

CAHIER DE
L'ENVIRONNEMENT
n° 350

Air

Le benzène
en Suisse



Office fédéral de
l'environnement,
des forêts et
du paysage
OFEFP

CAHIER DE
L'ENVIRONNEMENT
n° 350

Air

Le benzène en Suisse

Un rapport de la Commission Fédérale
de l'Hygiène de l'Air (CFHA)

Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts
et du paysage OFEFP
Berne, 2003

Editeur

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)

L'OFEFP est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Auteur

Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA

Référence

EKL – BUWAL 2003: Le benzène en Suisse. Cahier de l'environnement n° 350. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 38 p.

Contact

Peter Straehl, secrétariat de la commission fédérale de l'hygiène de l'air, division protection de l'air, OFEFP, 3003 Berne; Tel. + 41 (0) 31 322 99 84

Graphisme, mise en page

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Photos couverture

© OFEFP/Docuphot, Emanuel Ammon/AURA

Commande

OFEFP

Documentation

CH-3003 Berne

Fax + 41 (0) 31 324 02 16

E-Mail: docu@buwal.admin.ch

Internet: www.buwalshop.ch

Cette publication est également disponible en allemand.

Numéro de commande

SRU-350-F

Prix

CHF 8.– (TVA incluse)

© OFEFP 2003

Table des matières

Abstracts	5
Avant-propos	7
Résumé	9
1 Introduction	11
1.1 Description du problème	11
1.2 Propriétés, présence et utilisation du benzène	12
2 Sources des émissions de benzène	13
3 Immissions	15
3.1 Situation	15
3.2 Mesure des taux de benzène – Méthodes appliquées	16
4 Exposition de la population	17
5 Répercussions – évaluation des risques	23
5.1 Absorption, métabolisme, effets toxicologiques	23
5.2 Etudes épidémiologiques sur les risques de cancer	24
5.3 Autres répercussions sur la santé	25
5.4 Quantificateurs d'effets permettant de déterminer le risque de leucémie et valeurs indicatives préconisées	26
5.5 Evaluation du risque pour l'ensemble de la population en Suisse	27
6 Stratégies de réduction	28
6.1 Objectifs de protection – Bases légales	28
6.2 Examen de la valeur limite pour le benzène préconisée par l'UE	29
6.3 Stratégie	29
6.4 Mesures de réduction envisageables	30
7 Examen des problèmes posés par le benzène	33
8 Recommandations aux autorités chargées de la mise en œuvre et à la population	35
9 Bibliographie	37

Abstracts

Keywords:

benzene, emissions/
emission target,
ambient air quality limit
value, population expo-
sure/risk

Towards the end of 2000, the European Union EU set down an ambient air quality limit value for benzene of 5 µg/m³ (annual average). Member countries are obliged to adopt this limit value, to be met on 1 January 2010, in national legislation. In the light of the EU regulation, the Federal Commission for Air Hygiene EKL carried out a critical review of the air pollution control legislation in Switzerland with respect to benzene, and tabled proposals for further action. The EKL report identifies the sources of benzene emissions, and quantifies the population risk arising from benzene exposure. Moreover, a strategy and necessary measures for further reducing the risk are proposed.

The results show that the ambient air quality limit value for benzene as set down by the EU does not fulfil the requirements of the Swiss Federal Law relating to the Protection of the Environment LPE. It is expected that the more ambitious emission target applied by Switzerland will trigger additional measures to reduce benzene exposure, thereby contributing to the long-term protection of the population.

Stichwörter:

Benzol, Emissionen/
Emissionsziel,
Grenzwert für Immissi-
onen, Bevölkerungs-
Exposition/Risiko

Ende 2000 hat die Europäische Union EU einen Grenzwert für Benzol-Immissionen in der Aussenluft von 5 µg/m³ (Jahresmittelwert) festgelegt, welcher von den Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt und ab dem 1. Januar 2010 eingehalten werden muss. Im Lichte des EU Vorschlags würdigt das Positionspapier der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene EKL die Luftreinhaltung in der Schweiz betreffend Benzol kritisch und macht Vorschläge für das weitere Vorgehen. Dabei werden die Quellen der Benzol-Emissionen identifiziert und die Benzol-Exposition und das Risiko für die Bevölkerung quantifiziert. Ausserdem wird eine Strategie und Massnahmen zur weiteren Reduktion Belastung vorgeschlagen.

Die Analyse zeigt, dass ein Immissions-Grenzwert für Benzol, wie ihn die EU erlassen hat, den Anforderungen des Umweltschutzgesetzes USG der Schweiz nicht genügt. Ein ambitioniertes Emissionsziel hingegen sollte zusätzliche Massnahmen zur weiteren Reduktion der Belastung auslösen und langfristig den Schutz der Bevölkerung garantieren.

Mots-clés:

benzène, émissions/
objectif d'émissions,
valeur limite d'immis-
sion, exposition/risque
pour la population

A la fin de l'année 2000, l'Union européenne UE a fixé une valeur limite pour les concentrations de benzène dans l'air à 5 µg/m³ (moyenne annuelle). Les pays membres sont tenus d'intégrer cette valeur dans leur législation et de la respecter dès le 1er janvier 2010. A la lumière de la proposition faite par l'UE, la Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA se livre, dans sa prise de position, à une estimation critique de la protection de l'air en Suisse et elle fait des propositions pour la suite du processus. Elle procède à l'identification des sources d'émissions de benzène et à la quantification des expositions et du risque encouru par la population. Elle propose en outre une stratégie et des mesures visant à réduire davantage la charge polluante.

L'analyse montre qu'une valeur limite d'immissions pour le benzène, telle qu'elle a été définie par l'UE, ne suffit pas pour répondre aux exigences de la loi sur la protection de l'environnement LPE en Suisse. En revanche, un objectif d'émissions plus ambitieux permettrait de prendre des mesures complémentaires pour réduire les risques et assurer la protection de la population a long terme.

Parole chiave:
benzene, emissioni/
obiettivo d'emissioni,
valore limite per le
immissioni, esposizio-
ne/rischio per la popu-
lazione

Alla fine del 2000 l'Unione Europea UE ha fissato un valore limite per le immissioni di benzene nell'aria esterna a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valore medio annuo). Gli Stati membri dell'UE dovranno inserire questo valore nella loro legislazione e osservarlo a partire dal 1° gennaio 2010. Alla luce della proposta UE, la presa di posizione della Commissione federale per l'igiene dell'aria valuta in modo critico la protezione dell'aria in Svizzera per quanto attiene al benzene e fa proposte per le azioni future. In particolare vengono identificate le emissioni di benzene in Svizzera e quantificati l'esposizione e il rischio per la popolazione. Vengono inoltre proposte una strategia e delle misure per ridurre ulteriormente il carico.

L'analisi mostra che il valore limite delle immissioni di benzene, così come è stato adottato dall'UE, non soddisfa le richieste della legge sulla protezione dell'ambiente LPA. Un obiettivo ambizioso invece, dovrebbe prevedere misure aggiuntive per un'ulteriore riduzione del carico e per garantire la protezione della popolazione a lungo termine.

Avant-propos

Le benzène est rejeté dans l'air dans les gaz d'échappement des moteurs à essence et dans les stations services. La fumée de tabac contient aussi du benzène. Il fait partie des polluants atmosphériques cancérogènes et génotoxiques pour lesquels les scientifiques n'ont pas pu déterminer de seuil au-dessous duquel il n'existe pas de danger pour la santé. C'est pourquoi, en principe, il ne devrait pas y avoir de benzène dans l'air que nous respirons.

A fin 2000, l'Union européenne a fixé une valeur limite pour les concentrations de benzène dans l'air à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (en moyenne annuelle). Dès 2010, les États membres seront tenus de respecter cette valeur limite. Même si cette valeur est respectée, il demeure un petit risque de leucémie au sein de la population en raison de la charge maximale de benzène tolérée.

Prenant en compte la législation européenne, la CFHA a procédé à une analyse critique de la politique suisse en matière de protection de l'air au sujet du benzène et a rédigé le présent rapport. Les sources d'émissions de benzène y ont été identifiées, l'exposition et le risque encouru par la population suisse quantifiés.

La CFHA a tiré la conclusion qu'une valeur limite pour les immissions de benzène, comme l'a fait l'UE ne remplit pas les exigences de protection de la population prévues par la Constitution et la législation sur la protection de l'environnement. Pour assurer les exigences de sécurité pour la population suisse prescrites par la Constitution, la CFHA propose plutôt un objectif ambitieux en matière d'émissions. Pour cela, il est indispensable de prendre des mesures supplémentaires pour réduire les concentrations de benzène.

L'exposition personnelle au benzène n'est pas seulement influencée par les concentrations dans l'air ambiant à l'extérieur, mais dépend aussi du comportement et de la durée de résidence à l'intérieur de certains locaux, ainsi que de la profession exercée. Ce ne sont pas seulement des prescriptions étatiques et des mesures techniques, mais aussi des modifications des habitudes (par ex. son comportement par rapport à la fumée), qui permettent une baisse de l'exposition personnelle aux polluants.

Je tiens à remercier les auteurs du rapport ainsi que l'ensemble des membres de la CFHA pour leur précieuse collaboration. La CFHA a adopté ce rapport à l'unanimité lors de sa séance de juin 2002.

Commission fédérale
de l'hygiène de l'air CFHA

Ursula Ackermann-Liebrich
Présidente

Résumé

Le benzène fait partie des polluants atmosphériques cancérogènes, pour lesquels il n'a pas pu être déterminé de seuil au-dessous duquel il n'existe pas de danger pour la santé. En conséquence, les immissions de benzène – même minimales – doivent toujours être considérées comme nuisibles et incommodantes au sens de la loi sur la protection de l'environnement (LPE).

En principe, il ne devrait pas y avoir de benzène dans l'air que nous respirons. Or, en 2000, quelque 1400 tonnes de benzène ont été rejetées dans l'atmosphère. Les gaz d'échappement des véhicules motorisés sont responsables d'environ 75% de ces émissions, qui devraient être réduites à quelque 700 tonnes par an d'ici à 2010. Toutefois, pour remplir les exigences de protection de la population prévues par la Constitution, la quantité de benzène parvenant dans l'air que nous respirons ne devrait pas être supérieure à 100 tonnes par an environ.

La présente prise de position de la CFHA identifie les sources d'émissions de benzène, quantifie l'exposition et le risque encouru par la population suisse et propose des mesures visant à réduire davantage la charge polluante.

Les concentrations de benzène actuellement relevées en Suisse génèrent au sein de la population un risque de leucémie estimé à environ deux cas par an. Une expertise juridique a démontré que les exigences de sécurité pour la population suisse prescrites par la Constitution seraient respectées pour un risque d'un cas tous les dix ans, ce qui signifie que ce risque serait conforme à la LPE. Or le risque généré par le benzène pour la population est aujourd'hui 20 fois supérieur au risque toléré par la LPE.

En Suisse, les concentrations maximales de benzène à proximité de routes très fréquentées s'élèvent actuellement à un peu plus de 5 µg/m³. Fin 2000, l'UE a fixé une valeur limite pour les concentrations de benzène dans l'air à 5 µg/m³ (moyenne annuelle). Dès 2010, les États membres seront tenus de respecter cette valeur qui correspond à un risque 20 fois supérieur à celui admis par la LPE. Une telle valeur ne serait donc conforme ni à la loi ni à la Constitution. Dans la situation actuelle, la CFHA ne voit pas la nécessité de proposer une valeur limite pour les immissions de benzène, comme l'a fait l'UE. En effet, l'introduction d'une telle valeur serait un frein au renforcement des mesures visant à réduire les concentrations.

Il est toutefois indispensable de prendre des mesures supplémentaires pour réduire les concentrations de benzène. Il s'agit entre autres d'appliquer correctement les prescriptions de l'ordonnance sur la protection de l'air en matière de stations-service. En effet, dans quelque 20% d'entre elles, le système de récupération des vapeurs ne fonctionne pas du tout, et il fonctionne mal dans 15 à 30% d'autres postes de distribution, ce qui provoque des concentrations préoccupantes à proximité. Pour réduire les concentrations de benzène, on peut également capter et évacuer l'air vicié de manière conforme aux normes d'hygiène de l'air, notamment dans les garages et parkings, renoncer à la voiture pour de courts trajets et utiliser, pour alimenter les moteurs à deux-temps dont l'emploi est inévitable (p.ex. pour les tronçonneuses), de l'essence exempte d'hydrocarbures aromatiques et conforme aux normes suisses.

1 Introduction

1.1 Description du problème

Le benzène fait partie des substances cancérogènes. Le centre international de recherche sur le cancer de l'OMS (CIRC 1987) le place dans la catégorie des carcinogènes génotoxiques pour l'homme de classe 1. S'agissant de ces substances, aucun seuil au-dessous duquel il n'existe pas de danger pour la santé n'a pu être déterminé. Les immissions de benzène sont donc toujours considérées comme nuisibles et incommodantes au sens de l'article 11, al. 3, de la loi sur la protection de l'environnement (LPE, 1983).

La Suisse n'a donc pas fixé, dans l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair 1985), de valeur limite d'immission pour le benzène visant à protéger la santé de la population. En revanche, elle a édicté des valeurs limites préventives très strictes (annexe 1, ch. 8, « Substances cancérogènes », OPair) ainsi que des directives destinées aux entreprises (annexe 2, ch. 33, « Installations pour le transvasement de l'essence », OPair). Ces directives sont des **exigences minimales**. Aux termes de l'annexe 1, ch. 82, al. 2, OPair, les émissions des substances cancérigènes mentionnées au chiffre 83 doivent être au moins limitées de manière à ce que la concentration des émissions ne dépasse pas les valeurs limites fixées. Dans le cadre de cette limitation, il est en outre obligatoire de réduire davantage les émissions de substances cancérogènes, même si les valeurs limites sont respectées. Les autorités chargées de la mise en œuvre déterminent pour chaque installation émettrice de benzène quelles sont les mesures supplémentaires à prendre pour limiter les émissions de benzène, et ce en fonction des dernières technologies. Les autres directives importantes pour la réduction des émissions de benzène, que la Suisse a introduites en accord avec l'UE, sont des ordonnances concernant les exigences techniques (OETV 1–3, 1995/98) pour les véhicules. Les normes EURO sont ainsi intégrées au droit fédéral tout comme le sont les exigences concernant la qualité des carburants (essence) selon l'annexe 5, ch. 5, OPair.

Grâce aux mesures à la source appliquées en Suisse au cours des 10 dernières années, les émissions de benzène ont régressé de plus de 50%.

A la fin de l'année 2000, l'UE a fixé la valeur limite pour les concentrations de benzène dans l'air à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valeur annuelle moyenne, UE 2000). Les pays membres sont tenus d'intégrer cette valeur à leur droit national d'ici à fin 2002. Cette valeur limite devra de plus être respectée dès le 1^{er} janvier 2010. Si les mesures visant au respect des valeurs limites entraînent des problèmes socio-économiques, les Etats membres concernés sont en droit de demander que le délai imparti soit prolongé de cinq ans, une seule fois. Il est probable que les pays dans lesquels les émissions de benzène sont très importantes dans les villes fassent usage de cette dérogation. La valeur limite d'immission de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ne sera donc vraisemblablement atteinte qu'en 2015 dans les pays où les concentrations sont actuellement les plus élevées.

S'agissant du benzène, la prise de position écrite de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) a pour objectifs une estimation critique de la protection

de l'air en Suisse, à la lumière de la proposition faite par l'UE, et la mise en place d'un processus adéquat. Les points déterminants sont les suivants:

- Identification des sources d'émissions de benzène
- Quantification des nuisances et du risque encouru par la population suisse
- Mise en évidence de la nécessité éventuelle d'appliquer des mesures complémentaires s'agissant du benzène
- Proposition d'une stratégie et de mesures visant à réduire davantage les risques

1.2 Propriétés, présence et utilisation du benzène

La formule chimique du benzène est C_6H_6 (MM: 78,11). Il s'agit d'un liquide incolore dont l'odeur aromatique est caractéristique. Cette substance est le plus simple, mais aussi le plus connu des hydrocarbures aromatiques. Dans des conditions normales, le benzène est inflammable, chimiquement stable et modérément soluble dans l'eau. De par sa haute pression de vapeur ($0,1 \times 10^5$ Pa à 20°), il est principalement présent dans les gaz d'échappement et dans l'air sous forme gazeuse.

Le benzène est contenu en faibles quantités dans le pétrole brut et se forme lors du raffinage de cette matière première. Il apparaît également lors de la combustion - incomplète de substances organiques comme le charbon ou lors d'incendies de forêt. Aujourd'hui, 3 à 5% des émissions de benzène à l'échelle mondiale sont d'origine naturelle.

Le benzène est la substance de base d'un grand nombre de produits comme des matières synthétiques, résines, produits phytosanitaires, colorants ou produits nettoyants. Le benzène est aussi contenu dans certains carburants. Actuellement, la Suisse et l'Union européenne n'autorisent qu'un volume % de benzène par litre d'essence au maximum. Durant l'année 2000, environ 5,5 millions de m^3 (environ 4 millions de tonnes) de carburant automobile ont été utilisés en Suisse.

2 Sources des émissions de benzène

Les émissions de benzène dans l'atmosphère proviennent en majeure partie de sources anthropiques. Les sources principales sont les combustions servant à la production d'énergie. En 2000, les émissions de benzène en Suisse ont été évaluées entre 1370 et 1430 tonnes. Environ 75% de cette quantité provient du trafic routier motorisé, dont la majeure partie de véhicules à essence. Les émissions sont réparties comme suit:

En 2000, les émissions de benzène dues au **trafic routier motorisé** atteignaient environ 1040 tonnes (émissions des pots d'échappement de véhicules à essence et, dans une moindre mesure, de véhicules diesels). Entre 1985 et 2000, les émissions de benzène dues au trafic routier motorisé ont diminué d'environ 80%.

En Suisse, 70 à 100 tonnes de benzène ont été émises lors du **transvasement** et du **stockage** d'essence et de carburant diesel dans les 3600 stations-service, les divers entrepôts de carburant et les deux raffineries du pays. Trente tonnes environ sont à imputer au remplissage des réservoirs des voitures.

Dans le secteur **offroad**, (machines agricoles, sylvicoles, de jardin, de loisirs, navigation, navigation aérienne, véhicules industriels, machines de chantiers, remplissage des citernes à mazout, etc.), 60 à 90 tonnes de benzène ont été émises. Les émissions provenant des pots d'échappement, du stockage et du transvasement sont additionnées.

Les **combustions** des ménages, de l'industrie, de l'agriculture et des entreprises de prestation de services ont généré environ 200 tonnes de benzène. La majeure partie de ces émissions (environ 140 tonnes) provient de la combustion du bois.

Tableau 1: Les émissions de benzène en Suisse, pour les années 2000 et 2010

Source	Emissions en 2000		Emissions en 2010	
	t/a	%	t/a	%
Voitures et véhicules de livraison à essence	840	60,0	240	34,3
Motos et cyclomoteurs à essence	120	8,6	105	15,0
Bus, voitures, poids lourds, véhicules de livraison à moteur diesel	80	5,7	50	7,2
Transvasement et stockage de l'essence et du diesel	70–100	6,1	35–65	5,6
Gaz d'échappement, stockage et transvasement (essence, kérosène, diesel, mazout) dans le secteur offroad	60–90	5,3	30–60	6,4
Appareils, bateaux, machines, etc.				
Combustion de bois (ménages, artisanat, agriculture, services, industrie)	140	10,0	155	22,2
Combustion de mazout/gaz (ménages, artisanat, agriculture, services, industrie)	60	4,3	65	9,3
Total	1370–1430	100	680–740	100

Suite aux mesures déjà prises, les émissions de benzène en Suisse devraient encore diminuer d'ici à 2010.

S'agissant du trafic routier motorisé, le renforcement des prescriptions appliquées aux gaz d'échappement devrait entraîner une réduction des émissions de 1040 tonnes à environ 400. Ce chiffre correspond à 57% du total des émissions restantes. Lors du transvasement de carburant aux pompes à essence, les émissions devraient également baisser sensiblement (de 2/3 environ) grâce à l'amélioration des technologies (contrôle automatique de fonctionnement, systèmes autorégulateurs).

En ce qui concerne les entrepôts, aucune nouvelle mesure n'est prévue. En raison de l'amélioration des technologies, l'on peut cependant prévoir une régression des émissions de l'ordre de 20%.

Dans le secteur offroad, l'évolution du taux d'émissions est plus difficile à prévoir. Les pronostics actuels font état d'une baisse globale de 40% environ.

En ce qui concerne les combustions effectuées par les ménages, l'industrie, l'agriculture et le secteur des prestations de services, le taux d'émissions devrait rester stable, voire même augmenter légèrement. Il serait toutefois possible d'opérer des réductions grâce à l'emploi de meilleures technologies.

En 2010, les prévisions font état d'un total d'émissions compris entre 680 et 740 tonnes de benzène, ce qui représente à peu près 50% des émissions actuelles.

3 Immissions

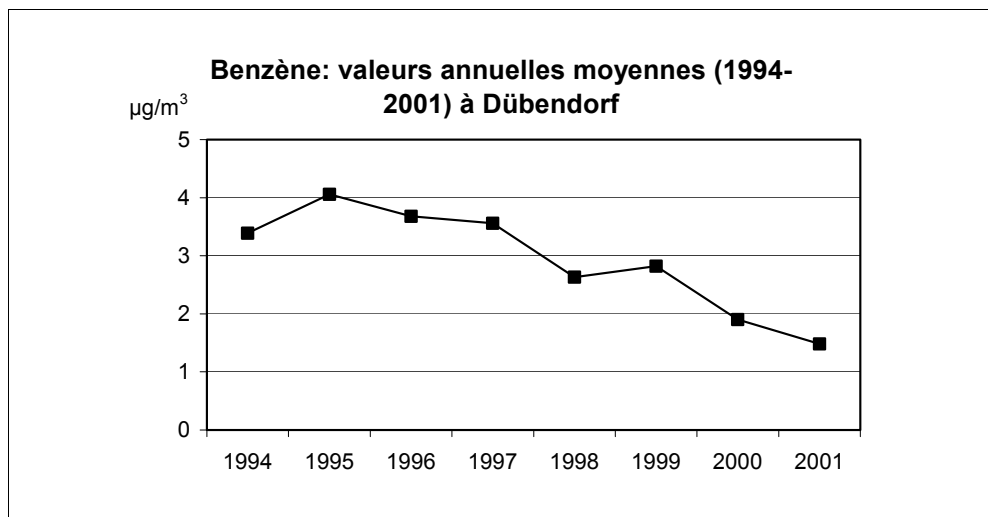
3.1 Situation

Les concentrations de benzène dans l'atmosphère sont fonction du taux des émissions, des conditions météo et de la dégradation chimique. La durée de séjour du benzène dans la troposphère est d'environ neuf jours mais, dans les endroits où les concentrations sont élevées, elle se réduit à un jour seulement, en raison d'une dégradation rapide.

Les taux de benzène sont mesurés à une vingtaine d'endroits en Suisse, par diverses méthodes (OFEFP 2001). Aux endroits où la concentration de benzène est élevée, les mesures effectuées en 2000/2001 indiquent des valeurs annuelles moyennes légèrement supérieures à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, comme à la Feldbergstrasse de Bâle, où la concentration est de $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et à la Neugasse de Zoug, où elle atteint $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Des concentrations moyennes comprises entre 2 et $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ont par exemple été mesurées à Locarno ($3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), à Soleure ($3,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), à Lugano et à Morbio Inferiore ($2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), à Montreux ($2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ainsi qu'à Dübendorf, Bâle St. Johann et Stabio ($1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Aux endroits peu touchés par le phénomène, les concentrations de benzène sont inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, comme à Grenchen Witi ($0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ou à Hagen SH ($0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Entre le milieu des années 90 et l'année 2001, les concentrations ont diminué de 40 à 60% à presque toutes les stations. C'est par exemple le cas à la Feldbergstrasse de Bâle, où la concentration est passée de $9,5$ à $5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, à la station NABEL de Dübendorf, où elle est passée de 4 à $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (cf. ill. 1), à la station NABEL de Tänikon, où elle est passée de $2,2$ à $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, à la place Bellevue de Zurich, où elle est passée de 8 à $4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et à la Stampfenbachstrasse de Zurich, où elle est passée de $4,7$ à $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les concentrations mesurées dépendent des endroits où sont placées les stations de mesure. Ainsi, les taux de benzène relevés à la Feldbergstrasse de Bâle, une rue encaissée relativement fréquentée, sont presque trois fois supérieurs à ceux relevés à environ 500 mètres de là, dans le quartier de St Johann, où le trafic est plus faible et la chaussée mieux ventilée.

Illustration 1:
Les concentrations de
benzène à Dübendorf
(LFEM, station NABEL)



La limitation du taux de benzène dans l'essence à un volume % a eu pour effet une réduction sensible des concentrations dans les années 2000/2001 par rapport à l'année 1999.

Au sein de l'UE (UE 1998), les concentrations urbaines de base varient entre 2 et environ 10 µg/m³ (valeurs annuelles moyennes 96–98). A certains endroits fortement pollués, les mesures indiquent de 20 à 40 µg/m³ (Milan, Rome, Athènes). Entre 1990 et 2010, les pronostics font état d'une réduction des immissions de benzène comprise entre 50 et 70% (en fonction du scénario de réduction des émissions).

3.2 Mesure des taux de benzène – Méthodes appliquées

Le benzène est mesuré par enrichissement sur un milieu adsorbant. Il est ensuite soumis à une désorption grâce à une méthode adéquate (thermique ou liquide) et séparé des autres hydrocarbures sans interférences par chromatographie gazeuse. La détection est réalisée à l'aide d'un détecteur d'ionisation de flamme (FID) ou d'un autre détecteur adéquat (p. ex. spectromètre de masse, détecteur à ionisation par photon).

Les installations de mesure doivent être calibrées à intervalle régulier. Le personnel chargé des mesures doit être au bénéfice d'une formation adéquate. Il est en outre tenu de vérifier en permanence la qualité des mesures et de déterminer la plausibilité des résultats obtenus (p. ex. en les comparant avec les concentrations des autres polluants au même endroit ou à des endroits similaires).

Une technique d'analyse différente des méthodes mentionnées ci-dessus peut être utilisée si elle permet d'obtenir les mêmes résultats. Un capteur passif à accumulation a par exemple été utilisé pendant quelques jours (LIFE 98) suite aux incertitudes de mesures relevées dans l'annexe VI à la directive 2000/69/CE.

Généralités

- Une méthode de référence pour mesurer les taux de benzène est actuellement développée dans le cadre du Comité européen de normalisation (CEN). Pour le moment, les méthodes et appareils connus sont comparés. Il ne faut pas s'attendre à une normalisation avant 2002/2003.
- Les diverses méthodes utilisées font l'objet d'un article récapitulatif. L'auteur de cet article est également le responsable du groupe CEN qui travaille à l'établissement de la norme (Skov 2001).

Un aperçu des mesures de benzène effectuées en Suisse indique une bonne source de données (OFEFP 2001). Il est cependant conseillé d'effectuer encore des mesures ponctuelles complémentaires (notamment dans les grandes agglomérations) afin de mieux évaluer l'exposition de la population, de procéder à un suivi et de mieux valider le modèle de dispersion. Ces mesures peuvent être faites avec des capteurs passifs adéquats par exemple.

4 Exposition de la population

L'exposition de la population au benzène en extérieur a été calculée grâce à un modèle de dispersion empirique sur la base d'une distribution selon une courbe de Gauss et en utilisant des paramètres relevant de la météorologie suisse. Ce modèle a été validé avec les données de différentes stations de mesures (OFEFP 2003, en cours de préparation). La carte suivante (cf. Il. 2) indique les concentrations de benzène en Suisse pour l'année 2000:

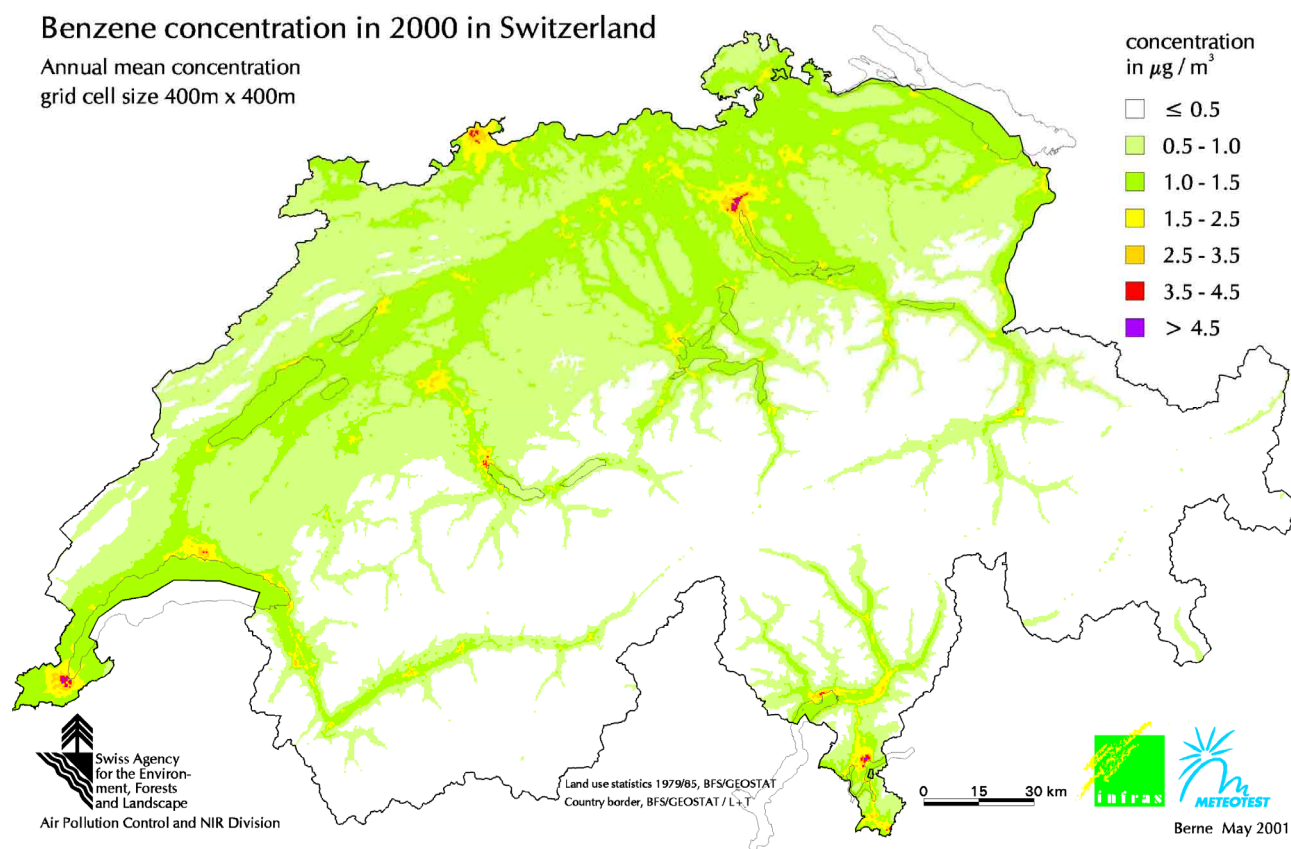


Illustration 2: Les concentrations de benzène en Suisse pour l'année 2000

Sur la base des immissions et des statistiques démographiques, la population a été classée suivant en fonction des différentes catégories d'exposition (cf. Tab. 2).

Environ 1% de la population vit dans des régions où les concentrations annuelles moyennes de benzène sont supérieures à $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 13% vivent dans des régions où les concentrations se situent entre 3 et $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La plus grande partie de la population, soit environ 84%, vit dans des régions où les concentrations annuelles moyennes sont comprises entre 1 et $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les 2% restants vivent dans des régions où les valeurs annuelles moyennes sont inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sur la base des concentrations mesurées dans l'air et des statistiques démographiques, on obtient une moyenne annuelle de l'exposition au benzène, pondérée en fonction de la population.

Tableau 2: Exposition de la population au benzène au cours de l'année 2000

Exposition en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	% de la population
0,0–0,5	0,0%
0,5–1,0	1,6%
1,0–1,5	17,7%
1,5–2,0	38,2%
2,0–2,5	19,8%
2,5–3,0	8,6%
3,0–3,5	5,9%
3,5–4,0	3,3%
4,0–4,5	2,1%
4,5–5,0	1,5%
5,0–5,5	0,8%
5,5–6,0	0,3%
> 6,0	0,1%
	100%

Benzene concentration in 2010 in Switzerland

Annual mean concentration
grid cell size 400m x 400m

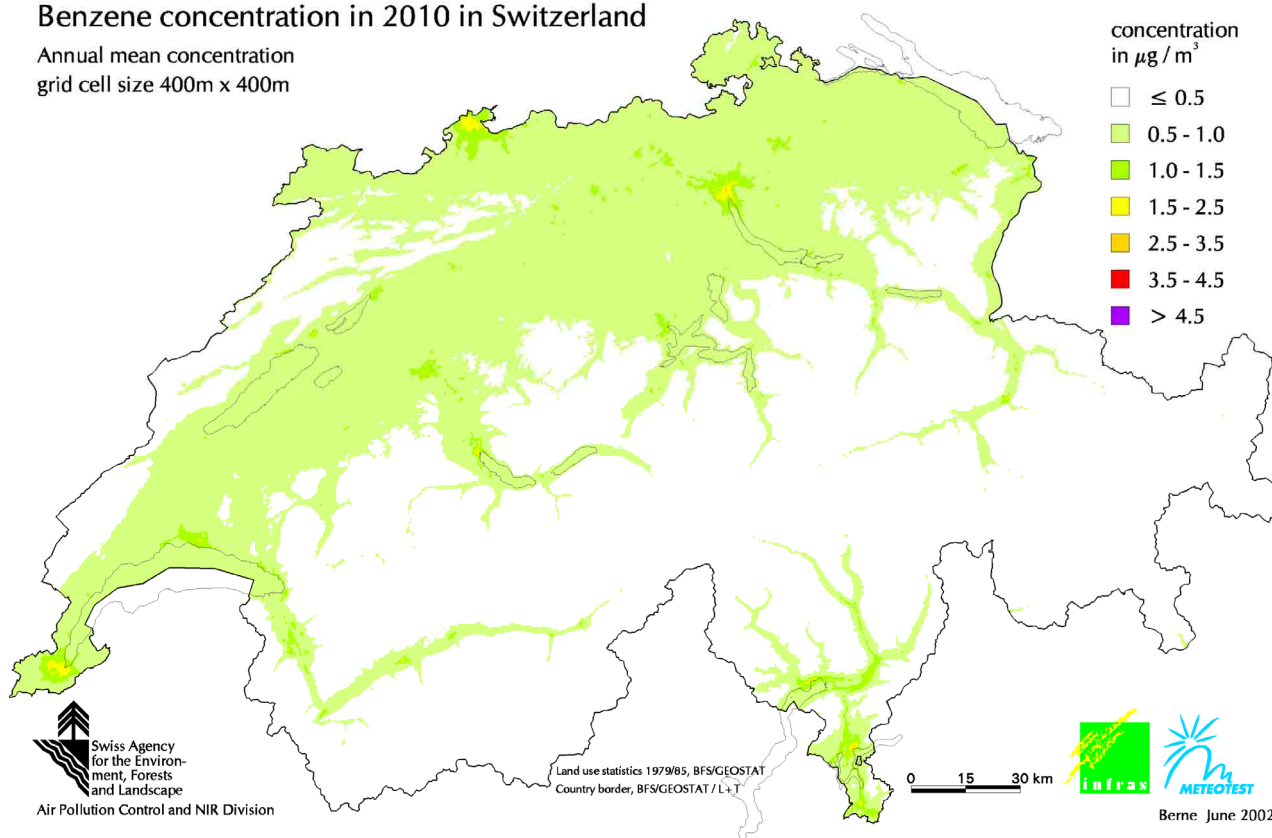


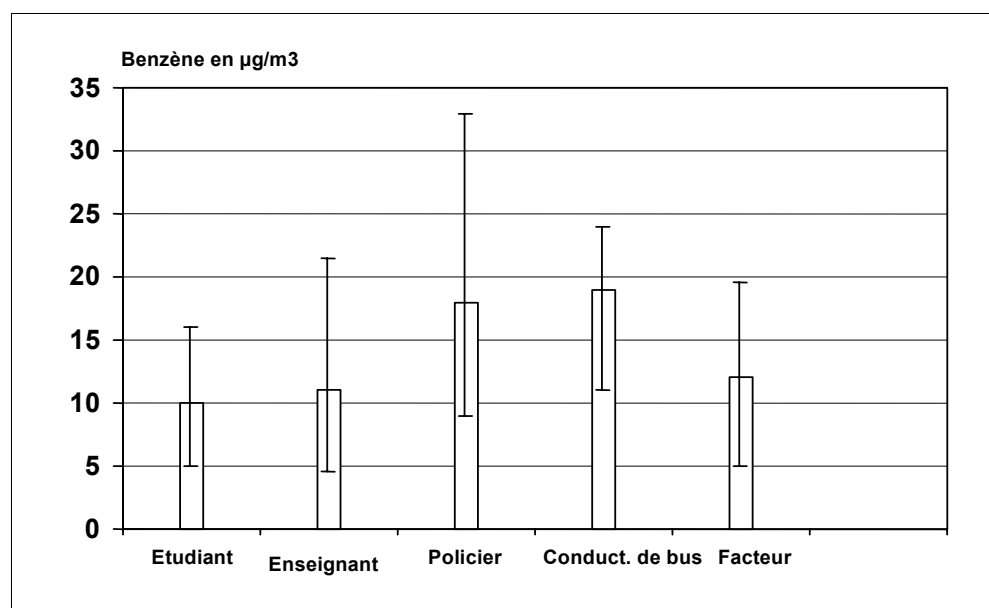
Illustration 3: Les concentrations de benzène en Suisse pour l'année 2010

En raison de la réduction prévue des émissions, les taux d'exposition de la population devraient baisser au cours des années à venir. En 2010, ils devraient avoir diminué de 50% environ. Ainsi, la majeure partie de la population vivra dans des régions où les concentrations de benzène seront comprises entre 0,5 et 1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (cf. ill. 3).

Quel est le degré de fiabilité des mesures effectuées dans l'air pour déterminer l'exposition véritable de la population?

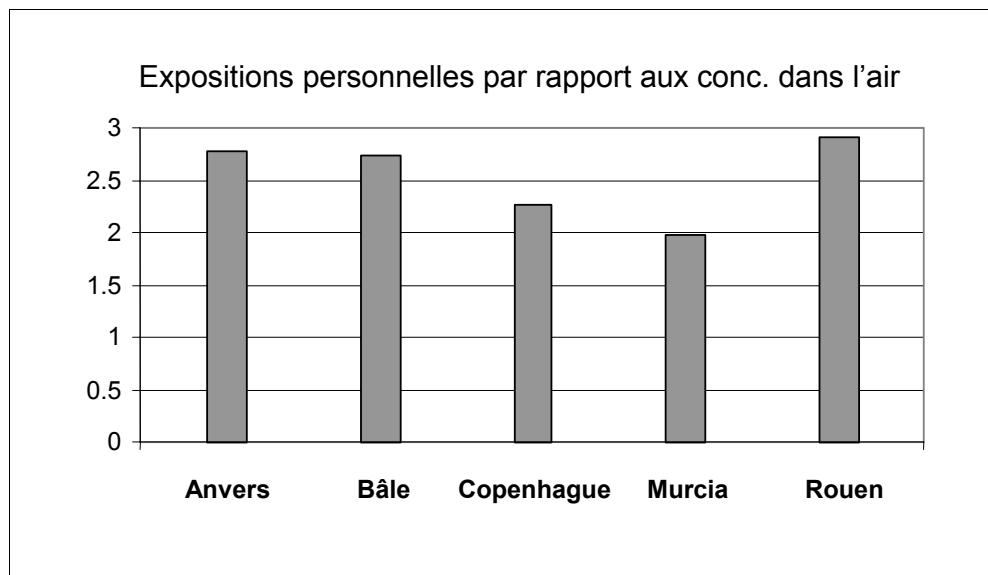
Pour répondre à cette question, l'on peut examiner les résultats des études européennes EXPOLIS (Jantunen 98) et MACBETH (LIFE 1998). Lors de ces études, les concentrations de benzène dans l'air ont été mesurées dans diverses villes d'Europe, en intérieur et en extérieur, ainsi que sur un nombre défini d'habitants de ces villes. Un premier résultat des études montre que l'exposition au benzène peut être très différente selon le domaine d'activité (cf. ill. 4).

Illustration 4:
Exposition au benzène
en fonction du domaine
d'activité (domaine
d'incertitude de la me-
sure incl.)



Un autre résultat montre que les concentrations moyennes relevées sur les habitants examinés sont sensiblement plus élevées que les valeurs mesurées dans l'air. A Bâle (Schweizer 2002) ainsi que dans d'autres villes d'Europe centrale et septentrionale, de même qu'à Murcia, le rapport est de 2 à 3 contre 1 (cf. ill. 5). On suppose que des sources supplémentaires qui ne sont souvent pas relevées directement lors des mesures dans l'air prennent ici toute leur importance. Les parkings, notamment les garages individuels ou communs fermés, ainsi que les abords de stations-service sont des endroits où les émissions de benzène sont importantes, ce qui a des répercussions sur les utilisateurs et les riverains.

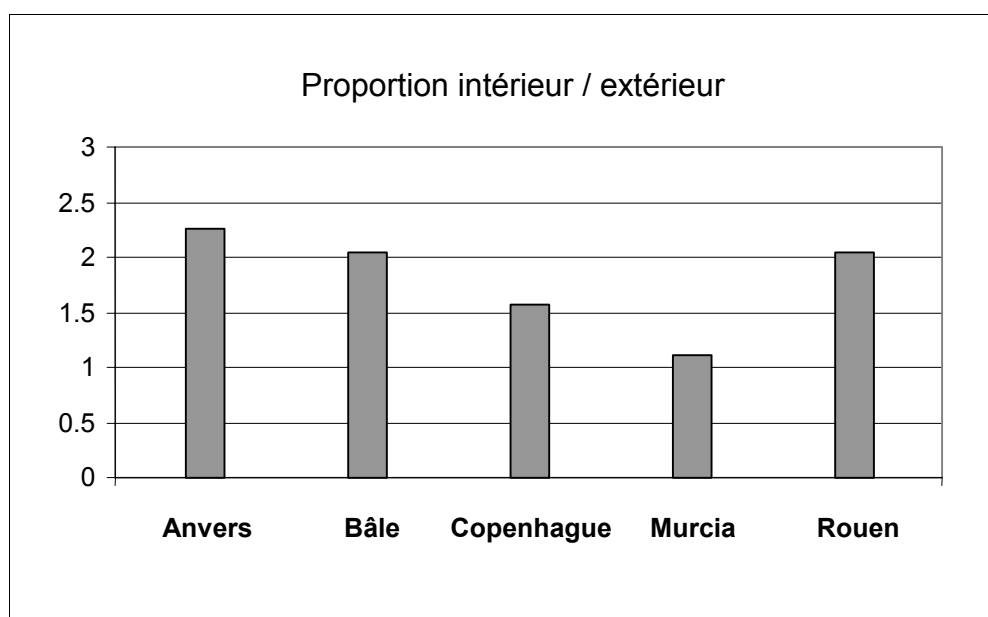
Illustration 5:
Expositions personnelles
en comparaison avec les
concentrations mesurées
dans l'air dans cinq villes
d'Europe (comparables
avec les proportions en
Suisse).



Le temps passé en voiture est aussi un facteur important. En effet, on relève de fortes concentrations de benzène dans l'habitacle. Dans les bus de ligne allemands, par exemple, les concentrations relevées sont comprises entre 15 et 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Römmelt 1994), en fonction de la densité du trafic. Des études estiment qu'environ un tiers de tout le benzène absorbé l'est pendant des séjours dans des véhicules (Fromme 1995).

Dans les habitacles, l'on mesure très souvent des concentrations de benzène plus élevées que dans l'air ambiant (cf. ill. 6).

Illustration 6:
Proportion de concentra-
tions de benzène à
l'intérieur/ l'extérieur
dans 5 villes en Europe.



Selon une étude (Berlin, Laue 1994), les concentrations de benzène dans les appartements situés à proximité de stations-service sont au moins le double de celles mesurées dans des appartements de référence, et elles sont quatre fois plus élevées dans des appartements situés au-dessus de stations-service. Ces concentrations peuvent être sensiblement diminuées grâce à un système de récupération des gaz qui fonctionne bien. Les mesures effectuées à proximité de grandes stations-service indiquent que les concentrations de benzène à hauteur du visage des clients ont diminué de 90% après l'introduction d'un système de récupération des vapeurs. Sur le périmètre de ces stations-service, les concentrations moyennes ont simultanément diminué de 75% (Reitmeyer 2000).

De fortes concentrations de benzène sont également mesurées dans les parkings souterrains. Le tableau suivant indique quelques mesures effectuées en 1999 à divers endroits de Suisse. Ils montrent que des concentrations élevées peuvent apparaître localement. La population est exposée dans une mesure non négligeable à ces concentrations qui ne sont pas relevées par les stations de mesure centrales. Les mesures ont parfois été effectuées sur 14 jours. Une comparaison avec les valeurs limites ou les valeurs indicatives n'est possible que dans une proportion limitée.

Les mesures indiquent clairement que les gaz d'échappement dans les parkings provoquent des émissions locales élevées dont l'importance doit être prise en compte pour les riverains. Les gaz d'échappement devraient sans aucun doute être recueillis et déviés selon des critères d'hygiène de l'air optimisés, dans le but de protéger la santé de la population (OPair 1985).

Tableau 3: Concentrations de benzène à quelques endroits sélectionnés en Suisse et en Allemagne

Concentrations en intérieur / extérieur	Benzène en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	Remarques
Air dans un magasin d'alimentation / centre commercial	17	Aspiration d'air frais près de l'évacuation d'air du parking souterrain (AFU AR 1999)
Air extérieur d'une zone d'habitation	3,5	Moyenne sur plusieurs mois (AFU AR 1999)
Mesures sur l'air de zones d'habitation en Suisse	2–3,5	(OFEFP 2000/1)
Air dans des garages de bâtiments administratifs, en Suisse et en Allemagne	jusqu'à 300	Mauvaise aération (AGB 1999, Simon 2001)
Air dans des parkings souterrains d'immeuble de bureaux	94	(Gritsch 2001)
Air dans des caves	57	(AGB 1999)
Air dans des bureaux	18–25	(AGB 1999)
Air ambiant dans des jardins	3,3	(AGB 1999)

* Durée des mesures effectuées avec des capteurs passifs: 14 jours

L'on peut supposer qu'une réduction de la pollution atmosphérique impliquerait une réduction des concentrations en intérieur. En effet, dans les appartements de non-fumeurs, le benzène provient presque uniquement de l'air extérieur et de l'air évacué des parkings.

Le tabagisme est un facteur important. A l'intérieur des habitations, la fumée du tabac est pratiquement la seule source supplémentaire de benzène. Des études (p. ex. Krause 1987) démontrent que les concentrations de benzène à l'intérieur des appartements de fumeurs sont de 30 à 50% plus élevées que chez des non-fumeurs (valeurs moyennes de $9,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ contre $7,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). L'exposition des fumeurs au benzène est encore renforcée par l'inhalation directe de la fumée. Le taux d'exposition d'un fumeur peut ainsi être cinq à dix fois supérieur à celui d'un non-fumeur.

Le présent rapport fournit une estimation, effectuée sur la base des valeurs Risque Unitaire (« Unit Risk »), des risques encourus par la population à cause de l'exposition au benzène. Les valeurs Risque Unitaire se fondent sur les résultats d'études réalisées sur le lieu de travail et d'études expérimentales effectuées sur des animaux et sur des cultures cellulaires. Ce type d'étude donne peu d'indications sur l'exposition de la population en général, contrairement aux études épidémiologiques grâce auxquelles l'exposition de la population peut être déterminée de manière assez précise. Si l'évaluation des risques est faite en fonction des valeurs Risque Unitaire, il convient en plus de déterminer l'exposition à laquelle est soumise la population. Suite aux résultats livrés par l'étude MACBETH (villes d'Europe méditerranéenne, centrale et septentrionale, LIFE 1998), les experts européens (UE 1998) estiment que l'exposition de la population au benzène dans toute l'Europe est environ 1,5 fois plus élevée que la valeur moyenne de cette même substance mesurée dans l'air (extérieur).

Pour évaluer l'exposition de la population helvétique, la moyenne obtenue lors des mesures effectuées en extérieur est multipliée par deux, puisque les valeurs moyennes pondérées en fonction de la population mesurées à Bâle ainsi que dans des villes d'Europe centrale et septentrionale sont plus importantes. La moyenne annuelle pondérée de l'exposition au benzène de la population suisse est donc d'environ $3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1,9 \times 2$).

5 Répercussions – évaluation des risques

5.1 Absorption, métabolisme, effets toxicologiques

Le benzène est absorbé principalement par inhalation. Selon l'état des connaissances actuelles, les aliments contenant du benzène qui transitent par le système gastro-intestinal sont négligeables. Lorsque la personne est en contact direct avec du benzène, ce polluant peut aussi être résorbé par la peau.

Le benzène est soluble dans la graisse; il se lie aux lipoprotéines dans le plasma. Il pénètre facilement les membranes cellulaires ou encore le placenta. Une partie du benzène absorbé est expiré à la fin de l'exposition, alors qu'une autre partie est assimilée par les tissus adipeux tels que la moelle osseuse. La métabolisation ainsi que l'élimination se font surtout par le foie; une petite partie est faite par les reins. L'exposition au benzène peut être décelée en fonction de la quantité de benzène contenue dans l'air expiré, dans le sang, ou encore grâce aux taux d'acide trans-, transmuconique et d'acide thiophényl acétique dans les urines.

Lorsque les concentrations de benzène sont élevées, elles provoquent des irritations des yeux et des voies respiratoires, une dépression du système nerveux (sommolence, désarroi, ataxie, arythmie, perte de connaissance), ce qui peut conduire à la mort par suffocation, arrêt respiratoire ou arrêt cardiaque. Les intoxications aiguës sont en général réversibles.

Le benzène est toxique pour les trois principales cellules sanguines, à savoir les leucocytes, les plaquettes et les érythrocytes. Le benzène n'est pas mutagène dans le test d'Ames. Il endommage cependant les chromosomes in vitro et in vivo. Il agit vraisemblablement sur l'ADN des cellules souches pluripotentes et des cellules souches des lymphocytes.

Suite à un empoisonnement chronique au benzène, une pancytopenie (réversible) ou encore une anémie aplastique peuvent apparaître. La pancytopenie est une production trop faible de globules rouges, blancs et de plaquettes, l'anémie aplastique le manque total de renouvellement de ces mêmes cellules. L'anémie aplastique évolue souvent vers une leucémie. La leucémie peut aussi se déclarer directement, sans être précédée d'une anémie aplastique.

La valeur IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) est de 3000 ppm. Une dose de 7000 ppm environ représente un danger de mort immédiat. La valeur OSHA (Occupational Safety and Health Administration) qui sert à prévenir les cancers (leucémies) est fixée à 1 ppm, avec une valeur de pointe de 5 ppm.

Le CIRC classe le benzène parmi les substances cancérogènes (classe I).

La valeur maximale d'exposition au poste de travail (VME) est de 1 ppm = 3,25 mg/m³. Comme le benzène est cancérogène, l'exposition à cette substance doit être la plus faible possible.

5.2 Etudes épidémiologiques sur les risques de cancer

Dans l'ensemble des études épidémiologiques, il est avéré que le benzène déclenche des cancers tels que la leucémie (prolifération hématopoïétique), mais aussi des lymphomes (proliférations cancéreuses dans le tissu lymphatique) (cf. Savitz 1997, CIRC 1987: *Classe 1, indications suffisantes de cancérogenèse chez l'homme*). Des études de cohorte démontrent que les personnes exposées au benzène sur leur lieu de travail encourrent un risque de leucémie de quatre à huit fois plus élevé que celles qui ne sont pas particulièrement exposées.

Etudes de la médecine du travail

Les études effectuées sur les animaux et sur les cellules humaines indiquent que des aberrations chromosomiques, des échanges entre les chromatides sœurs et des micronoyaux apparaissent dans les lymphocytes lors d'expositions au benzène. Le benzène est donc bien mutagène. La cancérogenèse a surtout été constatée chez des travailleurs exposés au benzène.

Les études effectuées par le passé indiquent que les personnes travaillant dans des usines pétrochimiques, dans le traitement du cuir, dans l'industrie du caoutchouc ou encore les personnes exposées aux vapeurs de solvants sont plus sujettes à la leucémie que la population moyenne. Très souvent, les personnes concernées étaient exposées au benzène et à un grand nombre de substances chimiques. Seule une évaluation exacte de l'exposition sur le lieu de travail permet de déterminer le rapport dose/effet pour ensuite appliquer les données obtenues à des groupes de population moins exposés. Cette évaluation continue de poser problème. Dans ce contexte, trois études sont le plus souvent citées.

L'étude la plus souvent consultée dans le cadre de la dérivation des quantificateurs d'effets est la cohorte Pliofilm. Elle a été réalisée sur 1212 personnes de sexe masculin ayant travaillé de 1936 à 1975 dans la production de caoutchouc hydrochloré, dont la fabrication exige de grandes quantités de benzène (Rinsky 1987, Wong 2000). Le dernier contrôle recense 111 décès dus à des cancers dont 14 à des leucémies (SMR 3,6, CI 2–6) étroitement associées à des expositions cumulées. Divers quantificateurs d'effets ont été évalués selon l'exposition et le type du rapport dose/effet. Les nouvelles estimations indiquent entre 0,3 et 1,3 cas de leucémie supplémentaire pour 1000 travailleurs lors d'une exposition à 3,2 mg/m³ sur 45 années.

Les études chinoises effectuées sur 74 800 travailleurs exposés au benzène et sur 35 800 personnes de référence (Hayes 1996, Yin 1996), tous contrôlés sur 15 ans mentionnent un nombre important de tumeurs malignes des tissus lymphatiques et hématopoïétiques ainsi que des cancers des poumons.

Une méta-analyse de toutes les études de cohorte effectuées sur les travailleurs de l'industrie pétrochimique aux USA et en Grande-Bretagne (Raabe 1996), qui traitait les données de 208 000 personnes, n'a pas prouvé d'augmentation statistique du risque de leucémie myéloïde aiguë, lymphatique aiguë ou lymphatique chronique. Le problème posé par l'évaluation méta-analytique de ces leucémies spécifiques

reste la comparabilité des études effectuées sur un nombre de personnes limité, les imprécisions, les définitions et diagnostics différents, etc. D'autres problèmes apparaissent également, comme le healthy worker effect (départ des travailleurs malades de l'entreprise et des études de cohorte) ainsi que les implications du choix des groupes comparés sur les résultats.

L'on constate que les effets sont différents en fonction du sexe et des organes étudiés, ce qui avait également été observé lors des études réalisées sur des animaux. Une nouvelle étude pharmacocinétique qui prend en compte chez les femmes le coefficient de partition sang/air plus élevé, le taux de métabolisation du benzène plus élevé et le taux de graisse corporelle plus élevé permet de conclure que les valeurs limites ne doivent pas être déterminées uniquement en fonction des études faites sur des éléments masculin, car, à doses égales, les effets constatés chez les femmes sont plus marqués (Brown 1999).

Etudes de population

Jusqu'à présent, les rapports de cause à effet existant entre le benzène et la leucémie ou le cancer ont surtout été étudiés lors d'études de cas de cohorte chez les enfants. L'indicateur de concentration choisi était souvent la densité du trafic et, une fois seulement, les immissions de benzène.

Quatre petites études menées sur des enfants atteints de cancer ou de leucémie établissent un rapport entre la maladie et la densité du trafic sur le lieu d'habitation de ces enfants. Cependant, le taux de benzène dans l'air n'a pas été mesuré et ces études se fondent en partie sur des modèles de charge du trafic et/ou sur les taux de NO₂ en tant que substance indicative. Lorsque la pollution atmosphérique est surtout due aux émissions du trafic routier, la corrélation entre le NO₂ et le benzène est en général bien établie.

Une importante étude danoise n'a pas été en mesure de confirmer ce rapport (Raaschou-Nielsen 2001). La densité du trafic à proximité du lieu d'habitation de la mère enceinte ou de l'enfant n'était associée ni à une leucémie, ni à une tumeur cérébrale, ni à un lymphome. En revanche, l'exposition au benzène et au NO₂ durant la grossesse est liée à l'apparition ultérieure de lymphomes chez l'enfant, notamment des lymphomes de Hodgkin.

5.3 Autres répercussions sur la santé

Dans les études de population qui ne font pas état de répercussions graves à long terme, le benzène est souvent un indicateur pour évaluer la densité du trafic. Ainsi, à Leipzig, le benzène s'est révélé un meilleur indicateur d'évaluation du trafic que les particules, le NO₂ ou le CO (Fritz 2001). Inversement, dans une étude danoise (Raaschou-Nielsen 1997), la densité du trafic à proximité du lieu d'habitation était un indicateur très imprécis des concentrations de benzène sur le seuil des immeubles. Les valeurs individuelles de benzène relevées sur les enfants étaient en corrélation

avec celles relevées devant les habitations; le simple fait de circuler en voiture influait fortement sur les taux de benzène relevés sur les passagers.

Une vaste étude menée à Dresde sur plus de 5400 écoliers (Hirsch 1999) indique une concentration de benzène moyenne de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (écart: de 1,9 à $8,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), relevée sur le lieu d'habitation par un quadrillage avec des mailles de 1 km. Par microgramme de concentration en plus, l'on a constaté une augmentation des toux chroniques de 15% environ et des bronchites de 11% environ pour l'année précédente. Ces incidences sont à imputer au mélange de toutes les substances contenues dans les gaz d'échappement, et non au seul benzène.

5.4 Quantificateurs d'effets permettant de déterminer le risque de leucémie et valeurs indicatives préconisées

Le Risque Unitaire est le risque supplémentaire de leucémie encouru par une personne qui inhalerait durant toute sa vie $1 \mu\text{g}$ de benzène/ m^3 . Ces Risque Unitaires ont été déterminés par différents organes sur la base de données provenant pour beaucoup des études de la médecine du travail mentionnées plus haut. Les calculs effectués pour obtenir le Risque Unitaire se fondent cependant sur divers modèles. L'évaluation des risques est souvent fonction d'une extrapolation linéaire du risque sur la population normale à partir des résultats d'études effectuées sur des travailleurs fortement exposés. Certaines organisations utilisent également des modèles de calcul incluant une valeur seuil. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les instances environnementales américaines EPA utilisent le modèle d'extrapolation linéaire sans valeur seuil. Elles justifient ce choix par le mécanisme génotoxique du benzène et le principe de précaution. De telles extrapolations sont nécessaires. En effet, le risque de leucémie encouru par la population en raison de concentrations de benzène de quelques microgrammes ne peut pas être évalué à l'aide des études épidémiologiques. Sur la base de ce Risque Unitaire et d'un risque maximal acceptable, certains pays définissent des valeurs de référence, des valeurs cibles ou encore des valeurs limites afin de réduire les risques de cancer au sein de la population.

Tableau 4: Risque Unitaires, valeurs cibles et valeurs limites fixées par divers pays et organisations

US EPA (1998)	Risque Unitaire: $2,2\text{--}7,8 \times 10^{-6}$
OMS (2000)	Risque Unitaire: 6×10^{-6} , moyen géométrique d'évaluation du risque ($4,4 \times 10^{-6}\text{--}7,5 \times 10^{-6}$).
Allemagne, LAI <i>Länderausschuss für Immissionsschutz</i> (1992)	Risque Unitaire: $6\text{--}20 \times 10^{-6}$ Préconisé: 9×10^{-6} , ou une valeur cible de $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour limiter le risque généré par les substances cancérogènes à 1: 2500
Suède (1993)	Moyenne annuelle de $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en tant que <i>low risk guideline value</i>
Pays-Bas (1993)	Moyenne annuelle maximale tolérable de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valeur cible de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Grande-Bretagne 1994	Moyenne annuelle de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5 ppb), valeur cible de $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 ppb)
UE 2000	Moyenne annuelle de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, à respecter d'ici à 2010

5.5 Evaluation du risque pour l'ensemble de la population en Suisse

Sur la base d'une moyenne d'exposition au benzène de $3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (moyenne annuelle pondérée 2000), d'une population de 7,1 millions d'habitants et du Risque Unitaire de l'OMS de 6×10^{-6} (6 cas de leucémie pour 1 million d'habitants et $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), l'on peut supposer qu'au cours des 70 années à venir, 162 personnes seront atteintes d'une leucémie provoquée par le benzène (calcul: $3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 7,1 \text{ millions} \times 6 \text{ cas par million et par } \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ce chiffre correspond à deux cas de leucémie par an en Suisse. En tenant compte du domaine d'incertitude des facteurs de risque unitaire de l'OMS ($4,4 \times 10^{-6}\text{--}7,5 \times 10^{-6}$) et des incertitudes dans l'évaluation de l'exposition des personnes (+/- 20%), l'on peut estimer que le nombre de cas est compris entre 95 et 245 sur 70 ans, soit 1 à 3 cas par an. Les coûts externes engendrés par ces maladies sont de l'ordre de 10 à 30 millions de CHF par année (Yetergil 1998). Dans notre pays, les risques sur toute une vie sont ainsi de 23/1 000 000, soit 23 cas de leucémie par million d'habitant (calcul: 162 cas/ 7,1 millions). Ils sont donc aujourd'hui de 20 fois supérieurs au risque maximal de 1/1 000 000 admis par la CFHA.

6 Stratégies de réduction

6.1 Objectifs de protection – Bases légales

Aux termes de la loi suisse sur la protection de l'environnement (LPE), l'homme et son environnement doivent être protégés des atteintes nuisibles et incommodantes de la pollution atmosphérique (art. 11 en rapport avec les art. 13 et 14 LPE). En tant que substance cancérigène de classe 1 (estimation CIRC – OMS), le benzène nuit aux êtres humains, même en très petites quantités. Un seuil de concentration non toxique n'a pour l'instant pas pu être déterminé. De ce fait, les immissions sont déjà trop importantes en très faibles concentrations. La LPE ne propose pas de réponse véritable à la question de savoir comment déterminer des valeurs limites d'immissions lorsque l'on n'observe pas de seuil d'effet.

Une expertise juridique a été effectuée sur mandat de l'OFEFP (Brunner 2000). Son but était d'examiner les directives qui fixent les valeurs limites d'immissions, en premier lieu selon des éléments inhérents à la LPE. Suite à un examen supplémentaire des éléments spécifiques, il apparaît que les exigences de protection promulguées par la Constitution (s'agissant des troubles de la santé générés par des sources anthropiques comme l'ingestion de substances nocives) correspondent à un risque au cours de la durée de vie de $1/1\,000\,000$ (10^{-6}), soit 1 cas de leucémie par million d'habitants. Un tel risque n'est que peu démontrable et reste très proche de zéro. S'agissant des substances (tel le benzène) pour lesquelles aucun seuil d'effet n'a pu être fixé, l'objectif de protection devrait donc être de $1/1\,000\,000$ au maximum.

Le risque encouru par la population à cause du benzène en Suisse est aujourd'hui de 20 fois supérieur au niveau de protection de $1/1\,000\,000$. Les émissions et donc les immissions de benzène doivent encore être réduites. D'un point de vue strictement mathématique, les émissions devraient diminuer d'un facteur 20 par rapport aux chiffres de l'année 2000, ce qui correspondrait à environ 70 tonnes par an (année 2000: environ 1400 tonnes). Mais les concentrations moyennes mesurées dans l'air ne sont pas le seul facteur déterminant. Il faut aussi prendre en compte la durée de l'exposition et l'attitude à adopter face aux « Hot Spots » (points noirs). Pour diminuer les risques, il ne s'agit donc pas uniquement de réduire les émissions. Une meilleure aération grâce à des évacuations d'air respectant les critères d'hygiène de l'air ou encore l'aération souvent renouvelée des habitations dans lesquelles l'on fume sont des facteurs permettant de réduire les risques. Pour atteindre un niveau conforme aux prescriptions de la LPE en matière de sécurité, il suffirait à long terme que le total des émissions de benzène en Suisse ne dépasse pas les 100 tonnes (70–140) par année. Entre 2000 et 2010, suite à l'application des mesures déjà fixées, les émissions devraient diminuer d'environ 50%, pour se situer à environ 700 tonnes par an. Pour respecter totalement les prescriptions en matière de sécurité dont l'objectif est de 100 tonnes par an au maximum, il faudrait envisager des mesures supplémentaires.

6.2 Examen de la valeur limite pour le benzène préconisée par l'UE

L'UE a fixé une valeur limite de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en extérieur (valeur annuelle moyenne). Les Etats membres sont tenus d'intégrer cette valeur à leurs textes de loi et de la faire respecter à partir de 2010, voire de 2015. La directive du Parlement européen et du Conseil de l'UE concernant la valeur limite de benzène dans l'air est une exigence minimale. Les Etats membres sont en droit de fixer des valeurs plus strictes et des délais plus courts, mais ne peuvent pas assouplir ces valeurs ni repousser les dates à partir desquelles elles doivent entrer en vigueur.

Dans la situation actuelle, la CFHA ne souhaite pas proposer de valeur limite pour le benzène comme l'a fait l'UE. Ses arguments sont les suivants:

Immissions une valeur limite d'immission pour le benzène de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ est encore trop importante par rapport aux prescriptions légales. Cette valeur ne permettrait pas d'appliquer les directives de la LPE en matière de sécurité et dérogerait ainsi à la législation en vigueur et à la Constitution.

Emissions une telle valeur limite ne susciterait vraisemblablement pas l'élaboration de mesures complémentaires plus strictes visant à réduire la pollution. La protection de l'homme et de son environnement doit être assurée aux termes des exigences légales actuelles. Il convient en premier lieu de mettre en œuvre tous les moyens techniques à disposition et d'appliquer ensuite les dispositions de l'OPair.

De plus, les travaux devant être effectués suite à l'introduction d'une limitation, à savoir les mesures visant à contrôler le respect de la limite en vigueur, sont proportionnellement trop importants.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que les immissions de benzène recensées actuellement en Suisse sont nocives et qu'elles dépassent les taux prescrits par l'OPair. Il convient donc impérativement de prendre des mesures visant à réduire encore les émissions.

6.3 Stratégie

En Suisse, le risque encouru par la population à cause du benzène est actuellement de 20 fois supérieur à celui admis conformément aux prescriptions de la LPE. Pour la protection de la population et par mesure de précaution, il est de ce fait impératif de réduire encore sensiblement les émissions de benzène (à 100 tonnes par an au maximum) et de les maintenir à un niveau aussi bas que possible. Les stratégies visant à protéger la population des substances cancérogènes contenues dans l'air que nous respirons se fondent sur la diminution, voire la suppression des émissions de ces substances. Ce principe de limitation des émissions est établi à l'annexe 1, ch. 82, Opair pour les installations stationnaires, mais il est aussi valable pour les installations mobiles (art. 11 al. 3 LPE).

Les émissions de benzène provenant notamment des sources suivantes doivent encore être réduites:

- Voitures à essence
- Stockage et transvasement d'essence (stations-service, entrepôts)
- Moteurs à deux temps à essence avec forte proportion de carburant imbrûlé (jusqu'à 35%) dans le secteur offroad (jardinage, loisirs, sylviculture, agriculture, navigation, etc.) et moteurs à quatre temps dans ce même secteur
- Moteurs à deux temps à essence avec forte proportion de carburant imbrûlé dans le secteur routier (scooters, petites motos)
- Aération complète et sûre dans les parkings et les garages avec des évacuations d'air optimisées conformément aux normes d'hygiène de l'air
- Feux de bois
- Véhicules industriels
- Transvasement de mazout, de diesel, de kérosène

6.4 Mesures de réduction envisageables

1. Confédération

- Suite à l'entrée en vigueur des normes d'émissions EURO 4 (dès 2005/6), la totalité des HC (et donc également le taux de benzène contenu dans les gaz d'échappement des voitures) devrait baisser de 50% par rapport aux normes EURO 3 actuellement en vigueur. De grandes quantités de benzène sont émises lors du démarrage à froid lorsque le véhicule roule vite. Il serait techniquement possible de préchauffer le pot catalytique et/ou de recueillir les gaz d'échappement durant une minute dans un récipient puis de les dévier sur le pot catalytique lorsque celui-ci est chaud. L'industrie automobile travaille actuellement à l'élaboration de tels systèmes. Il est possible qu'ils soient commercialisés dès 2005/6, lors de l'entrée en vigueur des normes EURO 4. Le Conseil fédéral prévoit de s'aligner sur l'UE quant à l'entrée en vigueur de ces normes.
- En Suisse, depuis le 1^{er} janvier 2000, le taux de benzène contenu dans l'essence importée et distribuée ne doit pas dépasser un volume %. Grâce à la réduction du taux de benzène d'environ 2,8 volumes % (état en 1999) à environ 1 volume %, les émissions et les immissions de benzène ont diminué. Bien que les émissions de benzène dans les gaz d'échappement soient également fonction des -aromatiques contenus dans l'essence, une diminution supplémentaire du taux de benzène dans l'essence entraînerait une réduction supplémentaire des émissions. Le Conseil fédéral a décidé d'appliquer simultanément en Suisse les normes de l'UE en matière de carburants. Le taux de benzène dans l'essence a été baissé il y a peu. Une baisse supplémentaire n'est pas prévue pour le moment.
- S'agissant de la combustion du bois et d'autres matières solides, les émissions de benzène sont en forte corrélation avec les émissions de monoxyde de carbone. De fortes émissions de benzène (1–10 mg/m³) sont constatées uniquement lorsque les émissions de monoxyde de carbone sont également élevées (supérieures à 1000 mg/m³ de gaz de combustion). Les installations les plus concernées sont les petits poêles alimentés par du petit bois ou du charbon. Lors de la prochaine

révision de l'OPair, il faudra examiner les moyens permettant d'améliorer la qualité de la combustion dans ces installations. La Suisse pourrait par exemple exiger que ces installations ne soient autorisées que si elles sont conformes à l'homologation européenne du CEN et aux exigences de la classe 3 (classe la plus stricte en matière d'émissions).

2. Cantons

- Selon l'OPair, les postes de distribution d'essence doivent être équipés et - exploités de manière à ce que, pendant le ravitaillement des véhicules, les émissions de substances organiques ne dépassent pas 10% du total des substances organiques contenues dans les vapeurs refoulées. En outre, il faut que les installations soient équipées d'un bon système de récupération des vapeurs. D'après Cercl'Air (état: janvier 2002), environ 35% des pompes à essence examinées ne répondent pas aux normes, et parfois même jusqu'à 50% pour certains systèmes particuliers. Le taux élevé (jusqu'à 20%) des systèmes qui ne fonctionnent pas du tout est très préoccupant. Dans la pratique, l'on constate plutôt que 50% de COV sont émis, au lieu des 10% préconisés. C'est pourquoi, au début de l'année 2001, Cercl'Air a publié une recommandation stricte concernant la récupération des vapeurs (Cercl'Air 2001) dans les stations-service, recommandation qui est depuis mise en œuvre dans les cantons. La situation pourrait également être améliorée grâce à l'utilisation de nouveaux composants qui contrôlèrent ou régleraient en permanence la fonction de récupération des vapeurs, et qui seraient ainsi intégrés à la mise en œuvre en tant que récentes découvertes en matière de technologie. Conformément au principe de proportionnalité, il conviendrait de préférer une application conséquente des directives de l'OPair (OFEFP 2001) à un renforcement général des exigences.
- Il est prévu de diminuer encore les valeurs limites pour le benzène prescrites par l'OPair lors de la prochaine révision de cette ordonnance (prévue pour 2004). Le benzène sera alors classé comme dans le proje de la nouvelle *Technische Anleitung Luft*. Le taux maximum de benzène autorisé dans les gaz d'échappement passera de 5 mg/m³ à 1 mg/m³ à partir d'un débit massique de 2,5 g/h au lieu de 25 g/h jusqu'alors. Ce chiffre correspond environ à la classe 2 de l'OPair et - correspond aux possibilités techniques actuelles tout en restant acceptable économiquement. Les cantons appliqueront alors ces directives de l'OPair.
- Evacuation de l'air dans les garages: l'air sortant des parking et des garages provoque de fortes émissions locales de benzène. Pour éviter les trop fortes concentrations aux abords des parkings, il convient de traiter l'air vicié (dépression) de manière sûre et d'installer un système de collecte des effluents conforme aux normes d'hygiène de l'air hors de la zone de turbulences provoquées par les bâtiments. Il convient également d'édicter des normes de construction adéquates ou d'adapter celles qui existent déjà. L'art. 6 de l'OPair indique que l'air vicié doit être capté aussi complètement et aussi près que possible de sa source, et évacué de telle sorte qu'il n'en résulte pas d'immissions excessives.
- Lors d'un démarrage à froid, les émissions de benzène sont élevées. En renonçant à la voiture pour des courts trajets, nous faisons baisser les concentrations de benzène cancérigène dans l'air que nous respirons. Un trajet automobile sur

3. Réduction de la consommation de carburants

huit est de moins d'un kilomètre et 34% des trajets ne dépassent pas les trois kilomètres. Seuls 30% des trajets automobiles font 10 kilomètres ou plus. Pour effectuer de courtes distances, il convient de se déplacer à pied, à vélo, en rollers, en trottinette, etc. C'est excellent pour la santé de la personne qui se déplace et aussi pour celle des personnes de son entourage et pour l'environnement. L'utilisation des transports en commun respectueux de l'environnement (p. ex. bus diesels équipés de filtres à particules, bus électriques, trains, etc.) sur de courtes ou de longues distances permet de réduire les concentrations de polluants dans l'air que nous respirons.

- Les moteurs à essence émettent de grandes quantités de benzène lorsqu'ils tournent à haut régime. Si les limitations de vitesse sont respectées sur les routes, les autoroutes et dans les agglomérations, les concentrations de benzène baissent sur ces routes et dans ces agglomérations.
- Les petites motos avec des moteurs à deux temps et une forte proportion de carburant imbrûlé émettent de grandes quantités de benzène. Les scooters devraient, dans la mesure du possible, être équipés de moteurs électriques ou de moteurs à quatre temps ainsi que de pots catalytiques (réglés). Lors de l'utilisation de véhicules équipés de moteurs à deux temps, il est conseillé d'utiliser de l'essence pour machines à moteur exempt de substances aromatiques.

4. Mesures dans le secteur offroad

- L'essence pour machines à moteur exempt de substances aromatiques (essence alcoyle) contient moins de 0,1% de benzène et son utilisation permet de réduire sensiblement les émissions de benzène dans les secteurs du jardinage, des loisirs, de l'agriculture, de la sylviculture, de la navigation, etc. Les personnes sont ainsi mieux protégées lors du travail ou des loisirs. L'utilisation d'appareils électriques ne produisant pas de gaz d'échappement est à privilégier dans la mesure du possible, notamment dans les domaines du jardinage et des loisirs.
- Il devrait être obligatoire d'alimenter les moteurs à deux temps avec de l'essence exempt de composés aromatiques. Cette essence devrait coûter le même prix que le carburant pour deux temps.

5. Mesures à prendre en intérieur

- Il convient de bien aérer les appartements dans lesquels on fume.
- Concernant les appartements situés à proximité de parkings, il convient de recenser les émissions produites par les véhicules et de les évacuer de manière sûre.
- Les concentrations de benzène dans les appartements proches des stations-service peuvent être élevées. Il est donc nécessaire de respecter strictement les directives de l'OPair dans les points de ravitaillement situés à proximité de zones d'habitation.

7 Examen des problèmes posés par le benzène

Le benzène est une substance cancérigène de classe 1. S'agissant de ces substances, aucun seuil au-dessous duquel il n'existe pas de danger pour la santé n'a pu être déterminé. En conséquence, les immissions de benzène doivent toujours être considérées comme nuisibles et incommodantes au sens de l'art. 11, al. 3, de la LPE. Les immissions et les émissions de benzène doivent encore être réduites.

Les concentrations de benzène actuellement relevées en Suisse génèrent au sein de la population des risques de leucémies estimés à 160 cas sur 70 ans, soit environ deux cas par année. Concernant les substances cancérigènes, la CFHA et les organisations internationales reconnaissent un risque supplémentaire au cours de la durée de vie de 1/1'000'000 (évaluation par substance). Pour la Suisse, cela signifie 7 cas en 70 ans. Une expertise a démontré que les exigences de sécurité pour la population suisse prescrites par la Constitution seraient respectées pour un tel risque, ce qui signifie que ce risque serait conforme à la LPE.

Or le risque généré par le benzène pour la population est aujourd'hui de 20 fois supérieur au risque toléré par la LPE. Il n'est donc pas conforme aux prescriptions et doit de ce fait être réduit. Le risque apparaît lors de l'exposition individuelle des personnes à l'air (extérieur et intérieur) ainsi qu'à certains « Hot spots ». Pour rendre le risque conforme à la législation en vigueur, les émissions de benzène dans l'air ambiant devraient être 15 fois moindres que celles enregistrées actuellement et 7 fois moindres que celles pronostiquées pour l'année 2010. Cela signifie qu'à long terme ces émissions ne devraient pas être supérieures à environ 100 (70–140) tonnes de benzène par année dans l'air que nous respirons en Suisse. Des mesures doivent être prises simultanément pour assainir l'air en intérieur.

Les concentrations de benzène sur les personnes dépendent non seulement des taux de benzène contenus dans l'air, mais aussi du comportement individuel, du temps passé à un endroit déterminé ou encore de la profession exercée. Les directives gouvernementales, mais aussi le changement des comportements, peuvent contribuer à la diminution des concentrations de benzène sur les personnes. Les personnes particulièrement concernées sont celles habitant à proximité d'axes routiers et de carrefours très fréquentés, de stations-service, de conduits d'évacuation d'air de parkings, ou encore les personnes passant beaucoup de temps dans le trafic et les stations-service. Il en va de même pour les personnes qui utilisent souvent des machines de jardin ou de loisir à essence, notamment celles qui sont équipées de moteurs à deux temps avec une forte proportion de carburant imbrûlé. Les fumeurs sont particulièrement contaminés.

Dans la situation actuelle, la CFHA ne voit pas la nécessité de proposer une valeur limite pour les immissions de benzène à l'extérieur, comme l'a fait l'UE. Selon la commission, une valeur limite de 5 µg/m³ ne suffit pas pour répondre aux exigences légales de la LPE. Une telle valeur ne satisferait pas aux exigences de protection fixées par la Constitution fédérale pour la LPE et ne serait donc conforme ni à la loi ni à la Constitution. De plus, son application serait un frein au renforcement des mesures visant à réduire encore les concentrations.

La protection de l'homme et de son environnement peut et doit être assurée en fonction de la législation existante et grâce aux instruments juridiques disponibles. Les prescriptions de l'OPair doivent être respectées et les moyens techniques à disposition utilisés.

8 Recommandations aux autorités chargées de la mise en œuvre et à la population

La Suisse tente de réduire les risques de cancers engendrés par des polluants atmosphériques grâce à des directives très strictes en ce qui concerne les émissions. L'une des mesures générales est l'obligation de les limiter autant que possible, selon l'ordonnance sur la protection de l'air. Il est ainsi obligatoire de réduire encore les émissions de substances cancérogènes, même si les valeurs limites préconisées sont déjà respectées. En revanche, l'introduction d'une valeur limite pour l'air ambiant équivalente à celle prescrite par l'UE ne serait d'aucune utilité en Suisse. Les efforts faits par la Suisse pour minimiser les émissions de benzène assurent une sécurité optimale à la population. Pour réduire les émissions de manière à être en conformité avec les prescriptions de la LPE, les émissions de benzène devraient être de 15 fois inférieures à celles mesurées actuellement et de 7 fois inférieures à celles pronostiquées pour l'année 2010. Des mesures adéquates devraient également être prises en intérieur. La priorité la plus haute est donc accordée à l'application conséquente des prescriptions de l'OPair et à l'utilisation des techniques actuellement disponibles pour réduire les concentrations de polluants.

1. L'on constate encore des lacunes dans l'application des mesures préconisées pour les stations-service. Selon l'OPair, les postes de distribution d'essence doivent être équipés et exploités de manière que, pendant le ravitaillement des véhicules, les émissions de substances organiques ne dépassent pas 10% du total des substances organiques contenues dans les vapeurs refoulées. Aujourd'hui, environ 35% des pompes à essence examinées devraient faire l'objet de modifications, voire 50%, s'agissant de systèmes particuliers. Le taux très élevé (jusqu'à 20%) des systèmes qui ne fonctionnent pas du tout est particulièrement préoccupante. Une forte odeur d'essence à la pompe est imputable à une mauvaise récupération des vapeurs. Au début de l'année 2001, Cercl'Air a publié une recommandation très stricte à l'attention des stations-service, en ce qui concerne la récupération des vapeurs. La CFHA part du principe que les autorités chargées de la mise en œuvre veillent à ce que les directives en vigueur pour la récupération des vapeurs soient appliquées dans les stations-service. Il est ainsi possible de réduire sensiblement le danger existant pour le personnel, les utilisateurs et le voisinage des stations-service.
2. Aux termes de l'art. 6 de l'OPair, les gaz d'échappement doivent être recueillis aussi complètement et aussi près que possible de leur source et évacués de manière conforme aux prescriptions en matière d'hygiène de l'air. La CFHA recommande aux autorités de vérifier si ces prescriptions sont respectées, en particulier pour l'évacuation de l'air des parkings et des garages, de manière à ce que le benzène ne pénètre pas dans les maisons et à ce que les riverains ne soient pas davantage exposés. Il convient donc de promulguer des directives de construction ou d'adapter celles qui existent déjà.
3. Il est important d'adapter continuellement l'OPair en fonction des nouveaux développements techniques. Lors de la prochaine révision de cette ordonnance, des valeurs limites plus strictes concernant les émissions de benzène sont prévues. La concentration maximale de benzène à l'émission dans l'air peut être réduite de 5 mg/m³ à 1 mg/m³ à partir d'un débit massique de 2,5 g/h. Cette limitation est techniquement et économiquement possible. La CFHA soutient

l'introduction rapide des nouvelles valeurs limites pour les émissions de benzène.

4. Le démarrage à froid de véhicules à moteur génère de fortes émissions de benzène. Eviter de prendre la voiture pour des courts trajets permet de diminuer les concentrations de benzène dans l'air que nous respirons. Un trajet automobile sur huit est inférieur à un kilomètre et 34% des trajets ne dépassent pas les trois kilomètres. Seuls 30% des trajets automobiles font 10 kilomètres ou plus. En ville, une utilisation accrue de véhicules générant peu ou pas d'émissions a pour résultat une baisse des concentrations de benzène sur les passagers et la population urbaine. La CFHA recommande de parcourir les courtes distances à pied, à vélo ou par les transports en commun.
5. S'agissant de la combustion du bois et d'autres matières solides, les émissions de benzène sont en forte corrélation avec les émissions de monoxyde de carbone. Les installations les plus concernées sont les petits poêles alimentés par du petit bois ou du charbon. L'utilisation de technologies appropriées peut faire baisser sensiblement les émissions de benzène dans ces installations ainsi que les concentrations sur les personnes séjournant à proximité. L'homologation CEN prévoit différentes classes pour les émissions. La CFHA se prononce en faveur de l'adoption par la Suisse des directives les plus strictes en la matière ainsi que d'un soutien apporté à la recherche des techniques visant à réduire les émissions produites par les petites installations de combustion du bois.
6. Dans les secteurs du jardinage, des loisirs, de l'agriculture, de la sylviculture ou encore de la navigation mais aussi pour ce qui est des petits cyclomoteurs, - l'utilisation de moteurs à deux temps à essence provoque aussi d'importantes émissions de benzène. La CFHA suggère de remplacer les deux temps par des moteurs électriques ou des moteurs à quatre temps à essence équipés d'un pot catalytique correctement réglé.
7. Lorsqu'il est impossible d'éviter l'utilisation de moteurs à deux temps (tronçonneuses, p. ex.), la CFHA recommande d'utiliser de l'essence pour machines à moteur exempt de hydrocarbures aromatiques et conforme aux normes suisses. Cette essence alcoyle contient moins de 0,1% de benzène, ce qui réduit fortement les émissions de cette substance. Les personnes sont ainsi mieux protégées au travail et durant leurs loisirs. Toutefois, cette essence est actuellement plus chère que l'essence « normale ». La CFHA se prononce donc ici en faveur de la motion parlementaire (motion Suter) visant à exempter l'essence alcoyle de l'impôt sur les huiles minérales. Le but est d'avoir une essence alcoyle dont le prix ne dépasserait pas celui du carburant pour deux temps. On devrait également pouvoir trouver ce carburant plus facilement qu'actuellement.
8. Les concentrations de benzène en Suisse sont mesurées à une vingtaine de stations. L'état des données est assez satisfaisant. Dans les grandes agglomérations, il est conseillé d'effectuer ponctuellement des mesures complémentaires - afin de faire des contrôles et de mieux définir le degré d'exposition de la population. Ces mesures peuvent également être faites avec des collecteurs passifs adéquats. La population doit être informée des résultats de manière appropriée.

9 Bibliographie

- AFU AR 1999: Amt für Umweltschutz des Kantons Appenzell Ausserrhoden. F. Zürcher et al. Interne Berichte. Herisau 1999
- AGB 1999: Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation, Bern: Herzig R et al. Interne Berichte. Bern, 1999
- Brown 1998: Brown EA, Shelley ML, Fisher JW: A pharmacokinetic study of occupational and environmental benzene exposure with regard to gender. *Risk Analysis* 1998; 18/2: 205–213.
- Brunner 2000: Brunner U.: Rechtsgutachten betreffend Grundlagen für die Anordnung verschärfter Emissionsbegrenzungen bei kanzerigenen Luftschadstoffen. Zürich August 2000.
- CIRC 1987: IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Benzene. Supplement 7. International Agency for Research on Cancer, Lyon 1987.
- Fritz 2001: Fritz G, Herbarth O: Pulmonary function and urban air pollution in preschoolchildren. *Int J Hyg Environ Health* 2001; 203: 235–244.
- Fromme 1995: Fromme H et al.: Gesundheitliche Bedeutung der verkehrsbedingten Benzolbelastung der allgemeinen Bevölkerung. *Zbl Hyg Umweltmedizin* 1995; 196:481–494
- Gritsch 2001: Gritsch TH: Tiefgaragenabluft – Analyse und Bewertung der Luftqualität. Bericht TÜV-Süd Deutschland, München 2001.
- Hayes 1996: Hayes RB, Yin SN, Dosemeci M, Li GL, Wacholder S, Chow WH et al.: Mortality among benzene-exposed workers in China. *Environ Health Perspect* 1996; 104 (supp 6): 1349–1352.
- Hirsch 1999: Hirsch T, Weiland SK, von Mutius E, Safeca AF, Gräfe H, Csaplovics E, Duhme H, Keil U, Leupold W: Inner city air pollution and respiratory health and atopy in children. *Eur Respir J* 1999; 14: 669–677.
- Jantunen 1998: Jantunen MJ, Hänninen O et al.: Air Pollution Exposure in European Cities: The EXPOLIS Study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 1998; 8: 495–518.
- Krause 1987: Krause C, Mailahn W et al.: Occurrence of Volatile Organic Compounds in the Air of 500 Homes in the Federal Republic of Germany. *Proceedings of Indoor Air 87*. Vol 1, Berlin 1987, 102–106
- Laue 1994: Laue W et al.: Benzolkonzentrationen der Luft unter besonderer Berücksichtigung von Wohnungen bei Tankstellen. In *VDI Berichte*: 1122, Luftverunreinigungen in Innenräumen, Düsseldorf 1994, 283–293
- LIFE 1998: MACBETH: Monitoring of Atmospheric Concentration of Benzene in European Town and homes. LIFE 96 ENV/IT/070. JRC –ERLAP 1998.
- LPE 1983: Loi fédérale sur la protection de l'environnement (loi sur la protection de l'environnement) du 7 octobre 1983. Etat le 21 décembre 1999. RS 814.01
- OFEFP 2001: Manuel pour le contrôle des stations-service équipées d'un système de récupération des vapeurs. Directives pour l'application. Edition d'octobre 2001.
- OFEFP 2001: Valeurs d'immissions mesurées en 2000. <http://www.environnement-suisse.ch/buwal/fr/medien/publikationen/index.html>
- OFEFP 2003 (en cours de préparation): NO₂ and Benzene Concentrations in Switzerland 2000 to 2020. Environment Series No..., Bern 2003.
- OPair 1985: Ordonnance du 16 décembre 1985 sur la protection de l'air. Etat le 28 mars 2000. RS 814.318.142.1

- Raabe 1996: Raabe GK, Wong O: Leukemia mortality by cell type in petroleum workers with potential exposure to benzene. *Environ Health Perspect* 1996; 104 (supp 6): 1381–1392.
- Raaschou-Nielsen 1997: Raaschou-Nielsen O, Lohse C, Thomsen BL, Skov H, Olsen JH: Ambient air levels and the exposure of children to benzene, toluene, and xylenes in Denmark. *Environ Res* 1997, 75: 149–159.
- Raaschou-Nielsen 2001: Raaschou-Nielsen O, Hertel O, Thomsen BL, Olsen JH: Air pollution from traffic at the residence of children with cancer. *Am J Epidemiol* 2001; 153 (5): 433–443.
- Reitmeier 2001: Reitmeier L: Abschätzung der Benzol-Immissionskonzentration im Umfeld von Tankstellen. Tätigkeitsbericht 2000. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2001.
- Rinsky 1987: Rinsky RA, Smith AB, Hornung R et al: Benzene and Leukemia, An Epidemiologic Risk Assessment. *N Engl J Med* 1987; 316: 1044–50.
- Römmelt 1994: Römmelt H et al.: Staub und Kfz-Abgase in städtischen Nahverkehrsmitteln. In VDI Berichte: 1122, Luftverunreinigungen in Innenräumen, Düsseldorf 1994, 169–179.
- Savitz 1997: Savitz DA, Andrews KW: Review of epidemiologic evidence on benzene and lymphatic and hematopoietic cancers. *Am J Ind Med* 1997; 31: 287–295.
- Schweizer 2002: Schweizer CH. Personenbezogenen Exposition gegenüber aromatischen VOC aus dem Strassenverkehr in Basel. Modellierung der individuellen Benzolbelastung. Diplomarbeit, Abteilung Naturwissenschaften ETH Zürich. Zürich 2002.
- Simon 2001: Simon H: Parkgaragen als Emissionsquellen im innerstädtischen Areal. Ergebnisse einer Studie zur Erfassung relevanter Garagenkenngrößen. Fachhochschule Mainz 2001.
- Skov 2001: Skov H. et al.: *Atmos. Environ.* 35, Suppl. 1, 2001, S141–S148.
- UE 1998: Council Directive on Ambient Air Quality Assessment and Management. Working Group on Benzene. Position Paper. Brussels, September 1998.
- UE 2000: Directive 2000/69/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 novembre 2000 concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant. Wong 2000: Wong O: Recent findings and new initiatives for epidemiologic research on benzene. *J Toxicol Environ Health Part A*: 2000; 61: 457–466.
- Yetergil 1998: Yetergil D. Externe Kosten von Krebserkrankungen durch kanzerogene Luftschadstoffe. Fortschrittberichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik, Nr. 193. VDI Verlag Düsseldorf 1998.
- Yin 1996: Yin SN, Hayes RB, Linet MS, Li GL, Dosemeci M, Travis LB et al: An expanded cohort study of cancer among benzene-exposed workers in China. *Environ Health Perspect* 1996; 104 (supp 6): 1339–43.