CSTB : autres types de facteurs

Facteurs influençant le transfert	Benzène	CO	SO ₂	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}	Particules*	BaP	Métaux	Moisissures	Pollens
Zone de densité urbaine	I/E : urbain>périurbain			I/E : ↗			Variation				I/E : Variation en fonction de la zone géographique	
Saison (période)	Pas de variation	I/E : varie	I/E : été > hiver	Finf et I/E : été > hiver Hors chauffe>chauffe		I/E : pas d'influence Finf : faible influence	Finf : Hors chauffe>chauffe I/E : pas de variation	Finf : été > hiver	Pas de variation		Pas de variation	Variation observée en fonction de la pollinisation
Point de mesure extérieur	I/E : variation en fonction proximité trafic, arrière cour	I/E : point à proximité du bâtiment > station de mesure			I/E : point à proximité bâtiment<station de mesure	Finf : point à proximité bâtiment>station de mesure						Variation en fonction du point à proximité bâtiment, station de mesure
Température extérieure ↗			I/E : ↗	I/E : ↘								I/E : ↗
Vent		I/E : varie en fonction de la direction du vent et de l'exposition de la façade (sous le vent < au vent)	I/E : ↗ en fonction de la vitesse du vent			I/E : faible influence de la direction du vent	Finf : ↗ en fonction de la vitesse du vent					I/E : ↗ en fonction de la vitesse du vent
Réactivité chimique ↗				Variation	Variation							
Remise en suspension ↗								I/E : variation		I/E : ↗	variation	
Revolatisation							I/E et Finf : ↘		En fonction de l'occupation			
Présence ou absence de sources	I/E : variation en fonction de la combustion	I/E : ↗ en fonction de la combustion		I/E : ↗ si Gazinière ou désurfaceuses	I/E : ↘ si gazinière							
Propriétés physico-chimiques Identification								P, Finf et I/E : en fonction du Diamètre et de la composition	Finf et I/E Variation en fonction de la fraction granulométrie	I/E : ↗ en fonction de la fraction granulométrie	Variation en fonction des espèces, de la taille et du dénombrement, P : ↘ en fonction de l'adhésion	Variation en fonction des espèces, de la taille et des propriétés aérobiologiques

Le rapport de la CRD Anses-CSTB conclut que :

La plupart des données pertinentes proviennent d'études américaines. Les paramètres clés du transfert que sont le facteur de pénétration P et le facteur d'infiltration F_{inf} sont très peu documentés dans les études menées en France. Ceux qui le sont ne sont d'ailleurs pas toujours identifiés comme tels. Par exemple, l'étude menée sur le transfert des polluants dans un appartement parisien vide fournit les pentes de régression des concentrations intérieures en fonction de l'extérieur, sans spécifier que la pente représente un facteur d'infiltration moyen. Ces données existent dans la plupart des études françaises, mais ne sont pas mises en avant ou affichées dans les publications. Ce sont le plus souvent les coefficients de corrélation ou de détermination qui sont mis en avant et pas la pente des droites de régression. Les études recherchent également les déterminants des concentrations intérieures par modèles de régression multiple ou modèles multiniveaux. Le coefficient associé à la concentration extérieure, pour des données non transformées, peut également être interprété comme un facteur d'infiltration moyen. Mais il est alors nécessaire d'exercer un œil critique sur les autres variables introduites dans le modèle notamment lorsqu'elles font également appel à des notions de transfert.

Les caractéristiques de construction et d'utilisation du conditionnement d'air varient entre les différentes régions des Etats-Unis, mais également par rapport à la France. La transposabilité des informations de transfert observées outre-Atlantique à nos contrées peut s'avérer hasardeuse, notamment durant l'été où l'utilisation intensive du conditionnement d'air modifie les pratiques d'aération entre les Etats-Unis et la France. Cela souligne d'autant plus la nécessité de produire des données de transfert propres au parc de bâtiments européens et français.

Au regard du transfert intérieur/extérieur, il est possible de distinguer les polluants selon 4 catégories :

- Les gaz peu réactifs comme le benzène ou le CO, pour lesquels peu de données sont disponibles, mais on peut supposer que le facteur de pénétration P est proche du facteur d'infiltration F_{inf} et voisin de 1 ($P \sim F \sim 1$). Cette hypothèse reste néanmoins à vérifier ;
- Les gaz réactifs comme NO, NO₂, O₃ et SO₂. Là encore, les données disponibles sont rares, mais elles indiquent que le facteur de pénétration P est plutôt inférieur à 1 et que le facteur d'infiltration F_{inf} serait inférieur à P du fait d'interactions supplémentaires avec les surfaces intérieures ($F < P < 1$) ;
- Les particules sous différentes fractions et métriques (PM₁₀, PM_{2.5}, PN) ainsi que les espèces particulaires qui leur sont associées (benzo(a)pyrène et métaux lourds). Les données de transfert des particules sont nombreuses, mais rares pour les espèces particulaires. Le facteur de pénétration P et le facteur d'infiltration F_{inf} vont dépendre très fortement de la taille des particules qui détermine les interactions avec les surfaces, mais également de leur composition et plus particulièrement de la fraction semi-volatile qui leur est associée. En général, le facteur d'infiltration F_{inf} est inférieur au facteur de pénétration P , lui-même inférieur à 1 ($F < P < 1$). Pour les particules supérieures à 2,5 µm, les ratios I/E élevés traduisent une influence de l'occupation des locaux et de la remise en suspension.
- Pour les agents biologiques particuliers comme les moisissures et les pollens, pour lesquels très peu de données sont disponibles, le facteur de pénétration P semble faible, voire plus faible que celui des particules inertes de même diamètre. Cela pourrait traduire l'existence de propriétés spécifiques d'adhésion aux surfaces que ce soit au travers de la forme particulière des spores de moisissures ou des grains de pollens ou d'autres propriétés biologiques. Il est également nécessaire de différencier le comportement des moisissures et des pollens. Les moisissures une fois adhérentes aux surfaces sont susceptibles de s'y développer si les conditions hydriques et la présence de nutriments sont optimales, si bien que l'enveloppe du bâtiment comme les surfaces intérieures jouent le rôle de sources secondaires de spores de moisissures. Les pollens, une fois pénétrés dans le bâtiment tendent à se déposer rapidement sur les surfaces. Mais, l'occupation et

les mouvements d'air peuvent les remettre en suspension. Dans les deux cas, cela conduit à un effet de rémanence qui impacte directement l'exposition des occupants.

Le facteur de pénétration P des substances gazeuses est très peu étudié mis à part pour l'ozone, il est par défaut considéré égal à 1, valeur observée pour le SO₂ entre deux volumes intérieurs, mais pas en fonction de l'extérieur, donc non représentative. Les particules et les substances particulaires affichent en général un facteur de pénétration inférieur à 1 et très variable selon les situations. Le facteur d'infiltration qui leur est associé est encore plus faible du fait des pertes sur les surfaces. Les ratios int/ext sont par contre du même ordre voire supérieurs à 1 selon les situations, indiquant un possible apport par remise en suspension ou provenant des pièces avoisinantes (notamment pour les particules de diamètre supérieur à 2,5 µm). Les moisissures affichent un facteur de pénétration légèrement plus faibles que les particules, sans doute lié à des propriétés spécifiques d'adhésion par rapport aux particules inertes. Les pollens de par leur plus grosse taille devraient avoir un facteur de pénétration plus faible que les moisissures. Les seules données disponibles ont comparé des prélèvements de poussières à des mesures dans l'air.

Le facteur de pénétration P représente le premier degré de protection du bâtiment aux polluants extérieurs. Le facteur d'infiltration F_{inf} mesure le degré de protection des occupants à l'inhalation des polluants extérieurs. Mais il ne tient pas forcément compte de l'éventuelle rémanence des polluants ayant réussi à traverser l'enveloppe et qui se sont déposés sur les surfaces comme les grosses particules et les substances semi-volatiles.

Pour certains polluants comme les moisissures et les pollens, le facteur d'infiltration F_{inf} n'est pas forcément le meilleur indicateur pour estimer l'exposition des occupants. Dans le cas des moisissures, la surface peut devenir une source qui va amplifier leur impact. Dans le cas des pollens, ce sont les paramètres associés à la remise en suspension qui vont définir l'exposition, plus que le facteur d'infiltration lui-même. Ce dernier n'est finalement utile qu'à partir du moment où une corrélation significative peut être établie entre les concentrations intérieures et extérieures d'une substance ou de l'indicateur sanitaire recherché. Il faut également souligner le rôle pas toujours connu des autres modes de transport de l'extérieur à l'intérieur des bâtiments (poussières déposées sur chaussures, vêtements, cheveux, animaux, etc.) qui peuvent supplanter le transport par voie aérienne.

De nombreuses études ont néanmoins exprimé le transfert à travers le ratio I/E. Ce dernier permet d'évaluer la contribution relative des sources actives à l'intérieur des bâtiments au regard des paramètres « puits » que sont le dépôt et les réactions chimiques. Il est à ce titre moins spécifique que le facteur de pénétration P.

Le travail du CSTB a décrit les facteurs affectant le transfert en distinguant les paramètres extérieurs au bâtiment et ceux associés aux bâtiments. Ces paramètres comprennent :

- A l'extérieur du bâtiment, le transfert dépend de la distance par rapport aux sources émettrices, de l'orientation et des dimensions de l'édifice (hauteur, rapport hauteur-largeur de la voie, etc.), de la forme urbaine (bâtiments avec espaces intermédiaires, non contigus), des aménagements à proximité (effets écrans de bâtiments et espaces végétalisés) et des conditions météorologiques (direction et vitesse du vent, température extérieure, etc.) ;
- Les caractéristiques propres du bâtiment notamment le type de construction qui influe sur les caractéristiques de l'enveloppe et notamment les infiltrations à travers les défauts d'étanchéité ou la nature des matériaux de construction et de décoration (adsorption/ désorption ou réactivité de surface) ;
- Le type de ventilation ou de climatisation apparaît comme un paramètre crucial puisqu'il définit notamment une localisation de la (des) prise(s) d'air neuf et la présence ou non de filtres au passage de l'air dans le bâtiment où à l'intérieur du bâtiment (unités de climatisation) ;
- Le comportement des occupants influe également sur les transferts à travers la fréquence et la durée d'aération par ouverture des ouvrants (fenêtres et portes).

Il convient aussi de souligner que d'autres vecteurs de pénétration des polluants atmosphériques peuvent en certaines circonstances se superposer aux transports par les flux d'air échangés entre l'extérieur et l'intérieur des bâtiments. Il s'agit notamment :

- Des transports par les occupants et les animaux, qui se déplacent entre l'intérieur et l'extérieur, ou entre plusieurs bâtiments : poussière collectée sous les chaussures, pollens et autres allergènes adhérant aux vêtements, etc.
- De la diffusion à travers la dalle des bâtiments de polluants initialement contenus dans le sol ou ayant été transférés dans le sol depuis le compartiment atmosphérique.

4.5 Données des AASQA

Comme indiqué au paragraphe 2.2.2, un recueil spécifique des données des AASQA a été réalisé dans le cadre de ces travaux. Il en ressort que les AASQA disposent d'un nombre important de données concernant des concentrations en polluant mesurées simultanément à l'extérieur et à l'intérieur de bâtiments. Les principaux polluants mesurés dans ce cadre sont les : PM (PM_{2,5} ; PM₁₀ ; PM_{0,3-3}), le NO₂, le benzène éventuellement en association avec le toluène, l'éthylbenzène et les xylènes (cf Annexe 5). Pour ces polluants pouvant provenir de l'air extérieur, des mesures à proximité des bâtiments sont conduites de façon quasi systématique par les AASQA lors des campagnes de mesure en air intérieur.

D'autres polluants référencés en Annexe 5, y compris certains ne rentrant pas dans le cadre de cette étude, ont également été mesurés de façon simultanée. Une exploitation fine de l'ensemble de ces données nécessiterait une consultation précise, étude par étude, et permettrait de documenter, en complément du travail effectué dans le cadre de la CRD Anses-CSTB, des valeurs françaises pour certains paramètres de transfert.

Certaines AASQA ont réalisé des études spécifiques de transfert ou des études regroupant un nombre important de données permettant de déterminer les ratios air intérieur/air extérieur (les références de ces études sont précisées en Annexe 5).

Un travail a été fait à partir des campagnes de mesure de l'étude ISAAC menée en 2016/2017 par Atmo Sud (AirPACA, 2018). Elle a concerné 64 salles de classes de 17 écoles. L'exploitation des concentrations en air intérieur et air extérieur pour le NO₂ et le benzène mesurées par tubes passifs ont permis de déterminer un ratio moyen proche de 0,8 pour le NO₂ et supérieur à 1 pour le benzène. Ces résultats sont proches de ceux publiés dans la littérature (Tableau 3). L'étude de ces données a permis également de mettre en évidence l'influence de la position du point de mesure extérieur (côté cours/côté route) sur les ratios calculés conformément à ce qui a été mis en évidence dans le rapport du CSTB.

ATMO Grand Est a réalisé de juin 2013 à avril 2018 des mesures de benzène par tubes passifs dans des écoles situées à proximité d'une cokerie (ATMO Grand Est, 2017). Les points de mesure extérieurs étaient situés à proximité immédiate de l'école. Les ratios de concentrations air intérieur/air extérieur obtenus en moyenne sur les écoles se situent entre 0,9 et 1 et sont inférieurs aux ratios indiqués dans le rapport du CSTB (autour de 1,2 en tendance centrale). L'absence de sources intérieures est avérée dans ces écoles ce qui peut expliquer ce résultat. Une exploitation plus fine des données a été réalisée en considérant uniquement les concentrations en benzène obtenues lorsqu'une influence de la cokerie est démontrée de par les directions de vents mesurées lors de la campagne. Les ratios I/E sont alors de 0,8 ; soit encore plus faibles que précédemment et que ceux issus du rapport du CSTB. Cela traduit l'influence de la direction du vent sur le ratio I/E pour ce qui concerne le benzène (non documenté dans le Tableau 5). Il apparaît également que les résultats obtenus peuvent donc être assez variables d'une pièce à l'autre dans la même école en lien avec la configuration de la pièce.

Air Pays de la Loire mène actuellement dans le cadre d'un projet AACT'AIR (Ademe) intitulé TRANSFAIR, une étude visant à déterminer le transfert du SO₂, des PM₁₀ et du NO₂ dans deux

écoles situées à proximité d'une zone aéroportuaire et d'axes de circulations. L'exploitation des données de l'étude est actuellement en cours.

En 2014, le projet SCOL-AIR mené par Atmo Haut de France en partenariat avec le Cerema a permis d'étudier le transfert de l'air extérieur vers l'air intérieur dans deux écoles de Lille. Cette étude a mis en évidence l'impact de la qualité de la conception du bâtiment (ventilation, isolation...) sur le transfert des polluants issus de l'air extérieur. En effet, une des écoles, de conception plus ancienne, est plus soumise à l'influence des polluants d'origine extérieure (benzène, poussières, dioxyde d'azote...) que la seconde école équipée d'un système de ventilation plus efficace (VMC double flux (ATMO Nord-Pas de Calais & CEREMA, 2015)).

Au-delà des campagnes de mesure, de nombreuses AASQA réalisent des études de pollution afin de déterminer l'impact des sources de pollution sur l'exposition des populations. Par exemple, les études de caractérisation de la qualité de l'air extérieur à proximité des voies de grande circulation effectuées par Airparif ont permis de réaliser un croisement entre les données modélisées de la qualité de l'air et la localisation des établissements recevant du public francilien (Airparif, 2008). Cela a permis de mettre en évidence que « près d'un tiers des ERP étudiés sont localisés dans des zones pour lesquelles les teneurs extérieures en NO₂ sont supérieures à 40 µg.m⁻³ en 2011. » (Airparif, 2012). Pour le benzène et les PM₁₀, 10 % des ERP sont situés dans des zones présentant des concentrations extérieures ne respectant pas les objectifs de qualité associés à ces polluants. Les AASQA travaillent également sur des projets intégrant des outils de simulation atmosphérique pour juger du niveau de pollution de l'air extérieur d'une zone à construire, de l'impact d'aménagements urbains sur ce niveau, ou pour étudier l'influence du positionnement du bâtiment sur une parcelle sur son exposition à la pollution atmosphérique (des exemples sont notamment décrits ci-après en dans le chapitre 5).

Les études menées par les AASQA confortent les résultats précédemment mis en évidence par le rapport de la CRD Anses-CSTB.

Cependant, à l'heure actuelle, peu d'études sont menées spécifiquement sur le transfert des polluants entre l'air extérieur et l'air intérieur par ces associations. De plus, les méthodes métrologiques généralement utilisées lors des campagnes de mesure (tubes passifs) ne permettent pas d'appréhender le transfert sur un pas de temps court.

5 Constats et pistes d'action visant à limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'intérieur du bâti

5.1 Constats

Au vu des données collectées et des conclusions qui en sont tirées et présentées dans le chapitre 4, il peut être clairement énoncé que la pollution de l'air extérieur contribue à la dégradation de la qualité de l'air intérieur. Les facteurs qui interviennent sur le transfert des polluants à l'intérieur des bâtiments identifiés à partir de la revue de la littérature sont particulièrement nombreux.

Les premiers facteurs à intervenir sont ceux qui affectent la concentration extérieure des polluants à proximité immédiate des bâtiments, aux abords de la façade, de la fenêtre ou de la prise d'air neuf. La position et la distance des sources de pollution au regard du bâtiment, les conditions météorologiques de dispersion des polluants dans l'atmosphère et la présence d'un écran végétal vont venir modifier la concentration à proximité immédiate du bâtiment, variable ou non selon les niveaux. Une fois présents dans les environnements intérieurs, il s'agit de mouvements/flux d'air induits par la ventilation, l'aération par les ouvrants ou les infiltrations à travers les défauts d'étanchéité des bâtiments, mais aussi et surtout des phénomènes physico-chimiques qui se produisent qui vont définir le transport des contaminants entre les compartiments intérieurs mais également avec l'extérieur.

Ces nombreux facteurs qui interviennent dans le transfert peuvent influencer la résultante « concentration intérieure » de manière positive ou négative selon les polluants étudiés. Il faut également noter l'interdépendance de certains facteurs entre eux.

Ainsi, les données disponibles ne permettent pas de mettre en exergue les paramètres les plus influents pour lesquels des recommandations technico-pratiques pourraient être formulées. En effet, il ne paraît pas possible, sur la base des connaissances actuelles, d'isoler et de caractériser précisément le degré d'influence de chaque paramètre associé à tel polluant, à telle caractéristique du bâtiment ou encore à telle situation d'implantation d'un bâtiment.

Compte tenu de l'exploration bibliographique réalisée sur la thématique et des différents retours obtenus suite aux consultations et auditions menées, il est apparu aux experts rapporteurs que l'angle de vue et d'approche de la thématique doit s'appréhender de manière élargie et plus globale, dans le cadre d'aménagements urbains, d'implantation d'infrastructures, de construction ou de réhabilitation de bâtiments, ou encore dans le cadre de l'occupation même des bâtiments.

Dans ce qui suit, il est proposé d'identifier les pistes d'actions pour limiter le transfert à partir de retours d'expérience recueillis à l'occasion des auditions, mais également sur la base d'exemples ou de projets initiés par des collectivités, des bailleurs sociaux, etc., de projets de recherche en cours ou à venir, ou encore de guides de bonnes pratiques, ou les stratégies proposées par le rapport de l'AIVC TN 58 (Sherman & Matson, 2003).

Cet élargissement de la réflexion aux expériences du terrain ayant pris en compte la problématique de la pollution atmosphérique et son transfert dans le bâti se veut volontairement large et illustratif afin de conforter les pistes d'actions proposées.

Ces éléments permettent ainsi d'envisager des leviers d'actions afin d'encourager la mobilisation de différents acteurs. Une attention particulière a été apportée au fait que ces pistes d'action puissent se concilier avec celles proposées actuellement sur la qualité de l'air intérieur. Par

ailleurs, les pistes identifiées s'attachent à proposer des évolutions de la réglementation dans le domaine de l'urbanisme, de la construction, etc.

Le périmètre de l'expertise incluait le territoire métropolitain mais également les territoires ultramarins pour lesquels aucune donnée n'a été recensée sur la question des transferts de la pollution de l'air ambiant dans les environnements intérieurs. Par ailleurs, il est difficile de transposer *stricto sensu* les constats et les recommandations formulées étant donné que ces territoires peuvent présenter des spécificités tant en termes de pollution de l'air ambiant avec des sources naturelles telles que les brumes de sable et des poussières volcaniques ou des différences concernant la construction et l'usage du bâtiment.

Les pistes d'action s'articulent suivant différents grands thèmes, ces derniers étant présentés par ordre de priorité d'action. Par ailleurs, elles sont fléchées vers les acteurs qui apparaissent les plus pertinents pour les mettre en œuvre. Elles sont présentées sous la forme d'encadrés dans ce qui suit.

5.2 Actions sur la source de pollution

Poursuivre et intensifier la mise en œuvre de toute action visant à réduire les émissions de polluants dans l'air, que ce soit par le trafic, l'industrie, le chauffage, l'agriculture, etc.	Pouvoirs publics
---	-------------------------

Au niveau national, l'Anses rappelle l'importance de réduire l'exposition de la population générale aux polluants atmosphériques. Pour cela, et conformément aux précédentes expertises conduites par l'agence sur la thématique de la pollution de l'air ambiant, la première recommandation vise la réduction en priorité à la source des émissions de composés gazeux ou particulaires dans l'atmosphère, et ce, quelle que soit la source.

Atteindre les niveaux de concentration dans l'air ambiant les plus faibles par la planification	Préfectures régionales ; services d'état (urbanisme, environnement, santé publique) ; services techniques des collectivités locales
--	--

Différents documents de planification d'intérêt sont pointés car ils fournissent les orientations stratégiques et les objectifs en terme de politiques publiques qui peuvent être spécifiques à la problématique de la pollution atmosphérique ou s'appliquer à un champ d'action élargi concernant l'aménagement, le climat, l'énergie etc. Ils ont vocation à mobiliser tous les acteurs concernés que ce soit du domaine économique, social, environnemental et sanitaire. Ces documents réglementaires constituent des opportunités pour proposer des leviers d'action visant à réduire les niveaux de polluants dans l'air ambiant. Ce qui suit est à coupler aux pistes d'action formulées dans le chapitre concernant la planification au niveau de l'aménagement du territoire et de la ville.

- **A l'échelle régionale** : Elaborer un SRADDET ³⁹, schéma fixant en partie des orientations de conformité aux normes de qualité de l'air en prévenant ou réduisant la pollution atmosphérique. Elaboré par la région, ce document s'impose à plusieurs autres documents de planification : plans de déplacements urbains (PDU), plans climat air énergie territoriaux (PCAET), chartes

³⁹ Instauré par la loi n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République. Le décret n° 2016-1071 du 3 août 2016 en précise les modalités de mise en œuvre.

de parcs naturels régionaux (PNR), schémas de cohérence territoriale (SCOT) ou, en l'absence de SCOT applicable, directement aux cartes communales, aux plans locaux d'urbanisme (PLU) et documents tenant lieu de PLU (article L. 4251-3 du code général des collectivités territoriales).

➤ **A l'échelle des agglomérations de plus de 250 000 habitants** : Elaborer des PPA⁴⁰, documents obligatoires dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants et dans les zones où les valeurs limites réglementaires sont dépassées ou risquent de l'être afin d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces polluants pour la santé humaine ou pour l'environnement. Ils ont pour objectif de ramener, dans des délais qu'ils fixent, les concentrations en polluants atmosphériques à un niveau inférieur aux valeurs limites réglementaires.

Des leviers d'action sont proposés concernant la réduction des émissions à la source avec des prescriptions pour tous les secteurs contributeurs. Le PPA Ile de France approuvé en 2013 intégrait une prise en compte de la qualité de l'air dans les documents d'urbanisme et dans les études d'impact mais ces deux mesures n'ont pas été reprises lors de la mise à jour du PPA en 2017.

A titre illustratif, et sans revendiquer l'exhaustivité des initiatives entreprises en ce sens au sein des différents PPA, celui de Lyon Métropole s'inscrit dans un objectif global de santé publique, puisqu'environ 130 000 habitants de l'agglomération sont exposés à des dépassements des valeurs limites d'exposition aux particules fines (PM₁₀ – données 2013). Le PPA comporte trois actions pérennes dans le domaine des transports :

- prévoir que l'ensemble des politiques de transport visera, sur le territoire du PPA, une diminution des émissions entre 2007 et 2016 de : 47 % en particules, sachant qu'une diminution de 40 % est attendue en tendanciel 2015, 54 % en oxydes d'azote sachant qu'une diminution de 49 % est attendue en tendanciel 2015 ;
- favoriser les plans de déplacements d'entreprises ou d'administrations ou inter-entreprises (PDIE/PDIA) pour toutes les entreprises/administrations au-delà de 250 salariés ;
- favoriser l'adhésion des transporteurs à la charte CO₂ et l'étendre aux polluants atmosphériques PM₁₀ et NOx (marqueur de la pollution automobile).

Ainsi, la contribution des mesures dans le secteur du transport du PPA de Lyon Métropole à la baisse des émissions totales de polluants serait de 16 % pour la baisse des émissions de PM₁₀ et de 89 % pour celle des émissions de NOx.

En cas d'épisode de pic de pollution, et toujours dans le domaine des transports, le PPA prévoit que soient considérées les mesures suivantes :

- modulation des prix des transports en commun, gratuité des vélos partagés ;
- modulation du prix du stationnement résidentiel ;
- passer de la circulation alternée vers une action de restriction des véhicules les plus polluants (en priorité les poids lourds), en particulier sur des périmètres pré-définis ;
- promouvoir le télétravail et la visio-conférence ;
- réduire les émissions de PM et NOx à partir d'une réduction progressive de la vitesse sur le réseau des voies rapides urbaines et autoroutes (action débutée en 2012).

⁴⁰ Articles L. 222-4 à L. 222-7 du Code de l'environnement ; R. 222-13 à R. 222-36 du Code de l'environnement ; Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (Loi LAURE)

➤ **A l'échelle des agglomérations d'intérêt en fonction de leurs connaissances sur la pollution de l'air ambiant : Elaborer des Cartes Stratégiques Air (CSA) :**

Actuellement, les CSA sont élaborées par les AASQA et peuvent être mises à disposition pour les aires urbaines de plus de 250 000 habitants et dans les zones munies d'un PPA. Elles font état de l'exposition aux pollutions de la population et renseignent les concepteurs de l'urbanisme de la zone concernée. La production de CSA est cadrée par le « Guide méthodologique d'élaboration de la Carte Stratégiques Air » - Mai 2015 - ATMO France. Une unique couche cartographique issue des outils de modélisation permet de décrire la qualité de l'air des cinq années passées sur la base de plusieurs polluants réglementés en l'occurrence les PM₁₀ et les NOx (indicateur multi-polluant). Une échelle de couleur normalisée à plusieurs niveaux est appliquée avec des intitulés explicites. La CSA est relativement stable dans le temps avec une révision au maximum tous les 5 ans, nécessaire au vu des durées de planification et de construction (30 à 50 années). Elle est moins marquée par les aléas météorologiques que les cartes annuelles de qualité de l'air, et sa temporalité est cohérente avec celle de l'urbanisme.

Ces cartes constituent une opportunité intéressante sous réserve d'une démarche méthodologique d'élaboration validée et homogène au niveau du territoire national.

➤ **A l'échelle des inter-communalités de plus de 20 000 habitants, mettre en place les Plans Climats Air Energie Territoriaux (PCAET)⁴¹ que doivent réaliser les EPCI.** Ces plans comportent un volet air définissant les actions de lutte contre la pollution atmosphérique. Ces PCAET complètent ainsi le dispositif régional. Ils doivent couvrir à terme tout le territoire national. Une échéance était fixée pour les EPCI de plus de 20 000 habitants au 31/12/2018 (PCAET engagé au 1/12/2017). Pour les autres EPCI, c'est une démarche volontaire à leur initiative.

⁴¹ Article 188 de la loi de transition énergétique pour la croissance verte, 17 août 2015.

5.3 Action sur l'urbanisme et la planification territoriale

La Figure 19 illustre certains leviers d'actions en urbanisme pour améliorer la qualité de l'air.

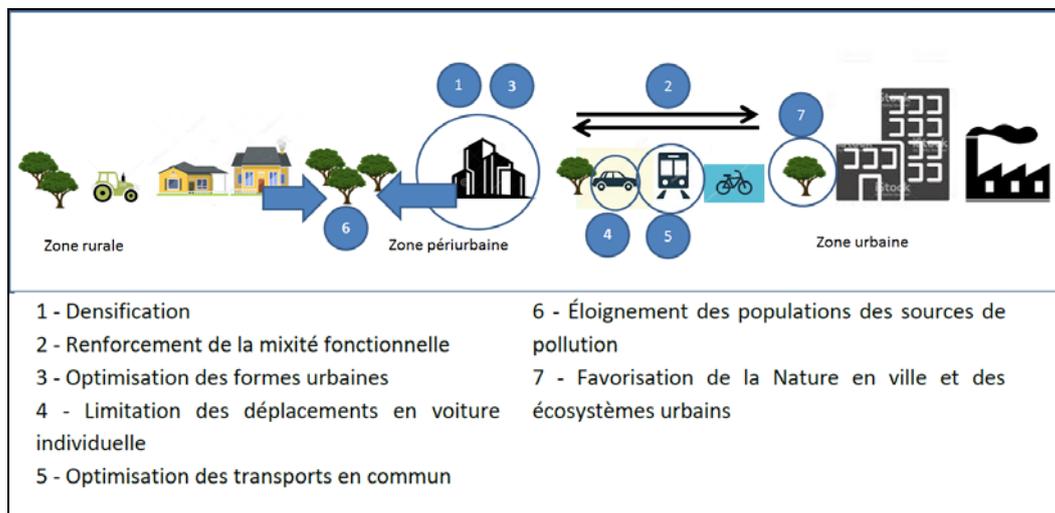


Figure 19 : Grands principes de l'urbanisme et de ses potentiels impacts sur la qualité de l'air (adapté du rapport DREAL Nord-Pas-de-Calais – Picardie, 2016)

Le Haut conseil de la santé publique a formulé en avril 2018 dans son rapport intitulé « Pour une meilleure intégration de la santé dans les documents de planification territoriale » des recommandations pour une meilleure intégration de la santé dans les documents de planification (HCSP, 2018). Ce travail s'est également basé sur des exemples d'initiatives qui ont montré les difficultés rencontrées mais également les possibilités d'action à différentes échelles territoriales avec des portées diverses selon les actions.

Les observations et réflexions portées sur la planification territoriale dans le cadre de la présente expertise convergent avec les observations du HCSP, en particulier sur l'importance de mobiliser les acteurs de la santé publique le plus en amont possible, ce qui devrait être systématique sur les projets d'aménagement et dans la planification. Un manque de dialogue et de reconnaissance de compétences en matière de santé dans l'urbanisme est ressorti des travaux du HCSP. Il encourage notamment le dialogue et la collaboration entre les acteurs notamment du domaine de la santé et de l'urbanisme.

Un objectif des travaux du HCSP est de faciliter la prise en compte de la problématique de santé environnement dans les documents de planification territoriale avec par exemple la possibilité de nommer un « référent santé » dans le pilotage des documents de planification.

Une évolution réglementaire avec des obligations prescriptives sur les enjeux de santé est également déclinée dans les recommandations du HCSP notamment dans le cadre de l'évaluation environnementale afin que l'avis sanitaire soit complémentaire et obligatoirement repris dans l'avis de l'Autorité environnementale.

<p>Inscrire les risques sanitaires liés à l'environnement, en particulier la question de la pollution de l'air ambiant et de son transfert dans le bâti, dans les documents d'urbanisme, et ce</p> <p><u>1/ de manière réglementaire</u></p>	<p>Législateur/régulateur</p>
--	-------------------------------

Pour intégrer la problématique du transfert des polluants de l'air extérieur vers l'air intérieur, il est possible de considérer quatre principales échelles de projet :

- à l'échelle d'un grand territoire ou bassin de vie, via le SCOT (planification) ;
 - à l'échelle d'un projet urbain, via le PLU et le PLUi (planification) ;
 - à l'échelle d'un secteur en amont des opérations d'aménagement, via la procédure de zone d'aménagement concerté (ZAC) (urbanisme opérationnel) ;
 - à l'échelle de la parcelle (urbanisme opérationnel).
- **Au niveau du SCOT** : c'est l'échelle la plus pertinente pour limiter les émissions de polluants atmosphériques et leurs transferts extérieur-intérieur. Or il y apparaît rarement explicitement les enjeux liés à la santé environnementale, au sens des risques sanitaires associés à des facteurs de l'environnement. Il comprend les orientations générales de l'organisation de l'espace et de la restructuration des espaces urbanisés, et les grands équilibres entre d'une part les espaces urbains et à urbaniser et d'autre part les espaces naturels et agricoles ou forestiers.

Recommandation générale : Les prescriptions du SCOT s'imposent aux documents d'urbanisme communaux et intercommunaux (plans locaux d'urbanisme, cartes communales...), en termes de compatibilité à certaines opérations foncières ou d'aménagement, autorisations d'exploitation. Des prescriptions inscrites sur la qualité de l'air s'imposeront donc à tous les autres documents d'urbanisme infra-SCOT.

Recommandations spécifiques à l'échelle du SCOT :

- Faire prendre en compte le PCAET des collectivités et EPCI dans le périmètre du SCOT.
- Faire établir dans les SCOT la référence aux CSA (Cartes Stratégiques AIR).
- Faire préciser dans les SCOT des orientations d'aménagement pour réduire les expositions des populations aux sources d'émissions diffuses ou localisées de polluants de l'air.
- Insérer dans le Document d'Orientations et d'Objectifs (DOO) des orientations pour réduire les sources de pollution (automobile, activités économiques, chauffage) et pour prévenir l'exposition à proximité des axes les plus exposés aux pollutions et nuisances atmosphériques.

A titre d'exemple, le SCOT de la région urbaine de Grenoble fait référence à une CSA.

- **Dans les PLU et PLUi**, aucun élément explicite n'apparaît dans les Annexes sur la proximité entre constructions et sources de pollution ou de dégradation de la qualité de l'air. Or ces prescriptions s'imposeraient pour tout document infra d'urbanisme et renforceraient des dispositions quant aux doubles expositions des populations au bruit et à la pollution de l'air ambiant.

Recommandation générale : inscrire dans les PLU des éléments prescriptifs sur les occupations et implantations des établissements et constructions en fonction des niveaux de nuisances et pollutions existantes (mesurées) et prévisibles (modélisées).

Recommandations spécifiques :

- Intégrer des prescriptions particulières dans les Annexes d'un PLU, telles que :
 - des servitudes d'interdiction ou restriction de construction à une distance définie des axes de desserte et transport par exemple ;
 - des aménagements d'espaces « tampons » entre zones tertiaires et infrastructures ;
 - un classement sonore et « pollution de l'air » des voies annexées au PLU⁴² ;
 - des distances minimales fixées entre sources d'émissions et établissements ou espaces publics, en tenant compte de l'intensité du trafic (nombre de véhicules par jour, du gabarit de la voirie, de la distance aux sources), sur la base d'exercices de modélisation par exemple.

Au niveau du PLU, et donc d'un projet urbain, l'enjeu stratégique est la définition de principes d'organisation et de gestion économes des sols. Pourtant, des leviers d'action pour lutter contre la pollution de l'air existent, tels que :

- inclure lors de l'élaboration du PLU, des données sur la qualité de l'air à faire valoir dans le « porter à connaissance » auprès du préfet ;
- identifier très en amont, par prévention, les incidences possibles d'un projet sur la qualité de l'air en provenance d'activités (trafic routier, établissements polluants, zones agricoles, zones de friches, secteurs végétalisés incluant des plantes allergisantes).

Sans revendiquer l'exhaustivité des initiatives, plusieurs exemples peuvent être cités :

- délégation territoriale d'Ille-et-Vilaine à l'Agence régionale de santé (DDT-ARS) signalant les risques associés aux plantes allergisantes ;
- ville de Nanterre préconisant une vigilance de 150 mètres pour les zones d'exposition chronique à la pollution de l'air ;
- Communauté Urbaine de Strasbourg intégrant une réserve foncière dans le PLUi au plus près d'un grand axe routier pour éviter les expositions des populations à la pollution du trafic motorisé ;
- ville de Bourg en Bresse qui a installé des murs anti-bruit végétalisés sur la rocade, formant à la fois des écrans visuels et acoustiques, voire jusqu'à fixant les polluants de l'air ⁴³.

En préservant le maintien des terres agricoles à proximité des villes, le PLU ou PLUi peuvent favoriser le développement des circuits courts et d'une agriculture de proximité, tout en exposant les résidents urbains à des polluants liés aux activités agricoles.

⁴² La circulaire du 25 mai 2004 rappelle la responsabilité partagée des préfets de départements et des collectivités locales compétentes en matière d'urbanisme, et insiste sur la priorité que constituent la publication des arrêtés de classement sonore et leur intégration dans les documents d'urbanisme.

⁴³ Voir les travaux scientifiques de Oddo R, Atalla N, Mjitt M. "Conception d'un écran antibruit végétalisé : Volet acoustique et structural, Étude bibliographique et concepts retenus", Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke au Ministère des Transports du Québec, septembre 2006.

Les PLU et PLUi n'ont pas vocation à agir sur les activités (agricoles, industrielles) ni même sur les sources de pollution de l'air. Ces documents ne peuvent intervenir que sur les localisations des établissements et installations. Cependant, malgré cette limite, la délimitation des secteurs d'implantation reste un facteur clé pour les expositions des populations. Dès lors, l'éloignement (en fonction de la portée des émissions depuis la source, avec des périmètres de protection ou distances de sécurité), l'évitement (par orientation, par des « écrans » minéraux ou végétalisés de protections) et les gabarits des infrastructures (routières par exemple) ou la régulation des flux (zone 30, etc.) peuvent répondre au triptyque des principes « éviter, réduire, compenser »⁴⁴ pour les expositions des populations, en orientant les évaluations environnementales des projets. L'annexe 11 discute du recours aux servitudes à visée de santé publique.

➤ A l'échelle d'une ZAC

Les règles générales de l'urbanisme s'appliquent à l'échelle d'une ZAC au même titre qu'un PLU ou une carte communale. Une ZAC consiste à réaliser une opération d'aménagement de l'espace par l'acquisition de terrains, l'installation d'équipements publics et de constructions.

- Faire prendre en compte systématiquement dans l'étude d'impact et lors de la concertation préalable et obligatoire avec le public les enjeux de qualité de l'air et des risques en santé environnement ;
- Inscrire des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation des pollutions et nuisances adoptées sur la base d'un diagnostic de l'état du milieu et des impacts du projet sur l'environnement et sur les populations. Les mesures dites « compensatoires » sont des actions de réhabilitation, de restauration et/ou de création de milieux. Des mesures de gestion conservatoire (ex.: pâturage extensif, entretien de haies, etc.) permettraient d'assurer le maintien de la qualité environnementale des milieux ;
- Imposer ces mesures de réduction de la « pollution de l'air et transferts de polluants » et « d'expositions des populations à des risques sanitaires » sur tous les projets urbains mis en œuvre sur le périmètre de la ZAC.

A titre d'exemple, sur la ZAC des Deux-Rives à Strasbourg, la santé humaine a été prise en compte à partir d'une étude « air et santé » avec le calcul d'un Indice Pollution Population (IPP), pour l'état initial, le scénario de référence puis les scénarios avec ZAC.

➤ A l'échelle d'une parcelle

Pour les communes et les EPCI, les documents d'urbanisme locaux permettent de fixer les règles d'occupation et d'utilisation des sols applicables à l'échelle de la parcelle.

Les prescriptions s'imposent aux travaux, constructions, aménagements, plantations, affouillements ou exhaussements des sols, ainsi que, le cas échéant, aux ouvertures d'installations classées appartenant aux catégories visées par le PLU.

Pour les travaux à engager, les règles prescrites quant aux implantations des établissements, leurs taux d'occupation au sol et emprises ont une incidence sur les niveaux d'émissions (activités polluantes) et sur les expositions aux polluants de l'air. Les caractéristiques des opérations foncières puis d'urbanisme seront des facteurs contributifs aux transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur de bâtiments.

⁴⁴ La directive cadre de 1996 n° 96/62/CE concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant. Cette dernière établit les principes de base d'une stratégie commune « visant à définir et fixer des objectifs concernant la qualité de l'air ambiant afin notamment d'éviter, de prévenir ou même de réduire les effets nocifs pour la santé humaine et pour l'environnement ». La loi LAURE du 30 décembre 1996 transpose ainsi dans l'ordre juridique national ces normes d'émissions.

L'intégration des facteurs qui interviennent sur les transferts des pollutions de l'air peut se faire à partir de plusieurs outils et méthodes.

La méthode de management de la qualité de l'air intérieur de l'Ademe (Manag'r) a été développée pour intégrer efficacement l'enjeu de la qualité de l'air intérieur à tout type d'opération (neuf ou rénovation), de la programmation à la réception, en tenant compte de la situation du projet et de ses caractéristiques.

Cette méthode est en cours d'expérimentation dans plusieurs régions sur une période de 4 ans. Elle repose sur différents outils (méthodologiques, techniques, d'évaluation et de sensibilisation/formation) impliquant tous les acteurs de la construction dans le but de répondre à 4 missions représentées sur la figure suivante.

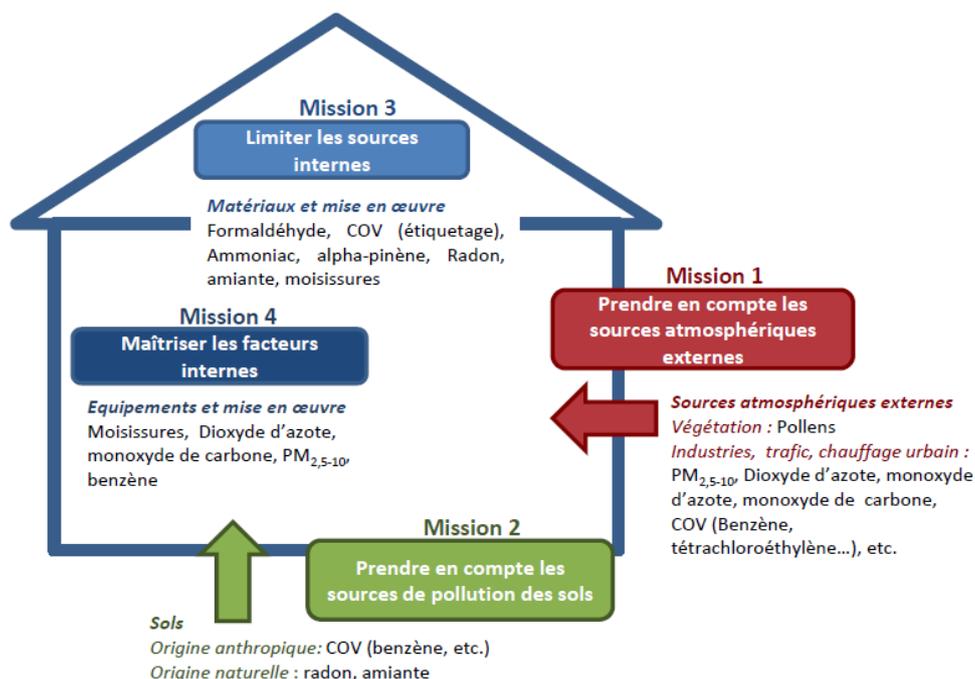


Figure 20 : Approche globale de la méthode de management de la qualité de l'air intérieur (Ademe, 2017a)

<p>Inscrire les risques sanitaires liés à l'environnement, en particulier la question de la pollution de l'air ambiant et de son transfert dans le bâti, dans les documents d'urbanisme mais également dans les autorisations d'urbanisme, et ce</p> <p><u>2/ de manière globale et coordonnée</u></p>	<p>Communes, EPCI et métropoles</p>
---	-------------------------------------

Une approche globale telle que celle adoptée par Strasbourg Eurométropole permet de considérer les niveaux de prise en compte de la qualité d'air dans les projets d'aménagement. Le rapport établi sur l'ensemble de la démarche est informatif quant à la prise en compte des enjeux d'émissions et d'exposition à la pollution de l'air (extérieur et intérieur). La Figure 21 en rend plus lisible les étapes et le processus.

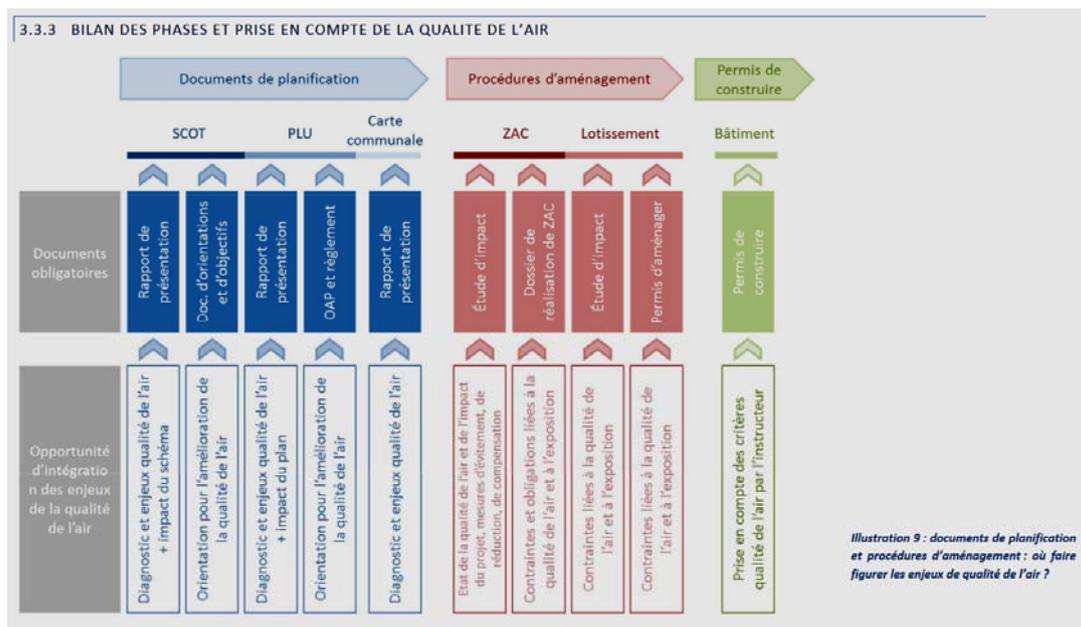


Figure 21 : approche globale et inclusion des enjeux de la qualité de l'air ambiant dans les documents de planification et de procédures d'aménagement : exemple de Strasbourg Eurométropole (ATMO Grand Est, 2015)

<p>Inscrire les risques sanitaires liés à l'environnement, en particulier la question de la pollution de l'air ambiant et de son transfert dans le bâti, dans les documents d'urbanisme, et ce</p> <p><u>2/ de manière volontaire</u></p>	<p>Communes, EPCI et métropoles</p>
---	-------------------------------------

Le HCSP a identifié les outils existants pour accompagner l'intégration de la santé dans les trois documents de planification que sont les SCOT, PLU et PDU et a fait ressortir deux démarches volontaires qui illustrent les pratiques françaises visant l'amélioration des politiques publiques dans le champ de l'urbanisme (HCSP, 2018) :

- **L'évaluation d'impact sur la santé (EIS)** : réalisée en amont d'un projet, cette démarche participative vise à recommander les mesures et solutions appropriées pour diminuer ses effets négatifs et augmenter ses effets positifs avec une approche globale de la santé (caractéristiques socio-économiques et vulnérabilité). En France, la démarche est appliquée principalement au niveau local et sur une base volontaire⁴⁵.

A titre d'illustration, l'aménagement du parc urbain Zenith de Lyon (8000 m²) a été précédé d'une EIS prenant en compte les dimensions de qualité pour la santé, avec notamment une protection des résidents face aux nuisances « bruit » et « pollution de l'air » en provenance de la voirie

⁴⁵ En particulier sur les zones d'aménagement concerté (ZAC), dans les Programmes de renouvellement urbain (PRU), dans les documents d'orientation d'aménagement et programmation (OAP), ou les Contrats de développement territorial (CDT).

(avenue Lacassagne, très circulante). La prise de recul des bâtiments par rapport à la voirie, leur orientation quant à l'ensoleillement (réduire l'effet îlot de chaleur), le confort thermique et climatique ont été intégrés dans l'étude et dans les principes d'aménagement opérationnel (projet très précurseur).

- **L'approche environnementale de l'urbanisme (AEU2)** : méthode développée par l'Ademe (2016b), elle permet de prendre en compte les enjeux environnementaux de façon transversale et intégrée sur différentes échelles de projets : du grand territoire (Schéma de cohérence territoriale ou SCoT), au projet urbain (PLU) en passant par les opérations d'aménagement, voire d'autres plans et programmes (PLH, PDU). Cette approche volontaire et participative décline de façon opérationnelle les enjeux sanitaires en lien avec la pollution de l'air dans les projets d'urbanisme.

De nombreux autres outils ont été identifiés et les possibilités d'utilisation de ces outils dans les documents de planification ont été analysées dans les travaux du HCSP (cf. Annexes 8 et 9 du rapport du HCSP). Il ressort de ce travail l'intérêt d'une articulation entre l'EIS et l'évaluation environnementale stratégique (EES) qui permettrait de mieux intégrer la santé même sur des déterminants environnementaux comme la pollution de l'air. A titre informatif, l'EES est demandée par la réglementation pour les SCoT, PDU ou PLUi, cette démarche permet d'identifier et suivre les effets sur l'environnement. Il est pris en compte les enjeux de santé en lien avec l'exposition aux facteurs environnementaux dont celui de la pollution de l'air⁴⁶.

<p>Accroître la dispersion atmosphérique des polluants et réduire les transferts de polluants par les formes urbaines</p>	<p>Bureaux d'études en aménagement et urbanisme ; services « urbanisme et aménagement » des collectivités locales ; établissements publics d'aménagement (EPA) ; les sociétés publiques locales d'aménagement (SPLA) ; les ATD (agences techniques départementales⁴⁷).</p>
--	--

Il est possible d'accroître la dispersion et de réduire les transferts de polluants par les formes urbaines :

- en plaçant des obstacles verticaux (occlusivité) pour empêcher des flux d'air pollué, tout comme servir de « masques » de sources d'émissions (le long d'axes routiers par exemple) ;
- en plaçant des obstacles horizontaux (rugosité), formant des barrages ou des couloirs de flux d'air, selon les hauteurs des obstacles ;

⁴⁶ La loi « Grenelle 2 » à travers le décret n° 2012-616 du 2 mai 2012 relatif à l'évaluation de certains plans et documents ayant une incidence sur l'environnement, a étendu le champ d'application de l'évaluation environnementale stratégique (EES) à des documents tels que : le schéma départemental des carrières, le schéma régional de cohérence écologique, le schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie, etc. (décret entrée en vigueur au 1er janvier 2013).

⁴⁷ Les ATD sont des Établissements Publics Administratif (EPA) qui ont vocation à apporter, aux collectivités territoriales et intercommunalités du département qui le demandent, une assistance d'ordre technique, juridique ou financière dans des domaines diversifiés (eau et assainissement, bâtiment, voirie, aménagement, etc...). L'[article L. 5511-1](#) du Code Général des Collectivités Territoriales définit le rôle et les missions des ATD.

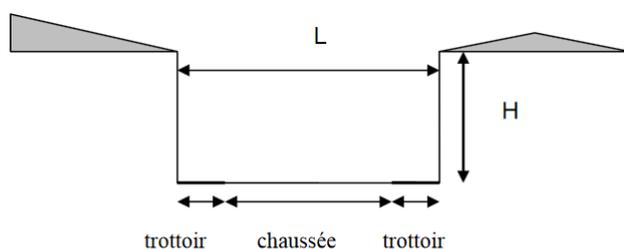
- en fixant des règles de proportions entre l'écartement des établissements et leur hauteur, pouvant former des rues canyon (couloirs très ventilés) et à forte concentration de pollution (indice de Landsberg).

La densification urbaine est devenue une formule courante dans le langage des décideurs, et ce depuis la loi relative à la solidarité et au renouvellement urbains (SRU) (1999) puis les lois Grenelle (2009 et 2010). Ce principe s'applique pour limiter ou contenir l'étalement urbain et en conséquence l'empiètement sur les espaces ruraux, agricoles voire naturels. En second lieu, ce principe tendrait à réduire les volumes de déplacements contraints (trafics routiers pendulaires périphéries-centres urbains), à maîtriser la consommation et l'artificialisation des sols. Ces deux objectifs sont ceux repris et énoncés par la loi du 24 mars 2015 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (Loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (ALUR)).

Toutefois, une densification (nombre d'habitations et donc d'habitants par surface urbaine occupée) entraîne une concentration en zone urbaine de sources d'émissions de polluants liés aux activités humaines (nombre d'usagers conducteurs, fréquence d'usages de véhicules motorisés, d'équipements de chauffage, etc.).

Les formes urbaines permettent d'influer aussi sur l'exposition des populations à des émissions polluantes. A titre d'illustration, les paramètres que sont la taille des bâtiments (en hauteur, largeur et longueur), leur orientation face au réseau viaire (voirie), la perméabilité des espaces publics (zones construites, non construites) contribuent à renforcer ou réduire les expositions des populations. Les corrélations entre nuisances sonores (cartes de bruit) et de qualité de l'air (CSA établies par les AASQA) sont notamment intéressantes quant aux niveaux d'exposition le long des axes et infrastructures de transport. Ainsi la communauté d'agglomération de Reims et ATMO Champagne Ardenne ont développé un outil de simulation du comportement des polluants, à l'échelle de la rue.

Sachant que pour les mêmes émissions atmosphériques, la charge polluante présente dans l'air varie considérablement en fonction des conditions météorologiques et de la morphologie urbaine (Qin & Kot, 1993), il est utile de s'appuyer sur l'indice de construction de Landsberg (H/L). Il est défini comme le rapport de la hauteur moyenne (H) du bâti de la rue (ou de la zone) à la largeur (L) de l'artère. Une rue étroite, dite rue canyon (indice de Landsberg très supérieur à 1) sera plus propice à l'accumulation de polluants. Une rue large, supportant des trafics importants, ne sera pas forcément plus polluée qu'une rue étroite dont le trafic est moindre. En revanche, il est clair que pour une morphologie de rue donnée, toute réduction de trafic fait diminuer les émissions et par conséquence les immissions (concentration des polluants dans l'air).



! : Eléments de caractérisation de l'indice de construction de Landsberg

L'un des spécialistes de la modélisation des flux de pollution et de la morphologie urbaine, Gilles Maignant, tire comme conclusion dans ses travaux la prédominance de la hauteur des constructions dans les facteurs de concentration des polluants. « *La hauteur des bâtiments d'une ville est un paramètre non négligeable de la dispersion de polluants, trop souvent ignoré car il n'est pas obligatoire de réduire les émissions pour réduire localement les concentrations au sein de la rue. Plus les bâtiments d'une rue sont élevés, plus la probabilité d'avoir des situations de rues*

canyon, rues très propices à l'accumulation de polluants, est importante. La hauteur des bâtiments engendre un phénomène de rupture. Au-dessus de la hauteur moyenne du bâti, le nombre d'obstacles diminuant, les flux de polluants se répartissent plus uniformément, faisant ainsi diminuer les concentrations ponctuelles. Ainsi, pour des trafics identiques et de mêmes conditions météorologiques, moins le bâti est élevé et dense, moins les concentrations locales de polluants sont fortes. En effet, la concentration de polluants est reliée au volume d'air offert et si le volume double, la concentration peut être divisée par deux » (Maignant, 2006).

Comparant des espaces urbains en fonction du nombre de voies de circulation et de l'indice de Landsberg, le même auteur apporte un nouvel éclairage : « *la meilleure configuration correspond à une rue dont les bâtiments sont éloignés de l'axe de la rue d'au moins 10 mètres, et pour laquelle l'indice de construction de Landsberg est faible (0,4 pour la rue à deux voies, 0,25 pour la rue à quatre voies). De plus, dans ces deux configurations, les bâtiments sont alignés à moyennes distances, ce qui crée des échappatoires possibles aux flux de polluants et fait baisser les concentrations moyennes. La pire configuration, quant à elle, correspond à une rue dont l'indice de construction de Landsberg est égal à 1 (rue canyon) et pour laquelle les bâtiments sont mitoyens créant des zones propices à l'accumulation (pièges à polluants) » (Maignant, 2005).*

<p>Recourir à la modélisation de la qualité de l'air pour la planification en complément de celle du bruit, de la chaleur urbaine et des formes urbaines (approche intégrée).</p>	<p>Etat et services d'état</p> <p>Services techniques des collectivités en d'aménagement, d'urbanisme</p> <p>Maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre publics et privés.</p>
--	--

A titre d'illustration, l'étude complète d'un aménagement d'établissement de type scolaire, telle que présentée sur Strasbourg Métropole, sur l'éco-quartier Danube et la ZAC des Deux-Rives (ASPA, 2012), démontre une prise en compte des niveaux de dépassement des valeurs limites et lignes directrices de l'OMS pour la qualité de l'air. L'architecture de l'établissement scolaire a été revue en fonction de ces critères, y compris les dispositions constructives (prises d'air extérieur du côté opposé à la voirie). Une simulation de l'impact de la forme urbaine à venir a été conduite pour l'élaboration des scénarios d'implantation et de construction (projet Eurostrat'Air, programme AACT-AIR soutenu par l'Ademe⁴⁸).

Cela a été possible au travers de l'utilisation d'un logiciel 3D de modélisation à l'échelle de la rue permettant de simuler la qualité de l'air en fonction des émissions mais aussi de la disposition et de la forme des bâtiments.

Air Pays de la Loire a également réalisé différentes modélisations dont l'une a concerné l'implantation d'un éco-quartier (Air Pays de la Loire, 2018). Cette étude a permis en particulier de déterminer l'impact potentiel des axes routiers sur les concentrations au sein de l'éco-quartier et d'optimiser l'usage des cheminements piétons ou le positionnement des futurs stationnements.

Ces modèles de dispersion atmosphérique peuvent donc être utilisés pour caractériser la qualité de l'air extérieur et pour prendre en compte différentes formes de bâtiments. Ces simulations sont généralement réalisées pour le dioxyde d'azote et les PM₁₀. Les modèles mis en œuvre peuvent

⁴⁸ Aide à l'action des collectivités territoriales en faveur de la qualité de l'air (<http://www.aactair-restitution.ademe.fr/>)

être en 2D ou 3D avec des résolutions variables selon le besoin de l'étude (2m, 10m par exemple). Le calage des modèles fait généralement l'objet de campagnes de mesures *in situ* par les AASQA pour confronter les résultats du modèle avec les résultats de mesure sur le terrain. Ainsi, les résultats de la modélisation peuvent orienter l'aménagement des quartiers, notamment concernant :

- le positionnement d'établissements recevant du public (types d'établissement, orientation, dimensions et nombre d'usagers, etc.) ;
- la forme des bâtiments (en épi, hauteur) ;
- l'inclusion d'une zone de circulation douce.

Il est donc recommandé de recourir à ce type de modélisation dans le cadre de projets d'aménagement afin de limiter l'impact potentiel de sources d'émission extérieures.

5.4 Action sur l'hygiène et la salubrité publique

<p>Faire évoluer la réglementation comme par exemple le règlement sanitaire départemental (RSD) type ou par département en incluant la question des risques sanitaires en lien avec l'air</p>	<p>Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) Législateur/ régulateur</p>
--	---

L'un des leviers majeurs pour les autorités locales en matière de réduction des risques sanitaires pour les populations, est celui du document de référence que constitue le RSD, Règlement Sanitaire Départemental. Au titre d'une lutte contre des nuisances (air vicié, bruit, etc.), ce document permet aux autorités administratives, dont les maires, d'intervenir pour prévenir, réduire ou résorber les risques sanitaires. Selon la terminologie des pouvoirs de police du maire, il s'agit de mettre en conformité les configurations d'exposition non réglementaires, de remédier aux non-conformités constatées en termes de localisation ou de dimensionnement des conduits de fumée par exemple (Le RSD s'interprète en lien avec d'autres réglementations techniques non codifiées : ex de l'arrêté de 1969 sur les conduits de fumée).

Le RSD, approuvé par arrêté préfectoral dans chaque département avec quelques variantes, demeure un outil juridique incontournable pour faire appliquer les règles d'hygiène notamment dans l'habitat et pour prescrire des mises en conformité : l'articulation entre RSD et PLU mériterait d'être examinée en ce sens.

Les prescriptions en matière d'hygiène et de salubrité publique du RSD portent des dispositions relatives aux eaux destinées à la consommation humaine, aux locaux d'habitation et professionnels, à l'élimination des déchets, à l'hygiène alimentaire et à l'hygiène en milieu rural.

Ces règles sont prescrites par arrêté préfectoral à partir d'un règlement sanitaire type adaptable aux conditions particulières de chaque département.

Il ressort toutefois que la partie « air » ne fait pas l'objet d'un titre (à la différence de l'eau, du bruit, des déchets), ni d'une section. Il est question des « ouvertures et ventilation » (chapitre III, aménagement des locaux d'habitation, section 1, Locaux) du RSD type (article 40) et de « ventilation des locaux » (titre III, section II, article 63) pour les bâtiments autres que ceux à usage d'habitation et assimilés.

La section 2 du Titre III du RSDT propose, en particulier, des prescriptions générales applicables à la ventilation des constructions. Les prescriptions dimensionnelles du RSDT sont définies par des débits minimum d'air neuf à introduire par occupants. Par ailleurs, le RSDT établit des prescriptions générales liées à l'utilisation d'air neuf et d'air extrait :

- les prises d'air neuf et les ouvrants doivent être placés en principe à au moins huit mètres de toute source éventuelle de pollution (véhicules, débouchés de conduits de fumée, sorties d'air extrait) ou avec des aménagements tels qu'une reprise d'air pollué ne soit pas possible ;
- l'air extrait des locaux doit être rejeté à au moins huit mètres de toute fenêtre ou de toute prise d'air neuf sauf aménagements tels qu'une reprise d'air pollué ne soit pas possible ;
- l'air extrait des locaux à pollution spécifique doit être rejeté sans recyclage.

Faire évoluer ce Règlement Sanitaire Départemental Type, dont la dernière version révisée date de 1978 (circulaire du 9 août 1978 relative à la révision du règlement sanitaire départemental type), serait souhaitable pour y intégrer plus explicitement des dispositions sur les risques sanitaires en lien avec la qualité de l'air intérieur et notamment les phénomènes de « transfert de pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur ».

5.5 Action pour la construction et l'usage des bâtiments

5.5.1 Socle général

Intégrer la problématique du transfert dans le cadre des travaux réglementaires en cours	Législateur/ régulateur
---	--------------------------------

Plusieurs initiatives législatives constituent une opportunité de mieux prendre en compte la problématique des transferts dans le parc de bâtiments existants, qu'il s'agisse de construction neuve ou de rénovation (transposition de la directive 2018/844/UE, décrets et arrêtés d'application des lois ELAN et ESSOC).

Au niveau européen, la Directive 2018/844/UE⁴⁹ exige des Etats membres :

- qu'ils établissent et actualisent tous les trois ans « *une stratégie de rénovation à long terme pour soutenir la rénovation du parc national de bâtiments résidentiels et non résidentiels, tant publics que privés, en vue de la constitution d'un parc immobilier à haute efficacité énergétique et décarboné d'ici à 2050* ». La Directive demande notamment aux Etats membres d'intégrer à cette stratégie une estimation des bénéfices plus largement escomptés, par exemple dans les domaines de la santé, de la sécurité et de la qualité de l'air. Le considérant n°15 de cette même directive rappelle d'ailleurs qu'« *Il est important que les mesures destinées à améliorer la performance énergétique des bâtiments ne ciblent pas uniquement l'enveloppe des bâtiments mais englobent tous les éléments pertinents et les systèmes techniques des bâtiments concernés, tels que [...] la ventilation et qui améliorent ainsi le confort [...]* ». Ainsi, il est recommandé de prendre en compte la question des transferts dès l'élaboration de la stratégie nationale de rénovation.
- qu'avant le 10 mars 2020 et s'agissant des bâtiments existants, ils « *prennent en compte les questions liées à un climat intérieur sain* ». Suivant le principe de subsidiarité, il appartiendra aux Etats Membres de préciser ce qu'ils entendent par « *climat intérieur sain* ».

⁴⁹ Directive 2018/844/UE modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>)

La loi ELAN⁵⁰ initie officiellement les travaux de préparation de la future réglementation environnementale 2020 (RE2020). L'expérimentation « *Energie positive et réduction carbone* » (E+C-) qui préfigurait la RE2020 s'est focalisée sur les consommations énergétiques et l'impact carbone des constructions. L'introduction par la loi ELAN d'une référence à la qualité de l'air intérieur reste à traduire concrètement.

La loi ESSOC⁵¹ engage le gouvernement dans des travaux de réforme profonde du code de la construction. Cette réforme remplacera, à terme, les obligations de moyens par des obligations de résultats de performance à atteindre. Cette réforme constitue une opportunité de clarifier les objectifs visés par la réglementation, en particulier la réglementation relative à la ventilation et l'aération des bâtiments.

Ces différents travaux législatifs offrent ainsi des opportunités au gouvernement et à son administration pour intégrer la problématique des transferts de pollution dans la réglementation de la construction. Les recommandations qui suivent visent à donner des pistes d'action concrètes pour ce faire.

<p>Prendre en compte le transfert de la pollution de l'air extérieur au même titre que les autres facteurs (acoustique, luminosité, etc.) pour la conception de constructions neuves ou la réhabilitation des bâtiments, au besoin en recourant à la modélisation de la qualité de l'air intérieur et extérieur;</p>	<p>Concepteurs</p>
---	---------------------------

Des outils de simulation sont de plus en plus utilisés par les bureaux d'étude comme le logiciel CONTAM⁵², ou bien des start-up proposent désormais des services commerciaux basés sur l'exploitation d'outils issus du monde de la recherche. Même si les outils de simulation de la qualité de l'air intérieur ne peuvent se targuer de la même maturité que ceux utilisés dans la simulation thermique dynamique qui est aujourd'hui devenue quasi incontournable pour la conception énergétique des bâtiments, ils représentent des outils pertinents, l'une des raisons étant que les outils de calcul sont devenus suffisamment précis, génériques et bien interfacés pour être exploités dans le domaine de l'ingénierie.

La conception de bâtiments permettant de limiter l'impact des transferts de pollution atmosphérique sur la qualité de l'air intérieur, par le choix de matériaux, de systèmes de ventilation ou de solutions de traitement d'air adaptés, ne nécessite pas nécessairement que soient mis en œuvre des outils numériques complexes. Comme cela est illustré dans les paragraphes qui précèdent, le niveau moyen des concentrations intérieures en polluants d'origine extérieure peut être appréhendé par des calculs en régime stationnaire qui relèvent de l'ingénierie du bâtiment. La méthode de classification des filtres à particules a d'ailleurs été révisée en ce sens, à travers la nouvelle norme ISO 16890 (2017). Telle que définie, la classe des filtres traduit désormais leur efficacité minimale vis-à-vis des PM_{2.5} et PM₁₀. Il est donc possible d'utiliser ces données dans les calculs, soit pour évaluer les niveaux attendus des concentrations intérieures en particules, connaissant leurs concentrations extérieures et leurs taux d'émission internes, soit pour déterminer la chaîne de filtration à mettre en place pour atteindre un objectif donné de concentration intérieure.

⁵⁰ Loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 pour l'évolution du logement, de l'aménagement et du numérique

⁵¹ Loi n° 2018-727 du 10 août 2018 pour un Etat au service d'une société de confiance

⁵² Outil gratuit développé et maintenu par le NIST. <https://www.nist.gov/services-resources/software/contam>

Dans les rénovations lourdes qui impliquent une redistribution des locaux et constructions neuves, privilégier la localisation de pièces de services (cuisines, sanitaires) sur les façades exposées aux nuisances (acoustiques et pollution de l'air extérieur).	Concepteurs
--	--------------------

Lors de l'audition du 14 septembre 2018, les ASQAA ont confirmé la variabilité spatiale de l'exposition des bâtiments à la pollution de l'air extérieur. En particulier, des campagnes de mesures confirment que, comme pour le bruit, l'écran produit par le bâtiment conduit à des concentrations en pollution de l'air supérieures sur les façades exposées aux infrastructures par rapport aux façades protégées par le bâtiment.

Par ailleurs, quel que soit le type de bâtiment, les réglementations en matière de ventilation distinguent les locaux à pollution spécifique (par exemple, la cuisine et les pièces humides dans le logement). Ces réglementations veillent à ce que les polluants de l'air intérieur dans ces pièces ne se diffusent pas dans les autres locaux, en particulier dans les locaux à pollution non-spécifique (par exemple, les séjours et chambres dans le logement).

Ces éléments permettent de recommander que, dans les projets de construction et lors de travaux de rénovation lourdes qui intègrent une redistribution des locaux, les concepteurs soient attentifs à :

- localiser les prises d'air extérieur sur les façades abritées des sources de pollution de l'air extérieur, afin de minimiser l'introduction de pollution de l'air extérieur par renouvellement,
- localiser les locaux à pollution spécifique sur les façades exposées, de sorte que tout transfert involontaire de pollution de l'air extérieur soit extrait dès que possible du bâtiment.

On notera que cette disposition permet, dans le même temps, de se protéger des nuisances sonores souvent associées aux sources de pollution de l'air.

Veiller à ce que les investissements dans la rénovation des bâtiments ne se limitent pas à la rénovation énergétique et visent une amélioration globale du bâti intégrant la qualité de l'air intérieur.	Propriétaires
---	----------------------

Plusieurs études ont démontré que l'étiquetage énergétique avait une influence sur la valeur des immeubles (Notaires de France, 2018). Cette « valeur » verte liée à la réduction des dépenses énergétiques, est un véritable levier pour encourager les investissements dans la rénovation énergétique des bâtiments.

Or, comme le souligne l'Ademe (2017b), la plupart du temps les travaux à visée énergétique sont engagés sans prendre en compte les aspects liés à l'acoustique, à la qualité de l'air intérieur et à la ventilation. Les incompatibilités ou les possibles synergies entre ces objectifs étant mal connues ou mal maîtrisées, ces travaux ont même souvent un impact négatif sur le confort sonore ou sur le renouvellement de l'air.

Le bâtiment fonctionne comme un système global, dans lequel chaque opération d'amélioration ciblée sur une performance peut avoir des conséquences sur les autres performances. Cet état de fait comporte à la fois :

- Un risque de dégradation de la qualité de l'air à l'occasion des travaux de rénovation concentrés sur la performance énergétique, mais aussi ;

- Une réelle opportunité de profiter des investissements dans les travaux de rénovation énergétique pour améliorer la qualité de l'air intérieur.

Ainsi, par exemple, des travaux d'isolation qui renforceront l'étanchéité de l'enveloppe ne peuvent pas faire l'économie d'étudier la nature et l'état de fonctionnement des systèmes assurant le renouvellement d'air et de les améliorer si nécessaire.

Veiller à ce que l'évaluation de la valeur vénale et locative des biens situés dans les zones exposées prenne en compte les dispositions prises sur le bâti pour en atténuer les effets.	Professionnels de l'immobilier
---	---------------------------------------

S'il existe plusieurs méthodes d'évaluation des biens immobiliers, toutes considèrent la localisation comme un élément déterminant dans la valeur des biens. Ce facteur intègre, de façon plus ou moins objective, de nombreux éléments socio-économiques et environnementaux.

L'augmentation de la qualité de l'information disponible sur la pollution de l'air (par exemple les cartes stratégiques de l'air - CSA) ne manquerait pas de faire baisser la valeur des biens apparaissant comme les plus exposés à la pollution de l'air. Cette baisse de la valeur affecte en premier lieu les propriétaires des biens, mais également l'ensemble des acteurs de l'immobilier, publics et privés.

L'absence de considération des dispositions prises pour limiter les transferts de pollution lors de l'évaluation des biens crée une situation déséquilibrée qui n'incite pas les propriétaires à faire les investissements pour mettre en place des mesures de protection.

Contrairement aux dispositifs de protection au bruit par exemple, l'efficacité des dispositifs de protection aux transferts de pollution ne peut s'évaluer de manière sensible et suppose donc une connaissance technique.

Un travail est donc nécessaire au sein de la profession pour développer les outils qui permettent de rendre tangibles les dispositions prises par les propriétaires pour atténuer les transferts.

5.5.2 Enveloppe

Fixer, comme pour les bâtiments résidentiels, des exigences réglementaires en matière d'étanchéité à l'air des bâtiments non résidentiels neufs et imposer leur mesure à la réception.	Législateur/régulateur
---	-------------------------------

Une meilleure maîtrise des transferts passe par une meilleure maîtrise des flux d'air, en particulier les flux d'air parasites occasionnés par les défauts d'étanchéité de l'enveloppe des bâtiments.

Comme cela a été présenté au paragraphe 3.3.2 du présent rapport, la RT 2012 prescrit, pour le secteur résidentiel, un niveau d'étanchéité à l'air à atteindre, soumis à des vérifications par mesures à réception par un opérateur certifié qui doit rapporter chaque année les mesures qu'il a réalisées.

Outre les nombreux effets positifs de cette disposition réglementaire sur la qualité des logements, les données de mesure sont une source de connaissance importante permettant aux industriels et professionnels d'améliorer leur production.

Dans le secteur non résidentiel, la réglementation ne prescrit pas d'exigence d'étanchéité à l'air. Elle incite simplement à une amélioration de l'étanchéité à l'air en permettant aux constructeurs de

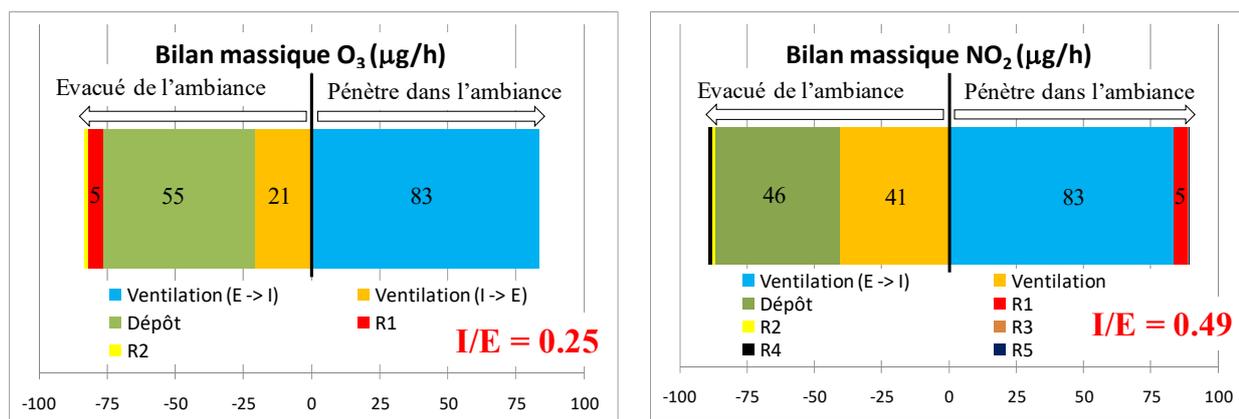
remplacer, par une valeur plus favorable, la valeur par défaut du calcul réglementaire. Dans ce cas, la valeur de substitution doit être confirmée par une mesure à la réception.

Le peu de mesures rapportées ces dernières années démontrent, qu'en l'absence d'obligation, les constructeurs se contentent généralement de la valeur par défaut qui ne présente aucune garantie de résultat.

5.5.3 Matériaux

<p>Sélectionner des matériaux de revêtement intérieur présentant un fort pouvoir de décomposition (dépôt) de l'ozone et des oxydes d'azote</p>	<p>Concepteurs</p>
---	---------------------------

Si tous les matériaux présentent globalement des capacités de dépôt similaires pour les particules en suspension dans l'air intérieur, il n'en est pas de même pour l'ozone et les oxydes d'azote ou de soufre. Les vitesses de dépôt publiées dans la littérature scientifique mettent en évidence des vitesses de dépôt qui peuvent varier d'un ordre de grandeur suivant les matériaux (Grontoft et Raychaudhuri, 2004). La Figure 22 illustre l'impact que peut ainsi avoir le choix des matériaux de revêtement intérieur sur les transferts d'ozone et de dioxyde d'azote. Les résultats correspondent à une simulation en régime stationnaire des transferts de ces polluants dans une pièce de type bureau. Elle prend en compte les effets de la ventilation, des réactions chimiques dans l'air intérieur par un mécanisme simple composé de 5 réactions (R1 à R5), et donc des dépôts à la surface des parois intérieures, par un modèle de vitesse de dépôt. Les graphiques montrent les flux d'ozone et de dioxyde d'azote qui pénètrent dans le volume d'air intérieur, et qui en sont extraits, par le biais de chacun de ces processus de transfert. Si des matériaux présentant des vitesses de dépôt élevées sont choisis pour le revêtement du sol, des murs et du plafond, l'équilibre des flux entrants et sortants conduit à des ratios I/E de 0,25 pour l'ozone et 0,49 pour le NO₂ (deux graphiques du haut). Dans les mêmes conditions, mais avec des matériaux qui présentent au contraire de faibles vitesses de dépôt, ces ratios sont respectivement de 0,64 et 0,85 (deux graphiques du bas).



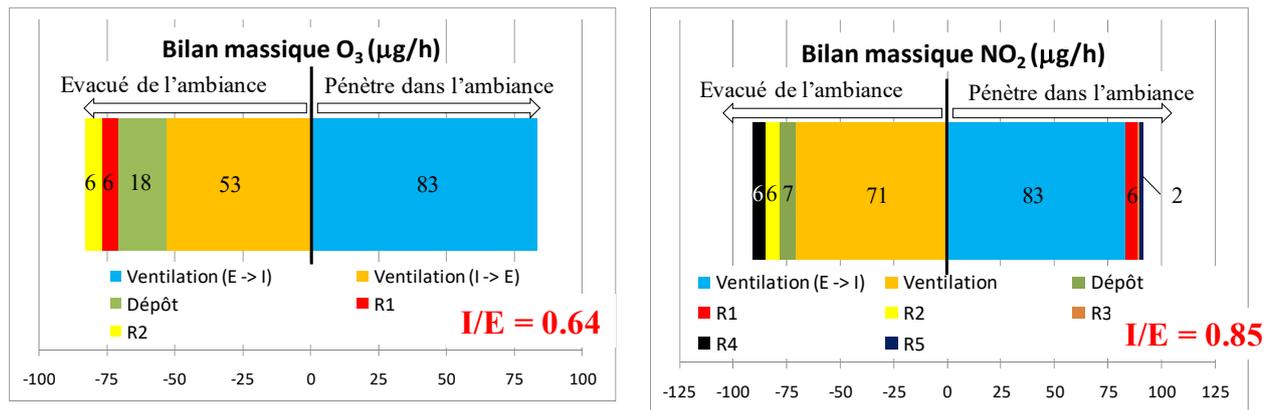


Figure 22 : Illustration de l'impact que peut avoir le choix des matériaux de revêtement intérieur sur les ratios I/E de l'ozone et du NO₂. Les graphiques en parties haute et basse correspondent respectivement aux plus fortes et plus faibles vitesses de dépôt mesurées par Grontoft et Raychaudhuri (2004)

La propension des matériaux à décomposer l'ozone, les oxydes d'azote ou le dioxyde de soufre est évidemment bénéfique pour la qualité de l'air intérieur si cette dernière est abordée sous le seul angle des transferts depuis l'extérieur. Il convient néanmoins d'insister sur le fait que ces dépôts correspondent dans le cas présent à des réactions chimiques de surface, et peuvent éventuellement donner lieu à l'émission de composés secondaires nocifs à la santé dans l'air intérieur (Uhde & Salthammer, 2007 ; Schoemaeker *et al.*, 2015).

Quoi qu'il en soit, les résultats présentés ci-dessus illustrent le potentiel d'outils de calcul simples pour évaluer l'impact de solutions constructives ou de paramètres opératoires (débit de ventilation par exemple) sur les transferts de pollution depuis l'extérieur, en tenant compte des couplages qui peuvent exister entre les différents processus physico-chimiques qui les régissent. La Figure 23 met par exemple en évidence le fort impact de la réduction du taux de renouvellement d'air sur les transferts d'ozone et de dioxyde d'azote, par les effets combinés d'une moindre pénétration depuis l'extérieur, et de l'augmentation flux des déposés à l'intérieur du bâtiment.

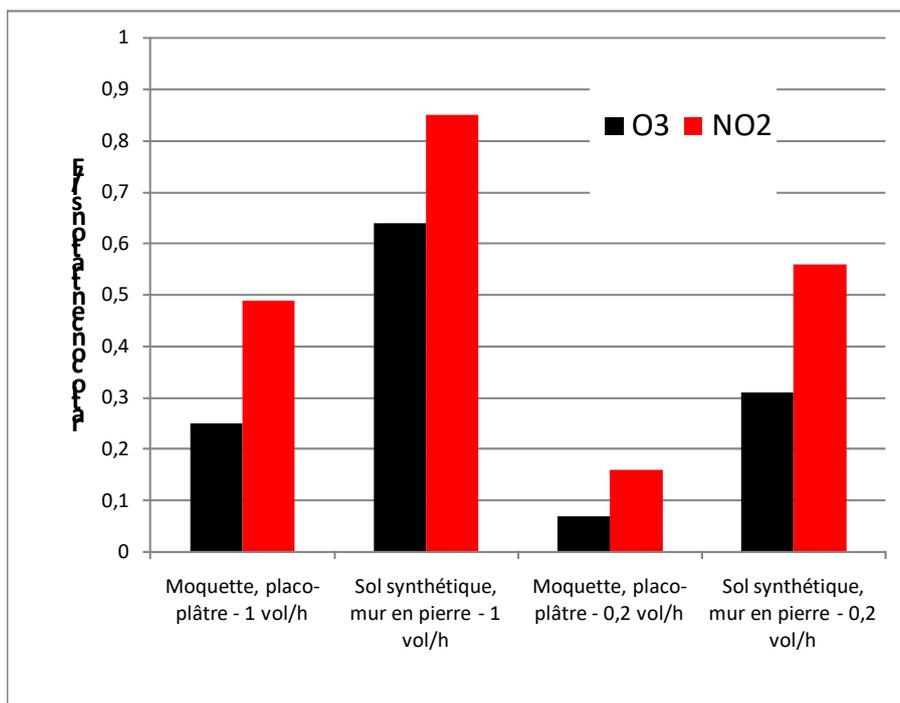


Figure 23 : Illustration des effets combinés du taux de renouvellement d'air et des dépôts sur les ratios I/E de l'ozone et du dioxyde d'azote

5.5.4 Systèmes techniques

<p>Tenir compte de la qualité de l'air extérieur dans les prescriptions réglementaires relatives à l'aération/ventilation des constructions neuves</p>	<p>Législateur / régulateur</p>
---	--

Quelle que soit la nature du bâtiment, la réglementation considère l'air extérieur comme étant de l'air « neuf » et propre. Cela n'est pas sans fondement puisque, selon l'OQAI, l'air intérieur des bâtiments est généralement plus pollué que l'air extérieur. Aussi, le fait que le bâtiment soit localisé dans une zone exposée à la pollution atmosphérique ne doit pas remettre en cause la nécessité d'un renouvellement d'air suffisant.

La mise en place d'une filtration de l'air dans un système mécanique de ventilation constitue la solution technique la plus évidente pour concilier les besoins de renouvellement d'air des bâtiments et la prévention de la pollution de l'air intérieur par les polluants d'origine extérieure. La filtration mécanique des particules est pratiquée depuis très longtemps, bien maîtrisée, et régie par un ensemble de normes internationales qui ont récemment évolué pour permettre aux ingénieurs du bâtiment de concevoir des installations qui répondent à des objectifs de qualité de l'air intérieur exprimés en termes de concentrations en PM₁₀ et PM_{2.5}. La nouvelle norme ISO 16890 (2017), qui a succédé à la norme EN 13779 (2012), classe ainsi les filtres sur la base de leur efficacité moyenne à atteindre vis-à-vis des PM_{2.5} ou PM₁₀. Sur la base de cette nouvelle classification, la révision attendue de la norme EN 16798-3 proposera un tableau indiquant le type de filtre à mettre en place pour obtenir un certain niveau de qualité de l'air insufflé dans les locaux en fonction de la classe de qualité de l'air extérieur, définie sur une échelle à trois niveaux.

Les systèmes de filtration électronique des particules, aussi appelés précipitateurs électrostatiques, permettent eux-aussi d'obtenir des efficacités de filtration élevées sur une large gamme de tailles de particules (10 nm à 20 µm). Ces systèmes ont longtemps été réservés au traitement des effluents industriels du fait de leur production d'ozone et d'oxydes d'azote

secondaires. Les progrès technologiques réalisés au cours de la dernière décennie incitent néanmoins à reconsidérer l'opportunité de leur utilisation pour la filtration de l'air des bâtiments résidentiels ou tertiaires ; cela doit se faire de façon prudente et des tests d'efficacité en condition réelle d'utilisation restent à encourager. Si leur coût d'achat reste très supérieur à celui de filtres mécaniques, leur faible coût d'entretien (nettoyage des collecteurs de particules), leurs pertes de charge réduites et leur faible consommation électrique apparaissent comme autant d'atouts forts dans le contexte énergétique et environnemental actuel. Le peu d'impact à attendre de défauts d'entretien des systèmes sur la ventilation des bâtiments constituent également un argument de poids en faveur des filtres électroniques, comparativement aux filtres mécaniques.

La systématisation de l'installation de filtres à particules de tous types dans les bâtiments situés dans des zones à forte pollution de l'air extérieur ne peut cependant être envisagée sans considérer la question de leur système de ventilation. Pour que l'air de ventilation soit filtré avant de pénétrer dans les locaux, il convient en effet de disposer d'une ventilation qui intègre l'insufflation d'air.

Dans le secteur résidentiel neuf, où les systèmes de ventilation par extraction prédominent largement (systèmes hygro-réglables notamment), la filtration ne peut être envisagée qu'au passage des entrées d'air disposées sur les façades. Les entrées d'air pourvues d'un média filtrant, qui sont depuis peu proposées à la vente pour répondre à ce besoin, suscitent beaucoup de réserves liées au colmatage progressif du filtre, au manque d'entretien, et aux conséquences désastreuses que cela peut avoir sur le renouvellement d'air des bâtiments et la qualité de l'air intérieur. Il existe sans aucun doute un potentiel d'innovation pour tendre vers la conception d'entrées d'air qui intègrent des fonctions de filtration garantissant à minima le maintien de la performance de la ventilation si l'entretien du procédé filtrant n'est pas effectué.

De manière générale, en plus de l'efficacité des filtres mis en place, la réduction efficace des transferts de particules, au sens où ils sont entendus dans ce rapport (niveaux comparés des concentrations intérieures et extérieures), est par ailleurs soumise à deux conditions :

- La maîtrise des flux d'air échangés entre l'extérieur et l'intérieur, par le contrôle des ouvertures des fenêtres : les fenêtres ouvertes créent inévitablement des voies d'air parallèles qui nuisent à l'efficacité du système de ventilation et à l'efficacité de la filtration ;
- La prédominance des particules d'origine extérieure aux concentrations intérieures, puisque la filtration de l'air extérieur a évidemment un impact beaucoup plus faible sur les concentrations intérieures en PM_{10} et $PM_{2.5}$ si les particules sont majoritairement émises par des sources internes au bâtiment.

Ces deux points sont très bien illustrés par l'étude de Ginestet *et al.* (2015) qui ont caractérisé les transferts de particules dans une école maternelle en fonction du niveau de filtration mis en place dans le caisson de ventilation double-flux. Les performances de trois filtres mécaniques ont en l'occurrence été comparées : G4, F7 et F9, d'après la classification définie dans la norme EN 13779 de 2012, qui n'est donc plus en vigueur (Figure 24). Les résultats montrent que pendant les périodes où l'école est inoccupée, c'est-à-dire pendant lesquelles les fenêtres sont fermées et il n'existe pas de sources internes significatives de particules, les ratios I/E sont (très) inférieurs à 1 et en accord avec la classe du filtre mis en place (I/E pour F9 < I/E pour F7 < I/E pour G4). Les fenêtres peuvent en revanche être ouvertes pendant la période d'occupation. Le bypass du système de ventilation qui en résulte, conjugué surtout aux fortes émissions de PM_{10} par les occupants⁵³ et à la remise en suspension de particules déposées par leur activité, conduit à des ratios I/E très supérieurs à 1 quel que soit le type de filtre mis en place.

⁵³ Bhanghar et al (2016) ont montré que le taux d'émission d'un élève pouvait être de 3 millions de PM_{10} par heure

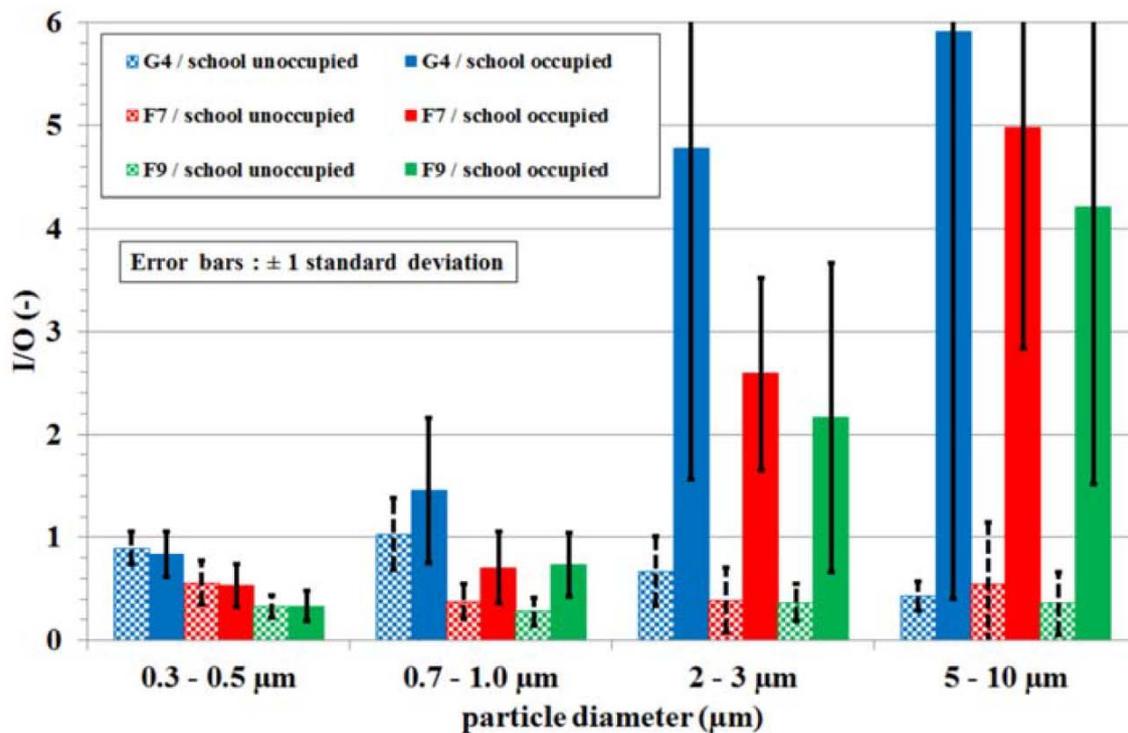


Figure 24 : Ratios I/E en fonction de la classe du filtre mis en place dans le système de ventilation double-flux d'une école maternelle (d'après Ginestet *et al.*, 2015)

La filtration des substances gazeuses, appelée filtration moléculaire, est beaucoup plus marginale dans les bâtiments. Les filtres moléculaires sont le plus souvent constitués de charbon actif en grains ou en fibres. On trouve également sur le marché des filtres mixtes qui combinent filtration mécanique des particules et filtration moléculaire par l'adjonction de fibres de charbon actif aux fibres synthétiques du filtre à particules.

De par leur principe filtrant (adsorption physique), les filtres moléculaires visent avant tout le traitement des composés organiques. L'abattement des concentrations intérieures à attendre par la mise en place d'un filtre de ce type, positionné au niveau de la prise d'air extérieur, dépend de nombreux paramètres (concentration extérieure, température, humidité, vitesse de passage de l'air, etc.) et varie dans de très larges proportions suivant les polluants : d'une manière générale, l'efficacité est d'autant plus élevée que la masse molaire des substances organiques est grande et que leur pression de vapeur saturante est faible. L'efficacité des filtres moléculaires vis-à-vis de polluants réglementés comme le benzène ou le benzo(a)pyrène, dont la littérature scientifique ou technique ne fait état d'aucune mesure *in situ*, pourrait de ce fait être élevée bien que leurs concentrations dans l'air ambiant ne dépassent pas quelques $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Le principal frein à une plus large utilisation des filtres moléculaires dans les bâtiments réside à ce jour dans l'absence de règle fiable pour évaluer la fréquence à laquelle les filtres percent ou saturent, et doivent donc être remplacés.

Outre les composés organiques, les filtres moléculaires, et dans une moindre mesure les filtres à particules, impactent aussi les transferts d'ozone, de dioxyde d'azote et de dioxyde de soufre par les dépôts (les décompositions chimiques) qu'occasionnent les grandes interfaces air/solide mises en jeu. Par des mesures dans un immeuble de bureaux, Ginestet et Pugnet (2008) ont ainsi obtenu des ratios I/E égaux à 0,8 pour le NO_2 et 0,15 pour l'ozone avec un filtre combiné, alors qu'ils étaient de 1,2 et 0,4 avec un filtre particulaire seul fonctionnant dans les mêmes conditions.

Dans ces conditions, la question d'une obligation de filtration mérite d'être posée. Comme vu précédemment, différents paramètres entrent en ligne de compte, notamment :

- Des considérations liées à l'exposition spécifique des bâtiments, en nature de polluants et en intensité : la variabilité de l'exposition se prête mal à une réglementation qui se doit de respecter le principe d'égalité en droit, i.e. fixer des règles applicables à tous. Il s'agit de cibler en priorité les bâtiments les plus exposés à la pollution de l'air extérieur, en termes de nature et de niveaux d'exposition aux polluants. Par analogie, l'arrêté de 1982 modifié⁵⁴ exige le fonctionnement permanent du système de ventilation tout au long de l'année pour les logements les plus exposés au bruit, considérant un moindre recours à l'ouverture des fenêtres dans ces zones. Lorsqu'elles existent, les CSA ou cartes équivalentes pourraient servir de référence afin d'identifier les zones prioritaires.
- Des considérations d'usage : Comme indiqué précédemment, les fenêtres maintenues ouvertes créent inévitablement des voies d'air parallèles qui nuisent à l'efficacité de la filtration. Exiger l'installation de systèmes de ventilation avec filtration dans des bâtiments utilisés fréquemment fenêtres ouvertes n'apporterait aucun bénéfice significatif. En revanche, bien que ne couvrant pas toutes les situations, la coïncidence de l'exposition au bruit (incitant à la fermeture des fenêtres) pourrait constituer un critère pertinent. De la même manière, sans système de recyclage partiel de l'air intérieur, la filtration de l'air de ventilation aura un impact limité sur la qualité de l'air si les polluants sont majoritairement émis dans l'air intérieur par des sources internes au bâtiment, ou par la remise en suspension dans le cas des particules (cas des locaux à forte densité d'occupation comme les salles de classe).
- Des considérations techniques pour les bâtiments existants : Comme établi au paragraphe 3.3, le parc bâti existant se caractérise par une grande diversité de configurations de bâtiments et de systèmes installés. Il paraît peu réaliste d'envisager une obligation réglementaire pour les bâtiments existants. Néanmoins, et toujours en lien avec les CSA, des dispositions incitatives pourraient être localement mise en place et compléter les actions prises sur les sources de pollution et sur l'aménagement urbain.

Quelle que soit l'approche adoptée, on ne saurait trop insister sur la nécessité de mettre en œuvre au préalable les deux recommandations suivantes, l'une relative au contrôle obligatoire du bon fonctionnement des installations à leur livraison, l'autre à leur entretien/maintenance sur la durée.

S'assurer du respect de la réglementation et des règles de l'art des systèmes de ventilation, et rendre obligatoire les contrôles de bon fonctionnement à leur livraison	Législateur / régulateur Concepteurs Entrepreneurs
---	---

De nombreux retours de terrain montrent que les processus « qualité » sont encore très souvent négligés dans la conception et la réalisation des installations de ventilation.

En 2015, 58% des logements neufs présentaient des non-conformités aux exigences de la réglementation relative à l'aération des logements (Cerema, 2017). Issu des résultats des contrôles des règles de construction effectués chaque année en logements neufs, ce niveau de non-conformité est récurrent depuis plusieurs dizaines d'années et ne connaît aucune amélioration au fil du temps.

⁵⁴

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000862344&fastPos=3&fastReqId=1020794859&categorieLien=cid&oldAction=rechTexte>

Une enquête réalisée par le Cerema au printemps 2018 auprès de l'ensemble de la filière démontre que ce constat de non-conformité est très largement partagé par les professionnels. Cette situation est considérée comme représentative de la réalité pour près de la moitié des répondants (48,4% des répondants). Les autres répondants ont tendance à trouver la situation pire (38,6%) voire bien pire (9,8%)⁵⁵. Dans cette même enquête, l'ensemble de la filière dénonce le manque d'autocontrôles et de contrôles comme l'une des principales causes de dysfonctionnement. Au-delà des réglementations, les règles de l'art établissent les pratiques que tout bon professionnel se doit de suivre. En lien avec le sujet traité, ce sont par exemple les documents techniques unifiés (DTU), les publications du programme RAGE (Règles de l'Art Grenelle Environnement) et les conditions de mise en œuvre définies dans les Avis Techniques émis par la Commission Chargée de la Formulation des Avis Techniques (CCFAT).

Les principaux acteurs de la filière ont récemment signé un « Livre blanc de la Ventilation – Acte I » et se sont engagés pour l'amélioration de la qualité des installations de ventilation des bâtiments en proposant qu'une attestation de prise en compte de la réglementation sur l'aération soit mise en place pour les opérations de construction neuve et de rénovation lourde, avec des installations de ventilation neuves⁵⁶.

Plusieurs travaux antérieurs peuvent alimenter cette initiative, notamment :

- Le projet ViaQualité⁵⁷, financé par l'Ademe dans le cadre de l'appel à projets de recherche « Connaissances, Réduction à la source et Traitement des Emissions dans l'Air » (APR CORTEA) 2012. Ce projet se proposait de montrer que des démarches qualité couvrant de plus larges thématiques sont également applicables par des constructeurs de maisons individuelles volontaires, et peuvent permettre d'améliorer à moindre coût la qualité des installations de ventilation et la qualité de l'air intérieur, en même temps qu'ils améliorent la qualité de l'étanchéité à l'air de leurs bâtiments. Issu de ces travaux, le guide « Grand Air » propose des recommandations à destination du grand public,
- Le projet Promevent⁵⁸, financé par l'Ademe dans le cadre de l'APR « Vers des bâtiments responsables à horizon 2020 » a amélioré la fiabilité de l'évaluation des performances des systèmes de ventilation mécanique des logements (y compris mesure de débit en sortie de bouches et de la perméabilité à l'air des réseaux de ventilation),
- Pour les bâtiments non-résidentiels, le guide DIAGVENT⁵⁹ reste la référence quand il s'agit de contrôle, réception et inspection des installations de ventilation.

Renforcer les exigences d'entretien et la maintenance des systèmes de ventilation.	Législateur / régulateur Exploitants
---	---

Au-delà de leur bon fonctionnement à la mise en service, les systèmes de ventilation pâtissent souvent d'un défaut d'entretien/maintenance. À la longue, les systèmes risquent de s'encrasser et de devenir moins efficace.

S'agissant des transferts, l'encrassement peut notamment conduire à la remise en suspension de particules. Une attention particulière sera accordée aux bouches, grilles et conduits d'entrée d'air

⁵⁵ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/projet-ventil-acteurs-mobiliser-acteurs-filiere-batiment>

⁵⁶ <http://www.qualiteconstruction.com/node/3309>

⁵⁷ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/qualite-ameliorer-qualite-installations-ventilation-air-0>

⁵⁸ <http://www.promevent.fr/>

⁵⁹ http://www.cetiat.fr/fr/downloadpublic/index.cfm?docname=guide_diagvent.pdf

ainsi qu'au remplacement des filtres. Dans les secteurs les plus exposés, les fréquences de nettoyages pourront être renforcées.

La réglementation des locaux de travail et des établissements recevant du public comporte une obligation de maintenance des installations sous la responsabilité des responsables d'établissement. Dans les locaux de travail, l'INRS édite une série de guides pratiques sur la ventilation des locaux. Le Guide n°10 « Guide d'installation de ventilation »⁶⁰ établit des recommandations pour la constitution et la tenue à jour du dossier d'installation de ventilation.

Pour les logements, indépendamment des règles de décence et de salubrité, il n'existe pas d'obligation réglementaire d'entretien des systèmes de ventilation. La création par l'article 182 de la loi ELAN d'une obligation de création d'un carnet numérique d'information, de suivi et d'entretien des logements est un levier pour une prise de conscience et pour l'amélioration des pratiques d'entretien/maintenance de la ventilation dans les logements.

5.5 Actions pour les usagers

Sensibiliser les usagers sur la question du transfert de la pollution de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments	Législateur/régulateur
--	-------------------------------

Les pouvoirs publics doivent favoriser par des actions de formation et de communication en utilisant tous les canaux à leurs dispositions (Ademe, CSTB, OQAI, Ministère de l'éducation, Ministère de la santé, ...), le déploiement de messages clairs vis à vis du grand public sur la notion de transfert de polluants de l'air extérieur vers l'air intérieur et sur les actions à prendre pour en limiter l'impact.

Sans revendiquer l'exhaustivité, les références suivantes proposent des recommandations sur la question de la qualité de l'air :

- **Ministère de la Santé**: <http://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/article/se-protger-en-cas-de-pic-de-pollution-de-l-air>
- **Ademe**: <https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/pollution-lair/pollution-lair/faire-lors-dun-pic-pollution>
- **Ademe**, 2017c, *Air sain chez soi (Un) - Des solutions et des pratiques pour améliorer la qualité de l'air intérieur*, Guide Pratique, Réf. 010310, <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-un-air-sain-chez-soi.pdf>
- **Ademe**, 2018, *Ventilation : indispensable pour un logement confortable et sain*, Guide Pratique, Réf. 010342,
- **Cerema, Medieco, Illustré Presse**, 2016, *GUIDE GRAND AIR - Des idées pour inspirer ceux qui aspirent à changer d'air intérieur*, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide_grand_air.pdf

⁶⁰ <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206008>

Enfin, même si cela ne relève pas *stricto sensu* du périmètre de l'expertise centrée sur la question du transfert, les recommandations suivantes s'apparentent à des alternatives lorsque les actions précédentes sur la source de pollution, l'urbanisme, le bâtiment, etc. s'avèrent complexes et difficilement réalisables.

Aération (continuer à aérer, adapter les horaires, privilégier l'ouverture des fenêtres sur cour, éviter l'aération par temps sec et venteux)	Occupants
--	------------------

Afin de préserver la qualité de l'air dans les espaces clos, il est recommandé d'effectuer une aération au quotidien. Le « guide de la pollution de l'air intérieur » de l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (INPES) préconise notamment une aération par ouverture des fenêtres de 10 minutes par jour, hiver comme été, à augmenter si nécessaire en fonction des activités réalisées (ménage, bricolage...). Par ailleurs, contrairement à une idée largement répandue, aérer son logement ne fait pas perdre beaucoup de chaleur puisque l'air ne contient qu'une toute petite quantité de calories stockées contrairement aux murs et aux mobiliers. Lors de la fermeture des fenêtres, ces calories perdues seront donc rapidement récupérées par radiation et convection, d'autant plus si une aération transversale, plus efficace, est privilégiée.

Au vu du transfert des polluants de l'air extérieur vers les espaces clos, les usagers peuvent parfois s'interroger sur la pertinence de l'aération notamment en cas de pics de pollution. A ce sujet, le HCSP recommande dans son avis du 15 novembre 2013 de ne pas modifier les pratiques habituelles d'aération et de ventilation lors d'un épisode de pollution avec dépassement du seuil d'information et de recommandation ou du seuil d'alerte, cet épisode ne justifiant pas des mesures de confinement (hormis les situations spécifiques d'épisode lié à un accident industriel) (HCSP, 2013). L'instance s'appuie sur le fait que l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé résulte beaucoup plus de l'exposition aux polluants sur une longue durée que des variations de la qualité de l'air au jour le jour, y compris lors d'épisodes de pollution atmosphérique.

Les sites internet des AASQA permettent notamment de consulter les informations relatives aux procédures enclenchées en cas de pics de pollution. Les données actualisées des stations de mesures y sont également disponibles et peuvent permettre de connaître les niveaux de concentration pour le polluant concerné par l'épisode de pollution.

Ces éléments sont confortés par l'Ademe qui indique les conseils suivants en cas de pic de pollution sur son site internet : « *continuez à aérer votre logement 2 fois 10 minutes par jour, de préférence côté cour et en fin de matinée en hiver ou la nuit en été - n'arrêtez surtout pas la ventilation. Des polluants sont émis dans votre logement. Si vous ne renouvelez plus l'air de votre logement, ces polluants ne sont plus évacués.* »

Le rapport de la CRD Anses-CSTB a mis en évidence les éléments suivants en termes de délais de transfert d'un épisode de pollution extérieure vers l'intérieur : « *L'étude menée à Porte de Vincennes sur le transfert intérieur/extérieur illustre l'impact d'un épisode de pollution extérieure sur les concentrations intérieures (Kirchner et al., 2001 ; 2002). Le scénario se base sur un polluant non réactif avec un épisode de pollution survenant entre 2 et 5 heures (concentration maximale de 3 à 4 heures) et sur un bâtiment ventilé mécaniquement par extraction selon différents taux de renouvellement d'air, entre 0,2 et 5 h⁻¹. Dans le cas où aucune fenêtre n'est ouverte, le retard de transfert augmente jusqu'à 2 heures pour le plus faible taux de renouvellement d'air. La concentration maximale atteinte à l'intérieur diminue avec le taux de renouvellement d'air jusqu'à 30 % du niveau extérieur à 0,2 h⁻¹. Mais dans le même temps, la concentration du polluant persiste à l'intérieur alors qu'elle devient quasi-nulle à l'extérieur. Le ratio intérieur/extérieur s'inverse et devient supérieur à 1, une fois l'épisode terminé. Il est également important de noter que la surface sous la courbe est identique dans chacun des cas. Autrement dit, l'exposition sur 24 heures ici est*

identique quel que soit le taux de renouvellement d'air. Selon les polluants, il peut s'avérer parfois plus important de réduire sa concentration aigüe et donc l'exposition à court terme que de réduire l'exposition à plus long terme.

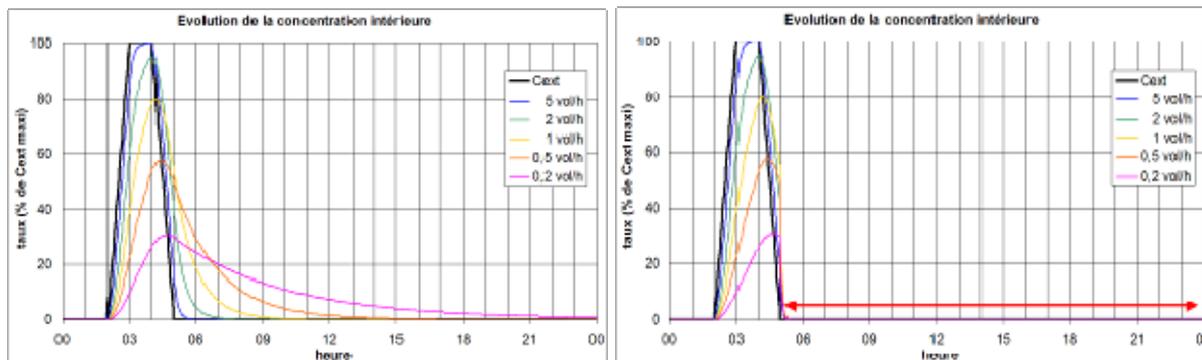


Figure 25 : Simulation d'un pic de pollution extérieure (Cext) et incidence sur la concentration intérieure selon différents scénarios de renouvellement d'air par ventilation mécanique sans ou avec ouverture de fenêtres (gauche et droite respectivement). D'après Kirchner et al., (2001)

L'ouverture des fenêtres après l'épisode de pollution permet d'évacuer très rapidement les polluants à l'intérieur et réduire dans ce cas aussi bien la concentration maximale du polluant et l'exposition associée. A l'inverse, une ouverture de fenêtres durant l'épisode de pollution conduirait au contraire à augmenter aussi bien la concentration intérieure du polluant que l'exposition. Une telle gestion nécessite pour les occupants de détenir l'information en temps réel sur la survenue des épisodes de pollution qui aujourd'hui fait défaut. Elle pourrait être mise en place pour des polluants dont le profil journalier est connu et bien établi comme l'ozone par exemple. Ce dernier présente généralement une concentration maximale en fin d'après-midi et qui retombe très rapidement durant la soirée. Néanmoins, tous les polluants extérieurs ne présentent pas le même profil de concentration. Et une telle gestion ne serait vraisemblablement efficace que contre un seul polluant ou famille de polluants à la fois. »

Il convient donc dans le cadre de la problématique de transfert de la pollution de l'air extérieur de maintenir des conseils d'aération régulière des logements par les usagers. Cette aération peut cependant être adaptée pour les zones identifiées comme présentant des niveaux de pollution extérieure élevés en privilégiant les façades les moins exposées aux sources de pollution extérieures (côté cour/jardin notamment ou celles le plus éloignées des sources) et les horaires où les concentrations en polluant sont moins élevées. Il convient généralement de favoriser une aération la nuit. Pour les polluants issus du trafic routier (tels que le NO ou les poussières fines), une aération en fin de matinée en dehors des pics de circulation est à privilégier. Ces recommandations ne sont valables que pour des sources de pollutions locales, les sources régionales, voire continentales, notamment lors de pics de pollution, étant peu prévisibles. La ventilation des bâtiments est nécessaire pour l'évacuation des polluants de l'air intérieur et la gestion exceptionnelle de l'aération en cas de pic de pollution doit bien être différenciée de la gestion usuelle du renouvellement d'air.

Entretenir et maintenir le système de ventilation	Propriétaires, Occupants
--	---------------------------------

En l'absence d'un système de VMC, c'est l'aération naturelle qui contrôle le renouvellement de l'air dans le logement. Cependant, les logements plus récents et généralement plus hermétiques sont souvent équipés d'une VMC. Elle peut être simple flux, ayant pour fonction d'extraire vers l'extérieur l'air vicié de la maison (humidité, bactéries...) grâce à un ventilateur. Elle peut être

également hygroréglable en tenant compte du taux d'humidité relative de la pièce pour contrôler la ventilation ou à double flux, permettant à la fois un renouvellement de l'air et la récupération de chaleur de l'air extrait. A noter que la ventilation à elle seule ne suffit pas : il faut aussi aérer régulièrement en ouvrant les fenêtres (Guide de la pollution de l'air intérieur, Ministère du Logement, 15 avril 2009).

Le bon fonctionnement d'un système de VMC suppose de favoriser la bonne circulation naturelle de l'air (au moins 1 cm d'espace sous les portes, nettoyage des entrées d'air et bouches d'extraction une fois par trimestre). La ventilation mécanique ne se fera pas bien si d'autres types de circulation d'air entrent en concurrence tels que les infiltrations et les fuites (au niveau des portes, fenêtres, conduit de cheminée).

L'entretien peut en partie être réalisé par les occupants mais une intervention par un professionnel est obligatoire sur certaines installations (VMC gaz) et un entretien complet annuel est recommandé, ou *a minima* tous les 3 ans. Une VMC bruyante peut être le signe d'une mauvaise installation, d'un système encrassé ou endommagé (ADEME, 2018).

Il est nécessaire de nettoyer les bouches d'extractions avec un chiffon humide par exemple et les entrées d'air avec un aspirateur ou un chiffon.

Il convient de vérifier régulièrement que les bouches d'extraction fonctionnent en approchant une languette de papier : elle doit se plaquer contre la bouche.

Pour une VMC double flux, le contrôle porte également sur l'encrassement de l'échangeur ou encore la bonne évacuation des condensats. Il faut remplacer régulièrement les filtres d'insufflation et d'extraction (poussières, pollens...) du système, généralement une à deux fois par an, voire plus selon la vitesse d'encrassement en fonction de la localisation (centre-ville plus polluants) ou de la saison (pollens).

<p>Limiter la remise en suspension des poussières lors des activités d'entretien :</p> <ul style="list-style-type: none"> - nettoyage humide / tissus microfibre (éviter les lingettes imprégnées qui émettent d'autres polluants) - nettoyage des surfaces, aspirateur / Entretien de la maison : Limiter l'introduction et la resuspension des poussières déposées ou de COV. A défaut de système d'aspiration centralisés, privilégier les aspirateurs avec filtres HEPA 	<p>Occupants</p>
--	-------------------------

Le rapport de la CRD Anses-CSTB a mis en évidence l'impact de la remise en suspension des poussières déposées ou de COV pouvant présenter un impact sur le transfert et précise les éléments suivants : « *En effet, les polluants ayant pénétré dans le bâtiment se retrouvent soit dans l'air, auquel cas ils contribuent directement à notre exposition, soit sur les surfaces. Dans ce dernier cas, pour éviter une possible remise en suspension future, il convient d'aspirer les poussières et nettoyer les surfaces. Un entretien périodique des surfaces permet ainsi de limiter l'exposition des occupants aux particules remises en suspension dont une partie provient de l'extérieur, mais également aux allergènes, pollens et spores sédimentés de façon temporaire.* »

L'entretien de la maison est une source importante de pollution de l'air car elle induit la remise en suspension des poussières et l'utilisation de divers produits d'entretien potentiellement émissifs en COV (détergent, antibactérien, désinfectant, fragrances ou muscs) et favorisant le décapage (détartrants) de surfaces émissives. Selon l'Ademe, « *certaines contiennent des substances allergisantes, irritantes, corrosives, et dangereuses pour l'environnement et la santé* » (ADEME, 2017b).

Dès l'entrée de l'habitation, il est recommandé d'utiliser un tapis de sol/paillason et de retirer ses vêtements d'extérieur (manteaux, chaussures) pour limiter l'introduction et la diffusion des polluants dans l'ensemble du logement.

Pour le nettoyage des sols, un nettoyage humide est à privilégier qui réduit fortement le ré-envoi de poussières ou l'utilisation d'aspirateurs avec filtres HEPA conçus pour piéger 99% des particules supérieures à 0,3 µm.

Pour les bâtiments neufs, les systèmes d'aspiration centralisés peuvent être envisagés, qui limitent les mouvements d'air en sous-sol ou dans une pièce dédiée.

Il convient d'encourager l'utilisation de produits d'entretien contenant peu de parfum, de respecter les doses conseillées et de ne pas mélanger plusieurs produits (ex : javel + produit acide ou basique) qui pourraient, par réaction chimique, émettre des gaz toxiques. Ainsi le guide ADEME, (2017b) préconise de privilégier les logos environnementaux pour le choix des produits. « *Par exemple, un nettoyeur multi-usages portant l'Écolabel Européen ne contient pas de formaldéhyde ou de désinfectant pour une performance équivalente à un produit classique* ».

Il est également préférable d'éviter l'utilisation de lingettes imprégnées qui émettent des COV (formaldéhyde, benzène, terpènes, xylènes) contrairement aux tissus en microfibres humidifiés à l'eau ou sèches qui sont neutres de ce point de vue et réutilisables.

De même, il n'est pas conseillé d'utiliser des produits sous formes de spray dont une partie ne se dépose pas sur la surface à nettoyer mais reste en suspension dans l'air et pénètre facilement dans les poumons.

<p>Envisager l'usage d'un épurateur d'air domestique recourant à la <u>filtration particulaire</u> (mécanique ou électronique) et/ou moléculaire pendant les périodes où les concentrations extérieures sont les plus élevées.</p>	<p>Occupants</p>
---	-------------------------

Dans son rapport de 2017 sur les systèmes d'épuration de l'air intérieur, l'Anses a conclu que les données disponibles dans la littérature ne permettaient pas de démontrer l'efficacité et l'innocuité en conditions réelles de l'utilisation des épurateurs d'air domestiques (appareils équipés d'un ventilateur qui dépollue l'air intérieur par recyclage) utilisant un procédé oxydant tel que le plasma froid, la catalyse ou la photocatalyse, l'ozonation et l'ionisation (Anses, 2017b).

Cette conclusion ne doit cependant pas occulter qu'un grand nombre de systèmes ont recours à la filtration plutôt qu'à l'oxydation, ou permettent de n'utiliser que les fonctions de filtration, ce qu'il est conseillé de faire au regard de l'avis de l'Anses. Les procédés filtrants ne présentent aucun risque de production de polluants dangereux pour la santé, ou un risque très limité pour les filtres électroniques, même en cas de défaut d'entretien de l'appareil. S'ils sont correctement dimensionnés, et utilisés dans des conditions qui correspondent à leur dimensionnement, les épurateurs domestiques équipés de filtres peuvent ainsi contribuer à réduire de manière très significative les concentrations intérieures en polluants d'origine extérieure, en particulier les PM₁, PM_{2,5} et PM₁₀. Cette capacité s'exprime plus précisément à travers le débit d'air épuré (DAE) de l'appareil, qui est déterminé à partir d'essais en chambre environnementale suivant la norme NF B44-200. Le DAE, exprimé en m³.h⁻¹, est le produit du débit d'air traité par l'appareil et de son efficacité vis-à-vis du polluant d'intérêt. En absence d'émissions internes des polluants et sans considérer les phénomènes de réactivité ou de dépôt qui contribuent eux aussi à réduire les concentrations intérieures, le ratio I/E à attendre de l'utilisation d'un épurateur de DAE connu dans une pièce ventilée avec un débit d'air Q (en m³.h⁻¹ et incluant les infiltrations) est donné par un simple bilan massique dans la pièce. Il conduit à l'expression suivante :

$$\frac{I}{E} = \frac{Q}{Q + DAE}$$

A titre d'exemple, dans un séjour ventilé avec un débit $Q = 90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, l'utilisation d'un épurateur domestique conduira à un ratio $I/E=0,9$ si le DAE de l'appareil est de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, mais à un ratio $I/E=0,64$ si le DAE est de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

La prise en compte des dépôts à la surface des matériaux, par le modèle global de constante de dépôt $\lambda \text{ (h}^{-1}\text{)}$, et d'éventuelles sources d'émission internes du polluant transféré (taux d'émission S en $\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ si les concentrations sont exprimées en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), mène pour sa part à l'expression suivante du ratio I/E en régime stationnaire, où $V \text{ (m}^3\text{)}$ désigne le volume de la pièce :

$$\frac{I}{E} = \frac{Q + \frac{S}{C_{\text{ext}}}}{Q + DAE + \lambda V}$$

Les fabricants et distributeurs disposent donc d'éléments objectifs pour conseiller une personne quant à l'opportunité d'utiliser un système de filtration chez elle, ou pour choisir le modèle le plus adapté à la taille de son logement.

5.6 Recommandations en matière d'acquisition de connaissances

Evaluer les méthodes métrologiques permettant d'appréhender la dynamique du transfert sur un pas de temps court (par exemple des analyseurs en lignes, micro-capteurs,) ainsi que leur condition d'application	Communauté de la recherche, AASQA
--	--

Le développement d'instruments de mesure en continu doit permettre d'étudier des processus rapides (adsorption, désorption, réactions physico-chimique...) ayant lieux aux interfaces et sur des pas de temps courts (seconde, minute, etc.) pour un large panel de polluants. De même, l'avènement des micro-capteurs, moins précis mais compacts et peu coûteux devrait permettre de multiplier les points de mesure et donc d'étudier la phénoménologie du transfert et d'évaluer la variabilité spatio-temporelle des polluants de l'air à des échelles jusque-là inaccessibles.

Favoriser la réalisation d'études spécifiques et combler le manque de documentation sur la problématique des transferts à travers par exemple des appels à projets	Communauté de la recherche, AASQA, ANR, Ademe, pouvoirs publics, etc.
---	--

Les conclusions de la CRD Anses--CSTB font état d'un manque de données notamment françaises sur certains polluants ou certains paramètres permettant d'étudier les phénomènes de transfert de l'air extérieur vers l'intérieur des bâtiments. Dans ce contexte, des travaux dans les territoires d'outre-mer sont aussi à considérer.

<p>Approfondir les connaissances relatives à l'influence des paramètres sur la concentration extérieure via l'emploi de modèles de dispersion atmosphérique de la pollution à différentes échelles tant urbaines au niveau de la rue et du quartier que rurales pour des configurations et des scénarios bien définis</p>	<p>Communauté de la recherche, AASQA, ANR, Ademe, pouvoirs publics, etc.</p>
--	---

Concernant l'influence de paramètres sur la concentration extérieure, les points suivants seront à prendre à compte :

- la représentativité du point de mesure extérieur au regard de l'air entrant dans le local/bâtiment étudié ;
- la distance horizontale comme verticale du bâtiment et de ses entrées d'air au regard de la ou des sources avoisinantes ;
- les conditions météorologiques et la question des îlots de chaleur urbains ;
- la présence éventuelle d'un écran de végétation (rangée d'arbres par exemple) pouvant jouer un rôle protecteur localement en limitant la concentration extérieure des polluants arrivant en façade des bâtiments et au niveau des entrées d'air ;
- la confirmation de l'influence de la position du point de mesure extérieur (côté cours/côté route) sur les ratios calculés

<p>Evaluer les bénéfices des matériaux de revêtement intérieur présentant un fort pouvoir de décomposition de l'ozone et des oxydes d'azote au regard du risque par exemple de formation de composés réactifs secondaires ou bien de constitution d'un réservoir d'allergènes (si revêtement textile) ;</p>	<p>Communauté de la recherche, AASQA, ANR, Ademe, pouvoirs publics, etc</p>
--	--

<p>Synthétiser et développer les connaissances sur les effets des matériaux de revêtement dépolluants d'usage extérieur (enduits ou peintures de façade, revêtements routiers) en termes de capacité à réduire la pollution au voisinage des bâtiments et de risques de production de composés secondaires dangereux pour la santé</p>	<p>Communauté de la recherche, AASQA, ANR, Ademe, pouvoirs publics, etc.</p>
---	---

Les années 2000 ont vu l'émergence sur le marché de matériaux de revêtement de façade ou routiers fonctionnalisés qui revendiquent un effet autonettoyant et de dépollution locale des oxydes d'azote, de l'ozone et des COV par oxydation photocatalytique (intégration de particules de dioxyde de titane aux matrices solides). L'aptitude de ces revêtements à réduire la pollution atmosphérique au voisinage immédiat des bâtiments a été étudiée dans le cadre des projets européens PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Application for Depollution Assessment) et ATREUS (Advanced Tools for Rational Energy Use towards Sustainability), à partir d'expériences de laboratoire et d'essais en conditions semi-contrôlées dans une rue canyon

reconstituée d'échelle 1. Les mesures réalisées dans cette configuration, qui ont été prolongées par des simulations numériques, ont montré une réduction des concentrations en oxydes d'azote de l'ordre de 40 à 80% suivant les secteurs, lorsque les façades sont revêtues d'un enduit photocatalytique (Moussiopoulos *et al.*, 2005).

Ces résultats illustrent l'intérêt que peut présenter cette solution technique pour le contrôle des transferts des polluants en milieu urbain mais davantage d'études et d'expérimentations sont nécessaires pour consolider les conclusions. En plus d'être peu nombreuses, les études scientifiques sur les matériaux de revêtement de façade dépolluants ne permettent pas, individuellement, d'évaluer toutes les composantes du problème : efficacité vis-à-vis de différents polluants, production de composés secondaires, inactivation possible du média photocatalytique, émissions possible de nanoparticules dans l'environnement, recyclage des matériaux, etc. Il serait par conséquent opportun de synthétiser les connaissances sur le sujet pour en identifier les manques, puis de mener des études ciblées sur ces trous dans la connaissance, pour se donner à terme les moyens de juger globalement et objectivement de l'intérêt de recourir plus largement à ce type de matériaux pour de nouvelles constructions ou pour la réhabilitation.

Les études *in situ* sont évidemment à privilégier même si elles sont nécessairement coûteuses et complexes compte tenu de l'échelle d'étude (échelle urbaine ou d'un quartier), de l'hétérogénéité spatiale des concentrations, et surtout de l'impossibilité de disposer de conditions strictement identiques pour identifier, isoler, puis caractériser les effets des matériaux dépolluants sur la qualité de l'air en milieu urbain et au voisinage immédiat des bâtiments qui en sont revêtus.

Il est dans tous les cas intéressant de relever que l'amélioration « passive » de la qualité de l'air en milieu urbain est source d'innovation dans le domaine des matériaux, comme en témoigne par exemple le développement actuel de gels biosourcés, à faible énergie grise, et auto-régénérables par les eaux de pluie, pour la capture des particules en suspension dans l'air⁶¹.

⁶¹http://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/innovative_seaweed_based_gel_coating_urban_homes_capture_harmful_air_particles_516na1_en.pdf

6 Bibliographie

6.1 Articles scientifiques

Abadie M. (2000). Contribution à l'étude de la pollution particulaire : rôle des parois, rôle de la ventilation. Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, 2000

Annesi-Maesano, I., M. Hulin, F. Lavaud, C. Raheison, C. Kopferschmitt, F. De Blay, D. A. Charpin, et C. Denis, 2012, "Poor air quality in classrooms related to asthma and rhinitis in primary schoolchildren of the French 6 Cities Study." *Thorax* 67 (8):682-688, doi: 10.1136/thoraxjnl-2011-200391

Bailly A, Guyot G, Leprince V (2015), 6 years of envelope airtightness measurements performed by French certified operators: analyses of about 65,000 tests, 36th AIVC Conference "Effective ventilation in high performance buildings", Madrid, Spain, 23-24 September 2015.

Bailly A, Guyot G, Leprince V (2016), Analyses of About 90,000 Airtightness Measurements Performed in France on Residential and Non-Residential Buildings from 2008 to 2014, ASHRAE and AIVC IAQ 2016 conference, Alexandria (VA)

Beko G., G. Clausen and C. J. Weschler (2008). Sensory pollution from bag filters, carbon filters and combinations. *Indoor Air*, 18, 27-36

Billionnet, C., E. Gay, S. Kirchner, B. Leynaert, et I. Annesi-Maesano, 2011, "Quantitative assessments of indoor air pollution and respiratory health in a population-based sample of French dwellings." *Environmental Research* 111 (3):425-434, doi: 10.1016/j.envres.2011.02.008

Chang T.J., Huang, M.Y., Wu, Y.T., Liao, C.M., 2003. Quantitative prediction of traffic pollutant transmission into buildings. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* 38(6) 1025-1040.

Churkina, G., Kuik, F., Bonn, B., Lauer, A., Grote, R., Tomiak, K., Butler, T.M., 2017. Effect of VOC Emissions from Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave. *Environ. Sci. Technol.* 51, 6120–6130.

Fujita, E.M., Campbell, D.E., Arnott, W.P., Johnson, T., Ollison, W., 2014. Concentrations of mobile source air pollutants in urban microenvironments. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995) 64(7) 743-758.

Fugler D (2014), Protecting Homes from Outdoor Pollutants, ROCIS Initiative, Reducing Outdoor Contaminants in Indoor Spaces, ROCIS.org, November 15, 2014, 32 p.

Ginestet A, Pugnet D (2008), Air intérieur : tests encourageants pour des filtres de ventilation, *Environnement & Technique*, 280, 20-22

Ginestet A, Pugnet D, Robitu M (2015), How the filtration of the incoming air decreases the particle concentration within a school equipped with a balanced ventilation system, 36th AIVC Conference, 23 – 24 September 2015, Madrid, Spain

Grontoft T, Raychaudhuri MR (2004) Compilation of tables of surface deposition velocities for O3, NO2 and SO2 to a range of indoor surfaces. *Atmospheric Environment*, 38, 533-544

Hang, J., Luo, Z., Wang, X., He, L., Wang, B., Zhu, W., 2017. The influence of street layouts and viaduct settings on daily carbon monoxide exposure and intake fraction in idealized urban canyons. *Environmental Pollution* 220(Part A) 72-86.

- Huang, Y., Ho, S.S.H., Lu, Y., Niu, R., Xu, L., Cao, J., Lee, S., 2016. Removal of Indoor Volatile Organic Compounds via Photocatalytic Oxidation: A Short Review and Prospect. *Molecules* 21, 56.
- Hytinen, M., Pasanen, P., Salo, J., Björkroth, M., Vartiainen, M., Kalliokoski, P., 2003. Reactions of Ozone on Ventilation Filters. *Indoor and Built Environment* 12, 151–158.
- Janhäll, S., 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment* 105(Supplement C) 130-137.
- Kirchner S, Bailloit O, Collignan B, Flori JP, Garret O, Laurent AM, Le Moullec Y, O'Kelly P, Ramalho O, Sauvaget M, Villenave JG, Vedel C (2001), Etude expérimentale des conditions de transfert de la pollution atmosphérique d'origine locale à l'intérieur des bâtiments d'habitation, Rapport CSTB/ADEME DDD/SB-2001-12A, avril 2001, 269 p.
- Kirchner S, Laurent AM, Collignan B, Le Moullec Y, Ramalho O, Villenave JG, Flori JP, 2002, Impact of the urban pollution on the indoor environment - Experimental study on a mechanical ventilated dwelling, *Proc. Indoor Air 2002*, , 164-169.
- Leprince V, Moujalled B, Litvak A (2017), Durability of building airtightness, review and analysis of existing studies., 38th AIVC conference, 13-14 September 2017, Nottingham.
- Maher, B.A., Ahmed, I.A.M., Davison, B., Karloukovski, V., Clarke, R., 2013. Impact of Roadside Tree Lines on Indoor Concentrations of Traffic-Derived Particulate Matter. *Environmental Science & Technology* 47(23) 13737-13744.
- Maignant . G. (2006). Modélisation de la dispersion de polluants à l'échelle intra-urbaine, mise en place d'indicateurs morphologiques. HDR. <hal-00130986>.
- Maignant G. (2005) Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement durable. Disponible en ligne : [https://www.unil.ch/files/live/sites/ouvdd/files/shared/Colloque%202005/Communications/A\)%20Ecologie%20urbaine/A1/G.%20Maignant.pdf](https://www.unil.ch/files/live/sites/ouvdd/files/shared/Colloque%202005/Communications/A)%20Ecologie%20urbaine/A1/G.%20Maignant.pdf)
- Morawska, L., Ayoko, G.A., Bae, G.N., Buonanno, G., Chao, C.Y.H., Clifford, S., Fu, S.C., Hänninen, O., He, C., Isaxon, C., Mazaheri, M., Salthammer, T., Waring, M.S., Wierzbicka, A., 2017. Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. *Environment International* 108(Supplement C) 75-83.
- Moussiopoulos N., Ossanlis I., Barbas Ph., Bartzis J. (2005) Comparison of numerical and experimental results for the evaluation of the depollution effectiveness of photocatalytic coverings in street canyons, in: *Proceedings of Fifth International Conference on Urban Air Quality*, Valencia, Spain, March 29–31, 2005, p. 70.
- Nicolas M, 2006, Ozone et qualité de l'air intérieur : interactions avec les produits de de construction et de décoration, Thèse, Université Paris 7, 234 p..
- Powaga E, Collignan B (2016), Modelling of outdoor pollutant transfers in buildings, *Proc. Indoor Air conference*, 3rd – 8th June 2016. Ghent, Belgium.
- Qin Y., Kot S.C. (1993). « Dispersion of vehicular emission in street canyons, Guangzhou City, South (P.R.C) ». *Atmospheric Environment*, vol. 27, part B, n° 3, p. 283-291.
- Rim, D., Wallace, L., Persily, A., 2010. Infiltration of Outdoor Ultrafine Particles into a Test House. *Environmental Science & Technology* 44(15) 5908-5913.
- Roue-Le Gall A., Le Gall J., Potelon J-L., Cuzin Y. (2014). Agir pour un urbanisme favorable à la santé, concepts & outils. Guide Ecole des hautes études en santé publique/ Direction générale de la santé EHESP/DGS. ISBN : 978-2-9549609-0-6
- Schoemaeker C., Hanoune B., Petitprez D., Lebègue P., *et al.* (2015) Caractérisation détaillée de l'air intérieur des bâtiments énergétiquement performants par couplage entre Mesures

Expérimentales Représentatives et Modélisation Air Intérieur Détaillée (MERMAID). Rapport final de la convention ADEME n°1262C0023, 166 p.

Sheldon L, Whitaker D, Keever J, Clayton A, Perritt R, 1993, Phthalates and PAHs in indoor and outdoor air in a southern California community, Proc. Indoor Air'93, Helsinki, Finland, Vol. 3, 257-262.

Sherman M.H., Matson N.E., 2003, TN 58: Reducing indoor residential exposures to outdoor pollutants, AIVC Technical Note 58, 2003, 36 pp.

Uhde E., Salthammer T. (2007) Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality—A review of recent advances in indoor chemistry. *Atmospheric Environment*, 41, 3111–3128

6.2 Rapports

Ademe (2015a) Urbanisme et qualité de l'air, DES TERRITOIRES QUI RESPIRENT, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Acteurs de l'urbanisme, Connaître pour agir, 20 pages, Angers

Ademe (2015b) RÉUSSIR LA PLANIFICATION ET L'AMÉNAGEMENT DURABLES
L'AEU2 : DES OUTILS POUR AGIR Mode d'emploi à destination des acteurs de l'urbanisme

Ademe (2016a) Élus, L'essentiel à connaître sur les PCAET. Plan climat-air-énergie territorial : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/elus_l_essentiel_pcaet_2016_ref_8832.pdf, 16 p. Angers

Ademe (2016b) Cahier technique de l'AEU₂: La qualité de l'air et ses enjeux sanitaires, Les volets thématiques de l'AEU₂, Complément du guide de l'AEU₂ « Réussir la planification et l'aménagement durable : <http://www.ademe.fr/qualite-lair-enjeux-sanitaires-associes>

Ademe (2017a) Benchmark international des politiques publiques de la qualité de l'air, Baecher C., Pianu B, Ungerer A., Brenguier, A, Allard F, Blondeau P., Séraphin G, 243 pages, Disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Ademe (2017b), Rénovation énergétique, confort acoustique et qualité de l'air en habitat individuel - Les fondements d'une intervention équilibrée, Guide technique et opérationnel, Août 2017.

Ademe (2017c) *Un air sain chez soi - Des solutions et des pratiques pour améliorer la qualité de l'air intérieur*, Guide Pratique, Réf. 010310, Disponible en ligne <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-un-air-sain-chez-soi.pdf>

Ademe (2018) *Ventilation : indispensable pour un logement confortable et sain*, Guide Pratique, Réf. 010342,

AirPACA (2018). Qualité de l'Air intérieur. Campagne ISAAC et accompagnement à la gestion de l'air des écoles de Marseille

Airparif (2008) Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation : premier volet – campagne de mesure portant sur le boulevard périphérique au niveau de la porte de Gentilly

Airparif (2012) AIRPARIF Actualité. Bulletin n°39. La pollution près du trafic. Décembre 2012. 8 p

Air Pays de la Loire (2018) Evaluation de l'impact de l'aménagement Peccot à Orvault sur la qualité de l'air. Note synthétique Anses, (2013a), Proposition de valeurs guides de qualité de l'air intérieur - Acroléine, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort, France.

Anses, (2014), Etude exploratoire du coût socio-économique des polluants de l'air intérieur, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort, France.

Anses, (2015), Expertise en appui à l'étiquetage des produits d'ameublement, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort, France.

Anses (2017a) Les normes de qualité de l'air ambiant, Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort.

Anses (2017b) Identification et analyse des différentes techniques d'épuration d'air intérieur émergentes Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort.

Anses (2018a) Polluants « émergents » dans l'air ambiant. Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air. Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort.

Anses (2018b) Évaluation du bénéfice sanitaire attendu de dispositifs respiratoires dits antipollution. Avis de l'Anses et Rapport d'expertise collective, Agence nationale de sécurité sanitaire, Maisons-Alfort.

ASPA (2012) Modélisation de la qualité de l'air sur le futur éco-quartier Danube, Disponible en ligne : http://www.atmo-alsace.net/medias/produits/Modelisation_de_la_qual.pdf

ATMO Grand Est (2015) Urbanisme et exposition à la pollution atmosphérique. Comment évaluer l'impact d'une opération d'aménagement sur l'atmosphère ? Disponible en ligne http://www.atmo-grandest.eu/sites/prod/files/2017-09/RAPPORT_IMPACT_OPERATION_AMENAGEMENT_Vf2_0.pdf

<https://www.strasbourg.eu/documents/976405/2313856/23-06-2018-L-SIRY-air-projet-urbain.pdf/de3bc2e1-97b3-7a0f-c123-f506c18ec1e5>

ATMO Grand Est (2017) Surveillance de la qualité de l'air intérieur dans des établissements recevant du public à proximité de la cokerie de Serémange-Erzange. Bilan 2017. REF : PROJ-EN-17-0019

Atmo Nord-Pas-de-Calais et Cerema (2015) Evaluation de la qualité de l'air intérieur. Projet SCOL-AIR 2 écoles de la Ville de Lille Mesures réalisées en 2014 RAPPORT D'ETUDE N°03/2014/PdesAurba (2015) Guide Plan local d'urbanisme et santé environnementale, Agence d'urbanisme Bordeaux Métropole Aquitaine.

Aurba (2015) Guide Plan local d'urbanisme et santé environnementale.

Cerema, Medieco, IllustrePresse (2016) *GUIDE GRAND AIR - Des idées pour inspirer ceux qui aspirent à changer d'air intérieur*, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide_grand_air.pdf

Cerema (2017), rapport de la campagne 2015 des contrôles d'application du règlement sur la construction

CGDD (2011) L'évaluation environnementale des documents d'urbanisme, Le Guide, Commissariat général au développement durable.

CGDD (2018) Bilan de la qualité de l'air en France en 2017. Commissariat général au développement durable. Service de l'observation et des statistiques (SOeS).

COM (2017) Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. L'examen de la mise en oeuvre de la politique environnementale de l'UE. Rapport par pays – France {COM(2017) 63 final}

Cour des comptes (2015) LES POLITIQUES PUBLIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION DE L'AIR, Enquête demandée par le Comité d'évaluation et de contrôle des politiques publiques de l'Assemblée nationale, Décembre 2015, 123 pages.

Dreal Nord-Pas-de-Calais – Picardie (2016) Aide à la prise en compte de la qualité de l'air dans la planification d'urbanisme et des transports : zoom en Nord et Pas-de-Calais sur PLU(i) et PDU, Avril 2016.

EHESP (2016) Agir pour un urbanisme favorable à la santé : complément outil d'aide à l'analyse des PLU au regard des enjeux de santé, Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique. Disponible en ligne : <https://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=638>

HCSP (2018) Pour une meilleure intégration de la santé dans les documents de planification territoriale. Avis et Rapports. Haut conseil de la santé publique. Avril 2018. 200 p.

MEDDE, (2013) Construire sain, Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et maître d'œuvre pour la construction et la rénovation, Mise à jour d'avril 2013, Ministère de l'égalité des territoires et du logement et Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

Notaires de France (2018). La valeur verte des logements en 2017. France métropolitaine. Etudes statistiques immobilières. Analyse détaillée – octobre 2018. Réalisée par Min.not, une entreprise du groupe ADSN — Octobre 2018. 11 p.

OQAI. 2009. ETAT DE LA VENTILATION DANS LE PARC DE LOGEMENTS FRANCAIS DESE/SB – 2009-037. Juin 2009. CSTB. Division Santé. Pôle Expologie des Environnements Intérieurs. 84 p.

OMS (2000) Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, No.91. OMS (2006) Lignes directrices relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre. Organisation mondiale de la santé - OMS Mise à jour mondiale 2005. Synthèse de l'évaluation des risques. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02. 25 pages.

OMS (2013a) "Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP" Technical Report. WHO Regional Office for Europe. 309 pages.

OMS (2013b) Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. New emerging risks to health from air pollution – results from the survey of experts. WHO Regional Office for Europe. 65 pages

SpFrance (2016a) Medina S., Pascal M., Tillier C, Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique, Saint-Maurice : Santé publique France ; 2016, 12 p, Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

SpFrance (2016b) Corso M, Medina S, Tillier C, Quelle est la part des pics de pollution dans les effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé dans les villes de France ? Saint-Maurice : Santé publique France ; 2016, 6 p, Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

6.3 Textes réglementaires

Directive 96/62/CE du conseil du 27 septembre 1996 concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant (abrogée par la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008)

Directive 1999/30/CE du 22 avril 1999 relative à la fixation de valeurs limites pour l'anhydride sulfureux, le dioxyde d'azote et les oxydes d'azote, les particules et le plomb dans l'air ambiant (abrogée par la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008)

Directive 2000/69/CE du 16 novembre 2000 concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant (abrogée par la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008)

Directive 2002/3/CE du 12 février 2002 relative à l'ozone dans l'air ambiant (abrogée par la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008)

Directive 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement - Déclaration de la Commission au sein du comité de conciliation concernant la directive relative à l'évaluation et à la gestion du bruit ambiant

Directive 2004/107/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant

Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe

Directive (UE) 2015/1480 de la Commission du 28 août 2015 modifiant plusieurs annexes des directives du Parlement européen et du Conseil 2004/107/CE et 2008/50/CE établissant les règles concernant les méthodes de référence, la validation des données et l'emplacement des points de prélèvement pour l'évaluation de la qualité de l'air ambiant (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE)

Directive 2018/844/UE modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique

Loi du 12 juin 1893 HYGIENE ET SECURITE DES TRAVAILLEURS DANS LES ETABLISSEMENTS INDUSTRIELS. CODIFIEE PAR LA LOI DU 31-12-1912

Loi du 11 juillet 1903 sur l'amélioration de la sécurité et l'hygiène au travail

Loi du 26 novembre 1912 portant codification des lois ouvrières

Loi n°89-413 du 22 juin 1989 relative au code de la voirie routière

Loi n°96-1236 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE)

Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant Engagement National pour l'Environnement (ENE)

Loi n°2014/58 du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles (MAPTAM),

Loi n°2014-366 du 24 mars 2014 pour l'accès au logement et un urbanisme rénové (ALUR)

Loi n°2015/991 du 7 août 2015 portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe)

Loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)

Loi n°2018-1021 du 23 novembre 2018 sur l'évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (ELAN)

Loi n° 2018-727 du 10 août 2018 pour un Etat au service d'une société de confiance (ESSOC)

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2016 -SA- 0 0 6 8



MINISTÈRE DES
AFFAIRES SOCIALES,
DE LA SANTÉ ET DES
DROITS DES FEMMES

Direction générale de la
santé

MINISTÈRE DU
LOGEMENT, DE
L'ÉGALITÉ DES
TERRITOIRES ET DE LA
RURALITÉ

Direction de
l'habitat, de l'urbanisme,
et des paysages

MINISTÈRE DE
L'ÉCOLOGIE, DU
DÉVELOPPEMENT
DURABLE ET DE
L'ÉNERGIE

Direction générale de la
prévention des risques

Direction générale de
l'énergie et du climat

MINISTÈRE DU
TRAVAIL, DE L'EMPLOI,
DE LA FORMATION
PROFESSIONNELLE ET
DU DIALOGUE SOCIAL

Direction générale du
travail

Paris, le 11 JAN. 2016

Le Directeur général de la santé

Le Directeur général de la prévention
des risques

Le Directeur général de l'énergie et du
climat

Le Directeur de l'habitat, de
l'urbanisme et des paysages

Le Directeur général du travail

à

**Monsieur le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité
sanitaire de l'alimentation, de
l'environnement et du travail (ANSES)**

Objet : Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'intérieur
des bâtiments.

L'Homme passe la majorité de son temps à l'intérieur de locaux (habitation, lieu de travail,...). L'exposition aux polluants présents dans l'air intérieur, essentiellement par inhalation, est susceptible d'avoir des effets sur la santé. Parmi les troubles associés à une mauvaise qualité de l'air intérieur, les pathologies du système respiratoire (rhinites, bronchites, asthme,...) sont celles les plus souvent rapportées. Beaucoup de ces manifestations sont de nature allergique. Des effets irritatifs, toxiques voire cancérogènes sont également associés à l'exposition aux polluants de l'air intérieur. Il ressort d'une étude exploratoire réalisée en 2013 par l'ANSES et le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) dans le cadre du programme de travail de l'OQAI que le coût socio-économique annuel de la pollution de l'air intérieur pour la collectivité s'élève à 19 milliards d'euros¹.

¹ Etude exploratoire ANSES/OQAI 2013.

3703-A2-8035

La qualité de l'air intérieur est influencée par la pollution en provenance de sources multiples et notamment de l'air extérieur. En effet, différentes campagnes de mesures de la qualité de l'air à l'intérieur des locaux, notamment à l'intérieur d'établissements recevant du public, ont mis en évidence une contribution de la pollution de l'air extérieur pouvant être significative suivant la situation et/ou le polluant considéré. Ces transferts de l'air extérieur vers l'air intérieur semblent notamment avoir lieu dans certaines conditions, par exemple pour des bâtiments situés à proximité d'importantes sources extérieures de pollution. Une étude menée en 2001 par le CSTB a montré que les polluants de l'air extérieur se comportent différemment lors de ce transfert. Différents paramètres régissent ce phénomène : les conditions de ventilation du local, la saison, le niveau de pollution à l'extérieur, la présence de matériaux adsorbants et réactifs à l'intérieur du logement, etc. L'abattement entre les niveaux de pollution à l'extérieur et à l'intérieur est aussi fonction du polluant considéré.

Il est nécessaire de disposer d'une revue des connaissances disponibles sur les interrelations entre l'air extérieur et l'air intérieur, qu'il s'agisse de locaux à usage d'habitation, de travail, ou d'établissements recevant du public (crèches, établissements scolaires, établissements médico-sociaux,...).

Aussi, nous vous demandons d'analyser les différents résultats de mesures obtenus au cours des dernières années en France voire dans d'autres pays, incluant les données factuelles et de la littérature scientifique, afin de déterminer les polluants (chimiques et biologiques) et les situations, à l'extérieur comme à l'intérieur des bâtiments, les plus favorables à ce type de transferts, dans des zones exposées de façon récurrente à la pollution de l'air extérieur. Les situations de pollution accidentelle (par exemple sur des établissements « Seveso ») ou intentionnelle ne font pas partie du champ de la présente saisine. Outre la hiérarchisation des polluants de l'air extérieur les plus contributeurs à la dégradation de la qualité de l'air intérieur, cette analyse bibliographique doit pouvoir permettre d'établir la liste la plus exhaustive de facteurs et de situations favorisant de tels transferts selon les polluants considérés (typologie et localisation des sources à l'extérieur, conditions climatiques, en lien avec l'implantation des bâtiments (région, altitude, exposition aux vents,...), particularités géographiques locales susceptibles de favoriser la stagnation de masses d'air et donc de polluants, configuration et orientation des bâtiments, exposition des pièces des logements (pièces donnant sur des cours moins exposées à la pollution, pièces en façades sur rue, en fonction de l'étage du logement,...), matériaux de construction utilisés, configuration des logements (logements en monoexposition, logements traversant,...), aménagements intérieurs des locaux, types d'ouvrants, mode d'aération (aération exclusive par ouverture des fenêtres, ventilation naturelle avec extraction naturelle par conduits, ventilation mécanique, avec distinction des types de ventilation (simple flux par extraction, simple flux par insufflation, double flux...), et localisation des entrées ou prises d'air extérieur le cas échéant, habitudes des occupants vis-à-vis de l'ouverture des fenêtres,...). Cette étude recherchera, lorsque cela est possible, l'information sur l'origine des polluants de l'air extérieur, à savoir ceux produits localement (trafic automobile, industries, chauffage domestique, chauffage d'établissements autres que d'habitation,...), et ceux provenant d'autres régions, voire d'autres pays, en lien avec des conditions météorologiques ponctuelles ou habituelles.

Dans les différents volets de cette saisine, les particularités éventuelles relatives à l'Outre-mer seront considérées.

Vous associerez notamment à vos travaux, l'INERIS, le CSTB, l'OQAI et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA), avec qui, nous vous invitons à échanger régulièrement.

Cette revue bibliographique est une étape préalable à la mise en œuvre de l'action 99 du PNSE 3, en lien avec les actions d'ores et déjà engagées dans le cadre du plan d'actions pour une meilleure qualité de l'air intérieur, lui-même intégré au PNSE 3 (action 49).

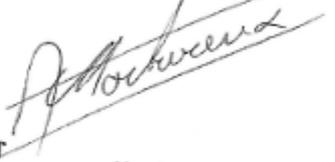
Nous vous remercions de bien vouloir nous indiquer, dans les meilleurs délais, les modalités de réponse à cette saisine dont le rendu est attendu fin 2016, avec un rendu intermédiaire pour la mi-2016.

Le Directeur général
de la santé



Professeur Benoit VALLET

Le Directeur général de la
prévention des risques



Marc MORTUREUX

Le Directeur général
de l'énergie et du climat



Laurent MICHEL

Le Directeur
de l'habitat, de l'urbanisme et
des paysages



Laurent TROMETTI

Le Directeur général
du travail



Copies : CSTB, OQAI, CEREMA, INERIS

Page 3 sur 3

Annexe 2 : Liste des organismes et pays ciblés dans la consultation internationale et au niveau français de l'Anses sur la thématique « Transfert extérieur/intérieur »,

Pays	Organisme*
Europe	European network of building research institutes - ENBRI (22 organismes associés contactés :BAM BBRI BRE CSTB ÉMI EMPA Enterprise IR ICI IETcc-CSIC IGH IMS Institute ITB LNEC SBi SINTEF SP TSUS TZUS URBAN-INCERC VTT ZAG) World health organisation – OMS Europe and headquarter
Allemagne	German Federal Institute for Risk Assessment - BfR German Federal Environment Agency – UBA
Belgique	Flemish Institute for Technological Research - VITO
Pays-Bas	National Institute for Public Health and Environment - RIVM
Canada	Health Canada
Etats-Unis	US Environmental protection agency - US EPA

* Noms en anglais

Pays	Organisme
France	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie - ADEME
	Agence régionale de santé Ile de France - ARS
	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) Centre Est et Nord
	Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques - CETIAT
	direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature - DGALN Sous-direction de l'Aménagement Durable
	Ecole des hautes études en santé publique - EHESP
	Fédération ATMO – association agréée de surveillance de la qualité de l'air (AASQA)
	Fédération nationale des agences d'urbanisme - FNAU
	Agence d'urbanisme de Bordeaux métropole Aquitaine - A'Urba
	Institut Mines Télécom Lille-Douai
Laboratoire central de la préfecture de police - LCPP	

Annexe 3 : Questionnaire soumis dans le cadre de la consultation internationale

Populations spend most of their time in indoor environments where they are exposed to indoor air pollutants potentially prejudicial for health. Indoor air quality is influenced by pollution from multiple sources including outdoor pollution. As a result of this, the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES) is currently conducting an expertise aimed at characterising pollution transfer from outdoor air to indoor air.

In fine transfer knowledge should be used to consider the different parameters governing phenomena (e.g. ventilation conditions, outdoor pollution level, adsorbent and reactive materials in building, etc.) in urban planning regulations for example building construction or renovation projects.

This international consultation aims to identify regulations, guidelines or actions carried out in different countries to integrate health concerns in urban planning projects for the public and especially for vulnerable populations.

The questionnaire concerns all regulated pollutants in ambient air in France⁶² as well as moulds and pollens. Nevertheless, this international consultation includes all the parameters influencing pollution transfers into indoor air.

We would like to collect information that can be useful for our work and/or identify a relevant contact person. A short questionnaire has been drawn up to facilitate this information collection:

1. When deciding on the location, construction or renovation of buildings, are you aware of regulations or urban planning guidelines that take into account
 - phenomena relating to pollution transfers to indoor environments (distance from the source, etc.)?
 - and / or health concerns for the population (inhabitants, public, vulnerable populations...)?

2. Are you aware of any work relating to the characterisation of pollution transfer phenomena to the indoor environment in your country?

If yes, can you send us documents relating to the work and / or contact details of a resource person?

Depending on your answers, we may contact you again in order to get more details.

This consultation covers European countries and North America.

The results of this short questionnaire will be analysed for the next expert report of ANSES's working group on "Characterising the phenomena of outdoor pollution transfers into the indoor air of buildings".

This report in French will be published on our website (www.anses.fr) at the end of the expertise at the end of 2018.

⁶² Nitrogen oxides (NO_x), benzo(a)pyren (BaP), benzene, ozone (O₃), particulate matter (PM), sulphur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO), et metals (Ni ; Pb, Cd, Hg and As).

Annexe 4 : Questionnaire pour le recueil des données des AASQA

Questionnaire à l'attention des AASQA

Evaluation des données de campagnes de mesures conduites sur des polluants réglementés avec la réalisation de mesures en parallèle dans l'air intérieur et l'air ambiant

L'Anses cherche par le présent questionnaire :

- d'une part à recueillir les rapports d'études d'AASQA relatives à des campagnes de mesures ayant investigué la problématique du transfert de l'air extérieur vers l'air intérieur de bâtiments;
- d'autre part à faire un inventaire qualitatif des données de campagnes où des mesures en parallèle dans l'air intérieur et à proximité immédiate du bâtiment dans l'air ambiant ont été réalisées.

Cette demande s'inscrit dans le cadre de travaux de l'Anses réalisés à la demande de la DGEC, DGPR, DGS, DHUP et DGT qui visent à identifier et hiérarchiser les facteurs et situations influençant le transfert des polluants de l'air extérieur dans les environnements intérieurs. L'objectif des travaux de l'Anses sera de formuler des recommandations visant à limiter l'impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air intérieur.

A noter que le questionnaire porte en priorité sur les polluants réglementés dans l'air ambiant, ainsi que les moisissures et les pollens mais que d'autres polluants peuvent également être renseignés.

1 - Au cours des 10 dernières années, avez-vous réalisé des études spécifiques sur la caractérisation du transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur de bâtiments?

OUI

NON

FAUX

1a_ Si oui, ces études ont-elle fait l'objet de publications particulières? (Par exemple, rapport d'étude publié, rapport d'étude confidentiel, publication)

OUI

NON

FAUX

FAUX

Précisez :

Merci de transmettre à l'Anses en accompagnement du questionnaire les publications (rapport d'étude, article scientifique...) de ces études

2 - Au cours des 10 dernières années, avez-vous réalisé des campagnes de mesures conduites sur des polluants réglementés avec la réalisation de mesures en parallèle dans l'air intérieur et à proximité immédiate du bâtiment dans l'air ambiant ?

A noter, qu'il est exclu de cette question les campagnes de mesures réalisées dans le cadre de la campagne pilote de la surveillance réglementaire dans les écoles et crèches, à la demande du ministère chargé de l'écologie.

Oui Non
FAUX FAUX

2a_ Si oui, combien de campagnes cela représente-t'il en moyenne sur une année?

Précisez :

2b_ Quelles sont les années et le nombre de campagnes réalisées par année ?

2017 2016 2015 2014 2013 2012
 2011 2010 2009 2008 2007 avant :

Précisez :

3 - Quels sont les polluants investigués?

- Particules
- Oxydes d'azote
- HAP*
- BTEX**
- Métaux
- Ozone 1
- SO2
- CO
- Pollens
- Moisissures
- Autres

Si autres, précisez: _____

Si autres, précisez: _____

Si autres, précisez: _____

Si autres, Précisez: _____

3a_ Quel nombre de campagnes de mesure cela représente-t'il par polluant?

Particules

Oxydes d'azote

HAP*

BTEX**

Métaux

Ozone

SO2

- CO []
- Pollens []
- Moisissures []
- Autres []

Si autres, Précisez: _____



* HAP: Hydrocarbures aromatiques polycycliques

** BTEX : Benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes

Annexe 5 : Documents collectés dans le cadre des consultations de l'Anses

Tableau 1 : Documents remis dans le cadre des consultations réalisées par l'Anses sur le transfert extérieur vers l'air intérieur (en vert : référence prise en compte dans le rapport du CSTB ; en gris qui ne concerne que la qualité de l'air intérieur)

Type de documents	Références
Articles scientifiques N = 14	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Thomson (2016a) Housing improvement and health: a systematic review of world literature (1900–2005), <i>European Journal of Public Health</i>, 16 (Suppl 1): 93. ✓ Thomson H., Atkinson R., Petticrew M., Kearns A. (2006b) Do urban regeneration programmes improve public health and reduce health inequalities? A synthesis of the evidence from UK policy and practice (1980–2004) <i>J Epidemiol Community Health</i>;60:108–115, doi: 10.1136/jech.2005.038885 ✓ Thomson H., Thomas S., Sellstrom E., Petticrew M, (2009) The Health Impacts of Housing Improvement: A Systematic Review of Intervention Studies From 1887 to 2007, <i>American Journal of Public Health</i>, 99 (S3): 681-692 ✓ Ginot L., Peyr C, (2010) Habitat degrade et santé perçue : une étude à partir des demandes de logement social, <i>Santé Publique</i> 22(5), p, 493-503, DOI 10,3917/spub.105.0493 ✓ Blondeau P., Iordache V., Poupard O, Genin D, et al, (2005) Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools, <i>Indoor Air</i>; 15: 2–12 ✓ Poupard O., Blondeau P., Iordache V., Allard F, (2005) Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools, <i>Atmospheric Environment</i>, 39 (11) : 2071-2080, ✓ Coppalle A., Beaudou P, et Delmas V, (2002) Le transfert extérieur/intérieur des polluants atmosphériques : approches statistiques et physiques utiles pour le calcul de l'exposition des populations, <i>Pollution atmosphérique</i>, 175 : 407-419 ✓ Ramalho O (2012) Niveaux de particules dans les environnements intérieurs en France, <i>Pollution Atmosphérique Numéro Spécial</i> ✓ Tran D, T, & Alleman L, (2010) Modélisation du transfert intérieur-extérieur des particules dans des classes d'écoles de la région Nord-Pas de Calais, 6ème édition des Journées Interdisciplinaires de la Qualité de l'Air ✓ Kirchner, S, Laurent, A.M., Collignan, B., Le Moullec, Y., Ramalho, O., Villenave, J.G, and Flori, J.P, (2002), Impact of the urban pollution on the indoor environment – experimental study on a mechanical ventilated dwelling, <i>In: Proceedings of the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (Indoor Air 2002)</i>, 30 June–5 July 2002, Monterey, USA, ✓ Schoemaeker et al, (2016) The impact of ventilation on indoor air quality in a low energy school: the respective roles of indoor and outdoor sources and of chemistry, October 2016 Conference: 9th International Conference on Indoor Air Quality Ventilation & Energy ✓ Verrièle M., Schoemaeker C., Hanoune B., Leclerc N., Germain S., Gaudion V, and Locoge N, 2015, The MERMAID study: indoor and outdoor average pollutant concentrations in 10 low-energy school buildings in France, <i>Indoor Air</i>,

Type de documents	Références
	<p>doi:10,1111/ina,12258,</p> <p>✓ Maher B, A., Ahmed I., Davison B., Karloukovski, Clarke R, (2013) Impact of Roadside Tree Lines on Indoor Concentrations of Traffic-Derived Particulate Matter, Environ, Sci, Technol, 47 :13737–13744, dx,doi.org/10,1021/es404363m</p> <p>✓ Powaga E, & Collignan B (2016) Modelling of outdoor pollutant transfers in buildings, Indoor air Conference 2016, 3rd-8th June, Ghent, Belgium</p>
<p>Thèses</p> <p>HDR</p> <p>N= 7</p>	<p>✓ Iordache V, (2003) Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire : recherche de moyens de prédiction et de protection, LEPTIAB</p> <p>✓ Courdier M, (2002) Évaluation du risque sanitaire lié à la pollution atmosphérique intérieure en rapport avec certains composés organiques volatils et le benzo(a)pyrène : comparaisons air intérieur/air extérieur : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCDMED_T_2002_COURDIER_MARTINE.pdf</p> <p>✓ Koffi J, (2009) Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00433348/document</p> <p>✓ Nicolle J, (2009) Développement d'une méthodologie d'analyse des composés organiques volatils en trace pour la qualification de matériaux de construction : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00401405/document</p> <p>✓ Tran D, T, (2011) Identification des sources et modélisation du comportement dynamique des particules dans l'air intérieur des écoles : https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/3c5ab515-85cd-43b6-96a3-f94690172539</p> <p>✓ Nicolas M, (2006) Ozone et qualité de l'air intérieur : Interactions avec les produits de construction et de décoration : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00134593/document</p> <p>✓ Blondeau P, HDR (2008): Caractérisation et modélisation des transports de polluants dans les environnements intérieurs : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00351567/document</p>
<p>Etudes</p> <p>N= 17</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ADEME <ul style="list-style-type: none"> - (2017) Benchmark international des politiques publiques de la qualité de l'air, Baecher C., Pianu B, Ungerer A., Brenguier, A, Allard F, Blondeau P., Séraphin G, 243 pages, Disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque - (2015) Réussir la planification et l'aménagement durables : volet Qualité de l'air et ses enjeux sanitaires, Supplément au guide méthodologique AEU2 : http://www.ademe.fr/reussir-planification-lamenagement-durables-volet-qualite-lair-enjeux-sanitaires - (2016) Cahier technique de l'AEU2: Air et enjeux sanitaires : http://www.ademe.fr/qualite-lair-enjeux-sanitaires-associes - (2015) Brochure Urbanisme et qualité de l'air : http://www.ademe.fr/urbanisme-qualite-lair-territoires-respirent • CEREMA (2014) Projet Scolair, Transfert des polluants extérieur vers l'intérieur • CEREMA Projet Via-Qualité, Améliorer la qualité des installations de ventilation et de l'air intérieur dans les maisons individuelles

Type de documents	Références
	<ul style="list-style-type: none"> • ORS IdF (2012) Pollution de l'air des enceintes souterraines de transport ferroviaire et santé • Etude RATP • LHVP : Bilan de la qualité de l'air dans 10 écoles parisiennes • OQAI : <ul style="list-style-type: none"> - bulletin n°10 sur PREBAT - 2004, Inventaire des données françaises sur la qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments : actualisation des données sur la période 2001-2004, Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur, 61, (http://www.oqai.fr/userdata/documents/Document_16.pdf) • CSTB : Étude expérimentale des conditions de transfert de la pollution atmosphérique d'origine locale à l'intérieur des bâtiments d'habitation, Convention de recherche ADEME, Rapport final, Avril 2001 • JRC (2017) Promoting healthy and highly energy performing buildings in the European Union: : National implementation of related requirements of the Energy Performance Buildings Directive (2010/31/EU), EUR 27665 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-70594-6, doi:10.2760/73595, JRC99434,
	<p>AASQA</p> <ul style="list-style-type: none"> - Etudes spécifiques : N= 8 (dont une en cours) <ul style="list-style-type: none"> ✓ Airparif <ul style="list-style-type: none"> (2008) Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation – premier volet – campagne de mesure portant sur le boulevard ✓ Grand Est : <ul style="list-style-type: none"> ATMO Champagne Ardenne (2010) ETUDE DE LA QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR AU SEIN DU CENTRE DES CONGRÈS DE REIMS CAMPAGNE 2010 ATMO Champagne Ardenne (2011) EVALUATION DU TRANSFERT AIR EXTERIEUR-AIR INTERIEUR DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES DANS L'AGGLOMERATION REMOISE (51) ATMO Champagne Ardenne (2012) ETUDE DE L'AIR INTERIEUR EN MILIEU SCOLAIRE DANS LA VILLE DE TROYES (10) (2017) Surveillance de la qualité de l'air intérieur dans des établissements recevant du public à proximité de la cokerie de Serémange-Erzange ✓ Air Pays de la Loire: etude en cours (projet TRANSFAIR - AAP ADEME) - publication en 2018 ✓ ATMO Normandie <ul style="list-style-type: none"> (2014-2015) Evaluation de la qualité de l'air intérieur au sein de la pépinière d'entreprises Seine Ecopolis ✓ AirPACA <ul style="list-style-type: none"> (2017) Qualité de l'Air intérieur, Campagne ISAAC et accompagnement à la gestion de l'air des écoles de Marseille

Type de documents	Références
	<p>- Evaluation qualitative / campagne Air int/Air ext : N= 403 campagnes de mesure (min :1 Auvergne Rhone Alpes – max : 144 Atmo-Grand Est)</p> <p>Polluants mesurés principalement : PM (PM_{2,5} ± PM₁₀; PM 0,3 – 3 µm), NO₂, Benzène ±TEX,</p> <p>Plus rarement : SO₂, Moisissures, Ozone, naphtalène</p> <p>Autres polluants : Formaldéhyde et autres aldéhydes, autres COV (E2G, terpènes), trichloramines, radon ; 1,2,4-triméthylbenzène ; 1,4-dichlorobenzène ; 1-méthoxy-2-propanol ; 2-butoxyéthanol ; Alpha-pinène ; Benzène ; Ethylbenzène ; Limonène ; (m+p)-xylènes ; o-xylène ; n-décane ; n-hexane ; Styrene ; Tétrachloroéthylène ; Toluène ; Trichloroéthylène ; 20 COV et 9 ALD, pesticides, perturbateurs endocriniens</p>
<p>Guides</p> <p>N=7</p>	<ul style="list-style-type: none"> • EHESP-DGS <ul style="list-style-type: none"> ○ (2014) Agir pour un urbanisme favorable à la santé : concepts et outils ○ (2016) Agir pour un urbanisme favorable à la santé : complément outil d'aide à l'analyse des PLU au regard des enjeux de santé, • A'Urba et ARS Aquitaine (2015) Guide PLU et santé environnementale • National Center for Healthy Housing (2016) A Systematic Review of Health Impact Assessments on Housing Decisions and Guidance for Future Practice • MEDAD Recenser, prévenir et limiter les risques sanitaires environnementaux dans les bâtiments accueillant des enfants, Guide à l'usage des collectivités territoriales • Ministères chargés du logement et de l'environnement (2013) Construire sain : Guide à l'usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre pour la construction et la rénovation • OMS (2000) URBANISME ET SANTE, Un guide de l'OMS pour un urbanisme centré sur les habitants, Hugh Barton et Catherine Tsourou, S2D Association internationale pour la promotion de la Santé et du Développement Durable • OMS (1983) Estimation de l'exposition de l'Homme aux polluants atmosphériques
<p>Expériences en lien avec l'urbanisme et/ou la rénovation urbaine</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dreal NPdC (2016) Aide à la prise en compte de la qualité de l'air dans la planification d'urbanisme et des transports : zoom en Nord et Pas de Calais sur PLU(i) et PDU 2. CD 93 Programme environnemental type pour les collèges du conseil départemental de Seine Saint Denis 3. Bensliman (2013) Les enjeux Santé & Logements en région bruxelloise : l'exemple de Forest 4. EHESP : Rennes, Lille, Miramas (en cours)
<p>Autres</p>	<p>Programme européen ACCEPTED : Assessment of Changing Conditions, Environmental Policies, Time activities, Exposure and Disease - ERA-EnvHealth 2012-2015 ; http://www.acceptedera.eu/ , Participation CSTB</p> <p>HCSP : Travaux en cours à la demande des ministères chargés de la santé et de l'écologie sur la prise en compte de la santé dans les procédures de planification territoriale</p>

Annexe 6 : Compte-rendu de l'audition organisée le 14 septembre 2018

Participants

Personnalités extérieures :	HONORE Cécile	Airparif
	IZARD Mathieu	Atmo Sud
	PIERRE Karine	Air Pays de la Loire
Participants Anses :	KEIRSBULCK Marion	Direction de l'évaluation des risques (DER) – unité en charge de l'évaluation des risques liés à l'air
	ALLEMAN Laurent	Experts rapporteurs nommés sur la saisine « Transferts »
	BLONDEAU Patrice	
	DELEERSNYDER Laurent	
	HARPET Cyrille	
JENNESON Bérénice		

L'Ademe s'excuse de son absence lors de cette audition.

Avant-propos

Au sein de l'Anses, des travaux d'expertise sur la problématique du transfert de la pollution extérieur vers l'air intérieur (saisine « Transferts ») sont actuellement en cours d'instruction. Il s'agit d'une demande adressée à l'Anses par les ministères en charge de la santé, de l'environnement, du logement et du travail.

Dans le cadre de ces travaux d'expertise, l'Anses a souhaité auditionner des représentants d'associations afin de recueillir leurs expériences et de disposer d'informations complémentaires à celles collectées notamment via la littérature scientifique.

Les personnes auditionnées ont présenté chacune leur expérience sur le sujet qui a servi de base de discussion sous forme de débat entre les experts rapporteurs et les personnes auditionnées.

Une synthèse des échanges qui se sont tenus lors de l'audition est présentée ci-dessous. Toutefois afin d'en simplifier la lecture, les propos ont été rassemblés autour de plusieurs items et ne suivent donc pas obligatoirement l'ordre chronologique des discussions en séance.

Le support de présentation de l'Anses qui avait été préparé et envoyé au préalable aux personnes auditionnées figure en annexe de ce compte rendu.

Synthèse des échanges tenus

1. Données relatives aux transferts

Dans les exemples d'études présentées par les AASQA en lien avec le périmètre de l'expertise de l'Anses, des campagnes de mesure portant principalement sur la qualité de l'air intérieur ont pris en compte les niveaux de concentrations dans l'air extérieur. Il peut s'agir de points de prélèvement mis en place à proximité de l'établissement (cour d'école) et/ou d'une station de mesure du système de surveillance.

Les polluants mesurés prennent en compte les sources à proximité des établissements : le dioxyde d'azote et les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) par rapport à la proximité d'axes de circulation, le benzène et le dioxyde de soufre en lien avec des activités industrielles ou stations-services.

Le calcul du ratio des concentrations intérieures sur celles extérieures dans l'étude ISAAQ sont cohérentes avec celles issues des données bibliographiques :

- NO₂ : I/E ~ 0,8
- Benzène : I/E >1

A noter que les données présentées n'ont pas fait l'objet de traitement statistique particulier. La présentation des valeurs minimales et maximales pour le ratio I/E serait intéressante.

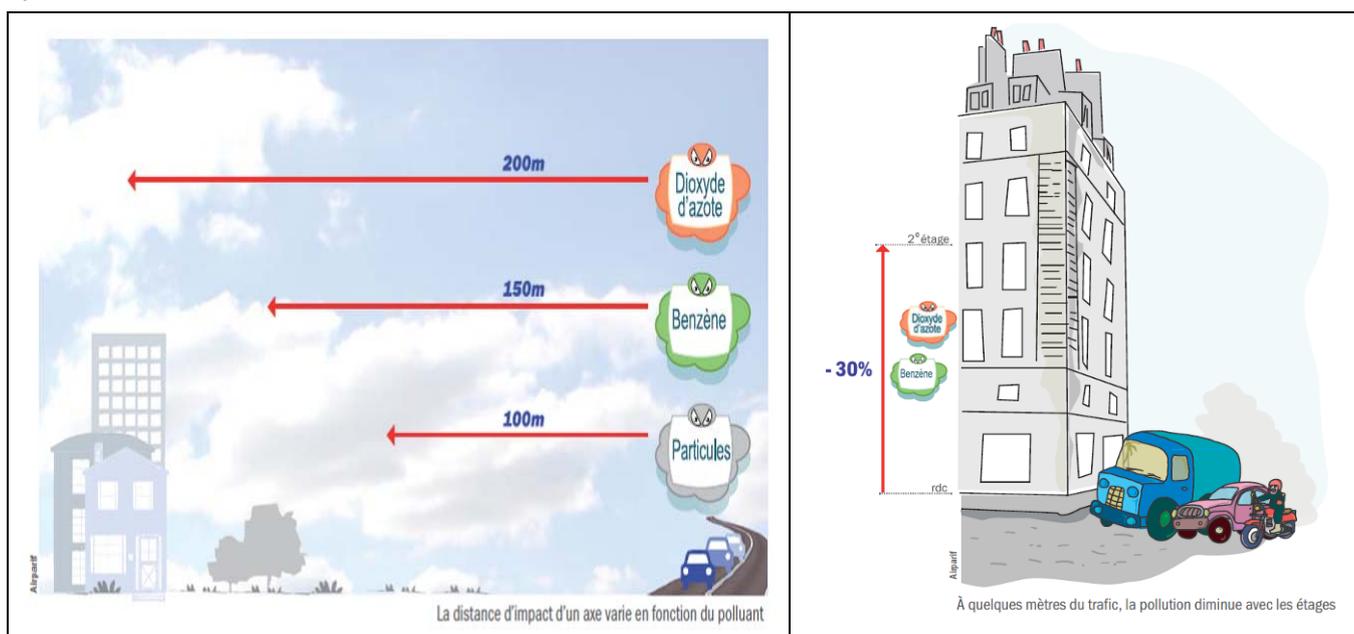
Il est mentionné l'étude Scol'air réalisée par le Cerema qui a fait un suivi temporel des concentrations et n'a pas observé de décalage entre les niveaux intérieurs et extérieurs en NO₂.

Dans les principaux résultats, le confinement des salles de classe ressort avec le suivi de l'indice ICONE. Les discussions soulignent le taux élevé d'occupation des pièces qui serait à rapporter au volume de la salle de classe pour appréhender le confinement.

La configuration des bâtiments est également discutée : rue canyon, nombre d'étage.

La proximité d'axes de circulation a également été considérée dans les études présentées.

Airparif a évalué l'impact de la distance d'influence sur les niveaux de concentration dans l'air extérieur ainsi que la hauteur du bâtiment (voir figures ci-dessous). Cette distance varie selon le polluant.



2. Projet d'urbanisme

Les AASQA peuvent contribuer au diagnostic, à l'identification de solutions et à la mise en œuvre de bonnes pratiques pour des projets d'urbanisme.

Des exemples de projet de création d'écoquartiers ou de modification de quartier ont été présentés. Les zones d'études avaient une localisation et une proximité par rapport à des axes de circulation définies.

Des modélisations ont été réalisées pour caractériser la qualité de l'air extérieur et pour prendre en compte différentes formes de bâtiments. Les modèles mis en œuvre par les AASQA peuvent être en 2D ou 3D avec des résolutions variables selon le besoin de l'étude (2m, 10m par exemple). Le calage des modèles font l'objet de campagne de mesure in situ par les AASQA pour confronter les résultats du modèle avec les résultats de mesure sur le terrain.

Des recommandations ont été formulées à partir de ces études concernant l'aménagement des quartiers :

- positionnement d'établissements recevant du public
- forme des bâtiments (en épi, hauteur)
- zone de circulation douce

Dans les plans de protection de l'atmosphère (PPA), des leviers d'action sont proposés concernant la réduction des émissions à la source avec des prescriptions pour tous les secteurs contributeurs. La limitation de l'urbanisation à proximité d'axes de circulations avait été proposée dans le PPA Ile de France mais n'a pas été repris lors de sa mise à jour en 2017.

La réalisation d'études d'impact notamment pour les projets d'infrastructures routières implique l'évaluation de la pollution atmosphérique pour caractériser l'exposition de la population avoisinante. Pour les acteurs concernés, des attentes et exigences pour prendre en compte les enjeux de la pollution atmosphérique ressortent.

Dans les projets de nouvelles constructions, des solutions pour limiter le transfert de la pollution extérieur vers l'air intérieur sont attendues par les acteurs de terrain. Les grands principes concernant le positionnement des prises d'air en toitures ou la mise en œuvre de systèmes de filtration sont proposés. Aucune étude n'a été réalisée par les AASQA pour évaluer l'efficacité de ces propositions. Des projets sont actuellement discutés dans le cadre d'AirLab⁶³ avec la proposition de solutions innovantes comme par exemple le suivi dynamique de la qualité de l'air intérieur.

3. Sensibilisation

La sensibilisation du public mais également des élèves, professeurs et personnels municipaux des établissements scolaires (service technique ou d'entretien) est un axe important des activités des AASQA. Atmo Sud a développé depuis 6 ans un module L'air et moi.

Il est également visé l'accompagnement des acteurs locaux dans la mise en œuvre de solution technique et à contribuer aux changements de comportement. Des messages généraux sur la qualité de l'air intérieur sont proposés. La réalisation de fiche réflexe pour la rénovation et la construction des écoles est également envisagée sur le retour d'expérience d'une étude présentée.

⁶³ <http://www.airlab.solutions/fr/decouvrir>

Concernant la pollution atmosphérique, des dispositifs d'affichage ou de prévision avec des systèmes de géolocalisation ou microcapteurs permettant d'associer les utilisateurs sont proposés afin de communiquer sur la qualité de l'air au plus près de la population.

Les discussions entre les experts rapporteurs et les personnes auditionnées soulignent la complexité du discours et l'antinomie que pourrait avoir des recommandations pour limiter les transferts de la pollution extérieure avec celles généralement proposées sur la qualité de l'air intérieur.

Annexe de l'audition : Diapositives présentées en introduction de l'audition

 <h2 style="text-align: center;">Transferts de pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur</h2> <h3 style="text-align: center;">Audition</h3> <p style="text-align: center;">19 septembre 2018</p>	<h2 style="text-align: center;">Introduction sur les travaux de l'Anses</h2> <p style="text-align: right;">anses 2</p>
<h3>Travaux d'expertise de l'Anses</h3> <ul style="list-style-type: none"> • Transfert air extérieur => air intérieur <ul style="list-style-type: none"> ➢ Zones exposées de façon récurrente à la pollution de l'air extérieur ➢ Locaux à usage d'habitation, de travail ou ERP (ex : crèches, établissement scolaires ou médicaux...)  <p style="font-size: small;">Figure : Sources and pathways of indoor air pollutants Leung, 2015 – Outdoor-indoor air pollution in urban environment : challenges and opportunity</p> <ul style="list-style-type: none"> • Polluants chimiques et biologiques (source intérieure < source extérieure) : Polluants réglementés + pollens + moisissures et les polluants pour lesquels des signaux existent en lien avec les effets sur la santé et/ou analyse bibliographique • France et Outre-mer <p><u>Exclusion :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Situations accidentelles (Seveso) et intentionnelles (terrorisme) • Sources intérieures <p style="text-align: right;">anses 3</p>	<h3>Organisation de l'expertise</h3> <ul style="list-style-type: none"> • Comité d'experts spécialisés : CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » • 5 experts rapporteurs <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p style="text-align: right; color: #0070c0;">Collecte de données</p> <ul style="list-style-type: none"> • REVUE DE LA LITTÉRATURE : Transferts de polluants + Déterminants de transferts entre l'air extérieur et l'air intérieur • CONSULTATION INTERNATIONALE + FRANCAISE : Informations notamment sur la prise en compte des phénomènes de transferts dans les documents d'urbanisme </div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> <p style="text-align: right; color: #0070c0;">Expertise des données</p> <ul style="list-style-type: none"> • Apporter une analyse critique sur les résultats de l'analyse bibliographique (CRD), le retour de la consultation, etc. • Organisation éventuelle d'audition avec les parties prenantes • Elaboration de recommandations vis-à-vis du transfert </div> <p style="text-align: right;">anses 4</p>

Objectif et organisation de l'audition



5

Audition du 14/09/18

- Objectif :
 - Echanger avec différents acteurs sur leurs expériences et données permettant d'identifier des préconisations visant à limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur.
 - Valorisation de données qui portent spécifiquement sur le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur
 - Prise en compte de la question de l'urbanisme avec des projets d'aménagements urbains.
- Participants
 - ADEME : Mohamedou Ba – service Qualité de l'air
 - AASQA
 - Airparif – service étude: Cécile Honoré
 - Atmo Sud: Mathieu Izard
 - Air Pays de la Loire: Karine Pierre



6

Audition du 14/09/18

- Modalités d'échange
 - 15 minutes de présentation possible pour chaque personne auditionnée – 1 heure
 - Discussion sous forme de débat entre les experts rapporteurs et les personnes auditionnées – 2 heures



7

Questions

- Que pensez-vous des leviers d'action suivants en terme de préconisation pour limiter le transfert de la pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur?
 - Bâtiments
 - Enveloppe et aménagements intérieurs
 - Systèmes : filtration et épuration
 - Utilisation/exploitation
 - Urbanisme
 - Aménagement du territoire et de la ville
 - Aménagement de la parcelle
 - Outils disponibles
 - Modélisation et méthodes
 - Urbanisme opérationnel



8

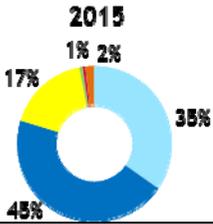
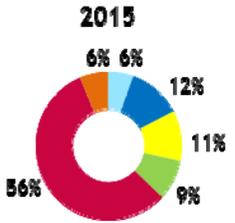
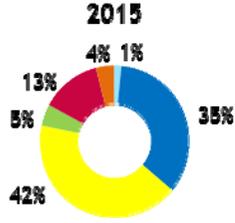
Questions

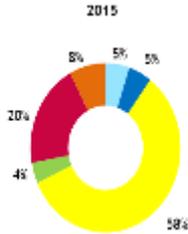
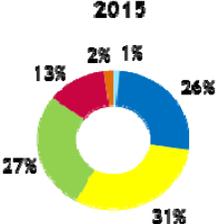
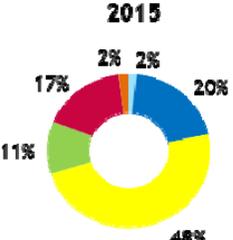
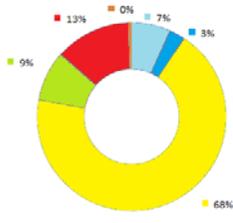
- Comment êtes-vous sollicités pour contribuer à des projets de construction ou d'aménagement? Quels sont vos principaux partenaires ?
- Quelle est la nature des études ou conseils réalisés ?
- Avez-vous identifié des entreprises qui sont spécialisées sur la question de l'urbanisme et la qualité de l'air ?
 - Sinon à quels types d'entreprise, corps de métier, faites-vous appel ?

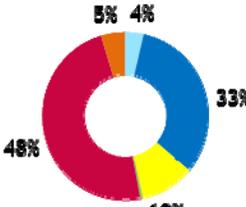
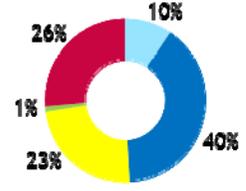
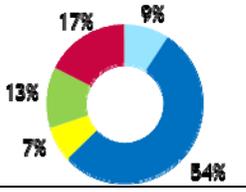
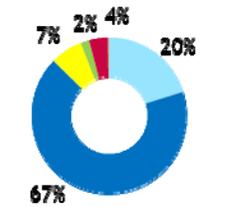


Annexe 7: Connaissances sur les sources et niveaux de concentrations des polluants de l'air

Tableau 1 : Synthèse des connaissances sur les sources et niveaux de concentrations dans l'air extérieur des polluants traités en priorité dans cette expertise

Polluant (n°CAS)	Sources (usages principaux)	Bilan d'émission (CITEPA, Format SECTEN – avril 2017)	Concentration Moyenne annuelle (Air Quality e-Reporting (AQ e-Reporting), France, 2017)	WHO AQGs
Dioxyde de soufre (SO ₂) (7446-09-5)	Sources anthropiques : Combustion de combustibles fossiles contenant du soufre : fuels, charbon Sources naturelles : activités volcaniques	<p>2015</p> 	24 ng.m ⁻³ à 10 µg.m ⁻³ moyenne annuelle (2017, 82 stations françaises)	20 µg.m ⁻³ sur 24 heures 500 µg.m ⁻³ sur 10 minutes (OMS, 2006)
Dioxyde d'azote (NO ₂) (10102-44-0)	Sources exclusivement anthropiques : Processus de combustion issus de la circulation automobile et installations de combustion (centrales énergétiques...), Sources secondaires : oxydation du NO	<p>2015</p>  <p>NOx</p>	1,4 à 82 µg.m ⁻³ moyenne annuelle (2017, 374 stations françaises)	40 µg.m ⁻³ sur 1 an 200 µg.m ⁻³ sur 1 heure (OMS, 2006)
Ozone (O ₃) (10028-15-6)	Sources exclusivement anthropiques : transformation photochimique des oxydes d'azote et des composés organiques volatils (COV) en présence de rayonnement ultraviolet solaire.	/	23 à 95 µg.m ⁻³ moyenne annuelle (2017, 305 stations françaises)	100 µg.m ⁻³ sur 8 heures (OMS, 2006)
Monoxyde de carbone (CO) (630-08-0)	Sources anthropiques : Combustion incomplète de combustibles fossiles ou biocarburants Secteurs : Transports	<p>2015</p> 	0,1 à 0,4 mg.m ⁻³ moyenne annuelle (2017, 17 stations françaises)	10 mg.m ⁻³ sur 8 heures 30 mg.m ⁻³ sur 1 heure 60 mg.m ⁻³ sur 30 minutes 100 mg.m ⁻³ sur 10 minutes (OMS, 2000)

Polluant (n°CAS)	Sources (usages principaux)	Bilan d'émission (CITEPA, Format SECTEN – avril 2017)	Concentration Moyenne annuelle (Air Quality e-Reporting (AQ e-Reporting), France, 2017)	WHO AQGs
Benzène (71-43-2)	Sources anthropiques : Combustion incomplète de combustibles fossiles ou biocarburants Industries pétrolières		0,5 à 2 µg.m ⁻³ moyenne annuelle (2016, 13 stations françaises)	17 µg.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁴ 1,7 µg.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁵ 0,17 µg.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁶ (OMS, 2000)
Particules en suspension	Sources anthropiques et naturelles : Combustion de combustibles – secteur énergie, transports, industriel Sel marin, poussières naturelles, pollens et activités volcaniques Sources secondaires - principaux précurseurs : SO ₂ , NO _x , NH ₃ , COV	<p>2015</p>  <p>PM₁₀</p> <p>2015</p>  <p>PM_{2,5}</p>	<p>PM₁₀ : 7 à 42 µg.m⁻³ moyenne annuelle (2017, 250 stations françaises)</p> <p>PM_{2,5} : 5 à 19 µg.m⁻³ moyenne annuelle (2017, 103 stations françaises)</p>	<p>PM₁₀ : 20 µg.m⁻³ sur 1 an 50 µg.m⁻³ sur 24 heures</p> <p>PM_{2,5} : 10 µg.m⁻³ sur 1 an 25 µg.m⁻³ sur 24 heures (OMS, 2006)</p>
Benzo(a)pyrène (50-32-8)	Sources exclusivement anthropiques : Combustion incomplète de nombreux combustibles (incinération, sidérurgie, moteurs automobiles, feux de cheminée, tabagisme, combustion du gaz) Emissions provenant de trois secteurs : le résidentiel/tertiaire, le transport routier, et l'industrie manufacturière Feux à l'air libre + usure des pneus	 <p>BaP</p>	0,02 à 3,8 ng.m ⁻³ moyenne annuelle (2015, 37 stations françaises)	1,2 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁴ 0,12 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁵ 0,012 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁶ (OMS, 2000)

Polluant (n°CAS)	Sources (usages principaux)	Bilan d'émission (CITEPA, Format SECTEN – avril 2017)	Concentration Moyenne annuelle (Air Quality e-Reporting (AQ e-Reporting), France, 2017)	WHO AQGs
	en caoutchouc			
Plomb (Pb)	Sources exclusivement anthropiques : <i>Trafic automobile</i> <i>Fabrication de batteries électriques, la fabrication de certains verres (cristal), etc.</i>	<p>2015</p> 	0 µg.m ⁻³ à 0,02 µg.m ⁻³ moyenne annuelle (2015, 38 stations françaises)	0,5 µg.m ⁻³ sur 1 an (OMS, 2000)
Arsenic (As)	Sources exclusivement anthropiques : <i>Combustibles minéraux solides, fioul lourd</i> <i>Production de verre, de métaux non ferreux ou la métallurgie des ferreux</i>	<p>2015</p> 	0,14 à 1,7 ng.m ⁻³ moyenne annuelle (2015, 35 stations françaises)	66 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁴ 6,6 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁵ 0,66 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁶ (OMS, 2000)
Cadmium (Cd)	Sources anthropiques et naturelles : <i>Production de zinc et incinération de déchets</i> <i>Combustion à partir des combustibles minéraux solides, du fioul lourd et de la biomasse</i> <i>Activités volcaniques</i>	<p>2015</p> 	0,04 à 2,4 ng.m ⁻³ moyenne annuelle (2015, 26 stations françaises)	5 ng.m ⁻³ sur 1 an (OMS, 2000)
Mercure (Hg)	Sources exclusivement anthropiques : <i>Combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, mais aussi par l'incinération de déchets ménagers, hospitaliers et industriels</i>	<p>2015</p> 		1 µg.m ⁻³ sur 1 an (OMS, 2000)

Polluant (n°CAS)	Sources (usages principaux)	Bilan d'émission (CITEPA, Format SECTEN – avril 2017)	Concentration Moyenne annuelle (Air Quality e-Reporting (AQ e-Reporting), France, 2017)	WHO AQGs
Nickel (Ni)	Sources exclusivement anthropiques : <i>Combustion du fioul lourd</i>	<p>2015</p> <p>45% 29% 18% 3% 3% 2%</p>	0,5 à 16 ng.m ⁻³ moyenne annuelle (2015, 29 stations françaises)	250 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁴ 25 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁵ 2,5 ng.m ⁻³ pour un niveau de risque de 10 ⁻⁶ (OMS, 2000)

Légende : Source d'émission	Transformation énergie	Industrie manufacturière	Résidentiel/tertiaire				
	Agriculture/sylviculture	Transport routier	Autres transports				
	Transformation énergie	Industrie manufacturière	Résidentiel Tertiaire	Agriculture Sylviculture	Transport routier	Autres transports	UTCF

Tableau 2 : Synthèse des connaissances sur les sources et niveaux de concentrations dans l'air intérieur des polluants traités en priorité dans cette expertise

Polluant (n°CAS)	Sources dans les environnements intérieurs	Concentration
Dioxyde d'azote (NO ₂) (10102-44-0)	appareils à combustion tels que les appareils de chauffage (cheminée, chauffage d'appoint etc.) et de production d'eau chaude non raccordés et les cuisinières à gaz.	Campagne OQAI* : Logements (2001- phase pilote) : médiane à 26 µg.m ⁻³ (chambre), et 34 µg.m ⁻³ (cuisine), Logements BPE (2015) : médiane à 16,2 µg.m ⁻³ ; maximum à 52 µg.m ⁻³ Niveaux les plus élevés associés à l'utilisation d'appareils à gaz (cuisinière ou chauffage) : maxima compris entre 180 et 2500 µg.m ⁻³ (Anses, 2013b)
Ozone (O ₃) (10028-15-6)	/	/
Monoxyde de carbone (CO) (630-08-0)	fumée de tabac ou utilisation d'un appareil non raccordé à un conduit de fumée, par exemple : cuisinières, chauffe-eau, barbecues, braseros, groupes électrogènes, chauffages mobiles d'appoint, panneaux radiants, véhicules à moteur, utilisant un combustible fossile (gaz naturel, GPL, fioul, bois, charbon, pétrole désaromatisé...).	Campagne OQAI* : Logements (2003-2005) : médiane à 0,5 mg.m ⁻³ , maximum de 36 à 42 mg.m ⁻³ sur 8 heures Enquêtes sur des cas d'intoxication : LCPP : 342 mg.m ⁻³ (mesure dans une chambre après 7 minutes de fonctionnement de l'appareil à l'origine de l'intoxication)
Benzène (71-43-2)	fumée de tabac et processus de combustion matériaux de construction et d'ameublement, produits de bricolage et d'entretien	Campagne OQAI* : Logement (2003-2005) : médiane à 2,1 µg.m ⁻³ ; maximum à 22,8 µg.m ⁻³ Logements BPE : médiane à 1,5 µg.m ⁻³ ; maximum à 7 µg.m ⁻³ Niveaux les plus élevés dans les parcs de stationnement couverts : moyenne de 33 à 51 µg.m ⁻³ (Afsset, 2009a)
Particules en suspension	activités de combustion : cuisson des aliments, appareils de chauffage, tabagisme, encens...	PM ₁₀ : Campagne OQAI* : Logements (2003-2005) : médiane à 31,3 µg.m ⁻³ , maximum à 522,6 µg.m ⁻³ PM _{2,5} : Campagne OQAI* : Logements (2003-2005) : médiane à 19,1 µg.m ⁻³ , maximum à 568 µg.m ⁻³ Logements BPE (2015) : médiane à 19,1 µg.m ⁻³ , maximum à 568 µg.m ⁻³ Niveaux les plus élevés dans les transports (métro) : PM ₁₀ . moyenne de 18 à 500 µg.m ⁻³ (Afsset, 2010)

Polluant (n°CAS)	Sources dans les environnements intérieurs	Concentration
<i>Composition chimique des particules</i>		<i>Nombre faible d'études ayant porté sur la composition chimique des aérosols domestiques (Afsset 2010)</i>
Benzo(a)pyrène (50-32-8)	/	/
Plomb (Pb)	peintures anciennes au plomb	PM ₁₀ : Etude NHEXAS (1999): médiane à 6,6 ng.m ⁻³ ; P95 = 56 ng.m ⁻³ PM _{2,5} : Etude EXPOLIS moyenne à 19 ng.m ⁻³
Arsenic (As)	/	PM ₁₀ : Etude NHEXAS (1999): médiane à 0,49 ng.m ⁻³ ; P95 = 1,6 ng.m ⁻³ PM _{2,5} : Etude EXPOLIS moyenne à 3,7 ng.m ⁻³
Cadmium (Cd)	/	/
Mercure (Hg)	/	/
Nickel (Ni)	/	PM ₁₀ : Etude Cho & Wong (2002) ~ 0,4 ng.m ⁻³ PM _{2,5} : Etude Cho & Wong (2002) ~ 0,3 ng.m ⁻³

Annexe 8 : Le parc français : volume et évolution

Le tableau 1 présente des données générales sur la taille du parc de bâtiments français, par catégorie de bâtiments.

Tableau 1: Données générales sur le parc de bâtiments français (Sources: Données statistiques CEREN 2015)

Secteurs	Catégories	Taille (2013)		Evolution (2012-2013)
		Nombre de logements (milliers)	Nombre de mètres carrés (millions)	En pourcentage du nombre de mètres carrés
Résidentiel	Logements individuels	15 897	1 771	
	Appartements	12 162	803	
Tertiaire	Bureaux		214	1,9%
	Hôtellerie-restauration		65	0,5%
	Commerce		208	0,5%
	Enseignement		185	0,5%
	Habitat communautaire		69	1,8%
	Santé		112	1,8%
	Sport, loisirs, culture		70	1,2%
	Transport		25	0,4%
TOTAL			3 522	

Tableau 2: Répartition du parc de logement par typologie et période de construction (Sources: Données statistiques CEREN 2015)

Typologies de logements	Période de construction	Taille (2013)	
		Nombre de logements (milliers)	Nombre de mètres carrés (millions)
Logements individuels	Avant 1975	8 098	869
	1975-1998	5 014	578
	Après 1999	2 785	324
Appartements	Avant 1975	7 035	466
	1975-1998	3 263	213
	Après 1999	1 864	124

Annexe 9 : Réglementations en lien étroit avec les transferts de polluants

Réglementation applicable en matière d'étanchéité à l'air des bâtiments

Paramètre important pour caractériser une enveloppe de bâtiment, la perméabilité à l'air du bâti est caractérisée dans la réglementation thermique par un coefficient de perméabilité à l'air appelé Q4Pa-surf. Ce dernier représente le débit de fuite par m² de surface déperditive, hors plancher bas, sous une dépression de 4 Pa. Elle s'exprime en m³/(h.m²).

Dans le cadre de la réglementation thermique applicable aux bâtiments neufs (RT 2012), le traitement de la perméabilité à l'air des bâtiments à usage d'habitation est obligatoire. Il est possible de justifier ce traitement soit par une mesure, soit en adoptant une démarche de qualité certifiée de l'étanchéité à l'air du bâtiment. Les seuils réglementaires sont les suivants : 0,6 m³/(h.m²) pour les maisons individuelles ; 1 m³/(h.m²) pour les logements collectifs.

Pour le secteur tertiaire, aucune exigence de résultat n'est imposée. Une valeur par défaut est fixée conventionnellement dans les règles de calcul thermique. Cette valeur est de 1,7 ou 3,0 m³/(h.m²) suivant la nature de l'activité hébergée. Une autre valeur peut se substituer à la valeur par défaut dans le calcul, à condition de justifier du niveau atteint par une mesure réalisée en fin de travaux.

La mesure de perméabilité à l'air d'un bâtiment n'est valide, dans le cadre de la RT 2012, que si elle est réalisée par un opérateur autorisé par le ministère en charge de la construction.

Réglementation applicable en matière de ventilation des bâtiments

1. Historique de la réglementation

➤ 1893

La loi du 12 juin 1893 établit les premières règles de salubrité applicables aux locaux de travail. Ces règles évolueront régulièrement avec les réformes du code du travail.

➤ 1894

Le décret du 10 mars 1894, pris en application de la loi de 1893, dispose que les poussières doivent être évacuées directement en dehors de l'atelier au fur et à mesure de leur production et que des ventilations aspirantes énergiques doivent être installées.

➤ 1903

La loi du 11 juillet 1903 (J.O. du 22/07/1903) étend les dispositions de la loi du 12 juin 1893 aux usines, chantiers, ateliers de quelque nature que ce soit, publics ou privés.

➤ 1906

Publication de l'ordonnance du 27 mars 1906 de la police de Paris qui impose aux logements chauffés au charbon ou au bois de disposer d'un conduit de fumée dans la cuisine et d'un conduit par pièce principale. Le renouvellement d'air s'effectue donc en partie via ces conduits de fumée et par aération grâce aux ouvertures de fenêtres et aux défauts d'étanchéité des parois et menuiseries. Les flux d'air ne sont donc pas contrôlés et dépendent des conditions climatiques.

➤ 1912

La loi du 26 novembre 1912, portant codification des lois ouvrières (Livre 2 du Code du Travail et de la Prévoyance Sociale) abroge la loi du 12 juin 1893, en reprenant in extenso ses dispositions.

➤ 1913

Le décret du 10 juillet 1913 reprend à son tour les dispositions du décret du 10 mars 1894, en prescrivant, en son article 6 : « Les poussières ainsi que les gaz incommodes, insalubres ou

toxiques seront évacués directement en dehors des locaux de travail au fur et à mesure de leur production. [...] L'air des ateliers sera renouvelé de façon à rester dans l'état de propreté nécessaire à la santé des ouvriers ».

➤ 1937

Publication le 1^{er} avril 1937 du premier Règlement sanitaire départemental type (RSDT) de 1937. Celui-ci prévoit une aération par pièce d'habitation réalisée par des ouvrants de surface minimale.

L'arrêté du 1^{er} avril 1937 du ministre en charge de la Santé impose aux préfets de l'adapter à leurs départements par des arrêtés préfectoraux établissant les règlements sanitaires départementaux (RSD).

Par la suite, les arrêtés interministériels pris en application de décrets fixant les règles générales de construction des bâtiments d'habitation fixeront les exigences applicables aux bâtiments neufs.

Les RSD continuent à fixer les exigences applicables à l'équipement et à l'aménagement des locaux d'habitation existants ainsi que les exigences d'aération applicables à la construction des bâtiments autres que d'habitation.

➤ 1955

Le décret du 22 octobre 1955 fixe des règles générales de construction des bâtiments d'habitation. L'article 8 prévoit en particulier une aération par pièce (cuisine et pièces principales) ainsi qu'une surface minimum de la partie ouvrante des baies. En cas de fenêtre étanche dans une pièce, il y a obligation d'aération permanente de cette pièce hors ouverture de baie. Il est prévu également une obligation d'aération permanente en cas de logement dont toutes les baies donnent sur une même façade.

➤ 1958

L'arrêté du 14 novembre 1958 vient préciser les dispositions de l'article 8 du décret du 22 octobre 1955, notamment pour les cas où une aération permanente par pièce est requise par le décret (ouvertures d'entrée d'air et de sortie d'air).

Le chauffage central et les conduits d'évacuation des fumées/de ventilation collectifs à raccordement individuel (shunts) se généralisent.

Les prescriptions étaient les suivantes :

- Si le bâtiment était équipé d'un chauffage central, il devait comporter un conduit de fumée dans chaque cuisine et un second conduit si l'appartement comprenait plus de 3 pièces,
- S'il n'y avait pas de chauffage central, l'ordonnance de 1906 était appliquée soit un conduit dans la cuisine et par pièce principale.

➤ 1969

L'arrêté ministériel du 22 octobre 1969 relatif à l'aération des logements amène le principe d'une aération générale et permanente à réaliser par balayage (entrée d'air neuf dans les pièces principales, transfert vers les pièces de service, évacuation). L'entrée de l'air neuf doit se faire par des bouches en façade des pièces principales, tandis que la sortie d'air vicié s'effectue dans les pièces de service (cuisines, toilettes, salles de bains) par conduits à tirage naturel ou par extraction mécanique.

Le renouvellement d'air alors recommandé est de 1 vol/h dans les pièces principales. Cet arrêté marque l'apparition des premiers systèmes de ventilation mécanique contrôlée (VMC).

➤ 1974

Le premier choc pétrolier engendre une crise de l'énergie et l'adoption du décret du 10 avril 1974 portant réglementation thermique. Le calcul de la déperdition globale d'énergie d'un bâtiment

rapportée à son volume habitable intègre les pertes thermiques causées par le renouvellement d'air.

➤ 1982

L'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements maintient le principe d'une aération générale et permanente, et fixe les débits à extraire pour chaque type de logement suivant le nombre de pièces principales qu'il comporte.

L'arrêté du 26 juillet 1982 fixe les dispositions applicables aux logements-foyers, tels que foyers de jeunes travailleurs et foyers pour personnes âgées.

➤ 1983

L'arrêté du 28 octobre 1983 vient modifier l'arrêté du 24 mars 1982 en ajoutant, sous certaines conditions, la possibilité de modulation des débits de renouvellement d'air par un système de régulation automatique dans les logements.

➤ 2002

Le décret du 30 janvier 2002 (dernière modification le 9 mars 2017), vient réglementer les logements neufs et existants mis en location. Il vise les caractéristiques du logement décent exige que les dispositifs d'ouverture et de ventilation des logements permettent un renouvellement de l'air adapté aux besoins d'une occupation normale du logement et au fonctionnement des équipements.

➤ 2009

L'arrêté du 17 avril 2009 (modifié par arrêté du 11 janvier 2016) vient fixer des règles spécifiques pour l'aération des bâtiments d'habitation neufs dans les Départements d'Outre-Mer.

2 Bâtiments résidentiels

➤ Réglementation applicable aux logements existants

Les logements existants sont généralement assujettis aux réglementations applicables à leur date de construction.

Par ailleurs, des dispositions réglementaires visent à assurer la salubrité et la décence des logements. Qu'il soit loué vide ou meublé, un propriétaire doit fournir à son locataire un logement décent. Cette obligation concerne la résidence principale du locataire. Le décret 2002-120 du 31 janvier 2002 (modifié) fixe les caractéristiques minimales de décence des logements au titre desquelles figure la présence de dispositifs d'ouverture et de ventilation des logements permettant un renouvellement de l'air adapté aux besoins d'une occupation normale du logement et au fonctionnement des équipements.

➤ Réglementation applicable aux logements neufs

Pour la construction de logements neufs, l'article R111-9 du Code de la Construction et de l'Habitation (CCH) établit les principes généraux du renouvellement d'air dans les logements.

L'arrêté du 24 mars 1982, pris en application de l'article R111-9 du CCH, vient préciser les dispositions particulières pour la conception et le dimensionnement des systèmes.

L'arrêté exige que l'aération des logements puisse être générale et permanente au moins pendant la période où la température extérieure oblige à maintenir les fenêtres fermées. Toutefois dans les bâtiments soumis à un isolement acoustique renforcé l'aération doit pouvoir être générale et permanente en toute saison.

La circulation de l'air doit pouvoir se faire principalement par entrée d'air dans les pièces principales et sortie dans les pièces de service.

L'aération permanente peut être limitée à certaines pièces pour les maisons individuelles construites dans les zones climatiques H1 et H2.

Un arrêté modificatif daté du 28 octobre 1983 ajoute la possibilité de modulation des débits de renouvellement d'air par un système de régulation automatique dans les logements. C'est cette modification qui permet le recours aux systèmes dits hygroréglables, qui modulent le renouvellement d'air en fonction de l'humidité ambiante.

➤ Etat de la conformité réglementaire des logements neufs

Le rapport de synthèse 2005-2009 de l'observatoire de la réglementation technique dans la construction (ORTEC) indique que 50% des bâtiments de logement contrôlés ne respectent pas la mise en œuvre et les dispositions fonctionnelles nécessaires au bon fonctionnement des systèmes de ventilation. On constate également ici que 43% des bâtiments ne sont pas conformes aux prescriptions réglementaires en termes de renouvellement d'air et notamment de débits d'air extrait : 36% des bâtiments contrôlés présentent des débits insuffisants et 7% des débits excessifs.

Ce rapport énonce aussi que le taux de non-conformité relevé dans les maisons individuelles est beaucoup plus élevé que dans les bâtiments collectifs d'habitation et précise que cette rubrique compte parmi celles où les règles de construction sont les moins respectées.

Ces résultats sont stables dans le temps et l'absence de progrès est confirmée par les contrôles récents. Pour l'année 2015, le bilan annuel de l'activité de contrôle fait état d'un taux global de 46% de non-conformité.

3 Bâtiments tertiaires

Dans les bâtiments tertiaires, la réglementation diffère suivant que le bâtiment héberge des postes de travail (assujetti au code du travail) et suivant qu'il accueille du public (assujetti au règlement sanitaire départemental).

➤ Code du travail

Les locaux de travail s'entendent comme les lieux destinés à recevoir des postes de travail situés ou non dans les bâtiments de l'établissement, ainsi que tout autre endroit compris dans l'aire de l'établissement auquel le travailleur a accès dans le cadre de son travail.

En ce qui concerne l'aération des locaux de travail, le Code du Travail distingue :

- les obligations applicables aux maîtres d'ouvrages qui construisent ou aménagent des locaux destinés à recevoir des travailleurs, que ces opérations nécessitent ou non l'obtention d'un permis de construire (Articles R4212-1 à R4222-17),
- de celles applicables aux employeurs pour l'utilisation des locaux de travail (Articles R4222-1 à R4222-17).

Les exigences sont établies en débit minimal d'air neuf à introduire par poste de travail et sont distinguées suivant que les locaux soient à pollution non-spécifique ou à pollution spécifique.

➤ Règlement Sanitaire Départemental Type

Les Règlements Sanitaires Départementaux sont des arrêtés préfectoraux, établis sur la base d'une circulaire du ministre chargé de la santé portant Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT), adaptée aux conditions particulières de chaque département.

La section 2 du Titre III du RSDT propose, en particulier, des prescriptions générales applicables à la ventilation des constructions neuves et aux constructions subissant des modifications importantes affectant le gros-œuvre ou l'économie de l'immeuble.

Les prescriptions dimensionnelles du RSDT sont définies par des débits minimum d'air neuf à introduire par occupants.

Par ailleurs, le RSDT établit des prescriptions générales liées à l'utilisation d'air neuf et d'air extrait :

- les prises d'air neuf et les ouvrants doivent être placés en principe à au moins huit mètres de toute source éventuelle de pollution (véhicules, débouchés de conduits de fumée, sorties d'air extrait) ou avec des aménagements tels qu'une reprise d'air pollué ne soit pas possible ;
- l'air extrait des locaux doit être rejeté à au moins huit mètres de toute fenêtre ou de toute prise d'air neuf sauf aménagements tels qu'une reprise d'air pollué ne soit pas possible ;
- l'air extrait des locaux à pollution spécifique doit être rejeté sans recyclage.

Annexe 10 : Caractéristiques techniques du parc

Étanchéité à l'air de l'enveloppe

Depuis 2008 en France, toutes les mesures d'étanchéité à l'air des enveloppes réalisées conformément à la réglementation thermique doivent être effectuées par un opérateur certifié QUALIBAT. Cette certification comprend un suivi annuel que le Cerema est chargé de compiler pour constituer une base de données très détaillée qui comprend des données d'environ :

- 220 000 mesures d'étanchéité à l'air de l'enveloppe réalisées entre 2008 et 2016 ;
- 1 300 mesures d'étanchéité à l'air des réseaux aérauliques réalisés entre 2010 et 2016 ;

La base de données sur l'étanchéité de l'enveloppe concerne principalement les bâtiments résidentiels (maisons individuelles : 64% ; collectif : 32%) et plus minoritairement les immeubles non résidentiels (4%). Dans 89% des cas, les mesures concernent des mesures à réception de travaux de construction neuves réalisées depuis 2010. La base de données comprend la localisation des fuites d'étanchéité, telles que déclarées par les mesureurs, suivant 46 catégories.

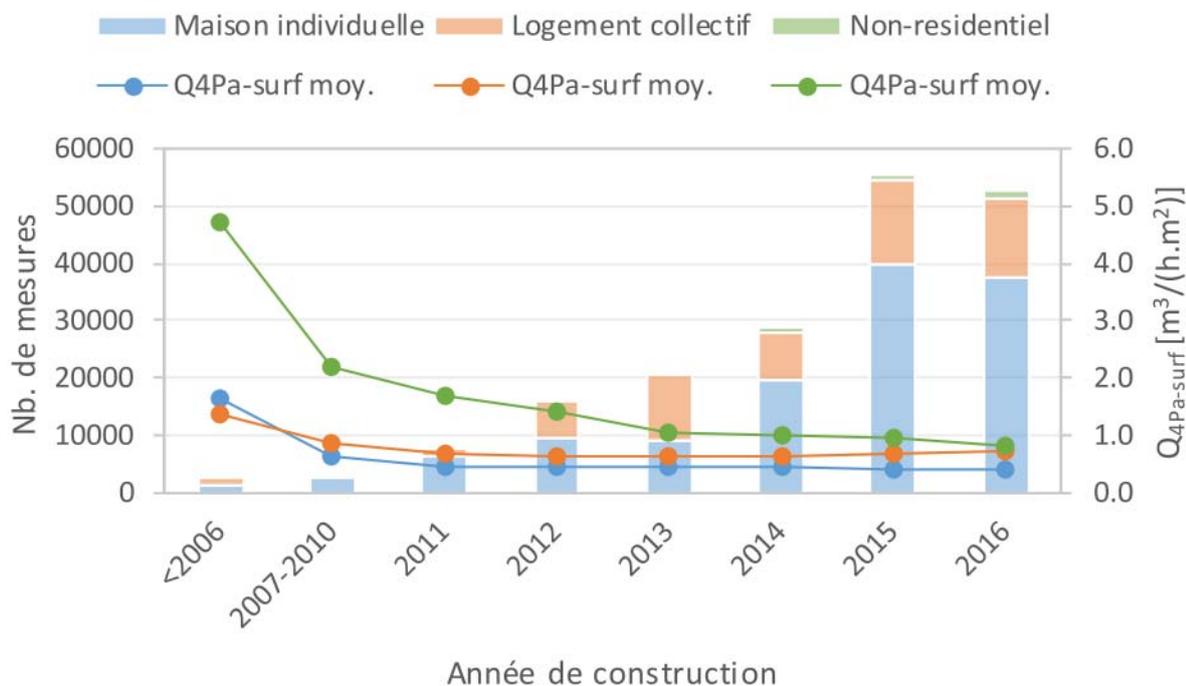
Tableau 1 : Classification des localisations de fuites (Source : Qualibat)

Catégories	Sous-catégories
A: Enveloppe principale	A1: Autre infiltration en partie courante
	A2: Membrane pare-vapeur (ou tout complexe similaire): jonction adhésive entre lés, percement ou déchirement
	A3: Liaisons mortier/colle entre blocs élémentaires de maçonnerie, entre panneaux de doublages
	A4: Percement (cheville, autre) ou liaison entre panneaux de doublages non rebouchés en partie courante
	A5: Dalles faux plafond: dalles sur ossatures non étanche
B: Liaisons de murs, toitures et planchers	B1: Autre liaison
	B2: Liaison entre deux parois verticales
	B3: Liaison pied de mur / plancher (plinthes, pied de cloison ou de mur...)
	B4: Liaison mur / plancher haut ou toiture inclinée (cueillie de plafond)
	B5: Membrane pare-vapeur (ou tout complexe similaire): Fixation défectueuse avec lisse basse, plancher intermédiaire et plancher haut
C: Portes et fenêtres	C1: Autre défaut de menuiserie
	C2: Fenêtre et porte fenêtre: Jonction cadres Ouvrant/Dormant (absence ou défaut de compression des joints)
	C3: Fenêtre et porte fenêtre: Jonction vitrage / montant de menuiserie (joint défectueux)
	C4: Porte palière ou porte coupe-feu: Mauvaise compression des joints de portes (hors barre de seuil)
	C5: Porte palière ou porte coupe-feu: Barre de seuil absente ou inefficace (sur ext ou LNC, y compris porte-fenêtre)
	C6: Baie coulissante: Jeu excessif entre parties vitrées d'un châssis coulissant, et/ou en partie haute et basse de châssis
	C7: Baie coulissante: Évacuation des condensas
	C8: Coffre de volet roulant: joues latérales, fixation sur cadre,...
D: Élément traversant une paroi	D1: Autre élément traversant une paroi
	D2: Membrane pare-vapeur (ou tout complexe similaire): traversée par gaine, tuyauterie, poutre, trappes
	D3: Traversée de plancher et de murs et/ou cloisons (tout type de plomberie, conduits et gaines électriques...)
	D4: Bouches VMC: fuite au pourtour de bouches d'extraction/soufflage
	D5: Poutres: Liaison poutres ou solive avec murs

Catégories	Sous-catégories
	D6: Poutres: Liaison poutres ou solive avec plafond ou plancher
	D7: Escalier: Jonction plancher/escalier ou parois verticale/escalier
E: Trappes	E1: Autre trappe d'accès
	E2: Trappe d'accès aux combles (joint absent ou inefficace)
	E3: Trappe de gaine technique verticale (joint absent ou inefficace)
F: Réseaux	F1: Autres équipements
	F2: Tableau électrique
	F3: Réseaux encastrés sur paroi / extérieure ou LNC: BT courant faible, téléphone, fibre optique, interrupteurs
	F4: Réseaux encastrés sur cloison intérieure: BT courant faible, téléphone, fibre optique, interrupteurs
	F5: Luminaires: encastrés en plafond, en applique plafond et murales
G: Liaisons porte/mur et fenêtre/mur	G1: autre liaisons parois/ouvrant
	G2: fenêtre et porte-fenêtre y-c coffre VR: Liaison menuiserie avec maçonnerie appuis/tableau/linteau
	G3: Porte palière ou coupe-feu: Liaison encadrement avec maçonnerie appuis/tableau/linteau
	G4: fenêtre et porte-fenêtre y-c coffre VR: Liaison menuiserie dormant / doublage
	G5: Porte palière ou coupe-feu: Liaison encadrement de porte / doublage
	G6: Membrane pare-vapeur (ou tout complexe similaire): Fixation défectueuse sur la menuiserie
H: Poêle, cheminée, ascenseur, hottes,...	H1: Autres
	H2: Poêle, insert ou chaudière étanche ou non étanche, ou arrivée d'air comburant
	H3: Hotte aspirante avec évacuation extérieure
	H4: Trappe/châssis désenfumage
	H5: Lanterneau d'éclairage zénithal
	H6: Porte d'ascenseur (encadrement - jonction porte, ...)
	H7: Arrivée d'air ou extraction non prévue dans l'étude thermique

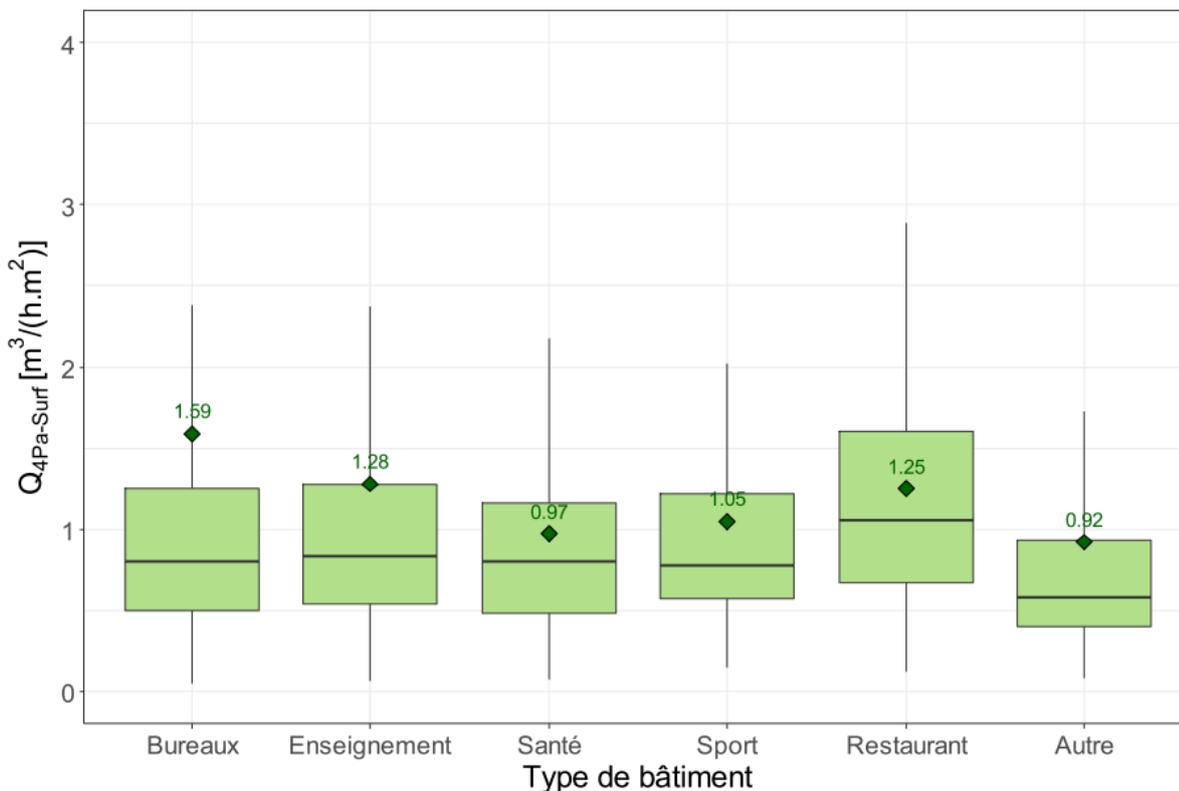
L'exploitation statistique de la base de données montre une amélioration significative de l'étanchéité à l'air des enveloppes au cours des dernières années.

Figure 1: Perméabilité à l'air suivant l'année de construction (Source: Cerema)



Les mesures réalisées dans les bâtiments non-résidentiels sont relativement homogènes suivant les catégories. Ces résultats sont cependant à relativiser dès lors que la mesure ne présente un intérêt pour les constructeurs que si elle est meilleure que la valeur par défaut de la réglementation.

Figure 2: Perméabilité à l'air des bâtiments résidentiels suivant la catégorie de bâtiment (Source: Cerema)



Quelle que soit la typologie de bâtiment, les fuites les plus fréquemment déclarées sont localisées au niveau des liaisons sol-mur-plafond. Pour les logements individuels, suivent les baies coulissantes et les réseaux encastrés. Pour les bâtiments d'habitation collectifs, il s'agit principalement des coffres de volets roulants. Enfin pour les bâtiments non-résidentiels, ce sont les fenêtres qui peuvent être incriminées.

Figure 3: Occurrence des fuites en maisons individuelles (Source: Cerema)

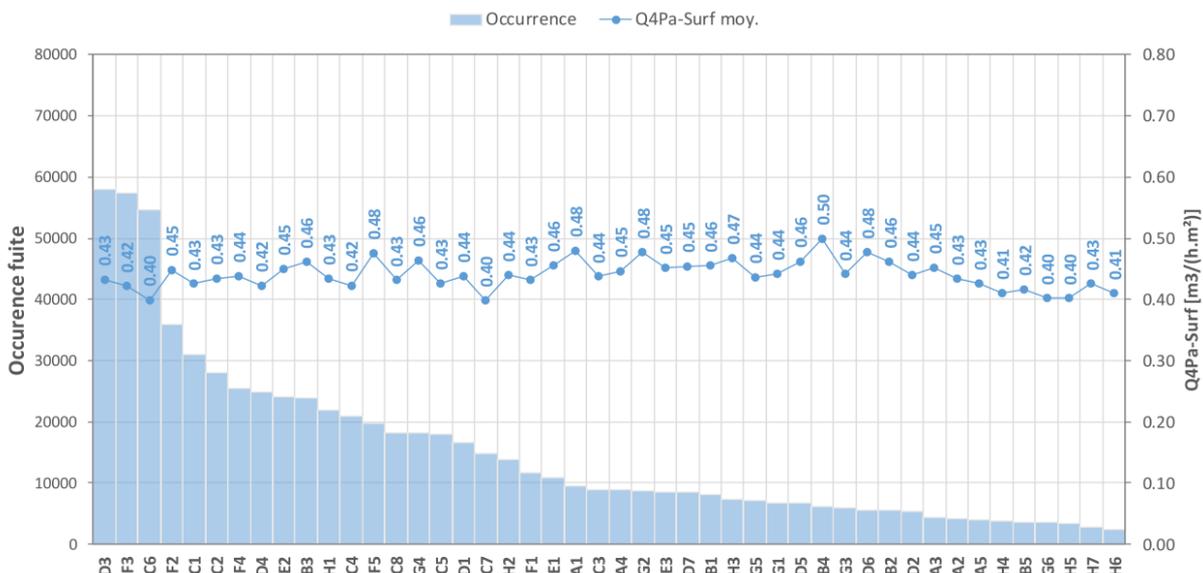


Figure 4 : Occurrence des fuites en logements collectifs (Source: Cerema)

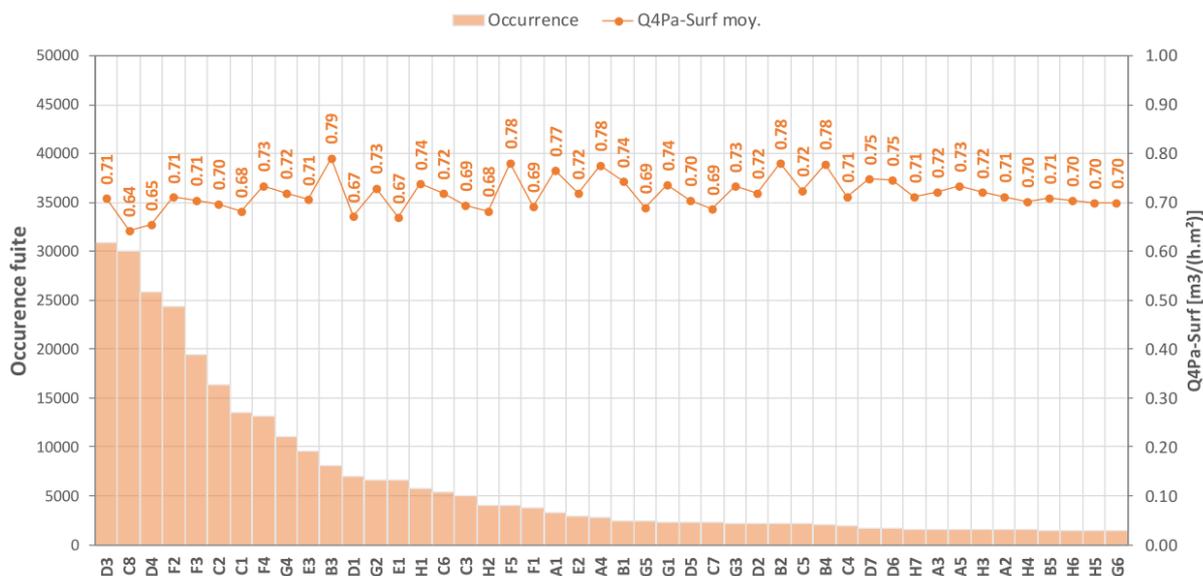
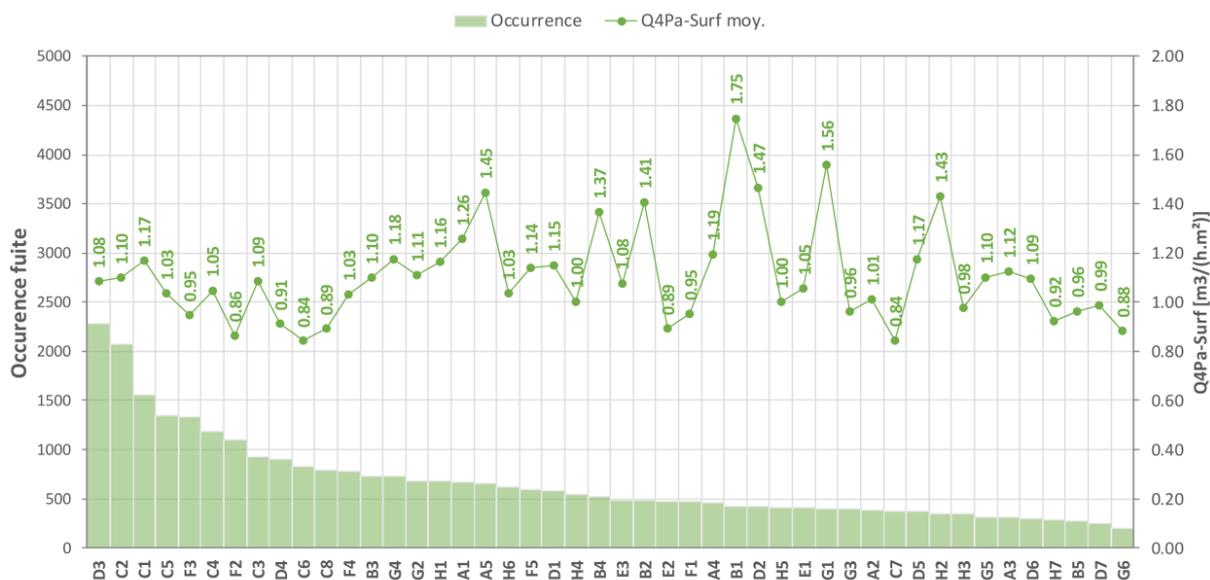


Figure 5 : Occurrence des fuites en bâtiments non-résidentiels (Source : Cerema)



Systèmes de ventilation

Un bâtiment répond fondamentalement à l'objectif de créer un environnement protégé des éléments extérieurs. Les exigences sur cet environnement intérieur portent en particulier sur le confort (température, humidité, etc.) et sur la santé (qualité de l'air intérieur, etc.).

Si l'on ne renouvelle pas suffisamment l'air intérieur, l'enveloppe du bâtiment peut créer un environnement confiné qui n'élimine pas les pollutions produites à l'intérieur du bâtiment. Outre les conséquences sur la santé des occupants, l'accumulation d'humidité et les phénomènes de condensation peuvent altérer le bâtiment dans le temps.

Dans le même temps, un renouvellement d'air trop important peut altérer la performance énergétique des bâtiments. Par ailleurs, les systèmes qui assurent le renouvellement d'air doivent prendre en considération d'autres facteurs comme la sécurité incendie ou le confort acoustique.

➤ Principe général de fonctionnement de la ventilation

Le renouvellement de l'air intérieur peut se faire :

- par un transfert d'air via les fuites d'étanchéité résiduelles de l'enveloppe,
- par aération, par exemple par l'ouverture volontaire d'une fenêtre,
- par un système de ventilation visant à produire un renouvellement d'air maîtrisé, utilisant des dispositifs prévus à cet effet, tels que des conduits, des bouches, etc.

Dans les bâtiments anciens, l'aération constituait, avec les fuites d'étanchéité de l'enveloppe, le mode principal du renouvellement d'air. Dans les bâtiments actuels qui disposent d'un véritable système de ventilation, l'aération demeure un complément nécessaire à la ventilation lors d'épisodes plus intenses de pollution intérieure qui ne peuvent être évités (entretien ménager, travaux engendrant des poussières, etc.).

Le principe général du renouvellement d'air consiste en :

- Une amenée d'air frais dans des zones à pollution non spécifique, c'est-à-dire les locaux dans lesquels la pollution est liée à la seule présence humaine,
- Un transfert d'air depuis les zones à pollution non spécifique vers les zones à pollution spécifique, c'est-à-dire les locaux dans lesquels gaz, vapeurs, aérosols solides ou liquides autres que celles qui sont liées à la seule présence humaine sont susceptibles d'être émis.
- Une évacuation de l'air vicié dans les zones à pollution spécifique.

Ce sens de circulation permet de limiter la contamination de parties a priori non-polluées.

A l'intérieur du bâtiment, les mouvements d'air sont engendrés par des différences de pressions (déplacement depuis les hautes pressions vers les basses pressions). Ces différences de pressions peuvent avoir différentes origines, naturelles et/ou mécaniques.

- Le tirage thermique : Si l'air dans un conduit est plus chaud et plus léger que l'air extérieur, il s'échappe en partie haute et instaure une dépression en partie basse, proportionnelle à la hauteur du conduit et à la différence de température entre intérieur et extérieur ;
- L'effet du vent : Quand il rencontre un bâtiment, le vent comprime l'air sur les parois qui lui font face et crée des dépressions sur les autres. Les entrées d'air et débouchés de conduits en toiture sont alors soumis à des pressions différentes, qui entretiennent une mise en mouvement de l'air dans le bâtiment ;
- Des dispositifs mécaniques : Un équipement, le plus souvent un ventilateur, crée une dépression à la sortie d'air ou une surpression à l'entrée d'air, voire une combinaison des deux.

➤ Typologies de systèmes

On distingue 4 principaux types de systèmes :

- Les systèmes de ventilations naturels, pour lesquels l'amenée d'air se fait généralement en façade et l'évacuation de l'air vicié par des conduits verticaux en toiture,
- les systèmes de ventilation par insufflation, pour lesquels l'amenée d'air est forcée par un dispositif mécanique, et l'évacuation de l'air vicié se fait par des grilles en façade et/ou par des conduits verticaux,
- les systèmes de ventilation par extraction, pour lesquels l'évacuation est forcée par un dispositif mécanique et l'entrée d'air se fait par la façade,
- les systèmes de ventilation double-flux, où insufflation et extraction se fait par un dispositif mécanique.

Les dispositifs mécaniques d'extraction peuvent être centralisés et raccordés aux locaux par des conduits, ou se matérialiser par des petits moteurs intégrés aux bouches et grilles disposées en façade.

➤ Répartition dans des types de systèmes dans les logements

L'OQAI a réalisé une étude statistique des systèmes de ventilation présents dans le parc de logement français. La répartition des systèmes, par type de système et par tranche d'âge, est présentée dans le Tableau 1 (distribution de chaque type de système par tranche d'âge) et le

Tableau 2 (distribution des systèmes dans chaque tranche d'âge).

Tableau 2 : Distribution représentée des logements pour chaque type de ventilation en fonction des classes d'âges de fin de construction. En pourcentage par colonne. (Source : OQAI)

Fin de construction	Aucun dispositif	Ventilation naturelle	Moteurs dans quelques pièces	Ventilation mécanique (simple et double flux)
Avant 1871	9,9	4,9	14,7	1,3
De 1871 à 1914	25,8	15,2	16,0	6,0
De 1915 à 1948	26,8	11,3	21,4	4,9
De 1949 à 1961	12,1	16,0	12,3	4,8
De 1962 à 1967	4,5	11,9	3,2	4,9
De 1968 à 1974	4,5	21,9	10,1	12,5
De 1975 à 1981	6,1	10,5	9,5	18,2
De 1982 à 1989	5,4	7,5	8,0	17,0
De 1990 à 2003	4,8	0,9	4,9	30,5
TOTAL (Colonnes)	100	100	100	100

Tableau 3 : Parts représentées des logements pour chaque classe de fin de construction en fonction des types de ventilation. En pourcentage par lignes. (Source : OQAI)

Fin de construction	Aucun dispositif	Ventilation naturelle	Moteurs dans quelques pièces	Ventilation mécanique (simple et double flux)	TOTAL (Lignes)
Avant 1871	37,9	23,7	8,3	30,2	100
De 1871 à 1914	38,7	36,6	10,1	14,6	100
De 1915 à 1948	43,2	29,2	14,6	12,9	100
De 1949 à 1961	23,9	50,7	10,2	15,3	100
De 1962 à 1967	13,6	58,1	4,1	24,2	100
De 1968 à 1974	7	54,7	6,6	31,7	100
De 1975 à 1981	10,8	29,8	7	52,4	100
De 1982 à 1989	11,2	24,9	6,9	57	100
De 1990 à 2003	8,3	2,4	3,5	85,8	100

Ci-après sont reproduits quelques éléments de l'analyse faite par l'OQAI dans son rapport.

Les systèmes de ventilation existant dans le parc de logement sont fondamentalement liés aux réglementations depuis 1958. Toutefois il convient de ne pas perdre de vue que ces réglementations ne couvrent que l'habitat neuf et qu'une partie du parc a été réhabilité et ceci fait que des systèmes de ventilation sont présents dans des tranches d'âge pour lesquelles ces systèmes n'étaient pas encore en place.

Parmi les logements construits après 1990, près de 12 % (9,3 % individuel + 2,5 % collectif) d'entre eux ne disposent d'aucun système de ventilation ou sont ventilés par ventilation partielle (moteurs de ventilateurs dans quelques pièces), et ne sont pas réglementaires. Ce constat peut aussi être fait sur les classes 1975-1981 et 1982 – 1989 : près de 18 % des logements construits dans ces deux périodes sont dans la même situation ne respectant pas le principe de la ventilation générale et permanente (~15,8 % individuel + ~2,2 % collectif).

Annexe 11 : Recours aux servitudes à visée de santé publique

Parmi les leviers possibles pour intégrer la santé dans les projets d'aménagement urbain et dans les documents de planification urbaine, il faut compter le recours aux diverses formes de **servitudes à visée sanitaire** : servitudes d'urbanisme, servitudes d'utilité publique, servitudes conventionnelles, ...ces servitudes fixent par exemple des restrictions d'utilisation des sols, des restrictions d'usages imposées pour des raisons sanitaires et/ou environnementales. Ces diverses formes de servitudes peuvent notamment être fixées par arrêté préfectoral, ou encore des restrictions d'usages peuvent également être définies par arrêté municipal ou par convention entre les parties.

Lister ces diverses servitudes et leur assurer une meilleure visibilité et publicité notamment dans les PLU et dans les documents annexés, par report dans les documents à l'échéance d'une année après leur élaboration pour les rendre opposables :

L'article L. 126-1 du code de l'urbanisme : « *Les plans locaux d'urbanisme doivent comporter en annexe les servitudes d'utilité publique affectant l'utilisation du sol et qui figurent sur une liste dressée par décret en Conseil d'État [...]* ». La liste de ces servitudes figure en annexe de l'article R. 126-1 du code de l'urbanisme.

Exemple : l'Article R. 123-14 du code de l'urbanisme précise que : *Les annexes comprennent à titre informatif également :*

- *les prescriptions d'isolement acoustique édictées, en application des articles L. 571-9 et L. 571-10 du code de l'environnement, dans les secteurs qui, situés au voisinage des infrastructures de transports terrestres, sont affectés par le bruit et, d'autre part, la référence des arrêtés préfectoraux correspondants et l'indication des lieux où ils peuvent être consultés*

➤ Dans les règlements de voirie :

- Destinataires : Pour les études préalables des documents d'urbanisme : Agences d'urbanisme, bureaux d'études des aménageurs.
- Pour l'aménagement de la voirie : collectivités locales, agglomération, métropoles.

Documents de référence :

- **le code de la voirie routière** qui regroupe les dispositions législatives et réglementaires relatives aux voies routières publiques ou privées (créé par la loi n°89-413 du 22 juin 1989) (partie législative, titres 2, 3 et 4 ; partie réglementaire, titres 2, 3 et 4)
 - **le règlement de voirie**, document d'urbanisme local qui établit très précisément les modalités de coordination administratives et techniques relatives à l'occupation temporaire du domaine public et à l'exécution des travaux de voirie, notamment sur les réseaux routiers, au niveau national, départemental ou communal.
- Pour les voies communales : le règlement de voirie est établi, selon l'article R141-14 du code de la voirie routière, par le conseil municipal, après avis d'une commission présidée par le maire et comprenant, notamment, des représentants des affectataires, permissionnaires, concessionnaires et autres occupants de droit des voies communales. À défaut de règlement de voirie, le conseil municipal est censé statuer dans chaque cas (art. R141-15 du code⁸).
 - Pour les routes départementales (article R131-11 du code), le conseil général et le président du conseil général se substituent au conseil municipal et au maire.

A l'initiative des services de voirie et de l'urbanisme, des dispositions peuvent être entreprises pour réduire les contributions de pollution de l'air par :

- distance entre sources émettrices et établissements.

- Pour le parc d'établissements existants :
 - Réduire les gabarits de voirie (passage de 3 à 2 voies, de 2 à 1 voie) pour augmenter les surfaces dédiées aux modes doux (espaces piétons, pistes cyclables, voies en site propre pour transports en commun)
 - Réduire les vitesses de circulation (zones apaisées et Zones à faible émission), notamment sur certains tronçons d'autoroute en période hivernale

Restreindre l'accès de secteurs à des catégories de véhicules :

- Zones à Circulation Restreinte (ZCR), compétence de la commune (Décret ZCR 2016-847 du 28.06.2016). ;
- Zones de protection de l'air (ZPA) activées en cas de mauvaises conditions climatiques et de forte pollution atmosphérique (dépassement des taux de pollution de l'air) ; Compétence du préfet du département (article R411-19 du Code de la route)
- Plans de mobilité (PDM) obligatoire pour les entreprises de plus de 100 salariés au 1/1/2018, et établissements générant du trafic (article 51 de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte - LTECV).

- Implanter des écrans végétalisés entre voirie et établissements ;

- Pour les nouveaux projets d'établissements et d'infrastructures :

- Définir une distance minimale entre voiries et infrastructures de circulation en fonction des paramètres que sont : le gabarit de la voirie, la prévision de niveau de trafic
- Définir l'orientation des bâtiments et la position des « prises d'air extérieur » (pour ventilation intérieure) sur les façades non exposées aux sources de pollution

- réduire les sur-expositions de secteurs urbains et établissements en modifiant l'aménagement des infrastructures :

- Repérer sur les cartes de bruit et niveaux de pollution de l'atmosphère les secteurs de surexposition (abords des grandes infrastructures de transport, proximité de zones d'aération de tunnel, zones d'activités émettrices).

- A la suite du repérage des secteurs sur-exposés, procéder soit à une régulation des flux de véhicules (réduction des vitesses, limitation des voies motorisées)

- Soit à un aménagement de la voirie en :

- Déclassant de grandes infrastructures (exemple de l'axe autoroutier européen A6/A7 traversant la ville de Lyon) pour transformation en « boulevard urbain apaisé »
- Elargissant les espaces de circulation « non motorisée » (voies piétonnes, pistes et voies cyclables)
- Répartissant les voies de circulation entre plusieurs modes de transport : Tram, bus, cycles, piétons
- Délimitant des Zones à Faible émission avec des zones réglementées quant à l'accès aux véhicules polluants (poids lourds notamment, véhicules deux roues non électriques).

- Insérant des espaces végétalisés interstitiels dans le tissu urbain, pour accentuer la porosité urbaine (dispersion des polluants), formant des « écrans » aux nuisances sonores et de polluants, voire contribuant à l'atténuation des « îlots de chaleur urbaine ».

Note : Les questions des expositions chroniques aux nuisances et polluants de l'air sont peu intégrées dans la conception des aménagements urbains, les services spécialisés (voirie, urbanisme) raisonnant en termes de « desserte, d'accessibilité, de linéaires et de maillage du territoire ». Le raisonnement en « débit » ou flux de véhicules /jour ou /heure est ramené à celui de la capacité de mobilité, de fluidité du trafic et encore trop peu en termes d'impacts (nuisances, pollutions) générés par les flux sur les populations riveraines, et encore moins sur les incidences en termes de santé.

➤ **Dans les autorisations d'urbanisme et d'installations :**

Plus spécifiquement concernant les sources fixes : établissements et activités polluantes :

Destinataires : mairies des collectivités locales ; services d'état pour le régime des installations classées pour la protection de l'environnement (DREAL) ;

- Au niveau d'une collectivité locale, l'instruction des autorisations d'occupation des sols (compétence des maires) et l'édition de **prescriptions spéciales, voire de refus pour des motifs de salubrité publique peuvent être conduites au regard de pollutions à risques pour les populations (air, sol, bruit, etc.)**. Cette possibilité est offerte depuis une très longue date par le code de l'urbanisme (**article R 111-2** applicable dans toutes les communes de France).

Le critère de la distance entre « sources d'émission » et « établissements » (tertiaires, habitat) est crucial : un simple « retrait » des constructions par rapport à la voie présente un gain attendu estimé en termes d'exposition des personnes. Dans certains cas, ce retrait est réglementairement prévu, comme dans l'article L.111-6 du code de l'urbanisme : Celui-ci interdit, en dehors des espaces urbanisés des communes, toutes constructions et installations dans une **bande de largeur allant de 75 et 100 m de part et d'autre de l'axe** de certaines catégories de voies (autoroutes, routes express, déviations et routes à grande circulation). Même s'il n'a pas pour objectif la seule préservation de la qualité de l'air, sa mise en œuvre permet de limiter l'exposition des personnes en imposant réglementairement un éloignement à la voie (CEREMA, 2017).

Par exemple, une étude a été réalisée pour les petites et moyennes communes de la région Auvergne, qui souligne qu'avec des trafics généralement **inférieurs à 20 000 véhicules par jour**, une distance de quelques dizaines de mètres peut permettre de limiter de manière conséquente l'exposition des personnes résidant aux abords des voies.

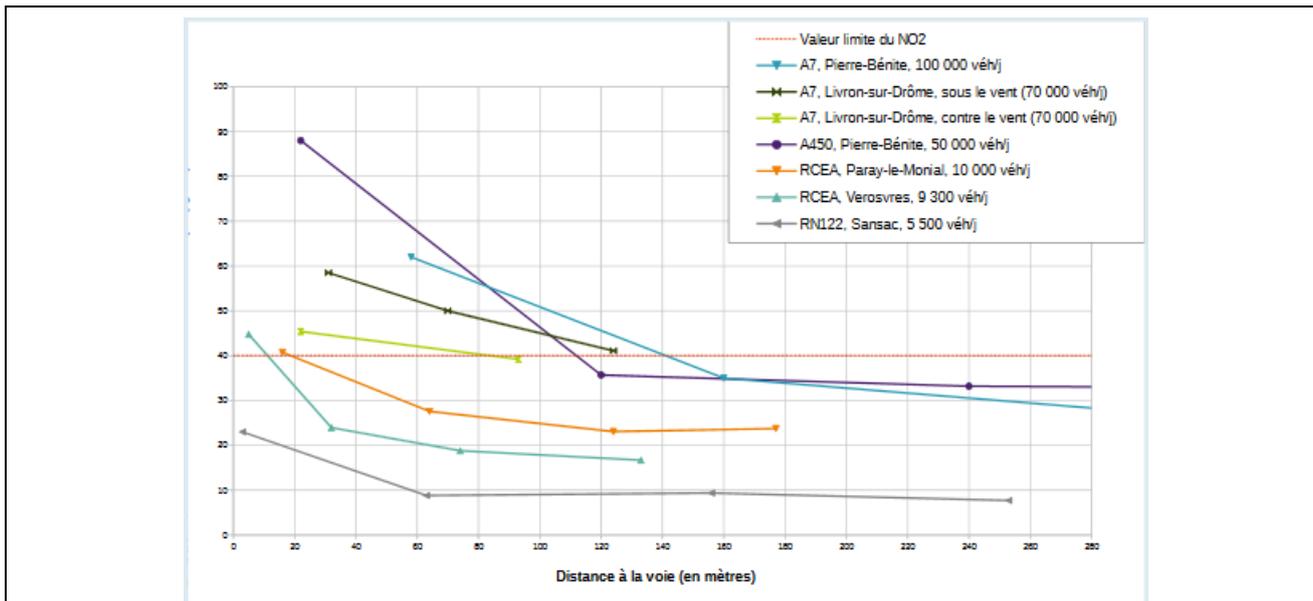


Figure 1 : Profil des concentrations en NO₂ en fonction du trafic supporté par la voie et de la distance à la voie (Source : CEREMA Centre-Est)

L'étude Airparif de qualité de l'air effectuée autour de la porte de Gentilly a montré une baisse rapide des niveaux de NO₂ dès que l'on s'éloigne de l'axe de circulation, d'environ 35 % à une vingtaine de mètres. La diminution des niveaux s'observe ensuite de manière plus progressive, l'influence du trafic étant encore perceptible à 160 mètres. Concernant le benzène, l'influence locale du trafic routier est plus marquée avec une diminution plus rapide des teneurs à une distance de 20 mètres de la source (d'environ 45 %) et un niveau de fond pratiquement atteint à 150 mètres (Airparif, 2008). Cette distance varie selon le polluant et montre que la distance d'impact est deux fois plus importante pour le dioxyde d'azote que pour les particules et montre que la distance d'impact est deux fois plus importante pour le dioxyde d'azote que pour les particules.

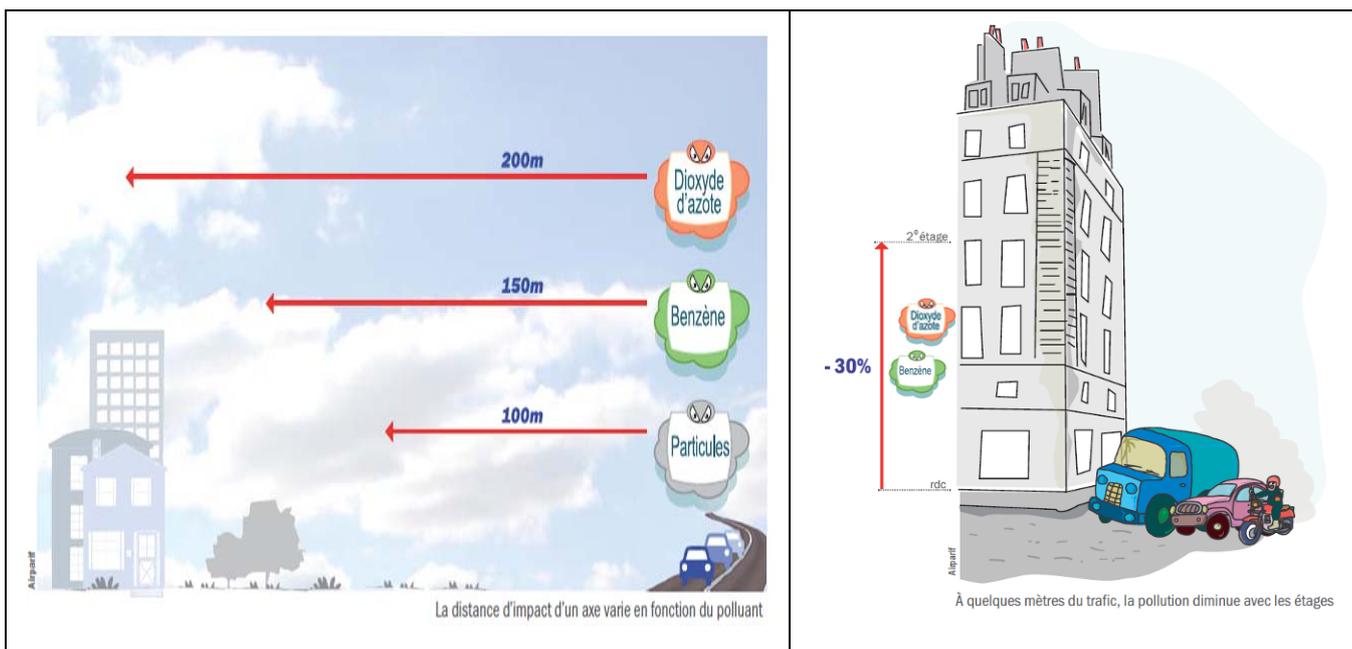


Figure 2 : Impact de la distance par rapport à un axe de circulation et de la hauteur du bâtiment sur les niveaux de concentrations en polluants atmosphériques (Airparif, 2012)

**Annexe 12 : Rapport de convention recherche et développement (CRD)
Anses-CSTB Impact de la pollution extérieure sur la qualité de l'air
intérieur.**

Notes





Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
F94701 Maisons-Alfort cedex
www.anses.fr
[@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)