

Zeitschrift: Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société
Band: 39 (1986)
Heft: 3: Archives des Sciences

Artikel: La physique de l'atmosphère et les îlots de chaleur au-dessus des villes
: possibilités et limites de la modélisation

Autor: Hertig, J.-A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-740367>

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: 09.11.2024

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

LA PHYSIQUE DE L'ATMOSPHÈRE
ET LES ILOTS DE CHALEUR
AU-DESSUS DES VILLES
Possibilités et limites de la modélisation

PAR

D^r J.-A. HERTIG ¹

Conférence présentée le 15 novembre 1985 lors du colloque
la Pollution atmosphérique en zone urbaine
organisé par la Société de Physique et d'Histoire Naturelle à Genève

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Pages</i>
1. Introduction	300
2. Aspects de la climatologie urbaine	303
3. Particularités des villes suisses, une classification	308
4. Modélisation, possibilités et limites	315
4.1 Modèles physiques	316
4.2 Modèles numériques	318
4.3 Démarche de mise en œuvre	319
5. Exemples de Bâle, Fribourg et Bienne	321
6. Conclusions	323

¹ Institut d'Economie et Aménagements Energétiques, EPFL, CH-1015 Lausanne.

1. INTRODUCTION

Le but de cette communication est de présenter l'état de développement des modèles sophistiqués permettant la détermination des concentrations en polluants en régions urbaines. Les modèles qui seront présentés ici sont destinés principalement à l'analyse d'épisodes et de cas particulièrement importants. Ils sont à distinguer des modèles gaussiens ou des «Box Models» utilisés de longue date pour déterminer des moyennes à long terme.

Avec l'entrée en vigueur de la loi sur la protection de l'environnement et le projet d'ordonnance sur la protection de l'air (OLPA)¹, les autorités cantonales et communales se verront confier la lourde tâche d'assurer une protection efficace de notre atmosphère. Il nous apparaît qu'un certain nombre de questions contradictoires sont posées par cette réglementation.

Il est notamment prescrit des valeurs limites d'immission pour la moyenne annuelle et pour le 95 ou 98% de la répartition des fréquences cumulées de toutes les mesures semi-horaires d'un mois ou d'une année. Ceci signifie que le législateur demande, lors de la construction de nouvelles installations ayant des immissions importantes, d'établir une prévision d'immission couvrant l'ensemble d'une année. Le modélisateur rencontre alors trois difficultés majeures:

- a) Comment doit-on définir la moyenne annuelle? Doit-on considérer une année typique et effectuer un calcul avec et sans l'émetteur? Auquel cas il faut définir une année moyenne typique pour le site ce qui est relativement arbitraire. Doit-on à l'opposé établir un calcul à l'aide des conditions passées et les moyennes sur dix à vingt ans? Dans ce cas, les données appropriées manquent pour la majorité des sites. Il convient de relever que seul un calcul cumulatif permet de déterminer la variation de la concentration en fonction d'un fractil défini.
- b) Quel modèle faut-il utiliser? Doit-on s'assurer que les moyennes annuelles seules sont correctes ou doit-on tenir compte de manière détaillée de chaque épisode et les cumuler?
- c) Quelle est la concentration moyenne déjà existante? Faut-il prendre des valeurs mesurées sur le site ou faut-il comparer avec un calcul effectué sur les mêmes bases que la prévision d'immission?

Le concept des moyennes journalières ne pouvant pas être dépassé plus d'une fois par année correspond par contre mieux à l'utilisation des modèles décrits ici. Il est également prescrit aux cantons d'établir un inventaire des sources de pollution et de déterminer les régions exposées (fig. 1). Doit-on considérer ici l'exposition moyenne annuelle lors d'épisodes critiques? Si l'on pense à l'épisode de froid associé

¹ Depuis la conférence, ce projet a été modifié et est entré en vigueur sous le cycle OPair.

à une forte pollution de janvier 1985 par exemple, il est évident que ni la moyenne annuelle, ni même le fractil 95% n'ont de relations étroites avec le niveau de pollution observé.

Art. 25 Détermination des immissions

¹Les cantons surveillent l'état et le développement des pollutions atmosphériques sur leur territoire. Ils enquêtent notamment sur l'ampleur des immissions et effectuent à cet effet des mesures et des calculs de diffusion.

²En règle générale, les immissions provoquées par une installation stationnaire isolée doivent être déterminées par des calculs de propagation. L'office fédéral recommande aux cantons les méthodes appropriées.

Art. 26 Pronostic des immissions

¹Avant qu'une nouvelle installation stationnaire soit construite ou assainie, les cantons peuvent exiger du détenteur un pronostic des immissions.

Art. 30 Détermination des sources d'émissions

Les cantons déterminent les sources d'émissions à l'origine de la pollution des régions exposées et en fixent l'importance par rapport à la pollution globale.

Art. 31 Plan d'assainissement

¹Les cantons établissent un plan d'assainissement pour chaque région exposée aux pollutions.

FIG. 1.

Extrait du projet de l'OLPA (ordonnance sur la protection de l'air).

La loi sur la protection de l'environnement prescrit (art. 10) également aux cantons de veiller à l'établissement de mesures contre les catastrophes et de plans d'intervention permettant de réagir en cas d'accidents majeurs. Il est évident que dans ce cas également c'est la connaissance des épisodes qui prévaut par rapport à l'établissement des moyennes à long terme.

Par cette référence aux nouvelles réglementations, nous voulons mettre en lumière le besoin de modèles détaillés capables de décrire avec un grand réalisme des situations complexes réelles. Le problème le plus difficile réside dans la modélisation de la phase de transport et de dispersion des polluants. Cette phase est située entre l'émission et l'immission qui représentent les quantités diluées de polluants entrant en contact avec les récepteurs (fig. 2). Il convient de relever encore que durant cette phase de transport et de dispersion des polluants, des transformations physico-chimiques interviennent. A courte distance, on observe entre autres la transformation des oxydes d'azote faisant diminuer la concentration d'ozone.

A plus longue distance c'est la transformation des oxydes de soufre et d'azote en acides (sulfureux et nitriques) ainsi que les actions photo-chimiques entraînant la création d'ozone qui interviennent.

Il est enfin évident qu'en raison de sa densité de population et de ses émissions, l'agglomération urbaine est le premier lieu visé par la protection de l'air. Ceci est naturellement très contraignant pour les modèles qui doivent être plus complexes que dans le cas de l'analyse des phénomènes atmosphériques ayant lieu dans les régions rurales.

Dans la présente communication nous analyserons donc tout d'abord les caractéristiques du climat urbain, nous décrirons ensuite quelques particularités des villes

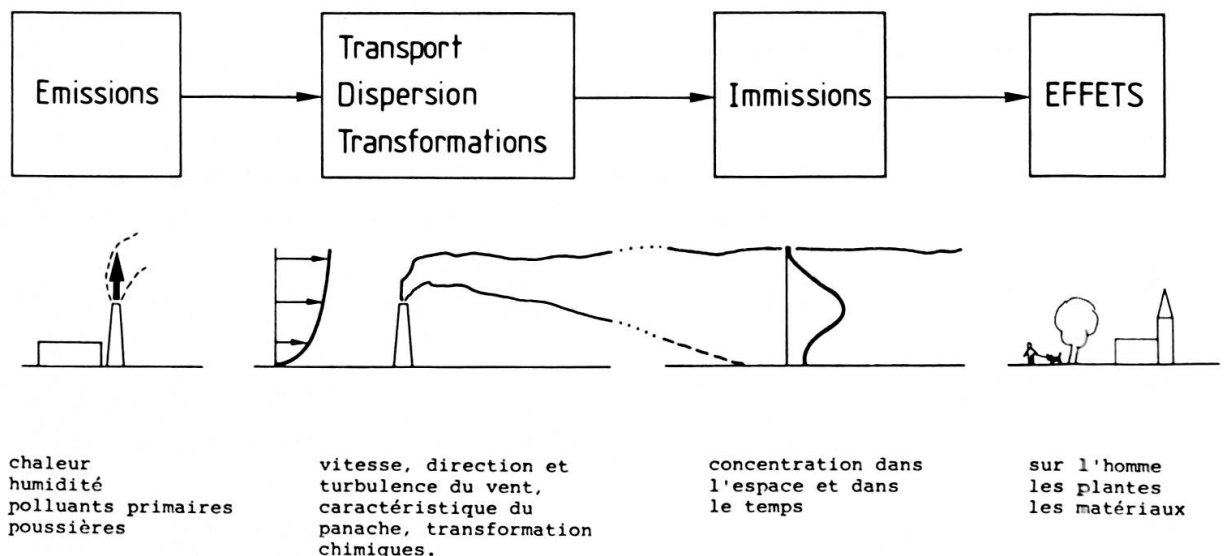


FIG. 2.

Définitions des relations entre les émissions et les immissions, et les immissions et les effets.

suisses et nous pourrons énoncer les propriétés que les modèles devront avoir pour simuler ou calculer les écoulements, le transport et la dispersion des polluants en milieu urbain.

2. LE CLIMAT URBAIN

L'énoncé du terme climat urbain suggère immédiatement les graves problèmes rencontrés dans les grandes métropoles. On pense également à la ville en tant que lieu de résidence et en tant que lieu des émissions. En poursuivant cette réflexion, on constate que la morphologie du sol est affectée par les constructions, qu'il s'agisse de la rugosité ou des propriétés des matériaux. Enfin le régime des eaux est modifié par la création de canalisations et la concentration des eaux de surface collectées.

Tout cela apparaît éminemment complexe et nous allons tenter de brosser un tableau aussi clair que possible de l'ensemble de ces phénomènes.

Envisageons tout d'abord les différences entre la ville et la campagne dues à l'action de bâtisseur de l'homme, soit à l'urbanisation (fig. 3).

On observe une modification de l'état de surface du sol par le remplacement de l'herbe par les différents matériaux de construction. Ces changements de couleur et de texture vont à leur tour modifier la réflexion du rayonnement solaire sur le sol. Cette propriété est appelée *albedo*. De nuit, l'émission du rayonnement par la surface du sol (émissivité) sera également modifiée. Les matériaux de construction ont une capacité calorifique différente en ville, généralement plus forte que celle de la cam-

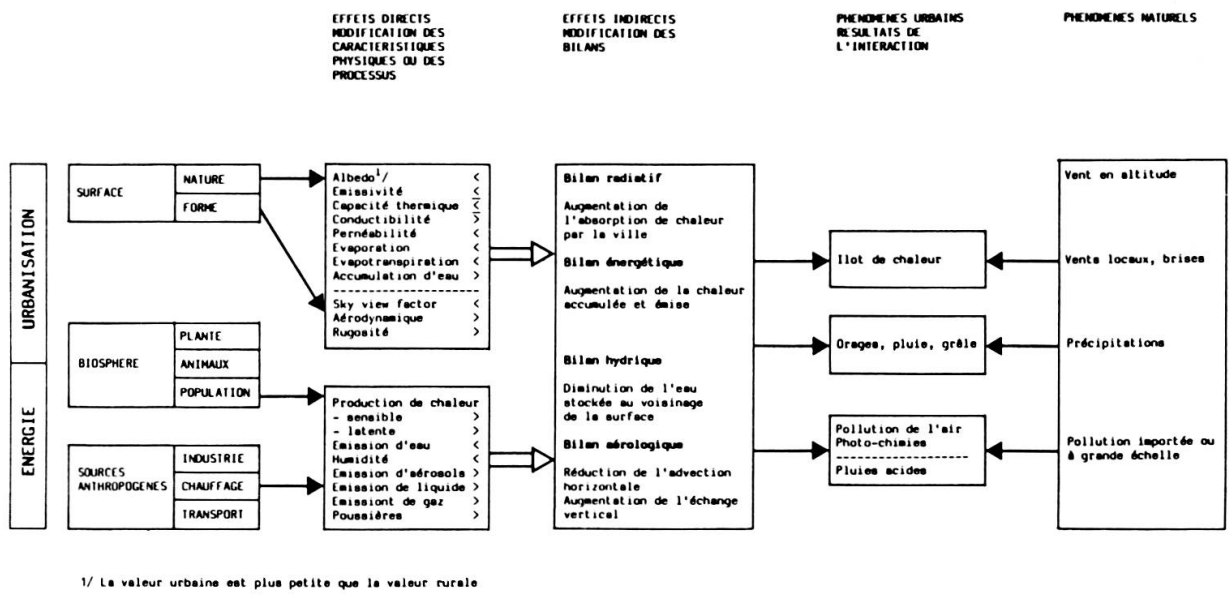


FIG. 3.

Propriétés des variables caractéristiques du climat urbain.

pagne. Toutefois, les bâtiments sont de grands volumes vides et la capacité calorifique globale de la ville est alors plus faible que celle de la campagne.

La conductivité thermique du sol est également modifiée, le béton et les matériaux des routes conduisent mieux la chaleur que les agglomérés de terrains ruraux. Ceci est dû à la présence des plantes qui jouent le rôle d'isolant thermique.

Les matériaux de construction affectent également les propriétés hydriques du sol. La perméabilité du sol et sa porosité sont différentes en ville qu'en campagne. L'évaporation est également modifiée car, pour une surface horizontale donnée, les surfaces en contact avec l'air sont plus faibles sur les bâtiments que sur les plantes. Enfin, comme conséquence de la création de canalisation des eaux de surface, la quantité d'eau stockée et pouvant être réévaluée est plus faible en ville qu'en campagne. En région rurale l'eau est accumulée en grande quantité dans la zone non saturée du sol et peut être restituée à l'atmosphère par l'évapotranspiration.

Une première conséquence du changement de la surface du sol est la modification des bilans radiatifs, énergétiques et hydriques de l'atmosphère.

L'urbanisation a une deuxième conséquence sur le bilan énergétique, liée au changement de la morphologie du terrain. La création de bâtiments va augmenter la rugosité du sol et par conséquent diminuer la vitesse du vent en le freinant plus. Si les constructions sont hautes, on créera même des modifications des vents par actions purement aérodynamiques, telles que le sillage ou jet. Le transport et la dispersion de la chaleur seront affectés par cette modification de la morphologie du sol et le bilan énergétique changera.

L'effet des bâtiments va également influencer ce bilan car la surface offerte aux rayons du soleil diminue en raison de leur ombre portée. Oke [1] a ici défini un nouveau coefficient appelé «Sky view factor» qui représente le rapport entre la surface visible du ciel depuis une rue et la surface limitée par l'horizon atmosphérique.

La création des villes a également des conséquences sur la biosphère. La population va augmenter, entraînant une production d'énergie anthropogène, la couverture végétale va diminuer, réduisant l'humidité spécifique et l'évapotranspiration. Par contre, la densité d'animaux change peu et n'a pas d'influence sur les aspects climatologiques.

L'homme, par ses activités et par sa présence, va agir plus ou moins fortement sur le climat. Il a besoin de source d'énergie pour son chauffage, ses activités industrielles et son transport. Cette consommation d'énergie s'accompagne évidemment d'émissions de gaz de combustion, d'humidité, de chaleur et de bruit. L'émission de chaleur contribue de manière notable à modifier le bilan énergétique naturel et entraîne la création d'îlots de chaleur urbains. Les émissions d'aérosols, de poussières et d'humidité peuvent affecter les bilans radiatifs et hydriques.

Enfin, les émissions de pollution, puisqu'elles sont situées au même endroit que les récepteurs, vont parfois créer des situations critiques pour la santé de l'homme. C'est sous cet aspect que les effets de la construction des grandes cités sont le mieux ressentis. En effet, comme l'a relevé très justement Rollier [2], si l'homme des cavernes

a dû être la première victime suffocante et toussante de la pollution atmosphérique, il faut attendre le XIV^e siècle pour voir les premières mises en accusation du charbon qui incommodent les Londoniens. Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle toutefois qu'une série d'épisodes de pollution excessive débute. A Londres tout d'abord (1873-80-82-91 et 92), par brouillard persistant, l'accumulation des gaz sulfureux, des aérosols acides et des suies provoque une nette augmentation des décès et des maladies pulmonaires. Ces épisodes se poursuivent par les cas aujourd'hui tristement célèbres de la vallée de la Meuse (1930), de Donara (USA) en 1948 et de Londres en 1952. Le monde découvre alors le smog, maladie du chauffage au charbon. Les mesures prises dès cette époque, en particulier la substitution du charbon par le mazout, ont permis d'assainir les principales villes du monde industrialisé. Malheureusement, au milieu des années soixante, la Californie découvre le smog photo-chimique, maladie de l'automobile. Sous l'influence du rayonnement solaire, les oxydes d'azote et les hydrocarbures imbrulés sont transformés en ozone, en peroxydes organiques. Ces agents sont responsables de la disparition rapide des magnifiques forêts entourant Los Angeles. Les mesures prises portent sur la réduction de l'activité industrielle, sur l'introduction de filtres et de catalyseurs afin de diminuer les rejets d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote.

A la fin des années septante, c'est au tour de Madrid, Barcelone et Athènes de subir des épisodes de stagnation obligeant les autorités à prendre des mesures de restriction du trafic et de l'activité industrielle. Enfin, Téhéran, Mexico, Bilbao et de nombreuses autres villes sont également touchées.

L'analyse de la situation réelle, telle qu'elle est faite ci-dessus, ne permet pas d'expliquer à elle seule les raisons de l'apparition d'épisodes aussi critiques. En effet il manque au tableau brossé jusqu'ici le pont entre l'urbanisation, les activités humaines et les émissions d'une part et les très hauts niveaux de pollution de l'air observés d'autre part. Ce pont réside justement dans l'analyse des mécanismes de transport et de dispersion atmosphériques et de l'influence que la ville peut avoir sur ces mécanismes.

Il est facile de comprendre que les problèmes les plus aigus apparaissent lorsqu'une interaction entre les écoulements régionaux et la ville conduit à une stagnation des masses d'air au-dessus de celle-ci, supprimant toute dispersion. L'analyse des épisodes catastrophiques européens décrits précédemment montre que souvent c'est la conjonction entre une haute pression hivernale, sans vent en altitude, un froid intense et une persistance de plusieurs jours qui forment les conditions critiques. Dans ce cas de vent très faible, l'influence des modifications des bilans radiatifs, énergétiques et hydriques mentionnés ci-dessus peut devenir déterminante et modifier en conséquence le bilan aérologique.

Ces bilans modifiés interagissent alors avec les phénomènes naturels de manière à induire les phénomènes urbains [3] suivants:

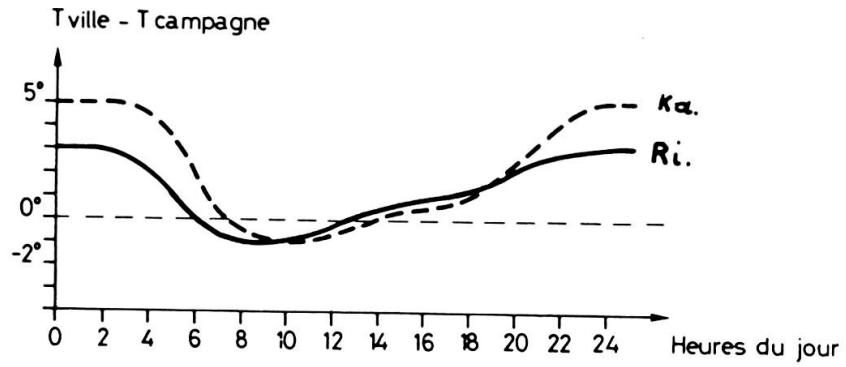


FIG. 4.

Variation typique de la différence de la température entre la ville et la campagne.
Cas de Richmond et de Karlsruhe.

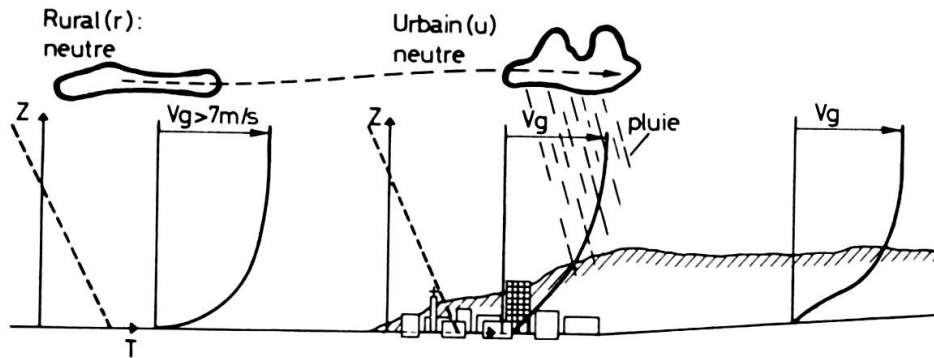


FIG. 5.

Précipitations apparaissant au-dessus d'une ville ou sous le vent de celle-ci.

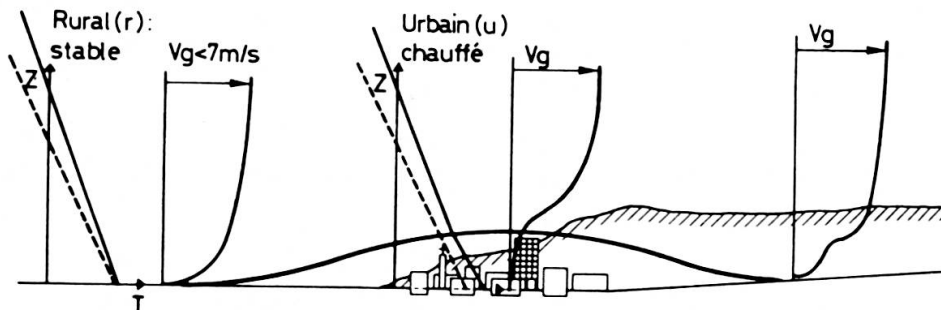


FIG. 6.

Formation d'une zone de calme sous l'effet combiné de la rugosité et de l'îlot de chaleur sur le vent en altitude.

- *L'îlot de chaleur* est issu de l'action conjuguée du bilan radiatif qui conduit, de jour, à une augmentation de la température de la ville sous l'effet du rayonnement solaire direct, et du bilan énergétique qui, à la tombée du jour, maintient une température plus élevée en ville qu'en campagne. Enfin, ce sont les rejets de chaleur qui, en hiver, provoquent une élévation de la température en fin de nuit; la figure 4 montre un cas d'évolution de la température dans l'îlot de chaleur urbain.
- Des *précipitations* apparaissent parfois en dessus d'une ville ou juste sous le vent de celle-ci, sous forme d'orage, de pluie ou même de grêle. Cela est dû à l'action conjuguée de l'îlot de chaleur et de la rugosité qui repoussent en altitude les masses d'air passant sur la ville. Si l'air est très humide, il y a parfois formation de cumulus, associés à des précipitations (fig. 5) [4].
- Une forte *diminution de la ventilation* de la ville peut apparaître par vent en altitude modéré dû au frottement exercé par la rugosité de la ville. L'action conjuguée de la rugosité et de l'îlot de chaleur peut être à l'origine de cellules convectives et d'épisodes de forte pollution (fig. 6).

L'image simplifiée des phénomènes décrits ci-dessus est valable pour une grande métropole située en terrain plat avec un environnement rural homogène.

Au-dessus d'un terrain plat, le mouvement des masses d'air en altitude se propage jusqu'au sol où, sous l'action de la rugosité, il est freiné. Dans ce cas, une ville va accentuer ce ralentissement par l'action de sa rugosité et de sa température plus importante qu'en campagne. Lorsque le vent en altitude est faible, il peut s'en suivre une stagnation au-dessus de la ville. Celle-ci est accentuée si la ville est construite dans une faible dépression de la topographie, comme c'est le cas de Londres.

En bord de mer il y a création, au-dessous du vent en altitude, de l'alternance bien connue des brises de terre et de mer. Ces vents locaux, d'origine thermique, viennent généralement favoriser la ventilation d'une région et sont admis comme un élément favorable à l'amélioration de la qualité de l'air. Pratiquement, ce n'est pas toujours vrai. Dans le cas de Barcelone ou de Bilbao, les brises sont un facteur aggravant car elles permettent par leur mouvement pendulaire de ramener au-dessus de la ville la pollution émise douze ou vingt-quatre heures avant.

Dans le cas d'une ville située en topographie complexe, il y a également création de brises et de vent de vallée dont le régime pendulaire, associé à la canalisation, peut fort bien induire des conditions critiques aigües du point de vue de la qualité de l'air.

3. PARTICULARITÉS DES VILLES SUISSES

Du point de vue du développement urbain, la Suisse n'a pas de très grandes agglomérations. Toutefois la plus grande partie de la population (2/3) est établie sur le Plateau suisse. Elle réside principalement dans les agglomérations de Zurich, Bâle, Berne, Lausanne et Genève qui regroupent plus d'un million d'habitants.

La topographie suisse est en outre complexe, formée de vallées, collines, du Jura et des Alpes. On notera la présence de nombreux lacs et cours d'eau.

Il a été reconnu que l'intensité des îlots de chaleur urbains suisses est relativement faible; comme le montre le tableau ci-dessous, elle ne dépasse pas 7° C.

TABLEAU 1.

Intensité de quelques îlots de chaleur en Suisse.

Ville	Intensité ΔT_{v-c} de l'îlot de chaleur urbain à 2 m/sol	Population en milliers d'habitants
Bâle	5-6° C	180
Bienne	4-5° C	57
Berne	5-6° C	140
Zurich	5-7° C	375

Cela est en bon accord avec les théories de Oke [5] et les mesures faites dans d'autres villes étrangères. La combinaison de ces faibles écarts de température avec l'influence de la topographie devrait théoriquement conduire à une ventilation efficace des villes suisses. Malheureusement, de nombreux cas de pollution atmosphérique urbaine ont été relevés. Cette situation étonnante provient d'une part de la structure en canyon relativement encaissée et étroite des tissus bâtis, et d'autre part de l'influence du vallonnement qui peut favoriser la création de lacs d'air froid.

Très schématiquement on peut décrire la situation des villes suisses de la manière suivante.

Les deux grandes chaînes montagneuses ont pour effet de réduire, au voisinage du sol et en moyenne, l'intensité des vents provenant des différents régimes synoptiques. Ces montagnes sont, à l'opposé, à l'origine d'écoulements régionaux d'intensité modérée à forte, tels que les brises de pente et vents de vallée. Il est observé fréquemment que ces écoulements régionaux sont isolés ou découplés des écoulements en altitude. Par conséquent, l'influence des zones urbaines (rugosité, rejets de chaleur, cellules de convection) se fait sentir essentiellement sur ces écoulements régionaux et provo-

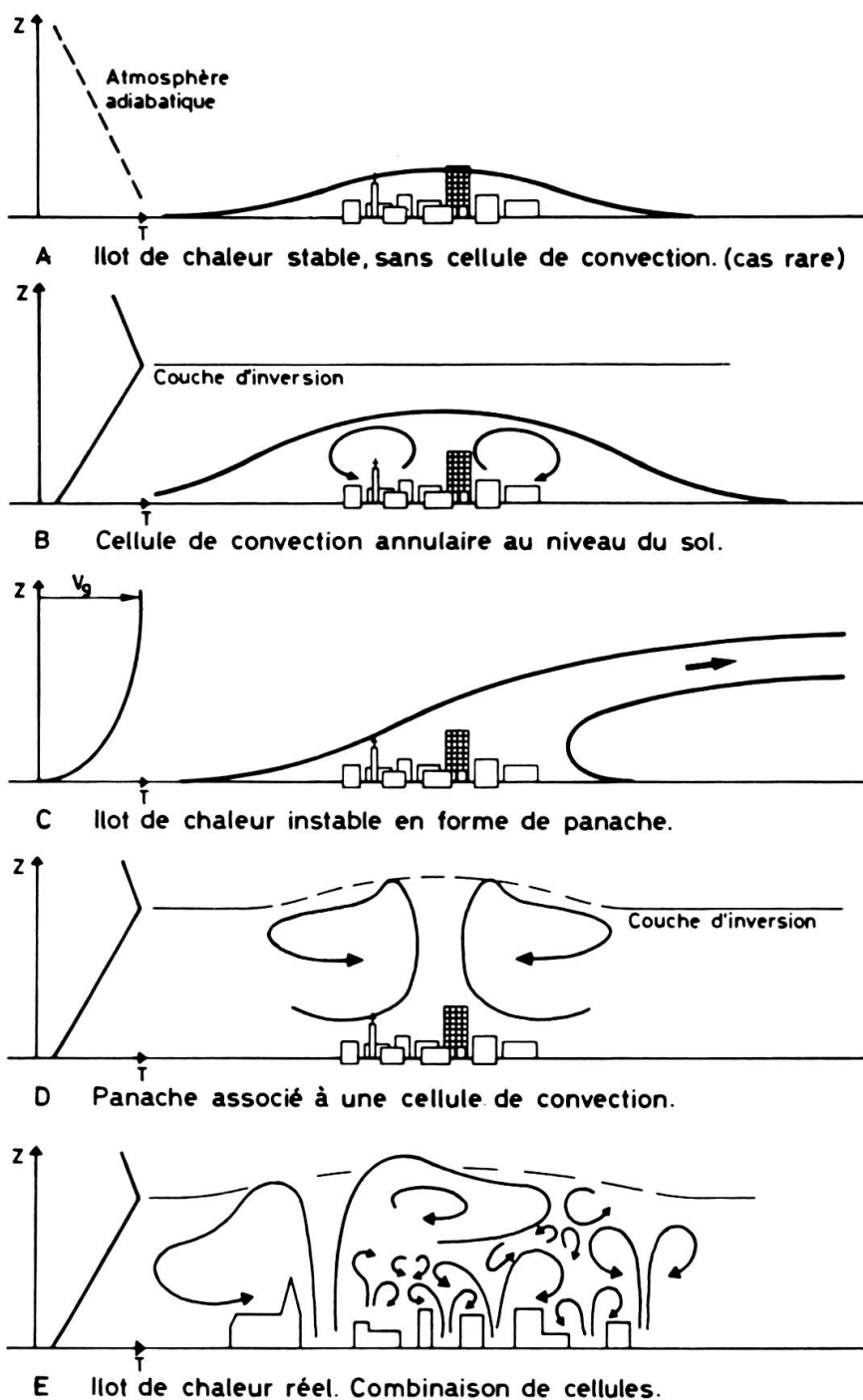


FIG. 7.

Ilot de chaleur urbain:
configuration possible des circulations au-dessus d'une ville avec un vent synoptique faible à nul.

que des blocages et des zones de stagnation [6]. Ces phénomènes peuvent apparaître malgré de faibles écarts de température horizontaux, car l'intensité des vents est en moyenne plus faible en Suisse qu'en terrain plat. D'autre part, il convient d'insister sur la présence fréquente en Suisse d'inversions de température au sol, condition évidemment favorable à la création des cellules convectives stables, caractéristiques des îlots de chaleur (fig. 7).

Il y a également la création d'un lac d'air froid épais pouvant s'étendre sur l'ensemble du Plateau suisse. Ce lac d'air froid peut apparaître toute l'année, mais il n'est bien visible qu'en hiver par la présence d'une mer de brouillard. Par situation météorologique de haute pression hivernale, cette mer de brouillard peut persister une dizaine de jours. Il y a donc là une situation potentiellement critique du point de vue de la pollution de l'air à l'échelle de la Suisse [6].

En guise de synthèse, on peut dire que c'est la combinaison de la réduction de l'intensité des vents, de la présence des écoulements régionaux et des inversions qui favorise la création d'îlots de chaleur urbains au-dessus des petites villes suisses. Mentionnons que l'influence du brouillard photochimique (smog) au sommet des couches d'inversion est considérée aujourd'hui comme un facteur aggravant de la pollution de l'air, notamment en ce qui concerne l'atteinte aux forêts.

Partant de l'hypothèse que la topographie est, en Suisse, le facteur dominant dans les particularités de la climatologie urbaine, nous présentons à la figure 8 une classification des grandes agglomérations suisses qui regroupe environ 3 millions d'habitants.

Nous proposons une décomposition en quatre catégories:

La première est celle des plus grandes agglomérations qui sont situées à l'extrémité d'un grand lac et exposées aux écoulements provenant des chaînes de montagnes et de vallées adjacentes.

La deuxième regroupe les villes situées à l'extrémité de grandes vallées, généralement sur un coude ou une boucle du fleuve ou de la rivière considérée. Dans ce cas, la ville est construite sur de nombreuses collines et vallonnements, il y a interaction avec les vents de la grande vallée en amont.

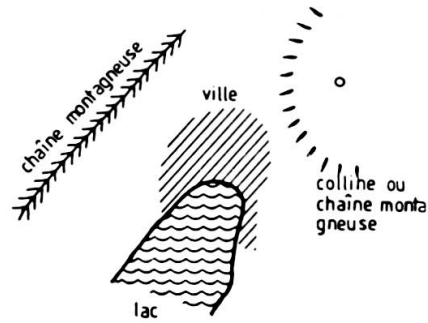
La troisième catégorie contient les villes construites en terrasse face à un lac, caractérisée par une pente générale exposée au sud et par la présence de quelques collines et vallées.

La quatrième catégorie regroupe les autres grandes villes de Suisse situées dans une dépression de terrain ou en terrain plat mais sous l'influence de massifs montagneux proches. Les villes de cette catégorie ne sont pas soumises à l'influence de plan d'eau ou de grandes rivières.

La première catégorie, avec 1,4 Mio ha, regroupe pratiquement la moitié de la population des grandes agglomérations suisses. La deuxième catégorie, avec 0,9 Mio ha, un tiers.

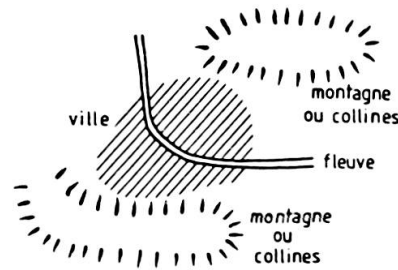
I. Ville plate située à l'extrémité d'un grand lac, avec une influence topographique marquée

Zurich	707
Genève	327
Lucerne	156
Bienne	87
Thoune	65
Zoug	52
Yverdon	21



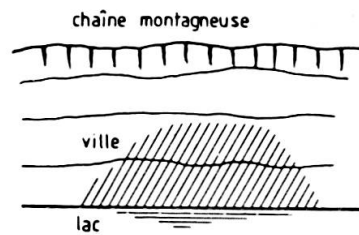
II. Ville située sur un méandre ou au bord d'un grand fleuve, généralement à l'embouchure d'une vallée

Bâle	364
Berne (Köniz)	382
Fribourg	52
Schaffhouse	51
Coire	32
Sion	23



III. Ville en terrasse située au bord d'un grand lac

Lausanne	225
Neuchâtel	59
Lugano	69
Vevey-Montreux	61



IV. Ville située dans une dépression de terrain ou dans un cirque montagneux

Saint-Gall	86
Winterthur	106
La Chaux-de-Fonds	37
Aarau	51
Baden	67



FIG. 8.

Particularités des principales agglomérations suisses (milliers habitants).

Arrêtons-nous un instant sur la morphologie caractéristique de ces grandes villes. Les villes ci-dessus peuvent être inscrites approximativement dans quelques formes géométriques très simplifiées. Le pentagone irrégulier convient pour la majorité des villes. Le rectangle, le carré, le trapèze et le cercle contiennent toutes les autres. Cette approximation géométrique est importante pour pouvoir juger de l'interaction entre l'îlot de chaleur urbain et les écoulements régionaux. De ce point de vue également

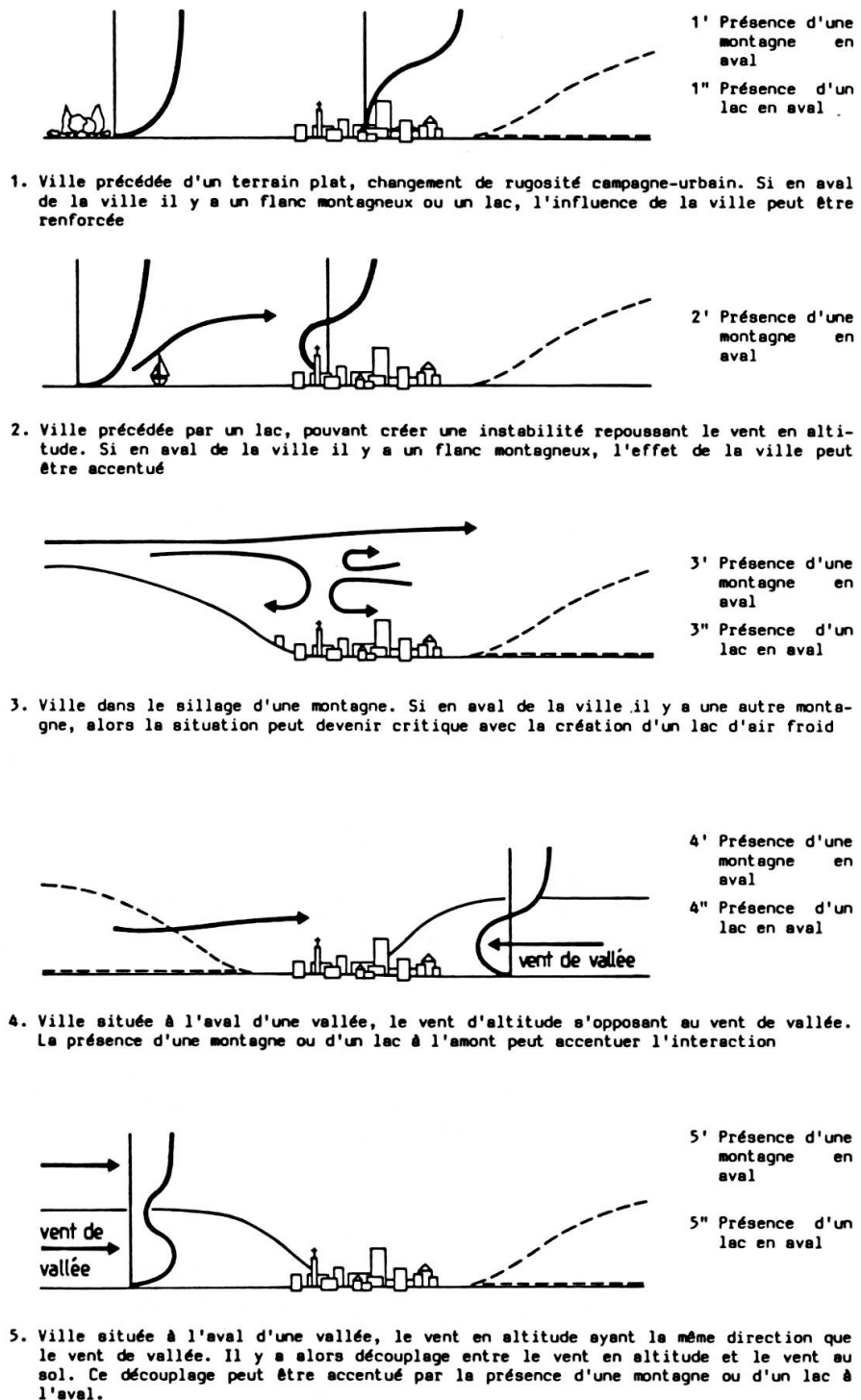


FIG. 9.

l'orientation relative des villes, des lacs et des montagnes ainsi que l'exposition aux vents dominants en Suisse sont très importantes. Nous pouvons définir cinq situations types décrites à la figure 9. Ces situations tiennent compte de l'interaction possible entre l'îlot de chaleur urbain et les écoulements. Le premier cas est représentatif du secteur de vent formé d'une ville en terrain plat pouvant freiner l'écoulement en couche limite. Les autres cas montrent les diverses combinaisons possibles entre la présence d'un lac (2^e cas), de montagnes (3^e cas) et de vallées (4^e et 5^e cas) sur le parcours du vent en altitude.

Pour chaque secteur de vent en altitude il est dès lors possible de classer les villes dans une des cinq situations typiques (Tableau 2). En attribuant ensuite une valeur numérique à l'aspect critique de chaque situation, on pourrait créer ainsi une sorte de hiérarchie entre les villes suisses.

Le problème essentiel réside dans la détermination du degré de gravité d'une situation typique pour une ville donnée. Les paramètres suivants doivent entrer en considération:

- la nature de l'interaction entre l'écoulement et l'îlot de chaleur,
- la taille de la ville,
- sa forme géométrique.

Par la nature de l'interaction on entend chiffrer l'abaissement de la ventilation d'une ville pour une configuration géométrique donnée et pour un jeu de paramètres météorologiques donnés. La durée ou persistance de l'interaction entraînant des vitesses inférieures à un seuil au-dessus duquel il y aura accumulation des polluants est également un élément déterminant.

Deux cas sont à considérer:

- le degré de gravité est défini par la persistance d'un épisode météorologique à haute pollution et un élément statistique permet de tenir compte de la fréquence de cet épisode. Il s'agit de valeurs critiques liées aux valeurs extrêmes de concentration;
- le degré de gravité moyen de la ventilation d'une ville peut être définie par la persistance cumulée de tout épisode entraînant une forte concentration; ceci correspond à un extrême annuel moyen typique d'une ville.

Ces définitions conduisent à envisager un indice de pollution comme étant proportionnel au produit d'une concentration par une persistance comptée en heures. Pour obtenir un indice, il faut encore normaliser par le produit d'une concentration et d'un temps. Nous proposons de considérer la moyenne annuelle de concentration multipliée par le nombre d'heures annuel. L'indice représente donc le pourcentage du cumul annuel dû à l'îlot de chaleur ou à une situation de stagnation caractéristique:

$$I = \Sigma [X_{\max} \cdot P(X_{\max})] / [\bar{X} \cdot (365 \cdot 24)]$$

TABLEAU 2.

*Particularités topographiques des principales villes de Suisse en fonction du secteur de vent.
Les chiffres se rapportent aux définitions de la figure 9.*

	VENT SUD ÷ SUD-OUEST	BISE NORD-EST	FOEHN SUD ÷ SUD-EST	VENT NORD ÷ NORD-OUEST
<i>Villes</i>				
Zurich	3'	1'/3''	2'	4/4'
Genève	3''	2'	3'	3'
Lucerne	3'	3'	1''	2
Bienne	2	1	1'	3
Thoune	3'	3'	1''/5	4/2
Zoug	2/2'	1''/3''	2/2'	1'
Yverdon	1	2	3	1
Bâle	4'	5'	1'	3
Berne	3'	3'	5/5'	4/4'
Fribourg	3'	3'	5'	4'
Schaffhouse	4'	5'	4'	5'
Coire	5	4	4'	5'
Sion	4	5	3'	3'
Lausanne	2'	3''	1/1''	2'
Neuchâtel	1	1	2'	3''
Lugano	3'	3'	2'	3''
Vevey	4''	5''	3	2'
Saint-Gall	3'	3'	3'	3'
Winterthur	3'	3'	3'	3'
Chaux-de-Fonds	1'	3	3'	3'
Aarau	1'	3	3'	3'
Baden	3'	3'	3	1'

Malheureusement il n'est pas possible, sur la base des données actuelles, de déterminer l'indice de pollution cumulé annuellement pour les villes suisses. Il manque les éléments quantitatifs permettant de déterminer la persistance des situations typiques pour chaque ville. Il s'agit notamment des vitesses de vent critiques en altitude au-dessous desquelles l'îlot de chaleur devient déterminant, ceci pour le cas 1. Dans le cas 2, si la température de l'eau est supérieure à celle de la ville, cette vitesse critique augmente. Dans le cas 3, la stratification thermique de l'atmosphère joue un rôle alors que dans les cas 4 et 5, c'est le refroidissement nocturne qui devra entrer en considération.

Une fois cette vitesse critique déterminée, il sera possible de retourner à la statistique annuelle et de rechercher la persistance des situations par lesquelles le vent à une vitesse inférieure, à la vitesse critique et pour des valeurs déterminées des autres paramètres (perturbation de température, température du lac). La prévision de cette vitesse critique et la détermination de la concentration à attendre durant l'épisode sont l'affaire des modèles.

4. MODÉLISATION-POSSIBILITÉS ET LIMITES

La simulation des écoulements atmosphériques transportant les émissions doit inclure la modélisation de l'ensemble des phénomènes se produisant dans les basses couches de l'atmosphère. Les écoulements à échelle moyenne sont caractérisés par la présence de la stratification thermique de l'atmosphère associée à des vitesses variables selon la hauteur au-dessus du sol. Lorsque l'atmosphère stratifiée thermiquement passe au-dessus des montagnes, il y a création d'ondes de gravité qui peuvent induire des rotors et des ressauts semblables au ressaut hydraulique.

Les différences de température entre le sol et la masse d'air en altitude, dues notamment au refroidissement nocturne du sol ou à l'ensoleillement diurne, provoquent des brises descendant ou montant les flancs des montagnes. La combinaison de plusieurs brises crée les vents de vallée. Etant donné leur variation temporelle relativement rapide en comparaison avec l'espace intéressé par les brises et les vents de vallée, ces écoulements sont principalement instationnaires. Lors de leur naissance, au lever ou au coucher du soleil, il y a formation de fronts qui interagissent avec le vent en altitude.

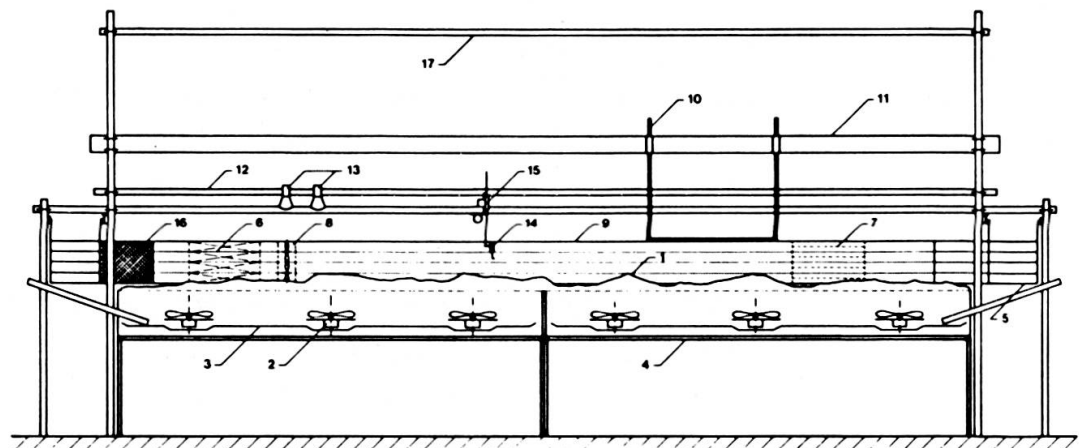
Comme nous l'avons vu précédemment, les villes vont influencer ces écoulements par leur rugosité et leur îlot de chaleur. C'est dans ces combinaisons d'écoulements souvent fort compliquées que les panaches des cheminées vont se disperser, puis être transportés.

En théorie, les modèles utilisés doivent permettre de traiter, si possible conjointement, l'ensemble de ces cas. Deux techniques seules sont à même d'apporter une contri-

bution à l'analyse de ces problèmes: la *modélisation physique* et la *modélisation numérique*, toutes deux basées sur une mécanique des fluides détaillée.

4.1 Modélisation physique

A l'origine, la modélisation physique ne comprenait que la simulation au-dessus de maquettes placées en soufflerie ou en canal hydraulique. Pour les simulations à échelle moyenne, la modélisation physique doit inclure la reproduction des propriétés thermiques de l'atmosphère.



1	Modèle en coque	7	Eléments refroidissants	13	Lampes infrarouges (250 W)
2	Ventilateurs du système de refroidissement	8	Ventilateurs pour vent en altitude	14	Sonde
3	Bac contenant de l'azote liquide	9	Plafond transparent	15	Porte - sonde
4	Support de modèle	10	Passerelle	16	Mousse poreuse
5	Système tournant, générant le vent en altitude	11	Support de passerelle	17	Construction métallique
6	Eléments chauffants (2 kW/couche)	12	Supports pour lampes infrarouges		

FIG. 10.

Enceinte circulaire de l'IENER pour écoulements stratifiés et modèles refroidis à l'azote liquide.

L'installation correspondante est une soufflerie météorologique ou une enceinte climatologique. Une telle installation (fig. 10) a été développée au cours de ces dernières années à l'IENER en vue de simuler l'ensemble des phénomènes mentionnés au chapitre précédent.

Cette installation permet de refroidir la surface des maquettes afin de reproduire les brises de pente et les vents de vallée qui entrent en interaction avec un écoulement stratifié à couches limites représentant le vent en altitude. Par l'étude des écoulements résultant de ces interactions, il est possible de décrire la ventilation d'une région. La

prise en compte de l'îlot de chaleur urbain se fait par chauffage à l'aide de lampes à infrarouge de la surface représentant la ville.

Il est évident que la simulation des écoulements à échelle moyenne doit se faire à l'aide de maquettes ayant une très petite échelle (comprise entre 1/10 000 et 1/25 000).

La modélisation physique repose sur la connaissance des *règles de similitude* et sur la *mise à disposition d'installations expérimentales*. Les règles de similitudes sont des critères ou nombres sans dimension qui permettent de déterminer les échelles des vitesses, des temps, des températures, des pressions, etc. en fonction de l'échelle géométrique de la maquette. Les règles de similitude correspondant à la simulation de l'atmosphère ont été dérivées de l'analyse dimensionnelle des équations différentielles décrivant l'atmosphère. Plusieurs dizaines de nombres sans dimension peuvent ainsi être obtenus. Comme il n'est pas possible de satisfaire à toutes les conditions, le travail de l'expérimentateur consiste à rechercher et à étudier les groupes de critères particulièrement important pour chaque famille de phénomènes. Une telle similitude partielle a été étudiée pour le problème de la simulation à mésoéchelle. Elle a conduit au développement de nouvelles installations afin d'induire les principales caractéristiques de la topographie, à savoir : les crêtes des bassins versants contenant les brises et les principales dépressions pouvant entraîner la formation de lacs d'air froid.

A ces petites échelles, il n'est pas possible de reproduire correctement la dispersion des panaches, seules les interactions entre les écoulements relativement importants (épaisseur supérieure à 50 m) peuvent être étudiées. Il faut ensuite recourir à des maquettes à plus grande échelle, supérieure à 1/2000, pour pouvoir simuler les panaches. A de telles échelles, la turbulence peut être reproduite avec une bonne qualité et les principales interactions entre écoulements doivent être imposées artificiellement. Ceci est rendu possible par les connaissances et les données acquises des modélisations à plus petite échelle. On se contente généralement ici d'utiliser une soufflerie à écoulements stratifiés et de reproduire les deux couches les plus voisines du sol.

Lors d'une telle modélisation, il est possible de mesurer les concentrations de polluants induites par les émetteurs représentant les cadastres d'émission qu'ils soient industriels ou représentatifs de la circulation automobile. Ces concentrations peuvent être obtenues par visualisation des fumées et mesurées par analyse numérique de la densité de fumée contenue dans les images vidéo prises lors de l'expérience.

Les avantages de la modélisation physique sont dans la représentation analogique des phénomènes atmosphériques, la prise en compte des aspects tridimensionnels de la topographie, ceci avec un luxe de détails très important, la relative facilité de mise en œuvre.

Les inconvénients résident dans les difficultés de mesurer avec grande précision dans tout le volume considéré. Par ailleurs, il n'est pas possible de tenir compte de manière détaillée de certains phénomènes physiques de l'atmosphère tels que l'activité nuageuse.

La reproduction de nombreuses situations météorologiques et de scénarios de cadastres d'émissions est très longue car chaque expérience demande une préparation importante.

Cette méthode est donc mal adaptée à l'établissement de moyennes annuelles, mais elle est adéquate pour *l'étude d'épisodes intéressants ou critiques*. Dans les cas de détermination de la hauteur des cheminées, on peut également l'utiliser pour obtenir des informations quant à l'influence de la topographie sur le comportement des panaches.

4.2 Modélisation numérique

La modélisation numérique est ici la résolution par ordinateur des équations fondamentales de la mécanique des fluides à l'aide de schémas d'interpolation de l'espace, du temps et de représentation de la turbulence.

Deux grandes techniques de description de l'espace sont utilisées: la méthode des différences finies et celle des éléments finis. Historiquement concurrentes, les différences finies tendent à être supplantées par les éléments finis et actuellement une mise en œuvre complémentaire est souhaitable. L'intégration dans le temps se fait encore généralement pour les deux méthodes selon différents schémas.

On distingue en outre deux grandes familles de modèles en fonction du traitement du mouvement vertical:

- les modèles hydrostatiques qui négligent la contribution à la pression des accélérations verticales; ces modèles sont plus simples et, partant, moins coûteux en temps de calcul;
- les modèles hydrodynamiques qui prennent les trois équations de Navier-Stokes sous la condition de continuité.

On sait que les modèles hydrostatiques conviennent bien à la simulation des écoulements à échelle moyenne et en ce sens ils sont comparables aux modèles physiques à petite échelle. Les modèles hydrostatiques ne conviennent pas pour l'étude des écoulements autour des obstacles et dans le sillage de ceux-ci. Dans ce cas, il faut recourir aux modèles hydrodynamiques. Ces derniers peuvent être utilisés pour les écoulements à échelle moyenne mais sont très avides de temps de calcul et de place mémoire. La limite inférieure de l'utilisation des modèles hydrodynamiques est encore mal connue, mais il semble qu'un domaine de l'ordre de 10 à 20 km reste nécessaire.

La conséquence de la définition de ces deux familles de modèles se retrouve dans les schémas de turbulence utilisés. En effet, à l'échelle particulière des modèles hydrostatiques, il n'est plus nécessaire de traiter la turbulence de manière détaillée, ainsi une fermeture dite au premier ordre est suffisante. Dans ce cas, on exprime la viscosité turbulente à l'aide de fonctions algébriques de l'espace tenant compte de la stratification thermique.

Par contre, dans les modèles hydrodynamiques, la turbulence est souvent traitée de manière détaillée. On utilise une fermeture dite au deuxième ordre, ce qui signifie que les coefficients de viscosité turbulente sont calculés à l'aide de variables décrites par des équations différentielles.

Le modèle le plus connu et le plus communément adopté est basé sur le calcul de l'énergie cinétique de la turbulence (K) et de la dissipation (ϵ) de celle-ci par frottement entre les tourbillons.

Les modèles numériques sont donc capables, comme les modèles physiques, de résoudre les problèmes posés par la climatologie urbaine. Mais le problème posé par les échelles très différentes des phénomènes considérés, vents de vallée d'une part et panaches d'autre part, est le même que dans le cas des modèles physiques. Il est nécessaire de recourir à des maillages de taille variable et à des maillages imbriqués.

Par rapport aux modèles physiques, les modèles numériques requièrent une approximation moins bonne de la topographie (maillage grossier) ainsi que des hypothèses relatives à la turbulence.

Le principal avantage des modèles numériques réside dans la possibilité de faire des études de sensibilité (il s'agit de l'analyse de l'influence de la variation de certaines conditions aux limites sur les solutions) et de disposer de résultats d'une manière exhaustive pour tous les champs considérés.

Le principal inconvénient réside dans le coût des calculs en temps et en place mémoire. On voit apparaître ainsi une complémentarité entre les modèles physiques et numériques. Par une méthodologie adéquate de mise en œuvre, on est en mesure de résoudre aujourd'hui les problèmes difficiles de climatologie urbaine.

4.3 Démarche de mise en œuvre conjointe des modèles physiques et numériques

L'organigramme de la figure 11 synthétise la démarche proposée ici. Cette démarche s'appuie sur la complémentarité des méthodes et sur les mesures *in situ*. Comme on peut le constater dans une première phase, on dédie au modèle à petite échelle la tâche de l'analyse de la phénoménologie et du contrôle des hypothèses relatives aux mécanismes de ventilation propres à une région donnée. Ces hypothèses et les résultats des simulations sont contrôlés par des mesures *in situ* adéquates obtenues lors de campagnes de mesures complémentaires.

L'interaction avec l'îlot de chaleur urbain est ensuite analysée conjointement entre le modèle physique et le modèle numérique. Le modèle physique fournit ici les éléments de calage nécessaires au modèle numérique. En particulier, l'influence de la représentation des bâtiments, les paramètres de rugosité et la schématisation de la topographie dans le modèle numérique peut être contrôlée. Ensuite, le modèle numérique peut être utilisé pour effectuer l'analyse paramétrique de l'influence de l'îlot de chaleur sur les écoulements et en déduire la persistance des diverses situations.

ETUDE DE LA VENTILATION DE ET DE L'HYGIENE DE L'AIR A BIENNE

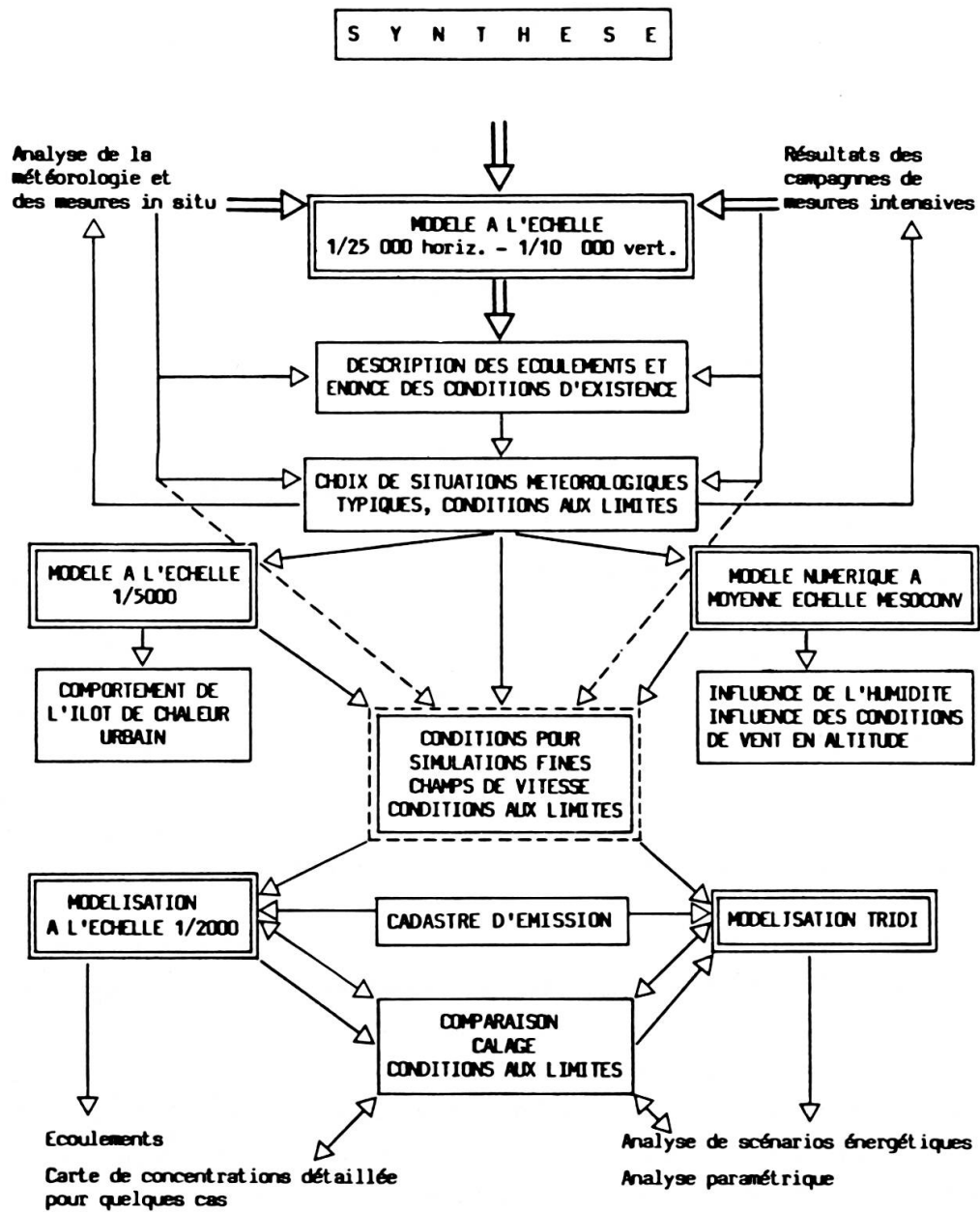


FIG. 11.

Démarche adoptée pour l'utilisation et la mise en œuvre des modèles.

Dans une troisième étape, ce sont des modèles de dispersion des panaches qui sont mis en complémentarité. Ces modèles utilisent les conditions aux limites définies dans la deuxième étape. Le modèle physique, placé en soufflerie, permet la détermination de jeux de variables, vitesses, températures, concentrations correspondant à quelques cas importants et représentatifs. Ces jeux de variables permettent un calage du modèle numérique correspondant, de déterminer le degré de finesse nécessaire dans la reproduction des sources d'émission, des conditions aux limites et des constantes de turbulence.

Le modèle numérique permet ensuite le calcul des concentrations dans de nombreux cas relevant de scénarios énergétiques liés à un ou plusieurs émetteurs.

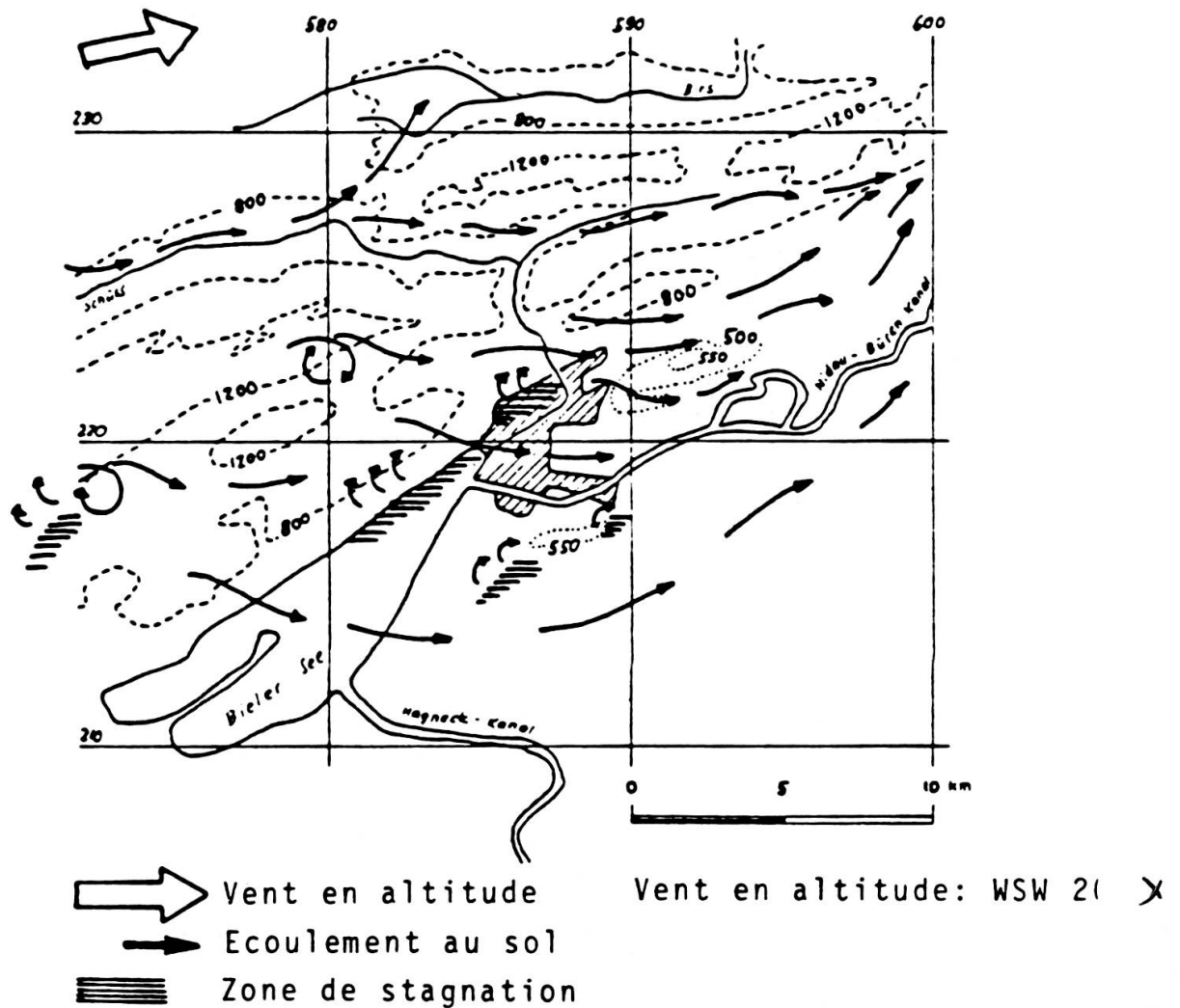
5. APPLICATION AU CAS DE BIENNE

La démarche décrite ci-dessus est le fruit de nombreuses recherches effectuées notamment pour l'étude des villes de Bâle (projet Climod [7]), Fribourg et Bienne ¹. C'est dans le cadre de l'étude de la région de Bienne que cette démarche a été perfectionnée et son application fut proche de ce qui est décrit. Notons qu'une application complète et plus rigoureuse sera faite dans le cadre de l'étude de la vallée de la Broye.

A Bienne, l'étude a été conduite par le GIUB et l'ENER a apporté son concours pour la modélisation physique. Les mesures *in situ* à l'aide d'un réseau de mesure fixe ont permis d'identifier les principaux problèmes. Un épisode de relativement forte pollution a été documenté les 10 et 11 novembre 1980 par une première campagne de mesures intensives. Une série d'hypothèses de travail quant à l'origine du maximum de pollution constaté à l'hôpital et aux principales caractéristiques de la ventilation ont été émises [8]. Parallèlement, les cadastres d'émissions ont été établis [9]. Les mécanismes de la ventilation régionale ont été analysés à l'aide d'un modèle physique à petite échelle (fig. 12) (1/25 000 horizontale et 1/10 000 verticale). Des constatations intéressantes ont pu être tirées quant au comportement du vent de la vallée de Saint-Imier, à l'influence du Jura, du lac et du vent du Taubenloch. Des confirmations ont été apportées pour diverses descriptions des écoulements, dans d'autres cas de nouvelles hypothèses ont été émises. Ces hypothèses ont alors été à l'origine d'une nouvelle campagne de mesures, qui est actuellement en cours de dépouillement.

Parallèlement, une analyse de l'interaction entre le Jura, le vent du Taubenloch, l'inversion sur le Plateau suisse avec l'îlot de chaleur urbain a été faite sur un modèle à l'échelle 1/5000. L'influence déterminante du lac a été relevée à cette occasion. Il a également été montré que la ville pouvait créer, par vent en altitude très faible, une cellule convective dont l'interaction avec la brise de pente pouvait conduire à une accumulation de pollution le long du Jura.

¹ Projet en cours dans le cadre du Programme National 14 «Cycle et pollution de l'air en Suisse».



Carte des vents

Les simulations sur maquettes à petites échelles (1/25 000) destinées à reproduire les principaux écoulements représentatifs de la région. On étudie également les influences du lac, de la ville, du Taubenloch sur ces écoulements. Les *données* sont les situations météorologiques typiques de la Suisse: vent d'ouest-bise-foehn-vent du nord-haute pression. Les *résultats* sont donnés sous la forme de cartes décrivant les écoulements, accompagnées de leurs conditions d'existence. L'influence de paramètres tels que la stratification de l'atmosphère, la présence du lac et de la ville en tant que source ou puits de chaleur et l'influence de la topographie, est décrite. Ces essais, corroborés avec les observations faites dans la nature, donnent les conditions aux limites pour les modèles de plus grande échelle.

FIG. 12.

Contribution de la modélisation physique à l'étude de la ventilation et de l'hygiène de l'air à Bière.

La modélisation physique sur un modèle à l'échelle 1/2000 est effectuée actuellement en vue d'analyser le transport et la dispersion des polluants émis par le cadastre industriel. Parallèlement, deux modélisations numériques sont effectuées. Ces modélisations sont destinées à l'étude systématique des conditions de dispersion correspon-

dant aux différents cadastres et aux hypothèses faits sur le développement de l'industrie, du chauffage et des transports.

Les résultats déjà obtenus par la modélisation physique du cadastre industriel montrent que certaines régions de la ville sont à déconseiller pour l'implantation de nouveaux émetteurs, alors que d'autres zones, situées à l'extérieur de la poche d'air décrite à la figure 12 pourraient faire l'objet de développements ultérieurs.

Les premiers tests de la modélisation numérique montrent qu'il est nécessaire de disposer d'une grosse capacité de calcul pour pouvoir décrire en détail la topographie. On est donc conduit à la simplifier et les résultats des modèles physiques sont d'une aide précieuse pour contrôler l'adéquation des simplifications effectuées.

6. CONCLUSIONS

Les contraintes imposées par la *nouvelle* réglementation sur la protection de l'environnement, la complexité des phénomènes atmosphériques, particulièrement dans le contexte topographique de la Suisse, et les nombreux phénomènes dont la ville est le siège nécessitent le recours à des techniques de modélisation toujours plus sophistiquées. Face à cette complexité, il n'existe pas, selon nous, de modèle universel. C'est seulement par la mise en œuvre, de *manière complémentaire*, des principaux moyens à disposition que les connaissances de nos villes suisses pourront progresser. L'inventaire de la qualité de l'air est en cours, l'inventaire des moyens permettant le maintien de l'amélioration de la qualité de l'air est à faire. On sait déjà que la meilleure protection de l'environnement consiste à réduire les émissions en quantité mais aussi en réduisant l'agressivité. Toutefois, ces réductions ne suffisent pas; il faut encore disposer de moyens de prévision de l'efficacité des mesures envisagées. A plus long terme, l'aménagement du territoire, les plans de circulation, le développement industriel doivent être contrôlés et les modèles décrits permettront de contribuer à guider cette évolution dans une direction favorable. Il ne s'agit, bien entendu, que d'un aspect des nombreux éléments conduisant au choix. Nous pensons ici aux implications politico-économiques qui restent dominantes.

Les modélisations présentées, physiques et numériques, ont atteint un niveau de qualité élevé. Il conviendra toutefois de les utiliser avec mesure et de les perfectionner car, comme nous l'avons vu, il reste quelques limitations, notamment de coût, à leur emploi pour les applications quotidiennes pour la protection de l'air. Par contre, nous pensons que ces méthodes doivent être utilisées en vue de l'analyse détaillée de l'origine des immissions actuellement mesurées en ville et qu'elles doivent intervenir dans les planifications à moyen et long terme.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements aux organismes qui soutiennent nos recherches en climatologie urbaine, soit:

- l'Office fédéral de l'économie énergétique
- la division des sciences naturelles et exactes ainsi que celle des programmes nationaux du Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

Notre gratitude va à MM. H. Wanner, Privat-Docent, D. Ruffieux, docteur ès sciences, P. Rickli et D. Luy pour leurs apports méthodologiques à nos recherches.

Nous nous félicitons de la collaboration qui s'est établie avec les Instituts de géographie des Universités de Berne et de Fribourg ainsi qu'avec la section de la protection de l'air de l'Institut Suisse de Météorologie et les services d'hygiène de l'air des cantons de Vaud et Genève et de la ville de Lausanne.

Enfin, nous remercions M. le professeur J. C. Landry et la Société de physique et d'histoire naturelle de nous avoir offert la possibilité de présenter cette conférence.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] OKE, T. R. 1982. The energetic basis of urban heat island. *Quart. J. ... Meteor. Soc.* 188, 1-24.
- [2] ROLLIER, H. 1985. *La pollution de l'air, ses causes et ses effets*. Economie Vaudoise 1984-1985. Off. Vaudois Dev. Comm. et Ind.
- [3] LANDSBERG, H. E. 1981. *The urban climate*. Academic Press, International Geophysics Series, vol. 28, 275 p.
- [4] CHANGNON, A. 1981. *Meteomex: A review and summary*. Meteorological Monographs, vol. 18, 181 p.
- [5] OKE, T. R. 1974. *Review of urban climatology, 1968-1973*. WMO n° 383.
- [6] WANNER, H., J.-A. HERTIG. 1984. *Studies of urban climates and air pollution in Switzerland*. J. of Climate & Applied Meteorology, AMS, vol. 23, n° 11.
- [7] Commission fédérale de météorologie du Haut-Rhin et Rhin supérieur en territoire suisse. *Possibilités de modifications climatiques régionales provoquées par des activités humaines*. Rapport final sur le projet Climod, EDMZ, Berne, juin 1981.
- [8] WANNER, H., P. BERLINCOURT, R. RICKLI. 1982. *Klima und Lufthygien der Region Biel*. Gedanken und erste Resultate aus einer interdisziplinären Studies. Geographica Helvetica, Berne, 4.
- [9] BERLINCOURT, P. 1984. *Le cadastre d'émission de la région biennoise*. Rapport GIUB.