

Prévision de la pollution acide en milieu urbain - Exemple de Caen

Acid pollution forecast in urban environments - Example of the city of Caen

Manuel TROUVÉ (*)

RÉSUMÉ

La pollution acide en milieu urbain est largement conditionnée par les conditions météorologiques existantes. Une première étude analytique permet d'introduire un certain formalisme dans les modalités de fonctionnement du système. Une modélisation de ce phénomène est alors possible. La méta-connaissance répertoriée peut ensuite être intégrée à un système logiciel capable de prévoir à différentes échelles spatiales le niveau de concentration attendu en fonction des paramètres météorologiques en présence. Ce système se révélera être aussi un outil d'analyse spatiale performant.

ABSTRACT

Acid pollution in urban environments is largely conditioned by the prevailing weather conditions. An first analytical study attempts to introduce a certain formalism into the system function parameters. So, the indexed meta-knowledge can be integrated into a software system able to forecast on different spatial scales the concentration level expected according to the meteorological parameters present. This system will also prove to be a high-performance spatial analysis tool.

Introduction

La gestion des pollutions de nature anthropique fait maintenant l'objet d'un dispositif législatif en France. Ce dispositif pose « *le principe de l'information immédiate du public, non seulement en cas de dépassement des normes de qualité de l'air, mais également en cas de risque de dépassement* ». Si le premier principe peut d'ores et déjà être assuré par les différents réseaux, la prévision des risques de dépassement est encore à l'état de projet de recherche. C'est donc l'objectif principal de recherche actuel.

En tant que géographe, cet objectif est, plus particulièrement, d'analyser la répartition spatiale de cette pollution en fonction des paramètres météorologiques afin de mettre en évidence des comportements représentatifs. Le site laboratoire retenu est celui de l'agglomération de Caen. Sur ce site, le réseau le mieux équipé est celui voué à l'étude de l'acidité forte. Lui seul présente un nombre de capteurs suffisant pour envisager une analyse spatiale de la répartition de la pollution. C'est ce polluant que l'on étudiera plus spécifiquement, même s'il s'agit d'une pollution moins

importante de nos jours. Plus que son analyse, c'est la méthode permettant une étude spatiale qui nous intéresse. Cette analyse portera sur six années de relevés horaires de 1988 à 1993. On ne retiendra, en définitive que les périodes hivernales, les plus facilement associables à une pollution par l'acidité forte.

Cet intervalle apparaît suffisant pour modéliser les phénomènes. Les années 94 et 95 serviront de validation des modèles développés. L'année butoir de 95 est fatale pour toutes autres expérimentations, le réseau de l'ESPAC ayant depuis connu de fortes modifications.

1. Le réseau laboratoire retenu et ses enjeux

1.1 Présentation du réseau

Le réseau de capteurs est géré par l'association pour l'Etude, la Surveillance et la prévention de la Pollution Atmosphérique dans l'Agglomération de Caen (ESPAC). Le réseau comprenait en 1995 10 stations automatiques de mesures des polluants chimiques et particuliers et deux stations météorologiques qui se répartissaient comme suit :

(*) Docteur es Géographie, ATER. Chercheur associé UMR 6590, Université du Maine.

Tableau I.
Implantation des stations de mesure à Caen en 1995.
Air pollution monitoring in Caen in 1995.

Stations	Sites	Mesures
1	CAEN-OUEST, Centre sociocultu- rel du Chemin Vert	AF.PS
3	GIBERVILLE, Mairie	AF.PS
4	HÉROUVILLE 1, Ecole St Michel	AF.PS
5	MONDEVILLE, station de pompage	AF
6	HÉROUVILLE, 1010, bd des Belles Portes	VV.DV.T
7	CAEN CENTRE VILLE, Tour Leroy	AF.PS.NO NO ₂ .SO ₂ O ₃ .CO.T BAR.HYG
9	RANVILLE, Presbytère	AF.PS
11	COLOMBELLES, Stade municipal	AF.PS
14	BLAINVILLE-SUR-ORNE, Bains Douches	AF
15	BLAINVILLE Météo	VV.DV.T
17	OUISTREHAM Plage	SO ₂

AF : Acidité Forte
PS : Poussières en Suspension
BAR : Pression atmosphérique
VV : Vitesse du vent
NO : Monoxyde d'azote
CO : Monoxyde de carbone
DV : Direction du vent
NO₂ : Dioxyde d'azote
SO₂ : Dioxyde de soufre
T : Température
O₃ : Ozone
HYG : Hygrométrie

Différents capteurs météorologiques sont dis-
posés au sein de ce réseau :

– à Blainville (mesure de la température, du vent
(vitesse et direction)),

– à Hérouville (mesure de la température, du vent
(vitesse et direction)),

– au centre ville (mesure de la température de la
pression et de l'hygrométrie).

La direction du vent est enregistrée en continu
par interrogation régulière du capteur et calcul de
la moyenne à un pas quart horaire et horaire.
Une valeur de 0 équivaut à une valeur de 360 et
désigne un secteur Nord. Une valeur de 90
désigne un vent de secteur Est et ainsi de suite.
On considère toujours le sens d'où vient le vent.
Ce paramètre sera considéré comme une
variable quantitative.

L'étude spatiale envisagée nécessite une car-
tographie spécifique permettant de visualiser la
distribution spatiale du polluant en fonction des
paramètres météorologiques en présence.

1.2. Les méthodes mises en œuvre

Ces méthodes sont en fait de deux natures
bien distinctes correspondantes à deux objectifs
particuliers : modéliser les phénomènes et déve-
lopper un outil cartographique approprié.

La modélisation passe classiquement par
l'étude des relations entre paramètres météoro-
logiques et niveau de concentration. Les études en
la matière reviennent sur des notions largement
éprouvées en confirmant l'influence de la vitesse
et de la direction des vents (fig. 1).

L'analyse en composantes principales, appli-
quée à la matrice de corrélation initiale, démontre
que le système évolue par rapport à des condi-
tions météorologiques spécifiques. La différen-
tiation la plus marquante s'opère entre acidité forte
d'une part et vitesse, direction du vent puis
température d'autre part. Ainsi lorsque l'acidité

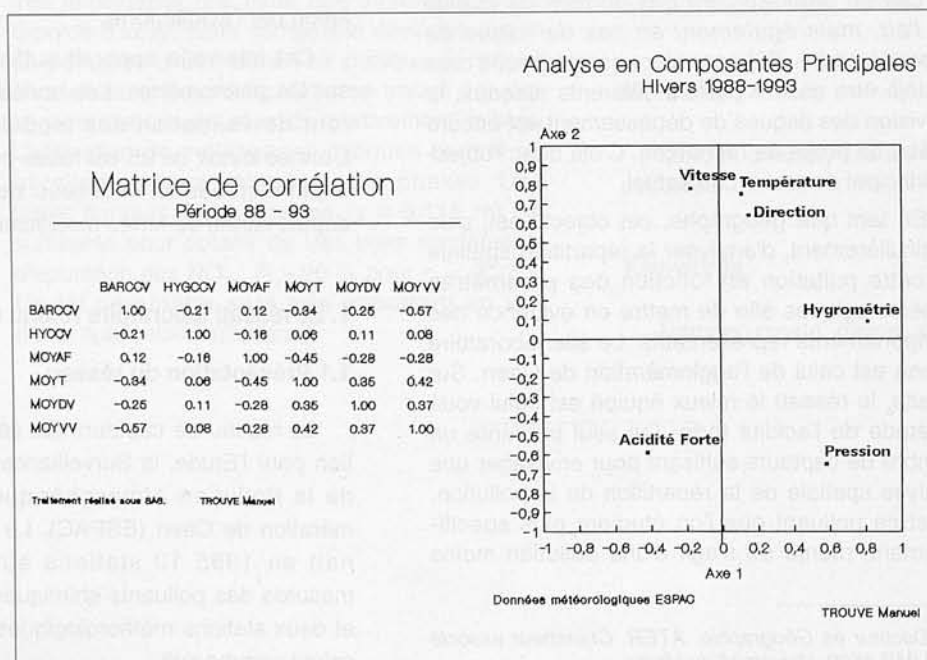


Figure 1.
Analyse en
composantes
principales du
phénomène lié à
l'acidité forte.
*Principals components
analysis about acid
pollution.*

forte sera importante, les autres paramètres seront faibles (températures tendant vers 0 °C voire négatives, vent tendant vers 0 m/s de secteur nord à nord est). La relation acidité forte / pression est différente puisque ces deux paramètres sont situés du même côté du premier axe factoriel. De fortes concentrations en acidité forte seront donc synonymes de fortes pressions barométriques.

La synthèse de ces informations peut alors s'opérer par modélisation. Les deux principales approches retenues sont respectivement :

- L'approche numérique, basée sur des considérations mathématiques. La variable à expliquer est alors la concentration du polluant considéré, les variables explicatives étant constituées des paramètres météorologiques ainsi que de la composante nycthémérale. Nous appliquerons à ce stade la technique de la régression multidimensionnelle. Les effets de seuil inhérents au phénomène seront intégrés par détermination de limites internes. Une pondération par les gradients à 3 h sera opérée. Au final, on obtient une équation de régression non linéaire qui se détermine comme suit :

Régression Non Linéaire avec limites internes et pondération par les gradients à 3 h

Step17 Variable T16 Entered

R-square = 0.80943879

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Prob>F
Regression	15	25349842.237906	1689989.4825271	453.08	0.0001
Error	1600	5967957.7565888	3729.97359787		
Total	1615	31317799.994495			

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II Sum of Squares	F	Prob>F
T3	-0.02851880	0.00631319	76115.05654604	20.41	0.0001
T4	-4.37109394	0.79152878	113750.31780011	30.50	0.0001
T5	0.55465325	0.12637496	71850.00415822	19.26	0.0001
T6	-0.48593392	0.09465735	98299.54829879	26.35	0.0001
T10	1.20229764	0.29223505	63134.26732943	16.93	0.0001
T14	-4.52116904	1.43708875	36918.16162426	9.90	0.0017
T15	-0.47138472	0.11552425	62102.69520234	16.65	0.0001
T16	0.51265683	0.22175631	19934.58919004	5.34	0.0209
VV1	-6.28791819	0.93200403	169778.98958139	45.52	0.0001
VV2	0.32751242	0.10462575	36549.72577258	9.80	0.0018
DV1	-0.23076876	0.01923031	537139.61980139	144.01	0.0001
DV4	0.00077901	0.00007859	366463.53141954	98.25	0.0001
BAR3	0.00000013	0.00000000	3610294.9637884	967.91	0.0001
BAR4	-0.03468292	0.00280141	571719.26212046	153.28	0.0001
BAR9	0.00170461	0.00054319	36732.23183163	9.85	0.0017

Bounds on condition number: 61502.07, 1289726

All variables left in the model are significant at the 0.1500 level.
No other variable met the 0.1500 significance level for entry into the model.

Les variables retenues sont des variables complexes qui intègrent les différents seuils déterminés. Ceci permet au modèle de réagir en fonction de la valeur effectivement soumise. Prenons l'exemple de la variable T4. Elle ne sera activée que si la température est inférieure à 0°C et si l'on se trouve en condition nocturne. T4 correspondra alors à la valeur de la température élevée au carré. L'intégration des différentes variables s'opère de manière incrémentale automatique. Un test permet d'intégrer ou de rejeter cette variable. Le résultat optimisé est l'équation décrite ci dessus.

Traitement réalisé sous SAS par TROUVÉ M

Figure 2.
Equation de régression non linéaire.
Non linear regression equation.

Cependant, cette approche numérique n'est envisageable qu'à une échelle globale sur l'agglomération. La dimension spatiale échappe au raisonnement. Il fallait donc envisager un autre mode opératoire : la modélisation analogique.

- L'approche analogique repose sur la sélection d'analogues dans la base de données historiques. Cette sélection s'opère sur l'ambiance météorologique, combinaison de paramètres météorologiques élémentaires. On dispose alors d'un outil qui met en évidence les contrastes de localisation des différentes concentrations.

Dans le cadre de cette approche, un outil cartographique approprié doit donc être développé. Cet outil s'articule autour de deux notions simples :

- l'interpolation linéaire entre les différents points de mesure alignés sur un transect,
- le carroyage de l'information résultante.

L'interpolation permet de disposer d'informations relatives à chaque point de l'espace. A chaque maille du carroyage peut ainsi être associée une valeur de concentration, qui sera soit une valeur mesurée ou bien, une valeur calculée par interpolation.

Le carroyage, pour sa part, est une technique qui décompose l'espace d'étude en entités élémentaires. Un maillage kilométrique a été ici retenu. Cette unité est la mieux adaptée à l'espace effectif des stations de mesures et à leur distribution spatiale.

La conjugaison de ces deux techniques permettra d'obtenir une représentation cartographique de la distribution spatiale du polluant considéré. Des données ponctuelles initiales, on passe donc à des données spatialisées.

Ces différentes approches, ainsi que les différentes techniques de cartographie permettent en fait de simuler les différents comportements du phénomène de pollution par l'acidité forte. Elles sont partie prenante du logiciel POLLU'AIR dont j'ai assuré le développement.

2. Potentialités du logiciel POLLU'AIR

2.1. Présentation des différentes fonctionnalités du logiciel

Concernant le module « modélisation et simulation » du logiciel POLLU'AIR, une première page (fig. 3) permet de sélectionner le type de modélisation que l'on souhaite effectuer. Ceci revient en fait à utiliser deux échelles différentes, à savoir une échelle globale dans le cadre d'une simulation numérique et une échelle spatiale dans le cadre d'une simulation analogique.

La sélection du premier item permet de calculer le niveau général de concentration sur l'agglomération. Pour ce faire, différentes boîtes de dialogues apparaissent successivement à l'écran afin de déterminer les valeurs désirées des différents paramètres météorologiques ainsi que les conditions nyctémérales. Le calcul est basé sur une équation de régression multidimensionnelle. Le résultat obtenu sera alors une estimation numérique de la concentration escomptée. On y associera la notion plus large d'indice de pollution en respect des limites communément admises par la plupart des réseaux français. Le résultat se présente comme indiqué en Figure 4.

La sélection d'une modélisation analogique dans la page initiale permet en fait d'introduire la

28/02/1998
EVALUATION DES RISQUES
10:8:25

Ce programme permet d'alerter l'utilisateur des risques de pollution
en prenant en considération les conditions météorologiques.

Deux traitements sont possibles :

Une estimation numérique	(1)
Une estimation analogique	(2)

Sélectionner l'item souhaité (1 ou 2). (Q pour quitter)

Figure 3.
Mise en œuvre des différentes prévisions au sein du logiciel POLLU'AIR.
Differents forecasts with POLLU'AIR software.

M O D E L I S A T I O N N U M E R I Q U E

Ce modèle est le fruit d'une régression non-linéaire multivariable.
La fonction développée est discontinue et n'exprime que 80.9% du phénomène
Elle gère :

- les paramètres météorologiques
- les conditions nycthémérales

Les paramètres initiaux sont les suivants :

Température :	-2.0 °C
Vitesse Vent:	2.0 m/s
Direction :	45.0 °
Pression :	1025.0 mb
Condition :	diurne

Selon ces conditions, la concentration en A.F prévue est de 92.7 µg/m³
En terme de qualité de l'air, cette valeur détermine un sous-indice
instantané de 5 sur une échelle de 10 soit un qualificatif de Moyen.

Tapez (I) pour impression et retour au menu
(R) pour relancer une simulation

Figure 4.

Exemple de modélisation numérique sous POLLU'AIR.
Example of numeric modelling with POLLU'AIR software.

dimension spatiale de l'analyse. L'introduction des conditions initiales de l'analyse s'opère alors par le biais du masque de saisie (fig. 5).

Les différents paramètres saisis vont servir de référence pour la sélection d'analogues dans la base de données historiques. Les sorties, dans ce cas, diffèrent de la précédente simulation. L'outil spécifique de cartographie mise en place prend alors le relais et propose une cartographie de la répartition spatiale de la pollution estimée.

2.2. Une prévision des niveaux de pollution

Les paramètres météorologiques sont considérés comme des révélateurs d'une ambiance météorologique spécifique. Par rapport au réseau, on utilisera la moyenne des différentes stations de mesures météorologiques. Cet artifice permet de considérer l'ambiance générale, en disposant de paramètres très facilement identifiables, en fin de compte des paramètres simples, susceptibles de faire l'objet d'une prévision météorologique. On introduit par ce biais la possibilité d'une connexion du modèle statistique

28/02/1998
RECHERCHE ANALOGIQUE APPLIQUÉE A LA POLLUTION SOUFRÉE

10:33:22

Sur quel fichier voulez vous travailler ? hiver.txt

Vous rentrerez les différentes conditions initiales

CONDITIONS :1 Diurne(1)/Nocturne(2) DIRECTION :45 (de 0 à 360) HYGROMETRIE:65 (de 0 à 100)	TEMPERATURE : -2	VITESSE : 2 (de 0 à 50) PRESSION : 1025 (de 960 à 1050)
--	---	---

L'hygrométrie recherchée est de 65.0 % (O/N)?

Copyright 1996 TROUVE Manuel

Figure 5.

Masque de saisie pour une modélisation analogique sous POLLU'AIR.
Data's input for an analogic modelling under POLLU'AIR.

avec un modèle météorologique, et donc l'opportunité d'une prévision effective des niveaux de concentration.

Prenons un exemple : un temps de Sud-Ouest. Les paramètres météorologiques représentatifs sont repris dans le tableau III. Par modélisation numérique, on aboutit à une estimation de la concentration moyenne sur l'agglomération de 24,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Par modélisation analogique, on aboutit à une concentration estimée de 25,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La comparaison de ces simulations avec des valeurs réelles confirme la validité du modèle comme en atteste le tableau suivant :

Tableau II.
Validation des modèles développés.
Developed model validation.

Jour et heure du relevé	Concentration moyenne en acidité forte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
23/01/1988 à 17h	23,5
21/01/1989 à 12h	15,9
10/01/1991 à 11h	23,1
09/02/1992 à 13h	23,0

De plus, par cette technique, on obtient une répartition spatiale de cette distribution (fig. 6).

On peut donc prétendre à une prévision spatiale des niveaux de concentration du polluant considéré.

2.3. Une analyse spatiale de la pollution

Cet outil de prévision peut être aussi considéré comme un outil de spatialisation. Deux exemples sont particulièrement parlants à cet égard

2.3.1. L'étude d'impact d'une source ponctuelle de pollution

Cette étude considère principalement l'axe du flux enregistré et se focalise sur les stations de Giberville, Colombelles et Mondeville. Les conclusions issues de la figure 7 sont reprises dans le tableau IV.

Ceci suppose une source d'émission placée au centre de ce dispositif. Lorsque l'on regarde la structure industrielle, on se rend compte que la maille centrale est le siège d'une usine métallurgique importante en activité au cours de la période d'étude (Société de Métallurgie Normande). Il y a donc transport de la pollution selon l'axe du flux. On peut par ailleurs quantifier cet apport qui est de l'ordre de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

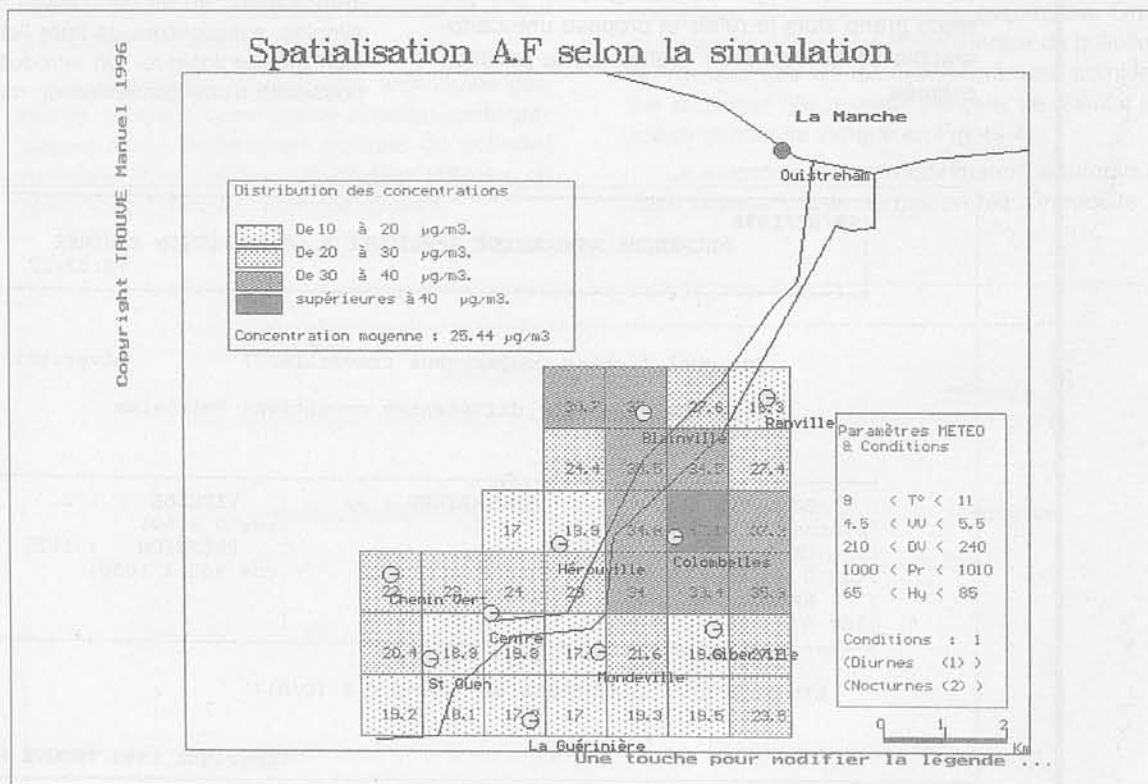


Figure 6.
Simulation de la distribution spatiale de la pollution acide et modélisation analogique.
Spatial distribution simulation and analogic modelling.

Tableau III.
Conditions météorologiques représentatives d'un temps de Sud-Ouest.
Meteorological conditions of South-East weather.

Température de l'air	Vitesse du vent	Direction d'où vient le vent	Pression atmosphérique	Hygrométrie	Conditions nycthémérales
10 °C	5 m/s	225°	1 005 mb	75 %	Diurnes

Tableau IV.
Répartition de la pollution en fonction du flux général.
Pollution distribution versus general flow.

Type de temps	Répartition spatiale principale
Temps du Sud-Ouest	Nord-Est de l'agglomération
Temps du Nord-Ouest	Sud-Est de l'agglomération
Temps du Nord-Est	Sud-Ouest de l'agglomération

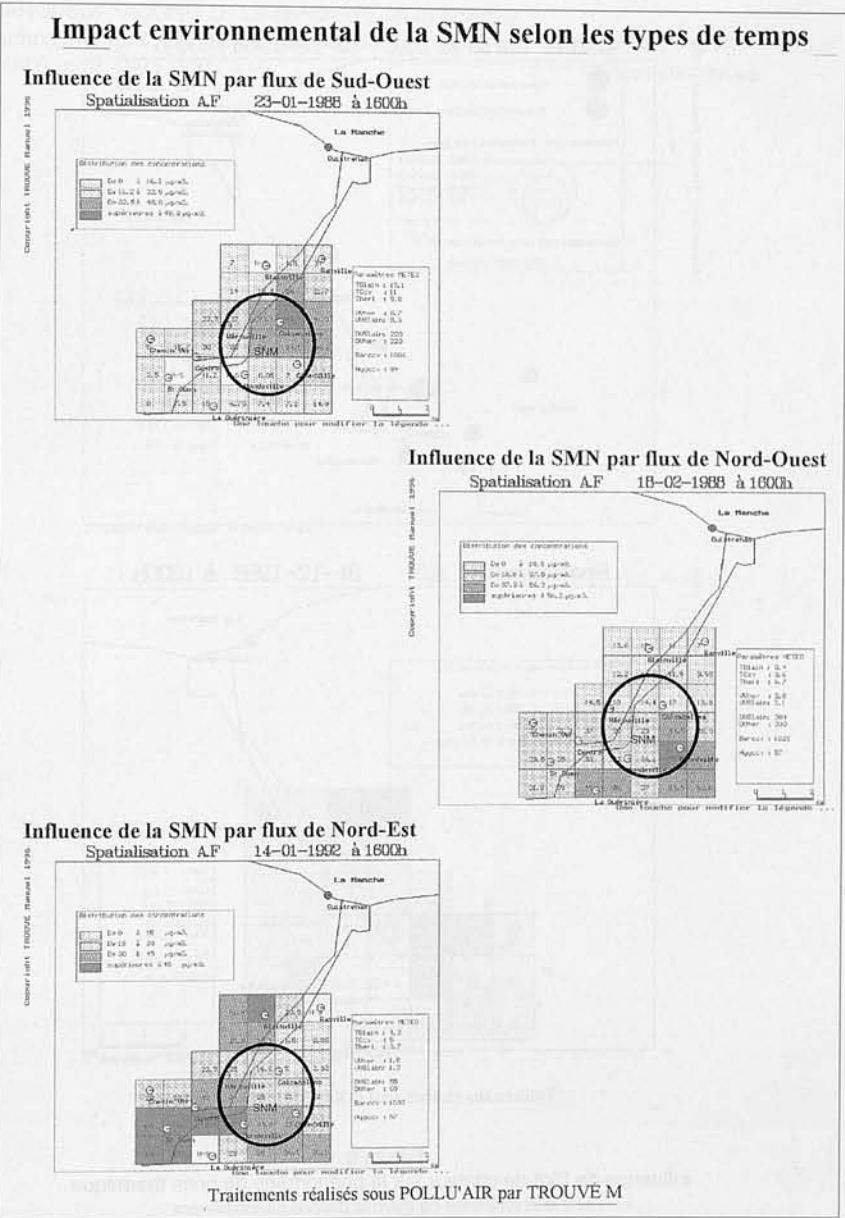


Figure 7.
Estimation du panache
polluant de la SMN en
fonction du type de temps.
*Pollutant wreath estimate of
SMN versus weather.*

2.3.2. L'observation de phénomènes micro météorologiques

La journée du 31 décembre 1988 sera le cadre de cette étude. Nous sommes alors en condition anticyclonique stable. Ces conditions favorisent l'expression de facteurs locaux.

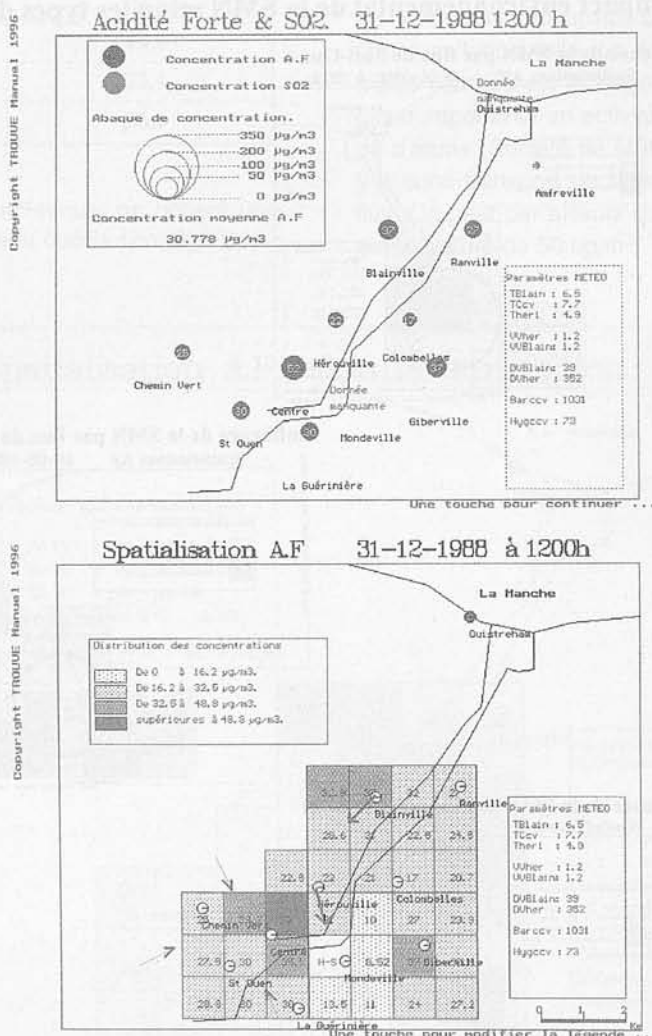
On constate une sur-représentation de concentration au centre ville. Ceci s'explique par la répartition des températures. Le centre est alors plus chaud que la périphérie. Nous sommes en présence d'un îlot de chaleur urbain. Cet îlot de chaleur génère des brises thermiques qui s'organisent de la périphérie vers le centre comme le suggère la figure 8.

Discussion et conclusion

La méthode développée permet une reconstitution spatiale du phénomène de pollution par l'acidité forte à l'échelle de l'agglomération caennaise. Cette méthode repose principalement sur le principe de l'étude analogique. La sélection d'analogues dans une base de données historiques permet de déterminer une situation « moyenne » de la pollution acide en fonction des conditions météorologiques en présence. Un outil cartographique approprié permet de visualiser cette répartition.

De par les concepts simples qu'elle utilise, elle apparaît exportable à d'autres champs d'étude.

Ilot de chaleur urbain et Brises thermiques



Traitements réalisés sous POLLU'AIR par TROUVE M

Figure 8.
Influence de l'îlot de chaleur sur le phénomène de brise thermique.
Hot islet influence on thermic breeze phenomenon.

Par contre, des améliorations sont susceptibles d'être apportées. La plus immédiate est certainement l'intégration d'un modèle numérique de terrain permettant d'introduire l'interaction évidente de la topographie dans l'étude.

Bibliographie sélective

Actes du colloque de Villeurbanne. *La modélisation confluent des sciences*, CNRS, 1990.

CARREGA P. *Une méthode de reconstitution de la température de l'air en montagne, utilisée en cartographie automatique*, L'air du temps, Etudes Méditerranéennes n° 16, 1994, 33-50.

ISIDOROV V.A. *Organic chemistry of the earth's atmosphere*, Springer-Verlag, 1990.

FINZI G., TEBALDI G. *A mathematical model for air pollution forecast and alarm in an urban area*, Pergamon Press, Atmospheric environment, Vol. 16 N° 9, 1982, 2055-2059.

JANQUEIX-YACONO D. *La complexité de la pollution atmosphérique*, Cahier de géographie physique de l'USTL n° 9, 1993, 3-31.

LAJOIE G. *Le carroyage des informations urbaines*, P-U-Rouen, collection Nouvelles données, 1992.

ROUSSEL I. *La circulation automobile en ville : émissions et qualité de l'air*, Hommes et Terres du Nord, n° hors série USTL, 1993, 107-120.

SANDERS L. *L'analyse statistique de données en géographie*, GIP RECLUS Montpellier, 1990.

SAWARAGI Y., SOEDA T., TAMUR H., YOSHIMURA T., OHE S., CHUJO Y., ISHIHARA H. *Statistical Prediction of air pollution levels using non-physical models*, Pergamon Press, AUTOMATICA, Vol. 15, 1979, 441-451.

SLAMANI Y. *Etude comparative de différents modèles mathématiques pour la prédiction des niveaux de pollution atmosphérique*, Thèse de l'Université de Caen, 1988.

Pour plus d'informations...

Page personnelle sur le Net : <http://www.univ-lemans.fr/~trouve>.