

NFP41 Verkehr und Umwelt

Projekt C4:

Anteil des Strassenverkehrs an den PM10- und PM2.5-Immissionen

Chemische Zusammensetzung des Feinstaubes und
Quellenzuordnung mit einem Rezeptormodell

Résumé

Christoph Hüglin, EMPA Dübendorf

Dübendorf, 31. Juli 2000

Résumé

Cette version abrégée a pour but de donner une vue d'ensemble encore relativement circonstanciée sur le plan général et sur les résultats essentiels de cette étude sans toutefois entrer dans les détails techniques et méthodologiques. Les renvois aux chapitres du rapport complet de l'étude indiqués entre parenthèses en italique permettent de se reporter en tout temps de manière précise à l'exposé et à la discussion détaillée des différents points du rapport du projet ainsi qu'à la bibliographie.

L'essentiel en un coup d'œil

La présente étude avait pour objectif premier la quantification de la contribution du trafic routier aux immissions de poussières en suspension PM10 et PM2.5 pour 4 stations représentatives de situations d'exposition à la pollution importantes en Suisse. A cet effet, on a procédé à une analyse détaillée de la composition chimique des poussières en suspension et à la détermination des facteurs d'influence (sources) à l'aide de méthodes de l'analyse statistique multivariable (modèle de récepteur). Une comparaison des résultats de mesures à haute résolution temporelle effectuées parallèlement aux abords de routes à fort trafic avec les résultats de mesure de la pollution de fond en milieu urbain a aussi permis de déterminer la contribution du trafic lourd aux émissions de particules fines.

Il est apparu que, pour les stations modérément exposées des villes et des agglomérations, la fraction PM10 des particules fines se composait pour un tiers d'aérosols contenant du carbone (suie, composés organiques), pour un tiers d'aérosols organiques secondaires (sulfate, nitrate, ammonium) et pour un tiers de minéraux et d'eau.

Les résultats obtenus pour les parts des immissions de PM10 et PM2.5 dues au trafic routier (comprenant aussi la part des aérosols secondaires provenant du trafic routier et une part, plutôt faible, due aux immissions off-road sur ces stations) sont les suivants:

Tab. R1.: Contribution moyenne du trafic routier

Station	Paramètre de mesure	Type d'exposition	PM mesuré ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM modèle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Contribution moyenne du trafic routier ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (%)	
Bâle	PM10	Agglomération	25.0	26.9	9.5	35.3
Berne	PM10	Ville, en bord de route	39.6	41.1	18.9	45.7
Zurich	PM10	Ville, dans un parc	24.5	25.8	8.6	33.3
Wiedikon ^a	PM10	Ville, en bord de route	42.6	42.6	26.8	62.9
Berne	PM2.5	Ville, en bord de route	24.1	25.0	9.2	36.8
Zurich	PM2.5	Ville, dans un parc	20.7	20.8	5.4	26.0

^a Les valeurs indiquées ne sont pas des moyennes annuelles, mais la moyenne de 59 échantillons journaliers des deux campagnes de mesure juillet/août 1998 et janvier/février 1999

Une subdivision de ces contributions en émissions directes des gaz d'échappement et en émissions dues à l'abrasion des pneumatiques/poussières soulevées n'est pas possible. Des analyses spécifiques à l'aide de traceurs montrent cependant que quantitativement, et mis à part aux abords directs des routes, l'abrasion des pneumatiques ne joue qu'un rôle secondaire.

Les mesures comparatives complémentaires effectuées à Zurich mettent par contre en évidence la grande importance du trafic des poids lourds. Avec un pourcentage de véhicules utilitaires lourds de 7% du volume du trafic total, la contribution de ces derniers aux émissions primaires de PM10 du trafic routier atteint environ 50% pour ces stations de mesure.

Les contributions des différentes sources ou groupes de sources aux immissions de particules fines sont représentées sous forme résumée dans les diagrammes ci-après:

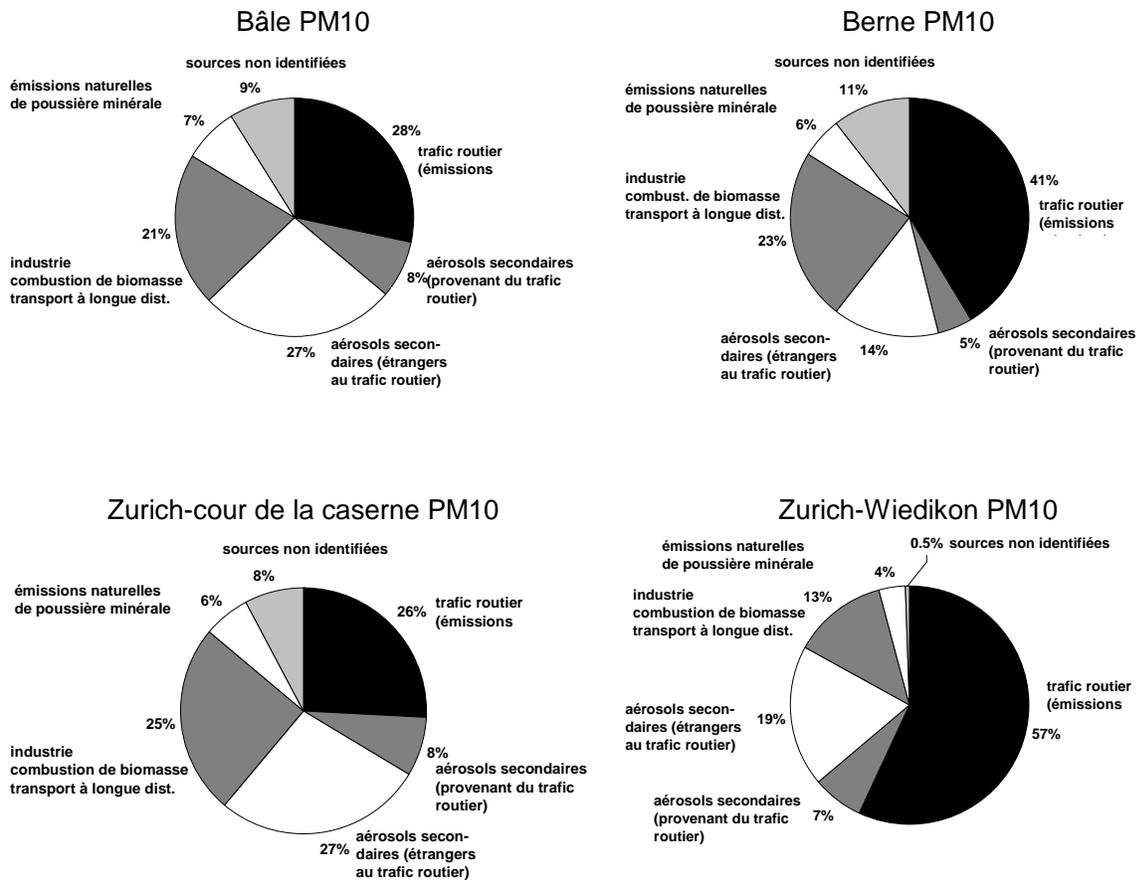


Fig.. R1: Contributions des différentes sources ou groupes de sources aux immissions de particules fines

En résumé, on constate que dans les villes ou les agglomérations urbaines sur les stations non directement exposées au trafic routier, environ 35-40 % des immissions de PM10 sont provoquées par la circulation routière. Dans les zones soumises à l'influence immédiate des routes urbaines à fort trafic, ce pourcentage peut augmenter à 50-65%. Ces résultats présentent une bonne concordance avec ceux que fournit la méthode des modèles de dispersion totalement indépendante de celle des modèles de récepteur.

R1 Exposé du problème et objectifs de l'étude

Une série d'études épidémiologiques récentes indiquent que des charges élevées en particules fines dans l'air atmosphérique peuvent provoquer des atteintes à la santé. Les résultats de ces études ont été pris en compte lors de la dernière révision de l'Ordonnance sur la protection de l'air suisse (OPair) par l'introduction de nouvelles valeurs limites d'immissions pour PM10. Les mesures effectuées dans le Réseau national d'observation des polluants de l'air (NABEL) montrent que ces valeurs limites ne peuvent pas être respectées dans des vastes régions de la Suisse.

Depuis peu une attention accrue est portée à la fraction PM2.5 encore plus fine des poussières en suspension. Bien qu'actuellement encore aucune de valeur limite n'ait été fixée pour PM2.5, il semble cependant qu'il existe pour cette fraction aussi une relation nette avec des effets négatifs sur la santé.

Pour pouvoir développer des mesures de réduction efficaces il est nécessaire de connaître les sources d'émission ainsi que leurs contributions moyennes aux immissions. En Suisse, le recensement et la quantification des sources de PM10 et de PM2.5 étaient jusqu'ici encore insuffisants. Le but de la présente étude était donc d'identifier les principales sources de poussières fines en suspension et de déterminer leurs contributions respectives aux immissions de PM10 et de PM2.5.

Les charges élevées de particules fines mesurées dans le réseau NABEL montrent que la circulation routière représente en Suisse une source importante pour les poussières en suspension dans l'air atmosphérique. Les émissions totales de poussières en suspension du trafic routier se composent de différentes contributions: D'une part les moteurs de véhicules émettent à travers leurs pots d'échappement aussi bien des particules primaires que des substances gazeuses précurseurs de particules en suspension secondaires. D'autre part, la circulation routière contribue à la remise en suspension de particules produites par des phénomènes d'abrasion (revêtement routier, pneumatiques, freins, etc.).

La présente étude a été consacrée principalement à la caractérisation chimique des immissions de PM10 et PM2.5 ainsi qu'à leur classement en fonction de sources et de groupes de sources définis. Conformément aux buts fixés, la contribution moyenne du trafic routier a été étudiée de manière plus particulièrement détaillée.

Les poussières en suspension, de par leur composition complexe, nécessitent une technique de mesure fort exigeante. Avec les méthodes de collecte conventionnelles, telles que la méthode gravimétrique manuelle utilisée dans le cadre de cette étude, il peut se produire une perte d'une partie des composants volatils durant le prélèvement, le stockage ou le conditionnement des échantillons. Par ailleurs, des composants gazeux peuvent se fixer sur le filtre et conduire ainsi à une augmentation de la masse du filtre. Sur le plan quantitatif, cet effet est toutefois moins significatif que les pertes mentionnées plus haut. Vus sous l'angle scientifique, ces artefacts sont toutefois plutôt gênants. Pour les questions auxquelles cette étude est consacrée, ce problème est cependant de peu d'importance car aussi bien les études épidémiologiques que la détermination des valeurs limites qui en découlent reposent sur des mesures effectuées avec les mêmes méthodes entachées des mêmes artefacts.

R2 Méthode de l'attribution aux sources à l'aide de modèles de récepteur

Le but principal de la présente étude, l'attribution à leurs sources des immissions de poussières en suspension, a été abordé par le biais d'un modèle de récepteur. Les modèles de récepteur nécessitent comme données d'entrée les résultats d'analyses détaillées de la composition chimique des poussières en suspension d'une station de mesure déterminée (récepteur). Les composants particulièrement spécifiques d'une source d'émission ou dont la variation dans le temps diffère de celles d'autres sources et qui permettent ainsi de tirer des conclusions sur la contribution de ces sources d'émission (variables indicatrices) présentent un intérêt particulier. L'application des modèles de récepteur ne demande pas de données détaillées sur les émissions. Les modèles de récepteur fournissent comme résultats des relations empiriques entre les données d'immissions sur la station choisie et les émissions de poussières en suspension des sources et des groupes de sources importants. (1.2; 1.3; 3.1; Appendice A3).

R3 Ampleur des mesures et méthodes de mesure

Pour pouvoir être appliqués avec plein succès à l'identification des sources d'émission de poussières en suspension, les modèles de récepteur demandent un nombre suffisamment élevé de mesures de composants appropriés (variables indicatrices). Dans le cadre de la présente étude, on a procédé à une caractérisation aussi complète que possible d'échantillons de PM10 et de PM2.5 de différentes stations de mesure.

Les analyses suivantes ont été effectuées (la méthode d'analyse utilisée est indiquée entre parenthèses) (2.1; 2.2):

- Ions inorganiques hydrosolubles NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- (chromatographie d'ions). La somme des concentrations de NH_4^+ , NO_3^- et SO_4^{2-} représente la fraction des particules inorganiques secondaires.
- Carbone élémentaire EC et carbone organique OC (coulométrie).
- Eléments en traces Al, As, Ba, Br, Ca, Ce, Cd, Cu, Fe, Ga, K, La, Mg, Mn, Mo, Nd, Ni, Pb, Rh, Sb, Se, Tl, V, Y (spectrométrie de masse par plasma, ICP-MS).
- Composés aromatiques polycycliques (Laser Two-Step Massspectrometry, L2MS) (2.3.4).
- Particules biologiques (Bio-Assays, microscopie)
- Produits d'abrasion des pneumatiques (GC-MS)

En complément de ces études à l'aide de modèles de récepteur, on a procédé à des mesures sur des stations exposées à un fort trafic routier à Zurich-Wiedikon et à proximité immédiate de l'autoroute A1 (Station NABEL de Härkingen). Ces mesures supplémentaires ont permis d'une part de déterminer la contribution du trafic routier local à la charge de PM10 et d'autre part d'obtenir des informations sur la répartition des contributions du trafic routier entre le trafic motorisé individuel et le transport de marchandises (6.1, 6.2).

R4 Stations de mesure sélectionnées et prélèvements d'échantillons

Les prélèvements ont été effectués dans le cadre des mesures de routine des poussières en suspension sur le Réseau national d'observation des polluants de l'air (NABEL). Durant la période du 01.02.98 au 31.03.99 on a procédé à une caractérisation chimique détaillée d'un grand nombre d'échantillons journaliers de PM10 et de PM2.5 prélevés sur les stations de Bâle, Berne, Chaumont et Zurich-cour de la caserne. Ces stations de mesure ont été choisies comme étant représentatives de différentes situations de pollution fréquentes en Suisse (tableau R2).

Au cours de deux campagnes de mesure en juillet-août 1998 ainsi qu'en janvier-février 1999, on a en outre procédé à des prélèvements et à des analyses d'échantillons de PM10 sur une station de mesure de l'Office de la santé et de l'environnement de la ville de Zurich exposée à un trafic routier extrême à Zurich-Wiedikon.

En plus de cela, au printemps 1999 on a déterminé la composition chimique de quelques échantillons de PM10 de la station de mesure NABEL de Payerne. La station de Payerne, située en milieu rural sur le Plateau suisse, est représentative d'une autre situation de pollution importante en Suisse.

Tab. R2: Stations de l'étude

Station	Type	Grandeur de mesure	Nombre d'échantillons
Bâle	Agglomération	PM10/PM2.5	120/82
Berne	Centre ville, bord de route	PM10/PM2.5	120/82
Chaumont	Zone rurale, altitude supérieure à 1000 m	PM10/PM2.5	120/82
Zurich-cour caserne	Centre ville, dans un parc	PM10/PM2.5	121/85
Zurich-Wiedikon	Centre ville, bord de route	PM10	59
Payerne	Zone rurale, altitude inférieure à 1000 m	PM10	17

Les prélèvements ont été effectués avec un échantillonneur à gros volume (Digital DHA-80) muni d'un orifice d'entrée sélectif (impacteur PM10 ou PM2.5). 720 m³ d'air extérieur sont aspirés en 24 heures à travers le filtre en fibres de quartz exemptes de liant (Schleicher und Schuell QF20, 150 mm de diamètre). La méthode de collecte choisie correspond à la méthode de référence pour la détermination de la charge en PM10 dans l'air atmosphérique de la norme EN 12341.

R5 Composition chimique des poussières en suspension

R5.1 Composants analysés et bilan massique

Le programme de mesure décrit plus haut englobait tous les composants qui contribuent à la masse des poussières en suspension (2.3.1). La somme de la masse de tous les composants analysés devrait ainsi dans le cas idéal correspondre à la masse déterminée par gravimétrie.

Le tableau R3 donne une vue d'ensemble de la composition des échantillons de poussières en suspension analysés des différentes stations. La figure R2 présente sous forme graphique la composition de PM10 et de PM2.5 pour les principaux composants.

R5.2 Teneur en eau et en particules biologiques

Une grande partie de la fraction des composants non identifiés mentionnée dans la dernière colonne du tableau R3 est formée de l'humidité des poussières en suspension, comprise dans la pesée lors de la détermination gravimétrique mais cependant pas quantifiée séparément dans le programme d'analyse, ainsi que des particules biologiques pour lesquelles la méthode choisie pour l'analyse des particules carbonées ne permet pas toujours une détermination quantitative. Les analyses quantitatives de l'humidité effectuées à titre de sondage sur les échantillons de poussières en suspension prélevés ont révélé une teneur en eau moyenne de 16% durant la saison chaude et de 6% durant la saison froide (2.3.2).

Tab. R3: Composition chimique moyenne de PM10 et PM2.5 sur les stations de mesure étudiées. A l'exception de Zurich-Wiedikon et de Payerne, les valeurs indiquées sont des moyennes annuelles (échantillons journaliers du 01.04.98 au 31.03.99), toutes les indications en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Station	PM grav.	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	EC	OM	Poussière minérale	Éléments en traces	non ident. ^d
Bâle PM10	24.0	1.9	3.1	3.9	1.9	4.7	2.0	1.0	5.5
Berne PM10	39.7	1.4	3.3	3.3	5.6	8.9	6.7	2.1	8.4
Chaumont PM10	10.1	0.8	0.8	2.0	0.6	1.7	1.3	0.4	2.6
Zurich-cour caserne PM10	24.1	2.0	3.3	3.7	2.0	5.0	2.2	0.7	5.4
Zurich-Wiedikon PM10 ^a	43.0	2.6	4.7	4.2	7.7	9.0	4.9	2.4	7.6
Payerne PM10 ^b	13.6	1.0	1.1	2.2	1.3	3.4	1.7	0.5	2.4
Bâle PM2.5 ^c	17.7	1.9	2.5	3.8	1.5	4.0	1.0	0.6	2.4
Berne PM2.5 ^c	22.0	1.4	2.3	2.7	3.8	6.5	0.9	0.5	3.8
Chaumont PM2.5 ^c	8.4	0.9	0.5	2.4	0.4	1.7	0.6	0.3	1.6
Zurich-cour caserne PM2.5 ^c	18.6	1.9	2.7	3.3	1.6	4.4	0.9	0.4	3.5

^a Moyenne de 59 échantillons journaliers des deux campagnes de mesure juillet/août 1998 et janvier/février 1999.

^b Moyenne d'un total de 17 échantillons journaliers de mai-juillet 1988 et septembre/novembre 1998.

^c Moyenne annuelle. D'avril à juillet, 3 échantillons journaliers par mois, sinon huit à neuf échantillons journaliers par mois. Un facteur de pondération 3 a été attribué aux échantillons des mois d'avril à juillet.

^d Voir R5.2 pour plus de détails

L'analyse spécifique des particules biologiques contenues dans les poussières en suspension s'est révélée particulièrement ardue. Les méthodes auxquelles on a eu recours n'ont pas permis une quantification précise. Le Bradford-Assay présentait une limite de détection trop élevée et les teneurs en protéine de tous les échantillons analysés étaient inférieures à cette limite. A partir de cette limite de détection connue et en attribuant une teneur en protéine moyenne définie aux particules biologiques, on peut ainsi uniquement constater que la concentration des particules biologiques dans les échantillons examinés était toujours inférieure à $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'analyse microscopique d'un nombre restreint d'échantillons (8 échantillons par station) a toutefois démontré clairement la présence de particules biologiques. Comme on pouvait s'y attendre, l'allure de la courbe saisonnière du nombre de particules biologiques décelées montre que les valeurs sont plus élevées durant la période de végétation. Du fait du grand nombre d'hypothèses non vérifiables avec précision sur la forme et la densité des particules qu'elles exigent, les conversions du nombre de particules en masse volumique sont d'une manière générale difficiles et entachées d'incertitude. Une estimation grossière aboutit à une concentration pondérale de particules biologiques d'environ $1-1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la valeur individuelle la plus élevée atteignant environ $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.3.3).

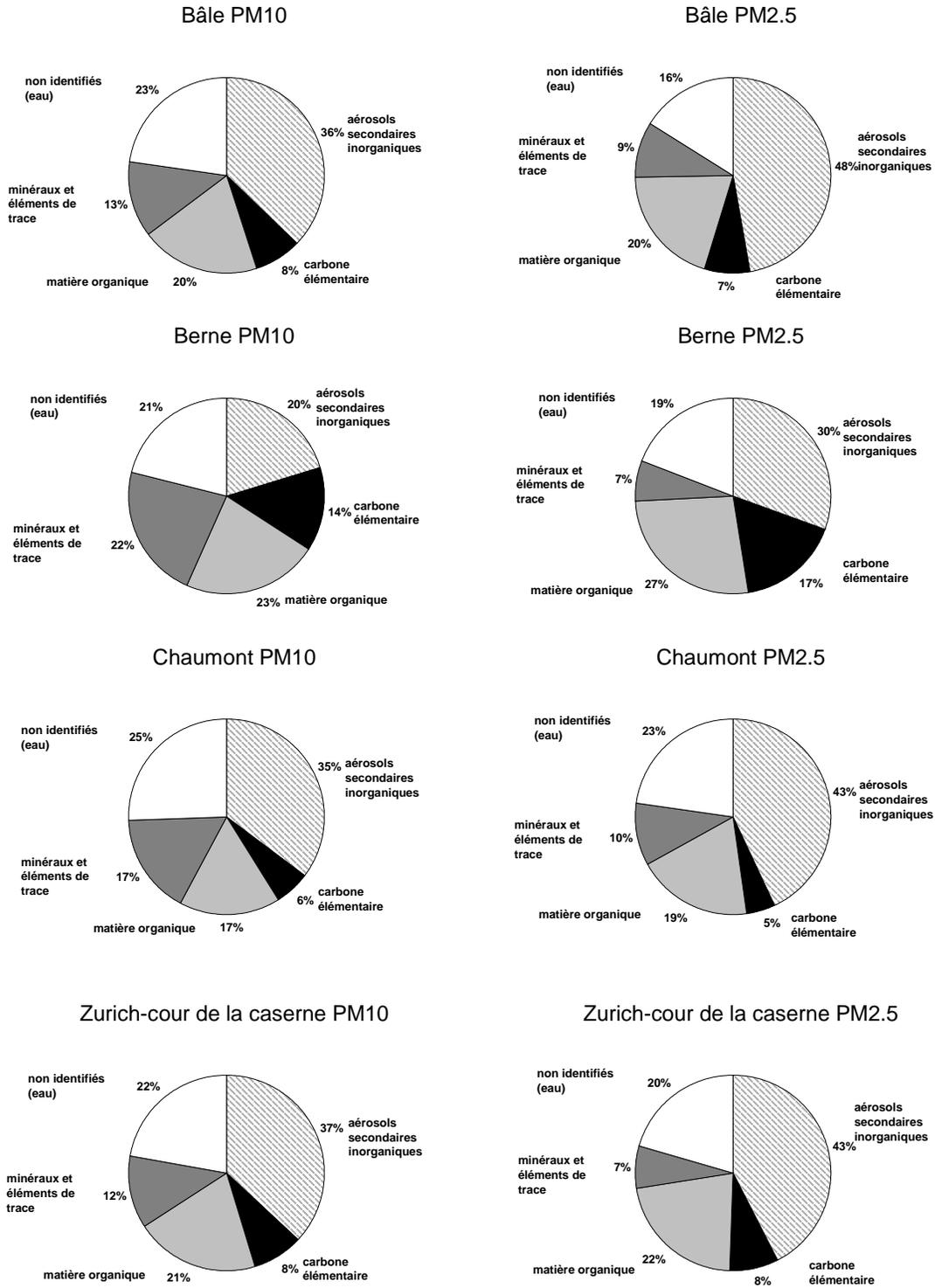


Fig. R2a: Composition moyenne de PM10 et PM2.5 pour les principaux groupes de composants

Zurich-Wiedikon PM10

Payerne PM10



Fig. R2b: Composition moyenne de PM10 et PM2.5 pour les principaux groupes de composants.

R6 Attribution des poussières en suspension PM10 et PM2.5 à leurs sources

R6.1 Attribution des poussières en suspension primaires à leurs sources

L'attribution des poussières en suspension primaires aux différentes sources a été effectuée à l'aide d'un modèle de récepteur. Le modèle utilisé fournit comme résultat des facteurs qui expliquent chacun une part de la variance globale des concentrations des composants. La connaissance des combinaisons typiques de composants des émissions de particules des différentes sources et leur comparaison avec la composition des facteurs déterminés permet d'attribuer ces facteurs à des sources ou à des groupes de sources précis. (3.1.2). A côté de ces "profils de sources", le modèle de récepteur permet aussi d'estimer l'activité des sources. L'activité des sources en fonction des jours de la semaine ou des saisons ainsi que la connaissance des facteurs d'enrichissement (2.4) permet d'obtenir des indications précieuses pour l'identification des sources.

Cette méthode permet d'attribuer les facteurs fournis par le modèle de récepteur aux sources ou groupes de sources suivants:

UIOM et combustion de biomasse, transport à longue distance des polluants, poussières contenant du thallium (cimenteries?), trafic routier (émissions des gaz d'échappement), poussière routière, poussière routière mélangée de sel de déverglaçage.

Il apparaît comme judicieux de réunir ces trois dernières sources en une seule source commune "trafic routier", car la corrélation élevée entre ces trois contributions différentes du trafic routier fait apparaître une délimitation stricte entre ces trois sources comme improbable.

Les valeurs estimées des contributions annuelles moyennes des différents groupes de sources d'émission et sources d'émission identifiés sont données dans le tableau R5.

R6.2 Attribution des aérosols inorganiques secondaires à leurs sources

L'attribution à leurs sources des aérosols inorganiques secondaires a été effectuée sur la base des données de l'inventaire européen des émissions des composants précurseurs NH₃, NO_x et SO₂ (CORINAIR), ainsi qu'à l'aide du modèle de dispersion à grande échelle géographique des poussières inorganiques secondaires utilisé dans le programme EMEP. L'agriculture est la source principale d'ammoniaque et elle contribue ainsi pour une grande part aux concentrations

d'ammonium dans l'air ambiant. Le trafic routier est par contre lui le principal responsable de la formation de nitrate. Les centrales thermiques et les processus de production de chaleur, les processus de combustion industriels et non industriels ainsi que les sources naturelles sont des émetteurs importants de SO_2 et contribuent ainsi de façon déterminante à la formation de sulfate. La connaissance de ces faits permet d'estimer les contributions respectives des différentes sources de précurseurs gazeux à la concentration annuelle moyenne des particules secondaires inorganiques PM_{10} sur les différentes stations étudiées (4.1).

Les résultats obtenus avec le modèle EMEP concordent fort bien avec les résultats des mesures effectuées dans le cadre de cette étude. La moyenne annuelle calculée de la concentration des aérosols secondaires est en Suisse de $10\text{-}15\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les moyennes annuelles que nous avons mesurées à Bâle, Berne et Zurich sont juste inférieures à $10\mu\text{g}/\text{m}^3$; il faut toutefois remarquer que la méthode d'échantillonnage conduit à des résultats de mesure inférieurs aux concentrations effectives d'ammonium et de nitrate (2.1).

R6.3 Aérosols organiques secondaires

Les mesures effectuées dans le cadre de cette étude permettent de déduire que les aérosols organiques secondaires ne représentent qu'une fraction peu importante des concentrations moyennes de PM_{10} (et de $\text{PM}_{2.5}$). Toutefois les jours de forte activité photochimique, les aérosols organiques secondaires peuvent atteindre des concentrations élevées. L'analyse détaillée d'un épisode photochimique particulièrement actif à Zurich a montré que la moyenne journalière des aérosols organiques secondaires atteignait pour cet épisode environ $3\mu\text{g}/\text{m}^3$. Vu ces quantités dans l'ensemble faibles, on a renoncé à leur attribution à des sources précises. (4.2).

R6.4 Contribution des produits d'abrasion des pneumatiques

Les pneumatiques des automobiles contiennent des composés organiques tels que p. ex. la N-cyclohexyl-2-benzothiazolamine (NCBA) que l'on ne trouve pratiquement que dans le caoutchouc vulcanisé. Bien que la détection de ces composés exige des analyses fort compliquées, il s'agit là toutefois d'indicateurs très spécifiques pour lesquels il existe une relation avérée avec le matériau provenant de l'abrasion des pneumatiques. La contribution des produits d'abrasion des pneumatiques peut s'estimer directement à partir de la concentration mesurée dans les immissionss si l'on connaît la teneur moyenne d'un de ces composés spécifique par unité d'émission.

Les teneurs en NCBA analysées sur 12 types de pneumatiques courants sélectionnés à cet effet ont été comparées avec les teneurs en NCBA des échantillons de particules PM_{10} des stations de Berne, de Zurich, de Tänikon et du Jungfrauoch. Les valeurs estimées de la fraction de PM_{10} provenant de l'abrasion des pneumatiques qui en résultent sont données dans le tableau R4.

Tab. R4: Teneurs de PM10 en particules d'abrasion des pneumatiques.

Station	Nombre d'échantillons analysés	Teneur en particules d'abrasion des pneus dans PM10 (%)	Intervalle de confiance à 95% (%)
Berne	6	7.5	5.1-14.0
Zurich-cour de la caserne	7	1.9	1.3-3.6
Tänikon	4	< 1	
Jungfraujoch ^a	4	< 1	

^a Au Jungfraujoch, on a mesuré la concentration des particules totales en suspension (TSP) à la place de PM10.

Ce qui frappe dans ce tableau, c'est l'étendue du domaine d'incertitude des résultats de la détermination des particules d'abrasion des pneumatiques dans PM10. Ces incertitudes élevées proviennent de la forte variation des teneurs en NBCA des échantillons des différents fabricants de pneumatiques. Du fait de la complexité de la méthode d'analyse, il n'a de plus été possible d'analyser qu'un nombre relativement restreint d'échantillons de pneumatiques et d'échantillons journaliers de PM10. Ces résultats doivent donc être considérés dans leur ensemble comme une estimation grossière. Ils montrent toutefois que les particules d'abrasion des pneumatiques ne jouent un rôle sur le plan quantitatif que pour les stations directement exposées au trafic routier. (3.2). Dans le bilan massique de PM10, ces fractions sont principalement contenues dans EC et OC; et pour l'attribution aux sources, dans les facteurs trafic routier et poussières routières.

R6.5 Vue générale de l'attribution des émissions de poussières en suspension à leurs sources

Le tableau R5 donne une vue d'ensemble de la distribution de la masse des particules fines (PM10) entre les facteurs obtenus à l'aide du modèle de récepteur. Le modèle de récepteur ne fournit pas les mêmes facteurs (ou la même distribution des sources) pour toutes les stations, ce qui rend difficile la comparaison directe des stations entre elles. Bien que pour la station de Chaumont seuls les échantillons journaliers avec $PM10 > 8\mu g/m^3$ aient été pris en compte dans l'analyse, il n'a pas été possible d'obtenir une séparation détaillée des différents facteurs. Pour cette station il n'est ainsi pas non plus possible de quantifier séparément la contribution du trafic routier.

Si l'on tient compte des incertitudes des valeurs de mesure et des incertitudes du modèle de récepteur, les sommes des contributions des différents facteurs indiquées sur la deuxième ligne du tableau concordent fort bien avec les valeurs de mesure (1ère ligne du tableau R5).

Pour obtenir la contribution totale du trafic routier, on a additionné les facteurs qui sont en relation avec le trafic routier. Un aperçu général des contributions annuelles moyennes du trafic routier à la charge en PM10 et (lorsque cela était possible) à la charge en PM2.5, comprenant aussi la fraction des aérosols secondaires provenant du trafic routier, est donné au chapitre "L'essentiel en un coup d'œil" au début de ce résumé (tab. R1).

Avec les données produites dans cette étude, le modèle de récepteur ne permet pas de distinguer entre elles les différentes catégories de moyens de transports. Les fractions dues aux transports routiers déterminées avec le modèle de récepteur englobent ainsi des sources d'autres moyens de transport consommateurs de carburants (domaine off-road ainsi que transports aériens et navigation, bien que toutefois ces deux derniers soient insignifiants sur le plan quantitatif). Cette distinction à vrai dire insatisfaisante entre les contributions des différentes

sources reflète une difficulté essentielle de l'application de modèles de récepteur à l'attribution des poussières en suspension à leurs différentes sources: Pour parvenir à une distinction nette entre les contributions des différentes sources, il est nécessaire de disposer pour chaque source active de composants spécifiques qui de plus doivent demeurer chimiquement stables durant le transport de la source au récepteur. Pour de nombreuses sources on ne dispose pas de tels composants appropriés et lorsqu'on en dispose, leur détection exige très souvent des méthodes d'analyse fort compliquées.

Tab. R5: Attribution des immissions de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) aux facteurs obtenus avec le modèle de récepteur. Pour l'évaluation des mesures de la station de Chaumont, on n'a tenu compte que des échantillons journaliers $>8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

	Bâle	Berne	Chaumont	Zurich-cour de la caserne	Zurich-Wiedikon
Total PM10 (mesure)	25.0	39.6	16.5	24.5	42.6
Total PM10 (modèle de récepteur)	26.9	41.4	16.4	25.8	42.6
Gaz d'échappement trafic routier (avec fraction off-road)	4.9	7.6		3.4	17.8
Poussière routière (dans la mesure où pas déjà comprise dans les facteurs trafic routier et sels de déverglaçage)	1.8	6.4		2.5	3.2
Sels de déverglaçage (y compris poussière routière soulevée)	0.9	3.1	0.3	0.8	3.3
UIOM, combustion biomasse	2.7				
UIOM, combustion biomasse, transport à longue distance		8.2		4.8	5.4
Transport à longue distance, facteur TI ^a	2.9				
Facteur TI ^a		1.4		1.6	
Poussière minérale (non due au trafic routier)	2.0	2.3	2.7	1.6	1.6
Diverses sources anthropogènes			4.3		
Autres sources non identifiées	2.4	4.4	3.6	2.0	0.2
Aérosols secondaires	9.3	8.0	5.5	9.1	11.1
dont dus au trafic routier	1.9	1.8	0.5	1.9	2.5

^a Le facteur TI (thallium) peut probablement être attribué aux émissions des cimenteries.

R6.6 Comparaisons entre les résultats du modèle de récepteur et du modèle de dispersion

Les contributions du trafic routier aux charges de PM10 et de PM2.5 sur les différentes stations obtenues à l'aide de la modélisation des récepteurs constituent certainement les résultats les plus importants obtenus dans la présente étude. Les contributions des différents polluants atmosphériques ont été obtenues à l'aide de deux méthodes reposant sur des principes différents, d'une part à l'aide de modèles de récepteur et d'autre part avec des modèles de dispersion (1.2). Une étude¹ publiée récemment par l'OFEFP décrit un modèle de dispersion développé pour la modélisation des immissions de PM10 en Suisse. Ce modèle permet d'estimer les contributions moyennes du trafic routier pour différentes charges moyennes de PM10. La figure R3 compare les résultats obtenus avec ce modèle de dispersion avec ceux obtenus dans cette étude avec le modèle de récepteur ainsi qu'avec résultats des estimations de l'étude GVF

¹ OFEFP (1999): Modélisation de la charge en PM10 sur le territoire suisse, Cahiers de l'environnement, des forêts et du paysage.

de 1996². Cette comparaison montre que le modèle de dispersion et le modèle de récepteur concordent bien pour les charges moyennes de PM10 de stations telles que celles de Bâle ou de Zurich-cour de la caserne. Pour la station exposée directement au trafic routier de Berne, la contribution moyenne estimée du trafic routier est environ 15% inférieure à la valeur calculée à l'aide du modèle de dispersion pour des régions présentant des immissions moyennes de PM10 comparables. Pour la station de Zurich-Wiedikon, elle aussi directement exposée au trafic routier, les résultats des deux méthodes concordent à nouveau bien entre eux. D'une manière générale la concordance entre les résultats du modèle de dispersion et ceux du modèle de récepteur est très satisfaisante si l'on considère que ces deux méthodes sont des méthodes totalement indépendantes l'une de l'autre.

A l'exception des cas de charges en PM10 très basses, les contributions du trafic routier estimées à l'aide du modèle de récepteur et du modèle de dispersion sont plus basses que les valeurs de l'étude GVF (1996) plus ancienne. Des hypothèses fortement simplificatrices ayant dû être posées pour cette étude du fait du manque de données, les résultats publiés dans le rapport GVF sont à considérer comme une estimation grossière des contributions du trafic routier à PM10.

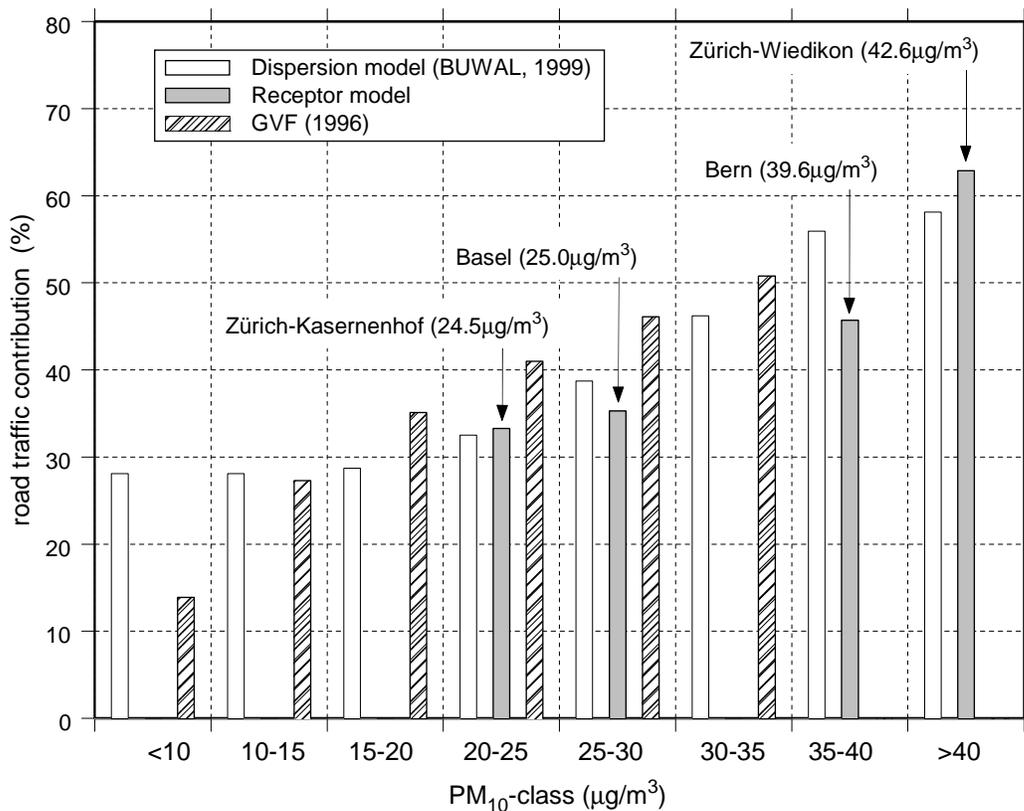


Fig. R3: Comparaison des contributions annuelles moyennes du trafic routier à PM10 estimées à l'aide du modèle de dispersion avec celles du modèle de récepteur de cette étude ainsi qu'avec les résultats du rapport BVF. Pour les résultats du modèle de récepteur, l'erreur-type des estimations est indiquée donnée sous forme de barre d'erreur.

² GVF (1996): Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten. Synthesebericht. Ecolplan Bern, GVF-Auftrag Nr. 272.

R6.7 Influences météorologiques sur les immissions de poussières en suspension

Une analyse de la distribution des composants principaux dans les échantillons journaliers de PM10 de toutes les stations NABEL a permis de montrer que la variabilité de PM10 est provoquée essentiellement par des facteurs agissant à grande échelle géographique (en particulier par les conditions météorologiques) (5.1). Les variations d'activité des sources locales n'exercent qu'une influence secondaire sur ce plan. En Suisse, la grandeur de la charge en PM10 par rapport à la moyenne en un jour donné sur une station dépend essentiellement de la situation météorologique.

La relation entre la situation météorologique et la charge de PM10 a été étudiée plus en détail. Pour cela, on a d'une part regroupé par types de temps les différentes conditions météorologiques journalières et étudié la dépendance entre le type de temps et la charge de PM10 (5.2). D'autre part on a recherché à savoir si une analyse de la direction de déplacement des masses d'air sur les stations NABEL de Chaumont et de Tännikon permettait de constater une influence du transport à grande distance de PM10. (5.3). Dans les situations d'advection, les charges moyennes en PM10 sont plus basses que lors des situations de convection. Lors des situations de d'advection, l'affluence de masses d'air du secteur ouest conduit à des charges moyennes en PM10 basses. Lors de ces situations météorologiques, des masses d'air maritime plus propres sont fréquemment amenées vers les Alpes, ce qui provoque une dilution des masses d'air continental polluées. L'arrivée de masses d'air des secteurs nord-est et est conduit à une augmentation des immissions moyennes de PM10 à Chaumont et à Tännikon. Comparativement aux immissions moyennes de PM10 lors de situations d'advection, les immissions moyennes lors de ces situations météorologiques sont plus élevées respectivement d'environ $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Chaumont) et d'environ $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tännikon). L'évaluation uniquement descriptive effectuée sur ces données ne permet pas d'expliquer les processus qui conduisent à ces observations. Les valeurs indiquées ci-dessus peuvent toutefois être considérées comme la limite supérieure de la contribution moyenne du transport à longue distance des particules en suspension lors des situations météorologiques d'advection.

R7 Voitures de tourisme et véhicules utilitaires lourds

La distinction des différentes sources de PM10 obtenue avec le modèle de récepteur ne permet pas une différenciation entre les émissions des voitures de tourisme (VT) et celle des véhicules utilitaires lourds (VUL). Pour combler cette lacune, en plus des analyses des échantillons journaliers, on a procédé à des campagnes de mesure avec une haute résolution temporelle sur les deux stations de Zurich-cour de la caserne et de Zurich-Wiedikon (Schimmelstrasse) (6.2). La station de Zurich-cour de la caserne est située dans un parc et est représentative d'une pollution atmosphérique urbaine non directement influencée par des sources d'émissions précises (niveau de fond urbain). La station de mesure de Zurich-Wiedikon est par contre située à proximité immédiate de la Schimmelstrasse, une voie à fort trafic (axe de transit de Coire en direction de Berne et Bâle) et elle représente un site fortement exposé au trafic routier. En plus de la mesure des polluants atmosphériques, on a procédé aussi à un comptage différencié des voitures de tourisme et des véhicules utilitaires lourds (détecteur à boucle inductive). La différence entre les charges de polluants déterminées simultanément sur ces deux stations fournit avec une bonne approximation la contribution des émissions du trafic routier à la Schimmelstrasse. Le tableau R6 donne une vue d'ensemble des résultats de ces mesures de monitoring à haute résolution

temporelle (valeurs semi-horaires obtenues durant deux campagnes de mesure en juillet/août 1998 et janvier/février 1999). A côté des valeurs de PM10, ce tableau donne les résultats de mesure des immissions de suie (sous forme de black carbon BC). On relèvera que les valeurs enregistrées pour BC au moyen d'un aethalomètre n'ont qu'une valeur informative car le principe de mesure n'est pas équivalent à la méthode de référence par coulométrie. Les valeurs du tableau montrent clairement que les émissions du trafic routier à la Schimmelstrasse contribuent pour une grande part aux immissions moyennes de BC et de PM10.

Le tableau R6 montre aussi que les émissions de PM10 du trafic routier à la Schimmelstrasse sont nettement plus basses les dimanches qu'en semaine. Cela s'explique par l'absence du transport de marchandise (trafic de véhicules utilitaires lourds). Les comptages isolés de VUL les dimanches sont probablement dus en majeure partie à des autocars. La comparaison des valeurs indiquées dans le tableau R6 pour les contributions du trafic routier les dimanches avec celles des jours de semaine permet d'estimer la part du trafic des poids lourds dans les émissions primaires de PM10 du trafic routier à la Schimmelstrasse. En tenant compte des chiffres de trafic légèrement plus bas en semaine que les dimanches, on obtient une contribution relative du transport de marchandises aux émissions primaires de PM10 du trafic routier de 53% (6.2).

Tab. R6: Nombre moyen de véhicules à la Schimmelstrasse et concentrations moyennes de suie (sous forme de BC) et de PM10 durant les deux campagnes de mesure de juillet/août 1998 et janvier/février 1999 ainsi que contributions du trafic local calculées à partir de ces valeurs à la Schimmelstrasse.

		Tous les jours	Lu-Ve	Sa	Di
Nombre de véhicules (par 30 min)	VT	537	513	594	588
	VUL	40	53	17	10
	VT + VUL	577	566	611	598
Suie sous forme de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cour caserne	1.6	1.8	1.2	1.1
	Wiedikon	4.6	5.4	2.8	2.3
Part trafic routier dans BC Schimmelstrasse ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		3.0	3.6	1.6	1.2
Part trafic routier dans BC Schimmelstrasse (%) ¹		65.2	66.7	57.1	52.1
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cour caserne	24.4	24.8	23.2	23.4
	Wiedikon	40.8	43.8	35.2	32.5
Part du trafic routier dans PM10 Schimmelstrasse ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		16.4	19.0	12.0	9.1
Part du trafic routier dans PM10 Schimmelstrasse (%) ¹		40.2	43.4	34.1	28.0

¹ Estimé à l'aide du rapport entre la différence moyenne de la concentration de polluants et la moyenne de la station de Zurich-Wiedikon.

Les valeurs journalières de PM10 obtenues par mesure gravimétrique sur les stations de Zurich-Wiedikon et de Zurich-cour de la caserne permettent aussi d'effectuer une estimation. La différence moyenne de PM10 entre ces deux stations ($\text{PM10}_{\text{Wiedikon}} - \text{PM10}_{\text{cour de la caserne}}$) est de $19.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ en semaine et de $8.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ les dimanches. La contribution relative du transport de marchandises aux émissions primaires de PM10 du trafic routier résultante de 54% concorde bien avec l'estimation à partir des données présentant une plus haute résolution temporelle. Les différences de PM10 entre les stations de mesure de Zurich-Wiedikon et Zurich-cour de la caserne présentent une distribution approximativement normale et un test en t fournit

un intervalle de confiance à 95% de 49 à 64% (3.1.2.3).

R8 Conclusions et questions encore ouvertes

Le modèle de récepteur utilisé a permis de quantifier la part de PM₁₀ et en partie aussi celle de PM_{2.5}, attribuables au trafic routier pour quelques situations d'exposition à la pollution typiques de la Suisse. Le choix de sites plutôt fortement exposés (dans un domaine allant de l'exposition extrême au trafic routier à un niveau de pollution de fond d'un centre urbain ou d'une agglomération) caractérise des situations d'hygiène de l'air potentiellement problématiques. Pour les sites faiblement exposés en zone rurale (Chaumont), le modèle de récepteur n'a pas permis de déterminer avec une fiabilité suffisante la part due au trafic routier. Les valeurs obtenues avec ce modèle dans cette étude sont ainsi certes représentatives de la situation d'exposition de larges couches de la population urbaine mais elles ne représentent pas une moyenne suisse.

Le modèle a aussi révélé ses limites en ce sens qu'il n'a le plus souvent pas été possible de parvenir à une distinction nette entre les différentes composantes des contributions des sources. Ainsi par exemple il n'a pas permis d'opérer une distinction entre la part des voitures de tourisme et celle des camions. Les contributions des activités artisanales et industrielles n'ont elles aussi pu être déterminées que de façon sommaire.

Les campagnes complémentaires de mesure à haute résolution temporelle effectuées à Zurich ont par contre permis de déterminer séparément les contributions des voitures de tourisme et des camions pour un site représentatif d'une exposition extrême au trafic routier. On a aussi pu montrer qu'il est en règle générale possible d'estimer à partir de telles mesures différentielles (pollution locale moins niveau de fond) des facteurs d'émissions pour des situations de trafic réelles (6.2). La demande d'informations de ce genre est actuellement importante, car les facteurs d'émission disponibles, obtenus à partir de mesures sur banc d'essai, ne fournissent aucune indication sur les émissions de particules soulevées ni sur celles des particules provenant des phénomènes d'abrasion. Afin de combler cette lacune et d'obtenir des facteurs d'émission pour différents scénarios de trafic typiques, un nouveau projet de mesure conçu pour répondre à cette question est prévu avec des mesures d'immissions aux abords de routes choisies à cet effet afin de déterminer les facteurs d'émission des gaz d'échappement, des poussières soulevées et des émissions dues à l'abrasion pour les voitures de tourisme et les camions.

L'importance des émissions off-road en général est une question qui reste ouverte. Leur composition chimique étant pratiquement identique à celle du trafic routier, ces émissions sont comprises dans les facteurs fournis par le modèle de récepteur pour ce dernier. Du fait du choix des sites étudiés, on peut toutefois admettre que la part des émissions off-road est plutôt faible sur ces sites car aucune source off-road typique (machines de chantier lourdes, tracteurs, locomotives Diesel) ne se trouvait à proximité. Cela ne signifie cependant pas que la part des émissions off-road, qui peut conduire temporairement à des immissions locales très élevées, soit partout insignifiante.

La part des émissions des chauffages domestiques (chaudières à mazout et à gaz) n'a pas non plus pu être saisie séparément car ces émissions présentent une composition chimique semblable. Toutefois, sachant que les valeurs d'émission de particules de ces installations sont basses, on peut conclure avec certitude que ces émissions jouent un rôle tout à fait secondaire pour les immissions de particules sur les sites choisis. Les émissions riches en particules des chauffages au bois sont elles par contre contenues dans le facteur "combustion de biomasse".