

**Frédéric Dor, Abdelkrim Zeghnoun, Pauline Brosselin**

# **Estimation de l'exposition des populations aux polluants présents à l'intérieur des habitations**

**Ce travail a pu être mené à bien grâce à une subvention du CSTB.**

## **Remerciements**

**Les auteurs tiennent à remercier :**

- **Yvon Le Moullec, Pascal Empereur-Bissonnet et Séverine Kirchner pour leur relecture très attentive du document et leurs conseils avisés ;**
- **Edwige Bertrand, documentaliste à l'InVS pour son aide efficace dans le travail de recherche bibliographique fondamental dans cette étude.**

## Résumé

Les citoyens passent la majeure partie de leur temps à l'intérieur de bâtiments ou autres lieux clos dans lesquels les pollutions de toutes natures sont considérées responsables de nombreux effets sur la santé. L'observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) a été mis en place pour contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'exposition de la population et à l'identification des déterminants environnementaux et comportementaux de cette exposition, dans un but d'évaluation et de gestion des risques sanitaires. L'objectif principal du présent travail est d'analyser l'influence du budget espace-temps (BET) et des modalités d'appréciation de la concentration des polluants dans l'air intérieur sur l'estimation de l'exposition des personnes pendant leur temps de présence dans leur logement. Les solutions proposées peuvent varier en fonction des objectifs des études de santé publique qui les utilisent.

Les données utilisées pour effectuer ce travail méthodologique sont issues de l'étude pilote de l'OQAI qui s'est déroulée de mars à juillet 2001, dans 90 logements, situés dans trois zones géographiques. Ces régions et ces logements ne sont pas représentatifs du territoire français mais offrent une certaine diversité de climat, population et type de logements. Au total, les résultats de 251 personnes sont exploitables (92 %) dont 48 % d'actifs et 21 % de moins de 15 ans. Les logements de ces ménages sont des appartements situés dans des immeubles collectifs dans 69 % des cas.

Les occupants ont rempli deux sortes de questionnaires : un carnet journalier avec un pas de temps de 10 minutes et un semainier avec un pas de temps de 15 minutes. Les taux de remplissage sont très variables selon les régions (de 29 à 60 %). Une première analyse a consisté à comparer les écarts éventuels des durées passées dans chacun des microenvironnements à l'intérieur des habitats déclarés en fonction du système de recueil.

Les concentrations atmosphériques du CO enregistrées toutes les 5 minutes ont été moyennées sur les pas de temps de 10 et 15 minutes afin d'être en cohérence avec les recueils de BET. Les concentrations du benzène et du formaldéhyde sont quand à elles mesurées sur un pas de temps hebdomadaire.

Les concentrations d'exposition domestique quotidienne (CEDQ) ont été calculées selon plusieurs méthodes : (i) celles qui visent à estimer la concentration d'exposition des personnes pendant leur seul temps de présence dans leur logement. Cette grandeur est utile en épidémiologie notamment pour assurer une classification la plus proche possible de la réalité des personnes en fonction de leur niveau d'exposition ; (ii) celles qui visent à estimer la concentration d'exposition des personnes rapportée sur une journée complète.

Elle permet, en EQRS, de disposer d'une estimation cohérente avec les valeurs toxicologiques de référence (VTR).

La comparaison de ces différentes modalités d'estimations des CEDQ a permis d'analyser l'influence : (1) du pas de temps des BET, (2) de l'agrégation du BET, (3) de la proportion de temps passé dans l'habitat au cours d'une journée, (4) de la prise en compte de la concentration des polluants à l'échelle de la pièce ou du logement et (5) de la combinaison de ces diverses possibilités.

Des procédures d'approximation des valeurs non quantifiées et manquantes ont été mises en œuvre. Pour le CO, les concentrations atmosphériques inférieures à la limite de quantification analytique (LQA) ont été fixées à une valeur correspondant à la LQA divisée par 2. Aucune valeur de concentration atmosphérique manquante dans une série recueillie n'a été remplacée. En revanche, en s'appuyant sur les connaissances publiées dans la littérature, l'absence de mesure dans des pièces telle que la chambre a été palliée avec soit les concentrations mesurées dans le séjour soit la moyenne des concentrations des pièces dans lesquelles une source d'émission était présente. Concernant le BET, seuls les cahiers remplis à plus de 75 % ont été exploités. Les valeurs manquantes ont été remplacées selon la méthode de l'imputation simple à partir des profils généraux des catégories de personnes dans chacune des régions.

Enfin, une analyse de la contribution de chacune des pièces à l'exposition domestique quotidienne a été conduite. L'estimation a été faite en calculant la dose d'exposition cumulée sur la journée pour la pièce considérée lorsque la personne est présente dans cette pièce, et la dose d'exposition domestique cumulée de la journée.

La comparaison des deux systèmes de recueil du BET, remplis pour un même jour, ne montre pas de différences sensibles dans la durée d'occupation des pièces du logement. Elle ne révèle pas non plus de différences de durée d'occupation des pièces du logement avec par ordre d'importance décroissante : la chambre, le séjour, la cuisine et la salle de bain. Les autres pièces sont beaucoup plus rarement occupées.

Pour le CO, au cours d'une journée, il est observé des écarts manifestes entre la concentration ambiante mesurée du CO et la concentration d'exposition domestique calculée. Cela révèle toute l'importance de tenir compte de l'emploi du temps précis des occupants si l'on veut estimer de manière correcte les niveaux d'exposition auxquels ils sont soumis.

En fonction des modalités de son exploitation, l'influence du BET sur les niveaux des concentrations d'exposition domestique quotidienne diffère. En premier lieu, le type de recueil du BET conduit à des écarts très ténus quels que soient le niveau de l'exposition et la

région (0.06 à 0.38 mg/m<sup>3</sup> en valeur absolue). Ensuite, les modalités de prise en compte du BET et des concentrations atmosphériques, quelle que soit la région, conduit à des différences d'autant plus grandes que les indicateurs sont agrégés et donc moins précis. Cependant compte tenu des CEDQ relativement faibles, au maximum, la différence est de 0.61 mg/m<sup>3</sup>.

Dès lors que l'on ramène le calcul des concentrations d'exposition domestique précédentes établies pour le seul temps passé à l'intérieur des habitats à une concentration d'exposition domestique sur la journée entière, la pondération est d'un facteur moyen compris entre 1.5 et 2 avec un maximum à 5.

Le remplacement des valeurs manquantes dans les semainiers n'a pas d'influence sur les résultats des CEDQ, même si l'on étend l'analyse à la prise en compte de tous les semainiers, quel que soit leur taux de remplissage. Ce résultat peut paraître surprenant tant pour certaines personnes, l'emploi du temps de la journée est peu renseigné. Cependant, la méthode d'approche des valeurs manquantes du BET oriente vers une uniformisation des comportements, les pièces les plus fréquentées étant privilégiées pour pallier l'absence des données. En revanche, les modalités d'attribution de concentrations atmosphériques de CO dans les pièces non instrumentées conduit à des différences d'autant plus grandes que les concentrations d'exposition domestique sont élevées (de 0 à 3.41 mg/m<sup>3</sup>).

La contribution de chacune des pièces du logement à l'exposition des personnes indique que si les concentrations d'exposition sont les plus élevées dans la cuisine suivie du séjour et de la chambre, en revanche, compte tenu du BET, c'est la chambre qui contribue le plus à l'exposition domestique quotidienne, suivie du séjour puis de la cuisine (respectivement 50, 25 et 15 %). Ce résultat est valable pour les trois polluants étudiés.

Bien que les logements enquêtés et donc les occupants soient non représentatifs de la population française générale, ce premier travail permet de comprendre que les pièces les plus polluées ne sont pas forcément celles qui contribuent le plus aux concentrations d'exposition quotidienne.

Le travail conduit ici ne visait pas la connaissance des niveaux d'exposition des populations mais à l'analyse de l'influence du BET et des concentrations atmosphériques pour estimer cette exposition afin de maîtriser les erreurs de classification en épidémiologie et de rendre possible la quantification des risques sanitaires.

L'influence du BET et des concentrations atmosphériques reste modeste sauf dans certains cas particuliers. C'est la conjonction des deux influences qui peut se révéler préjudiciable. Ces résultats militent donc pour le recueil d'un BET détaillé sur un pas de temps approprié au contexte de l'étude et de concentration atmosphérique cohérente avec ce BET.

La contribution majeure de la chambre à l'exposition en est une illustration. Il en ressortira une minimisation des erreurs de classification des personnes par rapport à leur niveau d'exposition et une meilleure quantification des risques.

Il ressort également la nécessité d'équiper les logements de dispositifs de mesure dans les pièces les plus occupées, notamment la chambre à coucher, et pas seulement dans celles présentant des sources d'émission des polluants.

Enfin, en terme de perspectives, l'analyse des données de la campagne pilote suggère d'organiser les données collectées dans une base de données structurée selon les besoins scientifiques et de développer une démarche d'évaluation quantitative du risque sanitaire encouru dans les habitats.

# Sommaire

<b>Résumé.....</b>	<b>2</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>II. Mesure de l'exposition.....</b>	<b>9</b>
1. Nécessité et difficulté de l'estimation de l'exposition .....	9
2. Démarche d'estimation de l'exposition.....	10
3. Méthodes d'estimation de l'exposition.....	10
3.1. Méthode directe .....	10
3.2. Méthode indirecte .....	11
<b>III. Objectif de l'étude .....</b>	<b>12</b>
<b>IV. Méthodes .....</b>	<b>13</b>
1. Préambule.....	13
2. Budget espace-temps (BET).....	14
2.1. Protocoles de recueil.....	14
2.1.1. Carnet journalier.....	14
2.1.2. Semainier .....	14
2.2. Description du BET .....	15
2.3. Comparaison des BET recueillis par le semainier et le carnet journalier .....	15
3. Estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne .....	15
3.1. Protocoles de mesure des polluants .....	16
3.2. Estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne (CEDQ) pour le CO .....	17
3.2.1. Les concentrations d'exposition domestique (CED).....	17
3.2.2. Les concentrations d'exposition domestique journalière (CEDJ).....	18
3.3. Estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne (CEDQ) pour le benzène et le formaldéhyde .....	19
3.3.1. Les concentrations d'exposition domestique (CED).....	19
3.3.2. Les concentrations d'exposition domestique journalières (CEDJ).....	19
3.4. Récapitulatif des possibilités d'estimation des concentrations d'exposition intérieure quotidienne .....	19
4. Approximation des valeurs manquantes .....	20
4.1. Substitution des concentrations atmosphériques inférieures à la LQA .....	20
4.2. Valeurs manquantes de concentration .....	20
4.2.1. Valeurs manquantes du BET.....	21
5. Analyse des estimations des concentrations d'exposition domestique de CO .....	22
5.1. Evolution des concentrations d'exposition domestique au cours de la journée.....	22

5.2. Comparaison des estimations de concentrations d'exposition domestique quotidienne .....	22
5.3. Estimation de la contribution de chacune des pièces du logement à la concentration d'exposition domestique quotidienne .....	23
<b>V. Résultats.....</b>	<b>23</b>
1. Budgets espace-temps.....	23
1.1. Description.....	23
1.2. Comparaison des BET .....	25
2. Estimation des concentrations d'exposition domestique quotidienne .....	26
2.1. Monoxyde de carbone.....	26
2.1.1. Evolution des concentrations d'exposition domestique au cours de la journée.....	26
2.1.2. Influence du type de recueil du BET sur les estimations des concentrations d'exposition domestique (CED-1).....	28
2.1.3. Influence de l'agrégation du BET et des concentrations atmosphériques sur les estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne .....	28
2.1.4. Influence de la prise en compte du seul BET intérieur par rapport à une journée entière.....	31
2.1.5. Influence des modalités de remplacement des valeurs manquantes du BET recueilli avec le semainier.....	31
2.1.6. Influence des modalités de remplacement de la concentration de CO dans les pièces non instrumentées.....	32
2.1.7. Contribution de chacune des pièces du logement à l'exposition des personnes.....	33
2.2. Benzène et formaldéhyde .....	36
<b>VI. Discussion.....</b>	<b>37</b>
1. Evolution des concentrations atmosphériques au cours de la journée .....	38
2. Comparaison des diverses modalités de calcul des CEDQ.....	38
2.1. Influence des modalités de recueil du BET .....	39
2.2. Influence combinée du BET et de la concentration atmosphérique des polluants	40
2.2.1. CO.....	40
2.2.2. Benzène et formaldéhyde.....	40
2.3. Influence des modalités d'approche des valeurs manquantes.....	40
2.3.1. BET .....	40
2.3.2. Concentration atmosphérique.....	41
2.4. Contribution des pièces à la concentration d'exposition quotidienne .....	42
<b>VII. Conclusion – perspectives.....</b>	<b>42</b>
<b>VIII. Références .....</b>	<b>44</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>47</b>



# **I. Introduction**

---

Les citoyens passent la majeure partie de leur temps à l'intérieur de bâtiments ou autres lieux clos (écoles, bureaux, habitations, transports...). Les pollutions physiques, chimiques et microbiologiques peuvent favoriser le développement de pathologies telles des affections respiratoires dont l'asthme, des irritations cutanées, des allergies, des cancers etc. De nombreuses publications scientifiques pointent le fait que les concentrations de certains polluants mesurés dans les lieux clos sont très souvent plus élevées que celles enregistrées dans l'air ambiant extérieur et que les expositions résultantes sont sûrement plus importantes. Les risques encourus par les populations sont alors à considérer.

Il a été ainsi décidé de mettre en place un « observatoire de la qualité de l'air intérieur », afin de contribuer à la connaissance de l'exposition de la population aux différents contaminants présents dans les environnements intérieurs, et notamment dans l'habitat, et à l'identification des déterminants environnementaux et comportementaux de cette exposition, dans un but d'évaluation et de gestion des risques sanitaires [CSTB 2000]. Il est nécessaire pour atteindre ces objectifs que le recueil systématique des données sur le parc national des bâtiments soit correctement dimensionné pour permettre une analyse en termes d'évaluation des risques.

Cette quantification des risques sanitaires passe notamment par l'estimation de l'exposition des populations attribuable à l'habitat individuel. Le présent travail s'inscrit dans cet optique en s'appuyant sur une partie des données recueillies au cours d'une étude de faisabilité qui s'est déroulée en 2002 sur une centaine de sites (90 logements et 9 écoles). Cette étape de faisabilité a permis le recueil des mesurages des polluants identifiés dans les différentes pièces d'un habitat et de données individuelles de budget espace-temps des occupants des habitations, au travers d'un semainier et d'un carnet journalier rempli très précisément pendant deux jours (un jour de semaine et un jour de week-end).

## **II. Mesure de l'exposition**

---

### **1. Nécessité et difficulté de l'estimation de l'exposition**

L'estimation de l'exposition des individus ou des populations est devenue une étape majeure dans la conduite des études épidémiologiques et d'évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS). Une plus grande précision qualitative et quantitative est requise afin notamment d'éviter des erreurs de classification des personnes.

Une des difficultés actuelles de l'estimation de l'exposition concerne la multiplicité des expositions tant au plan du nombre de polluants que des lieux fréquentés et donc des sources de polluants rencontrées. Ainsi, il est difficile d'accéder à l'exposition intégrée sur une période donnée des personnes et des populations ; en conséquence, la quantification des risques encourus reste généralement partielle, qu'elle s'appuie sur des méthodes épidémiologiques ou sur la démarche d'évaluation des risques.

En effet, quelle que soit la précision obtenue pour le calcul d'une exposition attribuable à une source identifiée, la classification des sujets dans une étude épidémiologique pourra être entachée d'erreurs manifestes en fonction du poids des co-expositions.

Dans le cas d'une évaluation quantitative des risques sanitaires, la quantification ne se faisant que polluant par polluant, les co-expositions ne sont pas réellement prises en compte. En fonction des modalités d'estimations des expositions des populations, les résultats exprimeront soit l'excès de risque global, soit l'excès de risque attribuable à la seule source identifiée ou au seul microenvironnement analysé.

## **2. Démarche d'estimation de l'exposition**

L'estimation de l'exposition passe par une approche en trois étapes :

- la première concerne la caractérisation, d'une part, du site à travers son environnement physique (climat, météorologie, type d'habitat, nature géologique du sol...) et, d'autre part, des populations présentes, potentiellement exposées et sensibles ;
- la seconde identifie les voies d'exposition des personnes résultant de la localisation des sources de contamination et des lieux où le contact homme-contaminant peut s'effectuer. Ceci nécessite d'avoir des connaissances sur le devenir et le transport des polluants dans les différents milieux environnementaux. Ces deux premières étapes permettent d'apprécier le potentiel d'exposition des personnes ou des populations ;
- la troisième étape est celle de la quantification de l'exposition par les voies identifiées à l'étape précédente. Elle peut être conduite selon les deux méthodes directe et indirecte classiquement décrites.

## **3. Méthodes d'estimation de l'exposition**

### **3.1. Méthode directe**

Elle consiste à estimer directement sur l'individu son niveau d'exposition. Les doses ou concentrations d'exposition sont estimées au niveau environnemental ou biologique. Pratiquement, cela consiste soit à faire porter un capteur à la personne dont on veut mesurer

l'exposition, pendant une durée variable, soit à recueillir les liquides ou tissus biologiques dans lesquels les polluants ou leurs métabolites seront quantifiés. Cette méthode est celle qui donne une estimation de l'exposition la plus proche de la réalité, puisque l'individu est suivi pas à pas. Un autre avantage est la possibilité de conduire les études sur des échantillons représentatifs de la population d'intérêt.

Cependant elle présente un certain nombre de contraintes : contraintes humaines en raison d'un recrutement difficile, principalement fondé sur le volontariat, avec en corollaire des arrêts en cours d'enquêtes ; contraintes matérielles importantes en raison d'un encombrement possible et de l'absence de capteurs disponibles pour nombre de polluants ; contraintes éthiques pour les biomarqueurs ; contraintes budgétaires.

### 3.2. Méthode indirecte

L'estimation de l'exposition humaine résulte d'une combinaison des mesurages micro-environnementaux et des données sur le temps passé par les individus dans les différents micro-environnements. La formule utilisée est celle définie par W.Ott en 1980 [Ott, 1980] :

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times T_i}{T_e} \quad [\text{équation 1}]$$

avec

CE = concentration d'exposition sur la période d'exposition considérée ;

C<sub>i</sub> = concentration du polluant dans les différents micro-environnements fréquentés ;

T<sub>i</sub> = temps passé dans les différents micro-environnements ;

T<sub>e</sub> = durée d'exposition considérée.

L'utilisation de cette formule, implique de poser plusieurs hypothèses [Jantunen, 1997] :

- il existe une homogénéité spatiale de la concentration du polluant dans chaque micro-environnement étudié ;
- il existe une stabilité temporelle de la concentration ; s'il y a des pics de concentration au cours de la période étudiée, ceux-ci ne seront pas pris en compte dans l'estimation de l'exposition car c'est la concentration moyenne qui est utilisée dans le calcul ;
- la concentration de polluant inhalée par les individus est celle enregistrée par le capteur, même si l'appareil de mesure se situe loin des individus ;

- la concentration dans le micro-environnement est la même que les individus soient présents ou non, puisque les capteurs fonctionnent le plus souvent en continu dans les micro-environnements étudiés.

Les avantages de cette méthode sont les suivants :

- elle peut être appliquée à un grand nombre d'individus ;
- elle permet d'estimer la contribution des différents lieux à l'exposition totale ;
- elle est adaptée à l'estimation de l'exposition à l'air intérieur car le nombre de micro-environnements est limité ;
- elle permet plus facilement que la méthode directe, l'estimation des niveaux d'exposition pour plusieurs polluants simultanément ;
- grâce à la modélisation, elle permet l'analyse de situations futures.

En contrepoint, les limites suivantes sont rapportées :

- l'accès au budget espace-temps n'est pas toujours aisé dans la population concernée ;
- les contrastes d'exposition sont généralement établis à partir de modèles non validés de dispersion et de transfert dans l'environnement ;
- les erreurs liées aux mesures en raison notamment des moments et des emplacements des prélèvements dont la représentativité et la pertinence sont problématiques.

### **III. Objectif de l'étude**

---

L'objectif principal du travail est d'analyser l'influence des paramètres, budget espace temps et concentration du polluant, entrant dans le calcul de l'estimation de l'exposition des personnes pendant leur temps de présence dans leur logement. Il s'agit ensuite d'en tirer des propositions d'une part pour la réalisation des études épidémiologiques, notamment pour limiter les éventuelles erreurs de classification des personnes en fonction de leur exposition, et d'autre part pour la conduite des études d'EQRS pour apprécier avec plus de précision la quantification du niveau de risque encouru.

Plus précisément, il s'agit de comparer les différentes modalités d'estimation des concentrations d'exposition domestique quotidienne des populations aux polluants présents à l'intérieur des locaux.

La démarche mise en œuvre s'est appuyée sur les données de mesurage et de budget espace-temps recueillies au cours de la campagne pilote réalisée en 2002 dans le cadre de l'OQAI. Le benzène, le monoxyde de carbone et le formaldéhyde ont été retenus pour développer la méthode. Ce choix permet de combiner plusieurs réflexions : pour le benzène et le formaldéhyde, il convient de s'intéresser aux expositions sur des périodes de plusieurs années et pour le CO, il convient de s'intéresser aux expositions de courte, moyenne et longue durées.

## IV. Méthodes

---

### 1. Préambule

Les données utilisées pour effectuer ce travail méthodologique sont issues de l'étude pilote de l'OQAI qui s'est déroulée de mars à juillet 2001, dans 90 logements, situés dans trois zones géographiques. Ces régions et ces logements ne sont pas représentatifs du territoire français mais offrent une certaine diversité de climat, population et type de logements.

Les 90 ménages qui ont participé à l'étude représentent 272 personnes âgées de 0 à 85 ans, dont 15,4 % de moins de 10 ans, 9,6 % entre 10 et 15 ans et 75 % de plus de 15 ans. Dans 40 % des ménages, les individus ont déclaré fumer à l'intérieur du logement. Parmi les participants, 48 % étaient actifs. Les logements de ces ménages sont des appartements situés dans des immeubles collectifs dans 69 % des cas.

Vingt et une personnes n'ayant pas remis soit leur carnet journalier, soit leur semainier, l'étude ne porte que sur 251 sujets.

Les estimations des concentrations d'exposition ont été réalisées séparément pour chacune des régions et au sein de chacune d'entre elles, les actifs, les inactifs et les moins de 15 ans dont la répartition est décrite dans le tableau 2. La catégorie des actifs regroupe les personnes majeures qui ont un emploi ainsi que les étudiants. La catégorie des inactifs rassemble les personnes sans emploi et les retraités.

**Tableau 2. Répartition des différentes catégories de population au sein de chaque région**

	Actif	Inactif	< 15 ans	Total
Région 1	43	18	17	78
Région 2	47	29	25	101
Région 3	32	29	11	72

## **2. Budget espace-temps (BET)**

### **2.1. Protocoles de recueil**

Les occupants ont rempli des questionnaires de deux sortes : un carnet journalier et un semainier.

#### **2.1.1. Carnet journalier**

Il en existe deux modèles pour deux tranches d'âges : 10-14 ans et plus de 15 ans. Son remplissage s'est effectué sur deux jours, un jour de semaine et un jour de week-end, de 21h à minuit le jour suivant. Le pas de temps est de 10 minutes. Les informations recueillies portent sur les lieux fréquentés, les activités réalisées, les produits utilisés par les participants et les personnes présentes dans le lieu.

Deux cents carnets journaliers ont été récupérés (soit 90 %), les 21 manquants n'ayant pas été rendus par les participants. Le remplissage est complet pour 60 % d'entre eux pour l'ensemble des régions, mais dans la région 3 le taux de remplissage est inférieur puisque seuls 29 % des jours de semaine et 39 % des jours de week-end sont complets. Quelle que soit la région, le taux de remplissage diminue au cours de la journée.

#### **2.1.2. Semainier**

Il a été rempli par tous les occupants des logements quel que soit leur âge. Son remplissage s'est effectué pendant 7 jours, de minuit à minuit le jour suivant, avec un pas de temps de 15 minutes. Les informations recueillies portent uniquement sur les lieux fréquentés : chambre, séjour, cuisine, autres pièces instrumentées, autres pièces, extérieur du logement.

Il a été récupéré 254 semainiers (soit 93,4 %), les 18 manquants n'ayant pas été rendus par les participants. Le remplissage des semainiers est meilleur que celui des carnets journaliers mais n'est pas complet pour autant : seuls 46,3 % des semainiers sont complets, 73 % sont remplis à plus de 90 % et 79 % le sont à plus de 80 %. Les taux de remplissage les moins bons correspondent aux premiers et derniers jours de l'enquête. Le remplissage est très variable selon les régions puisque moins de 5 % des semainiers sont complets dans la région 3, alors que plus de deux tiers d'entre eux sont complets dans les deux autres régions. Le remplissage varie aussi en fonction de l'âge : il est moins bon pour les tranches d'âge inférieure à 10 ans et supérieure à 65 ans.

## **2.2. Description du BET**

Pour chacun des deux types de recueils, carnet journalier et semainier, le BET a été décrit en établissant des histogrammes traçant la distribution, sous forme de percentiles, des durées de fréquentation des pièces du logement.

Le détail est plus important pour le carnet journalier car l'occupant devait renseigner très exactement son emploi du temps ; ainsi toutes les pièces du logement sont mentionnées, y compris des dépendances. En revanche, le semainier proposait une restriction des possibilités en regroupant d'office les pièces les moins usuelles d'un logement. Seuls, la chambre, la cuisine et le séjour étaient identifiés.

Les autres micro-environnements ont été regroupés sous les vocables suivants :

- autres pièces et dépendances ;
- autres pièces instrumentées ;
- extérieur.

## **2.3. Comparaison des BET recueillis par le semainier et le carnet journalier**

La comparaison effectuée a porté sur les écarts éventuels des durées passées dans chacun des microenvironnements à l'intérieur des habitats déclarés par les deux systèmes de recueil.

## **3. Estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne**

Le calcul d'une concentration d'exposition domestique quotidienne (CEDQ) combine la concentration atmosphérique d'un polluant avec la durée de fréquentation de la pièce d'un logement par une personne ou une population dans lequel la concentration du polluant a été mesurée. Cette CEQD est ensuite éventuellement pondérée par la période de temps d'exposition considérée (classiquement la journée).

Dans ce travail, la concentration du CO a été enregistrée par pas de temps de 5 minutes. Pour être en cohérence avec les BET recueillis par le semainier, il a été effectué, pour chacun des pas de 15 minutes des journées d'enquêtes, la moyenne des 3 enregistrements de la concentration atmosphérique de CO constitutifs du pas de temps. Il en résulte 96 quarts d'heure pour une journée donnée. Le même raisonnement a été tenu pour le BET recueilli par le carnet journalier établi sur un pas de temps de 10 minutes, en ne considérant que 2 enregistrements de la concentration atmosphérique du CO. Il en résulte 144 périodes de 10 minutes pour une journée complète donnée.

Une fois ces concentrations atmosphériques calculées sur chacun des pas de temps, en fonction de l'exploitation souhaitée des résultats obtenus, diverses estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne peuvent être envisagées.

On distingue :

- celles qui visent à estimer la concentration d'exposition des personnes pendant leur seul temps de présence dans leur logement. Elles seront dénommées dans ce rapport « concentration d'exposition domestique (CED). L'intérêt est manifeste en épidémiologie pour assurer une classification la plus proche possible de la réalité des personnes en fonction de leur niveau d'exposition ;
- celles qui visent à estimer la concentration d'exposition des personnes rapportée sur une journée complète. L'intérêt est manifeste en évaluation quantitative du risque sanitaire car les valeurs toxicologiques de référence sont établies pour des expositions continues au cours d'une période de la vie, voire sur la vie entière, sur une base journalière. Il est donc nécessaire de disposer d'une estimation de la concentration d'exposition cohérente avec ces VTR pour être à même de quantifier le risque encouru par les populations.

La présentation des différentes modalités de calcul des diverses concentrations d'exposition domestique quotidienne est effectuée séparément pour le CO, d'un côté, et le benzène et le formaldéhyde de l'autre.

Quelles que soient les modalités de calcul, pour un individu donné, sa concentration d'exposition intérieure journalière n'a pu être calculée que lorsque au moins 75 % des couples « concentration x pièce fréquentée » étaient disponibles.

### **3.1. Protocoles de mesure des polluants**

L'appareil de mesure du CO est un enregistreur en continu délivrant un résultat de concentration moyennée sur un pas de temps de 5 minutes. La résolution de l'appareil est de 1 ppm, soit 1.16 mg/m<sup>3</sup>. L'appareil a été laissé pendant une durée de 7 jours dans les logements enquêtés. Ils ont été installés dans le séjour et dans les pièces ayant une source de combustion telle que la cuisine. Le pas de temps court du CO permet de tenir compte des variations rapides de concentration.

Pour le benzène et le formaldéhyde, des tubes passifs ont été installés dans la chambre de la personne enquêtée et dans la cuisine pendant une durée de 7 jours. Le résultat obtenu est donc une concentration moyennée sur les 7 jours d'enquête. La limite de détection de la technique employée est respectivement de 0,7 µg/m<sup>3</sup> pour le benzène et de 0,7 µg/m<sup>3</sup> pour le formaldéhyde.



Ces différences dans les protocoles de prélèvement des polluants atmosphériques influencent les modalités de calcul des estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne.

### **3.2. Estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne (CEDQ) pour le CO**

#### **3.2.1. Les concentrations d'exposition domestique (CED)**

Les CED représentent l'exposition des personnes pendant leur seule durée de présence dans le logement. Les CED sont calculées en tenant compte de manière détaillée des couples "concentration x pièce fréquentée" des personnes.

##### 3.2.1.1. A partir du BET détaillé des personnes

Elles sont calculées pour chacun des deux BET recueillis. Seuls sont pris en considération les pas de temps pendant lesquels l'occupant est présent dans les différentes pièces du logement.

L'équation s'écrit :

$$CED-1 = \sum_{i=1}^n \frac{C_{Pi} \times PT_i}{T_i} \quad \text{[équation 2]}$$

avec

CED-1 : concentration d'exposition domestique (mg/m<sup>3</sup>)

C<sub>Pi</sub> : concentration atmosphérique du CO moyennée sur le pas de temps du BET dans chacune des pièces du logement pendant le temps de présence de l'occupant (mg/m<sup>3</sup>) ;

PT<sub>i</sub> : pas de temps de 15 ou 10 min du BET pendant lequel l'occupant est présent dans la pièce considérée (heure) ;

T<sub>i</sub> : durée totale de présence de l'occupant dans le logement au cours de la journée (heure).

##### 3.2.1.2. A partir du BET agrégé des personnes

La CED est aussi calculée pour chacun des deux BET recueillis. De la même manière, seuls sont pris en considération les pas de temps pendant lesquels l'occupant est présent dans les différentes pièces du logement. La différence avec la précédente estimation est que la concentration du polluant dans le logement correspond à la moyenne de l'ensemble des pièces instrumentées en ne considérant que les pas de temps, sous forme agrégée, pendant lesquels l'occupant est présent dans le logement.

L'équation s'écrit :

$$\text{CED-2} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{CLi} \times \text{Tint}}{\text{Tint}} \quad [\text{équation 3}]$$

avec

CED-2 : concentration d'exposition domestique ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

CLi : concentration atmosphérique moyenne du CO dans l'habitat, toutes pièces confondues, en ne considérant que les pas de temps pendant lesquels l'occupant est présent dans le logement ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

Tint : durée totale de présence de l'occupant dans le logement au cours de la journée (heure).

### **3.2.2. Les concentrations d'exposition domestique journalière (CEDJ)**

Les CEDJ représentent l'exposition des personnes pendant leur seule durée de présence dans le logement, mais rapportée à une journée complète de 24 heures.

#### 3.2.2.1. A partir des CED

Les estimations ont été réalisées en ramenant les concentrations d'exposition domestique sur un pas de temps de 24 heures, conduisant ainsi à l'obtention d'une concentration d'exposition domestique journalière.

L'équation mathématique s'écrit :

$$\text{CEDJ-n} = \frac{\text{CED-n} \times \text{Ti}}{\text{Tj}} \quad [\text{équation 4}]$$

avec

CEDJ-n : concentration d'exposition domestique journalière ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

CED-n : concentration d'exposition domestique ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

Ti : durée totale de présence dans le logement (heure) ;

Tj : durée totale d'une journée (heure).

#### 3.2.2.2. A partir des données agrégées de concentration atmosphérique sur l'ensemble de la journée

L'équation mathématique s'écrit :

$$\text{CEDJ-4} = \frac{[\text{moyenne Cpi}] \times \text{Tj}}{\text{Tj}} \quad [\text{équation 5}]$$

avec

[moyenne Cpi] : concentration atmosphérique moyenne du polluant dans le logement, sur l'ensemble de la journée ou de la semaine, que l'occupant ait été présent ou non ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

Tj : durée totale d'une journée (heure).

### 3.3. Estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne (CEDQ) pour le benzène et le formaldéhyde

#### 3.3.1. Les concentrations d'exposition domestique (CED)

Les CED représentent l'exposition des personnes pendant leur seule durée de présence dans le logement. Elles sont calculées en tenant compte de manière détaillée des couples "concentration x pièce fréquentée" des personnes. Cependant, contrairement au CO, les données de concentration atmosphérique de ces deux polluants sont agrégées sur l'ensemble de la semaine pour chacune des pièces instrumentées. Aussi, les CED sont calculées en combinant, cette concentration atmosphérique hebdomadaire avec le temps passé sur une semaine dans la pièce du logement considérée.

L'équation s'écrit :

$$CED-5 = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times TPS_i}{TS_i} \quad \text{[équation 6]}$$

avec

CED-5 : concentration d'exposition domestique ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

$C_i$  : concentration atmosphérique du benzène ou du formaldéhyde (moyennée sur la semaine dans chacune des pièces du logement) ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) ;

$TPS_i$  : temps passé dans chacune des pièces du logement au cours de la semaine (heure) ;

$TS_i$  : durée totale de présence de l'occupant dans le logement au cours de la semaine (heure).

#### 3.3.2. Les concentrations d'exposition domestique journalières (CEDJ)

Les CEDJ représentent l'exposition domestique des personnes rapportée à une journée complète de 24 heures. Elles sont calculées en moyennant les données de concentrations enregistrées dans les différentes pièces instrumentées sur l'ensemble de la semaine et en considérant que les personnes passent toute la journée dans leur logement.

Pour le benzène et le formaldéhyde, les équations 4 et 5 décrites pour le CO, s'appliquent.

### 3.4. Récapitulatif des possibilités d'estimation des concentrations d'exposition intérieure quotidienne

Le tableau 3 récapitule toutes les estimations des concentrations d'exposition intérieure quotidienne décrites dans les paragraphes précédents, en précisant les polluants pour lesquelles elles sont possibles.

**Tableau 3. Récapitulatif des concentrations d'exposition intérieure quotidienne calculées**

				Budget espace-temps	
<b>C o n c e n t r a t i o</b>		Pas de temps précis (15 ou 10 minutes)		Données agrégées de BET	Journée complète
	Concentration ambiante pendant le pas de temps précis (15 ou 10 minutes)		CED-1 ; CEDJ-1		
	Données agrégées de concentrations ambiantes des polluants			CED-2 ; CEDJ-2	
	Moyenne des concentrations ambiantes sur la journée complète		<b>CED-5 ; CEDJ-5</b>		<b>CEDJ-4</b>

\* Les sigles en gras signifient que les estimations sont possibles pour les trois polluants ; ceux qui ne sont pas en gras signifient que les estimations ne sont possibles que pour le CO.

\* CED : Concentration d'exposition domestique intérieure

\* CEDJ : concentration d'exposition domestique journalière

## 4. Approximation des valeurs manquantes

Les procédures d'approximation des valeurs manquantes ont été différentes selon qu'il s'agisse de compléter une série de données recueillies ou de proposer d'approcher des données inexistantes en raison d'une absence de recueil.

### 4.1. Substitution des concentrations atmosphériques inférieures à la LQA

Dans le cas du CO, la limite de quantification analytique (LQA) est à 1 ppm, soit 1.16 mg/m<sup>3</sup>. Par convention, choix a été fait de substituer une concentration égale à la LQA divisée par 2 à toute concentration inférieure à la LQA, soit 0.58 mg/m<sup>3</sup>.

La question ne s'est pas posée pour le benzène et le formaldéhyde, la durée du recueil de prélèvement d'une semaine permettant d'être systématiquement au dessus de la LQA.

### 4.2. Valeurs manquantes de concentration

Il n'y a eu aucun remplacement des valeurs de concentration manquantes dans une série incomplète de données recueillies, quelles que soient les pièces instrumentées. En revanche, des hypothèses ont été formulées pour pallier l'absence de données dans des pièces de l'habitat largement fréquentées par les occupants. Ces hypothèses s'appuient sur les connaissances bibliographiques des écarts de concentrations mesurés dans les différentes pièces d'un logement. Ainsi :

- Pour le CO, on attribue à la chambre du logement :
  - la concentration du séjour pour les logements sans source de combustion dans le séjour ;

- la moyenne des concentrations du séjour et des pièces avec source de combustion pour les logements avec source identifiée de combustion dans le séjour (cheminée, tabagisme).

*Les données disponibles dans la littérature indiquent d'une part que les concentrations dans les différentes pièces d'un habitat sont plutôt homogènes hormis s'il existe une source de combustion majeure en un endroit qui influence une partie de l'habitat et pas l'autre. Par ailleurs, sur un pas de temps court, une pièce dans laquelle fonctionne une source de combustion peut influencer directement la concentration de CO dans la ou les pièces adjacentes, un retour à un équilibre s'effectuant dans un laps de temps allant jusqu'à 1h30 après que la source de combustion ait été fermée. Cela n'empêche pas d'enregistrer des concentrations qui varient d'un facteur allant jusqu'à 10 (de 1 à 10 mg/m<sup>3</sup>) entre les divers habitats instrumentés. De nombreux paramètres entrent en jeu pour expliquer ces variations de concentration, dont les principaux sont le type de ventilation, la présence d'un garage adjacent et le tabagisme [Persily 1996].*

- Pour le formaldéhyde, on attribue au séjour
  - la concentration atmosphérique mesurée dans la chambre, car on considère que le séjour et la chambre ont les mêmes sources de formaldéhyde.
- Pour le benzène, on attribue au séjour :
  - la concentration de la chambre pour les logements sans source de combustion dans le séjour ;
  - la concentration de la cuisine pour les logements avec source de combustion dans le séjour.

*Les études dans lesquelles différentes pièces de logements ont été instrumentées sont peu nombreuses. Pour le benzène, deux études [Schneider 1999, Wallace 1989] concluent à une absence de différence de concentration entre les pièces (salon, cuisine et chambre pour une étude et cuisine et pièce principale pour l'autre). Pour le formaldéhyde, quatre études concluent à une absence de différence et deux concluent à une différence [Dingle 1993, Sexton 1984, Clarisse 2003].*

#### **4.2.1. Valeurs manquantes du BET**

Dans un premier temps, les carnets journaliers et les jours des semainiers dont la proportion de remplissage était inférieure à 75% de la journée ont été écartés de l'analyse. Pour les autres, il a fallu faire un choix méthodologique pour approcher les valeurs manquantes. En s'appuyant sur les expériences publiées dans la littérature, la méthode utilisée est celle de l'imputation simple [Garcia-Accosta, 1999].

La séquence suivante a été construite :

1. le remplacement est effectué indépendamment pour chaque pas de temps manquant ;

2. pour une région donnée et une catégorie de personnes (actif, inactif ou moins de 15 ans), un profil des pièces occupées est dressé pour chacun des pas de temps (10 ou 15 minutes) de la journée ;
3. pour chacun des profils, une probabilité de tirage au sort est affectée à chacune des pièces en fonction du nombre de personnes qui l'occupent dans ce pas de temps. Par exemple, les pièces qui ne sont occupées par aucune des personnes pour un pas de temps considéré ont une probabilité nulle d'être tirée au sort pour remplacer la valeur manquante ;
4. pour une personne de la catégorie et de la région concernées, la valeur manquante pour un pas de temps considéré est remplacée par tirage aléatoire dans le profil du même pas de temps établi à l'étape précédente, pondérée par les probabilités affectées à chacune des pièces.

## **5. Analyse des estimations des concentrations d'exposition domestique de CO**

### **5.1. Evolution des concentrations d'exposition domestique au cours de la journée**

Les concentrations d'exposition domestique ont été calculées pour chacun des pas de temps de 10 ou 15 minutes selon le recueil du BET considéré. On notera que lorsque l'on s'intéresse à 1 seul pas de temps (10 minutes ou 15 minutes), la concentration atmosphérique moyenne pendant ce pas de temps, et la concentration d'exposition domestique de l'occupant se confondent.

L'évolution de ces concentrations d'exposition domestique au cours de la journée, soit à l'échelle du logement, soit pour une pièce en particulier a été construite en intégrant dans la moyenne de chacun des pas de temps, tous les individus pour lesquels, le couple "concentration x pièce fréquentée" était valide. Pour chacun des pas de temps, le nombre de couples valides n'était donc pas forcément identique.

### **5.2. Comparaison des estimations de concentrations d'exposition domestique quotidienne**

Les comparaisons effectuées entre les différentes estimations de CEDQ avaient pour objet de déterminer l'influence :

- (i) du pas de temps des BET ;
- (ii) de l'agrégation du BET ;
- (iii) de la proportion de temps passé dans l'habitat au cours d'une journée ;

- (iv) de la prise en compte de la concentration des polluants à l'échelle de la pièce ou du logement ;
- (v) de la combinaison de ces diverses possibilités.

### **5.3. Estimation de la contribution de chacune des pièces du logement à la concentration d'exposition domestique quotidienne**

Cette démarche n'a été menée que pour le CO. Une seule méthode d'appréciation de la contribution des différentes pièces du logement a été mise en œuvre. Seuls les individus pour lesquels on est en mesure de disposer de l'ensemble de l'information "concentration pièce x BET" pour l'ensemble des pas de temps de la journée ont été retenus. Les valeurs manquantes du budget espace-temps et les valeurs inexistantes de concentration dans la chambre occupée ont été approchées selon les procédures décrites plus haut.

L'estimation a été faite en calculant la dose d'exposition cumulée sur la journée pour la pièce considérée lorsque la personne est présente dans cette pièce, et la dose d'exposition cumulée totale de la journée.

## **V. Résultats**

---

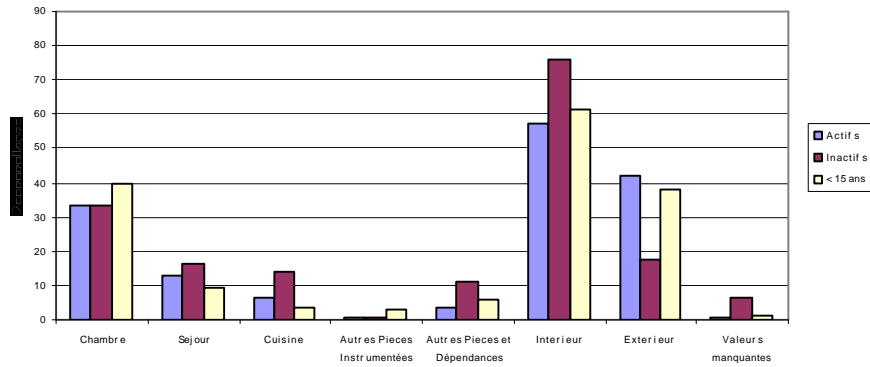
### **1. Budgets espace-temps**

#### **1.1. Description**

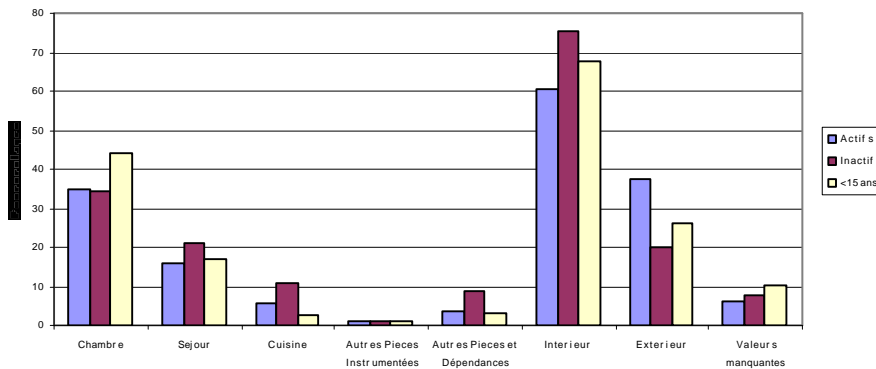
Quelles que soient les modalités de recueil (carnet journalier ou semainier) et la catégorie de personnes, les pièces du logement dans lesquelles les occupants passent le plus de temps sont par ordre d'importance décroissante : la chambre, le séjour, la cuisine et la salle de bain. Les autres occupations sont marginales en termes de temps. Le graphique 1 est proposé à titre d'exemple. Les graphiques plus détaillés incluant toutes les pièces susceptibles d'être fréquentées sont placés en annexe 1.

**Graphique 1. Distribution des durées hebdomadaires moyennes (exprimés en pourcentages) passées par les occupants de chacune des trois régions dans les différentes pièces du logement**

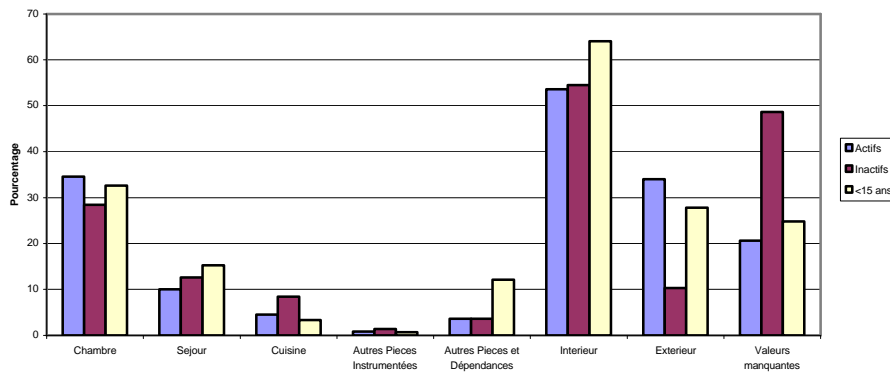
**région 1**



**région 2**



**région 3**





Cette analyse globale ne peut exclure que, pour une personne en particulier, ses activités la conduisent à être principalement dans une de ces pièces qualifiées de marginales.

Une description détaillée par catégorie de personnes indique que les moins de 15 ans occupent plus longtemps leur chambre que les adultes et que les inactifs passent plus de temps dans la cuisine. Quelle que soit la région, les inactifs passent légèrement plus de temps dans leur logement que les moins de 15 ans ; la différence est plus sensible avec les actifs. Ces écarts se réduisent le week-end (tableau 4).

**Tableau 4. Moyenne des durées passées dans chacune des pièces du logement selon la région, le type de jour de semaine et la catégorie de personnes**

			Chambre	Séjour	Cuisine	Autres pièces et dépendances	Extérieur	Intérieur	Pas de temps non renseignés
<b>Région 1</b>	<b>Actif</b>	Jours ouvrés	8	2.8	1.4	0.8	10.6	13.1	0.3
		Week end	8.4	3.5	1.6	1.1	9.4	14.6	0
	<b>Inactif</b>	Jours ouvrés	8.7	3.5	3.1	2.9	4.5	18.1	1.4
		Week end	8	4.4	3.1	2.6	4.5	18.2	1.3
	<b>&lt;15 ans</b>	Jours ouvrés	12.9	2.8	1	1.1	6.2	17.8	0
		Week end	10	3.4	1.3	1.8	7.5	16.5	0
<b>Région 2</b>	<b>Actif</b>	Jours ouvrés	8.1	3.2	1.3	0.7	9.1	13.5	1.4
		Week end	8.5	4.2	1.3	1.1	7.6	15.2	1.1
	<b>Inactif</b>	Jours ouvrés	8.3	4.8	2.5	2.1	4.9	17.9	1.2
		Week end	7.8	4.9	2.1	2.9	4.5	17.9	1.6
	<b>&lt;15 ans</b>	Jours ouvrés	8	1.5	0.4	0.3	5.5	12	6.5
		Week end	6.7	3.5	0.8	0.3	4.6	11.4	8
<b>Région 3</b>	<b>Actif</b>	Jours ouvrés	8.2	2.5	1.5	0.8	7.9	13.4	2.7
		Week end	8.3	3.2	0.9	1	8.4	13.4	2.2
	<b>Inactif</b>	Jours ouvrés	7.1	3.4	2.1	0.7	2.5	13.5	8
		Week end	6.3	3.3	2.2	1	2.2	13.7	8.1
	<b>&lt;15 ans</b>	Jours ouvrés	9.5	3.3	0.8	3.1	7.4	16.6	0
		Week end	10.4	3.4	1.8	2.1	6.3	17.6	0.2

## 1.2. Comparaison des BET

Toutes personnes confondues, la comparaison des deux BET (journalier et semainier), remplis pour un même jour, ne montre pas de différences sensibles dans la durée d'occupation des pièces du logement. Les quelques écarts observés sont principalement dus aux pas de temps non renseignés, bien plus nombreuses dans le cas du carnet journalier par rapport au semainier. Ces valeurs manquantes semblent principalement affecter le temps passé à l'extérieur du logement (annexe 2).

En revanche, sur un plan individuel, les écarts de déclaration entre le carnet journalier et le semainier sont plus manifestes, quelle que soit la pièce considérée (annexe 3). Une explication est à rechercher dans les modalités de remplissage de ces deux questionnaires.

## **2. Estimation des concentrations d'exposition domestique quotidienne**

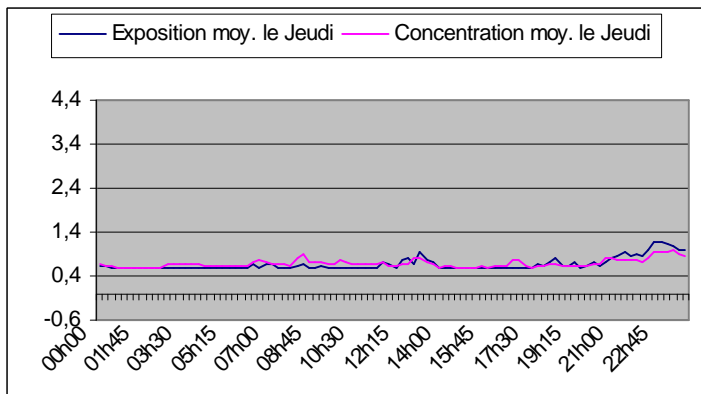
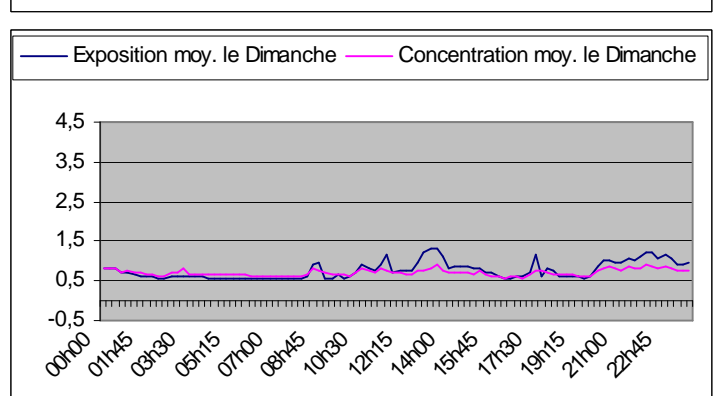
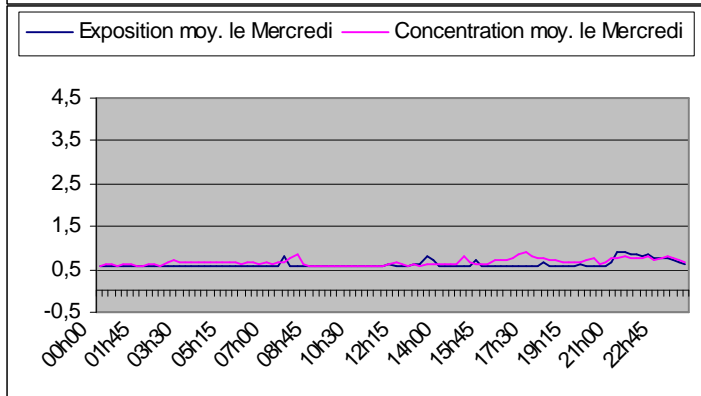
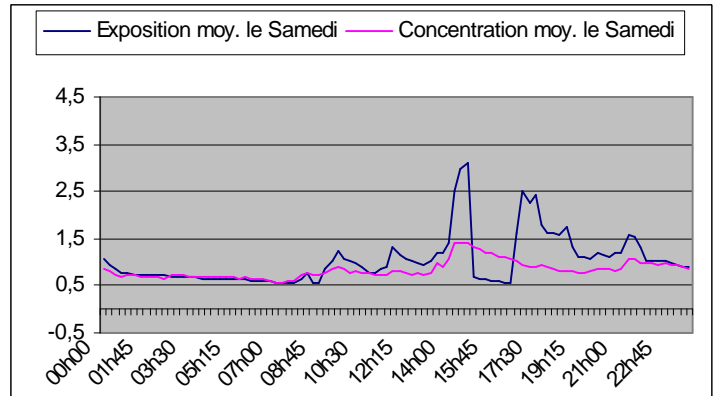
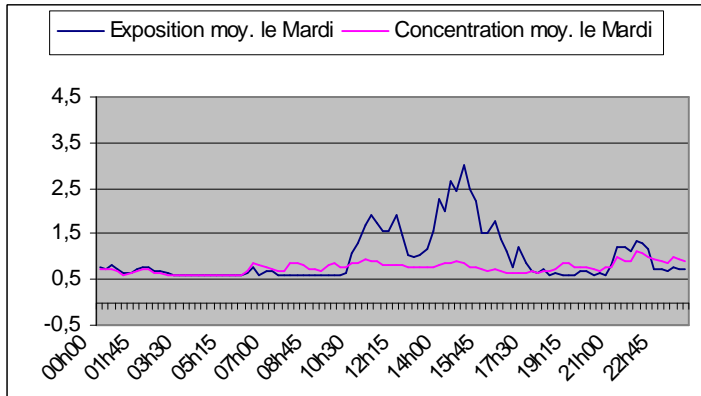
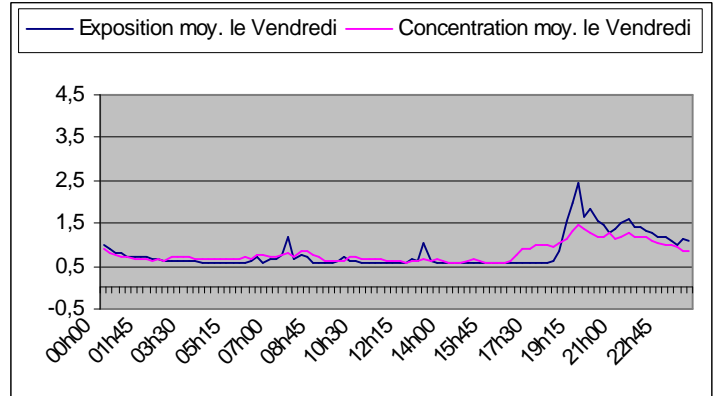
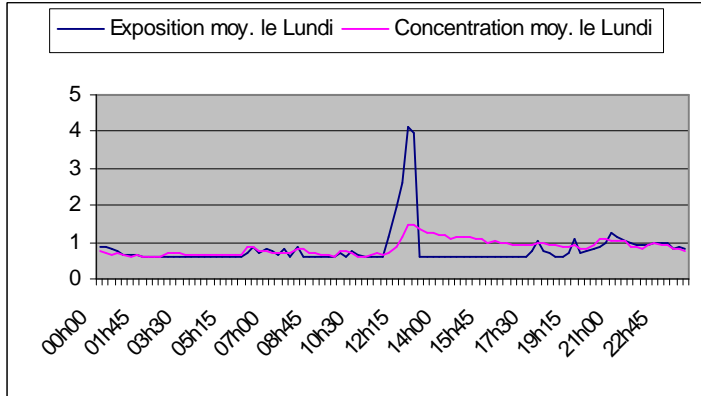
### **2.1. Monoxyde de carbone**

#### ***2.1.1. Evolution des concentrations d'exposition domestique au cours de la journée***

A titre d'exemple, des profils journaliers des concentrations d'exposition domestique ont été dressés pour le groupe des actifs habitant dans la région 1 en s'appuyant sur le recueil semainier. Ces profils sont obtenus en réalisant pour chacun des quarts d'heure de la journée, la moyenne des concentrations atmosphériques auxquelles sont exposés tous les occupants de tous les logements enquêtés, quelle que soit la pièce occupée. Pour chaque quart d'heure, le nombre de personnes entrant dans le calcul de la moyenne est peut être différent car il est lié au nombre de personnes présent dans son logement pendant ce quart d'heure. L'évolution quotidienne de la concentration atmosphérique de CO sur le même pas de temps est placée sur le même graphique à titre indicatif. Elle est représentée par la moyenne des concentrations mesurées dans toutes les pièces instrumentées de chacun des logements, que les occupants soient présents ou non.

Le graphique 2 permet de visualiser ces profils. Selon le jour, les profils sont plus ou moins chaotiques et les niveaux d'exposition très variables. Aussi, à défaut de dégager un profil standard quel que soit le jour de la semaine, on note la possibilité d'identifier les plages horaires qui correspondent aux trois repas quotidiens même si celle du petit déjeuner se démarque le moins. Sans préjugé de la contribution de ces périodes à la concentration d'exposition moyennée sur la journée, ces événements témoignent plus d'une activité dans le logement qu'autre chose.

**Graphique 2. Evolutions journalières, par pas de temps de 15 minutes, des concentrations d'exposition domestique des personnes de la catégorie "actif" et des concentrations atmosphériques de CO dans les logements de la région 1 (les concentrations sont exprimées en mg/m<sup>3</sup>)**



### **2.1.2. Influence du type de recueil du BET sur les estimations des concentrations d'exposition domestique (CED-1)**

Cette comparaison a pour objet d'apprécier les différences des estimations des concentrations d'exposition domestique en fonction des deux modalités de recueil de BET utilisées dans cette campagne pilote, le carnet journalier et le semainier. Seuls les carnets journaliers et les semainiers complets des personnes entrant dans la catégorie « actif » ont été retenus pour analyser les différences.

Globalement, les différences sont très ténues (tableau 5). Les moyennes des différences ont été calculées avec les concentrations d'exposition domestique dépassant la valeur numérique de 0.6 mg/m<sup>3</sup>. Cette valeur numérique traduit obligatoirement une quantification d'une concentration de CO dans l'air supérieure à la limite de quantification analytique.

**Tableau 5. Moyenne des différences, en valeur absolue (exprimées en mg/m<sup>3</sup>), des estimations des concentrations d'exposition domestique (CED-1) calculées à partir des carnets journaliers et des semainiers pour la catégorie actif des 3 régions**

	Moyenne des différences			
	N	Toutes CED confondues	< 1 mg/m <sup>3</sup>	> 1 mg/m <sup>3</sup>
<b>Région 1</b>	28	0.28	0.38	0.13
<b>Région 2</b>	42	0.06	0.04	0.16
<b>Région 3</b>	43	0.08	0.03	0.16

*n : nombre de couples carnet journalier / semainier entrant dans le calcul de la moyenne des différences*

Les résultats détaillés n'indiquent pas de particularité en fonction de la région (les graphiques sont placés en annexe 5). On remarquera que le niveau de l'exposition ne préjuge pas de l'ampleur de la différence.

### **2.1.3. Influence de l'agrégation du BET et des concentrations atmosphériques sur les estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne**

Cette comparaison a pour objet d'apprécier les différences d'estimation des concentrations d'exposition domestique quotidienne. Les calculs proposés ici s'appuient sur les résultats obtenus avec le semainier, c'est à dire le BET enregistré sur un pas de temps de 15 minutes. Ce choix a été fait car il permet de disposer d'un plus grand nombre de couples de données pour effectuer les comparaisons souhaitées. Toutes les catégories de personnes ont été regroupées.

Globalement, quelle que soit la région, les différences entre les estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne sont d'autant plus grandes que l'on considère les deux combinaisons les plus éloignées en terme de précision, c'est à dire selon que l'on s'attache à suivre très exactement le budget espace-temps des personnes (CED-1) associé à la concentration atmosphérique de la pièce fréquentée pendant le temps de présence dans celle-ci, ou que l'on soit plus global dans la prise en compte non seulement de la concentration dans le logement mais également du BET (CEDJ-4) (tableau 6). On remarque également que le niveau de concentration ne préjuge pas de l'ampleur de la différence obtenue et que la comparaison des régions entre elles révèle des écarts décroissants respectivement pour les régions 1, 2 et 3.

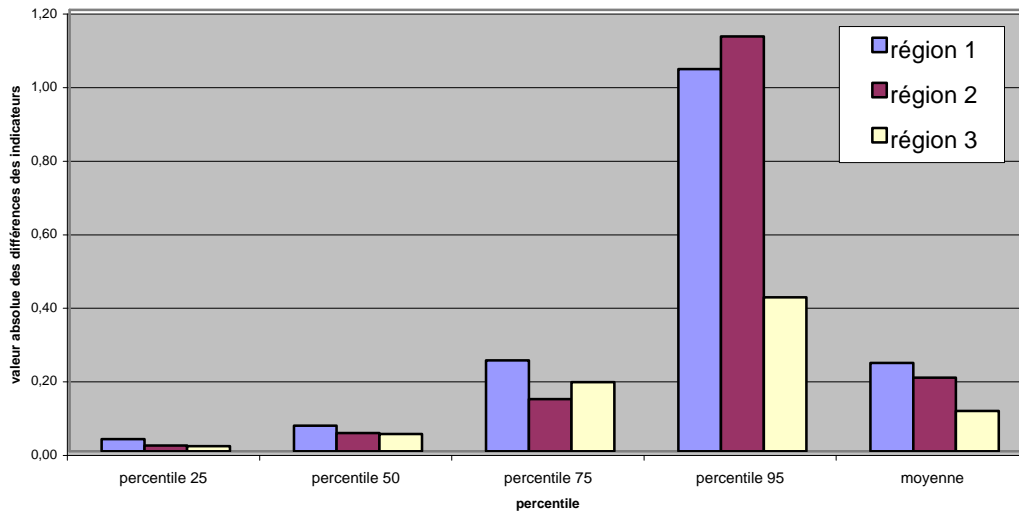
**Tableau 6. Moyenne des différences des estimations des concentrations d'exposition domestique toutes catégories de personnes confondues**

Moyenne des différences							
		CED-1 – CED-3			CED-1 – CEDJ-4		
	n	Toutes CED confondues	< 1 mg/m <sup>3</sup>	> 1 mg/m <sup>3</sup>	Toutes CED confondues	< 1 mg/m <sup>3</sup>	> 1 mg/m <sup>3</sup>
<b>Région 1</b>	96	0.24	0.31	0.15	0.39	0.31	0.56
<b>Région 2</b>	174	0.2	0.04	0.47	0.28	0.09	0.61
<b>Région 3</b>	137	0.11	0.06	0.19	0.02	0.08	0.39

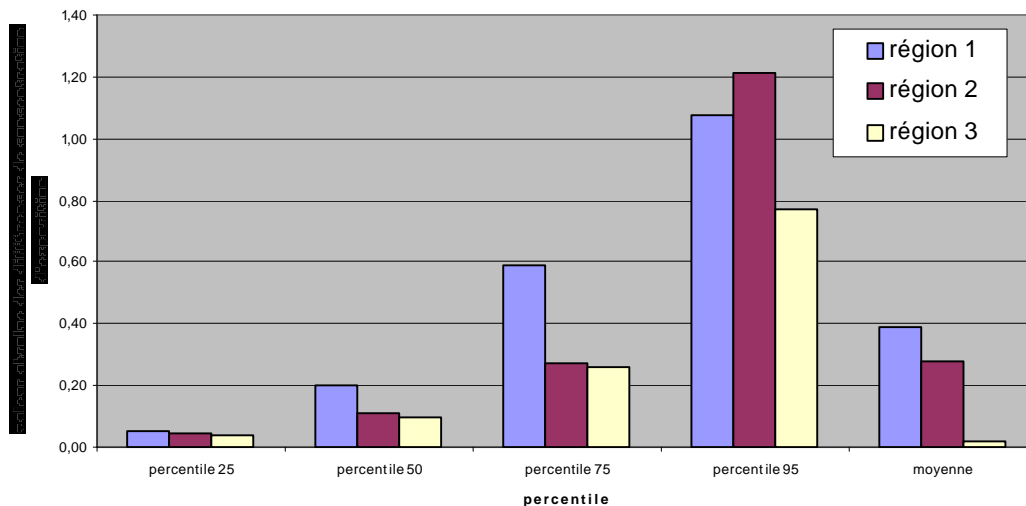
n : nombre de semainiers entrant dans le calcul des différences entre les CEDQ.

De manière plus détaillée, les histogrammes tracés sur les graphiques 3 et 4 permettent de visualiser les distributions des différences entre les diverses concentrations d'exposition quotidienne. Pour les 3 régions, la moyenne des moyennes des différences entre les concentrations d'exposition CED-1 et CED-3 se situent autour du percentile 75 de la distribution. L'écart d'un facteur 5 avec le percentile 95 indique que rares sont les différences importantes ; elles interviennent pour des concentrations d'exposition élevées. Pour les différences entre CED-1 et CEDJ-4, les distributions des différences sont propres à chaque région.

**Graphique 3. Distribution des différences, en valeur absolue, entre les concentrations d'exposition domestique CED-1 et CED-3 (exprimées en  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), toutes catégories de personnes confondues**



**Graphique 4. Distribution des différences, en valeur absolue, entre les concentrations d'exposition domestique quotidienne CED-1 et CEDJ-4 (exprimées en  $\text{mg}/\text{m}^3$ ), toutes catégories de personnes confondues**



D'autres graphiques placés en annexe 5 permettent une visualisation plus détaillée des différences à un niveau individuel et par catégorie de personnes dans chacune des régions. En l'état actuel des données disponibles, aucune explication ne peut être proposée pour les individus présentant des écarts importants entre les deux estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne.

#### **2.1.4. Influence de la prise en compte du seul BET intérieur par rapport à une journée entière**

Les CEDJ-1 et CEDJ-2, concentrations d'exposition domestique ramenées sur un pas de temps journalier, ont été estimées à partir des CED-1 et CED-2, concentrations d'exposition domestique calculées sur la seule période de présence dans l'habitat. Ce calcul est classiquement réalisé lors des démarches d'évaluation quantitative des risques sanitaires, car il est nécessaire de mettre en cohérence les modalités de calcul des expositions avec les modalités d'élaboration des valeurs toxicologiques de référence. Or ces dernières sont construites pour des expositions sur un pas de temps journalier tous les jours de la vie.

Le graphique 1 indique, pour chacune des régions, les pourcentages de temps passés dans l'habitat. Ils sont compris entre 53 et 60% pour les actifs et entre 54 et 76 % pour les inactifs. Pour les moins de 15 ans, ce pourcentage varie de 61 à 67 %. Ramener les concentrations d'exposition domestique à des concentrations d'exposition domestique journalière, revient à pondérer les premières par le rapport du temps passé dans l'habitat sur les 24 heures de la journée. Les concentrations d'exposition domestique journalière sont donc inférieures aux concentrations d'exposition d'un facteur 1,5 à 2. Une analyse à l'échelle individuelle indique des écarts pouvant aller jusqu'à un facteur 5, certaines personnes ne passant que 20 % de leur temps dans leur logement.

En conséquence, si cette correction était omise, l'excès de risque encouru par les occupants serait majoré de ces facteurs.

#### **2.1.5. Influence des modalités de remplacement des valeurs manquantes du BET recueilli avec le semainier**

Le nombre de données manquantes dans le BET est important. Ainsi seul 55,5 % des jours de la semaine, tout individu confondu de toutes les régions, ont été remplis en totalité ; 78 % des jours de semaine ont eu un taux de remplissage d'au moins 75 % des pas de temps. Cependant, afin d'avoir une appréciation la plus complète possible, les calculs des concentrations d'exposition domestique quotidienne ont été effectués pour l'ensemble des semainiers, quel que soit leur taux de remplissage.

A titre d'exemple, l'influence a été analysée à partir de la concentration d'exposition domestique CED-1. Les résultats sont présentés par région et par catégorie de personnes. Le tableau 7 rassemble les concentrations d'exposition quotidienne calculées sans qu'aucun remplacement des données manquantes de BET ne soit effectué. Quelles que soient la région et la catégorie de personnes, les différences arithmétiques sont très ténues entre les deux moyennes estimées.

**Tableau 7. Comparaison des concentration d'exposition domestique CED-1 en fonction du remplacement des valeurs manquantes de BET**

		Avant remplacement des valeurs manquantes			Après remplacement des valeurs manquantes	
		Nombre de jours de semaine théorique	Nombre de jours exploitables	Moyenne des CED-1	Nombre de jours exploitables	Moyenne des CED-1
Région 1	Actif	302	283	0.77	196	0.8
	Inactif	126	92	0.65	69	0.64
	< 15 ans	119	110	0.59	78	0.59
Région2	Actif	329	229	0.8	180	0.83
	Inactif	203	167	0.9	122	0.88
	< 15 ans	175	132	1.13	96	1.18
Région 3	Actif	224	180	1.04	135	1
	Inactif	203	120	0.67	52	0.66
	< 15 ans	77	60	0.93	49	0.88

**2.1.6. Influence des modalités de remplacement de la concentration de CO dans les pièces non instrumentées**

La chambre à coucher est une pièce de durée de fréquentation longue pour l'ensemble des occupants. Approcher les valeurs manquantes de concentration est donc une nécessité. A partir du BET semainier, l'analyse de sensibilité a consisté à comparer deux modalités d'approche des valeurs manquantes. La première consiste à prendre la concentration moyenne du logement ou des pièces dans lesquelles une source de combustion existe ; la deuxième consiste à retenir systématiquement la concentration atmosphérique de CO la plus élevée pour chacun des pas de temps de la journée, quelle que soit la pièce concernée du logement. Les résultats sont présentés dans le tableau 8.

Compte tenu de l'appareil de mesure utilisé et de sa résolution analytique, le tableau présente des résultats établis sur les seules valeurs de concentrations d'exposition, sur un pas de temps donné, supérieures à  $0.6 \text{ mg/m}^3$ , signifiant ainsi de n'avoir retenu que les valeurs numériques indiquant une concentration atmosphérique réellement mesurée car supérieure à la limite de détection de l'appareil. En revanche, ce tableau ne présente pas de résultats pour la catégorie "moins de 15 ans" en raison d'un trop faible nombre d'individus, empêchant ainsi d'appréhender une quelconque distribution. On notera enfin, que les différences sont d'autant plus grandes que les concentrations d'exposition domestique sont élevées.



**Tableau 8. Distribution, pour la région 1, des différences entre les estimations des concentration d'exposition domestique CED-1 et CED-3 (les concentrations sont exprimées en mg/m<sup>3</sup>).**

		Toutes CED confondues		CED > 0.6 mg/m <sup>3</sup>	
		CED-1 max – CED-1	CED-3 max – CED-3	CED-1 max – CED-1	CED-3 max – CED-3
<b>Actif</b>	<b>P25</b>	0	0	0	0.02
	<b>P50</b>	0	0	0.16	0.19
	<b>P75</b>	0	0.01	1.74	0.87
	<b>P95</b>	2.73	1.26	3.41	1.41
<b>Inactif<sup>3</sup></b>	<b>P25</b>	0	0	0	0.02
	<b>P50</b>	0	0.01	0	0.04
	<b>P75</b>	0	0.06	0.02	0.19
	<b>P95</b>	0.16	0.42	0.49	0.45

### **2.1.7. Contribution de chacune des pièces du logement à l'exposition des personnes**

Pour analyser la contribution des pièces à la concentration d'exposition domestique des populations, il est nécessaire d'aborder deux types de calculs qui se complètent. Le premier consiste à établir les concentrations atmosphériques dans les pièces au cours de la journée en tenant compte des seuls pas de temps où la personne est présente dans ladite pièce. Le deuxième consiste à déterminer la part de chacune des pièces dans l'exposition totale cumulée de la journée des personnes.

- Les concentrations atmosphériques

Le tableau 9 rapporte les concentrations atmosphériques dans chacune des pièces du logement. Il distingue la population prise dans son ensemble mais aussi les hommes et les femmes séparément en raison d'habitudes domestiques différentes conduisant à des durées de fréquentation des pièces différentes.

Quel que soit le sexe, la cuisine est la pièce qui conduit au calcul de la concentration atmosphérique la plus élevée. Les femmes sont cependant plus exposées que les hommes.

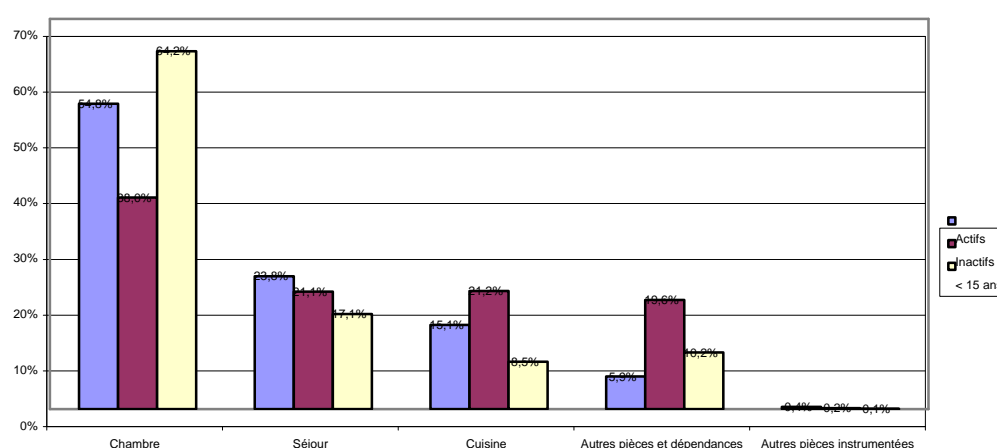
**Tableau 9. Moyenne des concentrations d'exposition domestique quotidienne de la population totale et par sexe par pièce et moyenne de la concentration du polluant par pièce**

	Population totale	homme	femme	Concentration dans la pièce
<b>Chambre</b>	0.7	0.71	0.67	0.73
<b>Séjour</b>	0.89	0.88	0.91	0.7
<b>Cuisine</b>	1.03	0.96	1.16	0.71
<b>Autres pièces instrumentées</b>	0.69	0.84	0.58	1.3
<b>Autres pièces et dépendances</b>	0.9	0.81	1.00	0.77

- Part de chacune des pièces du logement dans l'exposition totale cumulée sur la journée

Les graphiques 5, 6, 7 indiquent la part de la concentration d'exposition domestique totale sur la journée attribuable à chacune des pièces du logement en fonction du budget espace-temps des personnes. Sans ambiguïté, c'est la chambre qui contribue le plus à l'exposition domestique quotidienne des personnes. La cuisine dans laquelle les concentrations d'exposition domestique sont les plus élevées ne contribue en fait que pour 10 à 20 % de la concentration d'exposition domestique totale journalière.

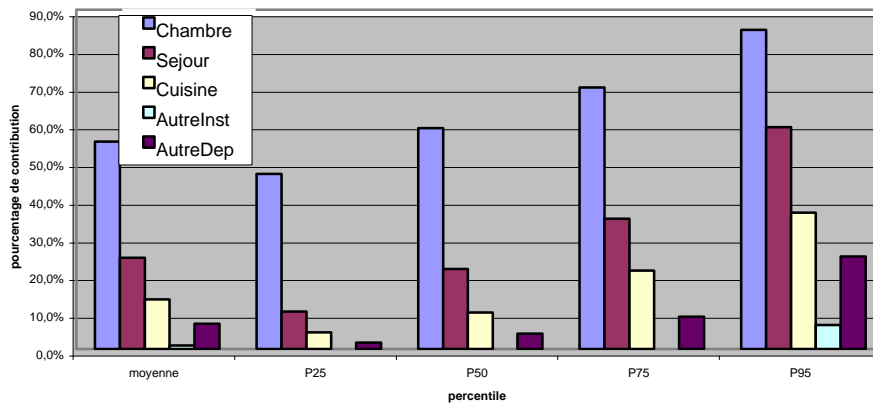
**Graphique 5. Contribution moyenne, exprimée en pourcentage, des différentes pièces à la concentration d'exposition domestique cumulée sur la journée dans la région 1 pour chacune des catégories de personnes**



A titre d'exemple, l'analyse de la distribution des contributions de chaque pièce du logement à la concentration d'exposition domestique journalière a été réalisée pour les actifs de la région 1. Quelle que soit la pièce, cette distribution est étalée : un facteur 2 pour la chambre,

à 7 pour la cuisine et même à 8 pour les autres dépendances sépare le percentile 25 du percentile 95. Dans la catégorie des inactifs de la région 1, l'écart atteint un facteur 20 pour les autres dépendances, allant jusqu'à une contribution de plus de 90 %. Cela révèle des caractéristiques particulières de certains habitats combinées peut être à des comportements eux aussi particuliers des occupants.

**Graphique 6. Distribution des contributions relatives des pièces, exprimées en pourcentage, à la concentration d'exposition domestique des personnes**

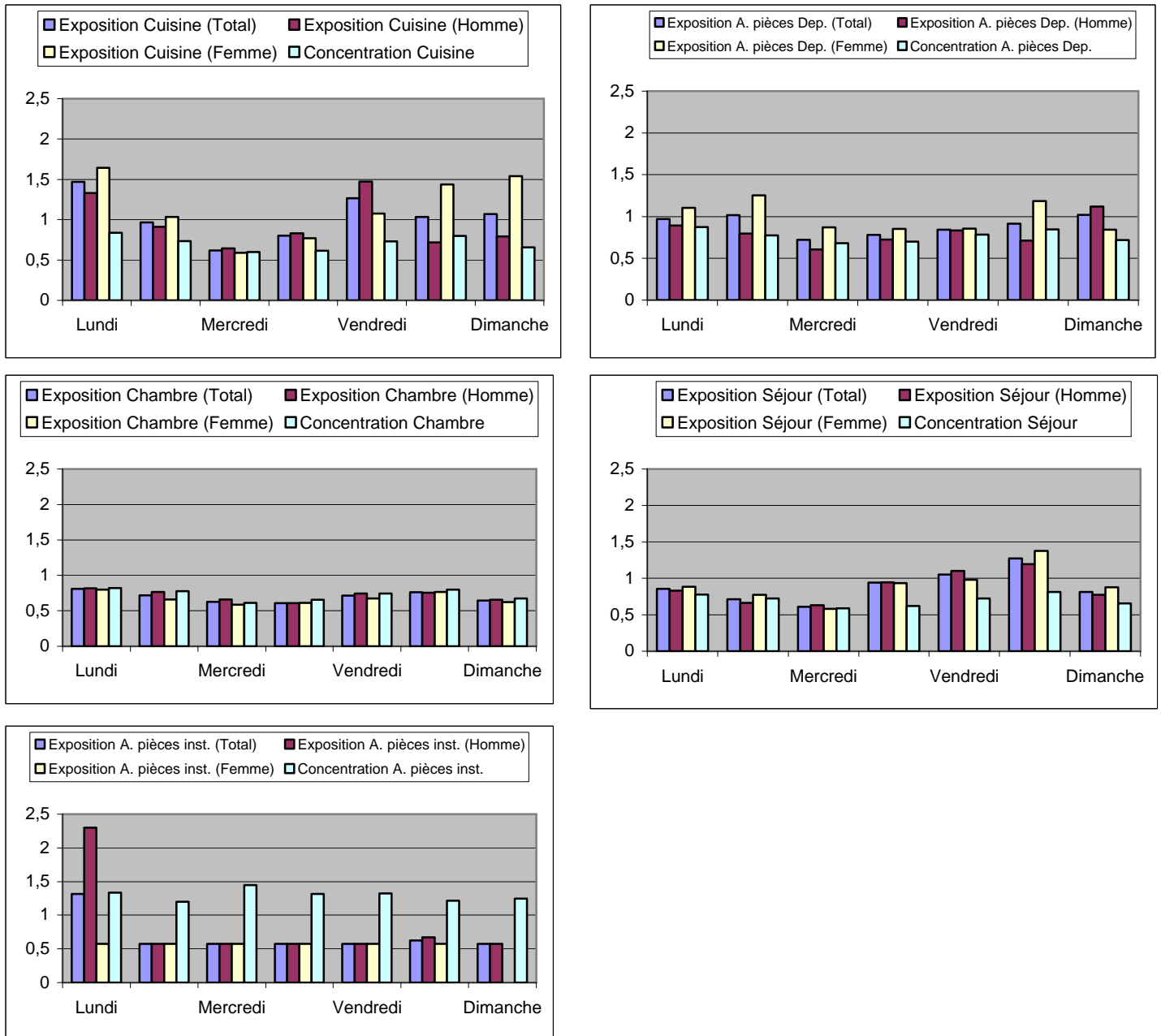


- Part de la contribution des pièces à la concentration d'exposition domestique en fonction des jours de la semaine

Quel que soit le jour de la semaine, la concentration d'exposition domestique ne varie pas dans la chambre et le séjour, tandis que les estimations sont plus chaotiques dans la cuisine (graphique 7).

*Cela n'empêche nullement que pour des individus pris isolément, les variations puissent être plus fortes compte tenu de leur activité quotidienne et de sources de combustion mises en route quotidiennement ou non, dans des pièces comme le séjour.*

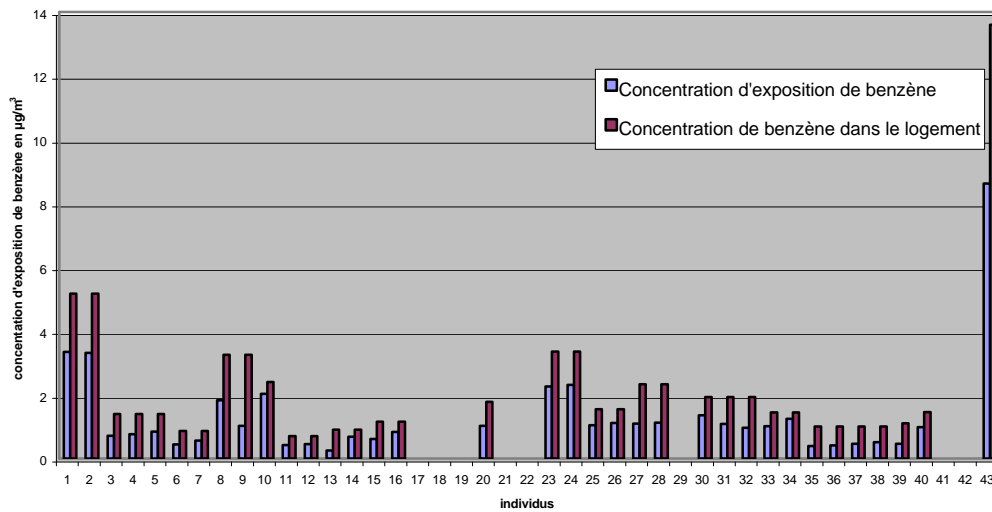
**Graphique 7. Concentrations d'exposition domestique (CED-1), exprimées en mg/m<sup>3</sup>, dans les différentes pièces du logement en fonction du jour de la semaine calculées pour la région 1, toutes catégories de personnes confondues**



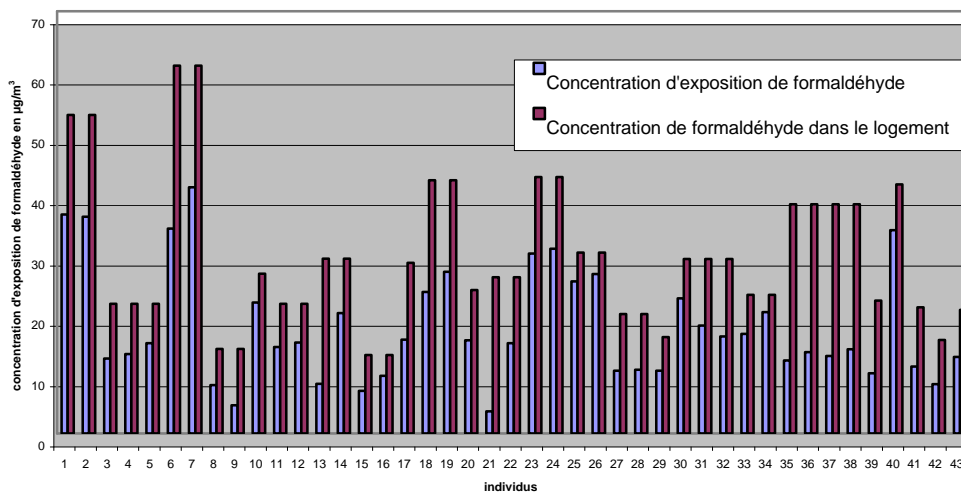
## 2.2. Benzène et formaldéhyde

Les graphiques 8 et 9 permettent de visualiser les écarts en fonction de l'estimation de la concentration d'exposition domestique quotidienne des personnes. Systématiquement, la description de l'exposition des personnes par la seule concentration mesurée dans le logement conduit à un résultat supérieur d'un facteur d'environ 2 selon la catégorie de personnes et la région à celui qui pondère par le temps passé dans chacune des pièces.

**Graphique 8. Comparaison des estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne, en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour le benzène, dans la région 1 et pour la catégorie actif**



**Graphique 9. Comparaison des estimations des concentrations d'exposition quotidienne, en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour le formaldéhyde, dans la région 1 et pour la catégorie actif**



## VI. Discussion

La méthode indirecte permet d'estimer l'exposition des populations en combinant les concentrations des polluants mesurés dans différentes pièces du logement avec les durées de fréquentation de ces pièces. Cette connaissance permet ensuite soit de classer les personnes en fonction de leur niveau d'exposition, soit de quantifier les risques encourus par ces personnes si tant est qu'une VTR est disponible pour le ou les polluants considérés.

Les publications parues jusqu'à aujourd'hui rapportent que la méthode indirecte conduit presque toujours à un niveau d'exposition inférieur à celui mesuré par méthode directe. Cette dernière servant de référence, les explications apportées décortiquent les faiblesses méthodologiques de la méthode indirecte.

Les auteurs pointent principalement l'influence du BET, allant jusqu'à affirmer qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'un BET détaillé pour approcher l'exposition des personnes et éviter des erreurs d'interprétation. Aucun d'entre eux ne discutent de l'influence des modalités de prises en compte de la concentration atmosphérique dans le logement (échelle du pas de temps ou de la journée, moyenne de la concentration dans le logement...), en s'appuyant sur les conditions d'échantillonnage.

Dans ce travail, à défaut de déterminer l'écart à la valeur la plus proche possible de la réalité qui serait représentée par une mesure directe de l'exposition, environnementale ou biologique, l'objectif est d'apprécier si différentes modalités de calcul des concentrations d'exposition domestique quotidienne pourraient engendrer des erreurs importantes lors d'éventuelles classification des personnes ou dans le niveau quantifié de risque encouru.

## **1. Evolution des concentrations atmosphériques au cours de la journée**

Des concentrations d'exposition domestique ont été calculées pour chacun des pas de temps de 10 ou 15 minutes selon le recueil du BET considéré. Pour comparaison, la moyenne des concentrations atmosphériques de CO de tous les logements enquêtés, pour les mêmes 96 quarts d'heure de la journée, a été calculée.

Selon les jours de la semaine, il est observé des écarts manifestes entre la concentration ambiante mesurée du CO et la concentration d'exposition domestique calculée. Cela révèle toute l'importance de tenir compte de l'emploi du temps précis des occupants si l'on veut estimer de manière correcte les niveaux d'exposition auxquels ils sont soumis.

## **2. Comparaison des diverses modalités de calcul des CEDQ**

Les résultats obtenus à l'échelle de la population n'indiquent pas, en moyenne, une différence d'une grande ampleur numérique entre les diverses modalités de calcul des concentrations d'exposition domestique quotidienne. Seules quelques unes présentent une différence élevée, pour des concentrations élevées de CO dans le logement.

En revanche, à une échelle individuelle, les écarts peuvent être plus substantiels, principalement pour des concentrations d'exposition domestique de CO élevées. Cela peut signifier que les occupants présentent des comportements particuliers. Pour ces personnes

là, il serait dommageable de ne pas considérer un BET et une concentration associée détaillée, sous peine de minimiser les risques encourus ou de les classer dans une mauvaise catégorie d'exposition. La globalisation des indicateurs du BET ou de la concentration atmosphérique du polluant, peut manifestement conduire à des erreurs d'interprétation.

Cette analyse globale ne permet pas de rendre compte de l'influence des facteurs entrant dans le calcul de l'exposition et notamment des modalités de recueil du BET et des concentrations atmosphériques des polluants. L'analyse de sensibilité menée permet de tirer quelques enseignements.

### **2.1. Influence des modalités de recueil du BET**

Le recueil du BET des occupants des logements enquêtés a été effectué d'une part sur deux journées (1 en semaine et 1 en week-end) et d'autre part, de manière plus globale pour chacun des jours de la semaine. Les deux pas de temps retenus pour chacun des recueils n'étaient pas cohérents entre eux, le premier étant de 10 minutes, le deuxième de 15 minutes.

Au delà de l'incohérence des déclarations qui avait pu être notée dans une analyse précédente de confrontation des deux modes de recueil [CSTB 2002], la comparaison des estimations des concentrations d'exposition domestique quotidienne avec l'un ou l'autre des recueils montre une moyenne des différences plutôt ténues pour deux régions (moins de 10 %), alors que pour la troisième l'amplitude est plus grande (environ 40 %). Cependant, les niveaux de concentrations d'exposition domestique étant faibles, voire très faibles, il convient de relativiser l'importance des écarts constatés.

Il n'en reste pas moins que pour les personnes qui ont des concentrations d'exposition domestique élevées (jusqu'à 4 mg/m<sup>3</sup>), ces écarts deviennent plus significatifs et peuvent avoir une influence plus grande lors d'une exploitation à des fins d'évaluation de l'impact sanitaire.

Les résultats publiés jusqu'à présent s'attachent à analyser l'influence des modalités de prise en compte du BET à un niveau populationnel. Nombre d'auteurs s'accorde à conclure que celles-ci a une influence marginale sur le niveau d'exposition si la concentration atmosphérique du polluant considéré a été bien sélectionnée [Noy, 1990 ; Dingle, 1993 ; Chan, 1990 ; Mosqueron, 2002 ; Jurvelin, 2001 ; Dockery, 1981 ; Hosein, 1991 ; Nitta, 2003]. S'ils reconnaissent toutefois que leur étude ne peut être extrapolée à d'autres populations et types de logements, l'analyse à un niveau individuel ne conduit pas forcément aux mêmes conclusions. C'est pourtant un niveau pertinent pour conduire une analyse de l'impact sanitaire de l'exposition à un ou plusieurs polluants.

Cette influence est d'autant plus grande que l'on omet de mettre en cohérence les estimations des expositions avec l'élaboration des VTR. Le travail conduit ici pointe une surestimation moyenne d'un facteur 2 si une telle pondération n'est pas effectuée.

## **2.2. Influence combinée du BET et de la concentration atmosphérique des polluants**

### **2.2.1. CO**

La prise en compte d'un BET plus global, c'est à dire que soit l'on considère la durée de la journée passée à l'intérieur de l'habitat sans distinction des pièces, soit il est considéré que la personne passe la totalité de la journée dans l'habitat, associée à une concentration atmosphérique de CO à l'échelle de chaque pièce ou à l'échelle du logement conduit à obtenir des résultats dont les différences peuvent représenter plus de 80 % de la valeur de concentration d'exposition intérieure par comparaison avec les calculs réalisés avec les données détaillées de BET et de concentration atmosphérique.

Comme précédemment, il convient de relativiser ces écarts, car les concentrations d'exposition sont plutôt faibles. Ils semblent être plus significatifs pour les personnes ayant une concentration d'exposition élevée ( $> 2 \text{ mg/m}^3$ ), pouvant conduire à des interprétations erronées des calculs d'impacts sanitaires.

### **2.2.2. Benzène et formaldéhyde**

L'analyse des données relatives au benzène et au formaldéhyde montre un écart systématique d'un facteur 2 entre la concentration d'exposition intérieure quotidienne et la concentration atmosphérique dans les pièces du logement. Une explication peut être la suivante : les personnes passent moins de temps dans les pièces du logement dans lesquelles les concentrations atmosphériques sont les plus élevées. Le calcul de la concentration d'exposition intérieure quotidienne prenant en compte le BET des personnes, pondère ces concentrations atmosphériques élevées.

## **2.3. Influence des modalités d'approche des valeurs manquantes**

### **2.3.1. BET**

Les démarches possibles pour approcher les valeurs manquantes dans une série de données sont nombreuses, des méthodes déductives aux méthodes d'imputation multiples [Garcia-Acosta 1999]. Le travail conduit ici n'avait pas pour objet de tester l'influence de ces différentes méthodes sur le résultat final. La sélection de la méthode d'imputation a été retenue en raison des données recueillies.



Les résultats obtenus ne rapportent aucune influence dans le calcul de la concentration d'exposition intérieure quotidienne, quelles que soient la région et la catégorie de personnes. Dans les deux cas, les écarts-types sont quasiment identiques (ET = 0.63 et 0.60 respectivement avant et après remplacement des valeurs manquantes de BET). A un niveau individuel, les écarts, lorsqu'ils existent, ne dépassent pas l'ordre du pourcent.

Ce résultat peut paraître surprenant tant pour certaines personnes, l'emploi du temps de la journée est peu renseigné. Cependant, la méthode d'approche des valeurs manquantes du BET oriente vers une uniformisation des comportements, les pièces les plus fréquentées étant privilégiées. Il en ressort une uniformisation des niveaux des concentrations d'exposition intérieure quotidienne.

Pour aller au-delà de cette uniformisation, il aurait peut être fallu affiner cette gestion des données manquantes en s'appuyant sur une caractérisation et donc une catégorisation plus fine de la population ainsi qu'en fonction des types de logements.

### **2.3.2. Concentration atmosphérique**

Dans le cas des concentrations atmosphériques dans les différentes pièces du logement, il ne s'agit pas d'approcher les valeurs manquantes mais plutôt des valeurs inexistantes. Les hypothèses retenues se sont appuyées sur les connaissances rapportées par la littérature concernant l'homogénéité ou l'hétérogénéité des concentrations atmosphériques dans les différentes pièces du logement en fonction des polluants.

Les calculs effectués en affectant à la chambre de l'occupant concerné, la valeur la plus élevée de concentration enregistrée dans une des pièces de l'habitat conduit à des augmentations notables des concentrations d'exposition journalière pour cet occupant. Cela est vrai dès qu'une concentration atmosphérique de CO élevée est mesurée dans le logement, quelle que soit la pièce et que celle-ci soit fréquentée ou non. On peut évidemment s'interroger sur le reflet de l'exposition que cette modalité de calcul apporte.

Cette pratique conduit à une estimation erronée de l'exposition et par voie de conséquence à une mauvaise classification des personnes lors d'éventuelles études épidémiologiques ou à un calcul sur-estimé du risque encouru dans le cadre d'une EQRS.

Le remplacement par des valeurs de concentration atmosphérique se voulant plus proches d'une moyenne a sûrement eu moins d'influence. Cependant, en raison de la faiblesse des connaissances disponibles sur les concentrations de CO dans les différentes pièces d'un logement, il conviendrait de mettre en œuvre quelques campagnes de mesures afin de déterminer le sens et l'ampleur de l'incertitude.

## **2.4. Contribution des pièces à la concentration d'exposition quotidienne**

L'absence de représentativité des données disponibles pour l'analyse empêche toute interprétation concernant l'importance relative des différentes pièces dans la concentration d'exposition quotidienne des occupants des logements. En revanche, ce premier travail permet de comprendre que les pièces les plus polluées ne sont pas forcément celles qui contribuent le plus aux concentrations d'exposition quotidienne. L'exemple de la chambre et de la cuisine en atteste.

Une exploitation des données similaires pour le benzène et le formaldéhyde ne montre pas de différences majeures avec les conclusions tirées à partir du CO. Seules les contributions respectives des items « autres pièces » et « autres pièces instrumentées » s'inversent, les deuxièmes étant plus contributives que les premières, respectivement en moyenne de 8,5 % et 2 %.

Ces résultats préliminaires font également comprendre la nécessité de mettre en œuvre des protocoles adaptés pour affiner la connaissance des concentrations atmosphériques dans les pièces pertinentes en termes d'exposition. A ce titre, l'appareillage systématique de la chambre à coucher s'impose.

## **VII. Conclusion – perspectives**

---

Le calcul de l'exposition est une étape clé dans les démarches d'évaluation des impacts sanitaires des pollutions environnementales sur les populations. L'exposition aux polluants atmosphériques lors de la présence des occupants à l'intérieur des locaux (habitat, lieu de travail...) est considérée comme importante car les populations y passent en moyenne, dans nos pays industrialisés, 80 à 90 % de leur temps. Le travail conduit ici ne visait pas la connaissance des niveaux d'exposition des populations mais l'analyse de l'influence du BET et de l'indicateur de concentration retenu pour estimer cette exposition afin de maîtriser les erreurs de classification en épidémiologie et la quantification des risques sanitaires.

Les données présentées ne permettent absolument pas d'accéder à des résultats représentatifs concernant les concentrations d'exposition des populations ni leurs budgets espace-temps, car les échantillons de la campagne pilote ont été constitués sur une base de volontariat et non d'un tirage au sort. Toutefois, à partir de ces données, un certain nombre de conclusions et de perspectives peuvent être proposées.

L'influence respective du BET et de la concentration atmosphérique n'est pas majeure, à moins que l'on retienne systématiquement la concentration la plus élevée dans le logement pour le pas de temps considéré. En revanche, la conjonction des deux peut conduire à des

erreurs d'interprétations préjudiciables, notamment à une échelle individuelle en raison de comportements particuliers.

Ce constat conforte la nécessité de disposer d'un BET détaillé sur les pièces fréquentées avec un pas de temps approprié à l'objectif de l'étude. Le recueil de la concentration atmosphérique doit être cohérent avec le BET, d'autant plus s'il est nécessaire de rendre une réponse en terme d'exposition aigue comme dans le cas du CO.

Il est renforcé par l'analyse de la contribution des différentes pièces d'un logement à la concentration d'exposition domestique quotidienne qui indique la part majeure prise par l'occupation de la chambre. Il est primordial d'inclure cette pièce dans les campagnes de mesurage organisées pour déterminer la qualité de l'air dans les logements individuels. Il est également primordial de bien connaître le temps passé dans cette pièce et la concentration à mettre en regard.

L'ensemble des éventualités n'ont pas pu être explorées en raison des limites de l'échantillonnage tant sur le plan des habitats que sur celui des occupants : la faible taille et le volontariat restreignent la diversité des situations. Aussi, les conclusions formulées nécessitent d'être avalisées par un travail complémentaire portant sur le BET de catégories de personnes particulières comme les enfants en bas-âge et les personnes âgées qui ont des caractéristiques spécifiques et sur les dispositifs d'échantillonnage des polluants afin de vérifier des hypothèses sur l'homogénéité ou l'hétérogénéité des concentrations atmosphériques au sein des logements. Il pourrait également être intéressant d'analyser les BET recueillis au niveau régional pour apprécier leurs différences et mettre en œuvre une démarche permettant de comprendre l'éventuelle influence de ces différences.

L'analyse de la campagne d'ampleur nationale démarrée en septembre 2003 dans le cadre de l'OQAI permettra de renforcer les premières conclusions issues de ce travail méthodologique, et de proposer des résultats plus pertinents sur le BET et sur les niveaux d'exposition des populations en fonction des types d'habitat.

Enfin, en termes de perspectives, l'analyse des données de la campagne pilote suggère d'envisager deux axes de travail. Le premier concerne l'organisation des données collectées dans une base de données afin d'en permettre l'utilisation et l'exploitation par des équipes de recherche ou des institutions. Le deuxième est de développer une démarche d'évaluation quantitative du risque sanitaire en s'appuyant sur les résultats de cette étude.

## VIII. Références

---

Brasche S, Witthauer J, Bischof W, Lee K and Spengler JD. Determination of NO<sub>2</sub> exposure-  
-personal passive sampling versus indoor measurement. *Zentralbl Hyg Umweltmed* 201  
(3):229-239, 1998.

Chan CC, Yanagisawa Y and Spengler J D. Personal and indoor/outdoor nitrogen dioxide  
exposure assessments of 23 homes in Taiwan. *Toxicol Ind Health* 6 (1):173-182, 1990.

Clarisse B, Laurent AM, Seta N, Le Moullec Y, El Hasnaoui A, Momas I. Indoor aldehydes :  
measurement of contamination levels and identification of their determinants in Paris  
dwellings. *Environ. Research*, 92:245-253, 2003.

Crump D R, Bland BH, Mann HS, Brown VM and Ross DI. Personal exposure to air  
pollutants in Hertfordshire, England. *8th International Conference on Indoor Air Quality and  
Climate, Edinburgh, Scotland* 5:288-293, 1999.

CSTB 2000

CSTB 2002

Dingle P, Shuwei H and Murray F. Personal exposure to formaldehyde. Proceedings of  
Indoor Air 93. Anonymous. Anonymous. 2:293-298, 1993.

Dockery DW and Spengler JD. Personal exposure to respirable particulates and sulfates.  
*J Air Pollut Control Assoc* 31 (2):153-159, 1981.

Dusseaux M, Laurent A.M, Le Moullec Y, Person A and Momas I. Evaluation de l'exposition  
personnelle au benzène d'une population francilienne représentative du secteur tertiaire.  
Anonymous. Anonymous. Programme Primequal : convention n° 99.62034, 2001.

Garcia-Acosta S, Clavel-Chapelon F. Gestion des données manquantes, abérrantes et  
incohérentes dans l'étude de cohorte E3N. *Rev. Epidém. Et Santé Publ.* 47, 515-523, 1999.

Gonzales-Flesca N, Cicoella A, Bates MS and Baskin E. Pilot study of personal, indoor and  
outdoor exposure to benzene, formaldehyde and acetaldehyde. *Environ Sci Pollut Res Int* 6  
(2):95-102, 1999.

Harrison RM, Thornton CA, Lawrence RG, Mark D, Kinnersley RP and Ayres JG. Personal  
exposure monitoring of particulate matter, nitrogen dioxide, and carbon monoxide, including  
susceptible groups. *Occup Environ Med* 59:671-679, 2002.

Hosein R, Corey P, Silverman F, Ayiomamitis A, Urch R and Alexis N. Predictive models  
based on personal, indoor and outdoor air pollution exposure. *Indoor Air* 1 (4):457-464, 1991.

Jantunen M, Jaakola JJK, Kryzanowski M. Assessment of exposure to indoor air pollutants. WHO-ECEH Working group; 1997.

Jurvelin J, Vartiainen M, Jantunen M and Pasanen P. Personal Exposure Levels and Microenvironmental Concentrations of Formaldehyde and Acetaldehyde in the Helsinki Metropolitan Area, Finland. *J Air Waste Manage Assoc* 51:17-24, 2001.

Kousa Monn C, Rotko T, Alm S, Oglesby L and Jantunen M J. Personal exposures to NO<sub>2</sub> in the EXPOLIS-study : relation to residential indoor, outdoor and workplace concentrations in Basel, Helsinki and Prague. *Atmos Environ* 35:3405-3412, 2001.

Lee K, Yang W and Bofinger ND. Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposures in Australia. *J Air Waste Manage Assoc* 50 (10):1739-1744, 2000.

Levy JI. Impact of residential NO<sub>2</sub> exposure on personal exposure : an international study. *J Air Waste Manage Assoc* 48:553-560, 1998.

Mage DA. Comparison of the direct and indirect methods of human exposure. Report on a joint workshop of risk assessment for the indoor environment; 1991; Kloster Banz, Germany.

McBride SJ, Ferro AR, Ott WR, Switzer P, Hildemann LM. Investigations of the proximity effect for pollutants in the indoor environment *J Expo Anal Environ Epidemiol* 9 (6):602-621; 1999.

Monn C. Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, NO<sub>2</sub> and ozone *Atmos Environ* 35 (1):1-32; 2001.

Mosqueron L, Momas I and Le Moullec Y. Personal exposure of Paris office workers to nitrogen dioxide and fine particles. *Occup Environ Med* 59 (8):550-555, 2002.

Nitta H and Maeda K. Personal exposure monitoring to NO<sub>2</sub>. *Environ Int* 8:243-248, 2003.

Noy D, Brunekreef B, Boleij JS and Houthuijs D. The assessment of personal exposure to NO<sub>2</sub> in epidemiological studies. *Atmos Environ* 24 A:2903-2909, 1990.

Ott WR. Models of human exposure to air pollution. Report 32. 1980.

Persily AK. Carbon monoxide dispersion in residential buildings: literature review and technical analysis. *National Institute of Standards and Technology*, 71p, October 1996.

Quackenboss JJ, Spengler JD, Kanarek MS, Letz R and Duffy CP. Personal exposure to NO<sub>2</sub>: relationship to indoor / outdoor air quality and activity patterns. *Environ Sci Technol* 20:775-783, 1986.

Rodes CF, Camens RM, Wiener RW. The significance and characteristics of the personal activity cloud on exposure assessment measurements for indoor contaminants. *Indoor Air* 2: 123-145; 1991.

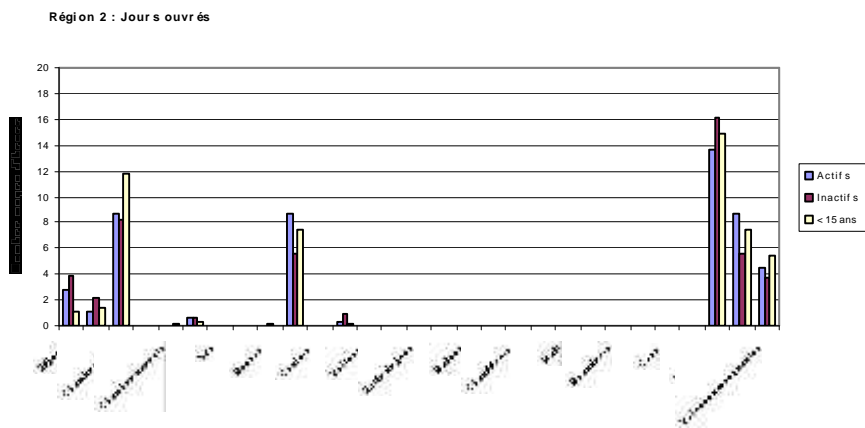
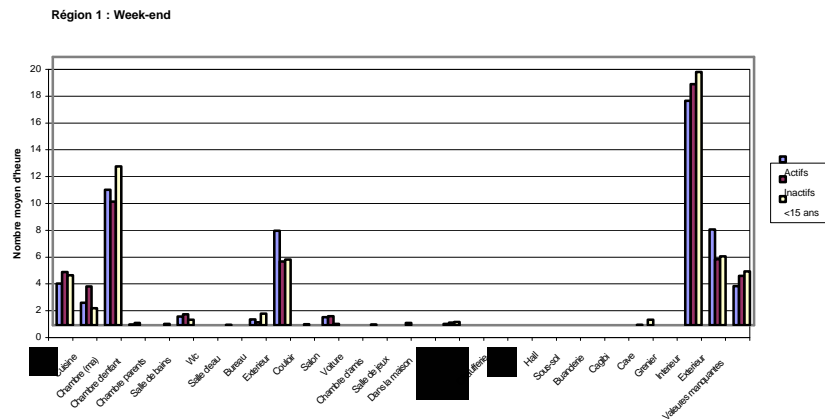
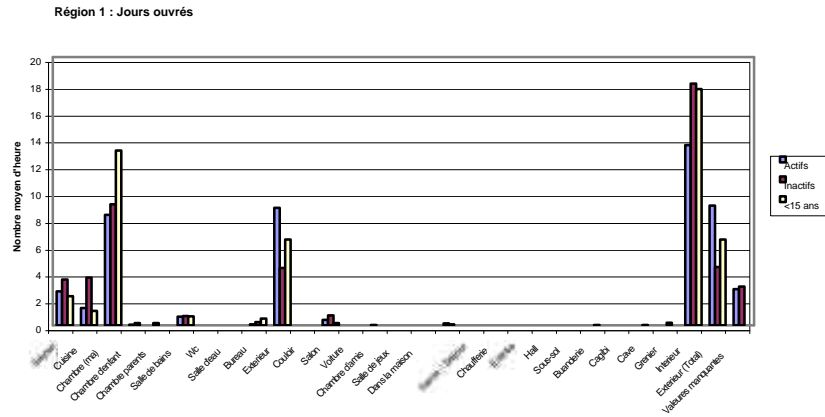
Schneider T. Measuring Strategies and Monitoring of the Indoor Environment. *J Environ Monit* 1999, 1, 427-434.

Sexton K, Spengler JD and Treitman RD. Personal exposure to respirable particles: a case study in waterbury, Vermont. *Atmos Environ* 18 (7):1385-1398, 1984.

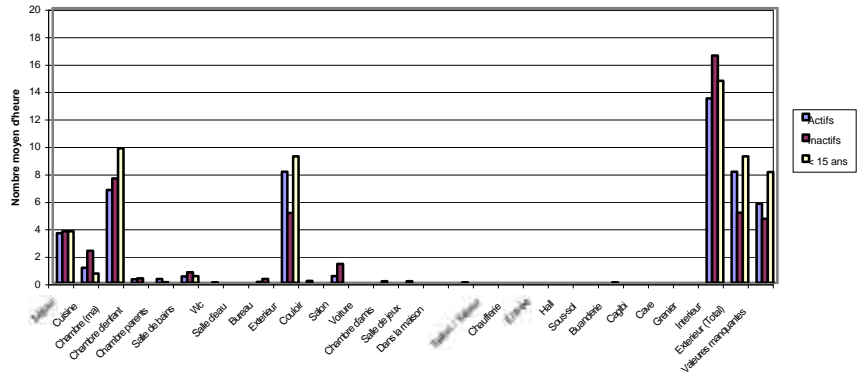
Wallace LA, Pellizzari ED, Hartwell TD, Davis V, Michael LC, Whitmore RW. The Influence of Personal Activities on Exposure to Volatile Organic Compounds. *Environ Res* 1989, 50, 37-55.

# Annexe 1

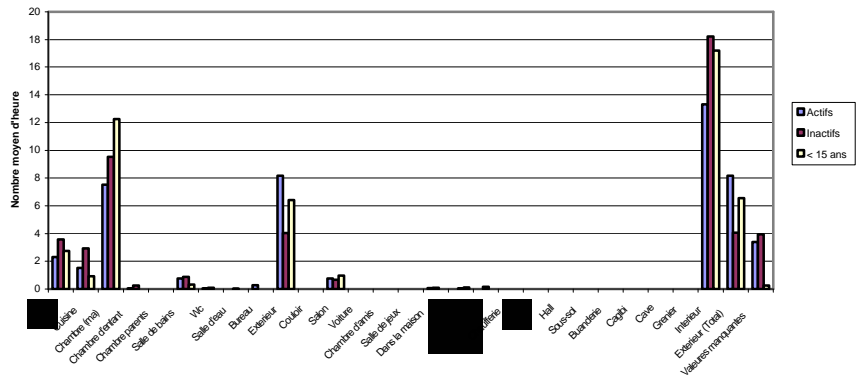
Graphiques. Description des BET selon la durée moyenne journalière de séjour en heure dans les différentes pièces d'un logement selon les régions et le type de jour de semaine (jour ouvré et week-end)



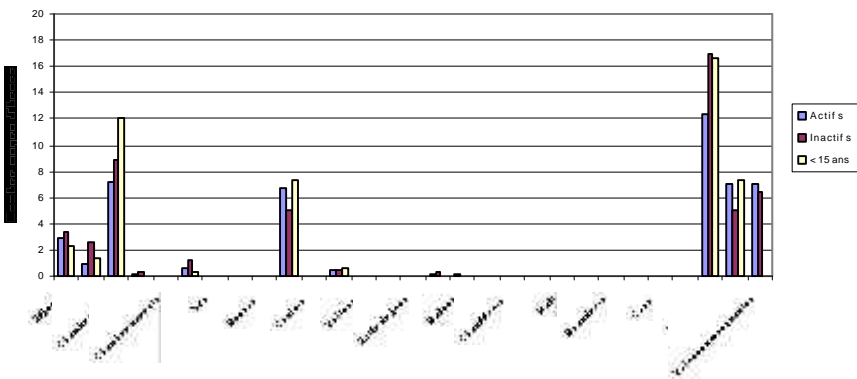
Région 2 : Week-end



Région 3 : jours ouvrés



Région 3 : Week-end





## Annexe 2

Tableaux. Distribution des temps passés dans chacune des pièces du logement selon la région, la catégorie de personne et le jour de la semaine

### Région 1

Actifs/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
Chambre	Journalier	0	0,1	2,27	7	8,5	9,58	10,93	11,82	13,17	7,84
	Semainier	0	0,15	5,3	7	8,5	9,62	11,35	12,45	13	8,02
Séjour	Journalier	0	0	0,03	0,75	1,83	4,08	7,43	7,95	9,67	2,79
	Semainier	0	0	0	0,62	2	4,62	7	7,92	8,5	2,8
Cuisine	Journalier	0	0	0,03	0,42	1,17	1,83	2,63	3	4	1,24
	Semainier	0	0	0	0,5	1,25	1,88	2,75	3,47	4,5	1,35
Autres pièces et dépendances	Journalier	0	0	0,03	0,33	0,5	1,17	1,8	2,43	7,33	0,92
	Semainier	0	0	0	0,5	0,75	1	1,45	2,42	3	0,76
Extérieur	Journalier	0	0	0	4,67	10,17	11,92	13,83	14,15	14,5	8,5
	Semainier	0	2,55	3,8	8,5	11	12,62	14,25	22	24	10,64
Valeurs manquantes	Journalier	0	0	0	0	0	0,17	13,57	22,92	24	2,69
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0	0,22	11,5	0,28
Intérieur	Journalier	0	1,08	7,9	10,92	12,67	15,25	19,87	20,93	24	12,8
	Semainier	0	2	9,75	11	12,75	15,25	20	20,92	24	13,08

Actifs/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
Chambre	Journalier	0	0	0	7,67	9,5	10,83	13,8	15,97	19	8,92
	Semainier	0	0	0	7,38	8,75	10,5	13,05	14,85	16,75	8,39
Séjour	Journalier	0	0	0	0,92	3	5,17	6,3	7,42	10,33	3,27
	Semainier	0	0	0	0,75	3,5	5	6,9	9,27	10	3,49
Cuisine	Journalier	0	0	0	0,33	1,5	2	3,43	4,15	4,67	1,48
	Semainier	0	0	0	0,38	1,5	2,5	3,75	4	5	1,55
Autres pièces et dépendances	Journalier	0	0	0	0,33	0,67	1,42	1,97	3,25	6,83	1,11
	Semainier	0	0	0	0	0,5	1,5	3,05	3,7	7	1,1
Extérieur	Journalier	0	0	0	1,58	5,5	9,5	12,6	15,6	24	6,3
	Semainier	0	0,8	1,5	4,75	7	12,38	24	24	24	9,4
Valeurs manquantes	Journalier	0	0	0	0	0	0,42	19,4	24	24	2,91
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0,01
Intérieur	Journalier	0	0	0	12,08	16,83	19,83	22,53	23,47	24	14,78
	Semainier	0	0	0	11,62	17	19,25	22,5	23,2	24	14,59

Inactifs/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	1,84	4,73	7	8	9,21	12,42	16,41	22,5	8,51
	Semainier	0	0	4,2	7,62	8,88	10,62	13,42	15,08	15,5	8,68
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0,43	1,2	1,83	2,67	4,96	7,7	8,77	12,17	3,92
	Semainier	0	1,06	1,42	2	3	5,06	6,58	6,79	7	3,47
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0,23	2,04	3,25	4,62	6,08	6,74	7,17	3,35
	Semainier	0	0	1,05	2	2,75	4,75	5,5	5,61	6,25	3,07
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0,12	0,54	0,75	1,83	2,65	3,02	3,17	1,23
	Semainier	0	0	0	0,56	1,12	2,75	6,25	8,39	20,5	2,85
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	1,04	3,25	5,96	8,93	9,49	11,33	4,11
	Semainier	0	0	0	1,25	4,5	7,38	8,65	9,3	11	4,5
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0,58	2,25	7,22	9,83	24	2,88
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0,48	4,45	24	1,4
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	6,94	10,85	15,54	17,75	20,54	23,3	24	24	17,01
	Semainier	0	11,05	14,4	15,94	18,75	22,12	23,3	24	24	18,1

Inactifs/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	1,17	6,54	9	9,96	10,48	12,58	22,5	8,19
	Semainier	0	0	4,2	7,62	9	9,69	10,32	10,65	11,5	8
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	2,17	4	5,75	7,32	9,11	10,67	4,1
	Semainier	0	0	1,4	3,5	4,25	5,38	7,2	10,04	10,25	4,43
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	1,83	2,25	3,42	4,72	6,17	7,17	2,56
	Semainier	0	0	0,53	2	2,5	4,44	5,72	6,36	7	3,06
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,04	0,75	1,46	2,63	3,63	5,33	1,11
	Semainier	0	0	0	0,5	1,12	2,94	4,98	7,71	20,25	2,61
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	0,96	4,5	7,46	8,92	9,57	10	4,37
	Semainier	0	0	0,18	1,44	4,88	6,88	8,65	9,07	9,5	4,47
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0,25	2,54	12,57	24	24	3,67
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0	3,6	24	1,33
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	6,07	14,67	16,83	20,25	22,6	24	24	15,96
	Semainier	0	12,32	14,85	16,44	17,88	22	23,22	23,79	24	18,19

<15 ans/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	11	11,12	11,25	11,54	12	14,71	15,83	16	16,17	13,03
	Semainier	10,75	10,94	11,12	11,56	11,88	14,81	15,75	15,75	15,75	12,92
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0,08	0,17	0,71	2,75	3,79	4,08	4,21	4,33	2,33
	Semainier	0	0,06	0,12	0,94	3,12	4	5	5,38	5,75	2,75
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0,12	0,25	0,54	1,08	1,62	1,92	2,04	2,17	1,08
	Semainier	0	0,19	0,38	0,81	1,25	1,5	1,5	1,5	1,5	1,04
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0,12	0,25	0,62	1,17	1,58	2,08	2,29	2,5	1,17
	Semainier	0	0,12	0,25	0,5	0,88	1,44	2,25	2,62	3	1,12
<b>Extérieur</b>	Journalier	1,83	2,54	3,25	4,71	5,67	9	10,25	10,46	10,67	6,39
	Semainier	2,75	3,25	3,75	4,81	5	8,56	9,75	9,75	9,75	6,17
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Intérieur</b>	Journalier	13,33	13,54	13,75	15	18,33	19,29	20,75	21,46	22,17	17,61
	Semainier	14,25	14,25	14,25	15,44	19	19,19	20,25	20,75	21,25	17,83

<15 ans/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0,71	1,42	5,17	12,5	13,58	15,67	16,58	17,5	9,86
	Semainier	0	0,69	1,38	5,06	12,38	15	16,25	16,5	16,75	10
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0,12	0,25	1,29	3,75	4,71	5,58	5,88	6,17	3,19
	Semainier	0	0,12	0,25	1,31	4,38	5	5,62	5,94	6,25	3,42
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0,25	1,25	1,75	1,92	1,96	2	1,06
	Semainier	0	0,19	0,38	0,88	1,5	1,94	2	2	2	1,29
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0,17	0,33	0,71	1,33	2,71	3,17	3,25	3,33	1,61
	Semainier	0	0,12	0,25	0,81	2	2,81	3,25	3,38	3,5	1,83
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	0	2,83	8,17	10	10,5	11	4,28
	Semainier	0	0	0	0,5	4,88	10,19	17,5	20,75	24	7,46
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	0	12	18	24	4
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	3,25	6,5	13,5	16,67	22,58	24	24	24	15,72
	Semainier	0	3,25	6,5	13,81	19,12	23,5	24	24	24	16,54

## Région 2

Actifs/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	7,04	8,33	10,79	11,33	11,88	12	7,61
	Semainier	0	0	2,88	7,75	8,62	10	11	11,25	13,5	8,13
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0	2,17	3,96	6	9,08	13,33	2,71
	Semainier	0	0	0	1,5	2,62	4,44	5,88	6,88	13,75	3,15
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0	0,58	1,5	2,83	3,12	4,83	0,99
	Semainier	0	0	0	0,06	1	1,75	3,38	3,69	8,25	1,34
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,17	0,5	0,83	1,17	1,42	2,33	0,58
	Semainier	0	0	0	0	0,38	0,75	1,75	2,94	6,25	0,71
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	4,96	8,92	10,67	12,17	13,62	15,17	7,61
	Semainier	0	0	3,25	6,38	9,25	11,19	12,5	14,81	24	9,06
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	2,25	24	24	24	4,5
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0,88	9,56	24	1,42
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	0	9,71	13,33	15,5	18,42	19,17	20,33	11,89
	Semainier	0	0	9,25	12,31	13,88	15,69	19,38	19,75	22,75	13,52

Actifs/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	0	7,42	10,29	11	11,12	13,83	5,74
	Semainier	0	0	0,25	8	9,25	11,19	12,75	13	13,5	8,48
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0	3	5,83	7,92	10,04	17	3,49
	Semainier	0	0	0	0,88	3,5	6,75	7,88	10,62	19	4,18
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0	0,75	1,67	2,08	2,75	3,33	0,93
	Semainier	0	0	0	0	1	2	2,75	3,56	5,5	1,29
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0	0,5	1	2,25	4,38	19,67	1,22
	Semainier	0	0	0	0	0,5	1	2,75	4,19	11	1,07
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	2,67	6,92	10,29	12,17	13,21	19,5	6,87
	Semainier	0	0	0,62	4	7,25	10,25	13,5	17,94	24	7,64
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	9,62	24	24	24	5,75
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0,25	2,25	24	1,14
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	0	4,71	13,25	17,29	19,33	21,21	24	11,38
	Semainier	0	1,12	7,38	13,06	16,25	19,38	21,25	22,56	24	15,22

<b>Inactifs/Jours ouvrés</b>	<b>Percentiles</b>	<b>0 %</b>	<b>5 %</b>	<b>10 %</b>	<b>25 %</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>90 %</b>	<b>95 %</b>	<b>100 %</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0,12	7,62	8,92	9,67	10,3	11,43	14,17	7,7
	Semainier	0	2,45	7,18	8	8,88	9	10,5	10,82	11,5	8,26
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	1,96	3,5	6,96	9,5	11,23	12,17	4,51
	Semainier	0	0	0,35	1,94	3,62	7,38	10,12	11,81	16	4,75
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0,79	1,83	2,88	4	4,32	8	2,05
	Semainier	0	0	0	1	2	3,56	4,8	6,64	9,75	2,51
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,33	0,58	1	1,27	1,82	4,83	0,77
	Semainier	0	0	0	0	0,88	3,56	5,95	7,49	9,75	2,14
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0,29	0,95	1,96	4,92	7,83	9,42	10,65	13,5	5,19
	Semainier	0	0	1,05	1,88	4,62	8,06	9,48	10,49	11	4,93
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	4,75	12,48	23,36	24	3,77
	Semainier	0	0	0	0	0	0	1,4	4,47	24	1,18
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	6,88	12,79	15,83	19,38	22,1	22,44	23	15,04
	Semainier	0	13,09	13,78	15,69	18,5	21,5	22,5	22,5	24	17,89

<b>Inactifs/Week-end</b>	<b>Percentiles</b>	<b>0 %</b>	<b>5 %</b>	<b>10 %</b>	<b>25 %</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>90 %</b>	<b>95 %</b>	<b>100 %</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	5,96	8	9,25	10,05	10,38	10,67	6,79
	Semainier	0	2,01	4,95	7	8,5	9,5	10	10	11	7,79
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0,92	3,92	7,08	11,15	11,61	12,33	4,57
	Semainier	0	0	0	2,19	4	8,19	11,08	11,74	12,5	4,91
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0,62	1,67	3	4,1	4,77	9	2,09
	Semainier	0	0	0	0,5	2	3	3,9	4,74	9,75	2,09
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,5	0,83	1,33	1,77	5,68	8,33	1,32
	Semainier	0	0	0	0	1,25	4,12	9,15	10,31	15,25	2,92
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	1,38	4,75	6,71	8,58	11,42	13	4,57
	Semainier	0	0	0	1,38	3,25	6,81	9,1	12,12	14,5	4,51
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0,33	5,92	20,5	24	24	4,67
	Semainier	0	0	0	0	0	0	1,6	12,1	24	1,61
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	2,22	11,75	17,58	20,58	23	23	23,5	14,77
	Semainier	0	7,88	10,55	16,38	18,75	21,62	23	23	24	17,88

< 15 ans/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	2,38	4,75	9,54	10,42	12,54	14,25	14,88	15,5	9,81
	Semainier	0	0	0	2,38	9,5	12,31	14,62	15,31	16	8,04
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0,12	1	1,62	2,25	2,54	2,83	1,08
	Semainier	0	0	0	0,25	1,12	2,38	3,25	3,5	3,75	1,46
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0	1	2,12	2,5	2,67	2,83	1,17
	Semainier	0	0	0	0	0,38	0,75	0,88	0,94	1	0,42
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0	0,17	0,71	0,83	0,83	0,83	0,33
	Semainier	0	0	0	0,06	0,25	0,44	0,5	0,5	0,5	0,25
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	1,12	2,25	4,88	6,17	7,46	10	11,08	12,17	6,14
	Semainier	0	0	0	0,81	5,62	8,94	10,75	11,5	12,25	5,46
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0,04	0,25	6,33	16,17	20,08	24	5,47
	Semainier	0	0	0	0	0,38	11,06	19,25	21,62	24	6,54
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	2,79	5,58	11,25	13,75	17,25	17,83	17,92	18	12,39
	Semainier	0	2,38	4,75	9,88	12,88	15,69	18,38	19,56	20,75	12

< 15 ans/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	1,12	5,33	9,04	14,25	16,38	18,5	6,53
	Semainier	0	0	0	1,88	8,88	10,44	11,25	11,62	12	6,71
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0,29	1,75	3,58	5,75	6,62	7,5	2,5
	Semainier	0	0	0	0,12	2,62	6,62	8	8,38	8,75	3,54
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0	0,08	0,54	1,25	1,54	1,83	0,44
	Semainier	0	0	0	0	0,12	1	2,38	2,94	3,5	0,83
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,04	0,25	0,46	0,75	0,88	1	0,33
	Semainier	0	0	0	0	0,12	0,25	0,62	0,81	1	0,25
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	0,5	3,83	11,79	14,58	14,96	15,33	6,14
	Semainier	0	0	0	0,88	4	5,62	9,88	11,81	13,75	4,62
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0,17	18,08	24	24	24	8,06
	Semainier	0	0	0	0	0	18	24	24	24	8
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	0	2,17	9,42	16,04	20	21	22	9,81
	Semainier	0	0	0	2,56	14,12	19,12	20	20,25	20,5	11,38

### Région 3

Actifs/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0,07	1,2	7	7,5	9	10,2	11,27	13,5	7,23
	Semainier	0	3,2	5,35	7	8	9,12	12,85	13,45	13,75	8,21
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0,83	2	4,5	5,1	7,43	14	2,94
	Semainier	0	0	0	0	2	3,75	5,1	7,72	10,75	2,49
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0,33	1	2	3,87	4,47	5,83	1,46
	Semainier	0	0	0	0,5	1	2,25	3,7	4,45	5,5	1,48
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,5	0,83	1,17	2,53	2,93	6,33	1,13
	Semainier	0	0	0	0,12	0,5	1,38	1,95	2,22	3	0,82
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0,33	5	9,33	11	12,17	12,43	13,33	7,85
	Semainier	0	0	0,5	5,75	9,5	10,5	12,2	13,62	14	7,92
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	3,83	9,47	18,07	24	3,39
	Semainier	0	0	0	0	0	1,25	10,55	16,5	24	2,73
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	2,23	10,17	11,83	13,5	14,67	16,03	18,3	19	12,77
	Semainier	0	4,93	9	11,5	14	15,5	18,6	21,28	23,25	13,35

Actifs/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	0,5	7,67	10,67	11,67	12,47	14,17	6,37
	Semainier	0	2,5	2,5	6,12	9	11	12,65	13,42	14,25	8,27
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0	2	4	7,8	10	11,17	2,87
	Semainier	0	0	0	0	2	5,88	7,5	8,85	11	3,18
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0	0,5	1,17	2,07	2,87	3,83	0,82
	Semainier	0	0	0	0	0,75	1,25	2,4	2,72	3,25	0,89
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0	0,67	1	1,87	2,47	3,5	0,81
	Semainier	0	0	0	0	0,5	1	2,6	3,65	5,75	0,97
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	1	6,17	11	11,93	13,33	15	6,13
	Semainier	0	0	0,3	4,38	9	11,5	15,9	20,5	21	8,42
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0,33	20,5	23,6	24	24	7,01
	Semainier	0	0	0	0	0	0,25	3,4	16,32	24	2,21
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	0	3,5	12,5	17	18,23	21,3	22,33	10,87
	Semainier	0	3	3	8,75	15	17,62	21,7	22,22	24	13,37

<b>Inactifs/Jours ouvrés</b>	<b>Percentiles</b>	<b>0 %</b>	<b>5 %</b>	<b>10 %</b>	<b>25 %</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>90 %</b>	<b>95 %</b>	<b>100 %</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	8	9	11,17	13,18	13,37	14	8,57
	Semainier	0	0	0	5,12	8	9,25	10,65	12,15	15	7,09
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	1,25	3,83	5,5	7,32	8,83	12	3,96
	Semainier	0	0	0	1,56	3,5	5,06	6,28	6,58	8	3,4
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0,92	3,17	4	4,85	5,02	5,33	2,64
	Semainier	0	0	0	0,69	2,12	3,31	3,85	4,76	5	2,08
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,46	0,83	1,54	2,92	3,75	5,33	1,23
	Semainier	0	0	0	0	0	1,06	2,25	2,35	4,25	0,68
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	1,79	3,33	4,88	7,12	8,26	10	3,66
	Semainier	0	0	0	0	1,25	4,31	7,15	8,56	9,75	2,51
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	0,75	20,4	24	24	3,94
	Semainier	0	0	0	0	4,62	16,56	24	24	24	7,95
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	0	15,04	19,33	21,71	22,37	22,73	24	16,4
	Semainier	0	0	0	7,31	15,88	18,75	21,52	21,76	22	13,54

<b>Inactifs/Week-end</b>	<b>Percentiles</b>	<b>0 %</b>	<b>5 %</b>	<b>10 %</b>	<b>25 %</b>	<b>50 %</b>	<b>75 %</b>	<b>90 %</b>	<b>95 %</b>	<b>100 %</b>	<b>Moyenne</b>
<b>Chambre</b>	Journalier	0	0	0	1,38	8,17	11,25	12,23	13,11	18,33	7,06
	Semainier	0	0	0	2,06	7,25	9,81	12,55	13,05	14	6,34
<b>Séjour</b>	Journalier	0	0	0	0	1,83	4,58	6,68	9,98	12,67	3,08
	Semainier	0	0	0	0,94	3,38	5,56	6,02	6,31	7,5	3,29
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0	0	0	2,17	2,92	3,82	5,22	6,33	2,02
	Semainier	0	0	0	0,88	2,5	3,06	3,83	4,56	5,75	2,24
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0,25	0,67	2,5	3,35	3,59	5,33	1,42
	Semainier	0	0	0	0	0	1,06	2,4	4,05	9,75	1,02
<b>Extérieur</b>	Journalier	0	0	0	0,88	4	6,12	9,52	9,68	9,83	4,04
	Semainier	0	0	0	0	0	4,31	5,15	6,64	9,25	2,24
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0,17	10,04	24	24	24	6,37
	Semainier	0	0	0	0,5	3,38	16,62	24	24	24	8,06
<b>Intérieur</b>	Journalier	0	0	0	8,5	17,08	19,21	21,63	22,89	24	13,59
	Semainier	0	0	0	7,38	16,62	19,12	20,33	21,02	21,5	13,7

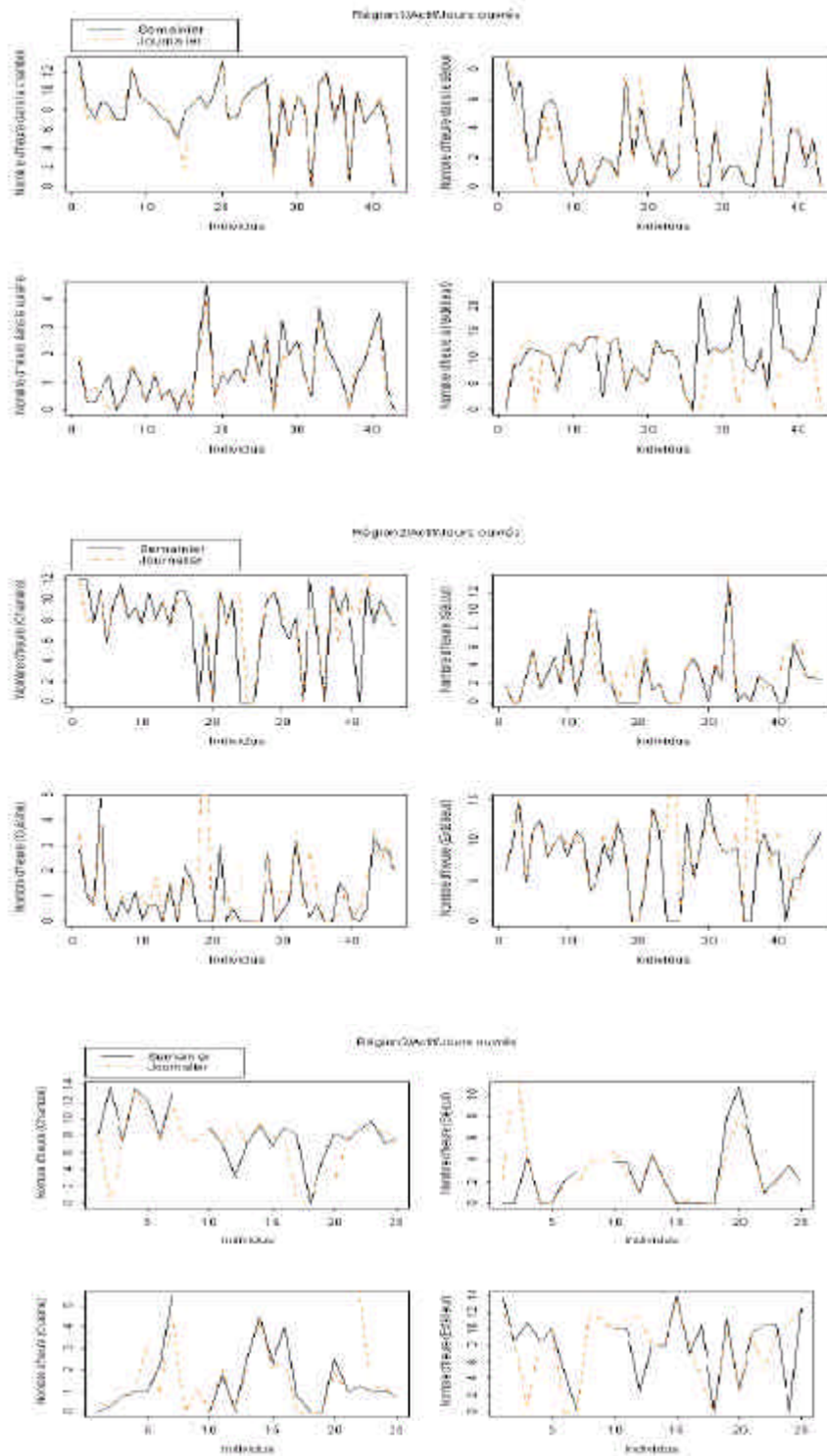


< 15 ans/Jours ouvrés	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	8,5	8,72	8,95	9,62	11	13,62	16,55	17,52	18,5	12,25
	Semainier	7,75	7,86	7,98	8,31	9,12	10,31	11,32	11,66	12	9,5
<b>Séjour</b>	Journalier	0,33	0,76	1,18	2,46	4	5,25	6	6,25	6,5	3,71
	Semainier	0,5	0,87	1,25	2,38	3,62	4,5	4,95	5,1	5,25	3,25
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0,07	0,15	0,38	0,92	1,46	1,68	1,76	1,83	0,92
	Semainier	0	0,07	0,15	0,38	0,88	1,31	1,42	1,46	1,5	0,81
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0	0,25	0,58	0,73	0,78	0,83	0,33
	Semainier	0	0,11	0,23	0,56	2,38	4,88	6,45	6,97	7,5	3,06
<b>Extérieur</b>	Journalier	1	2,05	3,1	6,25	8,08	8,38	8,75	8,88	9	6,54
	Semainier	2,25	3,11	3,98	6,56	8,62	9,44	9,78	9,89	10	7,38
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	0,25	0,7	0,85	1	0,25
	Semainier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Intérieur</b>	Journalier	14,83	14,86	14,88	14,96	15,5	17,75	20,9	21,95	23	17,21
	Semainier	14	14,11	14,22	14,56	15,38	17,44	20,02	20,89	21,75	16,62

< 15 ans/Week-end	Percentiles	0 %	5 %	10 %	25 %	50 %	75 %	90 %	95 %	100 %	Moyenne
<b>Chambre</b>	Journalier	9,5	10,02	10,55	12,12	13	13	13	13	13	12,12
	Semainier	7	7,38	7,75	8,88	10,5	12	12,9	13,2	13,5	10,38
<b>Séjour</b>	Journalier	1,67	1,72	1,77	1,92	2,75	3,71	4,08	4,21	4,33	2,88
	Semainier	2	2,08	2,15	2,38	3	4	4,9	5,2	5,5	3,38
<b>Cuisine</b>	Journalier	0	0,15	0,3	0,75	1,25	1,88	2,55	2,77	3	1,38
	Semainier	0	0,04	0,08	0,19	1,62	3,19	3,53	3,64	3,75	1,75
<b>Autres pièces et dépendances</b>	Journalier	0	0	0	0	0,25	0,58	0,73	0,78	0,83	0,33
	Semainier	0	0,07	0,15	0,38	1	2,69	4,83	5,54	6,25	2,06
<b>Extérieur</b>	Journalier	5,17	5,52	5,87	6,92	7,5	7,88	8,55	8,77	9	7,29
	Semainier	1,5	2,32	3,15	5,62	7,25	7,88	8,55	8,77	9	6,25
<b>Valeurs manquantes</b>	Journalier	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Semainier	0	0	0	0	0,12	0,31	0,43	0,46	0,5	0,19
<b>Intérieur</b>	Journalier	15	15,23	15,45	16,12	16,5	17,08	18,13	18,48	18,83	16,71
	Semainier	15	15,19	15,38	15,94	16,38	18	20,7	21,6	22,5	17,56

## Annexe 3

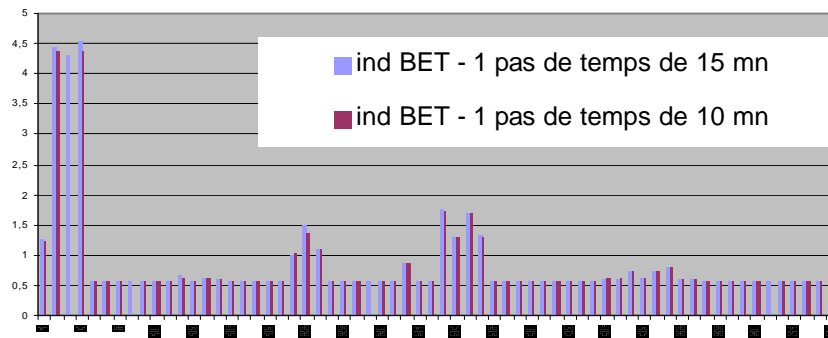
Graphiques. Illustration de la comparaison des BET journaliers et semainier chez les actifs des trois régions les jours ouvrés



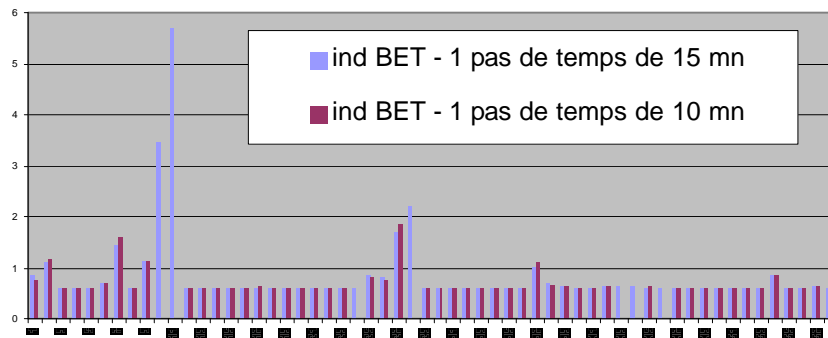
## Annexe 4

Graphiques. Comparaison des concentrations d'exposition en fonction du BET considéré (pas de temps de 15 ou 10 minutes) pour la catégorie actif dans les trois régions

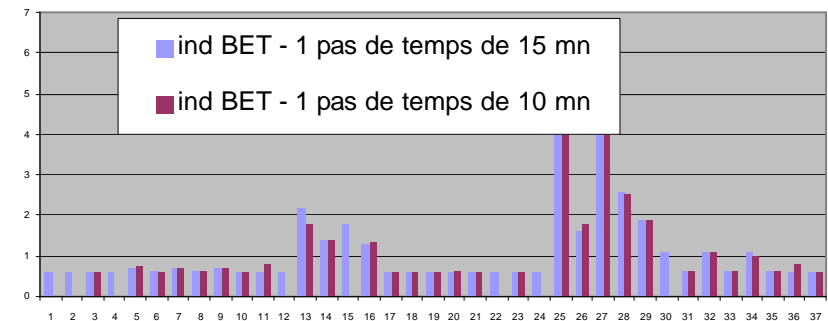
Région 1



Région 2



Région 3





## Annexe 6

La recherche bibliographique internationale sur le thème de l'estimation de l'exposition humaine aux polluants atmosphériques (intérieurs et extérieurs) a permis d'identifier environ 200 articles répartis autour des thématiques suivantes :

- des généralités sur l'exposition en tant que discipline récente, indispensable à l'épidémiologie et à l'évaluation de risque ;
- les méthodes utilisées pour l'estimation de l'exposition : méthode directe, indirecte, modélisation ;
- les relations entre exposition personnelle et mesurages micro-environnementaux
- le budget espace-temps : ses modalités de recueil et son rôle dans l'estimation de l'exposition ;
- la comparaison des approches directes et indirectes, réalisée dans 25 études ;
- des études de terrain utilisant une seule méthode.

Parmi l'ensemble de ces références, seules celles qui sont apparues majeures sont citées au cours du texte. Les autres sont signalées par thématiques en annexe 1.

### I. Principe

---

La méthode indirecte combine des mesurages micro-environnementaux et des données sur le temps passé par les individus dans les différents micro-environnements. La formule utilisée est la formule définie par W.Ott en 1980 [Ott, 1980] :

$$E = \sum_{i=1}^n C_i \times T_i$$

avec

$C_i$  = concentrations en polluants dans les différents micro-environnements fréquentés

$T_i$  = temps passé dans les différents micro-environnements

Parfois, le résultat de cette équation est divisé par la somme des  $T_i$ , afin d'obtenir une concentration d'exposition moyennée sur la durée choisie.

L'utilisation de cette formule, implique de poser plusieurs hypothèses [Jantunen, 1997] :

- il existe une homogénéité spatiale de la concentration du polluant dans chaque micro-environnement étudié ;

- il existe une stabilité temporelle de la concentration ; s'il y a des pics de concentration au cours de la période étudiée, ceux-ci ne seront pas pris en compte dans l'estimation de l'exposition car c'est la concentration moyenne qui est utilisée dans le calcul ;
- on considère que la concentration de polluant inhalée par les individus est celle enregistrée par le capteur, même si l'appareil de mesure se situe loin des individus ;
- on considère que la concentration dans le micro-environnement est la même que les individus soient présents ou non, puisque les capteurs fonctionnent en continu, le plus souvent, dans les micro-environnements étudiés

Les avantages de cette méthode sont les suivants :

- elle peut être appliquée à un grand nombre d'individus ;
- elle permet d'estimer la contribution des différents lieux à l'exposition totale ;
- elle est adaptée à l'estimation de l'exposition à l'air intérieur car le nombre de micro-environnements est limité.

## **II. Données des études**

---

### **1. Populations**

Les individus sélectionnés dans ces études sont :

- le plus souvent, des adultes actifs exclusivement [Dusseaux, Edwards, Kousa, Jurvelin, Gonzalez-Flesca, Levy, Mosqueron, Brasche, Dingle, Crump, Lee, Dockery, Gonzalez, Sisovic] ;
- parfois des sujets âgés, des étudiants, des enfants, des femmes au foyer et des malades [Harrison, Leung, Noy, Lambert, Quackenboss, Sexton, Chan, Hosein, Spengler, Waldman, Nitta].

La majorité des participants de ces études vit et travaille dans de grandes villes (Birmingham, Paris, Helsinki, Bâle, Prague, Nancy, Perth, Toronto, Brisbane, Zagreb) à l'exception d'une partie de la population de deux études qui vit en zone rurale [Leung, Chan].

Leur nombre est, le plus souvent, inférieur à 100, mais peut être plus élevé : de 200 à 800 [Edwards, Quackenboss, Lévy].

## **2. Polluants**

Les polluants les plus couramment mesurés, séparément ou simultanément selon les études sont :

- le monoxyde de carbone (CO),
- le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) ;
- les composés organiques volatils (COV, dont le benzène, le toluène, le xylène, le formaldéhyde et l'acétaldéhyde) ;
- les particules ;
- les sulfates (SO<sub>4</sub>).

## **3. Mesurages micro-environnementaux**

Les lieux fréquentés par les populations participantes sont nombreux et très hétérogènes dans leur prise en compte selon les études :

- au domicile, sur le lieu de travail, à l'extérieur, parfois dans les transports ;
- plus rarement dans certains lieux publics.

Le plus souvent, les concentrations ont été mesurées dans chacun de ces microenvironnements. Il arrive que les résultats des mesurages utilisés pour estimer l'exposition des populations n'aient pas été générés par une étude spécifique mais proviennent d'une ou plusieurs études antérieures, à une échelle locale, régionale ou nationale [Leung]. De même, une étude prend comme indicateur de concentration, la moyenne de chacun des microenvironnements et l'applique à tous les individus [Harrison].

La durée de ces mesurages correspond le plus souvent au temps total pendant lequel les participants sont équipés du capteur portatif ; dans quelques études, cette durée correspond au temps précisément passé par les individus dans chacun des microenvironnements qu'ils ont fréquentés : lieu de travail [Lévy], tous lieux [Edwards, Jurvelin, Dusseaux], domicile et travail [Mosqueron].

## **4. Budget espace-temps**

Le recueil de l'emploi du temps des participants est toujours effectué à l'aide d'un carnet individuel spécifique. Le pas de temps retenu est variable selon les études. Le plus souvent de 15 minutes, il peut également être de 30 minutes le jour et 1 heure la nuit [Levy] ou de 1 heure pendant toute la durée du mesurage [Leung, Noy, Chan]. Enfin, dans de trop nombreux cas, il n'est pas précisé.

Au final, la combinaison de toutes ces informations conduit le plus souvent à des quantifications d'exposition intégrées sur des pas de temps long, 24 heures ou plus. Seul Harrison rapporte des expositions estimées sur un pas de temps horaire pour le CO et le NO<sub>2</sub>.

### **III. Validité de la méthode indirecte**

---

#### **1. Démarche**

Pour apprécier la validité de la méthode indirecte dans l'estimation de l'exposition à divers polluants atmosphériques, les auteurs comparent les résultats fournis par cette méthode avec ceux obtenus par la méthode directe, considérée comme celle de référence.

Le fait d'utiliser ces deux méthodes pour les mêmes individus, dans les mêmes lieux, permet de les comparer et de quantifier l'éventuelle erreur d'estimation de l'exposition réalisée lors de l'utilisation de la méthode indirecte.

Différents outils statistiques ont été utilisés pour comparer les résultats obtenus à partir des deux méthodes :

- un ratio des estimations ou mesurages obtenus avec chacune des méthodes ;
- une régression linéaire multiple afin d'estimer la part de variance de l'exposition mesurée, expliquée par le résultat obtenu à l'aide de la méthode indirecte ;
- un coefficient de corrélation entre les deux séries d'estimation.

#### **2. Résultats**

##### **2.1. Ratios entre les résultats des deux méthodes**

Dans 15 études [Dusseaux, Lee, Brasche, Crump, Harrison, Gonzalez 1, Mosqueron, Quackenboss, Levy, Nitta, Gonzalez 2, Edwards, Kousa, Waldman, Sisovic], globalement, tous les auteurs sauf 1 rapportent que la concentration d'exposition obtenue par méthode directe est supérieure à celle établie par méthode indirecte (tableaux 1, 2 et 3). Pour les études pour lesquelles il est possible de calculer un ratio entre ces deux estimations, celui-ci est en moyenne de 1.34 (entre 0.65 et 5,34).

La valeur de ce ratio est indépendante du polluant considéré. Seule l'étude menée par Edwards indique que la méthode indirecte sous-estime l'exposition aux COV issus de sources extérieures, alors qu'elle surestime celle aux COV issus de sources intérieures.

En revanche, ce ratio dépend du type de personnes considérées. Par exemple, dans l'enquête menée par Harrison, pour le monoxyde de carbone, le ratio est de 1.34 chez les enfants et de 0.61 pour des asthmatiques.



**Tableau 1. Ratio (R) des estimations des concentrations d'exposition**

	<b>Benzène</b>	<b>Toluène O-xylène</b>	<b>Monoxyde de Carbone (CO)</b>	<b>Formaldéhyde Acétaldéhyde</b>	<b>Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)</b>	<b>Particules</b>
<b>Dusseaux</b>	R = 1,16	R = 1,15 R = 1,18				
<b>Lee</b>					R = 1,35	
<b>Brasche</b>					R = 1,21	
<b>Crump</b>	R = 1,28		R = 1,56	R = 1	R = 1,22	
<b>Harrison *</b>			R = 0,58-1,34			R = 0,65 – 5,34
<b>Gonzalez 1</b>	R = 2,5 R = 2			R = 1 R = 1,3		
<b>Mosqueron</b>					R = 1,12	R = 1,15
<b>Quackenboss **</b>					R = 0,99 - 2,5	
<b>Levy</b>					R = 1,05	
<b>Nitta</b>					R = 1,12	

\* selon type d'individus ; \*\*selon population et équipement ménager (gaz ou électrique)

**Tableau 2. Ratio (R) des expositions estimées par les méthodes directes et indirectes dans l'étude de Harrison**

	CO			PM 10		
	MD*	MI**	R	MD	MI	R
<b>Sujets âgés</b>	3	4	0,75	850	159	5,34
				93	142	0,65
<b>COPD</b>	3,3	3,6	0,91	206	139	1,48
<b>Asthmatiques</b>	2,7	4,4	0,61	146	167	0,87
<b>Enfants</b>	5,8	4,3	1,34	448	292	1,53
<b>Sujets sains</b>	3,7	6,3	0,58	191	178	1,07

**Tableau 3. Ratio (R) des expositions estimées au NO<sub>2</sub> par les méthodes directes et indirectes dans l'étude de Quackenboss**

			MD*	MI**	R	
<b>Eté</b>	<b>Gaz</b>	<b>Etudiant</b>	21,5	21	1,02	
		<b>Actif</b>	26	17,3	1,5	
		<b>Autre</b>	21,8	21,9	0,99	
	<b>Electrique</b>	<b>Etudiant</b>	15,2	9,2	1,65	
		<b>Actif</b>	18,2	8	2,2	
		<b>Autre</b>	17,4	9,6	1,81	
	<b>Hiver</b>	<b>Gaz</b>	<b>Etudiant</b>	36,6	34,1	1,07
			<b>Actif</b>	45	31,9	1,41
			<b>Autre</b>	43,3	36	1,20
<b>Electrique</b>		<b>Etudiant</b>	12,8	9,5	1,34	
		<b>Actif</b>	14,8	5,9	2,50	
		<b>Autre</b>	11,7	6,8	1,72	

\*MD=méthode directe ; \*\*MI=méthode indirecte

Ce ratio dépend également d'autres facteurs, isolés ou en combinaison :

- l'activité des personnes ;
- le type d'énergie pour la cuisinière (gaz ou électrique) ;
- la saison ;
- le tabagisme.

A titre d'exemples, l'étude d'Harrison indique que pour les sujets âgés, le ratio entre la valeur fournie par la méthode directe et celle de la méthode indirecte est de 5,34 pour les particules chez les fumeurs, alors qu'il est de 0,65 pour les non fumeurs ; dans l'étude de Quackenboss, le ratio est de 1,34 en hiver pour le NO<sub>2</sub> chez les étudiants équipés d'une cuisinière électrique, alors qu'il est de 2,50 dans les mêmes conditions, chez les actifs.

## **2.2. Corrélation entre les résultats des deux méthodes**

Neuf auteurs [Leung, Waldman, Harrison, Levy, Brasche, Quackenboss, Hosein, Lee, Nitta] ont calculé le coefficient de corrélation entre les résultats des deux méthodes : il se situe entre 0,18 et 0,92.

Les facteurs expliquant sa variabilité sont identiques à ceux dégagés lors de l'analyse des ratios : la saison [Waldman], le type d'individus, l'équipement ménager. En revanche, le type de polluant semble avoir une influence. Par exemple, le coefficient de corrélation est plus élevé pour le NO<sub>2</sub> (0,78) que pour les particules (0,44) [Hosein].

## **2.3. Régression linéaire multiple**

Dix auteurs [Jurvelin, Dingle, Kousa, Mosqueron, Chan, Hosein, Sexton, Spengler, Dockery] ont calculé la part de variabilité de l'exposition mesurée par la méthode directe, expliquée par la méthode indirecte. Cette proportion s'étend de 46 % à 88 % selon les études. Elle varie en fonction de différents facteurs :

- le nombre de micro-environnements pris en compte : la part de variabilité diminue selon que l'on considère tous les lieux intérieurs ou que l'on ne tient compte que des pièces principales du domicile : de 52 % à 46 % [Dingle], 64 % à 54 % [Spengler] ;
- le type de polluant : pour le NO<sub>2</sub> la part de variabilité est comprise entre 78 et 81 % [Mosqueron, Hosein] ; pour le SO<sub>2</sub>, elle est de 75 et 76 % [Dockery, Hosein] ; pour les particules cette part est respectivement de 57 % [Dockery] et 86 % [Mosqueron].

Il serait intéressant d'analyser les raisons des concordances et des discordances entre polluants et pour un même polluant.

- le type d'individus sans que la part de variabilité ait été quantifiée [Waldman].

### 3. Discussion

Les différences observées entre les deux méthodes trouvent, selon les auteurs, des explications dans des arguments qui ont trait aux limites de l'estimation de l'exposition par la méthode indirecte, celle-ci se fondant toujours sur la même formule mathématique. La description des résultats a déjà pointé des éléments pouvant être à l'origine de ces différences : (i) la saison, (ii) la nature du polluant, (iii) le type de personne, (iv) l'équipement ménager et (v) le nombre de micro-environnements pris en compte. L'exploration de ces facteurs explicatifs reste essentiellement au niveau du constat.

Au delà de ce constat, d'autres explications sont proposées par les auteurs. Elles portent sur les modalités d'échantillonnage des polluants, l'indicateur de concentration environnementale, le « personal cloud » et le BETA.

#### 3.1. Modalités d'échantillonnage des polluants

##### - **Manque de représentativité temporelle des mesurages micro-environnementaux :**

Certains auteurs [Dusseaux, Gonzalez-Flesca 1, Brasche, Crump, Waldman, Sisovic] expliquent l'écart entre les résultats de la méthode directe et indirecte par le fait que les mesurages, utilisés dans la méthode indirecte, ont lieu pendant une durée plus longue que celle passée par les individus dans les lieux étudiés ; ces mesurages fournissent alors des valeurs moyennes de concentration qui ne correspondent pas à la concentration à laquelle les individus ont été exposés pendant leur présence dans le lieu. Ceci est surtout valable lorsque les individus ont des activités qui entraînent une augmentation de la concentration du polluant étudié, tels que les fumeurs [Leung], les utilisateurs de cuisinières à gaz [Levy], les travailleurs en extérieur [Gonzalez-Flesca 1].

- **Erreurs de mesurage liée à une défaillance technique** [Levy], tant au moment du prélèvement que lors de la phase analytique (extraction du polluant par exemple).

#### 3.2. Indicateur de concentration

Les auteurs n'ont pas toujours utilisé la valeur précise mesurée dans les micro-environnements fréquentés par chaque individu mais la moyenne des concentrations (par type de micro-environnement) trouvées chez tous les participants [Harrison] ou une moyenne nationale [Leung]. L'influence sur l'estimation de l'exposition n'est cependant pas décrite.

#### 3.3. Personal cloud

Les capteurs micro-environnementaux, souvent situés à une certaine distance des individus, mesurent des concentrations différentes de celles à laquelle sont exposés les individus

[Harrison, Mosqueron] ; ce phénomène a été mis en évidence dans quelques études [Mc Bride, Monn, Rodes] et porte le nom de « personal cloud ». Ceci est encore plus évident lorsque les individus font des activités émettrices de polluants, dont la concentration sera sous-estimée par un capteur situé à distance (cas des COV chez Edwards).

### **3.4. Budget espace-temps (BETA)**

La controverse est importante entre les auteurs sur la nécessité de disposer d'un budget espace-temps établi de manière fine :

- Dusseaux précise que l'inexactitude des informations fournies par les participants sur leur budget espace-temps peut être une source d'erreur dans le calcul de l'exposition ;
- Mage mentionne le « Hawthorne effect » qui se traduit par une modification des comportements des individus du fait de leur participation à une étude ; ce phénomène peut être à l'origine de BETA non fiables car ne correspondant pas aux activités habituelles des individus ;
- D'autres auteurs [Noy, Dingle, Chan, Mosqueron, Jurvelin, Dockery, Hosein, Nitta] ont testé la méthode indirecte sans prendre en compte le BETA des individus. Ils ont comparé une ou plusieurs valeurs micro-environnementales mesurées dans les différents micro-environnements fréquentés par les individus avec la valeur fournie par le capteur personnel de chaque individu et concluent que l'exposition personnelle peut être estimée par une ou plusieurs concentrations micro-environnementales, bien choisies :
  - la concentration d'une pièce du domicile : celle du salon ou de la cuisine [Dingle], celle de la chambre [Chan] ou celle d'une pièce non précisée [Jurvelin, Hosein, Dockery et Nitta] ;
  - la moyenne des concentrations de plusieurs pièces, cuisine, chambre et salon [Noy] ;
  - la somme des mesures du salon, du travail et de l'extérieur [Mosqueron] lorsque l'on s'attache à estimer l'exposition totale journalière ;
  - la somme des concentrations au domicile et en ville [Hosein].

Selon deux auteurs [Chan et Hosein], cette méthode n'est valable que pour la population qu'ils ont étudiée, à savoir des individus passant la majeure partie de leur temps au domicile ; les autres auteurs ont étudié des individus ayant des modes de vie variés (adultes actifs, enfants scolarisés), mais passant aussi la majeure partie de leur temps au domicile, comme une majorité de la population dans de nombreux pays.

**Tableau 4. Pourcentage de variation de l'exposition personnelle expliquée par des mesures environnementales**

	<b>Particules</b>	<b>Dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)</b>	<b>Formaldéhyde Acétaldéhyde</b>	<b>Sulfates</b>
Concentration salon			60 ( <i>Dingle</i> )	
Concentration cuisine			52 ( <i>Dingle</i> )	
Concentration chambre		70 ( <i>Chan</i> )		
Concentration lieux intérieurs			59 ( <i>Dingle</i> )	
Concentration pièce du domicile	70 ( <i>Hosein</i> ) 51 ( <i>Dockery</i> )	Femmes au foyer : 56 Actifs : 20 ( <i>Nitta</i> )	61 ( <i>Jurvelin</i> ) 78	73 ( <i>Dockery</i> )
Moyenne des concentrations de 3 pièces (chambre, cuisine, salon)		Mères : 72-83 Enfants : 58-81 ( <i>Noy</i> )		
Somme concentration salon, travail, extérieur	80 ( <i>Mosqueron</i> )			
Somme des concentrations au domicile et en ville		81 ( <i>Hosein</i> )		75 ( <i>Hosein</i> )

## IV. Conclusion

Cette analyse bibliographique montre que la mise en œuvre de la méthode indirecte pour estimer l'exposition des populations est effectuée de manière semblable par l'ensemble des auteurs, même si ici ou là quelques différences apparaissent.

La validité de cette méthode est assez controversée. De nombreux facteurs sont à considérer afin de pouvoir prédire avec confiance la concentration d'exposition personnelle des gens. Ainsi, le budget espace-temps, les modalités d'échantillonnage des polluants, la nature du polluant, le type d'individu sont autant de facteurs sur lesquels doit porter l'exploitation des résultats de la campagne pilote.

Il est à noter que l'erreur d'estimation de l'exposition, réalisée lors de l'utilisation de cette méthode, n'a été quantifiée par aucun auteur.

Cette controverse est peut être d'autant plus forte que la comparaison porte sur une prise en compte de l'ensemble des micro-environnements fréquentés par les personnes dans la journée. L'analyse réalisée dans ce travail ne portant que sur l'habitat permettra d'éclairer une partie de cette controverse.

## V. Références

---

Brasche S, Witthauer J, Bischof W, Lee K, and Spengler JD. Determination of NO<sub>2</sub> exposure--personal passive sampling versus indoor measurement. *Zentralbl Hyg Umweltmed* 201 (3):229-239, 1998.

Chan CC, Yanagisawa Y, and Spengler J. D.. Personal and indoor/outdoor nitrogen dioxide exposure assessments of 23 homes in Taiwan. *Toxicol Ind Health* 6 (1):173-182, 1990.

Crump DR, Bland BH, Mann HS, Brown VM, and Ross DI. Personal exposure to air pollutants in Hertfordshire, England. *8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Edinburgh, Scotland* 5:288-293, 1999.

Dingle P, Shuwei H and Murray F. Personal exposure to formaldehyde. Proceedings of Indoor Air 93. Anonymous. Anonymous. 2:293-298, 1993.

Dockery DW and Spengler JD. Personal exposure to respirable particulates and sulfates. *J Air Pollut Control Assoc* 31 (2):153-159, 1981.

Dusseaux M, Laurent AM, Le Moullec Y, Person A and Momas I. Evaluation de l'exposition personnelle au benzène d'une population francilienne représentative du secteur tertiaire. Anonymous. Anonymous. Programme Primequal : convention n° 99.62034, 2001.

Edwards RD, Jurvelin J, Saarela K and Jantunen M. VOC concentrations measured in personal samples and residential indoor, outdoor and workplace microenvironments in EXPOLIS-Helsinki, Finland. *Atmos Environ* 35:4531-4543, 2001.

Gonzales-Flesca N, Cicolella A, Bates MS and Baskin E. Pilot study of personal, indoor and outdoor exposure to benzene, formaldehyde and acetaldehyde. *Environ Sci Pollut Res Int* 6 (2):95-102, 1999.

Gonzales-Flesca N, Bates MS, Delmas V and Cocheo V. Benzene exposure assessment at indoor, outdoor and personal levels. The French contribution to the life Macbeth programme. *Environ Monit Assess* 65:59-67, 2000.

Harrison RM, Thornton CA, Lawrence RG, Mark D, Kinnersley RP and Ayres JG. Personal exposure monitoring of particulate matter, nitrogen dioxide, and carbon monoxide, including susceptible groups. *Occup Environ Med* 59:671-679, 2002.

Hosein R, Corey P, Silverman F, Ayiomamitis A, Urch R and Alexis N. Predictive models based on personal, indoor and outdoor air pollution exposure. *Indoor Air* 1 (4):457-464, 1991.

Jantunen M, Jaakola JJK, Kryzanowski M. Assessment of exposure to indoor air pollutants. WHO-ECEH Working group ; 1997

Jurvelin J, Vartiainen M, Jantunen M and Pasanen P. Personal Exposure Levels and Microenvironmental Concentrations of Formaldehyde and Acetaldehyde in the Helsinki Metropolitan Area, Finland. *J Air Waste Manage Assoc* 51:17-24, 2001.

Kousa Monn C, Rotko T, Alm S, Oglesby L and Jantunen MJ. Personal exposures to NO<sub>2</sub> in the EXPOLIS-study: relation to residential indoor, outdoor and workplace concentrations in Basel, Helsinki and Prague. *Atmos Environ* 35:3405-3412, 2001.

Lee K, Yang W and Bofinger ND. Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposures in Australia. *J Air Waste Manage Assoc* 50 (10):1739-1744, 2000.

Leung PL and Harrison RM. Evaluation of personal exposure to monoaromatic hydrocarbons. *Occup Environ Med* 55:24-257, 1998.

Levy JI. Impact of residential NO<sub>2</sub> exposure on personal exposure : an international study. *J Air Waste Manage Assoc* 48:553-560, 1998.

Mage DA. Comparison of the direct and indirect methods of human exposure. Report on a joint workshop of risk assessment for the indoor environment ; 1991 ; Kloster Banz, Germany.

McBride SJ, Ferro AR, Ott WR, Switzer P, Hildemann L.M. Investigations of the proximity effect for pollutants in the indoor environment *J.Expo.Anal.Environ.Epidemiol.* 9 (6):602-621; 1999.

Monn C. Exposure assessment of air pollutants: a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, NO<sub>2</sub> and ozone *Atmos Environ.* 35 (1):1-32 ; 2001

Mosqueron L, Momas I and Le Moullec Y. Personal exposure of Paris office workers to nitrogen dioxide and fine particles. *Occup Environ Med* 59 (8):550-555, 2002.

Nitta H and Maeda K. Personal exposure monitoring to NO<sub>2</sub>. *Environ Int* 8:243-248, 2003.

Noy D, Brunekreef B, Boleij JS and Houthuijs D. The assessment of personal exposure to NO<sub>2</sub> in epidemiological studies. *Atmos Environ* 24 A:2903-2909, 1990.

Ott, WR. Models of human exposure to air pollution. Report 32. 1980.

Persily AK. Carbon monoxide dispersion in residential buildings: literature review and technical analysis. *National Institute of Standards and Technology*, 71p, October 1996

Quackenboss JJ, Spengler JD, Kanarek MS Letz R and Duffy CP. Personal exposure to NO<sub>2</sub>: relationship to indoor / outdoor air quality and activity patterns. *Environ Sci Technol* 20:775-783, 1986.

Rodes CF, Camens RM, Wiener RW. The significance and characteristics of the personal activity cloud on exposure assessment measurements for indoor contaminants. *Indoor Air* 2:123-145; 1991.

Schneider T. Measuring Strategies and Monitoring of the Indoor Environment. *J Environ Monit* 1999, 1, 427-434.

Sexton K, Spengler JD and Treitman RD. Personal exposure to respirable particles: a case study in waterbury, Vermont. *Atmos Environ* 18 (7):1385-1398, 1984.

Sisovic-Fugas M and Segal K. Assessment of human inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 6 (4):439-447, 1996.



Spengler J, Schwab M, Ryan PB, Colome S, Wilson AL, Billick I and Becker E. Personal exposure to nitrogen dioxide in the Los Angeles Basin. *J Air Waste Manage Assoc* 44 (1):39-47, 1994.

Waldman JM, Lioy PJ, Greenberg A and Butler JP. Analysis of human exposure to benzo(a)pyrene via inhalation and food ingestion in the Total Human Environmental Exposure Study (THEES). *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1 (2):193-225, 1991.

Wallace LA, Pellizzari ED, Hartwell TD, Davis V, Michael LC, Whitmore RW. The Influence of Personal Activities on Exposure to Volatile Organic Compounds. *Environ Res* 1989, 50, 37-55.

## VI. Bibliographie complémentaire

---

### Généralités sur l'exposition

Ashmore M, Loth K. Assessment of personal exposure to air pollution: a review of current knowledge and research needs for the UK. London, UK ; Imperial College Science and Technology. 1994. Ref Type: Report.

Brunekreef B, Noy D, Clausing P. Variability of Exposure Measurements in Environmental Epidemiology. *Am J Epidemiol* 1987, 125, 892-898.

Buck RJ, Hammerstrom K, Ryan PB. Estimating Long-Term Exposures From Short-Term Measurements. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1995, 5, 359-373.

Dellarco M, Gutschmidt K, Kjellstrom T. Summary Report the Joint WHO/IOMEH Workshop on Human Exposure Assessment in Environmental Health Decision-Making. *Cent Eur J Public Health* 1998, 6, 71-73.

Georgopoulos PG, Lioy PJ. Conceptual and Theoretical Aspects of Exposure and Dose Assessment. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1994, 4, 253-285.

Hattermer-Frey H. A, Travis CC. Environmental Partitioning and Human Exposure. *Env Res* 1990, 53, 221-232.

Heederik D, Kromhout H, Burema J. Assessment of Long-Term Exposures to Toxic Substances in Air. *Ann Occup Hyg* 1991, 35, 671-674.

Lioy PJ. In-Depth Exposure Assessments. *JAPCA* 1987, 37, 791-793.

Lioy PJ. Human Exposure Assessment: a Graduate Level Course. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1991, 1, 271-281.

Lioy PJ. Exposure Analysis and Assessment in the 21<sup>st</sup> Century. *Inhal Toxicol* 1999, 11, 623-636.

Keenan R, Finley B, Price P. Exposure Assessment. *Risk Anal* 1994, 14.

Lioy PJ, Pellizzari E. Conceptual Framework for Designing a National Survey of Human Exposure. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1995, 6, 425-444.

Lioy PJ. The 1998 ISEA Wesolowski Award Lecture. Exposure Analysis: Reflections on Its Growth and Aspirations for Its Future. International Society of Exposure Analysis. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1999, 9, 273-281.

Mage DT. Commentary: Defining Exposure and Related Concepts. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1998, 8, 117-128.

McKone TE. The Rise of Exposure Assessment Among the Risk Sciences: an Evaluation Through Case Studies. *Inhal Toxicol* 1999, 11, 611-622.

Ott WR. Concepts of Human Exposure to Air Pollution. *Environ Int* 1982, 7, 179-196.

Ott WR. Human Exposure Assessment: the Birth of a New Science. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1995, 5, 449-472.

Tielemans E, Marquart H, de Cock J, Groenewold M, van Hemmen J. A Proposal for Evaluation of Exposure Data. *Ann Occup Hyg* 2002, 46, 275-277.

US EPA Exposure Factors Handbook. *Federal Register* 1989.

US EPA Guidelines for Exposure Assessment. *Federal Register* 1992, L-4129.57 (104), 22888-22938.

Kromhout H, Tongeren M. How Important Is Personal Exposure Assessment in the Epidemiology of Air Pollutants? *Occup Environ Med* 2003, 60, 143-144.

Walker KD, Evans JS, MacIntosh D. Use of Expert Judgement in Exposure Assessment. Part I. Characterization of Personal Exposure to Benzene. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2001, 11, 308-322.

Walker KD, Catalano P, Hammitt JK, Evans JS. Use of Expert Judgment in Exposure Assessment: Part 2. Calibration of Expert Judgments About Personal Exposures to Benzene. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2003, 13, 1-16.

Wallace LA. Decade of Studies of Human Exposure: What Have We Learned? *Risk Anal* 1993, 13, 135-139.

Wallace LA, Duan N, Ziegenfus R. Can Long-Term Exposure Distributions Be Predicted From Short-Term Measurements. *Risk Anal* 1994, 14, 75-85.

Whitmyre GK, Driver JH, Ginevan ME, Tardiff RG, Baker SR. Human Exposure Assessment. I: Understanding the Uncertainties. *Toxicol Ind Health* 1992, 8, 297-320.

Zartarian VG, Ott WR, Duan N. A quantitative definitions of exposure and related concepts. *J Clean Technol Environ Toxicol Occup Med*, 1998, 7(3):269-295.

### **Méthodes d'estimation de l'exposition**

Austin BS, Greenfield SM, Behar JV, Weir BR, Anderson GA. Modeling Air Quality and Human Exposure in the Indoor Environment; a Review of the Current State of the Science. *Environ Sci Technol* 1992.

Behar JV, Blancato JN, Pandian MD, Thomas J. Modeling of Human Exposure/Dose to Benzene. *Modeling of Indoor Air Quality and Exposure, ASTM STP 1993, 1205*, 280-290.

Buck RJ, Hammerstrom K, Ryan PB. Estimating Long-Term Exposures From Short-Term Measurements. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1995, 5, 359-373.

Contant CF, Stock TH, Holguin AH *et al.* Empirical models for estimating individual exposures to air pollutants in a health effects study. National Symposium on recent advances in Pollutant monitoring of ambient air and stationary sources[EPA-600/9-84-001], 206-219. 1984. Ref Type: Conference Proceeding.

Contant CF, Stock TH, Buffler PA, Holguin AH, Gehan BM, Kotchmar DJ. The Estimation of Personal Exposures to Air Pollutants for a Community-Based Study of Health Effects in Asthmatics. Exposure Model. *J Air Pollut Control Assoc* 1987, 37, 587-594.

Cox BG, Mage DT, Immermann FW. Sample Design Considerations for Indoor Air Exposure Surveys. *JAPCA* 1988, 38, 1266-1270.

Dimitroulopoulou C, Ashmore MR, Byrne MA *et al.* Modeling of Indoor Exposure to NO<sub>2</sub> in the UK. *Atmos Environ* 2000, 35, 269-279.

Duan N. Models for Human Exposure to Air Pollution. *Environ Int* 1982, 8, 305.

Duan N. Stochastic Microenvironment Models for Air Pollution Exposure. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1991, 1, 235-257.

Duan N, Mage DT. Combination of Direct and Indirect Approaches for Exposure Assessment. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1997, 7, 439-470.

Furtaw EJ Jr. An Overview of Human Exposure Modeling Activities at the USEPA's National Exposure Research Laboratory. *Toxicol. Ind. Health* 2001, 17, 302-314.

Hanninen O, Kruize H, Lebet E, Jantunen M. EXPOLIS Simulation Model: PM<sub>2.5</sub> Application and Comparison With Measurements in Helsinki. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2003, 13, 74-85.

Hosein R, Corey P, Silverman F, Ayiomamitis A, Urch R, Alexis N. Predictive Models Based on Personal, Indoor and Outdoor Air Pollution Exposure. *Indoor Air* 1991, 1, 457-464.

Keenan R, Finley B, Price P. Exposure Assessment. *Risk Anal* 1994, 14.

Klepeis NE. An Introduction to the Indirect Exposure Assessment Approach: Modeling Human Exposure Using Microenvironmental Measurements and the Recent National Human Activity Pattern Survey. *Environ Health Perspect* 1999, 107 Suppl 2, 365-374.

Kromhout H, Tongeren M. How Important Is Personal Exposure Assessment in the Epidemiology of Air Pollutants? *Occup Environ Med* 2003, 60, 143-144.

Kruize H, Hanninen O, Breugelmans O, Lebet E, Jantunen M. Description and Demonstration of the EXPOLIS Simulation Model: Two Examples of Modeling Population Exposure to Particulate Matter. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2003, 13, 87-99.

Leaderer BP, Zagraniski RT, Berwick M, Stolwijk JA. Assessment of Exposure to Indoor Air Contaminants From Combustion Sources: Methodology and Application. *Am J Epidemiol* 1986, 124, 275-289.

Lioy PJ. Measurement Methods for Human Exposure Analysis. *Environ Health Perspect* 1995, 103.

MacIntosh DL, Xue J, Ozkaynak H, Spengler JD, Ryan PB. A Population-Based Exposure Model for Benzene. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1995, 5, 375-403.

Ott WR, Thomas J, Mage D, Wallace L. Validation of the Simulation of Human Activity and Pollutant Exposure (SHAPE) Model Using Paired Days From the Denver, CO Field Study. *Atmos Environ* 1988, 22, 2101-2113.

Ott WR, Mage DT. Comparison of Microenvironmental CO Concentrations in Two Cities for Human Exposure Modeling. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1992, 2, 249-267.

Pandian MD, Ott WR, Behar JV. Residential Air Exchange Rates for Use in Indoor Air and Exposure Modeling Studies. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1993, 3, 407-416.

Quackenboss JJ, Krzyzanowski M, Lebowitz MD. Exposure Assessment Approaches to Evaluate Respiratory Health Effects of Particulate Matter and Nitrogen Dioxide. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1991, 1, 83-107.

Sexton K, Ryan PB. Assessment of Human Exposure to Air Pollution: Methods, Measurement and Models. In *Air Pollution, the Automobile and the Public Health*; National Academy Press: 1986.

Switzer P, Ott WR, Willits NH. Averaging Time Modeling of Exposure Simulation With Application to the El Camino Real Vehicle Data. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1991, 1, 109-121.

### **Les B.E.T.A**

Edwards RD, Roy A, Adgate JL, Pellizzari ED, Quackenboss J, Sexton K, Lioy PJ. Quantitative Analysis of Children's Microactivity Patterns: The Minnesota Children's Pesticide Exposure Study. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2001, 11, 501-509.

Elgethun K, Fenske RA, Yost MG, Palcisko GJ. Time-Location Analysis for Exposure Assessment Studies of Children Using a Novel Global Positioning System Instrument. *Environ Health Perspect* 2003, 111, 115-122.

Freeman N, Lioy PJ, Waldman J. Design and Evaluation of a Location and Activity Log Used for Assessing Personal Exposure to Air Pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1993, 1, 327-338.

Freeman NC, Lioy PJ, Pellizzari E, Zelon H, Thomas K, Clayton A, Quackenboss J. Responses to the Region 5 NHEXAS Time/Activity Diary. National Human Exposure Assessment Survey. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1999, 9, 414-426.

Johnson T, McCoy M, Capel JE, Wijnberg L, Ollison W. A comparison of ten time-activity databases: effects of geographic location, temperature, demographic group and diary recall method. Proceedings

of the 1992 International Conference on Tropospheric Ozone; Air and Waste Management Association. 1992. Ref Type: Conference Proceeding.

Leech JA, Nelson WC, Burnett RT, Aaron S, Raizenne ME. It's About Time: a Comparison of Canadian and American Time-Activity Patterns. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2002, 12, 427-432.

Leech JA, Wilby K, McMullen E, Laporte K. The Canadian Human Activity Pattern Survey: Reports of Methods and Population Surveyed. *Chronic Dis Can* 1996, 17 (3/4), 118-123.

Moschandreas DJ. Exposure to Pollutants and Daily Time Budgets of People. *Bull N Y Acad Med* 1981, 57, 845-859.

Moschandreas DJ, Relwani S. The Shadow Sensor: an Electronic Activity Pattern Sensor. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1991, 1, 357-368.

Phillips ML, Hall TA, Esmen NA, Lynch R, Johnson DL. Use of Global Positioning System Technology to Track Subject's Location During Environmental Exposure Sampling. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2001, 11, 207-215.

Robinson JP, Presser S, Nelson W. Estimating Exposure to Pollutants Through Human Activity Pattern Data : a National Micro-Behavioral Approach. *US EPA* 1992, contract n° 816183-02-0.

Robinson JP. Time-Diary Research and Human Exposure Assessment: Some Methodological Considerations. *Atmos Environ* 1988, 22, 2085-2092.

Robinson JP, Silvers A. Measuring Potential Exposure to Environmental Pollutants: Time Spent With Soil and Time Spent Indoors. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 2000, 10, 341-354.

Schwab M, Colome SD, Spengler JD, Ryan PB, Billick IH. Activity Patterns Applied to Pollutant Exposure Assessment: Data From a Personal Monitoring Study in Los Angeles. *Toxicol Ind Health* 1990, 6, 517-532.

Thomas J, Behar JV. Basic Activity Patterns Structure for Modeling Pollution Exposure. NTIS No. PB89-166599[*Proceedings of the Research Planning Conference on Human Activity Patterns*, Environmental Research Center, University of Nevada, Las Vegas, Nevada,]. 1989. Ref Type: Conference Proceeding.

Waldman J, Bilder SM, Freeman NCG, Friedman M. A Portable Data Logger to Evaluate Recall-Based-Time-Use Measures. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1993, 3, 39-48.

Zartarian VG, Cornejo CS, Molina S, Valadez OF, Leckie JO. A Pilot Study to Collect Micro-Activity Data of Two- to Four-Year-Old Farm Labor Children in Salinas Valley, California. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1995, 5, 21-34.

### **Etudes de terrain utilisant une seule méthode**

Akland GG, Hartwell TD, Johnson TR, Whitmore RW. Measuring Human Exposure to Carbon Monoxide in Washington, DC and Denver, Colorado, During the Winter of 1982-1983. *Environ Sci Technol* 1985, 19, 911-918.

Alm S, Mukala K, Jantunen MJ. Personal Carbon Monoxide Exposures of Preschool Children in Helsinki, Finland: Levels and Determinants. *Atmos Environ* 2000, 34, 277-285.

Carrer P, Alcini D, Cavallo D, Bollini D, Ghalandar R, Lovato L, Vercelli F, Visigalli F, Maroni M. Daily personal exposure to air pollutants of office workers in Milano. 1998. Ref Type: Conference Proceeding.

Cavallo D, Alcini D, Carrer P, Basso A, Bollini D, Lovato L, Vercelli F, Visigalli F, Maroni M. Exposure to Air Pollutants in Home of Subjects Living in Milan. *Healthy buildings* 1997, 3, 141.

Chau CK, Tu EY, Chan DW, Burnett J. Estimating the Total Exposure to Air Pollutants for Different Population Age Groups in Hong Kong. *Environ Int* 2002, 27, 617-630.

Clausing P, Mak JK, Spengler JD, Letz R. Personal NO<sub>2</sub> Exposure of High School Students. *Environ Int* 1986, 12, 413-417.

Gilli G, Scursatone E, Bono R. Geographical Distribution of Benzene in Air in Northwestern Italy and Personal Exposure. *Environ Health Perspect* 1996, 104, 1137-1140.

Goldstein I, Hartel D, Andrews L. Indoor exposure of asthmatics to NO<sub>2</sub>. Proceedings of the 3rd International Conference on Indoor Air and Climate, Stockholm, Sweden. 2, 269-274. 1984. Ref Type: Conference Proceeding

Goldstein IF, Andrews LR, Hartel D. Assessment of Human Exposure to NO<sub>2</sub>, CO and Respirable Particulates in New York Inner City Residences. *Atmos Environ* 1988, 22, 2127-2139.

Hartwell TD, Carlisle AC, Michie RMJ, Whitmore RW, Zelon HS, Whitehurst DA. A study of carbon monoxide exposure of the residents in Washington, DC. 121.4. 1984. Ref Type: Conference Proceeding.

Hertel O, Jensen SS, Andersen HV, Palmgren F, Wahlin P, Skov H, Nielsen IV, Sorensen M, Loft S, Raaschou-Nielsen O. Human Exposure to Traffic Pollution. Experience From Danish Studies. *Pure Appl Chem* 2001, 73, 137-145.

Jaakkola MS, Jaakkola JJ. Assessment of Exposure to Environmental Tobacco Smoke. *Eur Respir J* 1997, 10, 2384-2397.

Johnson T. A study of personal exposure to carbon monoxide in Denver, Colorado. 121.3. 1984. Ref Type: Conference Proceeding.

### **Relation exposition personnelle / mesurages micro-environnementaux**

Alm S, Mukala K, Jantunen MJ. Personal Carbon Monoxide Exposures of Preschool Children in Helsinki, Finland : Levels and Determinants. *Atmos Environ* 2000, 34, 277-285.

Endo Y, Miyazaki T, Hikita Y, Azuma M, Ikeda H, Fukunaga K, Endo G. Sampling Methods and Residential Factors Affecting Formaldehyde Concentration in Indoor Air. *Tohoku J. Exp. Med.* 2001, 195, 227-236.

Lange JH. Are Personal and Static Samples Related? *Occup. Environ. Med.* 2003, 60, 224-225.

Liu LJ, Koutrakis P, Suh HH, Mulik JD, Burton RM. Use of Personal Measurements for Ozone Exposure Assessment: a Pilot Study. *Environ Health Perspect* 1993, 101, 318-324.

Mann HS, Crump DR, Brown VM. The Use of Diffusive Samplers to Measure Personal Exposure and Area Concentrations of VOCs Including Formaldehyde. *Healthy buildings* 1997, 3, 135-140.

Rea AW, Zufall MJ, Williams RW, Sheldon L, Howard-Reed C. The Influence of Human Activity Patterns on Personal PM Exposure: a Comparative Analysis of Filter-Based and Continuous Particle Measurements. *J Air Waste Manage Assoc* 2001, 51, 1271-1279.

Sisovic-Fugas M and Segal K. Assessment of human inhalation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 6 (4):439-447, 1996.

Spengler J, Schwab M, Ryan PB, Colome S, Wilson AL, Billick I and Becker E. Personal exposure to nitrogen dioxide in the Los Angeles Basin. *J Air Waste Manage Assoc* 44 (1):39-47, 1994.

Ullrich D, Brenske KR, Heinrich J, Hoffmann K, Ung L, Seifert B. Volatile Organic Compounds: Comparison of Personal Exposure and Indoor Air Quality Measurements. *7th International conference on Indoor Air Quality and Climate, Nagoya, Japan* 1996, 1, 301-306.

Waldman JM, Liroy PJ, Greenberg A and Butler JP. Analysis of human exposure to benzo(a)pyrene via inhalation and food ingestion in the Total Human Environmental Exposure Study (THEES). *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1 (2):193-225, 1991.

Wallace L. Personal Exposures, Indoor and Outdoor Air Concentrations and Exhaled Breath Concentrations of Selected Volatile Organic Compounds Measured for 600 Residents of New Jersey, North Dakota, North Carolina and California. *Toxicol Environ Chem* 1986, 12, 215-236.

Wallace LA, Nelson W, Ziegenfus R, Pellizzari ED, Michael L, Whitmore R, Zelon H, Hartwell T, Westerdahl D. The Los Angeles TEAM Study: Personal Exposures, Indoor-Outdoor Air Concentrations and Breath Concentrations of 25 VOC Compounds. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 1991, 1, 157-192.