Compréhension du phénomène de pointes « atypiques » d'ozone observé autour de la zone industrielle de Port-Jérôme en Haute-Normandie, France

Understanding of the atypical ozone peaks phenomenon observed around the petrochemical industrial zone of Port-Jérôme in Upper Normandy, France

Anaïs DETOURNAY*, Sébastien LE MEUR*, Véronique DELMAS*

Résumé

Depuis plusieurs années, la station de mesure d'AIR NORMAND (observatoire de la qualité de l'air en Haute-Normandie) basée à Notre-Dame-de-Gravenchon (commune de la Seine-Maritime située entre Rouen et Le Havre et voisine directe de la plate-forme pétrochimique de Port-Jérôme) enregistre des pointes d'ozone qualifiées « d'atypiques ». Contrairement à un pic d'ozone classique, ces pointes se produisent tôt le matin, durent une heure environ et leur intensité avoisine parfois les 200 $\mu g.m^{-3}$. De nombreuses AASQA ont fait état d'observations semblables par le passé, et une étude menée par l'INERIS sur ce thème a suggéré trois hypothèses pouvant expliquer l'apparition de ces pointes. La première est liée à l'existence d'interférents aux analyseurs d'ozone. La seconde rapporte la possibilité d'une intrusion d'ozone stratosphérique dans la troposphère. Enfin, selon la dernière hypothèse, il s'agirait d'ozone issu de réactions photochimiques, mais de mécanisme inconnu.

Face à l'importance des pointes atypiques sur ce site (46 ont été détectées entre 2000 et 2005), AIR NORMAND a mis en place une campagne de mesure : des appareils de mesure complémentaires des paramètres chimiques et météorologiques ont été ajoutés autour de la zone de Port-Jérôme durant l'été 2006. Les données recueillies ont mis en évidence l'existence d'un mécanisme complexe, résultant de la conjonction des niveaux de pollution au voisinage de la zone industrielle et de facteurs météorologiques propres au site.

Ces données seront par la suite utilisées pour modéliser le phénomène. Au-delà de la simple explication cherchée, celui-ci permettra d'approfondir les connaissances actuelles au niveau des mécanismes photochimiques en situation industrielle et d'aider à orienter les futurs efforts de réduction des émissions locales de polluants précurseurs.

Mots clés

Pointes atypiques d'ozone. COV réactifs. Zone industrielle. Haute-Normandie.

** AIR NORMAND, observatoire de la qualité de l'air en Haute-Normandie – 3, place de la Pomme d'Or – 76000 Rouen – E-mail : sebastien.lemeur@airnormand.fr – www.airnormand.fr*

Abstract

AIR NORMAND is the official association responsible for monitoring air quality in Upper Normandy. In order to measure and control atmospheric pollution, the association has 48 monitoring stations, across the region.

For many years, the air quality monitoring station situated in Notre-Dame-de-Gravenchon, a town located near the petrochemical industrial area of Port-Jérôme (between Rouen and Le Havre), has registered some atypical ozone peaks. These peaks appear to be atypical as they have occurred early in some mornings, for short periods (over an hour) and have been measured at concentrations higher than 200 µg.m^{-3}. This phenomenon has been observed in other locations across France and as a result the French Institute INERIS has undertaken research into this type of incident. As a result INERIS has proposed three hypothesis to explain these types of incidents.

The first hypothesis deals with the incidence of molecules that can interfere with the measuring instrument. The second hypothesis, deals with the possibility of stratospheric ozone intrusion into the low troposphere. The last agrees that the incidents could be the result of a photochemical reaction, whose mechanisms are unknown.

In order to determine how these phenomenon occurred, a campaign was undertaken over the summer of 2006: additional chemical analysers and meteorological equipment were set-up around the industrial zone of Port-Jérôme.

The data collected revealed the existence of complex chemical mechanisms, in which interactions between precursor-emissions, from within the industrial zone, combined with specific local meteorology resulted in elevated ozone peaks.

These data will also be used to model the phenomenon. There is likely to be more than a single explanation for this type of incidence, and so further research into this type of phenomenon will increase our knowledge about photochemical reactions under industrial situations and help to direct future reduction efforts of local precursor's emissions.

Keywords

Atypical ozone peaks. Reactive VOC. Industrial zone. Upper Normandy.

1. Introduction

L'ozone (O_3) est un polluant qui a suscité un intérêt croissant au fil des années. Les nombreuses études réalisées à son sujet ont permis de bien connaître les mécanismes de sa formation dans la troposphère polluée. Celle-ci est due à l'oxydation photochimique de différents composés, notamment les COV, catalysée par la présence de radicaux hydroxyles OH•. Les COV ainsi oxydés sont ensuite réduits par le monoxyde d'azote NO, lui-même oxydé en dioxyde d'azote NO_2. La réduction de ce composé par le dioxygène O_2, sous l'action du rayonnement solaire, forme une molécule d'ozone (Figure 1). Par la suite, les COV réduits sont dégradés pour former des composés carbonyles. Très réactifs, ceux-ci sont, selon les cas, photolysés ou détruits par réaction avec les radicaux OH• [1-4].

La production d'ozone troposphérique faisant suite à une réaction photochimique, ce phénomène est strictement diurne. L'ozone formé peut ainsi s'accumuler graduellement au cours de la journée, jusqu'à laisser apparaître des pointes plus ou moins intenses, en milieu d'après-midi. S'agissant d'un phénomène progressif, on observe alors au cours de la journée une courbe en forme de cloche, plus ou moins marquée avec un maximum dans l'après-midi. Ce phénomène s'observe fréquemment en milieu pollué lors des journées d'été chaudes et ensoleillées.

Si la formation d'un épisode d'ozone semble obéir à certaines conditions, il arrive que soient détectées des pointes « hors normes », formées dans des circonstances qui ne répondent pas à ces critères. Les études menées par l'INERIS [5] à ce sujet ont émis trois hypothèses capables d'expliquer l'origine de ces pointes atypiques.

La première d'entre elles met en cause la méthode de mesure employée. En effet, l'instrument le plus couramment utilisé par les Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA) est un analyseur par absorption UV, fonctionnant grâce à une lampe au mercure. Cet appareil est sensible à différents interférents, le plus important étant sans doute le mercure (1 µg de mercure pouvant induire une augmentation de 50 à 100 µg.m^{-3} de l'analyseur d'ozone [5]). Dans ce cas, la pointe observée ne correspondrait pas véritablement à de l'ozone, mais signalerait la présence d'un composé indéterminé, dans des concentrations inconnues.

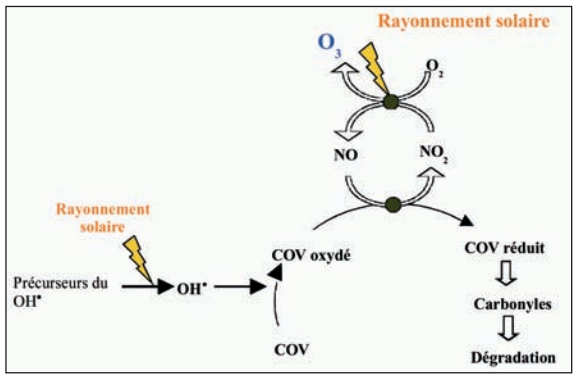


Figure 1.
Formation de l'ozone en troposphère polluée.
Ozone formation in the polluted troposphere.

La seconde hypothèse impliquerait l'intrusion d'ozone d'origine stratosphérique dans notre troposphère. Ce phénomène se produit occasionnellement, sous l'effet de contraintes purement météorologiques. Ce cas de figure se rencontre essentiellement dans les régions méridionales au début du printemps. Il peut généralement être détecté sur une échelle régionale, mais est cependant peu fréquent sous nos latitudes [4, 6].

Enfin, la dernière hypothèse avancée mettrait en cause une formation d'ozone photochimique. Il nécessite pour se produire des circonstances météorologiques favorables à la production d'ozone. L'intensité forte du pic et sa brièveté impliquent l'intervention d'un ou plusieurs composés extrêmement réactifs dont la nature comme l'origine restent à définir.

Des pointes d'ozone considérées comme « atypiques » sont depuis plusieurs années détectées par la station de mesure d'Air Normand, installée dans la ville de Notre-Dame-de-Gravenchon. Cette commune de Seine-Maritime proche du Havre est la voisine directe de la zone industrielle pétrochimique de Port-Jérôme (Figure 2), dont elle subit régulièrement l'influence. Ces épisodes se caractérisent notamment par leur horaire matinal (entre 8 h et 10 h TU en général) et leur allure particulière (Figure 3). Il s'agit en effet de pointes très aiguës.

En outre l'étendue du phénomène est restreint puisque les autres stations permanentes d'Air Normand mesurant l'ozone et localisées à environ 15 km, ne l'enregistrent pas.

Face à l'importance de ces pointes (46 détectées entre 2000 et 2005 – Tableau 1), une étude a été mise en place. Elle s'inscrit dans la cadre du projet européen INTERREG ARMO (Air Rive Manche Ozone), rassemblant des intervenants français (Atmo Picardie et Airparif, ainsi que l'INERIS) et anglais (le *Air Quality Sussex Stearing Group,* la *National Society for Clean Air* et l'Université de Brighton) pour l'analyse des phénomènes de pollution photochimique de part et d'autre de la Manche. Elle a été décomposée en deux parties. Une campagne de mesure a été mise en place au cours de l'été 2006, permettant de collecter de nombreuses données, lesquelles serviront ensuite à la modélisation du phénomène. Cet article traite uniquement de la première partie de cette étude.

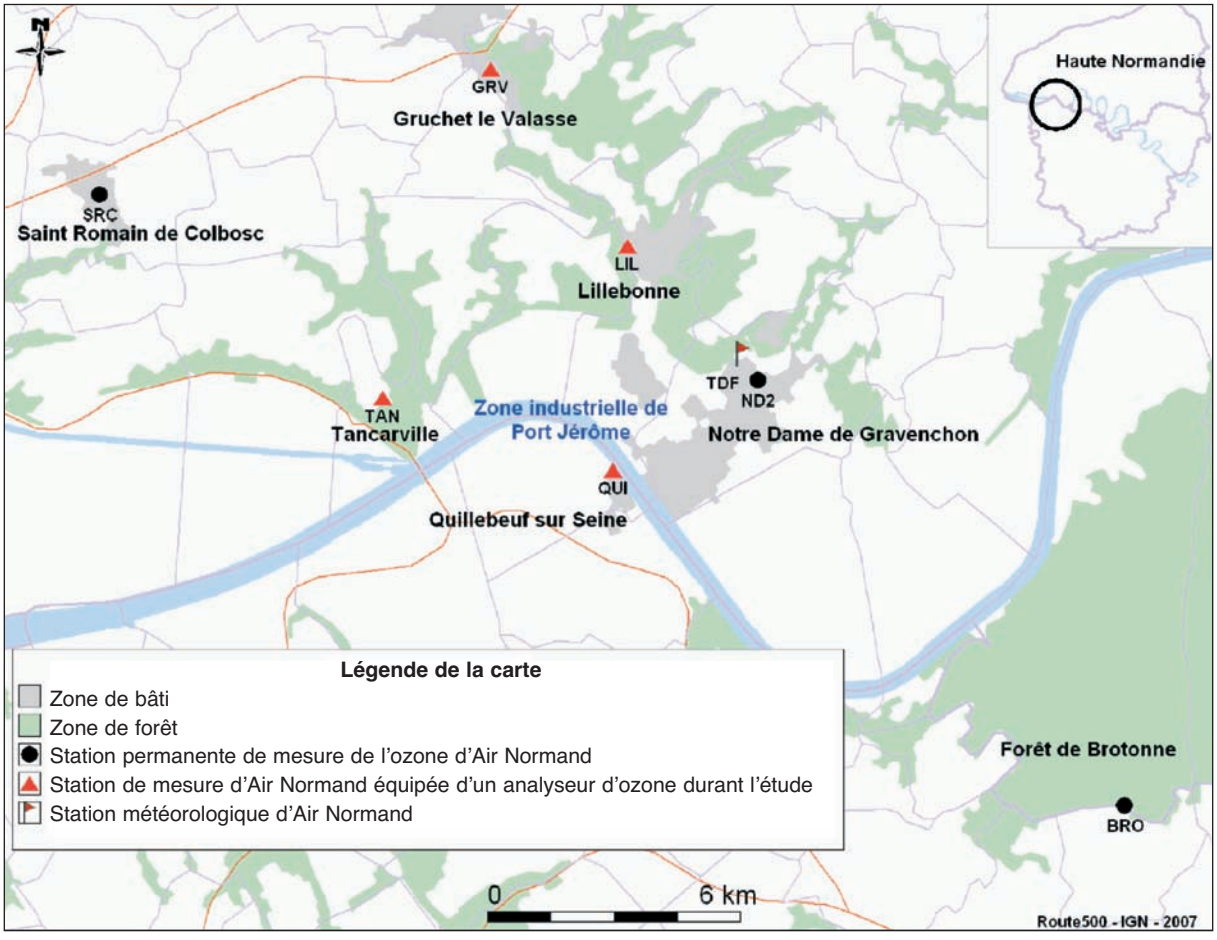


Figure 2.
Situation de la ville de Notre-Dame-de-Gravenchon en Haute-Normandie
et des stations de mesure d'AIR NORMAND autour de la zone industrielle de Port-Jérôme.
Location of the town of Notre-Dame-de-Gravenchon in Upper-Normandy
and AIR NORMAND's monitoring stations around the petrochemical industrial zone of Port-Jérôme.

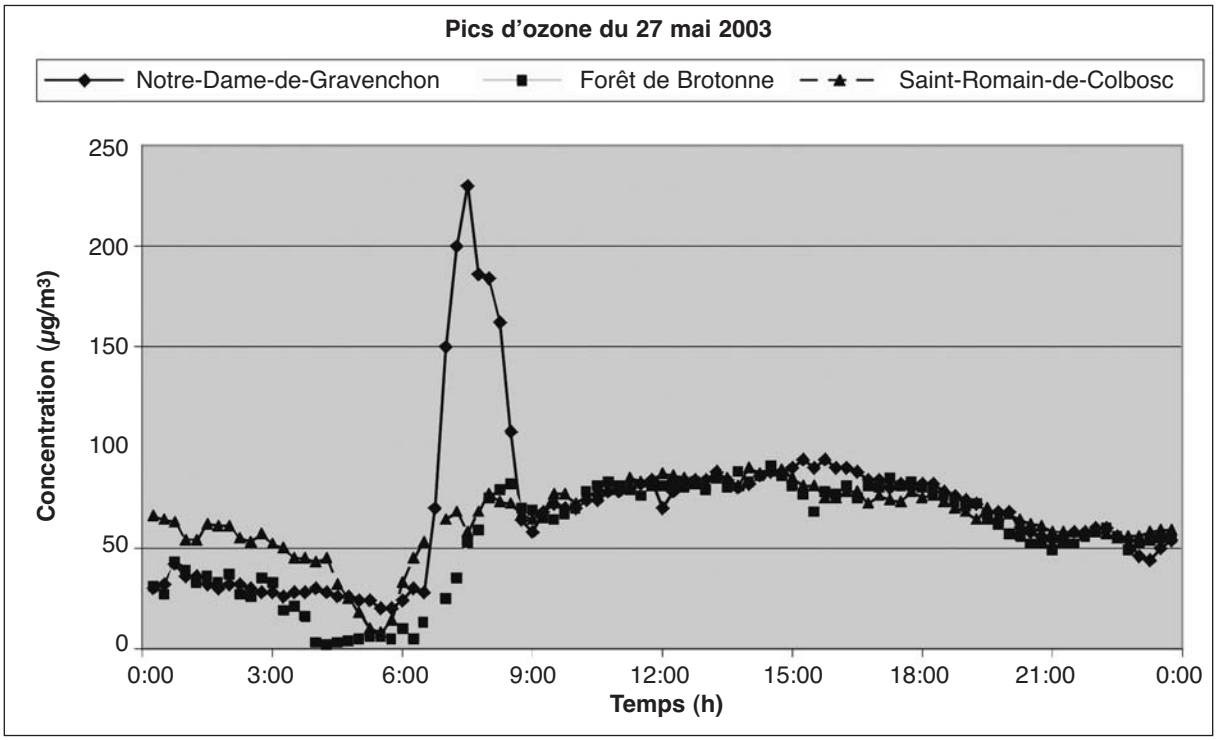


Figure 3.
Exemple de pointe atypique : cas du 27 mai 2003, à Notre-Dame-de-Gravenchon.
Example of an atypical ozone peak detected the 27th of May 2003, at Notre-Dame-de-Gravenchon.

2. Étude préliminaire

Afin notamment de mieux caractériser les conditions météorologiques d'apparition des pointes, un travail préliminaire de collecte et d'analyse des observations passées a tout d'abord été réalisé. Le principal objectif est de trouver des paramètres pouvant être prévus afin d'anticiper les pointes et ainsi déclencher des prélèvements ponctuels de précurseurs (COV) et de produits de dégradation des réactions photochimiques (composés carbonylés) au moment opportun.

2.1. Analyse des pointes passées

Cette analyse concerne les pointes atypiques détectées par Air Normand à Notre-Dame-de-Gravenchon entre 2000 et 2005. Elle a notamment permis d'élaborer une liste des paramètres météorologiques les plus importants observés au moment des pointes.

Les données utilisées proviennent pour la plupart des stations météorologiques d'Air Normand les plus proches du site. Elles ont par la suite été complétées par des données de Météo-France (brouillard, pression atmosphérique) mesurées près de Rouen et du Havre.

Les critères mis en évidence sont à classer en deux catégories : d'une part des conditions propices à la formation d'ozone, d'autre part des conditions favorisant une diminution du volume de dilution et donc la concentration des polluants. Les observations réalisées sont présentées dans le tableau 2. Quelques-unes nécessitent néanmoins des explications supplémentaires.

2.1.1. Brouillard et accumulation des polluants

Le brouillard se forme préférentiellement dans des conditions atmosphériques stables, à savoir des vents faibles et une couche limite basse (peu d'échanges verticaux). Ces conditions sont naturellement favorables à une accumulation des polluants.

2.1.2. Évolution diurne de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique connaît une évolution caractéristique au cours de la journée, indépendamment des variations dues à un changement de situation climatique. Élevée le matin, elle augmente peu à peu pour connaître un pic aux environs de midi. Du fait de l'important réchauffement des masses d'air, elle diminue ensuite peu à peu pour augmenter à nouveau au coucher du soleil, lorsque les masses d'air se refroidissent et se font plus denses. Lors d'épisodes de pointes atypiques, ce schéma est accentué (Figure 4). On observe alors un maximum de pression aux environs de 8 h ou 9 h TU, puis une baisse sensible de la pression l'après-midi. Ceci est le signe de la présence de masses d'air peu humides (moins denses) connaissant un important réchauffement, dû lui-même à un ensoleillement conséquent. Ce paramètre serait donc un indicateur d'une journée favorable à un phénomène d'ordre photochimique.

Tableau 1.
Liste des pointes atypiques d'ozone observées sur le site de Notre-Dame-de-Gravenchon entre 2000 et 2005.
List of atypical ozone peaks observed at Notre-Dame-de-Gravenchon monitoring station between 2000 and 2005.

		Horaire du maximum	Intensité ($\mu g/m^3$)	Heure de début	Heure de fin	Durée (h)
2000	25-01-2000	13:15	118	13:00	13:45	00:45
	18-07-2000	08:45	131	08:15	10:00	01:45
	19-07-2000	07:45	141	07:30	08:45	01:15
	31-07-2000	12:45	106	11:00	13:00	02:00
	05-08-2000	08:15	126	07:45	08:45	01:00
	11-08-2000	14:00	227	08:30	14:45	06:15
	04-09-2000	08:00	104	07:30	08:30	01:00
	14-09-2000	09:00	136	08:30	09:30	01:00
2001	15-02-2001	13:15	139	10:15	13:45	03:30
	10-05-2001	07:00	136	06:30	07:30	01:00
	30-05-2001	09:30	234	07:45	10:00	02:15
	24-06-2001	11:45	298	10:15	12:30	02:15
	30-07-2001	09:00	227	07:45	09:30	01:45
2002	08-03-2002	12:45	163	11:45	13:45	02:00
	20-04-2002	08:30	136	07:45	08:45	01:00
	19-08-2002	08:45	86	08:00	09:30	01:30
	05-08-2002	09:00	186	07:15	10:00	02:45
	11-09-2002	10:00	130	09:15	10:15	01:00
	27-09-2002	09:30	200	08:45	12:15	03:30
	04-10-2002	11:15	330	09:00	12:00	03:00
	19-10-2002	10:15	106	09:45	10:30	00:45
	16-11-2002	11:15	110	08:45	13:30	04:45
2003	07-05-2003	08:30	163	07:30	09:00	01:30
	27-05-2003	07:30	230	06:45	08:30	01:45
	28-05-2003	07:30	92	07:15	08:15	01:00
	05-06-2003	10:15	134	08:15	11:15	03:00
	08-07-2003	07:45	120	07:30	08:15	00:45
	06-08-2003	08:30	216	08:00	09:45	01:45
	12-08-2003	09:00	248	08:45	12:00	03:15
	20-08-2003	07:30	112	06:30	07:45	01:15
	01-09-2003	08:00	128	07:00	08:30	01:30
	05-09-2003	13:30	170	12:45	13:45	01:00
	18-09-2003	10:15	184	08:15	11:00	02:45
2004	15-05-2004	09:00	205	08:45	10:45	02:00
	01-06-2004	10:00	221	09:00	10:45	01:45
	14-06-2004	08:30	184	05:45	10:00	04:15
	31-07-2004	11:00	228	06:45	11:30	04:45
2005	11-04-2005	10:45	169	09:00	11:30	02:30
	02-05-2005	13:15	175	13:00	13:30	00:30
	22-06-2005	09:00	183	06:45	09:45	03:00
	13-07-2005	11:30	203	10:15	12:45	02:30
	09-08-2005	09:00	175	08:15	10:00	01:45
	10-08-2005	07:15	101	06:00	07:30	01:30
	29-08-2005	11:00	213	10:15	14:00	03:45
	07-09-2005	10:15	117	09:45	11:45	02:00
	11-09-2005	09:30	146	08:45	10:30	01:45
	10-11-2005	12:15	125	11:45	14:30	02:45

Tableau 2.
Grille des observations météorologiques lors des pointes d'ozone atypiques et critères de prévision retenus.
Table of observed meteorological data during atypical ozone peaks.

		Observations	Critères de prévision
Accumulation des polluants favorisée	**Direction des vents**	Vent de sud-sud ouest pour la majorité des pointes. Jamais de pointes par vent d'ouest.	Regarder la direction générale de vent indiqué pour prévoir où se formera éventuellement la pointe.
	Vitesse des vents	Vent faible.	< 2,5 m/s
	Température	Généralement élevée.	Indifférente. Une pointe se formera plus rapidement si la température est élevée.
	Gradient thermique	Gradient négatif au moment de la pointe. Inversion nocturne du gradient marquée.	Présence d'une inversion thermique nocturne marquée, prenant fin au matin.
	CLA (Couche Limite Atmosphérique)	Non mesurée.	Couche la plus basse possible la nuit (touche la ligne du zéro ou s'en rapproche beaucoup). Sa hauteur augmente beaucoup dans la journée (signe d'une journée chaude et ensoleillée).
	Brouillard	Présence de brouillard matinal fréquente à Notre-Dame-de-Gravenchon les jours de pointe.	Présence de brouillard. Ce paramètre reste difficile à prévoir.
	Pression atmosphérique	Évolution caractéristique sur la journée, avec un maximum autour de 9 h TU et une baisse sensible l'après-midi.	Pression élevée (> 1014 de préférence). Variation caractéristique sur la journée.
Formation d'ozone favorisée	**Flux solaire**	Moyen à fort.	Un ensoleillement fort n'est pas indispensable > 1 000 W/m² (valeur cumulée sur 3 heures).
	Nébulosité	Données jugées non pertinentes car le décalage spatial entre les points de mesure et le site de l'étude est trop grand.	Paramètre non ou peu fiable. Néanmoins, si les prévisions sont < 70 % pendant toute la matinée, on peut considérer qu'il n'y aura pas de pointe.
	Pluviométrie	Nulle au moment de la pointe ; généralement nulle sur la journée.	Ce paramètre est peu fiable, car difficile à prévoir. Une pointe ne peut avoir lieu s'il pleut. Si de la pluie est prévue continuellement sur toute la journée, la prévision est considérée comme fiable. Il n'y aura pas de pointe. Si des valeurs de pluie faibles sont prévues de façon ponctuelle, la prévision n'est pas fiable, et les autres paramètres doivent être consultés.
	Humidité relative	Évolution caractéristique sur la journée avec une baisse importante au moment de la pointe.	Non prévue.

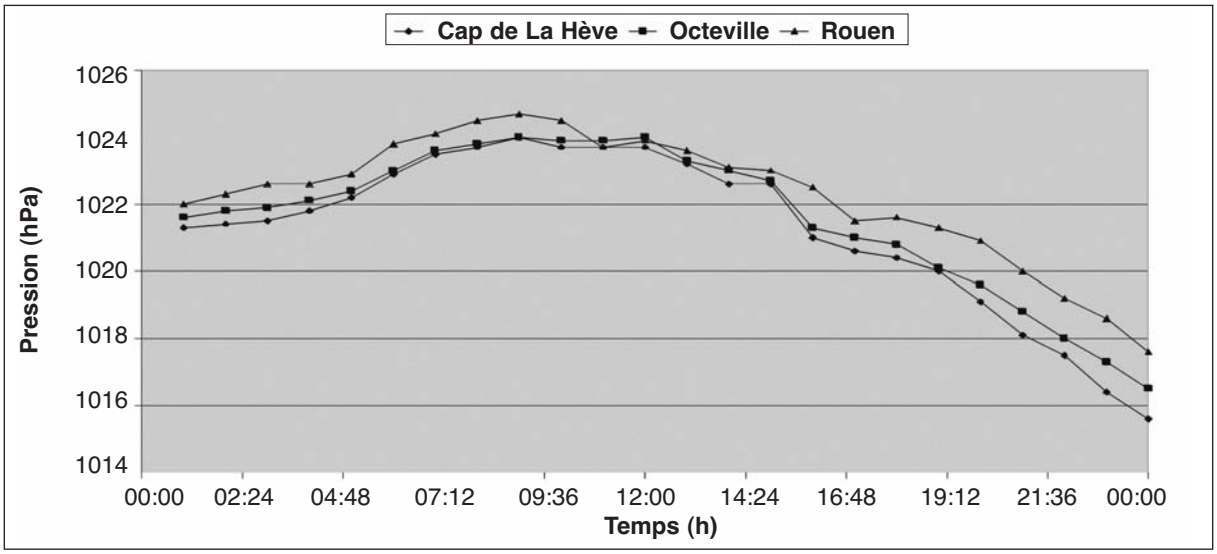


Figure 4.
Évolution caractéristique de la pression atmosphérique un jour de pointe atypique (cas du 28 septembre 2005).
A typical graph showing atmospheric pressure during a day when an atypical peak was detected (28th September 2005).

2.1.3. Évolution de l'humidité relative de l'air

L'évolution naturelle de ce paramètre au cours de la journée est la suivante : augmentation le soir, niveau maximal la nuit, baisse progressive au cours de la journée. Lors d'un épisode de pointe atypique, cette progression se fait de façon beaucoup plus abrupte : ainsi, le niveau peut en l'espace de trois heures passer de 100 % à 50 %. Le niveau minimal atteint est comparable à celui observé en situation normale, mais la variation abrupte semble caractéristique des pics d'ozone observés (Figure 5).

2.1.4. Évolution du gradient thermique et de la couche limite atmosphérique (CLA)

Une stratification peut être définie au sein même de notre troposphère. Elle distingue d'une part la CLA, partie basse de la troposphère en contact avec le sol et soumise de ce fait à toutes sortes de contraintes (liées au relief, aux variations de températures du sol, à la nature de la surface avec laquelle elle se trouve en contact…), et d'autre part l'atmosphère libre, totalement dégagée de ces contraintes. Les deux couches sont séparées par la couche d'inversion thermique. Celle-ci agit comme un véritable couvercle, empêchant totalement le transfert de masses d'air de l'une des deux couches vers l'autre (Figure 6). Ainsi, une émission de polluants dans la CLA se trouvera confinée dans celle-ci, et de l'épaisseur de cette CLA dépendra l'accumulation des polluants.

L'épaisseur de la CLA connaît une évolution particulière, tant au cours de la journée qu'au fil des saisons. Les jours de pointes atypiques se caractérisent toujours par une épaisseur importante le jour et faible à nulle la nuit. Ceci peut être vérifié par l'étude du gradient thermique. Il se traduit comme étant la différence entre les mesures d'une sonde thermique située en hauteur et d'une autre positionnée au sol. En conditions normales (pas d'inversion thermique, la température baisse avec l'altitude à raison de 1 °C par 100 m), ce gradient est négatif. En condition d'inversion thermique, on observe une rupture dans la décroissance de la température avec l'altitude. Le gradient thermique sera donc moins négatif qu'en conditions normales voire positif en cas de forte inversion thermique (la température en altitude est alors plus élevée que celle au sol). Si aucune inversion thermique n'est détectée, c'est que la couche d'inversion thermique, séparant la CLA de l'atmosphère libre a une altitude supérieure à celle du capteur le plus haut. Dans le cas contraire, c'est qu'elle se situe quelque part entre ce niveau et le sol. Une estimation de son altitude est ainsi apportée, mais l'altitude réelle de la couche demeure toujours inconnue. Une mesure du gradient thermique est disponible au niveau des stations TDF (Notre-Dame-de-Gravenchon) et CAU (Le Havre) d'Air Normand.

2.2. Établissement d'une grille de prévision

À partir de la liste de critères météorologiques observés, nous avons cherché à établir une grille de prédiction des pointes atypiques en nous basant sur les données disponibles en termes de prévisions météorologiques. Ces données sont issues de trois sources. Il s'agit d'abord des sorties du modèle de prévision météorologique numérique à aire limitée élaboré par Météo-France : ALADIN. Un des points de référence ALADIN est en effet voisin de Notre-

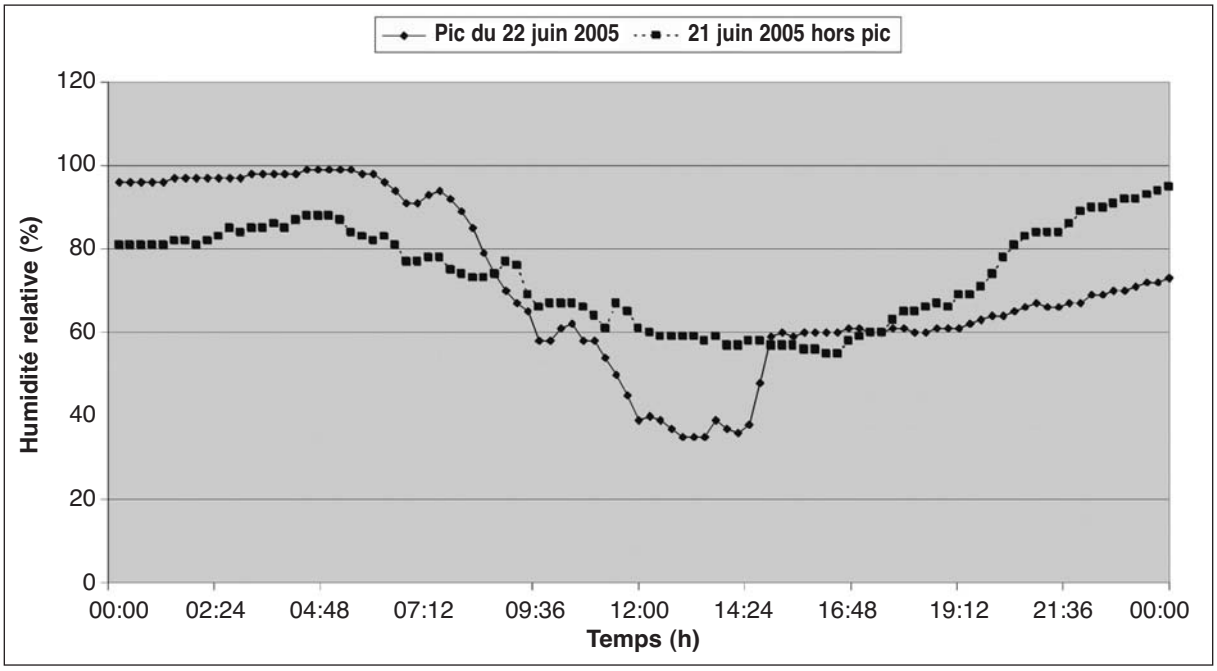


Figure 5.
Évolution de l'humidité relative de l'air lors d'une pointe atypique et en l'absence de pointe.
A graph showing relative humidity (RH), in an atypical and non-atypical situation.



Figure 6.
Couche d'inversion thermique au-dessus de Port-Jérôme, le 25 janvier 2006.
(Photo Maritxcu Capot, Maison de l'intercommunalité de Lillebonne).
Visualisation of the boundary layer (height), in the industrial area of Port-Jérôme, the 25th January 2006.

Dame-de-Gravenchon. Les données prévues sont la direction et la vitesse des vents à 10 m, la température à 2 m et sous abris, le gradient thermique calculé pour 100 m, la pression atmosphérique réduite au niveau de la mer, le flux solaire moyen cumulé sur 3 heures, la nébulosité et la pluviométrie. Le bulletin est calculé à différentes échéances, avec une remise à jour systématique toutes les 6 heures.

S'y joignent les données issues de la plate-forme de modélisation de la qualité de l'air ESMERALDA, projet qui regroupe six AASQA du nord de la France. Il s'agit de prévisions météorologiques issues du modèle MM5, incluant notamment des profils verticaux (hauteur de la CLA calculé à Notre-Dame-de-Gravenchon).

Enfin, les données prévisionnelles ainsi rassemblées ont été complétées par les prévisions disponibles sur le site Internet de Météo-France (prévisions régionales) en particulier pour la présence de brouillards.

La grille finalement obtenue est présentée dans le Tableau 2.

2.2.1. Variabilité des prévisions

Les bulletins météorologiques utilisés lors de la campagne sont régulièrement remis à jour (à raison d'un bulletin émis toutes les 6 heures). Des écarts importants entre ces bulletins, modifiant totalement le résultat des prévisions de pointe précédentes, peuvent alors être relevés. Lors de conditions anticycloniques persistantes sur plusieurs jours, ces écarts sont faibles. Il est possible de prévoir les conditions deux jours à l'avance. Dans le cas contraire, seul le premier bulletin matinal a été considéré.

2.2.2. Fiabilité des critères choisis

En ce qui concerne la fiabilité et la pertinence des critères de prévision établis, on peut estimer qu'ils ont permis de prévoir les pointes dans près de 80 % des cas. Ces résultats satisfaisants nous ont permis de réaliser des prélèvements de COV et de composés carbonylés lors de la majorité des pointes atypiques.

3. Matériels et méthodes

Afin de tester les différentes hypothèses proposées par l'INERIS pour expliquer les pointes d'ozone atypiques observées, de nombreux équipements complémentaires de mesures chimiques et météorologiques ont été implantés autour de la zone de Port-Jérôme.

3.1. Les équipements de mesures complémentaires

3.1.1. Extension du réseau de capteurs d'ozone existant

Afin de surveiller plus précisément l'étendue du phénomène atypique, et de suivre éventuellement le déplacement du nuage de pollution, le réseau de

capteurs d'ozone (par absorption UV) a été étendu aux stations de mesure voisines de Notre-Dame-de-Gravenchon, à savoir Quillebeuf-sur-Seine, Tancarville, Lillebonne et Gruchet-le-Valasse (Figure 2).

3.1.2. Test de l'hypothèse d'un interférent

Afin de vérifier que les pics d'ozone ne sont pas dus à un interférent sur les analyseurs d'ozone par absorption UV, trois de ces stations (Quillebeuf-sur-Seine, Lillebonne et Notre-Dame-de-Gravenchon), ont été équipées d'un micro-capteur d'ozone. Ces micro-capteurs commercialisés par la société Suisse Mic-S sont des instruments de technologie récente : il s'agit de semi-conducteurs en oxyde d'étain (SnO_2) dont la résistance varie en fonction de la température et de la concentration d'ozone. Ils permettent de mesurer l'ozone par une méthode différente de l'analyseur classique et ne réagissent donc pas, *a priori,* aux mêmes interférents (Figure 7). Ils ont été testés par Air Normand au cours de l'année 2004, lors d'une campagne basée à Honfleur [7], avec des résultats concluants en ce sens.

À partir de mi-juillet 2006, un analyseur automatique du mercure gazeux a également été ajouté à l'équipement de la station de Notre-Dame-de-Gravenchon, sachant que le mercure est le principal interférent des mesures d'ozone par absorption UV et que cette interférence a déjà été constatée au Havre en 2002 (Figure 8).

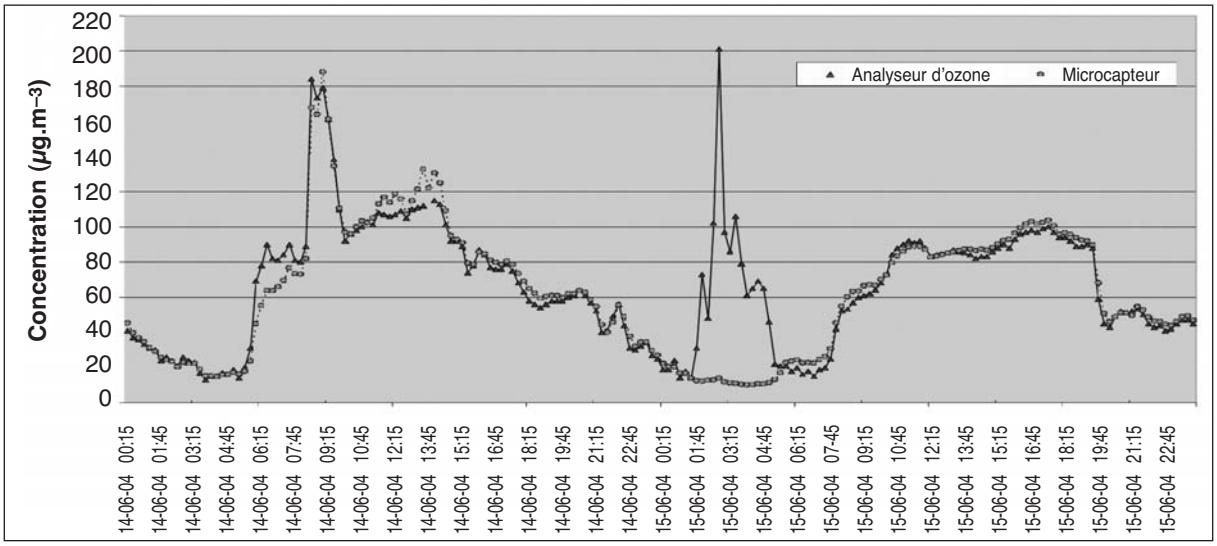


Figure 7.
Correspondance entre les relevés d'un analyseur d'ozone et d'un microcapteur placés à la station de Notre-Dame-de-Gravenchon lors d'un essai réalisé en juin 2004.
Concurence of data between the O_3, micro-sensor and ozone analyser located at the monitoring station in Notre-Dame-de-Gravenchon, during a test in June 2004.

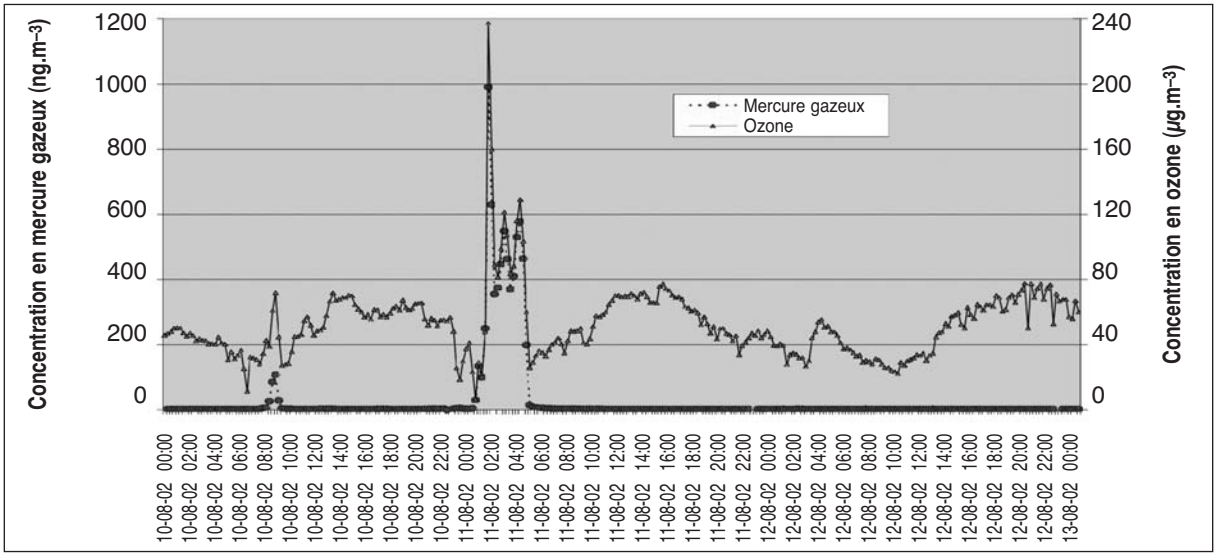


Figure 8.
Exemple de réponse de l'analyseur d'ozone en présence de mercure – Le Havre – Août 2002.
Example of ozone monitor's response during a peak of mercury in Le Havre – August 2002.

3.1.3. Test de l'hypothèse d'une intrusion d'ozone d'origine stratosphérique

Différentes études publiées à ce sujet ont permis la mise en évidence de traceurs pour ce phénomène [6, 8]. C'est le cas en particulier du rapport CO/O_3. Toutefois, la diminution des concentrations de CO observée ces dernières années en fait certainement un indicateur moins fiable qu'auparavant. Par ailleurs, au vu du caractère très localisé du phénomène qui nous occupe, cette hypothèse semble peu vraisemblable. Un analyseur de CO a tout de même été installé dans la station de Notre-Dame-de-Gravenchon à titre exploratoire.

3.1.4. Caractérisation du contexte météorologique de formation des pointes atypiques d'ozone

La connaissance d'un certain nombre de paramètres météorologiques est un élément important pour aider à la compréhension des phénomènes d'accumulation de polluants (vent faible, inversion thermique…) et photochimiques (température, ensoleillement, pression atmosphérique et température élevées, régime de vent, humidité relative faible, absence de précipitations…). Ainsi, les mesures existantes de la station météorologique TDF d'Air Normand (vitesse, direction du vent et température à 40 m et température à 3 m du sol) ont été complétées par l'ajout d'une mini-station météorologique et d'un SODAR.

La mini-station météorologique installée au centre de Notre-Dame-de-Gravenchon est composée d'un mât météorologique d'environ 1,5 m installé sur le toit de la résidence pour personnes âgées communale, cette station a permis la mesure de la vitesse et de la direction des vents, de la température, de la pression, de l'hygrométrie et de la pluviométrie. Un solarimètre, placé sur le toit de la station de Notre-Dame-de-Gravenchon, a permis de compléter ces données.

Le SODAR *(doppler Sound Detection And Ranging)* mis en place début août 2006 permet quant à lui de disposer d'une mesure réelle des profils verticaux des vents en termes de vitesse et de direction par l'analyse d'ondes sonores. Cet appareil émettant chaque seconde un signal sonore, il ne peut être placé en zone urbaine. C'est pourquoi il a été installé en bord de Seine (feu de Lillebonne). Les données ont notamment servi à améliorer le calcul de rétrotrajectoires des masses d'air.

3.1.5. Caractérisation des précurseurs de l'ozone

L'étude de certains précurseurs de l'ozone, les composés organiques volatils (COV), a été menée en se basant sur deux modes de suivis : un suivi dynamique, réalisé par un analyseur automatique, complété par une mesure plus exhaustive en laboratoire grâce à l'analyse d'échantillons prélevés au moment des pointes.

L'analyseur automatique de COV permet une quantification semi-horaire par chromatographie en phase gazeuse équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (FID) d'une trentaine de COV présents dans l'air extérieur et dont certains sont considérés comme majoritairement impliqués dans les phénomènes photochimiques suivant la directive européenne relative à l'ozone [10]. Cet instrument a permis de connaître les réactifs spécifiques présents au moment d'un épisode atypique. Par ailleurs, lorsque certains pics de COV n'étaient pas identifiés, une analyse spécifique en chromatographie gazeuse couplée à la spectrométrie de masse a été réalisée sur les prélèvements effectués par canister.

Le canister est un récipient en inox en forme de sphère dont la paroi interne a été passivée pour être la moins réactive possible. Il est initialement mis sous vide afin de permettre une aspiration de l'air sans pompage. Le canister est équipé d'un système veriflo (buse sonique), permettant le maintien d'un débit constant quelle que soit la pression à l'intérieur du canister, d'un manomètre servant au contrôle visuel de la pression et d'un minuteur rendant possible la programmation de prélèvements (Figure 9). Les pointes atypiques étant aiguës, une durée de trois heures a été choisie pour effectuer ces prélèvements. Le choix des jours et des heures de prélèvements a été basé sur la prévision d'apparition des pointes au jour le jour selon la grille établie lors du travail préliminaire d'étude des pointes passées (Tableau 2).

L'analyse des canisters a été confiée au laboratoire d'analyses des COV (Unité qualité de l'air) de l'INERIS. Les prélèvements y ont été envoyés par transporteur.

3.1.6. Caractérisation des produits de dégradation des réactions photochimiques

Afin de suivre les teneurs en carbonyles, résidus des réactions photochimiques et qui forment un ensemble de molécules réactives, nous avons effectué des prélèvements au moyen de cartouches SEP-PAK® imbibées de DNPH (dinitrophényl hydrazine). Ce réactif permet de piéger les carbonyles présents dans l'air en formant avec eux un complexe relativement stable : les hydrazones. Ces derniers pouvant être détruits par réaction avec l'ozone, un scrubber (tube imprégné d'iodure de potassium), installé en amont du prélèvement a permis de pallier ce problème. L'air est prélevé en extérieur et amené vers la cartouche au moyen d'une pompe, *via* un tuyau en téflon. Le préleveur est équipé d'un dispositif de programmation interne (Figure 9). La durée du prélèvement est ajustable, mais par commodité, elle a été fixée à trois heures, de façon à coïncider avec celle du canister.

Les cartouches ont été conservées au frais, (environ 4 °C) avant et après utilisation. Elles ont été expédiées par transporteur afin d'être analysées le plus tôt possible, pour éviter la dégradation de l'échantillon. L'analyse a été réalisée par le laboratoire du Département chimie et environnement de l'École des Mines de Douai.



Figure 9.
Canister pour le prélèvement de COV (à gauche) et cartouche SEP-PACK® pour le piégeage des composés carbonylés (à droite).
Canister for VOC sampling (in left) and SEP-PACK® cartridge for carbonyls sampling (in right).

4. Analyse des résultats de la campagne de mesure

4.1. Des pointes atypiques fréquemment observées sur la période

Le réseau de capteurs mis en place au cours de la campagne a permis la détection de pointes d'ozone considérées comme atypiques, de par leur forme et leur horaire lors de 20 journées (Tableau 3). Elles se répartissent sur l'ensemble de la zone d'étude ; non seulement à Notre-Dame-de-Gravenchon, mais aussi dans les communes avoisinantes. Des pointes ont ainsi été observées à Quillebeuf-sur-Seine, Lillebonne, Tancarville et occasionnellement à Gruchet-le-Valasse.

La formation de pointes d'ozone atypiques est donc un phénomène plus fréquent et étendu qu'initialement imaginé.

4.1.1. Invalidation des hypothèses d'interférence et d'intrusion stratosphérique

L'analyse des données observées a permis d'invalider, pour la majorité des pointes atypiques d'ozone, l'hypothèse d'une interférence. La figure 10 montre la correspondance entre les mesures de l'analyseur par absorption UV et celles du micro-capteur (ici à la station de Quillebeuf-sur-Seine). On constate ainsi que ces relevés coïncident, y compris en période de pointe atypique. Des observations similaires ont permis de caractériser la plupart des pointes observées comme étant effectivement de l'ozone. Par ailleurs, lors des pointes à Notre-Dame-de-Gravenchon, les concentrations de mercure gazeux (interférent connu de la mesure d'ozone par absorption UV) sont restées trop faibles (inférieures à 15 ng.m^{-3}) pour avoir une influence notable sur le signal de l'analyseur d'ozone (Figure 11).

Les données relevées par l'analyseur de CO placé à Notre-Dame-de-Gravenchon ont montré qu'un pic de ce polluant était systématiquement observé lors de chaque pointe atypique d'ozone. Or, l'air stratosphérique étant peu pollué et donc pauvre en CO, on ne devrait pas observer, en cas d'intrusion d'ozone d'origine stratosphérique, une augmentation des concentrations de ce composé. Ce constat confirme, comme nous nous y attendions, que les pointes atypiques d'ozone ne sont pas liées à une intrusion d'ozone stratosphérique.

4.1.2. Une répartition spatiale fonction de la direction du vent

L'étude de la direction des vents montre une forte relation entre l'emplacement de la pointe observée et la direction du vent au moment de la pointe. Ainsi, une pointe atypique s'observe généralement sur un site localisé directement sous le panache de Port-Jérôme. Ceci peut être montré par l'analyse du cas de la pointe atypique enregistrée à Notre-Dame-de-

Tableau 3.
Liste des pointes atypiques d'ozone observées lors de la campagne.
List of atypical ozone peaks observed during the campaing.

	Date	Heure du maximum	Intensité ($\mu g.m^{-3}$)	Lieu	Heure de début	Heure de fin	Durée (h)
Mai	11-05-06	08:15	131	Notre-Dame-de-Gravenchon	07:30	09:00	1:30
		10:45	141		10:00	11:00	1:00
Juin	12-06-06	11:45	170	Lillebonne	11:30	12:15	0:45
	13-06-06	13:15	168	Lillebonne	12:30	13:45	1:15
			181	Notre-Dame-de-Gravenchon	12:15	14:15	2:00
	17-06-06	08:00	132	Saint-Romain-de-Colbosc	07:15	10:15	3:00
		08:30	141	Tancarville	08:00	09:00	1:00
	23-06-06	14:15	137	Lillebonne	13:00	15:00	2:00
		14:30	126	Notre-Dame-de-Gravenchon	13:00	15:15	2:15
		14:45	127	Quillebeuf	13:15	15:15	2:00
	30-06-06	08:00	144	Tancarville	07:15	08:15	1:00
Juillet	03-07-06	08:15	244	Tancarville	08:15	09:15	1:00
		10:15	242		09:15	11:15	2:00
		09:30	179	Lillebonne	09:00	10:15	1:15
		10:00	166	Quillebeuf	09:15	10:15	1:00
	04-07-06	07:45	201	Notre-Dame-de-Gravenchon	06:30	10:00	3:30
	12-07-06	07:30	110	Notre-Dame-de-Gravenchon	06:15	08:30	2:15
		10:00	91		08:45	12:45	4:00
		11:00	85	Lillebonne	10:30	12:00	1:30
		11:30	82	Quillebeuf	09:45	12:30	2:45
	16-07-06	08:00	132	Tancarville	07:00	08:45	1:45
	17-07-06	09:30	237	Tancarville	08:45	10:30	1:45
	18-07-06	09:45	219	Tancarville	07:15	11:30	4:15
	19-07-06	10:45	211	Quillebeuf	09:30	12:15	2:45
		11:00	230	Tancarville	10:30	12:30	2:00
		11:45	211	Lillebonne	10:00	12:15	2:15
		12:15	207	Gruchet-le-Valasse	10:45	13:00	2:15
	20-07-06	14:00	201	Gruchet-le-Valasse	11:15	14:30	3:15
		15:00	193	Lillebonne	12:15	16:00	3:45
		15:30	206	Tancarville	13:30	16:45	3:15
		16:00	204	Quillebeuf	14:00	17:15	3:15
	24-07-06	08:15	126	Notre-Dame-de-Gravenchon	07:00	10:15	3:15
		11:15	169	Tancarville	10:45	15:15	4:30
		12:15	239	Quillebeuf	9:45	15:45	6:00
	26-07-06	11:00	215	Quillebeuf	09:30	16:00	6:30
		11:15	235	Tancarville	09:45	16:00	6:15
	29-07-06	07:45	90	Lillebonne	07:00	08:15	1:15
		10:00	92		09:30	10:30	1:00
Septembre	05-09-06	09:45	180	Lillebonne	07:45	10:45	3:00
			115	Tancarville	08:15	11:00	2:45
	06-09-06	09:45	182	Lillebonne	08:15	10:30	2:15
		11:15	168		10:30	13:15	2:45
		14:00	168	Notre-Dame-de-Gravenchon	13:15	15:00	1:45
		14:30	163	Gruchet-le-Valasse	13:45	15:00	1:15
	10-09-06	09:30	167	Quillebeuf	07:30	10:00	2:30
		09:45	146	Lillebonne	08:45	10:30	1:45
		11:00	180	Tancarville	10:15	11:30	1:15
		12:00	166	Gruchet-le-Valasse	11:30	12:45	1:15

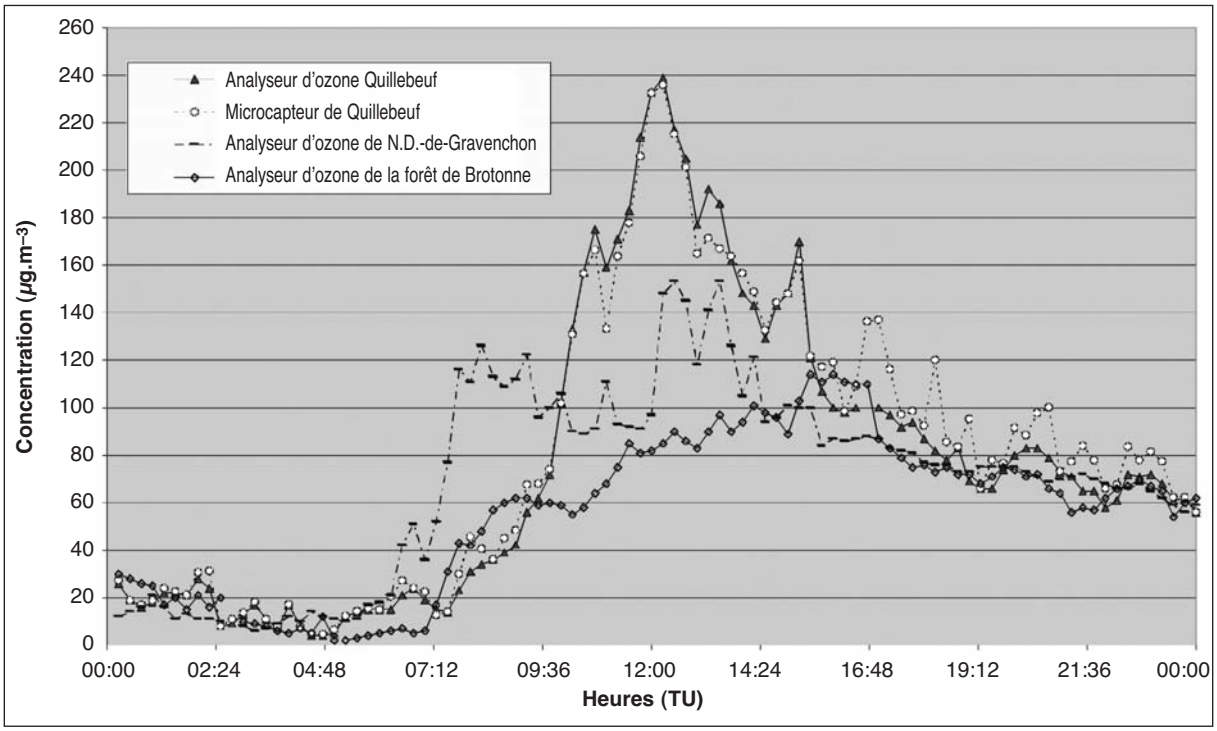


Figure 10.
Correspondance entre les relevés de l'analyseur d'ozone et du microcapteur placés à la station de Quillebeuf-sur-Seine, lors de la pointe atypique du 24 juillet 2006.
Concurrence of data between the O_3 micro-sensor and ozone analyser located at the monitoring station in Quillebeuf-sur-Seine, during an atypical peak of the 24th July 2006.

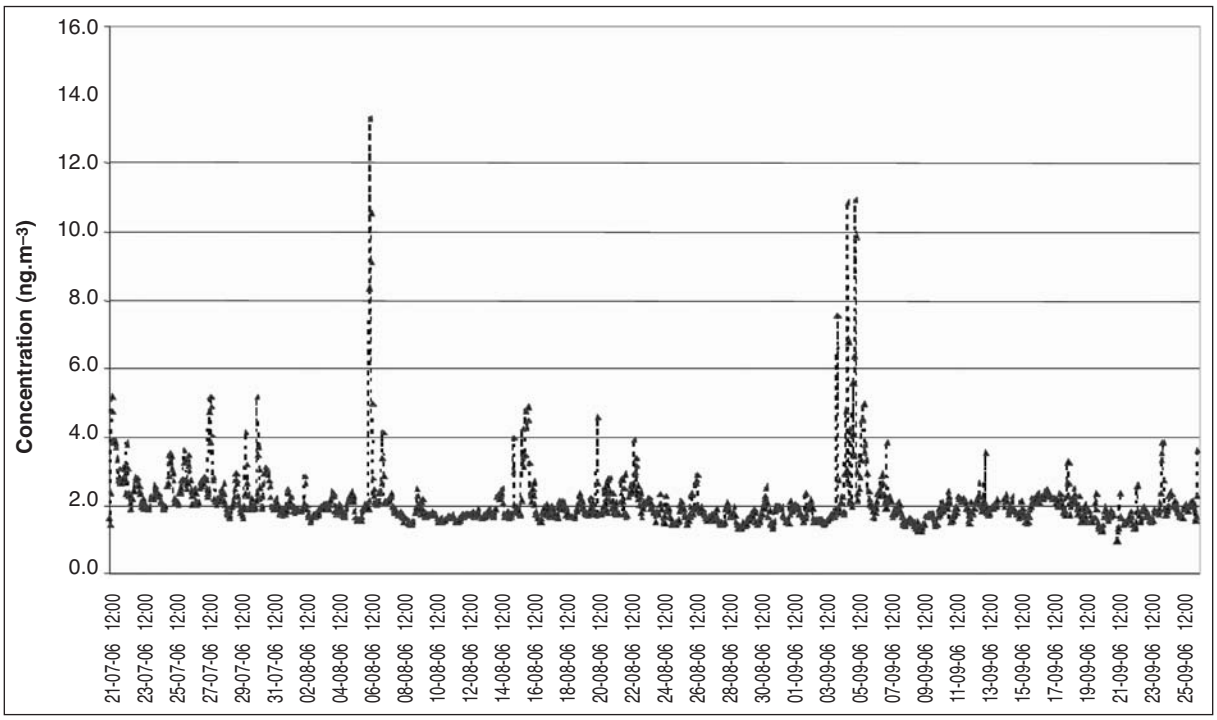


Figure 11.
Évolution des concentrations de mercure gazeux durant l'été 2006 sur le site de Notre-Dame-de-Gravenchon.
A graph showing mercury concentrations evolution during summer 2006 at Notre-Dame-de-Gravenchon monitoring station.

Gravenchon le 4 juillet 2006. Les rétro-trajectoires tracées montrent l'influence d'une masse d'air ayant traversé la Seine, survolant au passage la station de Quillebeuf-sur-Seine et le site de Port-Jérôme (Figure 12). Aucune pointe d'ozone n'a été détectée à Quillebeuf-sur-Seine. Le nuage d'ozone affectant Notre-Dame-de-Gravenchon s'est donc formé entre la ville et le site de Port-Jérôme. Des résultats similaires peuvent être obtenus pour chacune des pointes observées.

4.1.3. Répartition temporelle des pointes

Le plus grand nombre de pointes a pu être observé au cours du mois de juillet. La région était alors placée dans des conditions anticycloniques, caractérisées par de fortes chaleurs, un important ensoleillement, de hautes pressions et une faible nébulosité, peu de précipitations. Ces conditions sont naturellement favorables à la formation d'ozone photochimique. De hauts niveaux d'ozone ont d'ailleurs été relevés lors de pointes d'ozone « classiques », et l'association Air Normand a dû déclencher plusieurs informations des populations à risques. Le mois d'août s'est au contraire caractérisé par une situation fortement dépressionnaire, associée à une baisse des températures et d'abondantes précipitations. La hauteur de la CLA est également remontée. Ceci s'est accompagné de vents forts, avec bourrasques. Aucune situation d'accumulation des polluants n'a pu être observée. Les conditions d'ensoleillement n'ont pas permis la formation de pointes d'ozone classiques. Aucune pointe d'ozone atypique n'a pu être observée sur ce mois.

Une certaine variabilité peut être observée en ce qui concerne les heures de détection des pointes atypiques. En effet, si certaines d'entre elles se révèlent extrêmement matinales (autour de 6 h ou 7 h TU), d'autres n'apparaissent qu'aux alentours de 10 h TU. Il existe donc une diversité des heures d'apparition des pointes atypiques.

4.2. Contexte chimique de formation des pointes

4.2.1. Une pointe de pollution précédant la pointe d'ozone

Une pointe de pollution plus ou moins intense est toujours observée au moment même d'une pointe atypique ou bien la précède d'une ou deux heures. Cette pointe concerne tous les polluants étudiés au niveau de la station : SO_2, NO et NO_2, hydrocarbures totaux, poussières en suspension (PM_{10}). Cette pointe de polluants est observée lors de chaque pointe atypique (Figure 13).

4.2.2. Mise en évidence de l'existence d'un mélange de COV particulièrement réactifs

Les niveaux des COV relevés sont nettement plus élevés lors d'épisodes de pointes atypiques ayant eu lieu sur le site de Notre-Dame-de-Gravenchon (Tableau 4). On relève dans ce cas une augmentation de tous les COV représentés, ainsi que des pointes très importantes de certains COV, à savoir le propane, le n-hexane, le propène et l'isobutène. Si les deux premiers alcanes cités sont de faible intérêt car peu réactifs, ce n'est pas le cas des deux composés sui-

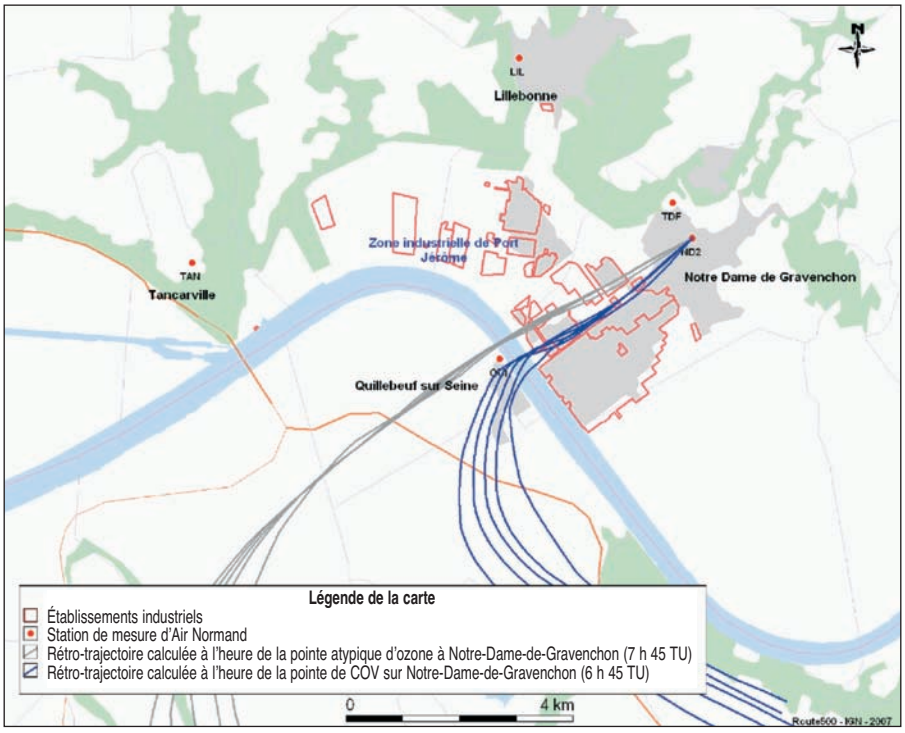


Figure 12.
Rétro-trajectoires calculées lors de la poine atypique le 4 juillet 2006 à Notre-Dame-de-Gravenchon.
Back-trajectories calculated during an atypical peak detected at Notre-Dame-de-Gravenchon on the 4th July 2006.

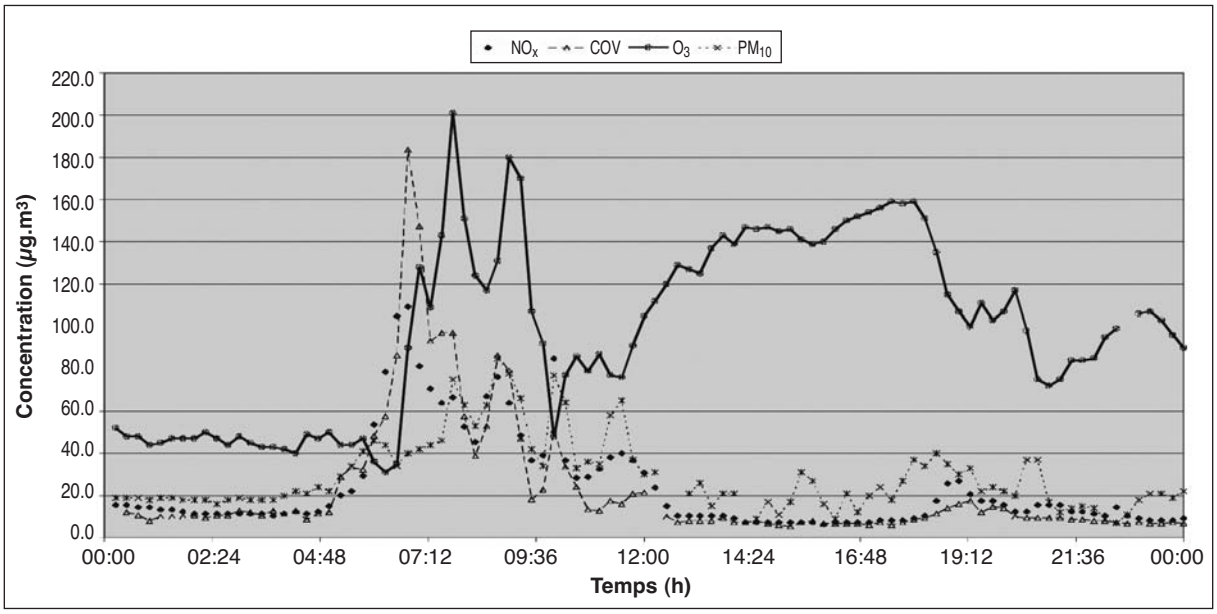


Figure 13.
Pointes de pollution enregistrées à Notre-Dame-de-Gravenchon, le 4 juillet 2006.
Pollution peaks recorded at Notre-Dame-de-Gravenchon, on the 4th July 2006.

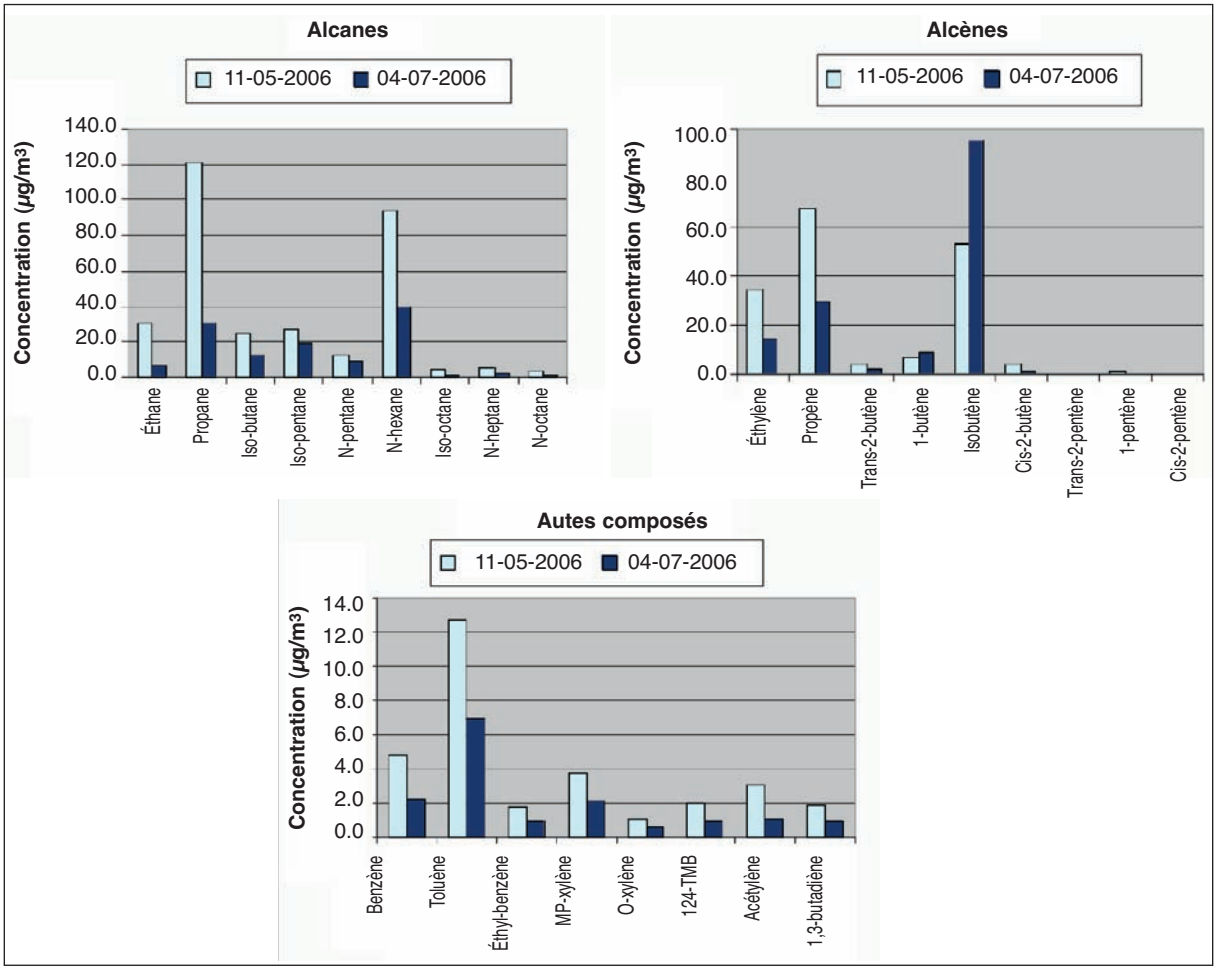


Figure 14.
Comparaison entre les relevés de COV lors des pointes atypiques du 11 mai et du 4 juillet 2006 à Notre-Dame-de-Gravenchon (résultats moyennés pour la durée de la pointe ; relevés de l'analyseur automatique utilisé par Air Normand).
Comparison between VOC's levels detected during the atypical peak on 11th May and the 4th July 2006 at Notre-Dame-de-Gravenchon (average results over the length of the peak; data from automatic monitor used by Air Normand).

Tableau 4.
Concentrations en COV (µg.m^{-3}) pendant et en l'absence de pointes d'ozone atypiques sur le site de Notre-Dame-de-Gravenchon (résultats de l'analyse des canisters) – Comparaison avec des résultats obtenus à Paris.
VOC concentrations (µg.m^{-3}) during and in the absence of atypical azone peaks at Notre-Dame-de-Gravenchon monitoring station (data from canisters analysis) – Comparison with AIRPARIF results.

Composé (µg.m^{-3})	Notre-Dame-de-Gravenchon		Paris 1er Les Halles	
	Lors d'une pointe « atypique » (vent faible, CLA très basse, brouillard...)	À l'absence de pointe « atypique » (meilleures conditions de dispersion)	Lors d'une journée marquée par une pollution photochimique	Lors d'une journée sans pollution photochimique
	Prélèvement du 04-07-06 (3 h)	Prélèvement du 10-07-06 (3 h)	Moyenne 3 h (8 h-10 h), le 04-07-06. Données communiquées par Airparif	Moyenne 3 h (8 h-10 h), le 10-07-06. Données communiquées par Airparif
Éthane	7,9	1,4	5,7	2,4
Éthène	11,9	0,7	2,8	1,2
Propane	34,7	1,9	5,4	1,8
Propène ou propylène	23,4	2,2	1,0	0,4
Iso-butane	12,2	0,7	6,0	2,8
n-butane	20,0	1,7	11,5	5,0
Éthyne ou acéthylène	0,8	< LD	1,1	0,5
Trans-2-butène	1,5	0,6	0,2	0,1
But-1-ène	4,3	0,3	0,3	0,1
Cis-2-butène	1,5	0,3	0,2	0,1
Iso-butène	57,4	3,1	NM	NM
Iso-pentane	24,5	0,9	10,2	4,2
n-pentane	9,2	0,5	2,5	0,8
1,3-butadiène	0,3	0,5	0,2	0,1
Trans-2-pentène	0,4	0,1	0,2	0,1
1-pentène	1,1	0,5	0,2	0,1
Cis-2-pentène	0,2	< LD	0,1	0,1
2-Méthylpentane	17,3	0,8	NM	NM
3-Méthylpentane	12,3	0,3	NM	NM
Isoprène	11,1	1,1	NM	NM
1-héxène	1,2	1,1	NM	NM
n-hexane	35,4	1,2	1,0	0,4
Benzène	2,9	0,7	1,7	0,8
Cyclohexane	2,2	< LD	NM	NM
Iso-octane ou 2.2.4-triméthylpentane	1,9	0,3	1,8	0,7
n-heptane	3,0	0,9	1,0	0,5
Toluène	9,7	3,7	8,2	3,9
n-octane	1,6	0,3	0,3	0,2
Éthylbenzène	1,7	1,0	1,4	0,7
m-xylène	5,0	3,3	4,3	1,9
o-xylène	1,7	1,4	1,3	0,6
n-nonane	1,8	0,4	NM	NM
a-pinène	6,3	< 2	NM	NM
1.3.5-triméthylbenzène	1,9	0,8	0,5	0,2
1.2.4-triméthylbenzène	2,9	1,7	1,3	0,5
1.2.3-triméthylbenzène	2,3	1,0	1,2	0,5
n-décane	14,8	1,0	NM	NM

NM : Composé non mesuré.

Tableau 5.
Concentrations en carbonylés pendant et en l'absence de pointe atypique sur le site de Notre-Dame-de-Gravenchon (résultats de l'analyse des cartouches Sep-Pack®).
Concentrations of carbonyl compounds during and in absence of atypical ozone peaks at Notre-Dame-de-Gravenchon monitoring station (data from Sep-Pack® cartridges analysis).

Composé (µg/m³)	Lors d'une pointe « atypique » (vent faible, CLA très basse, brouillard)	À l'absence de pointe « atypique » (meilleures conditions de dispersion)
	Prélèvement du 04-07-06	Prélèvement du 10-07-06
Méthanal *(Formaldéhyde)*	25,893	3,351
Éthanal *(Acétaldéhyde)*	18,798	3,068
3-buten-2-one *(Méthylvinylcétone)*	0,865	0,172
2-butanone *(Éthylméthylcétone)*	5,681	1,055
2-méthylpropénal *(Méthacroléine)*	2,478	0,203
Éthanedial *(Glyoxal)*	0,106	0,112
2-oxopropanal *(Méthylglyoxal)*	0,220	0,154

vants. Hautement réactifs, le propène et l'isobutène peuvent produire de l'ozone en une heure environ. Ceci correspond au décalage observé entre les pointes de COV et les pointes d'ozone atypiques.

Les proportions du mélange de ces composés sont très variables. Ainsi, lors de la pointe atypique du 11 mai 2006, les principaux COV étaient le propane et le n-hexane. Le principal composé réactif était alors le propène. Lors de la pointe atypique du 4 juillet, le niveau de propène était peu élevé. En revanche, le mélange était très concentré en isobutène (Figure 14).

Les prélèvements du 4 juillet 2006 montrent également des valeurs élevées en α-pinène et en isoprène. Ces molécules sont normalement émises par les végétaux, dans des proportions croissantes suivant l'intensité du rayonnement solaire. Dans notre cas, le rayonnement solaire est tout juste moyen (horaire matinal et brouillard). Les valeurs obtenues pour ces composés pour des jours bien plus ensoleillés sont également plus faibles. On peut donc supposer une origine industrielle pour ces deux molécules, sans toutefois pouvoir clairement l'affirmer. S'agissant également de composés réactifs, la question demeure d'intérêt. À titre de comparaison, les mesures de COV réalisées par AIRPARIF cette même journée (marquée également par un épisode de pollution photochimique en Ile-de-France), ne montre pas une élévation aussi marquée des composés les plus réactifs (Tableau 4).

4.2.3. Évolution des concentrations des composés carbonylés lors d'une pointe atypique

Un seul échantillon a pu être prélevé en ce type de circonstance à Notre-Dame-de-Gravenchon. Il s'agit de la pointe du 4 juillet 2006 (Tableau 5).

Les résultats obtenus montrent l'apparition de très fortes concentrations de formaldéhyde et d'acétaldéhyde. Ces deux molécules apparaissant à la toute fin de la chaîne d'oxydation de nombreux COV différents, ce paramètre ne nous apprend que peu de choses si ce n'est que cela conforte l'hypothèse d'une réaction photochimique.

La molécule dont le niveau connaît le plus fort taux d'augmentation est la méthacroléine (concentration multipliée par 12). Connaissant les principales réactions chimiques intervenant dans la photo-oxydation des COV, on peut deviner la molécule à l'origine de ce composé. Il s'agit ici probablement de l'isobutène.

5. Conclusion

La campagne de mesure menée entre mai et septembre 2006 autour de la zone industrielle de Port-Jérôme a permis d'aider à la compréhension des phénomènes d'ozone atypiques. L'ensemble des résultats recueillis tendent à prouver que les pointes atypiques d'ozone observées sur le site de Notre-Dame-de-Gravenchon sont bien, dans la majorité des cas, liées à une formation d'ozone photochimique répondant à des circonstances particulières.

Pour ce qui est des facteurs mis en cause, l'influence de la zone industrielle pétrochimique toute proche a pu être démontrée, puisque c'est sous le panache de Port-Jérôme que sont détectées les pointes. Différents composés réactifs sont présents sur cette zone, les principaux étant le propène et l'isobutène. Les proportions de ce mélange réactif sont fluctuantes, de sorte qu'il est pour l'heure impossible de déterminer l'importance de chaque molécule concernant la réaction. Une modélisation du phénomène, basée d'une part sur les résultats de la campagne et d'autre part sur les données fournies par les industriels de Port-Jérôme permettra, nous l'espérons, d'éclaircir ce point et d'orienter les futurs efforts de réduction des émissions de polluants précurseurs.

Concernant les facteurs météorologiques mis en cause, il semblerait qu'il s'agisse avant tout de conditions extrêmement propices à l'accumulation des polluants. Les facteurs les plus déterminants sont alors la vitesse des vents, la hauteur de la CLA, la présence de brouillard. Nous avons en outre observé qu'une forte intensité de rayonnement solaire n'était pas indispensable, le phénomène se rencontrant en conditions d'ensoleillement moyennes. Les résultats de la modélisation prévue permettront là encore d'améliorer notre connaissance du phénomène et sa prévision. La modélisation devrait enfin nous permettre de mieux cerner l'étendue de la zone concernée par le phénomène.

Références

1. Blieffert C, Perraud R. Chimie de l'environnement air, eau, sol, déchets. DoBoeck 2001, Université Paris.
2. Le Cloirec P. Les composés organiques (COV) dans l'environnement. École des Mines de Nantes. Lavoisier TEC & DOC 1998, Paris.
3. Aumont B, Toupance G. Dépendance de l'ozone troposphérique à ses précurseurs : les NO_x et les COV. Publication Université Paris VII et XII 1992.
4. Rapport de l'Académie des Sciences. Rapport n° 30. Ozone et propriétés oxydantes de la troposphère. Essai d'évaluation scientifique. Académie des Sciences 1993, Paris.
5. Zdanevitch I. Étude d'épisodes inexpliqués d'ozone. Rapport LCSQA, convention 41/2000. INERIS, 2001, Paris.
6. Thouret V, Cho JYN, Newell RE, Marenco A, Smit HGJ. General characteristics of tropospheric trace constituent layers observed in MOZAIC program. *Journal of Geophysical Research* 2000 ; 105 (17) : 17379-92.
7. Bobbia M. Rapport d'étude n° E04-01 : Honfleur. Utilisation de micro-capteurs pour mesurer l'ozone. Rapport interne Air Normand 2004.
8. Lasry F. Étude d'un pic de pollution par modélisation eulérienne tridimentionnelle sur le site de Berre-Marseille. Rapport de D.E.A. Chimie de la pollution atmosphérique et physique de l'environnement, 2002.
9. Fréjafon E. Syntèse annuelle sur les instruments « à long trajet optique » LIDAR-DOAS, rapport LCSQA convention 04000087. INERIS, 2004.
10. Directive européenne du 12 février 2002, 2002/3/CE, relative à « l'ozone dans l'air ambiant ». *J.O. des Communautés Européennes* ; L67 : 14-30.