

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 78 (1986)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Phénomènes de transport et de diffusion de polluants dans l'atmosphère  
**Autor:** Gassmann, Fritz  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940867>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 13.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Phénomènes de transport et de diffusion de polluants dans l'atmosphère

Fritz Gassmann

## Résumé

Les mécanismes de transport horizontal sont décrits pour toutes les échelles de longueur à l'aide d'une formule générale reliant la vitesse du vent, induit par l'introduction inhomogène de chaleur dans l'atmosphère, avec la puissance et l'échelle de longueur en question. La convection thermique et les vents induits par le relief qui sont importants pour le transport et la raréfaction des polluants, se révèlent comme mécanismes de transport vertical. Les vents de pentes nocturnes sont responsables des augmentations des immissions d'ozone le long des pentes. La modification des mécanismes de transport par l'interaction entre les polluants et le rayonnement solaire et infrarouge est discutée dans ce rapport.

## Zusammenfassung: Transport- und Diffusionsphänomene bei Luftschadstoffen in der Atmosphäre

Die Mechanismen für den horizontalen Transport von Luftschadstoffen werden für alle wichtigen Längensmassstäbe mit Hilfe einer allgemeinen Beziehung beschrieben, die die durch eine ungleichmässige Wärmeabgabe an die Atmosphäre induzierte Windgeschwindigkeit mit der betreffenden Leistungsdifferenz und dem beeinflussten Längensmassstab verbindet. Als Mechanismen für den vertikalen Transport von Luftschadstoffen, die auch für deren Verdünnung wichtig sind, werden sowohl die thermische Konvektion wie auch Hangwindssysteme untersucht. Insbesondere können nächtliche Hangabwinde zu erhöhten Ozonimmissionen längs der Abhänge führen. Schliesslich werden auch die Veränderungen der Transport- und Diffusionsmechanismen beleuchtet, die durch die Wechselwirkung von Luftschadstoffen und Sonnen- oder Infrarotstrahlung hervorgerufen werden.

## Abstract: Transport and Diffusion Phenomena of Pollutants in the Atmosphere

To describe the mechanisms for the horizontal transport of air-pollutants for all important length-scales, a general formula is explained relating winds induced by inhomogeneous heat release into the atmosphere with a power-difference and the influenced length-scale. As important mechanisms for vertical transport and hence rarefaction of air-pollutants, thermic convection and winds induced by topography are discussed. Downslope winds are responsible for example for increased ozone concentrations in hilly terrain. Finally, modifications of transport and diffusion mechanisms due to the interaction of solar or infrared radiation with atmospheric pollutants are investigated.

### 1. Mécanismes de transport horizontal

Le transport horizontal dans l'atmosphère est effectué à des échelles différentes, qui s'étendent de l'ordre de grandeur du cm (micro-échelle, phénomènes de dissipation) jusqu'à 10000 km (échelle globale). Les dimensions et les vents caractéristiques des échelles les plus importantes pour le transport horizontal des polluants sont montrées sur la figure 1. De ces valeurs typiques, les temps de transport moyennés, entre 1 heure et 12 jours, peuvent être calculés

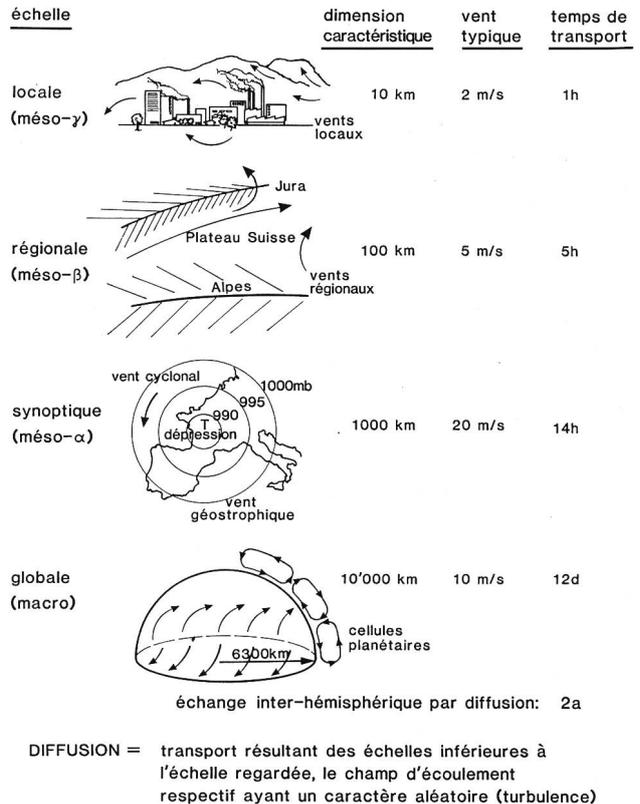


Figure 1. Mécanismes de transport horizontal.

pour les échelles locales à globales. En comparant ces temps de transport avec le temps de résidence dans l'atmosphère de gaz traceurs ou d'aérosols, montrés sur la fi-

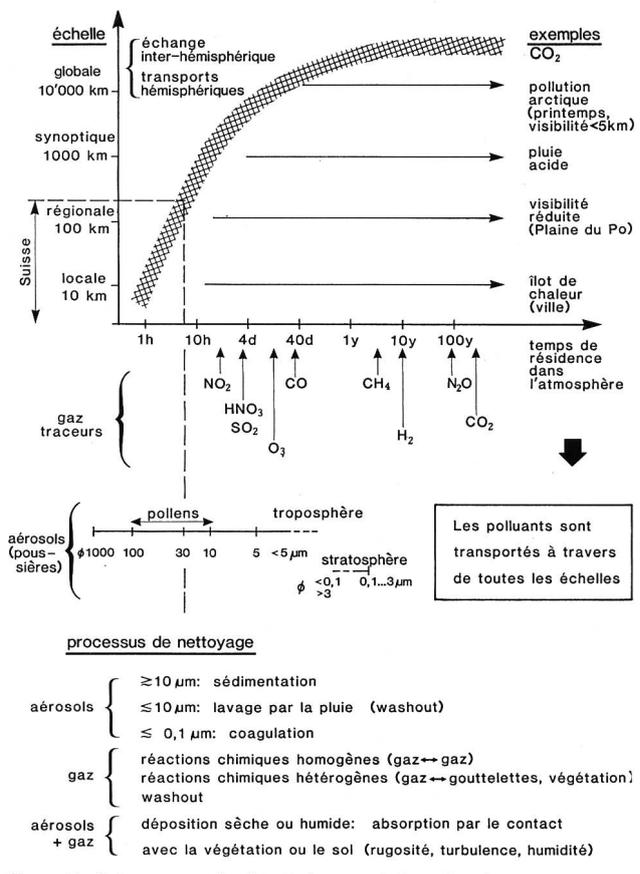


Figure 2. Distances maximales de transport de polluants.

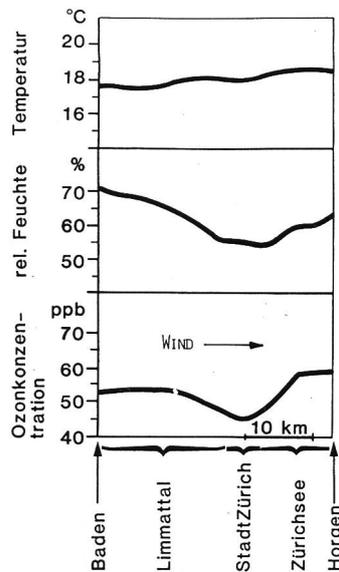


Figure 3. Vol de mesure du 2-9-1982 (18h) à 200m sur sol.

gure 2, on peut conclure que beaucoup de polluants sont transportés à travers toutes les échelles. Cette réalité a été remarquée progressivement: on connaît le transport à l'échelle locale depuis des millénaires, à l'échelle régionale, des effets de pollution se manifestaient depuis l'industrialisation du siècle passé, enfin, la pluie acide à l'échelle synoptique et l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> à l'échelle globale sont connues seulement depuis quelques décennies. D'autres effets à l'échelle globale comme par exemple la pollution arctique, comparable à la pollution autour des villes européennes, ont été découverts récemment. Des processus différents, résumés sur la figure 2, sont responsables pour le nettoyage de l'atmosphère. La limitation du temps de résidence d'aérosols dans la troposphère à quelques semaines, même pour les particules très petites avec des vitesses de sédimentation minimales, est due au lavage de la troposphère par les précipitations. Dans la

stratosphère, qui ne connaît pas de pluie et presque pas de turbulence, le temps de résidence est au maximum de quelques années pour les particules entre 0,1 et 3 µm de diamètre. Les particules plus grandes que 3 µm ont une vitesse de sédimentation non négligeable (selon la loi de Stokes) et les particules inférieures à 0,1 µm disparaissent par coagulation. Pour les gaz traceurs, le temps de résidence dépend de leurs propriétés chimiques. A côté des réactions homogènes entre des gaz différents, les réactions hétérogènes entre un gaz et une particule ou un corps solide jouent un rôle prédominant dans l'atmosphère. Ce sont les gouttelettes microscopiques de l'eau (brume) qui jouent un rôle prédominant dans la troposphère et c'est la végétation dans la couche limite planétaire. Les réactions chimiques extrêmement complexes, qui ne peuvent guère être étudiées en laboratoire, ne sont pas encore comprises. Il s'en suit que les relations entre la chimie de l'atmosphère, la microphysique des gouttelettes, l'absorption du rayonnement solaire et infrarouge et la topographie ne sont pas connues sous forme de relations mathématiques et ne peuvent pas encore entrer dans les modèles pour simuler l'atmosphère. Ainsi s'expliquent les difficultés énormes pour établir des pronostics sur les brumes anthropogènes.

Un exemple pour le transport et les réactions homogènes et hétérogènes est donné sur la figure 3, qui montre la température, l'humidité relative et la concentration d'ozone pendant une situation de smog photochimique, en été, aux environs de Zurich à 200 m au-dessus du sol. Le vent du nord étant faible, la température montre un échauffement continu de la couche limite planétaire dû surtout à l'activité convective pendant l'après-midi de ce beau jour d'été. Mais seulement 2% de la réduction totale de 15% de l'humidité relative s'expliquent par cet échauffement de l'air. Le minimum de l'humidité au-dessus de Zurich est probablement le résultat de réactions hétérogènes avec les aérosols anthropogènes. Par contre, la réduction de la concentration de l'ozone dans la même région résulte de la réaction homogène avec de l'oxyde d'azote anthropogène:  $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ . Parce que cette réaction n'est pas seule à former du NO<sub>2</sub> (des réactions complexes qui se basent sur les hydrocarbures anthropogènes mènent à la production de bioxyde d'azote supplémentaire), les concentrations d'ozone dues à la dissociation de NO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> en NO et O<sub>3</sub> par les rayons ultraviolets sont supérieures aux concentrations initiales en aval de la ville. Comme le temps pour les réactions chimiques est de l'ordre de grandeur de l'heure, les maxima des concentrations d'ozone se trouvent à des distances supérieures à 10 km des villes, alors que les concentrations aux environs des villes sont minimales.

Tableau 1. Mise en marche des mécanismes de transport par l'introduction inhomogène de chaleur.

échelle	exemple	ΔP	L	v	phénomène
locale (≤ 10 km)	chauffage d'une maison	10 kW	10 m	0,2 m/s	courant d'air dans une chambre
	centrale thermique	2 GW	100 m	5,4 m/s	vitesse verticale dans le panache
	thermique naturelle (200 W/m <sup>2</sup> )	0.2 GW	1 km	1,2 m/s	vents locaux
		20 GW	10 km	2,5 m/s	
régionale (100 km)	Bas-Vallais (200 W/m <sup>2</sup> sur 160 km <sup>2</sup> )	30 GW	0.5 km	8 m/s	vents locaux (Simplonwind, Grimselwind)
			30 km	2 m/s	vents régionaux
	Plateau Suisse (100 W/m <sup>2</sup> sur 1500 km <sup>2</sup> )	150 GW	1,5 km	10 m/s	vents locaux (Fricktalwind, Möhlin-Jet)
			150 km	2 m/s	vents régionaux
	orage (puissance de condensation)	4 TW	1 km	32 m/s	rafales, vent ascendant
		10 km	15 m/s	vents locaux	
			100 km	7 m/s	vents régionaux
synoptique (1000 km)	anticyclone (100 W/m <sup>2</sup> sur Ø 2000 km)	300 TW	1000 km	13 m/s	vent géostrophique
globale (10'000 km)	différence du rayonnement entre 0 et 20° latitude Nord = 10 W/m <sup>2</sup> sur 10 <sup>8</sup> km <sup>2</sup>	1000 TW	2000 km	16 m/s	vents alizés

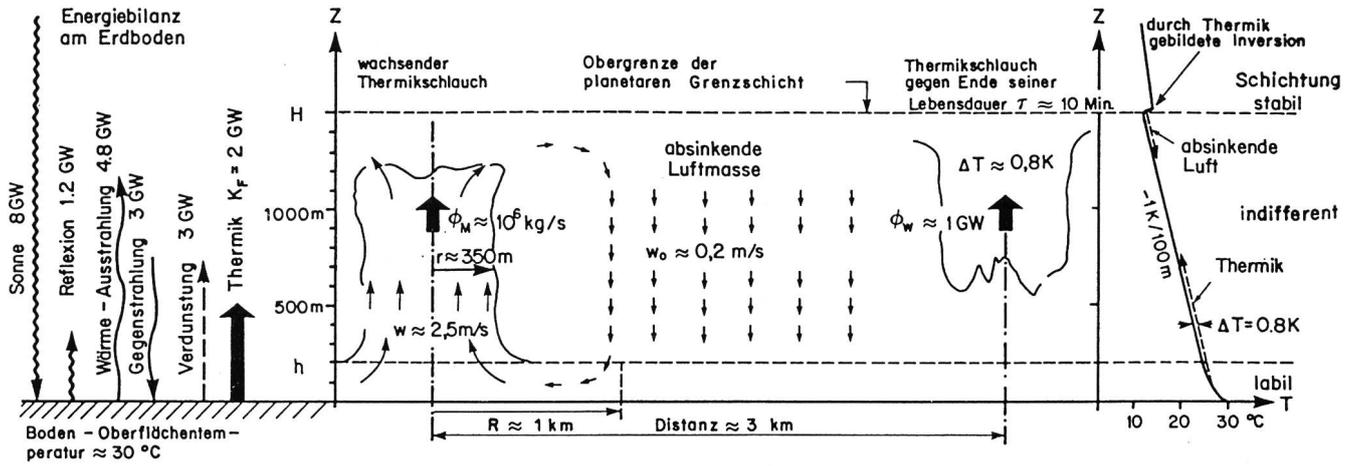
remarque: moyenne du rayonnement solaire absorbé par la terre = 115'000 TW

A l'aide des lois de la conservation de l'énergie et de la masse d'air, l'équation hydrostatique, l'équation d'état pour un gaz parfait et l'équation de Bernoulli, l'auteur a établi une formule approximative [1] reliant la vitesse du vent  $v$  induit par l'introduction inhomogène de chaleur dans l'atmosphère avec la différence de puissance  $\Delta P$  et l'échelle de longueur  $L$  en question:

$$v \approx 0,02 \sqrt[3]{\frac{\Delta P}{L}}$$

$v$  = vitesse du vent induit (m/s)  
 $\Delta P$  = différence de puissance (w)  
 $L$  = échelle de longueur (m)

Sur le tableau 1, des exemples sont donnés pour l'emploi de la formule pour l'échelle de 10 m (chauffage d'une maison qui induit des courants d'air dans une chambre) jusqu'à l'échelle globale (vents alizés produits par la différence du rayonnement solaire entre l'équateur et 20° de latitude nord). La mise en marche des mécanismes de transport ho-



Massenfluss	$\phi_M = \pi r^2 w \rho$	$\approx 10^6$ kg/s
Wärmefluss	$\phi_w = \phi_M \Delta T c_p$	$\approx 1$ GW
Anzahl Thermikschläuche	$N = K_F / \phi_w$	$\approx 2$
Radius des Einzugsgebietes	$R = r \sqrt{\frac{w}{h} \tau}$	$\approx 1$ km
Absinken	$w_0 = w N \pi r^2 / F$	$\approx 0,2$ m/s
Zykluszeit	$\tau_0 = H / w_0$	$\approx 2$ Std.
Erwärmung der planetaren Grenzschicht	$= F \cdot H \rho c_p \Delta T / \tau_0 = \rho c_p \Delta T w N \pi r^2 = N \phi_w = K_F \text{ q.e.d.}$	

<u>Konstanten:</u>	
Spez. Wärme der Luft	$c_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Luftdichte	$\rho = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$
Bezugsfläche	$F = 10^7 \text{ m}^2$
<u>Annahmen:</u>	
Labile Grenzschicht	$h = 200 \text{ m}$
Thermik-Lebensdauer	$\tau = 600 \text{ s}$

Figure 4. Valeurs moyennes pour l'échange vertical dans la couche limite planétaire pendant un bel après-midi estival, la surface de référence étant de 10 km<sup>2</sup>.

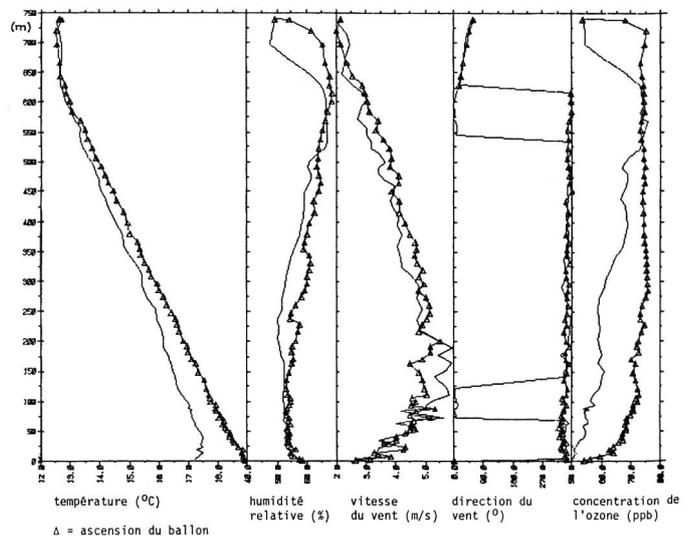
horizontal s'explique alors par une formule simple pour toutes les échelles.

## 2. Mécanismes de transport vertical

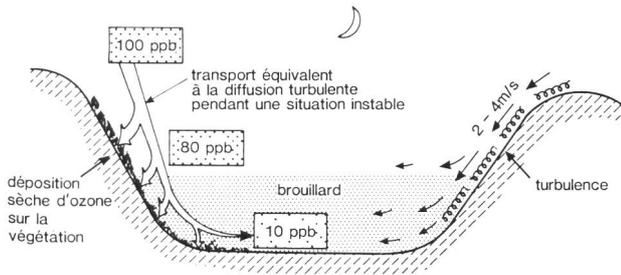
Un intense échange vertical d'air a lieu seulement dans la troposphère (entre le sol et 8 à 12 km de hauteur). La stratosphère, quant à elle, représente une couche de haute stabilité thermique sans mouvements verticaux importants. Cette grande stabilité, avec l'absence complète de gouttelettes d'eau, et le couplage relativement faible avec la troposphère (grands orages équatoriaux, jet-streams, régions polaires) explique l'importance des substances une fois introduites dans la stratosphère. Surtout les substances qui entrent en interaction avec le rayonnement solaire (particules d'éruptions volcaniques, fréons qui diminuent la concentration d'ozone) doivent être considérées comme ayant le potentiel de produire des variations climatiques globales. Dans la troposphère, l'échange vertical d'air et de polluants se fait par la convection thermique, l'activité des fronts et l'interaction du champ d'écoulement avec les variations importantes du relief (montagnes, Alpes, Jura). Le mécanisme responsable en premier lieu pour le nettoyage de la troposphère est la formation de précipitations (pluie, neige), mais pendant des périodes sèches (situations anticycloniques), d'autres mécanismes peuvent jouer un rôle important surtout dans la couche limite planétaire. Celle-ci, caractérisée par un échange vertical prononcé, atteint une épaisseur de 0,5 à 2 km avec une thermique intense pendant de beaux après-midi estivaux. Les ordres de grandeur liés à l'échange vertical sont résumés sur la figure 4. La puissance thermique d'environ 2 GW pour 10 km<sup>2</sup> (200 W/m<sup>2</sup>) produit un mouvement vertical qui inverse la couche limite planétaire à peu près une fois toutes les 2 heures. Le résultat de ce mélange vertical est une distribution presque homogène de la vapeur d'eau et aussi des polluants. L'ascension d'un ballon captif montrée sur la figure 5 donne un exemple im-

pressionnant de ce mélange vertical: le gradient vertical de la température est exactement adiabatique (- 0,98 K/100 m), l'humidité relative augmente lorsque la température diminue et la haute concentration de l'ozone est constante entre 100 m sur le sol et la limite supérieure de la couche limite planétaire à 700 m sur le sol. La diminution de la concentration de l'ozone au-dessous de 100 m est due à sa destruction par le contact avec la végétation. Ce contact nuisible pour les plantes est intensifié par l'orographie. La figure 6 montre le transport nocturne de hautes concentrations d'ozone vers le fond des vallées le long des pentes, où le gaz agressif vient en contact avec la végétation. Le mécanisme de transport, qui est basé sur les vents de pentes, ne joue pas au-dessus d'une plaine, où les plantes sont

Figure 5. Sondage avec un ballon captif à Mettmensstetten (vallée de la Reuss) du 2-9-1982, départ du ballon à 18 h 20, retour à 19 h 30 (GMT + 1 h).

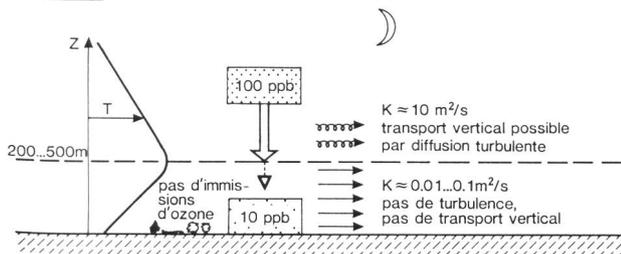


a) orographie complexe



le système nocturne des vents thermiques induit par l'orographie établit un transport vertical de l'ozone vers le fond des vallées où il est détruit par le contact avec la végétation: Pas de régénération possible pour les plantes pendant la nuit.

b) plaine



une inversion de température bloque le flux vertical de l'ozone pendant la nuit: Les plantes peuvent se régénérer des immissions diurnes de l'ozone.

Figure 6. Mécanismes nocturnes de transport vertical: immissions d'ozone et orographie.

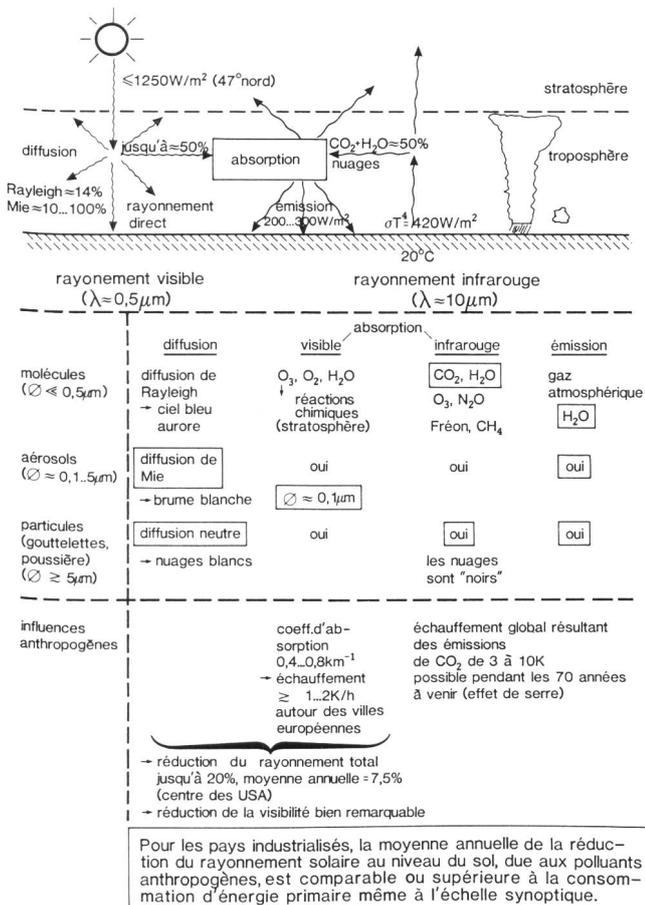


Figure 7. Rayonnement et pollution atmosphérique.

Tableau 2. Estimation des vents résultants de l'absorption inhomogène du rayonnement solaire au infrarouge causée par des polluants anthropogènes.

$$v \approx 0.02 \sqrt[3]{\frac{\Delta P}{L}} \quad (\text{F. Gassmann, 1982})$$

échelle	exemple	surface (km <sup>2</sup> )	différences d'absorption (W/m <sup>2</sup> )	ΔP (TW)	L (km)	v (m/s)
locale	ville (Zurich, Basel)	100	100	0.01	10	2
régionale	Plateau Suisse	1500	30	0.05	30	2,4
	Plateau du Po	10'000	200	2	50	7
synoptique	Europe	10 <sup>6</sup>	5...50	5...50	1000	3.5...7
globale	0-20° latitude Nord	10 <sup>8</sup>	0.1...1(?)	10...100	2000	3.5...7

remarque: consommation d'énergie primaire globale ≈ 10 TW

Les vents induits par les inhomogénéités de la pollution de l'air peuvent influencer les conditions climatiques à toutes les échelles.

protégées par une inversion de température qui bloque le flux vertical de l'ozone [2].

3. *Modification des mécanismes de transport par la modification de la transparence de l'atmosphère*

Le rayonnement solaire ainsi que le rayonnement thermique de la terre traversent l'atmosphère. Les propriétés de diffusion et d'absorption de l'atmosphère sont déterminées presque entièrement par des gaz traceurs (y compris la vapeur d'eau), des aérosols et des substances, qui sont négligeables à l'égard de la masse de l'atmosphère. Sur la figure 7, les processus de diffusion et d'absorption les plus importants sont résumés. Pour le rayonnement visible, ce sont surtout les aérosols, avec des diamètres de 0,1 à 5 μm, qui entrent en interaction avec les ondes électromagnétiques d'une longueur d'ondes de 0,3 à 2 μm. C'est ici que les aérosols anthropogènes ont le potentiel de modifier sensiblement les flux du rayonnement solaire, même sur l'échelle synoptique. Des mesures du coefficient d'absorption, effectuées aux environs de Francfort [3], ont donné des valeurs de 0,4 à 0,8 km<sup>-1</sup> menant à un échauffement de la couche limite planétaire de 1 à 2 K/h. La figure 8 montre un échauffement de l'air de 1,1 K/h au-dessus d'une inversion mesurée à l'aide d'un ballon captif à 500 m sur le sol au centre de Zurich [4]. Parce que le chauffage de l'air par l'advection d'air chaud ou par l'activité thermique pouvait être exclu, l'échauffement au niveau de 500 m sur le sol, qui commence 1 heure après le lever astronomique du soleil, doit être compris comme le résultat de l'absorption du rayonnement solaire. Une étude américaine [5] a révélé une moyenne annuelle de la réduction du rayonnement solaire au niveau du sol de 7,5% pour le centre des USA. Pendant des jours brumeux, des valeurs de 20% ont été déterminées pour une région à l'échelle synoptique. En se basant sur des calculs de transport et de rayonnement, les auteurs de cette étude concluent, que la plus grande partie de la brume responsable pour la diminution du rayonnement solaire était d'origine anthropogène. La réduction du rayonnement solaire due aux polluants anthropogènes est alors compara-

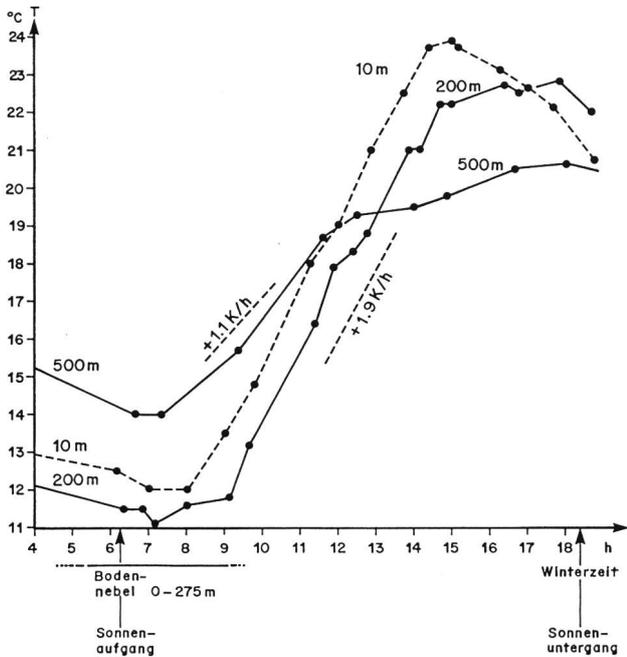
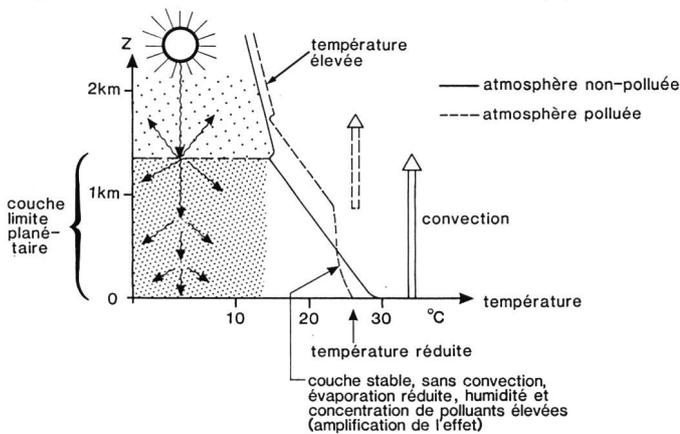


Figure 8. Echauffement de l'air au-dessus de la ville de Zurich le 24-9-1983.

ble ou supérieure à la consommation d'énergie primaire, même à l'échelle synoptique. Un effet mieux visible encore que la réduction du rayonnement solaire est la diminution de la visibilité: Pendant les 3 dernières décennies, la visibilité à Zurich-Kloten (aéroport) a été réduite de moitié pendant 13% des jours estivaux [6]. Des valeurs encore plus prononcées ont été observées autour des villes japonaises



#### Influences à attendre :

- formation de nuages, d'orages
- quantité de précipitations
- humidité et température du sol et de la couche limite de surface
- rayonnement solaire direct/indirect
- rayonnement infrarouge
- vents et turbulence
- diffusion de polluants
- croissance et santé des plantes

→ tous les paramètres climatiques les plus importants sont influencés par la pollution atmosphérique

Figure 9. Variation de la stabilité des couches atmosphériques due à l'absorption du rayonnement solaire causée par des polluants anthropogènes.

[7] et sont à craindre sur la Plaine du Po. Pour l'interaction avec les rayons infrarouges (5 à 50  $\mu\text{m}$ ), ce sont surtout le  $\text{CO}_2$ , la vapeur d'eau, les gouttelettes d'eau (nuages) et les aérosols qui en sont responsables (figure 7). A cause du temps de résidence extrêmement long du gaz carbonique dans l'atmosphère, il est à craindre qu'un échauffement global de 3 à 10 K se produise pendant les 70 années à venir, dû à l'effet de serre.

Une estimation des vents résultants de l'absorption inhomogène du rayonnement solaire ou infrarouge dans l'atmosphère peut être faite à l'aide de la formule générale entre  $v$ ,  $\Delta P$  et  $L$  donnée ci-dessus. Les résultats pour toutes les échelles sont résumés sur le tableau 2 et montrent que les vents induits par la pollution de l'air peuvent influencer les conditions climatiques à toutes les échelles.

A l'égard du transport vertical dans la couche limite planétaire, c'est la modification de la stabilité thermique par l'absorption du rayonnement solaire qui semble jouer le rôle le plus important. Une température élevée dans la partie supérieure de la couche limite planétaire et, en même temps, une réduction de la température au niveau du sol, dues à l'absorption du rayonnement solaire, pourraient stabiliser la couche limite de surface et diminuer le transport vertical de la vapeur d'eau et des polluants. Ce mécanisme posséderait le potentiel de se renforcer lui-même par l'augmentation de la vapeur d'eau et de la concentration des polluants dans la couche stabilisée. L'effet serait une modification significative de tous les paramètres climatiques importants, ayant de graves répercussions sur la croissance et la santé des plantes et des animaux (y compris l'homme) (figure 9).

#### Littérature

- [1] F. Gassmann: Abschätzung des durch anthropogene Energieabgaben beeinflussten Gebietes. TM-34-82-5, EIR, 1982.
- [2] B. Broder: Der Einfluss der Kopplung zwischen Transportvorgängen und chemischen Prozessen auf den Tagesgang des Ozons in der planetaren Grenzschicht über komplexer Topographie. LAPETH-21, ETH Zürich, 1984.
- [3] R. Busen et al.: The determination of the atmospheric heating rate due to the absorption of short-wave radiation in particles, in: Atmospheric trace constituents, proc. of Coll. Mainz 1981, ed. by F. Herbert, p. 97-108, 1982.
- [4] F. Gassmann et al.: Profilmessungen in der planetaren Grenzschicht über Zürich während einer herbstlichen Hochdrucklage. EIR-Bericht Nr. 514, 1984.
- [5] R. J. Ball, G. D. Robinson: The origin of haze in central U.S.A. and its effect on solar irradiation. CEM Hartford (Conn.), 1979.
- [6] F. Gassmann: Stadtklima und chemische Verschmutzung. Jahrbuch der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Wiss. Teil, p. 112-119, 1983.
- [7] S. Nomoto: A climatological study of visibility in Japan. (Geophys. Mag.) 40, No. 3, p. 193-284, 1983.

Conférence sur la protection de l'air, Lugano-Trevano, 26-29 août 1985.

Adresse de l'auteur: Fritz Gassmann, Dr. sc. nat., Institut fédéral de recherches en matière de réacteurs, CH-5303 Würenlingen.