

Pollution par les moteurs diesel lors de la construction de tunnels

Bulletin 3:

Plus d'air ou moins de gaz polluants?

Mesures de ventilation contre traitement secondaire des gaz d'échappement

1. Données du problème

Les chantiers souterrains doivent être munis d'une ventilation artificielle afin de contrer la dégradation de la qualité de l'air provoquée par les fumées d'explosifs, les poussières inertes et de béton projeté, ainsi que la pollution des moteurs diesel. Dans les années 80, le taux de passage d'air a été établi à 4 m³/kWmin pour les moteurs diesel, ce qui répondait alors aux critères de l'époque en matière de qualité de l'air. Aujourd'hui, la reconnaissance du risque cancérigène lié aux particules diesel vient relancer la polémique. Pour atteindre les valeurs limites actuelles en vigueur pour cette catégorie de substances nocives, il faudrait à nouveau intensifier la ventilation, ce qui aurait pour conséquence un accroissement considérable des coûts, sans compter les barrières innombrables auxquelles on se heurterait lors de la concrétisation d'un tel projet. Il est question

Editorial

La prise de mesures allant bien au delà de celles en vigueur depuis 1994 s'impose, si l'on veut respecter les valeurs limites concernant la qualité de l'air aux postes de travail sur les chantiers de construction de tunnel. Il ressort de ce bulletin que la ventilation seule permet difficilement d'atteindre cet objectif. Seule la réduction des émissions polluantes des moteurs diesel employés dans le tunnel constitue une solution réaliste. Il s'avère également qu'un traitement secondaire des gaz est largement plus économique qu'une intensification de la ventilation dans le tunnel. Ce procédé présente également l'avantage de permettre de renoncer au développement coûteux, en temps, de moteurs destinés à être utilisés dans le cadre de travaux souterrains. En outre, la diminution des émissions polluantes directement à la source a pour effet de réduire notablement la charge en substances nocives rejetées à l'extérieur.

Le recours à des moteurs modernes et au traitement secondaire des gaz d'échappement permettra probablement d'abaisser le taux de passage d'air établi à 4 m³/kWmin.

AUVA, Suva, TBG

VERT: Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau. On entend par machines réelles, les moteurs en service sur le terrain et non pas les développements futurs. Le premier numéro de juin 1995 du bulletin VERT traitait du fonds et des objectifs du projet. Le second numéro paru en décembre 1995 présentait les résultats des essais menés sur des filtres à particules.

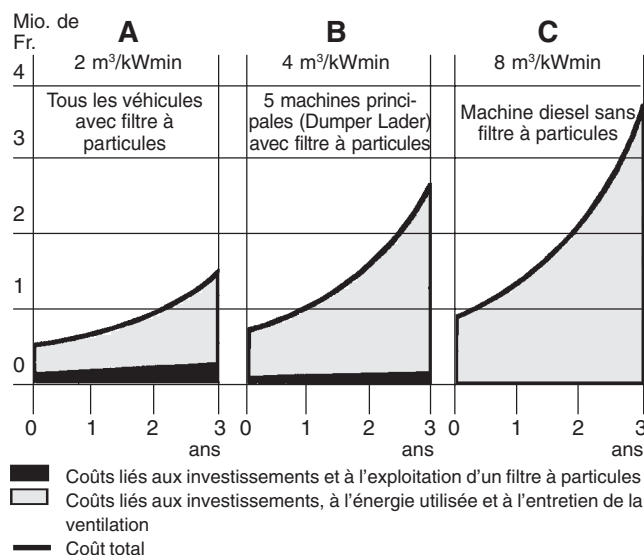


Figure 1: réduction des coûts de ventilation grâce au traitement secondaire des gaz d'échappement. Se rapporte à l'exemple de calcul du point 6.

actuellement de l'alternative que représente la réduction des gaz d'échappement émis par les moteurs diesel, et plus particulièrement de l'équipement ultérieur de ces derniers avec des filtres à particules. Il s'agit de déterminer laquelle parmi ces deux solutions – plus d'air de dilution ou une moindre émission de gaz polluants à la source – est la plus avantageuse en regard de la qualité de l'air, de sa concrétisation et principalement de sa rentabilité.

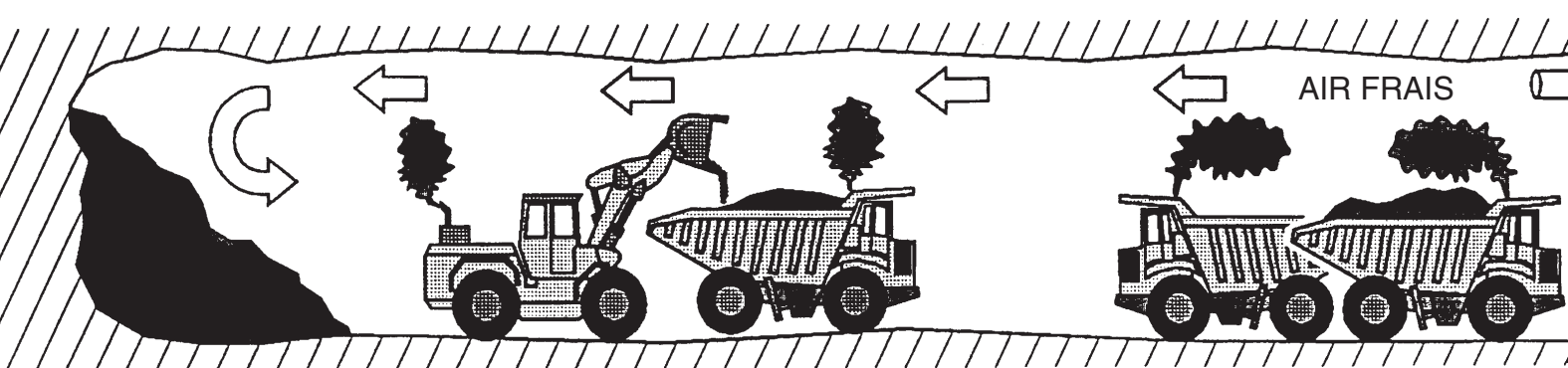
2. Pollution lors de la construction de tunnel

Tableau 1

Gaz d'échappement mg/Nm ³	CO	NOx	SO ₂	HC	Particules
Emissions des moteurs diesel	1000	3000	350	400	250
Valeur limite d'immission selon VME	35	NO 30 NO ₂ 6		5	0.2 0.1*
Facteur de dilution	28	100	70		2500

* valeur d'alarme RTSD 554 (en vigueur en Allemagne)

La première ligne montre des valeurs représentatives de moteurs diesel actuels [1]. A la seconde sont indiquées les exigences en matière de qualité de l'air conformément aux valeurs VME (valeur limite moyenne d'exposition) actuellement en vigueur [2]. La ligne 3 indique le degré de dilution



qui devrait résulter d'un fonctionnement normal des moteurs et d'un mélange homogène – vu sous un angle simplifié. Alors que précédemment, le NO représentait la principale pollution de l'air, ce sont les particules qui maintenant assument clairement ce rôle. Il en découle un degré de dilution beaucoup plus élevé, la ventilation devant être intensifiée bien au delà de ce qui semblait suffire auparavant.

3. Le comportement des gaz d'échappement dans le tunnel

Concernant la circulation routière, on part du fait qu'après être sorti du tuyau d'échappement, les gaz d'échappement sont dilués si rapidement que dans l'immédiat tout risque toxique est écarté, des réactions ultérieures se déclenchant en outre très lentement. Les conditions régnant dans les sections de tunnel sont tout autres :

- La concentration en substances nocives augmente en cas de ventilation insuffisante.
- Des concentrations élevées de substances nocives sont relevées dans la zone des machines.
- Des fumées de tir à forte concentration s'évacuent lentement par les galeries vers l'extérieur du tunnel sous forme de bouchons d'écoulement de fumée; elles atteignent de la sorte les postes de travail situés dans les zones de transport et de construction. Un mélange homogène des gaz étant quasiment irréalisable, il est donc vain de tenter de réduire ces pics de concentration.
- La transformation des gaz polluants :
 - Par oxydation, le SO_2 se transforme lentement en SO_3 . La réaction du SO_3 et de la vapeur d'eau résultant du processus de combustion entraîne le dégagement d'émanations de gaz sulfureux et d'acide sulfurique. Il

suffit de faibles concentrations pour déclencher des irritations des yeux et des voies respiratoires.

- Par action de l'oxygène de l'air sur l'élément principal de l'oxyde d'azote, le monoxyde d'azote (NO), celui-ci se transforme extrêmement rapidement en dioxyde d'azote (NO_2), un gaz beaucoup plus toxique (figure 2). Dans le cas d'une durée de séjour de 100 minutes, ce qui correspond pour une vitesse de déplacement normale à un tunnel d'une longueur de 2-3 km, on peut tabler sur une transformation à hauteur de 75 % en partant d'une concentration d'origine de 50 ppm des gaz d'échappement dilués.
- On ne sait encore que très peu de choses sur la transformation des hydrocarbures. Plusieurs réactions sont envisageables, comme par exemple la production de concentrations nocives d'ozone par les oxydes d'azote et les hydrocarbures, deux précurseurs de l'ozone.

4. Les immissions dans le cas d'une ventilation standard

Au tableau 2 sont reproduites les valeurs d'immission pour une ventilation standard de $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$, sachant que leur estimation suppose de connaître au préalable les valeurs d'émission du tableau 1. La valeur moyenne de départ de $6 \text{ m}^3/\text{kWh}$ correspond à la consommation moyenne en air d'un moteur diesel se trouvant pratiquement en régime de pleine charge. Dans le cas d'un mélange parfaitement homogène, le degré de dilution effectif se situe à une hauteur de 40 – il faut savoir que dans les faits, il s'agit toujours de mélanges non homogènes.

Tableau 2

Gaz d'échappement en mg/Nm^3	CO	NOx	SO_2	HC	Particules
Valeur limite d'immission	35	30	5		0.2
Valeurs calculées	25	67	8	10	6
Valeurs mesurées	15	12	0.6		jusqu'à 2.0

Les valeurs mesurées de CO, NOx et de SO_2 proviennent de relevés effectués dans des tunnels par la Suva [4]. Sont reproduites les valeurs de la tranche supérieure, les valeurs moyennes étant moitié moins élevées. Les valeurs concernant les particules sont le résultat d'enquêtes menées par le TBG et l'AUVa sur des chantiers de construction de tunnel.

Les valeurs mesurées sur un chantier de construction de tunnel sont inférieures aux valeurs calculées du fait que dans la pratique, les taux d'utilisation des moteurs diesel se situent en deçà de 20 %.

Il apparaît donc clairement que, si d'une manière générale, un taux de passage d'air de $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$ suffit pour atteindre la valeur limite d'immission s'agissant des substances nocives gazeuses, tel n'est pas le cas pour les particules.

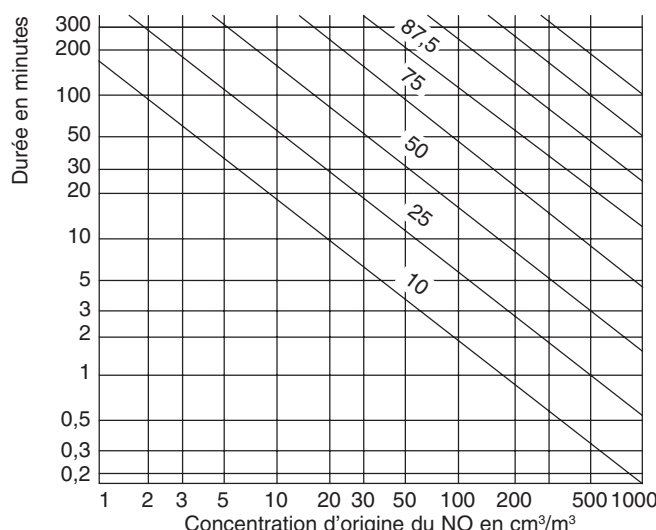
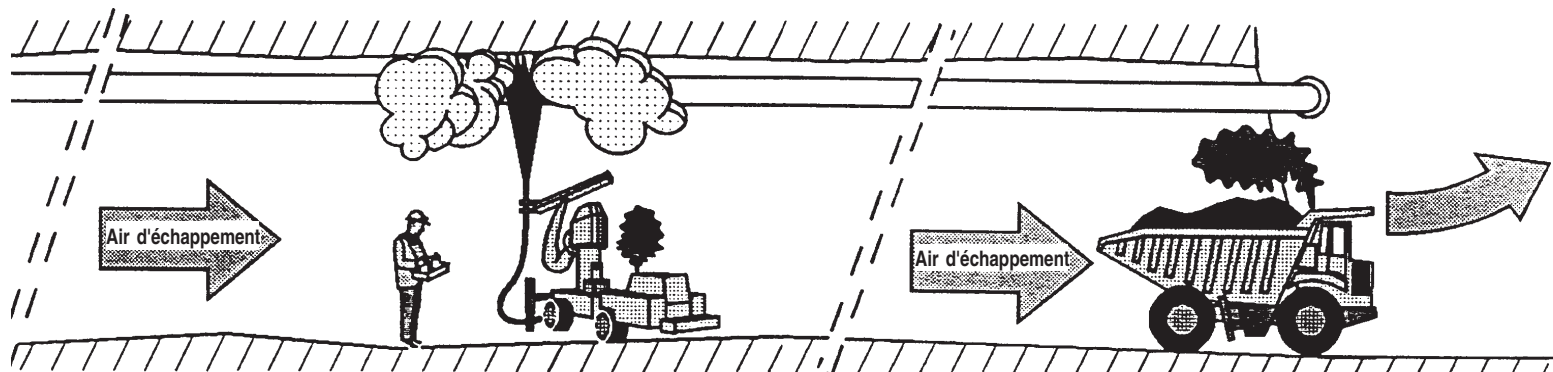


Figure 2: transformation par oxydation du NO en NO_2 (en %) [3].



5. Ventilation nécessaire

Une étude modèle va montrer quelles sont les mesures requises de ventilation, de limitation de la capacité des installations et plus particulièrement de durée d'utilisation des véhicules, mesures permettant d'atteindre les valeurs limites, sans qu'il y ait altération de la qualité de l'air.

Pour un travail d'une durée de 8 heures, en partant d'un taux de passage d'air des gaz d'échappement de 4 m³/min par kW diesel, on dispose d'un volume d'air de dilution de 1920 m³. Dans une galerie de tunnel, la charge admissible en particules diesel est dans ce cas de :

- 1.15 g/kWh dans le cas d'une valeur limite de 0.6 mg/m³
- 0.38 g/kWh dans le cas d'une valeur limite de 0.2 mg/m³
- 0.19 g/kWh dans le cas d'une valeur limite de 0.1 mg/m³

En se basant sur les chiffres cités en [1], à une émission moyenne d'un moteur diesel actuel de 1.5 g/kWh correspond sur une durée de 8 heures une charge effective en particules diesel de 12 g/kWh! Par conséquent, dans le cas d'un taux d'utilisation moyen de 10 % d'un moteur diesel employé dans un tunnel, la valeur limite pour les particules de 0,2 mg/m³ est d'ores et déjà dépassée. D'après la valeur d'alarme de 0.1 mg/m³ des RTSD 554, le taux d'utilisation moyen devrait être réduit à 1.6 %, ce qui est irréalisable.

Pour garantir le respect de la valeur limite lors de travaux souterrains, il serait nécessaire d'augmenter le volume d'air, de façon à diluer suffisamment les substances nocives émises. L'exemple montre qu'un taux d'utilisation minimal de la machine de 15 % nécessite de multiplier par 5 ledit volume d'air. Le degré de ventilation devrait donc être rehaussé à 20 m³/kWmin, ce qui relève, comme le montre le calcul de l'exemple qui suit, de la plus pure utopie, tant pour des raisons techniques que de coûts.

6. Coût de la ventilation

La question décisive des coûts va elle aussi être expliquée à l'aide d'un exemple fortement simplifié :

- longueur du tunnel de 5 km, durée du chantier 3 ans
- utilisation de 5 appareils diesel dans la zone d'attaque
- puissance nominale globale 800 kW
- volume d'air global sur place
- vitesse de passage de l'air dans les buses < 20 m/s
- pression de fonctionnement 10'000 Pa
- calcul d'après SIA 196
- amortissement: ventilateurs 10 ans, buses 6 ans
- coût en énergie: 0.20 DM/kWh
- utilisation: 6000 h/a, taux d'utilisation 0.5

Exemple

	A	B	C
Volume d'air m ³ /kWmin	2	4	8
Puissance du ventilateur en kW	440	1000	1600
Diamètre de la buse en m	1.6	2.0	2.6
Perte de pression appr. en Pa	9'500	10'500	10'500
Type de ventilateur	GAL140	AL20	AL25
Nombre de ventilateurs	2	4	4
Coût des ventilateurs en DM	60'000	166'000	242'000
Coût des buses/m en DM	93	115	166
Coût des buses/m en DM	232'000	288'000	415'000
Investissement en DM	292'000	454'000	657'000
Investissement + intérêts et maintenance en DM	388'000	604'000	874'000
Coût en énergie en mio de DM	0.79	1.80	2.88
Coût total en mio de DM	1.18	2.40	3.75
Coût/100 kW en DM	147'500	300'000	468'750
Coût/moteur en DM	236'000	480'000	750'000

La configuration du concept de ventilation a une très grande influence sur les coûts engendrés par la ventilation!

Un accroissement de la capacité de ventilation ne saurait passer par un agrandissement supplémentaire du diamètre des buses. Dans le cas où ce dernier reste inchangé, la capacité de ventilation et les coûts de fonctionnement sont élevés à la puissance trois du débit d'air ventilé. (Figure 1)

Dans le cas présent, seul un doublement du degré de ventilation de 4 à 8 m³/kWmin a été envisagé. Cependant une telle augmentation est loin de suffire pour atteindre les objectifs – comme les exemples aux points 4 et 5 le démontrent. Il apparaît donc clairement que même un recours à toutes les possibilités techniques (adaptation du diamètre des buses aux conditions données, meilleure répartition de la ventilation dans la zone de dégagement et de propagation des émissions polluantes) est insuffisant. Un doublement du degré de ventilation se heurte d'ores et déjà aux limites de ce qui est possible.

7. Inconvénients de la ventilation

Mis à part le problème des coûts, le modèle de dilution s'avère une voie sans issue pour d'autres raisons:

- Le diamètre du tunnel ne permet pas l'utilisation des buses du diamètre requis.
- Les vitesses de déplacement à l'intérieur du tunnel, qui s'élèvent actuellement à environ 0.5–1 m/s, devraient passer à 3–5 m/s.
- Même dans le cas où on a atteint en moyenne un taux inférieur à la valeur limite pour les particules, il ne faut jamais perdre de vue le fait que des valeurs de substances nocives nettement supérieures à la valeur limite sont susceptibles d'apparaître localement et de façon périodique.

- S'ajoute à cela le fait que la charge en substances nocives de l'air du tunnel rejeté à l'extérieur reste élevée; nombreux sont les endroits où ce point pose problème pour des raisons de respect de l'environnement, et plus particulièrement dans le cas des chantiers à l'intérieur des villes.

Toutes ces raisons justifient l'abandon de la logique actuelle de ventilation.

8. Avantages de mesures à la source

Les moteurs à essence munis de pots catalytiques sont considérés aujourd'hui comme des systèmes totaux et sont globalement passés dans les mœurs. C'est là l'unique moyen d'atteindre des valeurs d'émission acceptables.

Il faut maintenant transférer ce mode de pensée aux moteurs diesel: de la même manière, ils doivent être équipés d'un dispositif de traitement secondaire des gaz d'échappement, dispositif tenant compte des spécificités propres aux moteurs diesel.

Seul ce système est adapté dans les tunnels:

- Les filtres à particules concourent à une réduction légèrement inférieure à 10 % des émissions de particules des moteurs diesel. De tels filtres sont disponibles sur le marché (voir bulletin VERT n°2) [6]) et permettent de résoudre efficacement le problème posé par les émissions de particules. Les dépenses qu'ils engendrent se situent d'ores et déjà pour nombre d'entre eux en deçà des 125 DM/kW, même dans le cas de petits nombres de filtres.
- Grâce aux catalyseurs, il est possible de réduire les émissions d'hydrocarbures et de CO d'un peu moins de 10%. Cela suppose cependant l'utilisation d'un carburant à très faible teneur en soufre. Ils sont disponibles sur le marché, mais au vu des émissions des diesel qu'ils ne réduisent que très peu, leur utilisation dans les tunnels n'est pas impérative.
- Des catalyseurs spéciaux se trouvent depuis déjà longtemps sur toutes les machines fixes et sont maintenant développés pour les véhicules. Ils permettent une réduction des émissions de NOx de l'ordre de 5 à 10 %. Néanmoins, cette technique qui serait fort appréciable dans les tunnels n'est pas encore disponible.

Un recours à toutes les mesures de réduction des émissions polluantes à la source permet de diminuer visible-

ment le degré de ventilation. Deviennent déterminantes les émissions gazeuses des moteurs diesel ainsi que les fumées de tir. Dans nombre de cas, il s'avérera peut-être possible d'abaisser le degré de ventilation à 2 m³/kWmin.

La Suva, le TBG et l'AUVA sont tout disposés à assouplir les exigences actuelles valables en la matière, dès que la fiabilité des systèmes de traitement secondaire des gaz d'échappement le permettra.

L'objectif poursuivi, tant du point de vue de la protection des travailleurs que de celle de l'environnement est la réduction des émissions polluantes de chaque moteur diesel grâce à un système de traitement secondaire des gaz d'échappement directement relié au moteur.

9. Comparaison des coûts

La comparaison qui suit s'applique à une machine de chantier, équipée d'un moteur diesel de 100 kW et en service depuis 3 ans.

Ensemble des dépenses d'équipement pour le traitement secondaire des gaz d'échappement

Filtre à particule (montage compris)	12'500 DM
Maintenance	5'000 DM
Augmentation de la consommation de carburant	3'000 DM
Additif pour la régénération	3'000 DM
Total	23'500 DM

Somme totale des dépenses de ventilation

Avec 8 au lieu de 2 m³/kWmin > 300'000 DM

Du fait du peu d'expérience dont on dispose en la matière, le recours à des mesures d'équipement ultérieur dans les chantiers de construction de tunnels ne va sans une maintenance accrue, ainsi qu'un remplacement occasionnel. Indépendamment de cela, cette méthode n'en constitue pas moins un plus financier significatif par rapport aux mesures de ventilation.

10. Quintessence

Pour des raisons financières et techniques, la réduction de la pollution des moteurs diesel aux emplacements de travail dans les tunnels ne peut que passer par la réduction des émissions à la source. A court terme, dans le cas des moteurs actuels, cela se traduit par l'utilisation de filtres à particules diesel avec des carburants à faible teneur en soufre.

Bibliographie

1. Schadstoffemission und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen, Bericht Nr. 23 BUWAL/Bern 94
2. Valeurs limites au poste de travail, 1994, Suva/Lucerne
3. Verhalten von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid in kleinen Konzentrationen in Abwettern, Glückauf-Forschungshäfte 51 (1990) Nr.1
4. Schadstoffmessungen im Tunnelbau, Ein Vergleich GESTERN (1975-82) und HEUTE (1986-89), Suva/Lucerne, Bericht 90.218, 1990
5. Bulletin VERT n°1, Problèmes, Objectifs, Programme
6. Bulletin VERT n°2, Filtres à particules

Abréviations:

Suva Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents
 AUVA Allg. Unfallversicherungsanstalt/Autriche
 TBG Tiefbau-Berufsgenossenschaft (syndicat allemand des employés des travaux publics)
 VME Valeur Moyenne d'Exposition
 RTSD Règles Techniques relatives aux Substances Dangereuses

Direction du projet:

Bureau d'ingénieur TTM, A. Mayer
 Fohrhölzlistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf
 Tél. CH-0041 (56) 496 64 14 Fax 0041 (56) 496 64 15

Organismes à contacter:

AUVA: E. Bigga A/0043(3842)23417
 TBG: Prof. D. Kieser D/0049(761)73135
 Suva: W. Scheidegger 0041(41)419 50 60

Commandes de bulletins:

AUVA: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
 Division de la prévention des accidents et des maladies professionnelles
 Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Vienne (Madame Radosztics)
 Tél. 0222-33111-418 Fax. 0222-33111-347
 Référence: AUVA-Report 4/2

TBG: Tiefbau-Berufsgenossenschaft
 Am Knie 6 D-81241 Munich
 Tél. (089)8897-505 Fax. (089)8897-494

Suva:

Caisse nationale suisse d'assurances en cas d'accidents
 Service clientèle central, Case postale, 6002 Lucerne
 Tél. 041/419 58 51 Fax. 041/419 59 17