

Analyse descriptive du comportement de l'ozone sur l'Arc Atlantique

Descriptive analysis of the ozone behaviour on the Atlantic Arc

Vladislav NAVEL*, Alain GAZEAU*, Fabrice CAÏNI*,
Magali CORRON**, Cyril BESSEYRE**, Luc LAVRILLEUX***, Arnaud REBOURS***,
François DUCROZ***, Frédéric PENVEN***, Patrick BOURQUIN****, Florence PERON****, Laurent CHAIX****

Résumé

Le comportement de l'ozone moyen a fait l'objet d'une investigation approfondie sur l'ensemble du territoire français. Cette analyse s'est appuyée sur les données de mesures d'ozone collectées par le réseau français de surveillance de la qualité de l'air (Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air : AASQA) entre 2000 et 2004. Cette étude a mis en évidence un comportement spécifique de l'ozone au-dessus de l'arc atlantique.

Afin de déterminer les caractéristiques du comportement de l'ozone au-dessus de l'arc atlantique, quatre AASQA (Air Breizh, Air Pays de la Loire, ATMO Poitou-Charentes et AIRAQ) ont mis en place une campagne de mesures au sol pendant l'été en 2005 (EOLIA : « Étude de l'ozone sur le littoral atlantique »). L'objectif de la campagne était de mesurer les concentrations sur une bande de 20 kilomètres de large le long de l'arc atlantique. À l'intérieur de cette bande littorale, seize stations temporaires ont été installées du mois de juin au mois de septembre 2005. Les stations ont été placées environ tous les cinq kilomètres le long de plusieurs transects (alignements perpendiculaires à la côte) afin d'étudier l'évolution des concentrations au sol en ozone. Cette mesure au sol a été complétée par des mesures LIDAR (*light detection and ranging*) pour mesurer la structure verticale du champ d'ozone. Les résultats des mesures LIDAR ne sont pas présentés dans cet article.

L'analyse des données produites a permis de mettre en évidence le comportement spatial de l'ozone. Ce comportement a été traduit à l'aide d'une classification décrivant le profil spatial de l'ozone dans la bande littorale. Cette classification repose sur la définition de trois zones à l'intérieur desquelles le comportement de l'ozone est homogène. Les trois zones correspondent aux définitions géographiques : océanique, continentale et intermédiaire. Les stations implantées sur les îles constituent la première zone, les stations continentales la deuxième zone et les stations à l'intérieur de la bande littorale la dernière zone.

La classification contient deux niveaux. Le premier compare les concentrations d'ozone entre les zones continentales et océaniques et le second compare les concentrations d'ozone entre la zone intermédiaire et les deux autres. L'agrégation des deux niveaux mène à la définition de neuf classes (les quatre classes principales sont présentées dans l'article).

Pour chaque classe, un profil spatial spécifique est observé. Quelle que soit la classe considérée, une discontinuité dans le profil spatial apparaît au niveau de la zone intermédiaire. Pour une classe donnée, la discontinuité est observée sur tout l'arc atlantique.

Mots clés

Comportement de l'ozone. Littoral atlantique. Surveillance de la qualité de l'air.

* ATMO Poitou-Charentes – rue Fresnel, ZI de Périgny/La Rochelle – 17184 Périgny Cedex. Tél. : 05 46 44 83 88.

** AIR Breizh – 28, rue des Veyettes – 35000 Rennes. Tél. : 02 23 20 90 90.

*** AIR Pays de la Loire – 2, rue Alfred Kastler, BP 30723 – 44307 Nantes. Tél. : 02 51 85 80 83.

**** AIRAQ – Parc d'activités Chemin Long 13, allée James Watt – 33692 Mérignac Cedex. Tél. : 05 56 24 35 30.

Abstract

The analysis of ozone behaviour over the French territory was realised. This analysis was based on ozone measurement databases managed by the French national ozone monitoring network (*"Associations de Surveillance de la Qualité de l'Air"*) from 2000 to 2004. This study highlighted a specific ozone behaviour over the Atlantic Arc.

In order to determine the characteristics of the ozone behaviour over the Atlantic Arc, four air quality monitoring associations (*Air Breizh, Air Pays de la Loire, ATMO Poitou-Charentes and AIRAQ*) set a serie of ground measurements during the summer in 2005 (*EOLIA : "Étude de l'Ozone sur le Littoral Atlantique"*). The serie of measurements focused on a twenty kilometers wide band along the Atlantic littoral. Inside this littoral band, sixteen temporary sites were established from June to September. The sites were laid out every five kilometers along several transects (alignments perpendicular to the coast) in order to study the evolution of ground ozone concentrations. In addition, two ozone monitoring sites were completed with LIDAR measurement (Light Detection And Radar) to record the vertical structure of the ozone field. Results of LIDAR measurement are not presented in this article.

Datas produced were analysed and a spatial behaviour was found for ozone ground concentrations. This analysis led to the definition of a classification that gives the spatial profile of ozone concentrations inside the littoral band. This classification is based on three areas inside which the ozone behaviour is homogeneous. The three areas correspond to a geographical repartition : oceanic, continental and intermediate. Sites on island constitute the first area, continental sites constitute the second area and sites inside the twenty kilometers wide littoral band constitute the last area.

Two levels define the classification, the first one compares ozone concentrations between oceanic and continental areas, and the second one compares ozone concentrations between the intermediate area and the two others. The aggregation of the two levels leads to the definition of nine classes (the main four classes are presented in the article).

A specific spatial profile is observed for each class. Whatever is the class considered, a break in the spatial profile appears in the intermediate area. Considering the same class along the Atlantic coast, the break remains similar. In other words, a disturbance in the spatial profile of the ozone concentrations exists over the littoral band. This disturbance depends only on the global spatial behaviour of ozone concentrations and seems to be identical on the whole Atlantic Arc.

Keywords

Ozone behaviour. Atlantic littoral. Air quality monitoring.

1. Introduction et objectifs

L'ozone est un polluant qui peut migrer sous l'action des vents et dont les concentrations peuvent fortement varier en fonction des conditions météorologiques locales. Cette influence locale a été mise en évidence notamment en zone littorale sur le bassin athénien [1, 2, 3]. Les zones littorales sont caractérisées entre autres par la formation de cellules maritime (brises de mer, brises de terre) qui peuvent conduire à l'apparition de pics de pollution [4]. La complexité de l'apparition de ce phénomène qui dépend aussi bien des conditions météorologiques [5] que de la structure topographique locale [6, 7] a pour conséquence une complexité dans le comportement de l'ozone sur ces zones.

Face à ces constatations, les quatre réseaux de surveillance de la qualité de l'air de la façade atlantique (*Air Breizh, Air Pays de la Loire, Atmo Poitou-Charentes, AIRAQ Atmo Aquitaine*) ont essayé de comprendre l'existence d'une différence du comportement de l'ozone sur le littoral atlantique et de son impact en terme d'exposition.

Cet article vise donc à documenter le comportement de l'ozone sur le littoral atlantique en s'appuyant sur les données collectées au sol pendant la campagne de mesures. La démarche « descriptive » adoptée ici n'intègre pas de variables explicatives, qui seront prises en compte dans la seconde phase d'exploitation.

L'ensemble des mesures réalisées par les AASQA en station fixe est archivé dans la banque de données de la qualité de l'air de l'ADEME. L'extraction des concentrations d'ozone de cette base de données permet d'obtenir 1 770 médianes annuelles valides (75 % des valeurs horaires validées) réparties sur 465 stations en France (Figure 1) pour les années 2000 à 2004.

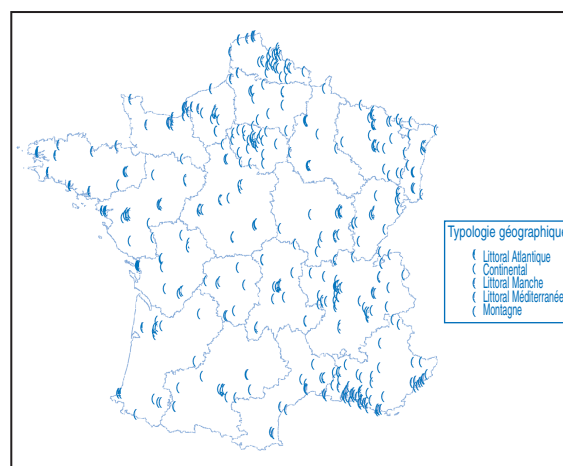


Figure 1.

Répartition spatiale des stations de mesures en France.
Spatial distribution of the French air quality monitoring network.

Les 465 stations concernées ont été réparties en trois groupes selon des critères géographiques afin de déterminer si les stations implantées dans une zone littorale présentaient quelques spécificités. Les trois groupes obtenus sont les suivants :

- stations littorales (implantées à moins de 20 km d'une côte, 356 valeurs disponibles) ;
- stations montagneuses (situées à une altitude supérieure à 250 m, 399 valeurs disponibles) ;
- stations continentales (n'entrant pas dans les deux groupes précédents, 1 015 valeurs disponibles).

L'application du test de Student sur la moyenne des médianes de chacun de ces groupes (respectivement 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) indique que les différences observées sont significatives. Ainsi, les niveaux moyens d'ozone sont plus importants sur la bande littorale.

En comparant la distribution des médianes (Figure 2) selon les trois groupes définis précédemment, il apparaît que les médianes annuelles en zone littorale sont moins dispersées que pour les deux autres catégories. De plus, la répartition des médianes littorales présente une dissymétrie vers les faibles valeurs, celle des médianes montagneuses présentent une dissymétrie vers les fortes valeurs et celle des médianes continentales présente une distribution normale.

Ces observations confirment que les concentrations sur des zones littorales ont un comportement spécifique à ces zones.

Il est possible de subdiviser le groupe des stations littorales en trois sous-groupes afin de déterminer s'il existe des différences entre les différents littoraux français. Les trois groupes obtenus sont :

- stations du littoral atlantique (67 valeurs disponibles) ;

- stations du littoral méditerranéen (212 valeurs disponibles) ;

- stations du littoral de la Manche et de la mer du Nord (94 valeurs disponibles).

Les histogrammes (Figure 3) indiquent des différences de comportement significatives entre les trois littoraux français. La zone atlantique présente une plus faible dispersion des niveaux annuels médians d'ozone et est caractérisée, avec la zone Manche/mer du Nord, par une dissymétrie de distribution à la faveur des niveaux faibles. Une rupture est observée au niveau de la classe 60-65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ce phénomène est plus marqué sur le littoral atlantique avec un faible écart-type.

Les concentrations d'ozone en bordure littorale présentent donc des différences de comportement par rapport aux autres zones, mais il existe des disparités de comportement au sein même de cette catégorie. **L'ozone sur le littoral atlantique possède un niveau médian différent des deux autres zones avec une plus grande stabilité.**

Une étude similaire, basée sur le centile 98 (qui traduit les effets de pointes), ne permet pas de dégager de différences significatives entre les zones géographiques. Toutefois, une analyse plus fine des données (exploitant les données horaires et non plus les centiles 98) semble montrer que hors épisodes de brises exceptionnels, les concentrations maximales sont plus faibles en bordure littorale qu'à l'intérieur des terres. La proximité de l'océan impliquerait que les concentrations d'ozone sont plus faibles lors des épisodes généralisés de pollution à l'ozone.

Contrairement aux travaux menés dans le cadre ESCOMPTE, la campagne EOLIA ne se focalise pas sur des épisodes de pollutions photochimiques, mais a pour objectif de documenter le comportement des niveaux de fond de l'ozone.

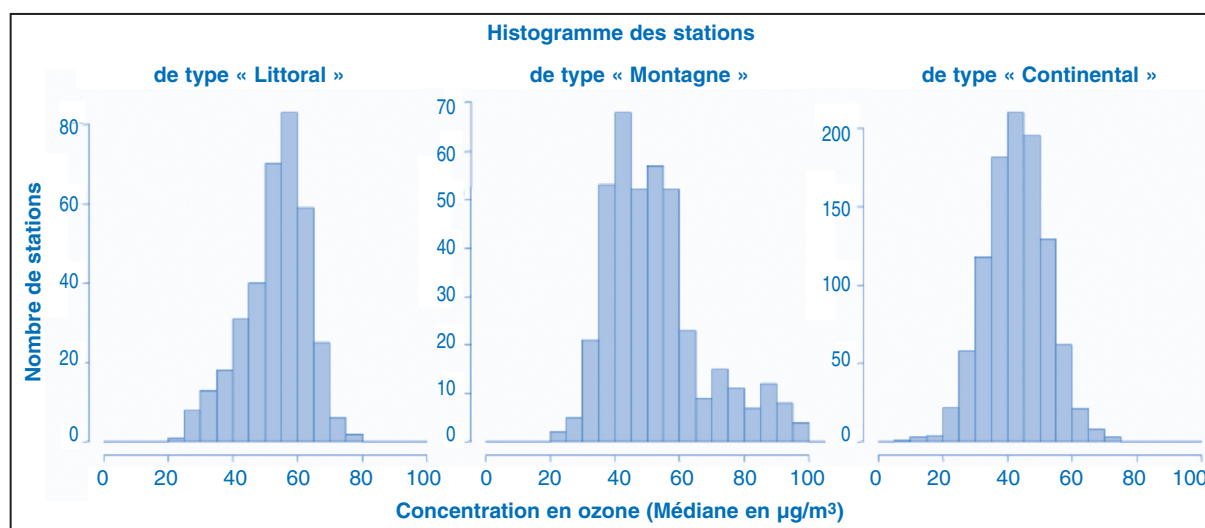


Figure 2.

Répartitions des médianes annuelles de concentrations d'ozone selon le type géographique.

Distribution of the annual medians of ozone concentrations grouped by geographical typology.

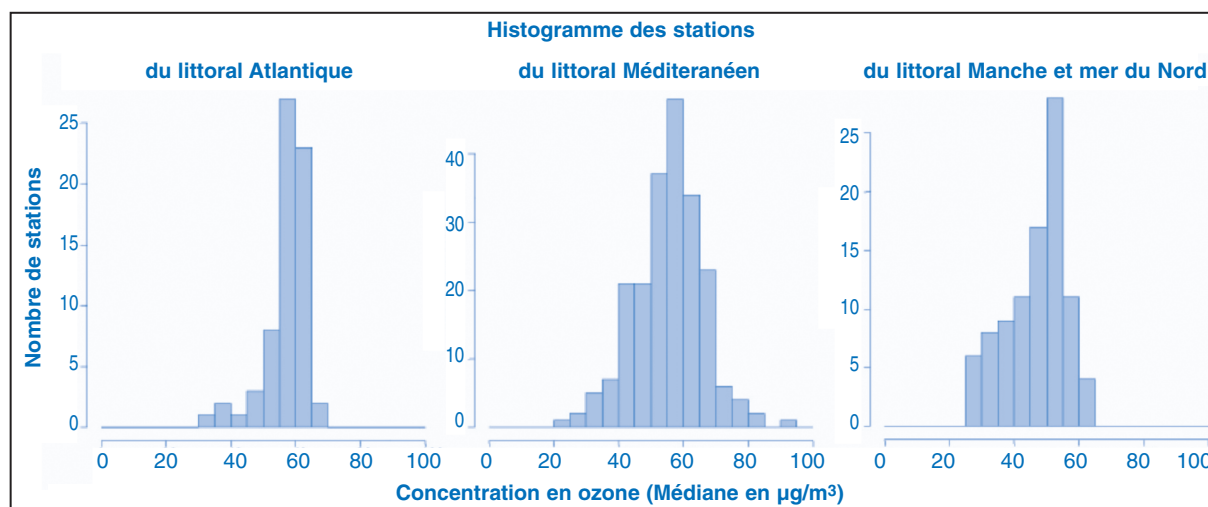


Figure 3.

Répartitions des médianes annuelles de concentrations d'ozone selon le littoral.
Distribution of the annual medians of ozone concentrations grouped by littoral area.

Au-delà d'une simple description du phénomène, les objectifs de cette étude s'intègrent dans un cadre plus général visant :

- à évaluer les modèles photochimiques disponibles sur la zone d'étude (CHIMERE National, MOCAGE, CHIMERE Régional sur la région Pays de la Loire) ;
- à identifier les paramètres pouvant améliorer leurs performances ;
- à quantifier les « entrants » photochimiques.

2. Dispositif de mesures déployé

EOLIA a pour but de documenter de la façon la plus complète possible le comportement de l'ozone à l'interface terre/mer sur l'ensemble du littoral atlantique. Le dispositif de mesure a été dimensionné pour faire ressortir aussi bien les phénomènes globaux (caractérisation des entrants photochimiques) que les particularités locales (perturbation du comportement de l'ozone à proximité de l'interface terre/mer). Un maillage géographique du littoral a ainsi été réalisé sur les quatre régions de la façade Ouest.

Dans chaque région, la mise en place et le suivi spécifique des mesures ont été pris en charge par les quatre AASQA chargées de la surveillance de la qualité de l'air des territoires correspondants. Cette répartition met à profit la connaissance des spécificités locales des AASQA pour que le dispositif le mieux adapté soit mis en place.

Cette collaboration interrégionale permet ainsi, par la mise en commun de moyens techniques adaptés, de couvrir au mieux un large territoire de l'île d'Ouessant au littoral aquitain.

2.1. Mise en place de transects sur le littoral atlantique

L'objectif premier du dispositif de mesure installé pendant la campagne EOLIA a été de documenter l'impact du littoral sur l'évolution des concentrations

d'ozone. Pour cette raison, les analyseurs d'ozone ont été disposés en « transects » le long de la côte atlantique : les sites ont été choisis de manière à former des alignements perpendiculaires à la côte.

EOLIA visant à observer l'impact pur du littoral sur le comportement de l'ozone, le choix des sites de mesures a été soumis à un critère de ruralité. Ce critère a permis de s'affranchir de l'action des précurseurs anthropiques locaux sur la physico-chimie du phénomène.

Au total, seize stations mobiles de mesures ont été déployées (Figure 4) et ont permis la réalisation de quatre transects ruraux (un par région). Les mesures ont été réalisées de juin à septembre 2005. Afin de compléter les transects, six stations fixes de mesures ont également été prises en compte dans le dispositif. Les sites de mesures ont été choisis pour respecter les critères d'implantation d'une station de type « rural » comme définis dans le guide de l'ADEME. Le caractère rural de certains sites nécessitait d'être confirmé. Cette validation a été réalisée en assurant, en plus de la mesure d'ozone, la mesure des oxydes d'azote.

L'implantation de chaque transect a été définie de manière à disposer, dans la mesure du possible, d'un site en zone océanique, c'est-à-dire sur une île au large de la côte atlantique. Afin de renseigner le comportement de l'ozone sur le littoral, les autres sites ont été répartis sur une bande de vingt kilomètres de large avec un espacement d'environ cinq kilomètres entre chaque site d'un même transect.

Afin d'assurer une cohérence métrologique, une comparaison des modes opératoires des différentes AASQA a été faite. De plus, les quatre AASQA impliquées dans EOLIA sont raccordées à la chaîne nationale d'étalonnage.

En plus des quatre principaux transects, deux transects supplémentaires ont été intégrés au dispositif en ajoutant une station mobile sur Belle-Île. Ces deux transects ne répondent pas aux critères de

ruralité ; ils ont néanmoins été réalisés pour fixer les limites à l'intérieur desquelles les conclusions obtenues sur les transects ruraux pourront être appliquées aux zones côtières urbanisées.

Afin de disposer d'informations complémentaires, les résultats de mesure d'ozone issus des stations permanentes des quatre réseaux ont été ajoutées aux données collectées pendant la campagne EOLIA. En plus de ces concentrations, des informations météorologiques provenant de stations de mesure des quatre AASQA, mais également de Météo-France ont constitué la partie météorologique de la base de données créée dans le cadre de ce programme. Les données météorologiques renseignées sont principalement les directions et vitesses de vents au sol.

Le transect implanté en Poitou-Charentes a fait l'objet de mesures complémentaires visant à documenter la structure verticale du champ d'ozone. Ces

mesures, financées par l'ADEME, ont été réalisées à l'aide de deux LIDAR installés sur les sites PC_0 et PC_3 en collaboration avec l'INERIS. Les résultats de ces mesures sont en cours d'interprétation, ils ne sont donc pas présentés dans cet article.

3. Mise en évidence de l'hétérogénéité des concentrations d'ozone au niveau du littoral

Dans l'introduction, il a été mis en évidence que l'ozone présentait un comportement particulier sur la bande littorale atlantique par rapport aux autres zones géographiques (continentale et montagneuse). La mise en place d'un réseau de mesure temporaire selon des transects a permis d'étudier le comportement de l'ozone le long de ces transects. Les principaux résultats des mesures sur les transects ruraux sont présentés ici.

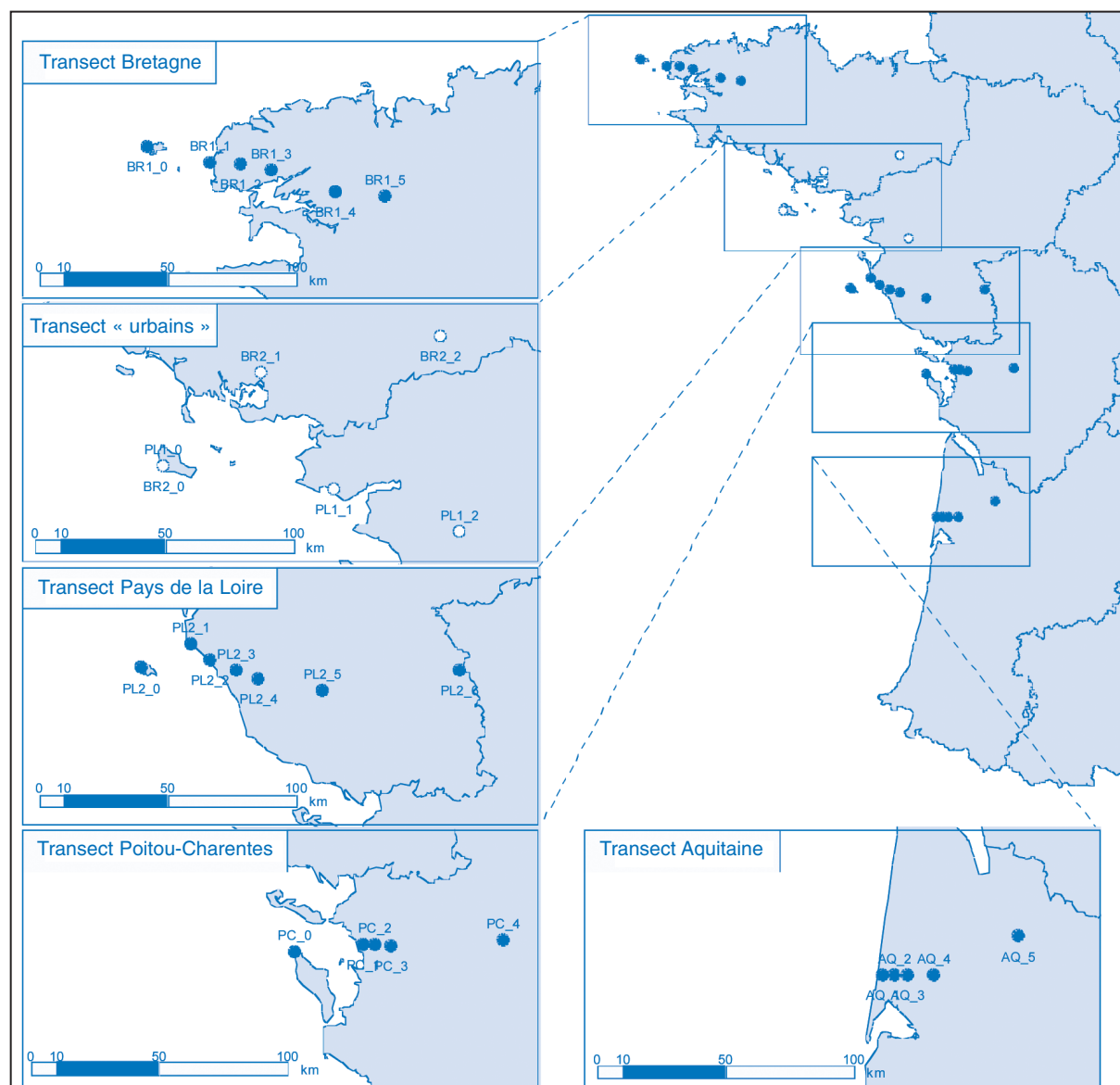


Figure 4.

Implantations des sites formant les transects.

Localization of the sites of measurement for each transect.

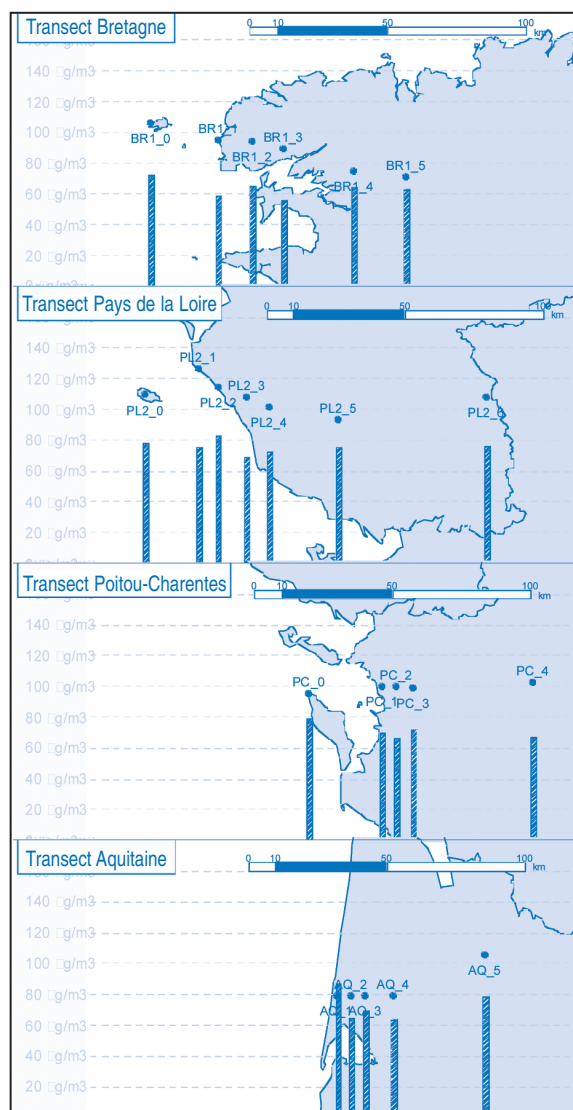


Figure 5.
Concentrations moyennes sur les sites de mesures.
Average ozone concentrations.

3.1. Évolution des concentrations le long des transects

Les sites pris en compte dans la comparaison qui suit sont les sites formant les transects ruraux. Sur l'ensemble de la campagne, la concentration moyenne la plus élevée est relevée sur le site AQ_1 (Figure 5) avec 86,4 µg/m³. Sur les trois autres transects, les concentrations moyennes maximales sont retrouvées sur les sites océaniques BR1_0, PL2_0, PC_0 (les îles respectivement de Ouessant, Yeu et Oléron avec 71,9 µg/m³, 77,8 µg/m³ et 78,7 µg/m³).

Le long de chacun des quatre transects, il apparaît une brusque diminution des concentrations d'ozone :

- BR1_1 pour le transect de Bretagne ;
- PL2_2 et PL2_3 pour le transect des Pays de la Loire ;
- PC_2 pour le transect de Poitou-Charentes ;
- AQ_2 pour le transect d'Aquitaine.

La brusque diminution des concentrations traduit l'existence d'une zone de transition entre, d'un côté un comportement d'ozone homogène sur les sites insulaires, et de l'autre un comportement homogène à l'intérieur des terres. Les évolutions des concentrations d'ozone sur les sites insulaires des différents transects sont comparées entre elles afin de caractériser les similitudes du comportement de l'ozone sur ces sites. En raison de la spécificité de la zone de transition, les sites lui appartenant font également l'objet d'une comparaison.

3.2. Comparaison des sites insulaires

Pour la comparaison des sites insulaires, les données obtenues sur le site de Belle-Île (BR2_0) ont été utilisées. Ce site répond au critère de ruralité.

L'évolution des concentrations d'ozone sur les sites BR2_0, PL2_0 et PC_0 est fortement similaire (Figure 6). En revanche, les concentrations d'ozone sur le site BR1_0 présentent des différences de comportement.

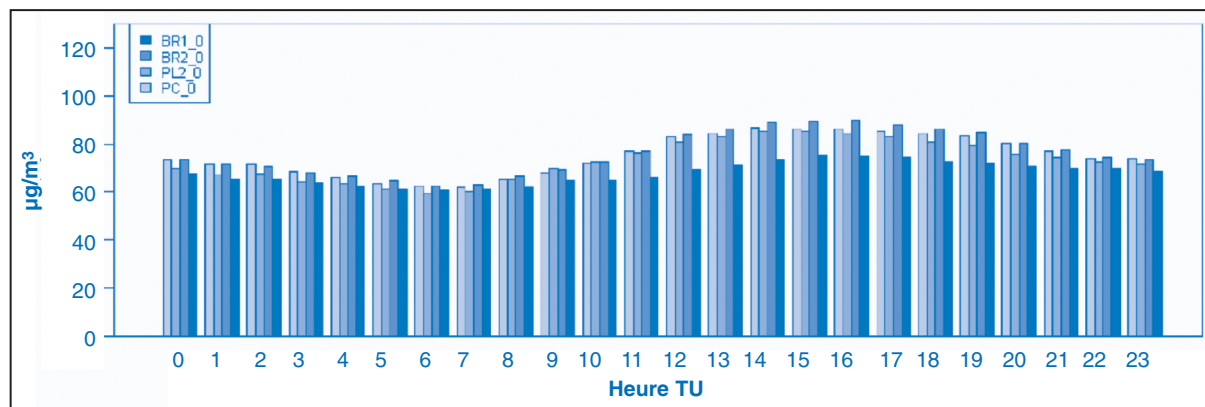


Figure 6.
Profil moyen journalier des concentrations d'ozone sur les sites insulaires.
Daily profile of the ozone concentrations on the insular sites.

Le site BR1_0 est caractérisé par une amplitude des concentrations plus faibles en moyenne sur la journée.

Ces évolutions montrent qu'au large de la côte atlantique, l'ozone a un comportement similaire sur une large zone allant au moins de Belle-Île jusqu'à l'Île d'Oléron. L'absence d'un site insulaire ne permet pas d'étendre cette zone jusqu'en Aquitaine. Les concentrations en ozone évoluent dans une gamme plus restreinte de valeurs au niveau de la pointe bretonne.

3.3. Comparaison des sites de la zone de transition

Les sites littoraux ont été, pour chaque transect, implantés à quelques mètres de l'océan. La comparaison de l'évolution journalière des concentrations d'ozone sur ces sites (Figure 7) montre une forte similitude pour les transects des Pays de la Loire et de Poitou-Charentes.

La comparaison de l'évolution journalière des concentrations d'ozone sur les sites situés à environ

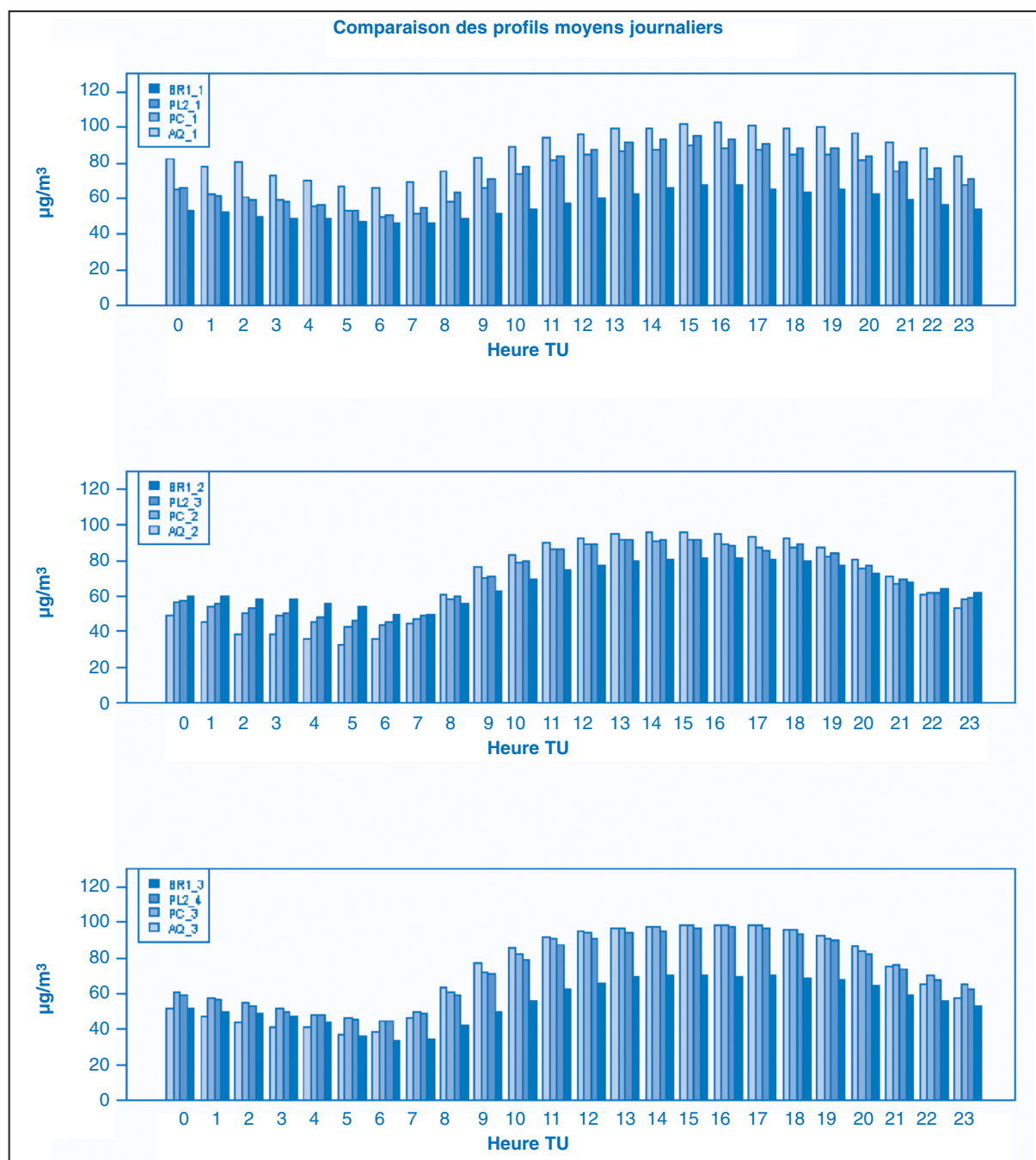


Figure 7.
Profil journalier des concentrations d'ozone sur les sites littoraux.
Daily profile of the ozone concentrations on the littoral sites.

cinq kilomètres puis dix kilomètres de la côte montre que l'homogénéité de cette évolution croît avec la distance à la côte pour les transects des Pays de la Loire, de Poitou-Charentes et d'Aquitaine.

Bien que moins marquée, cette tendance à l'homogénéisation semble similaire sur le transect de Bretagne. Le site BR1_3 était potentiellement influencé par les émissions de l'agglomération de Brest. Les concentrations mesurées sur ce site ne permettent donc pas de confirmer la tendance d'homogénéisation.

3.4 Premières constatations

L'approche préliminaire présentée ci-dessus a permis de mettre en avant plusieurs conclusions intermédiaires. Les sites insulaires se distinguent des autres sites par une moyenne plus élevée et un écart-type plus faible que les autres sites du même transect. Les sites se trouvant sur la bande littorale présentent quant à eux des spécificités qui correspondent à une zone de transition entre le comportement de l'ozone sur les sites insulaires d'une part et les sites implantés à l'intérieur des terres d'autre part.

4. Étude de classification des niveaux d'ozone le long des transects

L'étude préliminaire présentée dans la partie 3 a mis en évidence l'existence de trois zones distinctes. La délimitation de ces trois zones a été confortée par différents tests statistiques appliqués aux mesures recueillies. Les trois zones définies concernent les quatre transects ruraux et sont la zone océanique, la zone intermédiaire et la zone continentale (Figure 8). Afin de décrire de façon pertinente le comportement de l'ozone entre les trois zones, une méthodologie de classification a été mise au point. Elle permet de comparer synthétiquement les niveaux d'ozone entre chacune des zones.

La méthode développée a pour objectif de mettre en évidence des comportements communs de l'ozone sur le littoral atlantique entre les trois zones. L'absence de site insulaire sur le transect aquitain, ainsi que le comportement fortement atypique du site AQ_1 (littoral) montrent que ce transect nécessite une analyse distincte. Pour cette raison, la méthode de classification liée à ce transect n'est pas présentée dans cet article.

Figure 8.

Répartition des sites selon les trois zones.

Sites of measurement classified in the three areas.

Transect	Zone océanique	Zone intermédiaire	Zone continentale
BR1	BR1_0	BR1_1, BR1_2	BR1_4, BR1_5
PL2	PL2_0	PL2_1, PL2_3, PL2_4	PL2_5, PL2_6
PC	PC_0	PC_1, PC_2, PC_3	PC_4

4.1 Présentation de la méthode de classification

La classification développée dans le cadre du programme EOLIA se décline en deux niveaux. Le premier permet de comparer les niveaux d'ozone entre les zones océanique et continentale. Le deuxième niveau compare quant à lui les niveaux d'ozone de la zone intermédiaire avec la moyenne des deux autres zones. Pour chacun des deux niveaux, trois classes ont été définies. Dans un deuxième temps, les deux niveaux ont été regroupés, ce qui permet d'avoir une description synthétique heure par heure du profil spatial des concentrations d'ozone par transect. Neuf classes sont alors définies.

Les classes du premier niveau sont définies comme suit :

- **classe A**, les concentrations d'ozone sur la zone océanique sont **supérieures** à celles de la zone continentale ;
- **classe B**, les concentrations d'ozone sur la zone océanique sont **inférieures** à celles de la zone continentale ;
- **classe C**, les concentrations d'ozone sont équivalentes sur les zones océanique et continentale.

Les classes du second niveau sont les suivantes :

- **classe A**, les concentrations d'ozone dans la zone intermédiaire sont **supérieures** à la moyenne des deux autres zones ;
- **classe B**, les concentrations d'ozone dans la zone intermédiaire sont **inférieures** à la moyenne des deux autres zones ;
- **classe C**, les concentrations d'ozone dans la zone intermédiaire sont **équivalentes** à la moyenne des deux autres zones.

Dans chacun des deux niveaux de classification, une notion d'équivalence entre les concentrations d'ozone sur les différentes zones a été introduite. Cette équivalence a été définie par l'introduction d'un seuil, exprimé en valeur relative, au-delà duquel les concentrations ne sont plus considérées comme équivalentes. Ce seuil peut être fixé selon les besoins (un seuil important permet de conserver les classes A et B extrêmes, tandis qu'un seuil faible peut supprimer les classes C). Les résultats présentés par la suite sont basés sur un seuil fixé à 5 %. Ce seuil permet de s'affranchir, en partie, des incertitudes météorologiques et de ne conserver que les événements les plus marqués.

Pour le regroupement des deux niveaux (Figure 9), les classes sont désignées par deux lettres, la première correspond au premier niveau et la seconde au deuxième niveau. Par exemple, la classe AB signifie que les concentrations d'ozone sont supérieures sur la zone océanique par rapport à la zone continentale (A-) et que les concentrations dans la zone intermédiaire sont inférieures à la moyenne des deux autres zones (~B).



Figure 9.
Classes du niveau 1 et 2.
Classes of level 1 and 2.

4.2 Résultats de la classification

L'application de la classification heure par heure décrite précédemment sur les transects de Bretagne, des Pays de la Loire et de Poitou-Charentes permet d'obtenir une répartition journalière des classes.

Le premier niveau de la classification (Figure 10) met en évidence que le plus généralement, et quel que soit le transect considéré, les niveaux d'ozone sont plus importants la nuit sur la zone océanique par rapport à la zone continentale (classe A majoritaire). Cette différence tend à diminuer l'après-midi : les niveaux d'ozone s'homogénéisent sur les deux zones dans la deuxième partie de la journée (augmentation de la classe C). Sur le transect breton, même si cette tendance à l'homogénéisation est également apparente, elle est moins marquée que pour les deux autres transects (classe A toujours majoritaire l'après-midi).

Le deuxième niveau de la classification (Figure 11) permet également de dégager des comportements communs entre les trois transects. Au cours de la période nocturne, les niveaux d'ozone sont généralement inférieurs à la moyenne des deux autres zones (classe B majoritaire). Cette différence tend à diminuer au cours de la journée, une homogénéisation des niveaux est observée (augmentation de la classe C). Comme pour le premier niveau de la classification, le transect breton présente une plus faible augmentation de la classe C l'après-midi : l'homogénéisation est moins importante sur ce transect.

De manière plus générale, le transect Breton présente une singularité qui devra être rapprochée des particularités géographiques de la zone (côte découpée, péninsule bretonne...)

Le regroupement des deux niveaux de la classification a permis de se focaliser sur les classes correspondant à un comportement de l'ozone fortement marqué. Ainsi, seules les classes où n'apparaît pas de classe C, sont présentées ici. Il s'agit des classes AA, AB, BA et BB.

Le profil spatial moyen pour la classe AA (Figure 12) est fortement semblable pour les trois transects. Les caractéristiques communes pour cette classe sont :

- des niveaux moyens d'ozone plus importants sur la zone océanique ($70-80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que sur les autres zones ;
- des niveaux moyens d'ozone plus faibles sur la zone continentale ($30-50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) que sur les autres zones ;
- apparition d'une brusque diminution des niveaux moyens d'ozone au milieu de la zone intermédiaire (observation non-confirmée pour le transect breton en raison de l'absence d'un site rural valide à 5 km) ;
- les concentrations moyennes de la zone intermédiaire sont plus proches de ceux de la zone océanique.

Les heures d'apparition de cette classe en fonction des heures de la journée (Figure 13) montrent que cette classe est caractéristique d'un état nocturne.

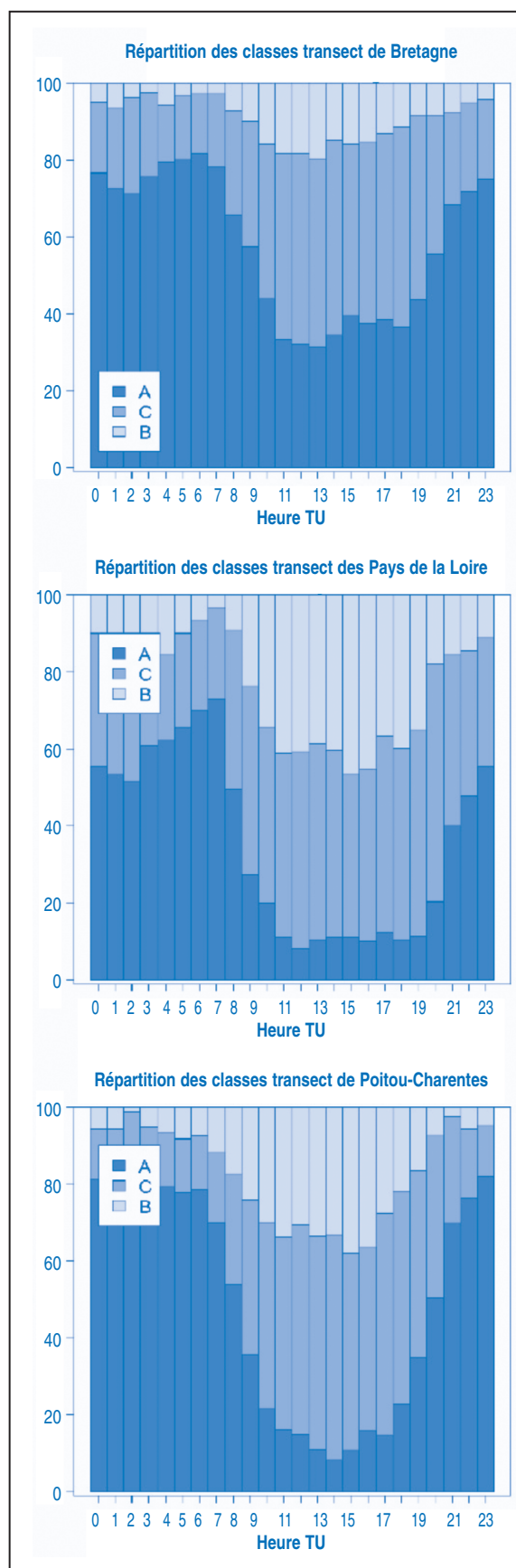


Figure 10.
Répartition journalière des classes de niveau 1.
Daily distribution of the classes of level 1.

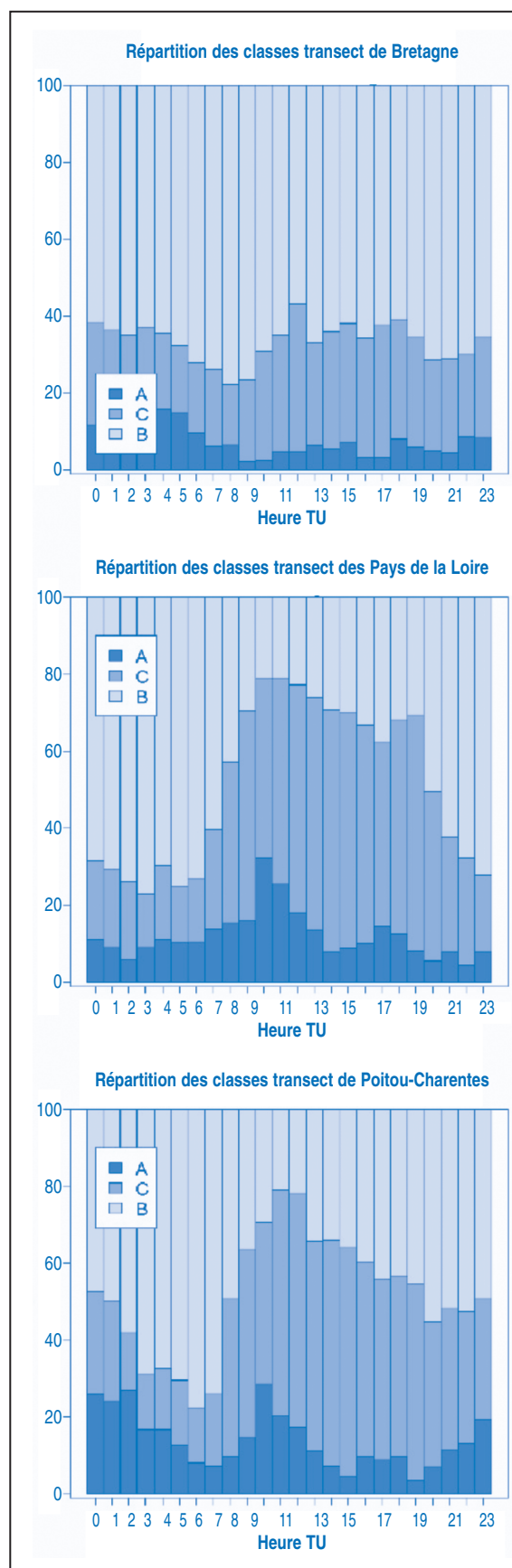


Figure 11.
Répartition journalière des classes de niveau 2.
Daily distribution of the classes of level 2.

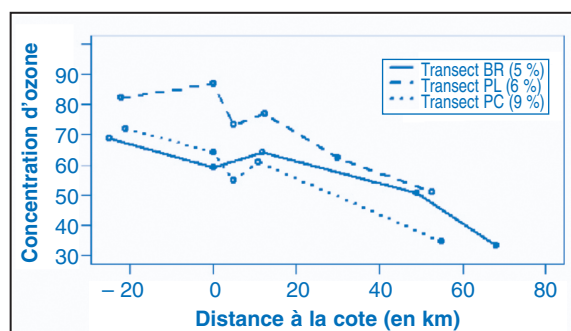


Figure 12.
Profil spatial de la classe AA.
Spatial profile of the AA class.

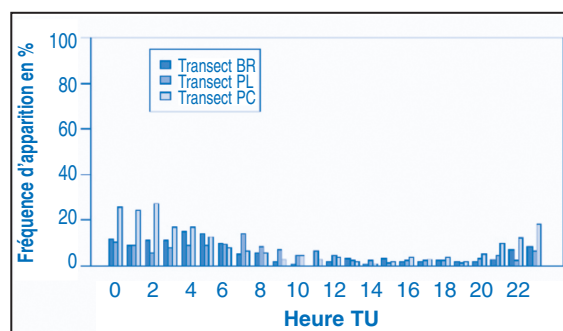


Figure 13.
Apparition journalière de la classe AA.
Daily occurrence of the AA class.

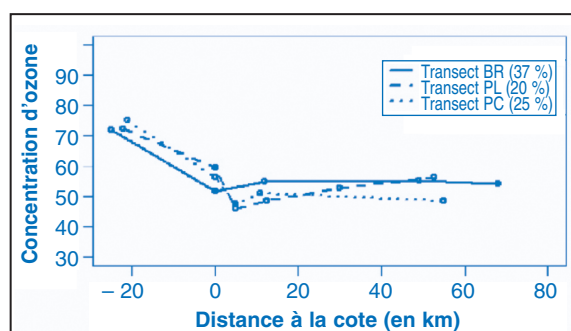


Figure 14.
Profil spatial de la classe AB.
Spatial profile of the AB class.

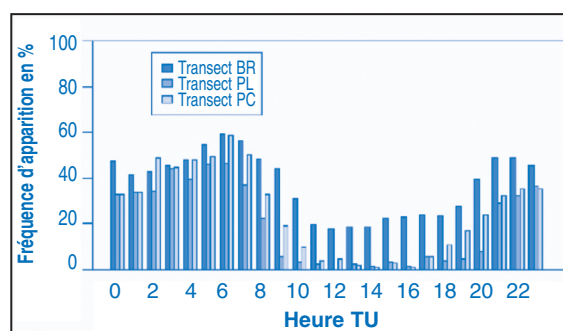


Figure 15.
Apparition journalière de la classe AB.
Daily occurrence of the AB class.

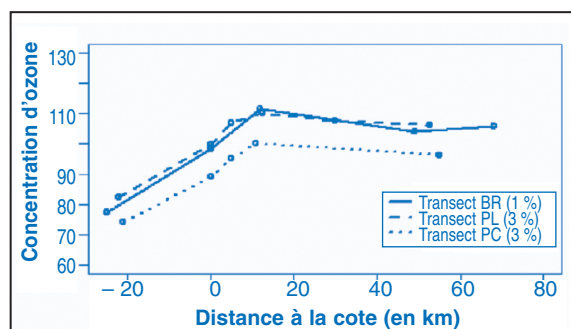


Figure 16.
Profil spatial de la classe BA.
Spatial profile of the BA class.

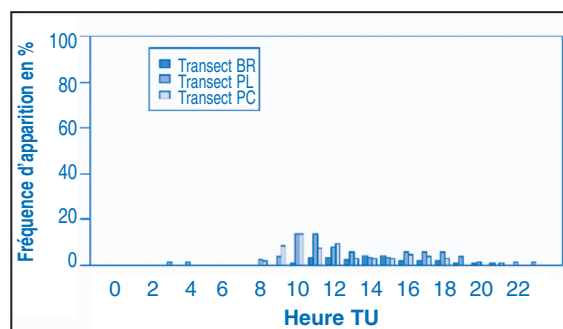


Figure 17.
Apparition journalière de la classe BA.
Daily occurrence of the BA class.

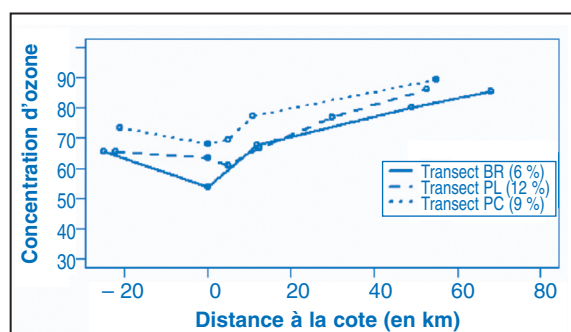


Figure 18.
Profil spatial de la classe BB.
Spatial profile of the BB class.

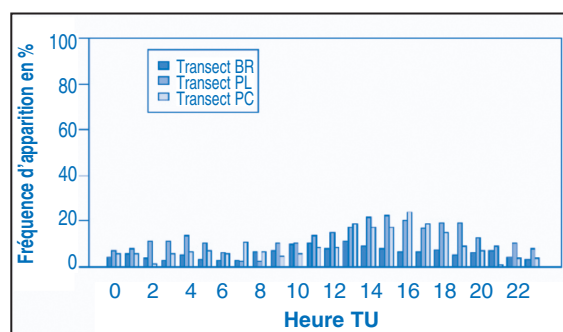


Figure 19.
Apparition journalière de la classe BB.
Daily occurrence of the BB class.

Le profil spatial moyen pour la classe AB (Figure 14) est comparable à celui de la classe AA mais présente deux différences majeures. Ses caractéristiques sont :

- des niveaux moyens d'ozone plus importants sur la zone océanique ($70\text{--}80\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) que sur les autres zones ;
- des niveaux moyens d'ozone plus importants que dans la classe AA sur la zone continentale ($50\text{--}60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$), mais toujours inférieurs à ceux des autres zones ;
- apparition d'une brusque diminution des niveaux moyens d'ozone au milieu de la zone intermédiaire (observation non-confirmée pour le transect breton en raison de l'absence d'un site rural valide à 5 km) ;
- les concentrations moyennes de la zone intermédiaire sont plus proches de ceux de la zone continentale.

Les heures d'apparition de cette classe (Figure 15) montrent que cette configuration est typique d'un comportement nocturne.

La classe BA (Figure 16) se caractérise par un profil spatial moyen radicalement différent de celui des deux classes précédentes. Les éléments caractérisant ce profil pour les trois transects sont les suivants :

- niveaux moyens d'ozone plus importants sur la zone océanique ($70\text{--}80\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) par rapport aux deux autres zones ;
- niveaux moyens équivalents sur les zones intermédiaire et continentale et très importants (autour de $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les heures d'apparition de cette classe au cours de la journée (Figure 17) montrent qu'elle est essentiellement observée vers dix heures, ce qui correspond à la période de la journée au cours de laquelle les concentrations d'ozone augmentent sur tous les sites. Cette classe est néanmoins très peu représentative de ce qui se passe sur le transect breton.

La classe BB (Figure 18) présente un profil moyen spatial dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- niveaux moyens d'ozone relativement importants en zone océanique (autour de $70\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) ;
- niveaux moyens d'ozone plus importants sur la zone continentale ($90\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) par rapport à la zone océanique ;
- niveaux moyens d'ozone sur la zone intermédiaire équivalents à ceux de la zone océanique avec une brusque diminution au milieu de la zone (observation non-confirmée pour le transect breton en raison de l'absence d'un site rural valide à 5 km).

Les heures d'apparition de cette classe au cours de la journée (Figure 19) montrent que pour les trois transects, elle est assez fréquente l'après-midi. Les fréquences relativement faibles de cette classe au cours des périodes d'augmentation et de diminution de l'ozone (vers 9 h et 21 h) montrent que la configuration spatiale de la classe BB correspond aux périodes de la journée au cours desquelles les concentrations d'ozone atteignent une certaine stabilité.

5. Conclusion

Les concentrations d'ozone présentent des spécificités au niveau du littoral Atlantique en comparaison avec les autres régions françaises. La campagne de mesures mise en place en 2005 sur l'ensemble de l'Arc Atlantique par Air Breizh, Air Pays de la Loire, ATMO Poitou-Charentes et AIRAQ a permis de documenter l'évolution de ce polluant estival sur une bande littorale d'une vingtaine de kilomètres le long de la côte. Les résultats ont permis de mieux appréhender le comportement spatial et temporel de l'ozone, notamment pendant les périodes de forte affluence touristique.

L'analyse descriptive des premiers résultats montre qu'il existe une unité de comportement sur tout l'arc et que des comportements généraux peuvent être déduits. Ainsi, l'ozone présente des concentrations généralement plus importantes qu'au-dessus des terres, et ce notamment pendant les périodes nocturnes. Quel que soit le profil spatial des concentrations d'ozone considéré, une perturbation est observable dans la zone intermédiaire. Cette perturbation est semblable sur chacun des transects réalisés pour un même profil spatial considéré. Cette zone de transition couvre une bande littorale d'environ vingt kilomètres.

L'analyse descriptive préliminaire a donc mis en évidence des comportements de l'ozone cohérents. La prochaine étape consiste à croiser ces résultats avec d'autres types de paramètres (météorologiques notamment) susceptibles d'expliquer les comportements observés. La deuxième de l'étude de l'ozone sur le littoral atlantique a d'ores et déjà débuté. Elle consiste à terminer l'exploitation des données issues des mesures LIDAR et comprendre les phénomènes décrits dans cette première analyse. Des collaborations avec des organismes spécialisés (Météo-France, INERIS, etc.) sont progressivement mis en place afin d'exploiter au mieux toutes les données disponibles.

Références

1. Kassomenos PA, Flocas HA, Lykoudis S, Skouloudis A. Spatial and temporal characteristics of the relationship between air quality status and mesoscale circulation over an urban Mediterranean basin. *The Science of the Total Environment* 1998 ; 217 : 37-57.
2. Kambezidis HD, Weidauer D, Melas D, Ulbricht M. Air quality in the Athens basin during sea breeze and non-sea breeze days using laser-remote-sensing technique. *Atmospheric Environment* 1998 ; 32 (12) : 2173-82.
3. Klemm O, Ziomas IC, Balis D, *et al.* A summer air-pollution study in Athens, Greece. *Atmospheric Environment* 1998 ; 32 (12) : 2071-87.
4. Gangoiti G, Alonso L, Navazo M, *et al.* Regional transport of pollutants over the Bay of Biscay: analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west-central Europe. *Atmospheric Environment* 2002 ; 36 : 1349-61.
5. Borne K, Chen D, Nunez M. A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *International Journal of Climatology* 1998 ; 18 : 901-14.
6. Liu H, Chan JCL, Cheng AYS. Internal boundary layer structure under sea-breeze conditions in Hong Kong. *Atmospheric Environment* 2001 ; 35 : 683-92.
7. Pont V, Fontan J. Local and regional contributions to photochemical atmospheric pollution in southern France. *Atmospheric Environment* 2000 ; 34 : 5209-23.

