

POLLUTION EN OZONE EN BOURGOGNE ORIENTALE

Y. RICHARD⁽¹⁾, M.-L. HOUZE⁽¹⁾, J.-P. CHABIN⁽¹⁾ et D. THEVENIN⁽²⁾

(1) Centre de Recherches de Climatologie, CNRS – Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon – France. Tel 03 80 39 38 22, Fax 03 80 39 57 41, E-mail : yrichard@u-bourgogne.fr

(2) METEO-FRANCE, CDM de la Côte-d'Or, 22-24 rue Louis de Broglie, 21000 Dijon – France. Tél. : 03 80 72 92 16, Fax : 03 80 74 19 98, E-mail : denis.thevenin@meteo.fr

Résumé:

En Bourgogne, les concentrations en ozone des étés (avril-septembre) 1998 et 1999 sont mises en relation avec leurs précurseurs azotés et les conditions météorologiques observées à Dijon et Chalon-sur-Saône. Les résultats d'une Analyse en Composantes Principales attestent du lien fort entre beau temps estival, chaud, ensoleillé et sec, et pollution spécifique en ozone. Les épisodes concernés peuvent durer plusieurs jours. Ils sont associés à des vents de nord à est et affectent l'ensemble du territoire. En revanche, une hétérogénéité spatiale est observée la nuit où la destruction d'ozone est maximale à Chalon. En l'absence d'épisodes, les concentrations nocturnes sont en grande partie contrôlées par le vent.

Abstract:

Ozone concentrations in Burgundy, and particularly for the two principal agglomerations, Dijon and Chalon-sur-Saône, are studied on the 1998 and 1999 summers (April-September). A Principal Component Analysis is carried out to examine their relationships with meteorological conditions and nitrogen oxides (NO_x). The episodes are associated with summer warm, dry and sunny weather conditions, which are established during several days when Northerly or Easterly winds prevail. The entire region is affected. Night patterns of ozone are more heterogeneous with a higher chemical destruction in Chalon. Outside episodes, night concentrations are for a large part controlled by the wind.

Mots-clés: Ozone, Bourgogne, Dijon, Chalon-sur-Saône, conditions météorologiques, ACP.

Key-words: Ozone, Burgundy, Dijon, Chalon-sur-Saône, Meteorological conditions, PCA.

Introduction

La Bourgogne n'est pas une région très peuplée (1.500.000 habitants). Son tissu industriel n'est pas très développé. A ce titre les niveaux de pollution ne figurent pas parmi les plus élevés de France. Néanmoins, population et activités sont relativement concentrées dans le val de Saône où elles s'associent à un réseau de circulation d'importance européenne. Ainsi, au regard des normes européennes relatives à l'ozone, considéré comme un « traceur » de la pollution photooxydante (Bavay et Roussel, 1992), les niveaux 1 (110 µg/m³ sur 8h, protection de la santé) et 2 (180 µg/m³ sur 1h, information de la population) peuvent être dépassés (mai et août 1998 par exemple). L'ozone, qui a des effets nocifs sur certaines plantes (tabac, épinards, choux, laitue, luzerne...), contribue au dépérissement des forêts, oxyde certains matériaux (plastiques, peintures...) et affecte la santé humaine (asthme, bronchites...) (Mégie, 1998). En théorie (Académie des sciences, 1993 ; Toupance, 1999), en un lieu donné, les concentra-

tions en ozone, polluant secondaire, dépendent:

- des concentrations des précurseurs chimiques (rapport COVNM/NO_x, en milieu urbain ou pollué (NO_x>5 ppb); NO_x, en milieu rural ou peu pollué) ;
- des conditions météorologiques nécessaires à sa formation (chaleur et rayonnement solaire) ;
- de l'apport d'ozone troposphérique de fond ;
- des puits (réactions avec NO ou précipitations et dépôts humides principalement).

Les études effectuées sur les concentrations d'ozone montrent la fréquence des dépassements en milieu urbain dans les villes d'Europe (Sluyter, 1996). Le lien entre les données de climatologie locale et les niveaux de pollution (Roussel *et al.*, 1997), mais aussi la contribution d'échelle européenne sur laquelle viennent se superposer des effets locaux (Papais *et al.*, 1996) sont avérés. Enfin, la prévalence du contrôle de la production d'ozone dans les basses couches de la troposphère est exercée par les réactions chimiques au sein du système NO_x-O₃ (Minoura, 1999).

Le premier objectif est d'identifier, à l'échelle de la Bourgogne, les concentrations de NO_x et les conditions météorologiques associées aux variations temporelles des concentrations en ozone. Les oxydes d'azote constituent l'un des principaux précurseurs de la pollution photochimique, ils sont mesurés dans toutes les stations des réseaux ATMOSF'air. Les autres précurseurs, CO (monoxyde de carbone) et COVNM (Composés Organiques Volatiles Non Méthaniques), sont peu ou pas mesurés en Bourgogne, ce qui réduit la précision d'éventuelles prévisions de l'ozone (Houzé *et al.*, 2000). Le deuxième objectif est d'analyser les variations spatiales des concentrations entre les différents sites (Morvan, Donon, Mâcon, Le Creusot, Chalon et Dijon), ainsi qu'au sein des deux principales agglomérations (Dijon et Chalon).

1. Données et Méthodes

1.1 Période et saison

Les mesures d'ozone ne forment un ensemble cohérent à Dijon et Chalon que depuis 1998. Pour les années 1998 et 1999, nous avons retenu la saison où la radiation directe est suffisante pour initier fréquemment les réactions chimiques aboutissant à la formation d'ozone: avril-septembre (Nieber, 1976).

1.2 Réseau de mesure et paramètres disponibles retenus

Le paramètre central de l'étude, l'ozone, est mesuré dans 5 stations dijonnaises et 3 stations chalonnaises. On dispose également des séries du Creusot, de Mâcon, du Morvan, ainsi que de celle du Donon (Alsace, données ASPA), soit un ensemble de 12 points de mesures.

Les précurseurs de l'ozone sont intégrés au travers des NO_x = NO+(1.25/1.91) NO₂, où:

- NO et NO₂ sont exprimés μ/m³ ;
- NO_x est exprimé en équivalent NO.

Les NO_x sont disponibles dans 11 des 12 stations (seul le Morvan n'est pas équipé).

Les paramètres météorologiques sont mesurés dans trois stations Météo-France. Nous avons retenu le rayonnement global et la température (nécessaires à la formation de l'ozone), la vitesse et la direction du vent (jouant sur le brassage de l'air, la dispersion ou l'advection d'ozone), ainsi que l'humidité et les précipitations (favorisant les dépôts humides d'ozone). La station d'Ouges représente les conditions météorologiques de Dijon, les stations de Rully (rayonnement global) et de Champforgeuil (autres paramètres) de Chalon-sur-Saône. Selon le paramètre, pour chaque jour, nous sélectionnons les valeurs :

- horaires (direction du vent) ;
- minimales et maximales (ozone) ;
- moyennes (NO_x) ;
- totales (précipitations) ;
- minimales, maximales et moyennes (vitesse du vent, rayonnement global et humidité) ;
- minimales, maximales, moyennes et amplitude (température).

1.3 Données manquantes

Les données chalonnaises et les séries météorologiques sont exemptes de valeurs manquantes. Ce n'est pas le cas des données de qualité de l'air pour l'agglomération dijonnaise, et encore moins des stations de Mâcon, du Creusot et du Morvan (non encore ouvertes au 01/04/1998). Les valeurs manquantes ont été remplacées par des moyennes. Celles-ci ont été calculées sur trois types de variables : minima, moyennes et maxima quotidiens. Cette méthode était la seule envisageable pour intégrer les stations du Morvan, de Mâcon et du Creusot, pour lesquelles nos conclusions seront prudentes. Reconstituer les séries dijonnaises par des régressions multiples était envisageable, mais aurait conduit à augmenter la cohérence spatiale des séries, ce qui allait à l'encontre de notre objectif : l'étude des variations à différentes échelles spatiales.

1.4 Traitements statistiques

Pour mettre en évidence les relations statistiques existant entre variables météorologiques et de qualité de l'air (ozone et précurseurs azotés) nous avons effectué une Analyse en Composantes Principales (ACP) sans rotation, avec matrice des corrélations. Toutes les variables sont retenues, à l'exception de la direction du vent (qualitative). La matrice forme un ensemble de 366 observations (183 jours que multiplie deux ans) et de 59 variables. L'ACP permet d'identifier les caractéristiques majeures des variations spatio-temporelles communes entre ces variables.

Les coordonnées des observations des composantes principales retenues sont ensuite croisées avec les directions du vent mesurées à Dijon-Ouges et Chalon-Champforgeuil dans des tables de contingence. Celles-ci permettent d'identifier les liens entre direction du vent et type de pollution.

2. Résultats

2.1 Identification des types de pollution estivale en Bourgogne

Les tests de Kaiser et de Cattell conduisent à ne retenir que les deux premières Composantes Principales (CP). La CP₁ exprime 30,6% de la variance totale, la CP₂ 16,4% (7,3% pour CP3 et 6,2% pour CP4).

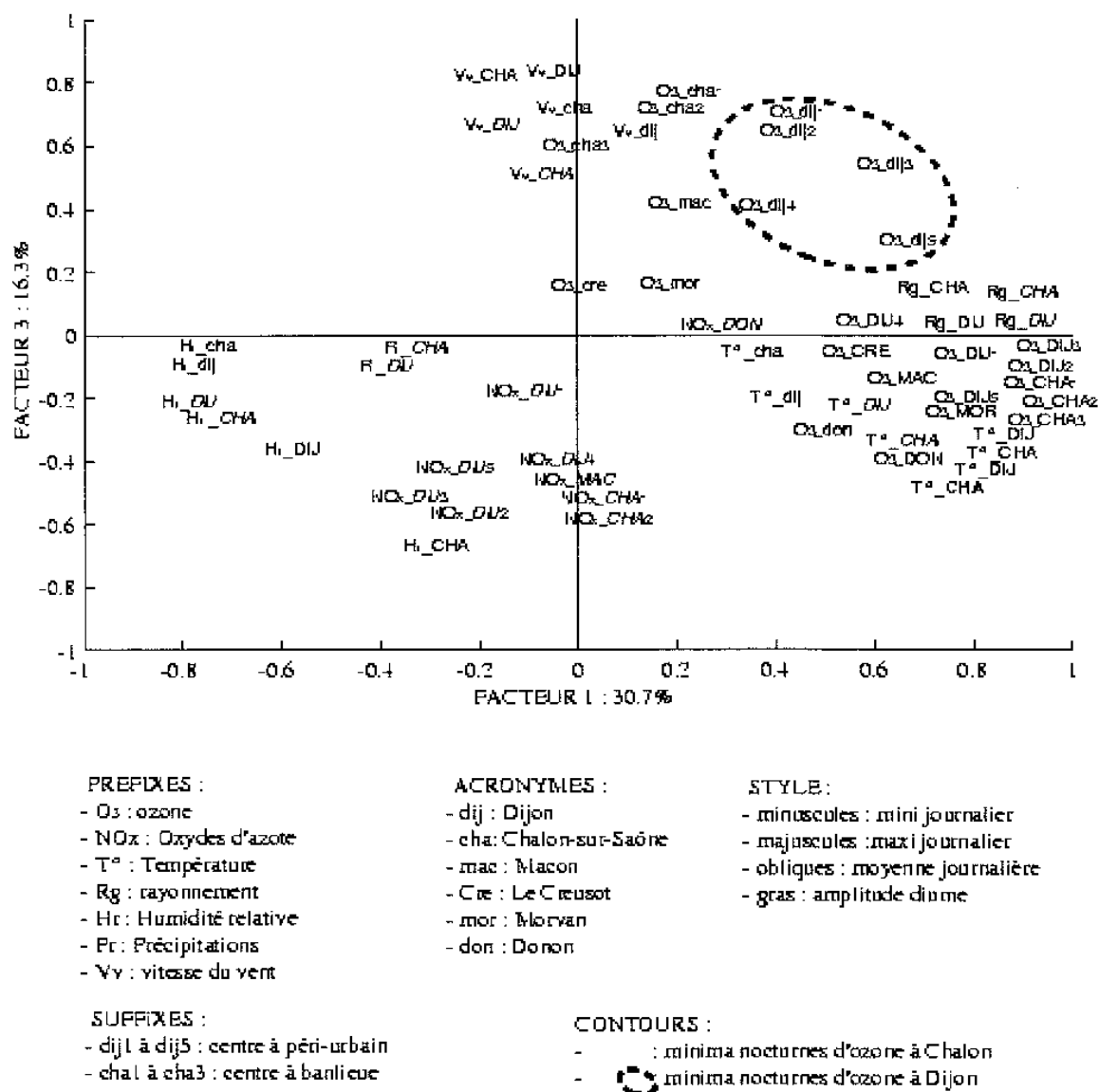


Figure 1: Ozone, précurseurs et conditions météorologiques : premier plan factoriel. Coordonnées des variables sur les deux premières composantes principales

La CP₁ (30,6%) signe l'existence d'une histoire partagée par l'ensemble du territoire bourguignon. Quelle que soit la station et ses caractéristiques (de fond, de proximité, urbaine, périurbaine ou rurale), l'ozone est positivement corrélé avec la température et le rayonnement global (Fig. 1). La corrélation est négative avec l'humidité et les précipitations. L'association entre ozone et temps chaud et ensoleillé est donc primor-

diale. Ce sont les valeurs maximales diurnes d'ozone et de température, ainsi que le rayonnement total de la journée, qui sont les plus concernés (Fig. 1). Les valeurs minimales le sont beaucoup moins, surtout à Chalon-sur-Saône. A noter que les précurseurs (NOx) ne sont pas corrélés avec CP_1 qui décrit donc une pollution spécifique en ozone. Ce type de pollution a principalement été observé en mai et août 1998 (Fig. 2A) mois pendant lesquels deux épisodes relativement longs (une dizaine de jours) sont observés. L'été 1999 ne connut pas de tels épisodes (Fig. 2B). CP_1 décrit une pollution estivale étendue à l'ensemble de la région, pollution diurne spécifique en ozone. Elle permet d'identifier les épisodes d'ozone.

La CP_2 (16,4%) montre des concentrations minimales (nocturnes) d'ozone corrélées positivement avec la vitesse du vent (Fig. 1). Elles s'opposent aux concentrations des NOx et à l'humidité. Ce schéma concerne les stations chalonaises et les stations centrales de Dijon (Pasteur, Tarnier et Balzac). Les stations de banlieue (Marsannay), périurbaines (Daix) ou situées dans de plus petites agglomérations (Mâcon et Le Creusot) sont moins corrélées avec CP_2 . Les stations rurales (Morvan et Donon) ne le sont pas du tout (Fig. 1). Cette décroissance des valeurs sur CP_2 ne semble pas trop affectée par la taille variable des échantillons. Les concentrations nocturnes d'ozone sur les agglomérations furent maximales en mai 1998 (Fig 2C). En dehors de ces épisodes, elles sont observées à de multiples reprises, quel que soit le mois, mais sur des séquences brèves (Fig 2D). CP_2 signe la présence d'ozone nocturne sur les agglomérations.

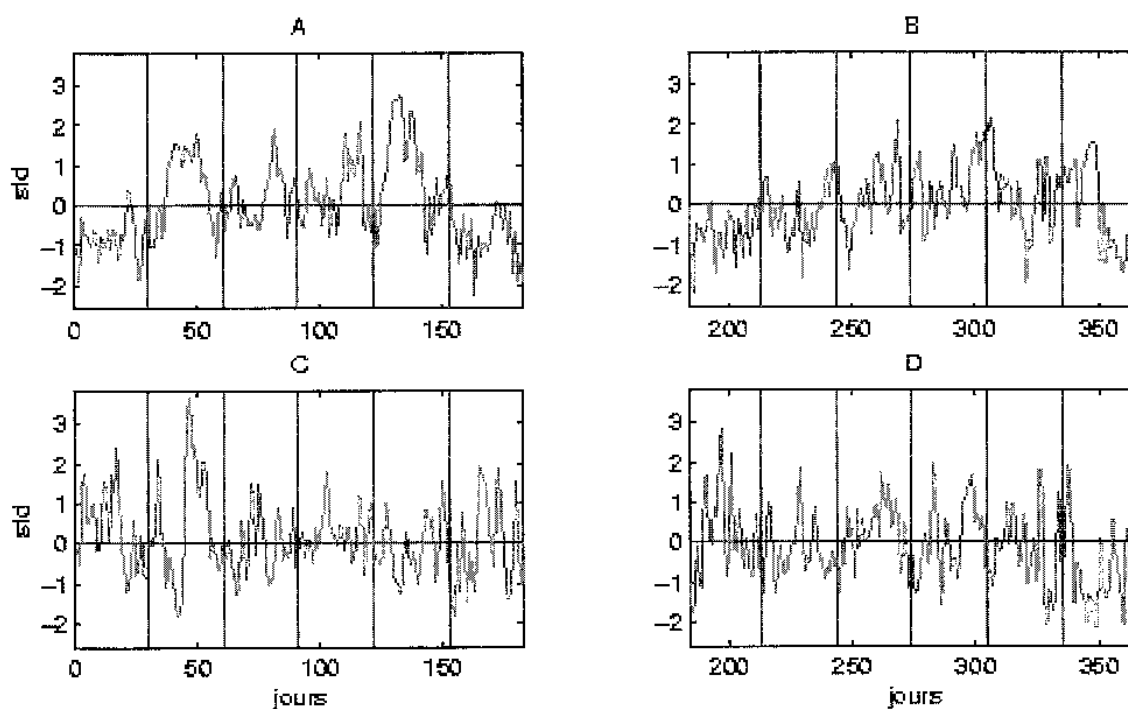


Figure 2: Coordonnées temporelles de CP_1 et CP_2
A et B : CP_1 , C et D : CP_2 , A et C : 1998, B et D : 1999

2.2 Variations spatiales de la pollution en ozone

On peut interpréter CP_2 en termes de niveau d'urbanisation. Les stations sont d'autant mieux corrélées avec CP_2 (négativement pour les NO_x , positivement pour l'ozone nocturne) qu'elles sont dans une grande agglomération et au centre de celle-ci (Fig. 1). Les stations de Chalon-sur-Saône ont une signature aussi urbaine que celles de Dijon (100.000 habitants contre 240.000). Ceci, paradoxal au vu de la population, ne l'est pas en termes d'émissions industrielles : plusieurs industries chalonnaises émettent des NO_x , aucune d'importance à Dijon (Drire, 1999). Ainsi les concentrations nocturnes en NO sont-elles plus élevées à Chalon qu'à Dijon (Fig. 3). A noter que l'altitude interfère également : les stations péri-urbaines (Daix) ou rurales (Morvan et Donon) sont situées relativement en altitude. Or les stations d'altitude sont moins affectées par les inversions thermiques nocturnes propres aux basses couches et enregistrent des valeurs nocturnes d'ozone généralement plus élevées (Bavay et Roussel, 1992 ; Marcoux *et al.*, 1998).

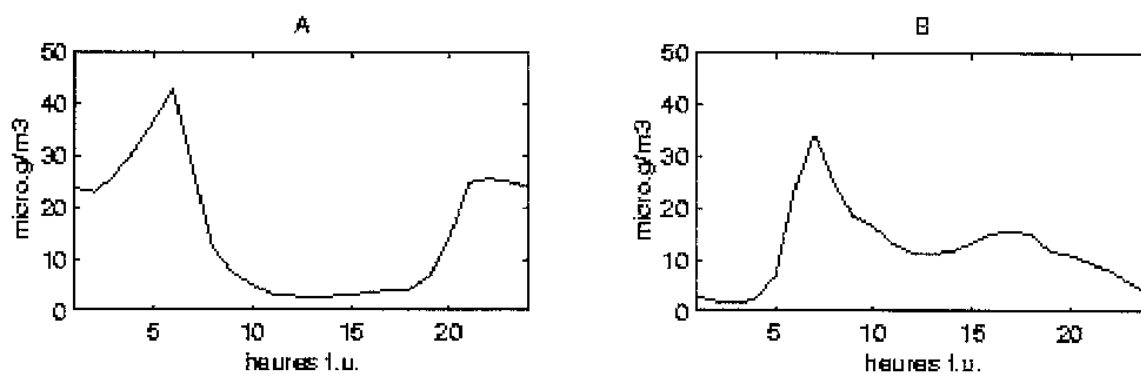


Figure 3: Concentrations horaires moyennes en NO (avril-septembre 1998 et 1999)
 A : Chalon Champforgeuil
 B : Dijon Pasteur.

Cette hypothèse n'en exclue pas une seconde, fondée sur le brassage de l'air dans les basses couches. A défaut de radio-sondage, inexistant entre Lyon et Nancy, l'étude des vents permet d'aborder la question. Lors de l'épisode d'ozone d'août 1998, l'amplitude diurne des concentrations fut supérieure à Chalon-Centre, comparative-ment à Dijon-Pasteur (Fig. 4A). Cela est vrai pour ces deux stations, situées dans les centres-villes des deux agglomérations respectives, mais également pour les autres stations (non montré), et peut être mis en relation avec la vitesse du vent. Sur la quasi totalité des jours, les vents sont moins soutenus à Chalon-sur-Saône qu'à Dijon (Fig. 4B).

Lors des épisodes d'ozone, le vent synoptique est sensiblement le même dans les deux villes (conditions anticycloniques avec flux de nord à est faible ou vent calme). Il est néanmoins un peu plus fort à Dijon, peut être de par la configuration géographique de la plaine de la Saône, resserrée à cette latitude entre le massif de la Serre et le talus de la Côte d'Or (effet Venturi).

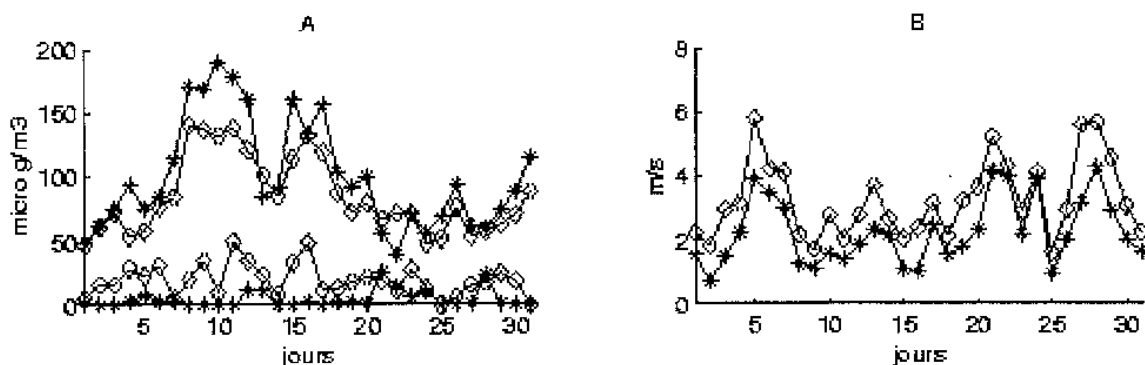


Figure 4: Vitesse du vent et ozone dans les centres-villes de Dijon et de Chalon en août 1998

Astérisx : Chalon-sur-Saône, Losanges : Dijon.

A: Minima et maxima quotidiens d'ozone à Dijon-Pasteur et Chalon-Centre.

B: Vitesse quotidienne moyenne du vent à Dijon-Ouges et Chalon-Champforgeuil.

En dehors des épisodes, en l'absence de vent synoptique advectant de l'ozone sur la Bourgogne, des facteurs locaux expliqueraient les différences entre les sites, comme au sein des agglomérations. Pendant les saisons 98 et 99 la fréquence de vents calmes nocturnes (inférieurs à 2 m/s) est deux fois plus importante à Chalon qu'à Dijon (contre 1,5 fois le jour). A Dijon, située au pied de la Côte, les brises de pente se développent. La nuit, l'air froid descend du plateau bourguignon et de la Côte (vent de nord-ouest dans la nuit). La brise s'inverse la journée avec le réchauffement de la Côte avant la plaine de Saône (vent de sud-est en milieu de matinée). L'organisation et la topographie de la région chalonnaise sont différentes : Côte moins élevée, relief moins homogène et agglomération située à distance de la Côte (10 km environ). En conséquence, le phénomène de brise est moins marqué (Marceau *et al.*, 1994). A Chalon-sur-Saône, la faiblesse des vents diurnes favorise l'accumulation de NO₂ qui réagit pour former de l'ozone. La nuit, cette même faiblesse des vents limite la dispersion du NO (contribuant à la destruction de l'ozone) hors de l'agglomération (Fig. 3), réduit le brassage de l'air et favorise le développement d'inversions de températures (ce qui restreint les apports en ozone depuis les couches supérieures de l'atmosphère). Ainsi les minima nocturnes d'ozone sont-ils plus faibles à Chalon qu'à Dijon (Houzé, 1999).

2.3 Type de pollution et direction du vent

La direction du vent, paramètre qualitatif, n'a pu être intégrée dans l'ACP. Son étude est néanmoins essentielle car la direction peut être mise en relation avec la circulation synoptique et intervenir directement sur les concentrations par advection d'ozone depuis d'autres régions, éventuellement plus polluées. Les directions à Dijon-Ouges et à Chalon-Champforgeuil ont été classées en 4 classes : Nord (entre 320° et 40°), Est (entre 50° et 130°), Sud (entre 140° et 220°) et Ouest (entre 230° et 310°). Les coordonnées des deux premières CP ont été divisées en 5 classes :

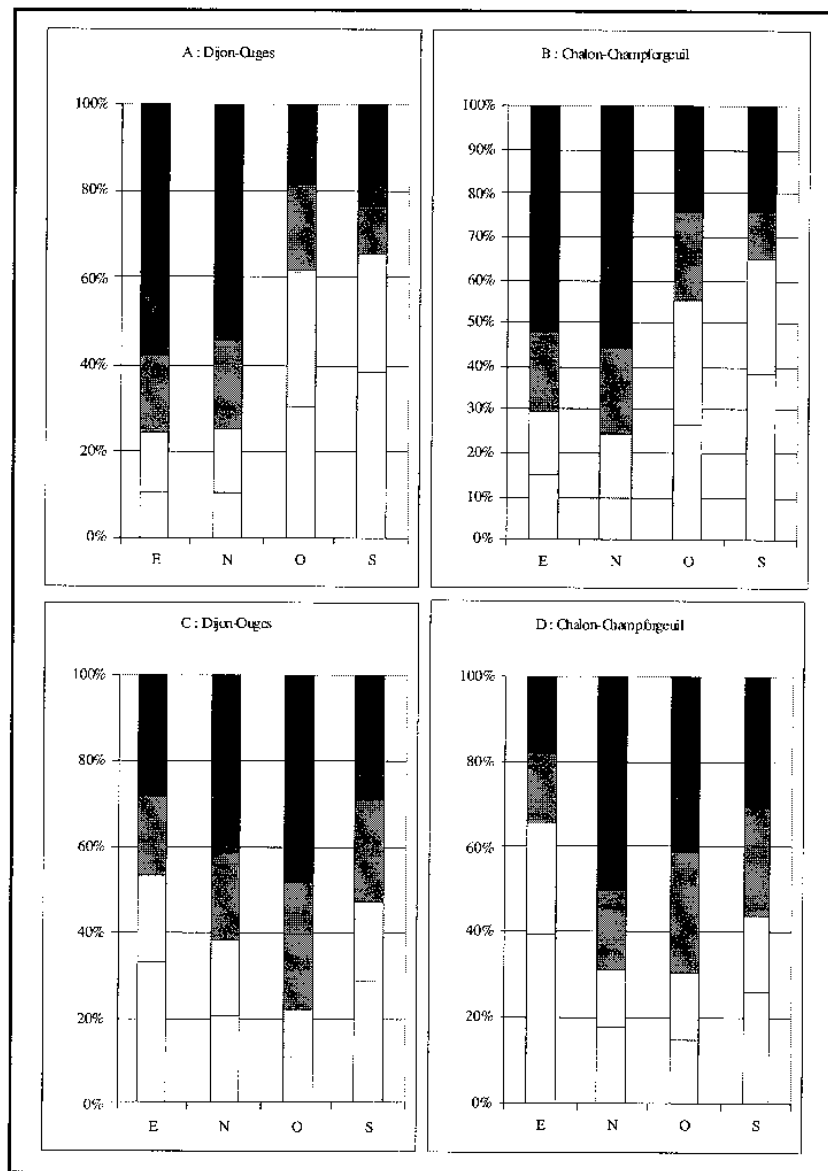


Figure 5: Direction du vent et type de pollution (avril-septembre 1998 et 1999)

A et B : CP₁ (Pollution à l'ozone de beau temps).

C et D : CP₂ (vent et ozone nocturnes sur les agglomérations).

Classe 1 : blanc

Classe 2 : gris clair

Classe 3 : gris moyen

Classe 4 : gris foncé

Classe 5 : noir

-1: [$CP \leq -0.75$], -0.5: [$-0.75 < CP \leq -0.25$], 0: [$-0.25 < CP \leq 0.25$],
0.5: [$0.25 < CP \leq 0.75$] et 1: [$0.75 < CP$].

Pour Dijon et Chalons indépendamment, et pour chacune des directions de vent, sur un jeu de 8518 valeurs (366 jours que multiplie 24 heures), nous avons extrait de la

table de contingences le pourcentage de valeurs affectées à chaque classe élaborée sur CP₁ et CP₂ (Fig. 5).

A Dijon comme à Chalon, les valeurs élevées de CP₁, qui décrit une pollution estivale, diurne, spécifique en ozone et étendue à l'ensemble de la Bourgogne, sont préférentiellement associées à des vents de Nord à Est (Fig. 5A et B). En contrepartie, vents de sud à ouest sont associés à un temps plus humide, moins beau et chaud, et à des valeurs d'ozone plus faibles. A Dijon, les épisodes nocturnes d'ozone observés par temps venté (fortes valeurs sur CP₂) sont essentiellement le fait de vents d'ouest et de nord (Fig. 5C). Il s'agit donc bien de vents qui dispersent le NO, favorisent le brassage vertical de l'atmosphère ou/et advectent de l'ozone depuis les régions rurales. A Chalon-sur-Saône ce sont les vents de Nord qui sont les plus efficaces pour maintenir des concentrations nocturnes d'ozone non négligeables au sein de l'agglomération (Fig. 5D).

Conclusion

En Bourgogne orientale, les temps chauds et ensoleillés, sans précipitation et avec un air sec, favorisent une pollution spécifique en ozone, non associée à des valeurs élevées de NO_x. Les NO_x sont nécessaires à la formation de l'ozone, mais la complexité des réactions au sein du système NO_x-O₃ fait que les pics respectifs sont asynchrones, conformément à ce qui est observé au Japon par exemple (Minoura, 1999). Lors de situations anticycloniques persistantes associées à des vents d'est ou de nord, le niveau 2 (180 µg/m³) peut être dépassé pendant plusieurs jours consécutifs. L'ensemble du territoire est concerné par ces épisodes d'ozone, Côte d'Or et Saône-et-Loire, stations urbaines et rurales. Ces résultats sont cohérents par rapport à ceux obtenus à l'échelle de l'Europe en 1989 (Bavay et Roussel, 1992), ou de la France en 1996 (Papaïs *et al.*, 1996).

La différenciation spatiale, entre les agglomérations comme au sein de chacune d'entre elles, intervient préférentiellement la nuit. Les valeurs nocturnes sont faibles, donc moins étudiées, elles permettent néanmoins de mieux comprendre certains phénomènes. Ainsi le rôle de la vitesse du vent est-il mis en évidence, limitant par brassage le développement de la couche d'inversion de rayonnement ou/et advectant de l'ozone sur les centres-villes la nuit. A Dijon, le lien entre vitesse du vent et concentrations nocturnes d'ozone permet de définir un gradient centre-périphérie : Pasteur, Tarnier, Balzac, Marsannay, Daix. A Chalon-sur-Saône toutes les stations fonctionnent comme des stations urbaines. L'agglomération a un comportement plus urbain que Dijon, avec des concentrations nocturnes de NO plus élevées et d'ozone plus faibles, dues pour partie à des vents moins soutenus et traduisant le caractère plus industriel de la ville.

Remerciements

Hélène Pannecière, Observatoire Régional de l'Environnement de Bourgogne, pour les informations relatives aux émissions NO_x.

Bibliographie

- ACADEMIE DES SCIENCES, 1993 : *Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère*. Coll. Tec&Doc., **30**, Paris, 253p.
- BAVAY R., ROUSSEL I., 1992 : Conditions atmosphériques et pollution photo-oxydante en Europe du Nord-Ouest : exemple de l'été 1989, *Pollution Atmosphérique*, **135**, 36-49.
- DRIRE Bourgogne, 1999 : *Elaboration du plan régional de la qualité de l'air en Bourgogne*. Dijon, 97p.
- HOUZE M.-L., 1999 : *Concentrations en ozone dans les agglomérations dijonnaise et chalonnaise et conditions météorologiques*. Mémoire de maîtrise de Géographie, Université de Bourgogne, Dijon, 67p.
- HOUZE M.L., 2000 : *Prévisibilité des concentrations en ozone sur les agglomérations dijonnaise et chalonnaise*. Mémoire de DEA, Université de Bourgogne, Dijon, 49p.
- MARCEAU J., TABOULOT S., AUBERT J.-C., 1994 : *Atlas climatique de la Côte d'Or*. Météo-France, Conseil Général de la Côte d'Or, 127p.
- MARCOUX N., TESSIER L., BEGIN Y., 1998 : Répartition estivale du dioxyde d'azote et de l'ozone dans une vallée alpine, Chamonix, France. *Géographie Physique et Quaternaire*, sous presse.
- MEGIE G., 1998 : Les modifications chimiques de l'atmosphère et leurs effets sur l'environnement. *Pollution Atmosphérique*, **117**, 5-42.
- MINOURA H., 1999 : Some characteristics of surface ozone concentrations observed in an urban atmosphere. *Atmospheric Research*, **51**, 153-169.
- NIEBER H., 1976 : The effect of latitude to the potential formation of photochemical smog. *Atmospheric Environment*, **10**, 730-733.
- PAPAI S., FONTAN J., LASSERRE-BIGORRY A., PONT V., 1998 : Analyse de la pollution photochimique en France pendant l'année 1996. *Pollution Atmosphérique*, juillet-septembre, 82-93.
- ROUSSEL I., ROUCHOUSE S., BATTON-HUBERT M., 1997 : Pollution atmosphérique urbain et climat local : l'exemple de l'agglomération stéphanoise en 1997, *Revue de Géographie de Lyon*, **72**, 315-321.
- SLUYTER R., 1996 : La pollution atmosphérique dans les villes d'Europe. *Bulletin de l'OMM*, **45**, 2, 140-145.
- TOUPANCE G., 1999 : L'ozone dans la basse troposphère : théorie et pratique. *Pollution atmosphérique*, **117**, 32-42.