

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 88 (1962)  
**Heft:** 2

**Artikel:** Abaque pour le calcul de la hauteur et des effluents d'une cheminée industrielle  
**Autor:** Lugeon, Jean  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-771827>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

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

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (S.V.I.A.)  
de la Section genevoise de la S.I.A.  
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique  
de l'Université de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'E.P.F. (Ecole  
polytechnique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: † J. Calame, ing. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosgrin, arch.; E. Martin, arch.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;  
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: D. Bonnard, ing.  
Membres: M. Bridel; J. Favre, arch.; R. Neeser, ing.; A. Robert, ing.;  
J.-P. Stucky, ing.  
Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

## RÉDACTION

Vacat  
Rédaction et Editions de la S. A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Avenue de Cour 27, Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse	Fr. 28.—	Etranger	Fr. 32.—
Sociétaires . . . . .	»	» 23.—	»	» 28.—
Prix du numéro . . . . .	»	» 1.60		

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »,  
N° II 57 73, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, changements  
d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie La Concorde, Terreaux 29,  
Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:  
1/1 page . . . . . Fr. 320.—  
1/2 » . . . . . » 165.—  
1/4 » . . . . . » 85.—  
1/8 » . . . . . » 42.50

Adresse: Annonces Suisses S. A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

Abaque pour le calcul de la hauteur et des effluents d'une cheminée industrielle, par Jean Lugeon, directeur de l'Institut  
suisse de météorologie, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale.

Divers.

Nécrologie: René Neeser, ingénieur EPF.

Bibliographie. — Carnet des concours. — Documentation générale. — Informations diverses.

## ABaque POUR LE CALCUL DE LA HAUTEUR ET DES EFFLUENTS D'UNE CHEMINÉE INDUSTRIELLE

par JEAN LUGEON, directeur de l'Institut suisse de météorologie, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale.

L'industriel qui projette une centrale thermique brûlant du mazout ou du charbon produisant de l'énergie électrique interroge parfois le météorologiste sur la ventilation des lieux, afin d'évaluer la hauteur de la cheminée, car de celle-ci va dépendre le taux de concentration des gaz qu'elle dépose sur le sol à des distances variant de 1 à 100 km et qui peuvent être nocifs.

Le panache de fumée, produit de la combustion du mazout, est composé d'air, de vapeur d'eau, de mercaptants et d'anhydride sulfureux (SO<sub>2</sub>). Nous ne parlons ici que du calcul des concentrations de SO<sub>2</sub> au sol, qui devront être au moins inférieures à 0,2 ppm (1 ppm = 1 cm<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> dans 1 m<sup>3</sup> d'air) en régime permanent, à quelque distance que ce soit, de façon à être supportables tant pour les règnes végétal et animal que pour le genre humain.

Rappelons que pour une immixtion de 1 ppm pendant huit heures, la plupart des cultures maraîchères, le tabac, etc., sont lésés. Pour 100 heures d'exposition au taux de 0,1 ppm, la plante est anéantie; 3 ppm

de gaz sont âcres à la respiration; la gorge s'enflamme. Il convient donc de s'en tenir à des taux de concentration de SO<sub>2</sub> aussi faibles que possible.

L'évaluation de la hauteur d'une cheminée inoffensive implique en fait l'examen de plusieurs dizaines de paramètres variables tant dans le domaine de la mathématique pure que dans celui de la thermodynamique ou de l'aérodynamique expérimentale.

Le but de la présente note n'est ni d'énumérer ces facteurs, ni de décrire les multiples situations météorologiques intéressant le proche ou lointain voisinage de l'installation. Nous passons sous silence aussi les inconvénients résultant des pollutions industrielles de l'air susceptibles de modifier le climat local: Londres, Los Angeles, la Ruhr sont des exemples classiques.

Pour calculer la hauteur de la cheminée, nous proposons une méthode simplifiée, prétendant donner au constructeur l'ordre de grandeur théorique des taux de pollutions qu'il est en droit d'atteindre sans danger pour le voisinage.

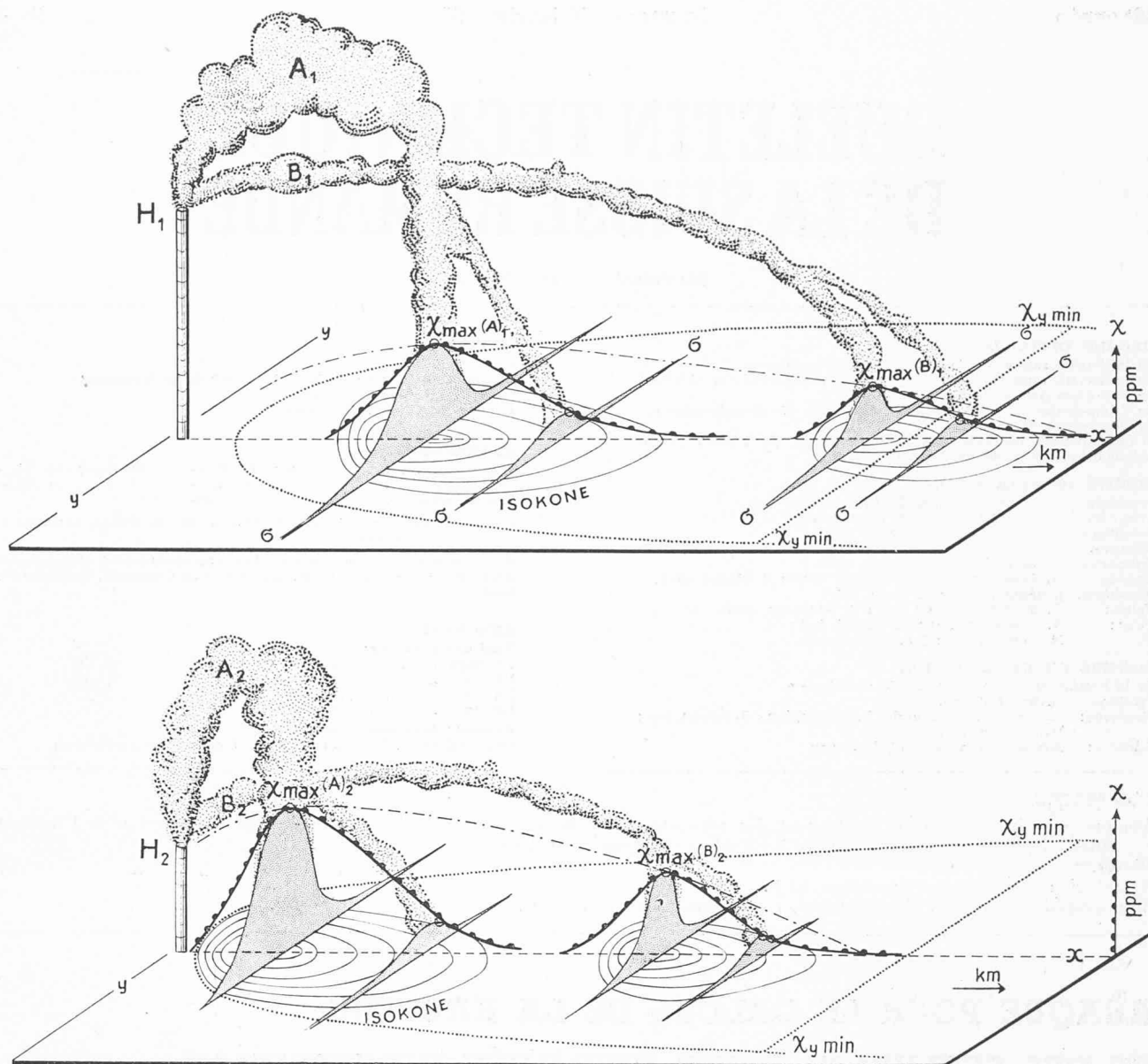


Fig. 1.

## 1. Théorème de la cheminée

### Définitions

$H$  = hauteur de la cheminée.

$x, y$  = axe du plan horizontal intéressant les retombées.

$\chi$  = concentrations des retombées de  $\text{SO}_2$  au sol en ppm.

$\sigma$  = dispersion latérale du panache ou des concentrations.

isokone = ligne d'égale concentration au sol (unité  $10^{-6}$ ).

$A_1, B_1$  = hauteur effective du panache, soit hauteur à ajouter à l'exutoire  $H_1, H_2$ .

max = en indice, est un maximum.

Il découle de l'œuvre fondamentale de Sir Graham Sutton, directeur du Meteorological Office de Grande-Bretagne [6, 7] les règles suivantes expérimentalement confirmées par plusieurs auteurs :

*Influence de la hauteur de la cheminée sur la concentration des retombées nocives au sol (Fig. 1)*

La distance  $x$  en km de  $\chi_{\max}$  est théoriquement indépendante de la vitesse quasi horizontale du vent.

Plus la cheminée  $H$  est haute, plus la retombée s'éloigne (axe  $x$ ) et plus la concentration diminue (axe  $\chi$ ).

La concentration  $\chi$  augmente en raison inverse de la vitesse du vent. On a pour  $H_1 > H_2$ , quel que soit le type de temps conditionnant la hauteur effective du panache ( $A_{1,2}$  ou  $B_{1,2}$ ) au-dessus de l'exutoire :  $\chi_{\max}(A_2) > \chi_{\max}(A_1)$ .

La dispersion latérale  $\sigma$  (axe  $y$ ), paramètre météorologique, permet de numérotiser en ppm les isokones, d'après le débit et la concentration des gaz nocifs, de leur vitesse d'expulsion de la cheminée et de leur différence de température avec l'air ambiant.

En valeur climatique moyenne, les dispersions  $\sigma$  augmentent progressivement avec la distance  $x$  en km.

Dans certaines conjonctures, les courbes gaussiennes sous  $\chi_{\max}(B_{1,2})$  sont notablement plus aplaties et plus longues que sous  $\chi_{\max}(A_{1,2})$ . Les familles d'isokones ovoïdales se transforment en longs fuseaux  $x, y$ , où  $y$  augmente sensiblement, selon une loi hyperbolique.

## 2. Rappel de quelques éléments théoriques

### Définitions

- $O$  = origine du système  $(x, y, z)$  de coordonnées (pied de la cheminée).  
 $X$  = grandeur diffusée (aérosol).  
 $D$  = flux de la grandeur  $X$  à travers l'atmosphère.  
 $K$  = coefficient de diffusibilité turbulente de composantes  $K_x, K_y, K_z$ .  
 $\bar{u}$  = vitesse moyenne du vent dans la direction  $x$ .  
 $t$  = temps.  
 $A$  = constante d'intégration.  
 $\sigma_y, \sigma_z$  = dispersion gaussienne de la variable aléatoire  $X$ .  
 $c$  = coefficient de diffusion turbulente de Sutton.  
 $c_y, c_z$  = composantes de  $c$  selon  $O_y$  et  $O_z$  et fonction de  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$ .  
 $Q$  = débit de la source.  
 $n$  = exposant de Sutton, fonction de la situation météorologique.  
 $x$  = distance mesurée le long de l'axe de la direction du vent.  
 $h$  = hauteur de la source d'émission ou de la cheminée.  
 $\chi$  = concentration du polluant le long de  $O_x$ .  
 $\chi_o$  = concentration au sol.

\* \* \*

Nous nous sommes basés pour nos calculs théoriques et numériques sur la version que J. Saïssac [4, 5] a donnée de la théorie de Sutton, en faisant sa jonction avec la théorie lagrangienne de la diffusion turbulente de Taylor. Résumons cette conception en la concrétisant, afin de résoudre le problème de l'abaque que nous nous sommes posé.

### Equation différentielle fondamentale de la diffusion

Il existe deux types d'émission d'une grandeur  $X$  qui font l'objet de deux types d'intégrales d'une même équation différentielle de base :

- 1) l'émission continue à débit  $Q$  constant (cheminée) ;
- 2) l'émission instantanée d'une quantité finie (explosion).

Nous nous bornons au premier cas, en examinant à la manière de l'hydrodynamique classique l'équation de continuité relative à la grandeur  $X$  véhiculée dans l'atmosphère ambiante, tout en tenant compte de la diffusibilité turbulente  $K$  (qui joue ici un rôle analogue à celui de la diffusion moléculaire). Cette équation de continuité s'écrit :

$$-\operatorname{div} \vec{D} = \frac{\partial}{\partial t} X. \quad (1)$$

D'autre part, la variable de tension  $X$  est reliée au flux  $\vec{D}$  par :

$$\vec{D} = -K \operatorname{grad} X, \quad (2)$$

équation qui est équivalente aux trois suivantes :

$$D_x = -K_x \frac{\partial}{\partial x} X$$

$$D_y = -K_y \frac{\partial}{\partial y} X$$

$$D_z = -K_z \frac{\partial}{\partial z} X$$

lesquelles, portées dans 1), fournissent l'équation générale aux dérivées partielles de diffusion :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial}{\partial x} X \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial}{\partial y} X \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial}{\partial z} X \right) = \frac{\partial}{\partial t} X \quad (3)$$

Les intégrales de cette équation fournissent, selon des circonstances appropriées, les quantités finies qui permettent de calculer les diverses grandeurs intervenant dans l'aérosol.

L'équation (3) s'écrit, dans le cas d'une source ponctuelle fixe à débit constant (cheminée), où le vent souffle dans la direction  $x$  à la vitesse moyenne  $\bar{u}$  :

$$K_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} X + K_z \frac{\partial^2}{\partial z^2} X = \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} X, \quad (4)$$

compte tenu du fait que  $x = \bar{u} t$ .

En admettant que la loi de Gauss régit les dispersions  $\sigma_y, \sigma_z$  de la variable aléatoire  $X$ , on a :

$$X = \frac{A}{2\pi \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)} \quad (5)$$

et sachant que le débit de la source est :

$$Q = \bar{u} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} X dy dz, \quad (6)$$

l'équation (4) se transforme en

$$X = \frac{Q}{2\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right)} \quad (7)$$

qui, finalement, est la base de la théorie de la diffusion de Sutton reliée à celle de Taylor et à celle de la turbulence de Prandtl par l'intermédiaire des écarts-types  $\sigma_y, \sigma_z$ . Ce thème a été développé récemment par F. Baatard dans le présent Bulletin [1].

Saïssac a montré en effet que les écarts-types  $\sigma_y, \sigma_z$  sont fonction de la diffusion turbulente selon les longueurs de mélange qui dépendent elles-mêmes des circonstances atmosphériques ; d'où l'introduction des coefficients de diffusion  $c_y$  et  $c_z$  de Sutton dans l'équation (7), qui permet finalement le calcul  $\chi$  de la concentration de la grandeur diffusée  $X$ , soit :

$$\chi = \frac{2Q}{\pi c_y c_z \bar{u} x^{2-n}} e^{-\left[ \frac{1}{x^{2-n}} \left( \frac{y^2}{c_y^2} + \frac{z^2}{c_z^2} \right) \right]} \quad (8)$$

\* \* \*

Ces considérations théoriques étant connues et pour faciliter la construction de l'abaque, nous avons repris les déductions de Duvergé et Saïssac intéressant le calcul de la pollution sur l'aéroport d'Orly [2]. Nous les reproduisons partiellement ci-dessous en les complétant.

Pour un point considéré au sol dans l'axe du vent moyen  $O \rightarrow x$ , la concentration  $\chi_o$  au sol est :

$$\chi_o = \frac{2Q}{\pi c^2 u} e^{\left(-\frac{h^2}{x^{2-n} c^2}\right)} \quad (9)$$

Cette formule (9) a été utilisée pour le calcul des courbes de répartition au sol des concentrations  $\chi_o$  pour les quatre circonstances météorologiques qu'avait choisies Sutton.

Il est essentiel, pour la construction des courbes, de connaître la valeur maximum  $\chi_{o \max}$  de  $\chi_o$  et à quelle distance  $x$  elle se produit.

C'est le calcul de la dérivée :

$$\frac{d\chi_o}{dx} = \frac{2Q}{\pi c^2 u} (n-2) x^{n-3} \left(1 - \frac{h^2}{c^2} x^{n-2}\right) e^{\left(-\frac{h^2}{c^2} x^{n-2}\right)} \quad (10)$$

avec la condition :

$$\frac{d\chi_o}{dx} = 0$$

qui montre que ce maximum  $\chi_{o \max}$  est obtenu pour la distance :

$$x = \left(\frac{h}{c}\right)^{\frac{2}{2-n}} \quad (11)$$

avec la valeur :

$$\chi_{o \max} = \frac{2Q}{\pi e u h^2} \quad (12)$$

Remarquons que si  $\chi_{o \max}$  est la concentration maximale au sol et  $\chi_{hm}$  la concentration au même point  $x$ , à la hauteur  $h$ , on a :

$$\chi_{h \max} = \frac{2Q}{\pi u h^2} \quad (13)$$

c'est-à-dire qu'il existe un rapport constant entre  $\chi_{o \max}$  et  $\chi_{h \max}$ , tel que :

$$\chi_{h \max} = \chi_{o \max} e.$$

En conséquence, on voit qu'il suffit de multiplier la concentration maximum au sol  $\chi_{o \max}$  par le nombre  $e = 2,718 \dots$  pour avoir la concentration à la hauteur  $h$  de la source émissive.

En introduisant les valeurs numériques de  $\pi$  et  $e$ , la formule (12) devient :

$$\chi_{o \max} = \frac{0,23 Q}{u h^2}$$

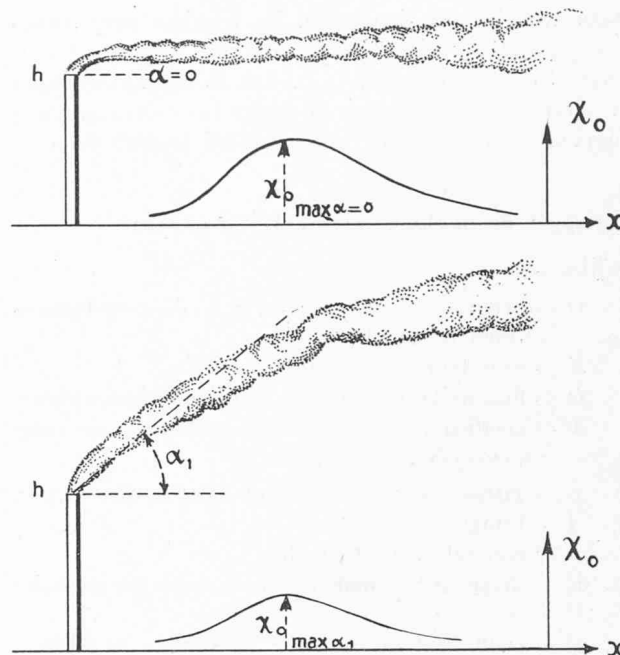


Fig. 2.

#### Hauteur effective de la cheminée

Inversement, si le panache présente une certaine pente (fig. 2), il en résulte une diminution de  $\chi_{o \max}$  qui devient  $\chi_{o \max, \alpha_1}$ , soit :

$$\chi_{o \max, \alpha_1} < \chi_{o \max, \alpha = 0}$$

Rappelons que cette considération fait appel à la hauteur effective de la cheminée, c'est-à-dire à la forme et à l'inclinaison du panache.

Respectivement, si :

$$\chi_{o \max, \alpha_1} = \chi_{o \max, \alpha = 0}$$

il en découle nécessairement que la hauteur  $h$  de la cheminée est plus petite.

\* \* \*

#### Calcul de la dispersion latérale $\sigma_y$

En fixant une valeur de la distance  $x$  quelconque, la formule (8) permet de calculer la courbe de répartition des concentrations dans un plan vertical perpendiculaire à  $Ox$ , soit la dispersion latérale  $\sigma_y$  (fig. 1).

Rappelons que Saïssac a montré que  $\sigma$  est proportionnel aux coefficients  $c_y, c_z$  qui définissent la turbulence selon Taylor.

#### Isokones

Ce sont les courbes d'égale concentration  $\chi_o$  au sol obtenues en joignant les projections des points homologues des courbes  $\sigma_y, z$  de l'espace, qu'il est facile de tirer de l'abaque.

### 3) Quelques situations météorologiques fondamentales

#### Les coefficients numériques

On se rappelle que Sutton, en établissant sa théorie, a considéré quatre situations météorologiques types où

entrent un exposant  $n$  et les valeurs correspondantes du coefficient de diffusion turbulente  $c_x, c_y, c_z$ . Cet exposant  $n$  est caractéristique de la structure verticale du vent et fonction de la turbulence.

On a, grosso modo :

$$0 \leq n \leq 1$$

très turbulent                      turbulence très faible

Si  $n$  augmente, on passe des turbulences fortes aux turbulences faibles et le coefficient de diffusion diminue. Autrement dit, une forte turbulence facilite la diffusion ou le mélange.

Dans la plupart des situations,  $c_x, c_y, c_z$  sont confondus en un seul coefficient  $c$ , lequel est aussi relié à la turbulence, mais surtout en rapport avec les situations météorologiques.

Sans discuter plus en détail la théorie de Sutton-Saïssac, il est utile de rappeler l'expression liant les variations de vitesse du vent  $u$  aux hauteurs  $Z$ , soit :

$$\frac{\bar{u}}{u_1} = \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

qui présente un intérêt en climatologie dynamique.

\* \* \*

Les valeurs numériques des coefficients de Sutton entrant dans les formules utilisées pour construire l'abaque sont les suivantes :

#### Situations météorologiques

I. Instabilité . . . . .	0,36	0,2
II. Isothermie . . . . .	0,12	0,25
III. Faible inversion . . . .	0,048	0,33
IV. Forte inversion . . . .	0,03	0,5

On a constaté expérimentalement que  $c_y = c_z = c$ , pour  $Z > 10$  mètres, c'est-à-dire que la turbulence d'anisotrope au ras du sol devient de plus en plus isotrope lorsqu'on s'élève.

#### Détermination expérimentale des coefficients numériques

Remarquons que les valeurs numériques du tableau peuvent être reconsidérées à la lumière d'expériences faites dans des régions climatiques différentes, par exemple en explorant les trajectoires du panache par la technique aérologique des radiosondes équilibrées ou celle des chapelets de ballonnets qui donne la fonction  $U = f(x, y, z)$ , figure 4.

Egalement, des radiosondages simultanés mesurant la dispersion latérale  $\sigma_y$  en fonction de  $x$  permettent de déterminer  $c_x, c_y, c_z$ .

Nous nous sommes préoccupés de ce problème dans les plaines du Rhône, afin de chercher à corriger les valeurs du tableau. A cette fin, on tire  $c$  et  $n$  des formules précédentes, en y introduisant les paramètres mesurés du flux : hauteur, vitesse du vent, dispersion latérale, distance des retombées.

#### 4) Autres formules

Avant de proposer l'abaque pour le calcul de la cheminée, nous avons parcouru un grand nombre de publications. Les relations de Lowry, souvent citées, ont retenu notre attention, car elles donnent des taux de concentrations notablement plus faibles que celles de Sutton-Saïssac-Duvergé.

Lowry introduit la hauteur effective  $H$  de la cheminée de hauteur géométrique  $h$ , qui est la somme de  $h$ , et de deux hauteurs équivalentes dues à la vitesse ascensionnelle  $h_v$  du gaz et de sa température  $h_t$ , et écrit :

$$H = h + h_v + h_t$$

ce qui serait rationnel, s'il n'abandonnait pas le critère fondamental de Sutton pour remplacer les coefficients par d'autres, tenant compte de la dispersion angulaire temporelle du vent. Cette simplification n'est permise que dans des cas très limités, mais ne saurait être généralisée dans le cadre orographique de nos régions climatiques, différentes des plaines de Brookhaven où il a opéré.

Nous en sommes restés aux principes classiques, qui paraissent, mathématiquement et physiquement, plus près du but à atteindre.

Ajoutons que notre abaque, figure 3, peut parfaitement être utilisé pour le cas où l'on voudrait tenir compte de la hauteur effective. Il suffit d'ajouter la fraction de son choix à la hauteur géométrique de la cheminée. Notons que l'effet de la température et de la vitesse d'expulsion des gaz à l'exutoire n'est, de loin, pas aussi important que l'ont jugé certains auteurs critiquant les équations de Sutton. Par ailleurs, on sait que d'autres éléments météorologiques beaucoup plus importants sont à considérer, où l'emploi de toute formule peut devenir illusoire ; par exemple, pour certaines formes d'inversions thermiques ou dynamiques, ou en cas d'isotachie, etc.

#### 5) L'abaque à cinq entrées

On peut écrire d'une manière générale :

$$H = f(\% S, M, \bar{u}, \chi_{o \max}, x)$$

où :  $H$  = hauteur géométrique ou effective de la cheminée.

$\% S$  = taux de soufre en % du mazout (fuel) brûlé.

$M$  = situation météorologique dans le proche ou lointain voisinage de la cheminée.

$\bar{u}$  = vitesse du vent à l'exutoire, en m/sec.

$\chi_{o \max}$  = concentration maximale au sol de la retombée de  $SO_2$  en ppm.

$x$  = distance en km de la retombée maximum au sol  $\chi_{o \max}$ .

L'emploi de l'abaque est simple, figure 3. Son parcours est réversible, qu'on y entre avec l'une ou l'autre, ou même les cinq variables à la fois.

#### Mode d'emploi

Exemples : Soit à déterminer une concentration  $\chi_{o \max}$  à une distance de  $x$  en km, pour une cheminée de 130 m de hauteur, un vent de 2 m/sec à l'exutoire, une faible inversion de température (mer de brouillard



# ABaque POUR L'ÉVALUATION DE LA HAUTEUR D'UNE CHEMINÉE

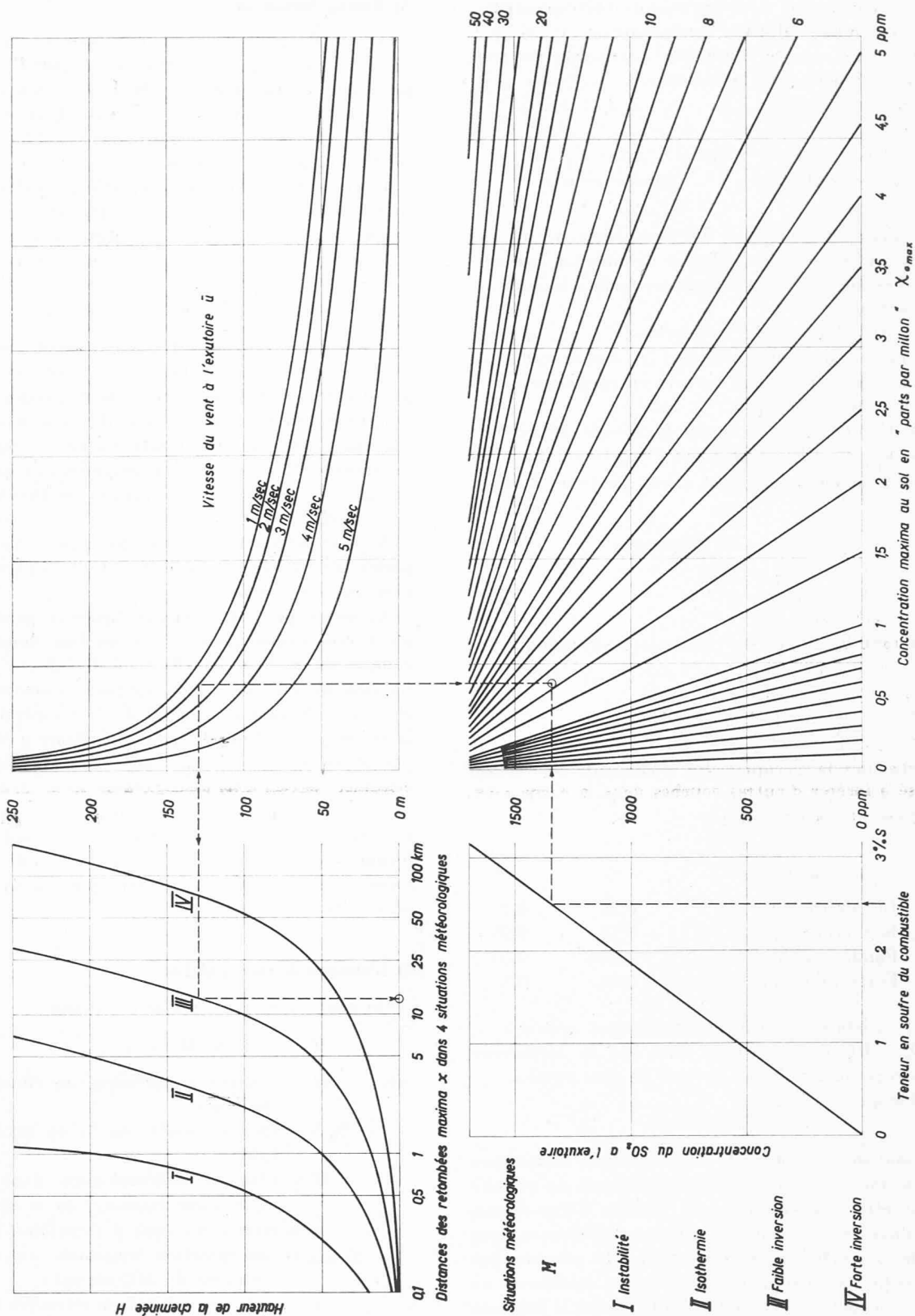


Fig. 3.

ténue planant notablement au-dessus de l'exutoire, situation III), pour un mazout contenant 2,5 % de soufre. Les flèches indiquent le parcours à suivre. On trouve une concentration maximum au sol  $X_{o\max}$  de 2,15 ppm, à une distance de 13 km de la cheminée. Soit à calculer la hauteur d'une cheminée pour une

certaine concentration au sol de  $SO_2$  fixée comme tolérance. Admettons 0,2 ppm, un taux de soufre de 1,5 % dans le mazout, un vent moyen annuel à l'exutoire de 2,5 m/sec, l'abaque donne une hauteur  $H$  de 212 m. Pour un taux de soufre plus faible, de 0,8 %, on trouverait  $H = 193$  m.

Remarquons que cet abaque est facilement adaptable à d'autres processus de combustion, selon la matière brûlée, le débit d'air et la température du four. Pour cela, il est aisé d'incliner ou de déformer à son gré la ligne du carré gauche inférieur de l'abaque, correspondant à d'autres concentrations à l'exutoire. C'est donc une simple question d'échelle, qui ne change en rien le principe de notre méthode. Le constructeur de la chaudière est seul en mesure de donner les concentrations à l'exutoire. Notre diagramme intéresse les normes les plus usuelles, soit :

#### Mazout

Teneur en soufre en %	Concentrations de $\text{SO}_2$ à l'exutoire, en ppm
1	538
2	1076
3	1614

(Chiffres aimablement communiqués par Sulzer Frères S.A., à Winterthour.)

Au point de vue météorologique, nous nous sommes contentés de dessiner quatre courbes I à IV, choisies à priori par Sutton, mais n'intéressant qu'un terrain parfaitement plat, une circulation homogène de l'air augmentant avec l'altitude, une dispersion latérale  $\sigma$  relativement faible. Bref, notre modèle, théoriquement idéal, n'est pas adaptable sans autre à un terrain au relief tourmenté, cependant que les valeurs des concentrations qu'on en extrait sont utiles aussi dans des situations météorologiques différentes. On est en effet autorisé à insérer d'autres courbes dans la gerbe I-IV, correspondant par exemple au fœhn, à la bise, à cer-

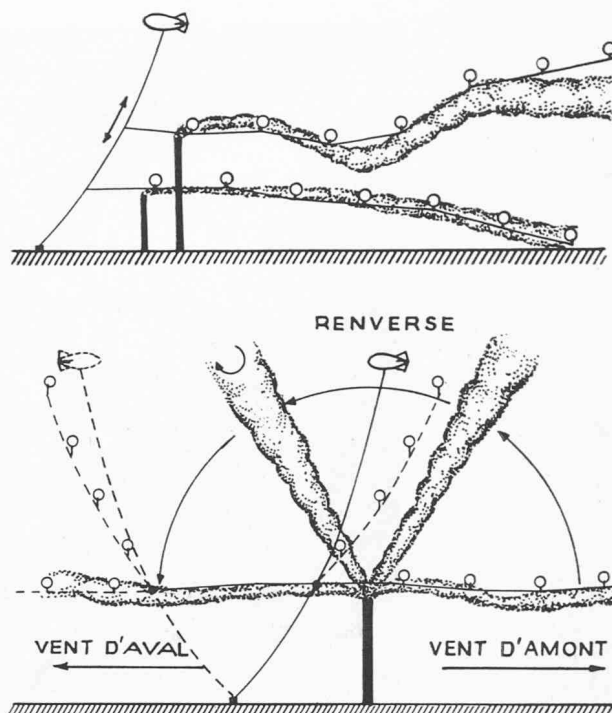


Fig. 4. — Chapelet de ballons.

A l'aide de l'amarre d'un ballon captif, on élève à la hauteur de la cheminée un chapelet de petits ballons équilibrés, distants de 50 à 100 m, reliés par un fil de nylon sans poids appréciable de 1 à 3 km de longueur. Le chapelet dessine la forme du panache de fumée. On peut facilement trianguler les ballonnets par cinématographie pour reconstituer l'histoire des volutes et révolins, détecter les retombées, préciser les dispersions latérales, etc.

Au moment de la renverse du vent de vallée, passant de l'amont vers l'aval, le chapelet s'élève, traverse la verticale quand le courant est nul, puis se recouche dans le lit du vent descendant après le crépuscule vespéral. Cette technique a permis de mesurer à la fois l'épaisseur de la renverse et sa durée, d'où l'on peut calculer le taux des retombées de  $\text{SO}_2$  dans le voisinage de la cheminée.

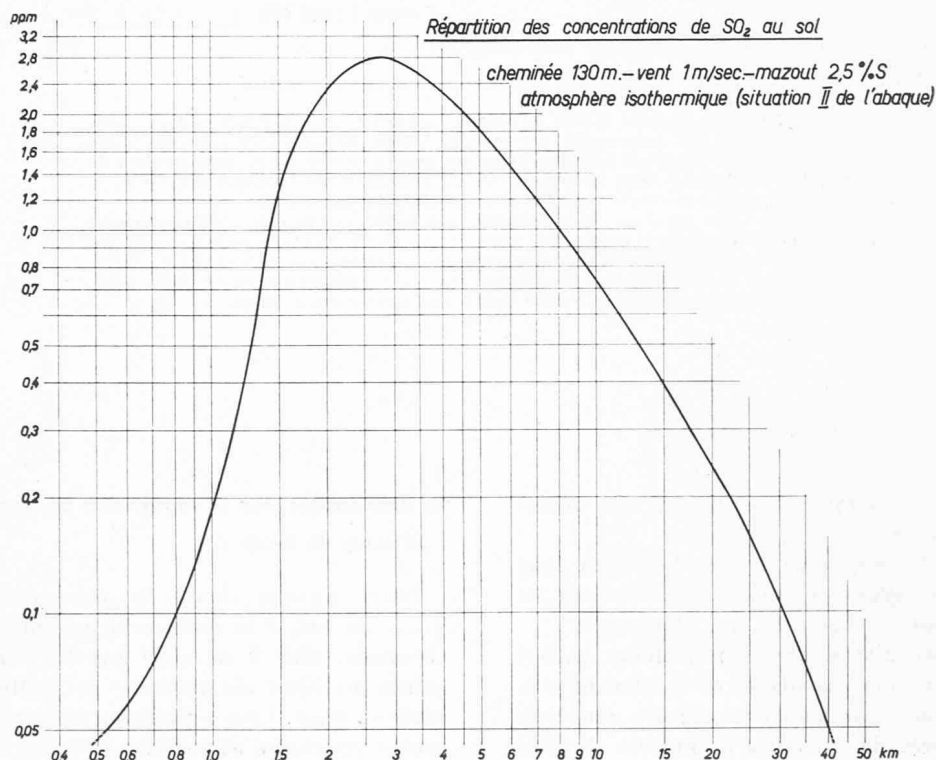
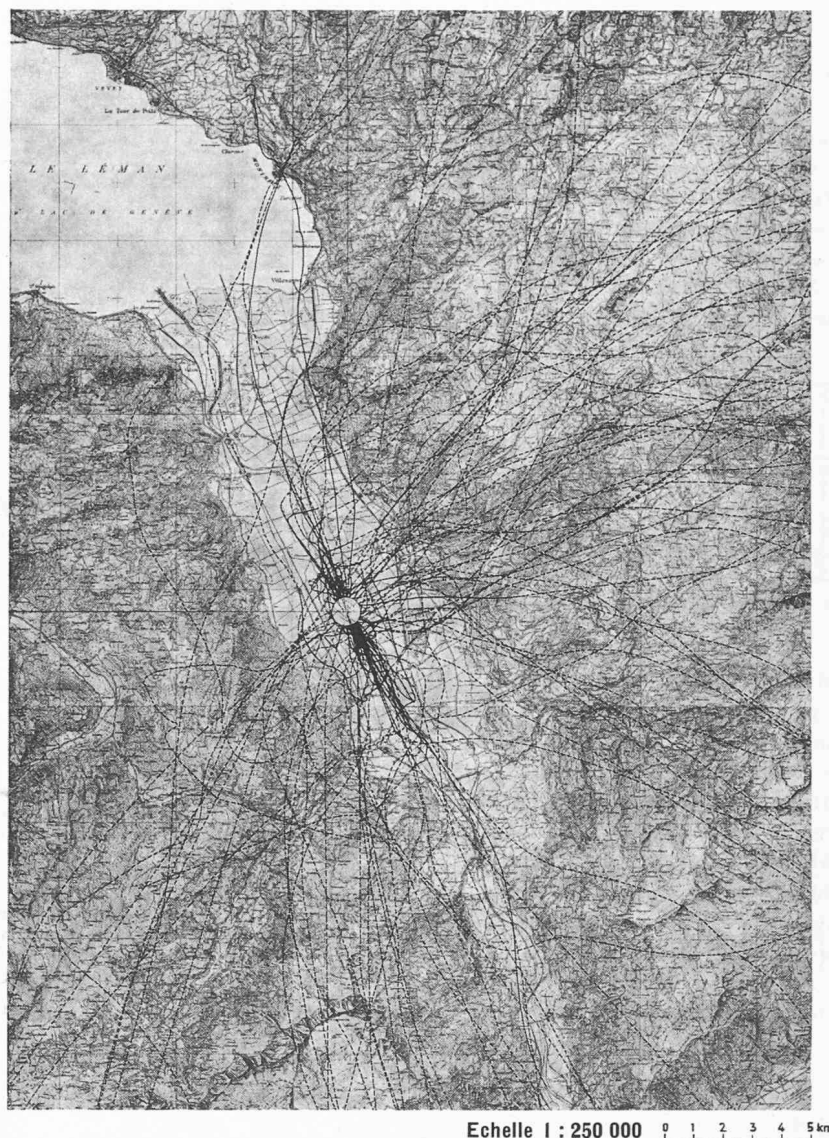


Fig. 5.





Echelle 1 : 250 000 0 1 2 3 4 5 km

Reproduit avec autorisation du Service topographique fédéral du 22.12.1961.

Fig. 6. — Trajectoires du vent dans une vallée.

De l'emplacement supposé d'une cheminée industrielle aux Iles près d'Aigle, nous avons lâché environ 150 radiosondes à très faible vitesse ascensionnelle pour apprendre le comportement de la circulation atmosphérique jusqu'à une trentaine de kilomètres de distance. Les traits pleins sont les trajectoires du vent entre les altitudes de 400 m et 2000 m prolongés par des traits pointillés pour les altitudes supérieures.

La rose des vents est d'une extraordinaire complexité, excluant dans de nombreuses situations météorologiques l'application pure et simple de l'abaque pour le calcul des retombées. En règle générale, le vent géostrophique commence à se faire sentir au-dessus de 800 m. Deux grands domaines angulaires des vents sont dirigés l'un vers le nord-ouest pour le temps maussade, et l'autre vers le sud pour le beau temps.

taines inversions dynamiques, ce qui est une affaire de jugement empirique.

Des jaugeages de  $\text{SO}_2$  sous la trace  $x$  d'un long panache par divers types de temps permettraient de constituer un réseau de lignes  $(x, \chi_0)$  plus précis.

Nous avons tenté d'atteindre indirectement ce but par notre technique d'échosondages et en élevant à la hauteur de l'exutoire, par ballon captif, des chapelets de ballons équilibrés de quelques kilomètres de longueur, dont les oscillations verticales et latérales dessinent la forme du panache, figure 4.

#### 6) Remarques sur la répartition de la concentration $\chi_0$ le long de l'axe $x$

Notre abaque donne la concentration maximale  $\chi_{0\text{max}}$  de  $\text{SO}_2$  à la distance  $x$  en km à compter de la cheminée. Mais il est clair que les retombées des gaz lourds au droit du panache se produisent avant et après ce point. Leur répartition suit théoriquement une courbe en cloche asymétrique évasée, dont nous donnons un exemple pour un vent de 1 m/sec et la situation météorologique II, figure 5.

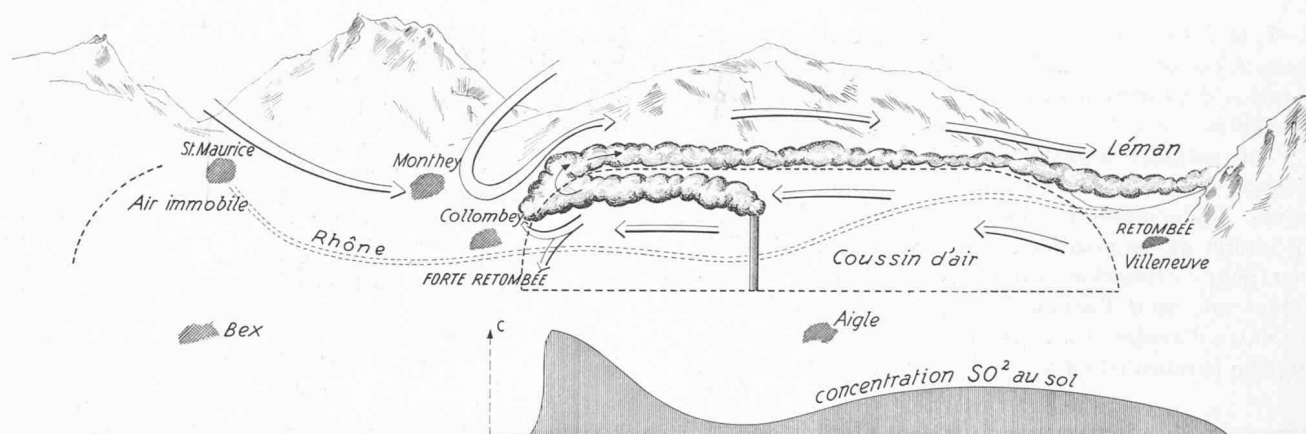


Fig. 7. — Le coussin d'air.

Une des caractéristiques aérologiques des plaines du Rhône, entre le Léman et le défilé de Saint-Maurice, est la quasi-permanence d'un coussin d'air à circulation intrinsèque, dont la stagnation est consolidée lorsque souffle un léger föehn en altitude, au demeurant descendant lentement le val d'Ille ou émanant du Haut-Rhône. Ce courant gravite le sommet du coussin, créant l'inversion dynamique du vent vers 250 à 450 m au-dessus du thalweg.

Les gaz s'échappant d'un exutoire situé au-dessous de ce niveau sont d'abord emprisonnés dans le coussin, le crèvent vers Collombey-Massongex, pour gagner par le haut la Riviera vaudoise. Dans de telles conditions, apanage de 70 à 80 % des jours de l'année, toute formule mathématique intéressant les taux des retombées est pratiquement inutilisable. Par contre, notre méthode de calcul hydrostatique greffée sur le flux mesuré par échosondage donne la répartition des retombées selon la plage hachurée au bas du dessin.

Quant à la dispersion latérale  $\sigma$ , c'est-à-dire la forme du fuseau isokonique, elle dépend du domaine angulaire qu'engendre le panache en pendulant à gauche et à droite de l'axe  $x$ .

Finalement, il est important d'insister sur le fait que notre abaque n'aide l'industriel qu'en parfaite connaissance des conjonctures météorologiques locales, souvent capricieuses (fig. 6).

Appliquer ses valeurs sans autre critique à des cheminées situées dans des régions montagneuses, sur le thalweg, dans une plaine encastrée, un défilé, etc., peut conduire à de graves erreurs d'estimation (fig. 7).

Pour résoudre ces problèmes bien helvétiques, nous avons proposé une *méthode hydrostatique élémentaire*, permettant d'apprécier les retombées en cas d'isotachie, d'inversion dynamique, d'advection et de subsidence thermique ou dynamique, et surtout en cas de renverse des vents de vallée, au crépuscule vespéral, où les concentrations de  $SO_2$  au sol peuvent être considérables. Ce sera l'objet d'un autre Mémoire.

Zurich, 20 novembre 1961.

## BIBLIOGRAPHIE

1. BAATARD, F.: *Bases physiques et mathématiques des mécaniques statistiques de la turbulence*. Bulletin technique de la Suisse romande, n° 23, p. 397-403, Lausanne, 18 novembre 1961.
2. DUVERGÉ, P.: *Brouillards et fumées sur l'aéroport d'Orly*. La Météorologie, n° 55, p. 179-208, Paris, juillet-septembre 1959.
3. LUGEON, J.: *Radio-sondages à Aigle en rapport avec la pollution de l'air*. Actes SHSN, Aarau, 1960, p. 92-93.
4. SAÏSSAC, J.: *Application des théories de la diffusion turbulente au problème de la pollution atmosphérique*. La Météorologie, n° 38, p. 151-160, Paris, avril-juin 1955.
5. — *La diffusion atmosphérique (I)*. Journal de mécanique et de physique de l'atmosphère, n° 6, p. 71-86, Paris, avril-juin 1960.
6. SUTTON, O. G.: *Atmospheric turbulence*. 107 p. Methuen & Co. Ltd., London, 1949.
7. — *Micrometeorology*. 333 p. McGraw-Hill, New York, 1953.

## DIVERS

### FAS / SIA

Centre d'études pour la rationalisation du bâtiment

### Programmes de calculs électroniques pour ingénieurs<sup>1</sup>

Le recours aux calculatrices électroniques devient de plus en plus fréquent dans nos bureaux d'ingénieurs. Bien que l'utilisation de ces machines ne diminue pas le coût même des études, du moins permettent-elles de promouvoir des solutions audacieuses et économiques, grâce à l'ampleur et à l'exactitude des méthodes employées. De plus, ces résultats sont obtenus dans des délais plus courts et, grâce à la machine, il est possible de procéder aux études avec moins de personnel, facteur important à cette époque de pénurie d'ingénieurs et de techniciens.

La mise au point et le contrôle du programme qui commande le déroulement des opérations nécessaires à la résolution d'un problème déterminé, demande encore beaucoup de temps, malgré l'utilisation de divers programmes et moyens auxiliaires. C'est pour contribuer à éviter tout double emploi dans ce domaine de la programmation, que le *Centre d'études pour la rationalisation du bâtiment* entreprend de dresser un répertoire des programmes les plus intéressants dans l'ensemble du domaine de l'ingénieur.

Le Centre d'études n'envisage pas d'établir lui-même de tels programmes et encore moins d'exploiter un centre de calcul. Il s'est simplement chargé d'un travail de coordination, qui consiste à attirer l'attention des intéressés sur l'existence de programmes déjà éprouvés, par la publication périodique de brèves notices descrip-

<sup>1</sup> FAS / SIA Centre d'études pour la rationalisation du bâtiment, Torgasse 4, Zurich.