

# ARTICLES

## Distribution de la concentration de benzène autour des stations d'essence à La Réunion

## Distribution of benzene concentration in the vicinity of petrol stations at La Réunion Island

Chatrapatty BHUGWANT\*, Bruno SIÉJA\*, Paolo SACCO\*\*

### Résumé

Dans le cadre du Code de l'environnement, deux campagnes de mesures atmosphériques ont été réalisées en été austral et en hiver austral, à l'île de La Réunion en 2002, afin d'évaluer la concentration de benzène autour de deux stations d'essence. Les deux sites de l'île comportaient en moyenne 17 points de mesures répartis de manière homogène autour de chaque station d'essence. Cette recherche a été menée avant la mise en place des dispositifs de récupération des vapeurs lors du chargement-déchargement des camions-citernes (phase I) et lors du remplissage des véhicules particuliers (phase II). L'étude avait pour objectif de caractériser la distribution spatiale et la variabilité saisonnière de la concentration de benzène et de toluène à proximité de sources fixes d'émissions, sur deux régions distinctes de La Réunion.

Les résultats montrent que les activités anthropiques (sources fixes et mobiles) sont responsables de la variabilité de la concentration de benzène et de toluène. Les sorties cartographiques montrent que le benzène présente une distribution inhomogène et des concentrations maximales à proximité immédiate de la station d'essence du Port. Cette caractéristique n'est pas observée autour de la station d'essence de Saint-Denis, où la distribution de benzène est assez homogène, avec des niveaux de concentration faibles. Ceci est lié à la conjugaison des alizés et des effets de brises terre-mer sur ce site au vent. L'analyse des données météorologiques relevées parallèlement au recueil des échantillons de benzène montre que ces paramètres ont peu varié durant les deux campagnes. Ceci suggère donc que « l'effet de source », c'est-à-dire les rejets d'origine anthropique, est prépondérant par rapport aux autres processus (dynamique, dépôt, lessivage) sur ces sites. À l'échelle locale, la concentration de benzène autour de ces stations d'essence situées en zone urbaine, est supérieure d'un facteur 3 à 12 aux valeurs rencontrées sur des sites de fond.

### Abstract

In the frame of the French *Code de l'environnement*, two atmospheric measurement campaigns were undertaken during austral summer and austral winter at La Réunion Island in 2002, in order to evaluate the benzene concentration in the vicinity of two petrol stations. The two sites contained about 17 sampling points which were homogeneously divided around each of the petrol stations. This work was undertaken before the set up of vapour recovery systems during the filling and the discharge of tankers (stage I) and during filling of the private cars (stage II). The main objective of the study was to characterize the spatial distribution and the seasonal variation of the benzene and the toluene concentration in the vicinity of stationary emission sources, in two distinct regions of La Réunion Island.

The results point out that the anthropogenic activities (stationary and mobile sources) are responsible of the benzene concentration variation at La Réunion Island. The model outputs show that benzene presents an inhomogeneous distribution and maximum concentration values in the immediate proximity of the Le Port petrol station. This characteristic is not observed around the Saint-Denis petrol station where the benzene distribution is quite homogeneous, with lower concentration levels. This is related to the conjugate effect of easterlies and land-sea breezes on this windward site. Meteorological data analysed in parallel with the benzene sampling indicate that the former have varied little during the two campaigns. We may thus assert that the "source effect", i.e. the anthropogenic emissions, is the predominant factor as compared to other processes (dynamical, deposition, scavenging) at these locations. On local scale, the benzene concentration in the vicinity of the petrol stations situated in urban areas, is higher by a factor of 3 to 12, as compared to values encountered in background/remote locations.

\* Observatoire Réunionnais de l'Air. Technopôle de La Réunion, Bâtiment Rodrigues – 5, Rue Henri Cornu – 97490 Sainte-Clotilde – Ile de La Réunion, France – E-mail : [ora.atmo@wanadoo.fr](mailto:ora.atmo@wanadoo.fr)

\*\* Fondazione Salvatore Maugeri. Centro Di Ricerche Ambientali – Via Svizzera 16 – 35127 Padova, Italie.

## Introduction

Depuis quelques décennies, la répétition des épisodes de pollution a entraîné la prise de conscience de la gravité de la situation et de la nécessité d'appréhender l'origine, les causes et les conséquences sanitaires et environnementales de ces pollutions. Leur occurrence a augmenté de façon notable, suite à l'accroissement de la population et de l'activité humaine (urbanisation et industrialisation). Les polluants d'origine anthropique, tels que le benzène, l'ozone, le nitrate de peroxyde acétate, les composés carbonylés et les peroxydes sont, pour certains d'entre eux des agents phototoxiques, pour d'autres des agents cancérigènes [1, 2].

Des travaux antérieurs menés dans le domaine de la chimie atmosphérique montrent que parmi les photo-oxydants, l'accumulation de l'ozone troposphérique est l'un des problèmes les plus préoccupants à l'heure actuelle [2]. Il s'avère que des polluants tels que les composés organiques volatils (COV) et les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) ont une forte implication dans la chimie atmosphérique, le bilan radiatif ainsi que la santé [2, 3]. Malheureusement, il existe encore très peu de documentation sur les COV, en particulier en zone tropicale marine de l'hémisphère Sud, en raison du manque de données disponibles [4-6].

Il a également été montré que les émissions dues au trafic sont une cause majeure de pollution de l'air, notamment en zone urbaine [7-10]. D'autres travaux montrent que des sources fixes telles que les stations d'essence sont des émetteurs de polluants dans l'atmosphère [11, 12]. En dépit de ces considérations, très peu d'études ont été menées jusqu'à ce jour sur ce sujet d'une part en zones urbaine et périurbaine de villes européennes et, d'autre part, en région tropicale [13, 14]. Dans ce contexte, la caractérisation de la concentration de polluants tels que le benzène

et le toluène autour des stations d'essence sur différentes parties de La Réunion permet d'avoir une première approche quantitative de cette problématique.

La première partie de cette étude est consacrée à une description d'une part du contexte géographique et d'autre part du contexte météorologique, en abordant l'aspect de la circulation atmosphérique à l'échelle régionale et locale. Le contexte réglementaire qui a motivé l'orientation de cette étude est présenté dans la deuxième partie. Les origines et les effets du benzène sont ensuite abordés dans la troisième partie. La quatrième partie a pour objet la description des sites de mesures, des capteurs et des protocoles d'analyse s'y rattachant. La cinquième partie est dédiée à l'intercomparaison de mesures de benzène. La sixième partie présente les résultats des deux campagnes de mesures atmosphériques réalisées à deux saisons différentes à La Réunion. Ces résultats sont confrontés aux paramètres météorologiques. Les principaux processus intervenant dans la distribution spatiale et la variabilité saisonnière des concentrations de benzène autour de sources fixes sont déterminés.

## Contexte général de l'étude

### Contexte géographique

La présente étude porte sur des campagnes de mesures des concentrations de BTX (benzène, toluène et xylènes) effectuées en couche limite marine, à l'île de La Réunion. Cette île est située à 21,5° Sud et 55,5° Est, au sud-ouest de l'océan Indien, comme cela est indiqué dans la figure 1. Elle se trouve dans la région des îles Mascareignes, en zone tropicale de l'hémisphère Sud, entre l'Afrique et l'Australie. Elle est située, à une distance moyenne d'environ 800 km

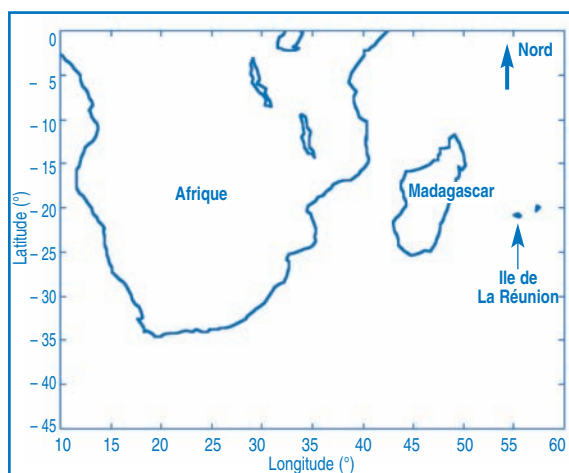


Figure 1.

Carte du sud-ouest de l'océan Indien, indiquant la position de La Réunion.

(Carte : C. Bhugwant – ORA)

Map of the South-Western Indian Ocean with indication of the location of La Réunion Island.  
(Map: C. Bhugwant – ORA)

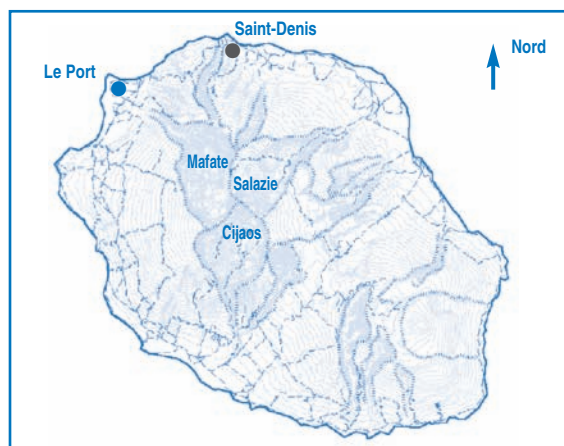


Figure 2.

Carte de La Réunion,

avec indication des principaux massifs de l'île.  
(Carte : Université de La Réunion – Laboratoire des Sciences de la Terre. Reproduit avec autorisation)

Map of La Réunion Island, with indication of the main massifs of the island.  
(Map: University of La Reunion – Reproduced with permission)

de la côte est de Madagascar, et à une distance d'environ 1 000 km du continent africain.

Le climat de La Réunion est typiquement tropical marin. L'île de La Réunion a une forme plutôt elliptique. Son plus grand diamètre mesure 70 km, pour une superficie de 2 512 km<sup>2</sup>. C'est une île volcanique et montagneuse (Figure 2). Elle est constituée de deux massifs proches :

- le piton de La Fournaise culminant à 2 631 m ;
- le piton des Neiges, massif plus ancien, culminant à 3 070,5 m.

### Contexte météorologique

#### *Circulations régionales : les alizés*

Les caractéristiques géographiques de l'océan Indien influent sur le climat de la zone : totalement fermé au nord et ouvert dans sa partie sud vers la ceinture de l'océan Atlantique. De l'anticyclone de Sainte-Hélène (Atlantique Sud), se détachent des cellules de hautes pressions qui circulent d'ouest en est à travers l'océan Indien [15].

La figure 3 présente le déplacement méridien et saisonnier de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) ainsi que les différentes directions des alizés. Schématiquement, la ZCIT est la région de basse pression où convergent les vents situés dans la basse atmosphère. À l'intersaison, il y a une modulation du climat et une oscillation de la ZCIT entre les deux situations extrêmes associées à l'été et l'hiver.

#### *Circulations locales : les brises terre-mer*

Les différences thermiques terre-mer ainsi que les alizés influent directement sur le climat réunionnais, qui se singularise surtout par de grandes variabilités liées au relief de l'île. Aussi, il existe un contraste d'une région à l'autre de l'île en ce qui concerne la pluviométrie, le rayonnement solaire et le vent. On distingue la côte au vent, à l'est, qui présente une pluviométrie très importante quelle que soit la saison, et la côte sous le vent, à l'ouest, protégée des alizés par le relief de l'île. Le climat y est beaucoup moins humide et les régimes de brises sont prédominants. Il apparaît ainsi que l'influence du relief est tout aussi fondamentale que les effets de l'insularité.

Quelques études ont été menées sur l'interaction des processus de brises aux îles Hawaii, îles aux reliefs et caractéristiques topographiques comparables à ceux de La Réunion [16]. Il apparaît que le phénomène de brises, dans ce type d'îles montagneuses, résulte de la conjugaison de deux composantes : les brises « de terre » et « de mer », et les brises « de pente ».

La figure 4 donne une représentation schématique de ce type de circulation. Pendant la nuit (Figure 4b), la terre se refroidit par rayonnement. Sa température devient plus basse que celle de la mer, provoquant l'établissement d'une brise dite « de terre » qui souffle de la terre vers la mer. En journée (Figure 4a), le réchauffement du sol inverse le différentiel de température. Le sol devient plus chaud que la mer, le courant d'air s'inverse et souffle alors de la mer vers la terre ; on parle alors de brise « de mer ».

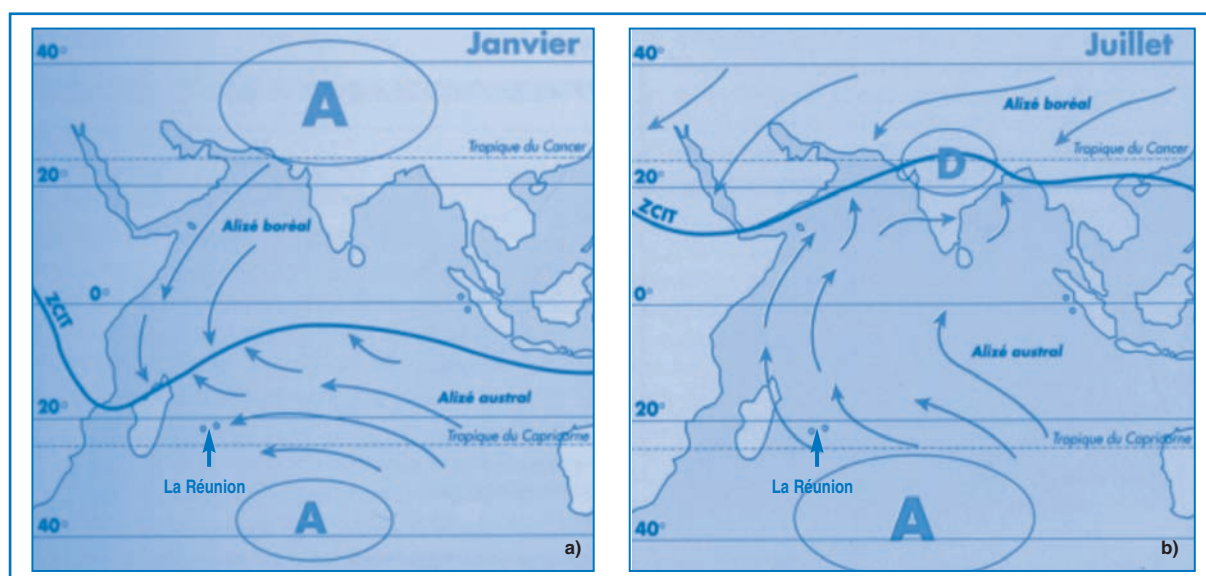


Figure 3.

Déplacement saisonnier de la zone de convergence intertropicale et des alizés au sud-ouest de l'océan Indien.

(Source : Atlas climatique de La Réunion. Généralités : le climat réunionnais 2000 ; 1657 : 13. Reproduit avec autorisation)

Seasonal displacement of the Inter Tropical Convergence and the over the South-Western Indian Ocean.

(Source: Atlas climatique de La Réunion. Généralités : le climat réunionnais 2000 ; 1657 : 13. Reproduced with permission)

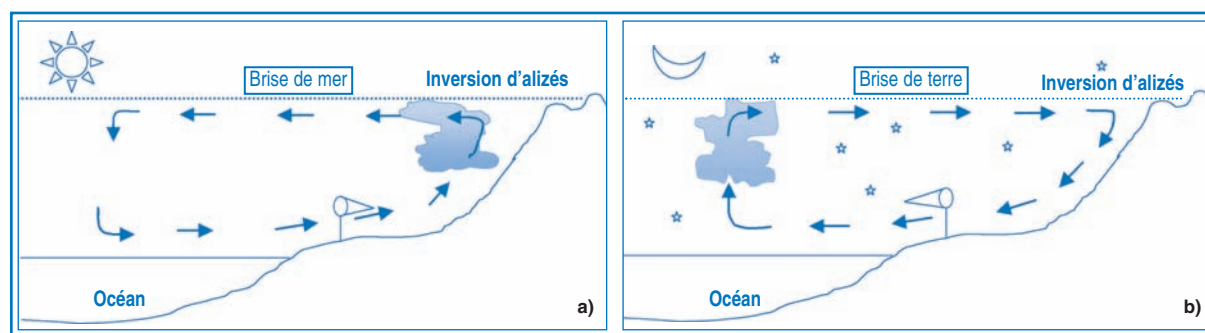


Figure 4.

Représentation schématique de la brise de terre et de la brise de mer à La Réunion :  
a) régime de brise de mer pendant le jour et b) régime de brise de terre pendant la nuit.  
(Réalisation : C. Bhugwant – ORA)

Schematic representation of the land and the sea breezes at La Réunion Island :  
a) sea breeze regime during daytime and b) land breeze regime at night time.  
(Created by: C. Bhugwant – ORA)

Tableau 1.

Application de la valeur limite de la concentration de benzène pour la protection de la santé humaine, de 2001 à 2010 en France.

Application of the limit value of benzene concentration for the human health, from 2001 to 2010 in France.

|                                                   | 2001 à 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|---------------------------------------------------|-------------|------|------|------|------|
| Marge de dépassement ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 5           | 4    | 2    | 5    | 1    |

Les brises de « pente » sont, quant à elles, provoquées par le relief. Elles remontent les pentes en journée et les descendent la nuit. Brises « de terre » ou « de mer » et brises « de pente » jouent dans le même sens, conjuguant leurs effets. La nuit, leur résultante, a tendance à créer une large circulation divergente et subsidente sur l'île qui, en situation non perturbée, favorise la dissipation des nuages.

L'ensemble de ces représentations dynamiques susceptibles de concerner l'île et la région ne constitue qu'un schéma conceptuel. Dans la réalité, les écoulements sont plus complexes et variables au cours de la journée et de l'année. Néanmoins ce schéma conceptuel est indispensable pour l'interprétation des mesures des constituants atmosphériques.

## Contexte réglementaire

Les valeurs, en termes d'objectifs de qualité, seuils d'alerte, seuils de recommandation et d'information et valeurs limites, pour chaque polluant sont définies dans l'Annexe I du décret n° 2002-213, du 15 février 2002 [17]. Concernant le benzène, les valeurs sont définies comme suit :

- objectif de qualité :  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne annuelle ;
- valeur limite pour la protection de la santé humaine :  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en moyenne annuelle, valable à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2010. Avant cette date, la valeur limite

applicable est la valeur de 2010 augmentée des marges de dépassement telles qu'elles sont indiquées dans le tableau 1.

## Le benzène dans l'air

### Origine

Le benzène fait partie de la famille des COV et plus particulièrement de celle des hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM). Il est libéré par évaporation du carburant automobile ou produit par les réactions de combustion dans les moteurs et émis dans les gaz d'échappement. Il provient majoritairement du trafic automobile, le reste des émissions étant lié aux processus industriels et de combustion. Les combustibles automobiles sont des produits pétroliers complexes composés principalement d'hydrocarbures paraffiniques, oléfiniques, naphthéniques et aromatiques. Les HAM constituent une partie importante de ces composés dont le benzène représente une certaine part (environ 1 %) en tant que polluant atmosphérique primaire.

### Impact sanitaire et environnemental

D'un point de vue toxicologique, le benzène est très nocif pour la santé humaine ; il peut provoquer des leucémies et des cancers [18]. À ce titre, il a été classé dans le groupe 1 du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) [1]. De plus, les COV participent également au bilan d'ozone troposphérique [2].

## Mise en œuvre expérimentale

### Choix des sites et des méthodes de mesure

Afin d'étudier la répartition spatiale et temporelle des composés atmosphériques sur des zones étendues et prédéfinies (urbaine, périurbaine, rurale...), l'utilisation des tubes à échantillonnage par diffusion s'est avérée intéressante. En effet, cette méthode peu onéreuse, permet de multiplier les points de mesures, ce qui permet d'atteindre un niveau élevé d'information sur la répartition du polluant dans la zone étudiée [19, 20]. Lors des différentes campagnes, la variabilité de la concentration de quelques traceurs atmosphériques tels que le benzène, le toluène et les xylènes a pu être étudiée.

Le choix des sites s'est porté principalement autour des stations d'essence se trouvant en zone urbaine de Saint-Denis et du Port. La concentration des polluants a été relevée suivant une rosace (quadrillage), avec un rayon de 300 m autour des stations d'essence. La figure 5a présente, à titre d'exemple, les points de mesures situés autour de la station d'essence Elf de Saint-Denis. On peut remarquer que ce site englobe des habitations, le complexe scolaire du Butor et la piscine municipale. La figure 5b présente un point de mesure situé en face de la gare routière de Saint-Paul. On peut y noter les différents capteurs (Radiello® et Perkin Elmer®) placés durant la première campagne de mars 2002.

Chaque site a été quadrillé par au moins 17 points afin de couvrir la zone d'étude de manière homogène. Au total, 38 points de prélèvements de benzène par campagne ont été choisis. Dans l'objectif de valider les mesures, des campagnes d'intercomparaison ont été effectuées entre différentes marques de capteurs destinés au même composé. Ces intercomparaisons ont eu lieu en parallèle avec les campagnes de mesures, sur 15 points prédéfinis initialement pour des zones urbaines, périurbaines et rurales.

### Principe de prélèvement

Les tubes à échantillonnage de BTX utilisés sont dits « échantillonneurs diffusifs », car l'échantillonnage est effectué par le processus de diffusion d'air, et ne nécessite aucune aspiration à l'aide de pompes.

Les échantillonneurs diffusifs de marque Radiello® fournis par la *Fondazione Salvatore Maugeri* (FSM), constitués de tubes en filet d'acier remplis du matériel adsorbant, sont placés à l'intérieur d'une membrane diffusive poreuse cylindrique. Cette géométrie permet une diffusion radiale, autour de la membrane poreuse. Concernant les échantillonneurs diffusifs de marque Perkin Elmer® fournis par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), l'échantillonnage suit une géométrie axiale, la face du tube adsorbant étant la surface de diffusion.

Pour les deux campagnes, des échantillonneurs diffusifs Radiello® contenant des adsorbants en charbon graphité ont été utilisés. Durant les campagnes de mesures, les tubes sont fixés sur des supports tels que les poteaux électriques, par exemple, à environ 2,50 m du sol. Ils ont été placés sur site pendant environ sept jours consécutifs, afin d'obtenir une exposition moyenne au benzène durant cette période.

### Analyse des échantillons

Les tubes issus des échantillonneurs diffusifs Radiello® ont été analysés par la *Fondazione Salvatore Maugeri*. Les échantillons recueillis avec des tubes Perkin Elmer® ont été analysés par l'INERIS.

Les tubes adsorbants en charbon graphité issus des échantillonneurs diffusifs Radiello® ont été désorbés thermiquement à 320 °C [21] par un désorbeur Perkin Elmer TurboMatrix®. L'analyse s'est faite ensuite par chromatographie en phase gazeuse (Perkin Elmer Autosystem XL® à colonne J&W PONA®) avec un détecteur à ionisation de flamme (FID).

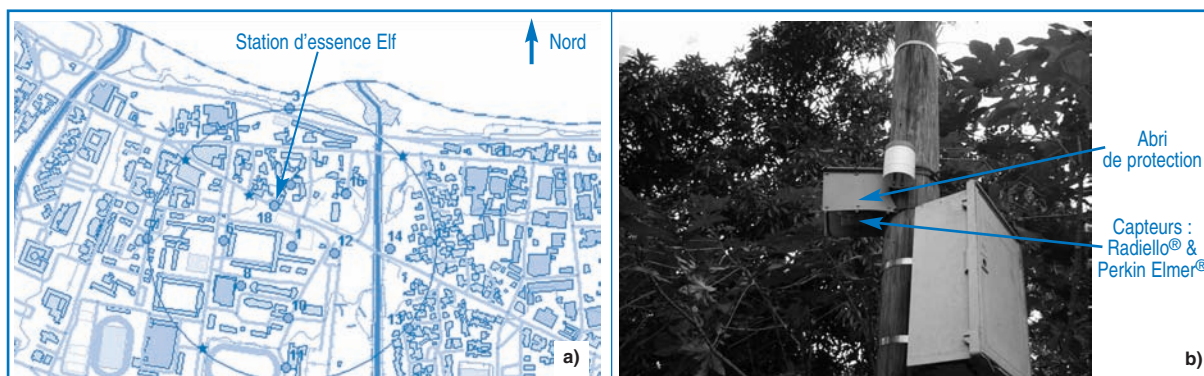


Figure 5.

Points de mesures situés a) autour de la station d'essence Elf de Saint-Denis et b) en face de la gare routière de Saint-Paul.

- a) Measurement points located around the Saint-Denis Elf petrol station.
- b) Measurement points located in front of the Saint-Paul bus station.

(Sources : Figure 5a : BD CARTO ©IGN, licence n° 5201.

Reproduit avec l'aimable autorisation de l'IGN / Reproduced with kind permission Figure 5b : Photo – C. Bhugwant – ORA)

De plus, les échantillonneurs diffusifs Radiello® contenant du charbon actif, utilisés lors des campagnes d'intercomparaison, ont été désorbés chimiquement [22], avec 2 ml de disulfure de carbone. L'analyse s'est faite ensuite par chromatographie en phase gazeuse (Hewlett Packard HP5890® à colonne HP PONA®, équipé d'échantillonneur automatique HP7673®), avec un détecteur à ionisation de flamme (FID).

Durant les campagnes d'intercomparaison, les tubes Perkin Elmer® en acier ont été également placés à côté des échantillonneurs Radiello®, afin d'avoir une approche sur l'incertitude des mesures. Ces échantillons, contenant le Carbotrap B® comme adsorbant, ont été désorbés thermiquement à 325 °C par un désorbeur Perkin Elmer ATD 400®. L'analyse s'est faite ensuite par chromatographie en phase gazeuse capillaire (chromatographe Chrompack à colonne CP Sil 5®) avec un détecteur à ionisation de flamme.

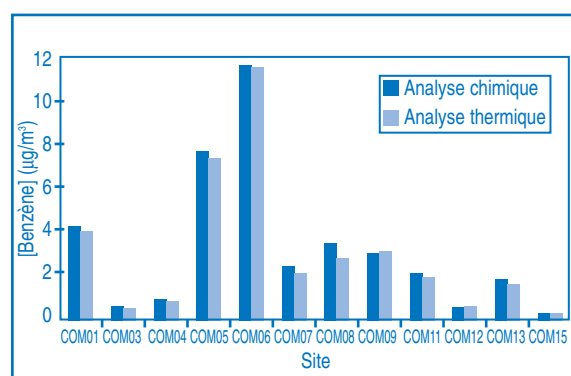


Figure 6.

Concentrations moyennes de benzène relevées sur 12 sites d'intercomparaison, à partir des tubes à diffusion Radiello®, en mars 2002. (Données : ORA)

Mean benzene concentrations measured at 12 intercomparison sites, using Radiello® diffusion tubes, during March 2002. (Data: ORA)

## Campagnes d'intercomparaison

L'objectif de l'intercomparaison était de connaître les écarts sur les mesures effectuées lors des deux campagnes. En raison de l'existence d'une similitude entre les résultats des deux campagnes, seuls ceux obtenus durant la première campagne sont présentés.

La figure 6 montre les concentrations de benzène relevées sur 12 sites par deux techniques d'échantillonnage et d'analyse différentes : adsorption par charbon actif puis désorption chimique et adsorption par charbon graphité puis désorption thermique. On note que pour différents types d'environnements (urbain, périurbain et rural) les deux techniques montrent la même variabilité, avec une différence maximale de 0,7 µg/m³, pour le benzène. Les résultats des campagnes d'intercomparaison entre les différents tubes d'échantillonnage de benzène ont montré sur chaque site et pour les deux campagnes de mesures, des valeurs comparables, avec un écart maximal de 10 % entre les différents capteurs.

## Campagnes de mesures autour des sources fixes

Le résumé des deux campagnes de mesures autour des deux sources fixes figure dans le tableau 2. Par souci de clarté pour le lecteur, les résultats de l'étude et les discussions associées ont été présentés pour chacun des deux sites, en y groupant les deux campagnes de mesures.

### Résultats des mesures effectuées à Saint-Denis

#### Concentrations en benzène autour de la station d'essence Elf

La figure 7 présente la distribution des concentrations moyennes de benzène relevées durant les deux campagnes de mesures effectuées du 25 mars au 2 avril 2002 (Figure 7a) et du 10 au 18 juin 2002 (Figure 7b), autour de la station d'essence Elf. Le tableau 3 résume les niveaux des concentrations de benzène et de toluène relevées durant ces deux campagnes de mesures.

Tableau 2.

Récapitulatif des campagnes et des mesures réalisées à deux saisons différentes en 2002, dans le cadre de la présente étude.

Summary of the measurement campaigns undertaken at two different seasons in 2002, in the frame of the present study.

| Sites de mesures                            | Mesures Campagne 1<br>(25 mars-2 avril 2002)                                                                                     | Mesures Campagne 2<br>(10-18 juin 2002)                                                                                          |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Station d'essence Elf<br><b>Saint-Denis</b> | Benzène et toluène<br>Données météorologiques<br>(vitesse et direction de vent,<br>hauteur de précipitations...) et trafic       | Benzène et toluène<br>Données météorologiques<br>(vitesse et direction de vent,<br>hauteur de précipitations...)                 |
| Station d'essence Caltex<br><b>Le Port</b>  | Benzène et toluène<br>Données météorologiques<br>(vitesse et direction de vent,<br>hauteur de précipitations,<br>température...) | Benzène et toluène<br>Données météorologiques<br>(vitesse et direction de vent,<br>hauteur de précipitations,<br>température...) |

Les concentrations de benzène varient dans la gamme 0,3 à 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sur l'ensemble des points de mesures autour de la station d'essence Elf, pour les deux campagnes. Concernant, le toluène, la même tendance est observée, avec une variation de 1,6 à 5,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour les deux campagnes. Durant la campagne d'été, il existe une très bonne corrélation entre le benzène et le toluène ( $R^2 = 0,91$ ), suggérant que ces deux polluants ont une source commune. En hiver austral, il y a également une très bonne corrélation entre le benzène et le toluène ( $R^2 = 0,92$ ).

La répartition cartographique [10, 23] montre que la distribution des concentrations de benzène présente un gradient de concentration homogène autour de la station d'essence comparable pour les deux campagnes, avec des concentrations légèrement plus élevées en hiver qu'en été. Des valeurs élevées de benzène sont observées autour de la RN2 et des faibles valeurs sont relevées dans l'enceinte du complexe scolaire du Butor. De manière générale, les plus fortes concentrations de benzène sont observées à proximité de la station d'essence Elf, suggérant qu'en premier lieu cette dernière est la principale source d'émissions de ce polluant sur ce site. *A contrario*, les faibles valeurs de benzène sont relevées dans des zones éloignées des sources d'émission, qui bénéficient d'une topographie faisant

écran aux polluants gazeux. Nous avons également effectué des mesures de benzène à Saint-François (point éloigné des habitations), considéré comme un point de mesure dit « de fond » pour Saint-Denis. Les concentrations de benzène varient dans l'intervalle 0,1-0,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour les deux campagnes.

Ces résultats mettent en évidence le fait que les concentrations de benzène relevées autour de la station d'essence Elf, sont deux à cinq fois supérieures à celles des concentrations de fond sur Saint-Denis. De plus, la distribution de benzène est assez homogène et la concentration maximale s'explique par la proximité de la station d'essence et de la RN2. Nous pouvons également remarquer que des concentrations plus importantes sont aussi relevées sur la partie nord à nord-est, par rapport à la station d'essence Elf. Ceci pourrait être dû à une contribution des stations d'essence voisines (Total et Esso) suite à une dispersion par les alizés des polluants issus de ces sources.

Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, on n'observe pas de concentrations très élevées de benzène dans l'environnement proche de la station d'essence. Ceci peut s'expliquer par la présence de brises terre-mer, des alizés et de précipitations qui participent alors à une « bonne » dispersion de ce polluant.

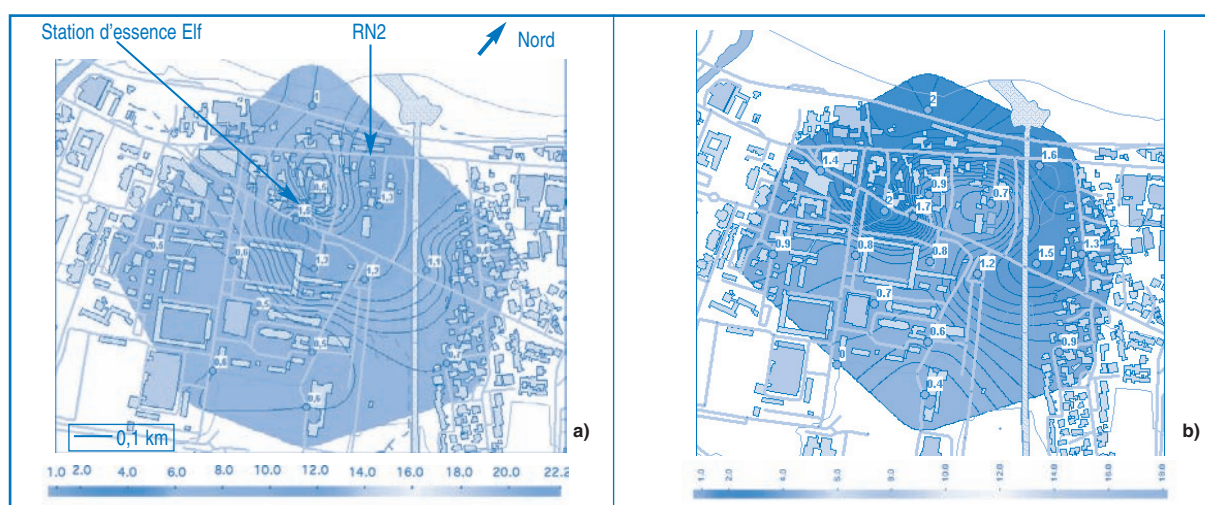


Figure 7.

Distribution des concentrations moyennes de benzène relevées a) du 25 mars au 2 avril 2002 et b) du 10 au 18 juin 2002 autour de la station d'essence Elf à Saint-Denis.

Distribution of the mean benzene concentrations measured a) from 25th March to 2nd April 2002 and b) from 11th to 18th June 2002 in the vicinity of the Saint-Denis Elf petrol station.

(Source : BD CARTO ©IGN, licence n° 5201.

Reproduit avec l'aimable autorisation de l'IGN / Reproduced with kind permission)

Tableau 3.

Gamme de concentrations moyennes de benzène et toluène relevées autour de la station d'essence Elf de Saint-Denis durant les campagnes d'été et d'hiver australs 2002.

Mean benzene and toluene concentration ranges obtained around the Saint-Denis Elf Petrol station during the 2002 austral summer and winter campaigns.

|                                        | Campagne 1 :<br>été austral | Campagne 2<br>hiver austral |
|----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| [Benzène] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 0,5-1,5                     | 0,3-2                       |
| [Toluène] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 1,8-5,4                     | 1,6-5,5                     |

*Météorologie**(vitesse et direction de vent) à Saint-Denis*

Afin de déterminer l'influence de la météorologie sur la variabilité de la concentration de benzène, une analyse des données météorologiques relevées sur la station de Gillot a été effectuée. La figure 8 présente la rose des vents (fréquence d'occurrence de la direction des vents) calculée pendant la nuit (21 h 00 et 7 h 00 : traits  $\square$ ) et pendant le jour (8 h 00 et 20 h 00 : traits  $\triangle$ ) du 25 mars au 2 avril 2002 (Figure 8a) et du 10 au 18 juin 2002 (Figure 8b) à Saint-Denis (Gillot).

Les relevés météorologiques horaires montrent que durant les premiers jours de la campagne d'été (mars-avril 2002), les masses d'air ont de faibles vitesses (2-3 m/s), avec une origine est-sud-est ou nord-nord-ouest ( $\sim 330$ - $360^\circ$  : air marin). Pendant le reste de la campagne, les masses d'air proviennent la nuit du sud-est et le jour d'est-nord-est, avec des vitesses variant entre 3-4 m/s (le jour) et 10-12 m/s (la nuit). Du nord-est au sud-ouest du site d'étude se trouve une zone d'habitations où l'activité anthropique est relativement importante (vente de carburants, trafic automobile). En hiver austral (juin 2002), les masses d'air sont relativement stables, avec une provenance du secteur est (la nuit) à sud-est (le jour). Ces masses d'air proviennent de la RN2 et de zones habitées (Sainte-Marie, par exemple). Durant cette campagne, la vitesse du vent présente une forte intensité (3-14 m/s) comparativement à la campagne d'été. Les plus faibles vitesses (3-6 m/s) sont observées pendant la nuit alors que les plus importantes sont mesurées pendant le jour (8-14 m/s).

On constate donc qu'il existe un changement notable des caractéristiques des masses d'air durant les deux campagnes, qui ne peuvent donc expliquer la faible variabilité saisonnière des concentrations ainsi que la distribution du benzène observée à Saint-Denis. Par ailleurs, les campagnes de mesures ayant eu lieu en dehors des vacances scolaires, ces résultats laissent présumer que « l'effet de sources » a été pratiquement identique durant ces deux campagnes. D'autres processus comme les dépôts (secs et humides) pourraient donc expliquer ces faibles concentrations de benzène observées en hiver austral.

Ces résultats suggèrent que les émissions liées d'une part à l'activité de la station d'essence Elf et des autres stations d'essence proches, et d'autre part à l'activité du trafic automobile, sont à l'origine des niveaux de concentrations de benzène relevées autour de cette station d'essence. La topographie du site peut aussi en partie expliquer la variabilité de la concentration du benzène relevée autour de cette station exposée aux vents.

*Pluviométrie et température à Saint-Denis*

Des données pluviométriques et de température ambiante collectées à Gillot par Météo-France durant les deux campagnes ont également été analysées dans le cadre de cette étude. Des travaux antérieurs soulignent que la pluie peut avoir une certaine influence sur les concentrations des constituants atmosphériques, ceci par des processus de lessivage [24, 25]. Dans ce contexte, ces données ont été analysées afin de déterminer quantitativement leur influence sur les concentrations de benzène.

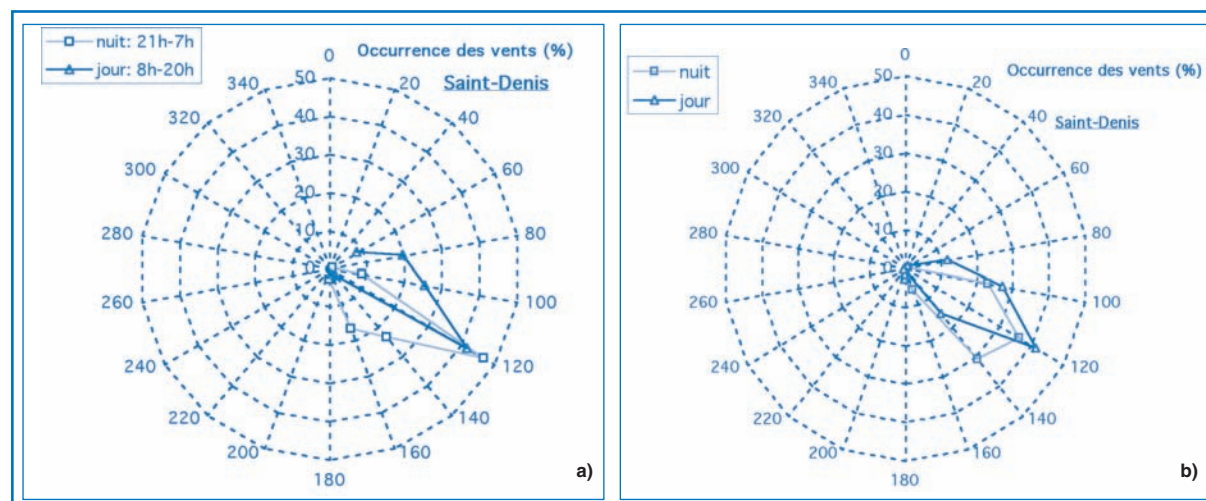


Figure 8.

Évolution de la rose des vents (fréquence d'occurrence de la direction des vents) calculée pendant la nuit (21 h 00 et 7 h 00 : traits  $\square$ ) et pendant le jour (8 h 00 et 20 h 00 : traits  $\triangle$ ) a) du 25 mars au 2 avril 2002 et b) du 10 au 18 juin 2002 à Saint-Denis (Gillot).  
(Données : Météo-France La Réunion)

Evolution of wind rose (frequency of occurrence of wind direction) calculated for night time (9.00 pm to 7.00 am : line  $\square$ ) and day time (8 am to 8.00 pm : line  $\triangle$ ) a) from the 25th March 2002 to the 2nd April 2002 and b) from 11th to 18th June 2002 at Saint-Denis (Gillot).  
(Data: Météo-France La Réunion)

La hauteur des précipitations journalières (en mm) relevée du 25 mars au 2 avril 2002 varie entre 0 et 0,4 mm et est nulle (0 mm) entre le 10 et le 18 juin 2002. Ces résultats montrent que les précipitations ne peuvent expliquer la relative baisse des concentrations de benzène relevée lors de la seconde campagne. Concernant la température, on note une faible variation entre l'été (23-32 °C) et l'hiver (19-29 °C), suggérant une influence, par des processus d'évaporation, sur la variabilité de la concentration de benzène.

### Résultats des mesures effectuées au Port

#### Concentrations en benzène autour de la station d'essence Caltex

Des mesures de concentration de benzène ont également été menées sur la partie nord-ouest de l'île, dans la commune du Port. La figure 9 présente la distribution autour de la station d'essence Caltex des concentrations moyennes de benzène relevées durant les deux campagnes de mesures : du 25 mars au 2 avril 2002 (Figure 9a) et du 11 au 18 juin 2002

(Figure 9b). Le tableau 4 résume les niveaux des concentrations de benzène et toluène relevés durant les deux campagnes sur ce site sous le vent. On constate que les concentrations de benzène varient dans la gamme 0,8-11,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour les deux campagnes. La plus forte concentration de benzène (11,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) est relevée sur un point situé à environ 8 m des pompes de remplissage de la station d'essence et à environ 4 m des événements. Concernant, le toluène, la gamme de concentrations s'échelonne de 2,3 à 27,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , pour ces deux campagnes, avec de fortes concentrations proches de la station. En été, comme en hiver, on observe une très bonne corrélation entre le benzène et le toluène ( $R^2 = 0,97$  en été et  $R^2 = 0,98$  en hiver), suggérant des sources communes (notamment l'activité de la station d'essence et du trafic automobile) de ces deux polluants. On observe par ailleurs que le niveau et la variabilité des concentrations de benzène sont différents de ceux relevés autour de la station d'essence Elf de Saint-Denis. Ceci peut en partie s'expliquer par l'intensité des sources émettrices, conjuguée à une faible influence des processus dynamiques (notamment les alizés), sur ce site sous le vent.

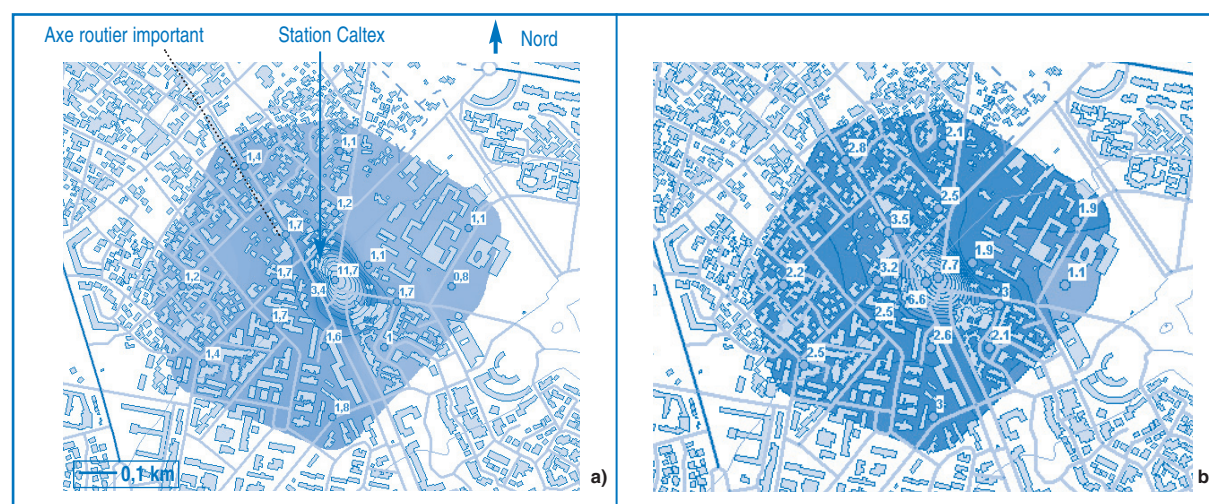


Figure 9.

Distribution des concentrations moyennes de benzène relevées a) du 25 mars au 2 avril 2002 et b) du 11 au 18 juin 2002 autour de la station d'essence Caltex du Port.

Distribution of the mean benzene concentrations measured a) from 25th March to 2nd April 2002 and b) from 11th to 18th June 2002 in the vicinity of the Le Port Caltex petrol station.

(Source : BD CARTO ©IGN, licence n° 5201.

Reproduit avec l'aimable autorisation de l'IGN / Reproduced with kind permission)

Tableau 4.

Gamme de concentrations moyennes de benzène et toluène relevées autour de la station d'essence Caltex du Port durant les campagnes d'été et d'hiver australs 2002.

Mean benzene and toluene concentration ranges obtained around the Le Port Caltex petrol station during the 2002 austral summer and winter campaigns.

|                                        | Campagne 1 : été austral | Campagne 2 : hiver austral |
|----------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| [Benzène] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 0,8-11,7                 | 1,1-7,7                    |
| [Toluène] ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 2,3-27,5                 | 3,0-21,9                   |

Une comparaison avec des valeurs précédentes (1999-2000) de benzène relevées sur ce site montre que le niveau de concentration de ce polluant a peu varié depuis 2 ans [14, 23]. On observe également que la station d'essence Caltex est desservie par des axes routiers, dont le principal enregistre des valeurs élevées de benzène. Ces résultats suggèrent que l'activité du trafic automobile contribue à la variabilité des concentrations de benzène sur ce site. La représentation cartographique fait apparaître des concentrations de benzène plus élevées à proximité du centre-ville, où la circulation automobile est plus importante.

Il est important de souligner que deux autres stations d'essence : Shell et Esso sont situées à environ 300 et 400 m respectivement au sud-sud-est de la station Caltex. Ces stations proches peuvent en partie contribuer à l'augmentation des concentrations de benzène autour de la station d'essence Caltex. En effet, les valeurs de benzène relevées en hiver autour de ces deux stations d'essence varient dans la gamme 0,7-3,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nous constatons également qu'il existe une saisonnalité des concentrations de benzène différente de celle de Saint-Denis, avec des valeurs élevées en hiver et faibles en été. Ceci peut s'expliquer par la variabilité de l'intensité des sources.

#### La météorologie (vitesse et direction de vent) au Port

Afin d'approfondir l'étude, des données météorologiques collectées au Port par Météo-France (station météorologique située au Port Ouest) ont été analysées. Cette station se trouve à proximité de la

station d'essence Caltex (distance ~ 3 km). Elle est donc représentative de l'environnement de ce site de mesures. La figure 10 présente la rose des vents (fréquence d'occurrence de la direction des vents) calculée pendant la nuit (21 h 00 et 7 h 00 : traits  $\triangleleft$ ) et pendant le jour (8 h 00 et 20 h 00 : traits  $\blacktriangleright$ ) du 25 mars au 2 avril 2002 (Figure 10a) et du 10 au 18 juin 2002 (Figure 10b) au Port.

Durant l'été austral, une régularité de la direction et de la vitesse des vents est observée pendant toute la campagne. Les masses d'air ont une origine ouest-sud-ouest (air plutôt marin) avec de fortes vitesses de vent (maximale ~ 5 m/s) pendant le jour, et une origine est-sud-est (intérieur de l'île) avec une faible intensité (maximale ~ 2 m/s) des vents pendant la nuit. On remarque donc que l'influence des brises terre-mer est prépondérante sur ce site. En hiver austral, les masses d'air demeurent également relativement stables, avec une origine ouest-sud-ouest et une vitesse maximale de 6 m/s pendant le jour. Pendant la nuit, les masses d'air ont une origine est-sud-est avec une vitesse maximale de ~ 2 m/s.

De manière générale, la vitesse des vents est modérée, comparativement au site de Saint-Denis. Ceci laisse présumer que les processus dynamiques peuvent se conjuguer avec l'activité des sources de benzène pour expliquer la variabilité des concentrations de ce polluant.

#### Pluviométrie et température au Port

La hauteur des précipitations journalières (en mm) relevée du 25 mars au 2 avril 2002 varie entre 0 et 2,8 mm (faibles) et, du 10 au 18 juin 2002, entre 0 et

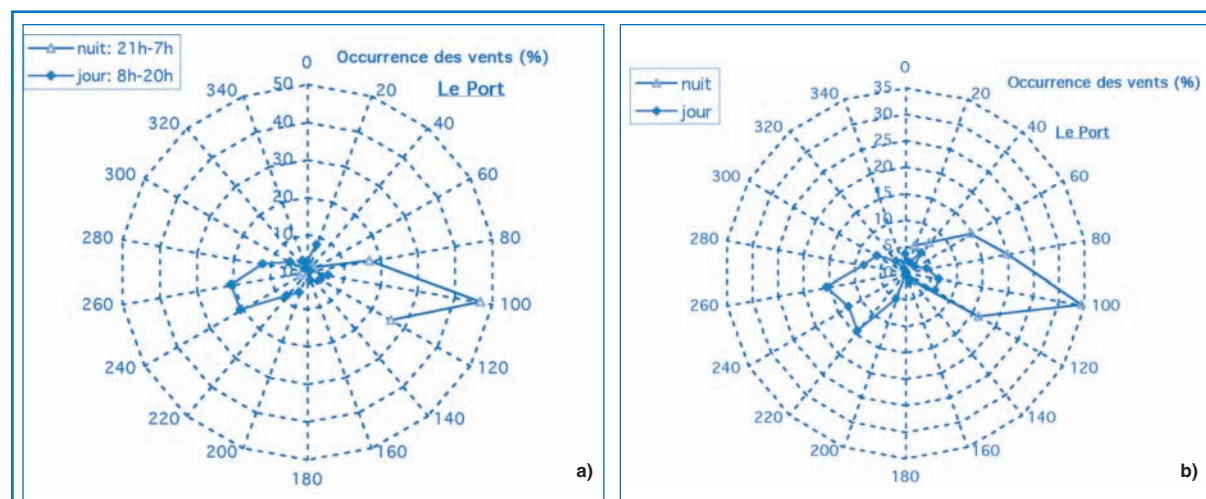


Figure 10.

Évolution de la rose des vents (fréquence d'occurrence de la direction des vents) calculée pendant la nuit (21 h 00 et 7 h 00 : traits  $\triangleleft$ ) et pendant le jour (8 h 00 et 20 h 00 : traits  $\blacktriangleright$ ) a) du 25 mars au 2 avril 2002 et b) du 11 au 18 juin 2002 au Port.  
(Données : Météo-France La Réunion)

Evolution of wind rose (frequency of occurrence of wind direction) calculated for night time (9.00 pm to 7.00 am : line  $\triangleleft$ ) and day time (8 am to 8.00 pm : line  $\blacktriangleright$ ) a) from the 25th March 2002 to the 2nd April 2002 and b) from 11th to 18th June 2002 at Le Port.  
(Data: Météo-France La Réunion)

6,6 mm (modérées). Ce paramètre météorologique peut donc en partie expliquer la variabilité des concentrations de benzène autour de la station Caltex du Port.

La température journalière relevée durant la campagne d'été (25 mars au 2 avril 2002) varie entre 20 et 30 °C, alors qu'en hiver (10 au 18 juin 2002) elle varie entre 18 et 26,5 °C. Ceci suggère donc que ce paramètre peut en partie contribuer à la variabilité de la concentration de benzène, comme à Saint-Denis.

## Résultats obtenus dans d'autres régions

Il était intéressant de présenter des résultats des études menées dans diverses régions, et ayant des caractéristiques et un environnement différent (géographique, météorologique, insularité...) de celui de La Réunion. Il existe des travaux portant sur les mesures des concentrations de benzène dans l'air ambiant, notamment en ville, à l'intérieur des locaux et suite à l'exposition des personnes [15, 19, 20, 24]. Parmi ces travaux, seuls ceux ayant eu lieu dans l'air ambiant des zones urbaines/périurbaines seront présentés, afin d'être comparés avec les résultats de la présente étude. Le tableau 5 présente à titre d'indication les résultats (liste non exhaustive) de quelques études (basées pour la plupart sur des campagnes de mesures) sur le benzène menées dans des villes européennes depuis plusieurs années.

En résumé, on observe que les niveaux des concentrations de benzène relevés dans l'île de La Réunion sont comparables en ordre de grandeur à celles relevées en régions métropoles de latitudes tempérées.

## Conclusion

L'objet de cette étude était d'évaluer « l'état initial » de la concentration de benzène autour de stations d'essence et de déterminer sa variation saisonnière, avant le passage aux phases I et II, c'est-à-dire la mise en place des dispositifs de récupération des vapeurs lors du chargement/déchargement des camions-citernes et du remplissage des véhicules particuliers, respectivement. Pour ce faire, deux campagnes de mesures atmosphériques ont été effectuées à deux saisons différentes : en mars-avril 2002 et en juin 2002. Lors de la première campagne, une variabilité importante des concentrations de benzène a été observée suivant la situation géographique des sites. Sur la station d'essence Caltex située au nord-ouest de l'île, les concentrations maximales de benzène se situent à proximité de la station d'essence ( $\leq 150$  m) pour ensuite diminuer rapidement au bout d'une centaine de mètres. On constate également que les points de mesures proches des axes routiers importants présentent des concentrations de benzène plus élevées.

L'ensemble des résultats obtenus, durant les deux campagnes de mesures, fait ressortir les points suivants :

- une étude comparative avec différents types de capteurs et d'analyses montre une bonne cohérence sur l'ensemble des mesures. Cette constatation a été notée durant les deux campagnes de mesures. Une variation saisonnière de la concentration de benzène a également été constatée, avec des valeurs modérées en été et fortes en hiver. La principale cause de cette variabilité saisonnière est « l'effet de source », en particulier pour des points localisés à proximité de zones urbaines/périurbaines ;

Tableau 5.

Résultats des concentrations de benzène relevées dans des régions urbaines des latitudes tempérées.

Results of benzene concentrations measured in different urban temperate latitude regions.

| Étude/Projet                        | Lieu de mesures                                                                                                        | Milieu | Benzène ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )                                 | Période/Année                                                              | Référence                        |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Multifund Operative Programme (MOP) | Catane (Italie)                                                                                                        | urbain | 3,9-10,8<br>4,3-16,3                                                 | été 1996<br>(10-06-96 au 09-07-96)<br>hiver 1996<br>(19-02-96 au 18-03-96) | [26]                             |
| LIFE « MACBETH »                    | Anvers (Belgique)<br>Athènes (Grèce)<br>Copenhague (Danemark)<br>Murcie (Espagne)<br>Padoue (Italie)<br>Rouen (France) | urbain | 1,2-25,9<br>6,2-74,2<br>0,6-11,3<br>2,9-47,0<br>1,2-43,5<br>1,4-13,4 | Sept. 1997-Oct. 1998                                                       | [19]                             |
| LIFE « RESOLUTION »                 | Neuilly-sur-Seine (Paris)<br>Dublin (Irlande)<br>Rome (Italie)<br>Madrid (Espagne)                                     | urbain | 1,2-6,9<br>0,4-3,3<br>0,5-13,5<br>1,4-19,8                           | Nov.-Déc. 2000                                                             | [20, 27]<br>[20]<br>[20]<br>[20] |

- des concentrations élevées de benzène se situent à proximité des axes routiers et en zones urbaines, alors que des faibles valeurs de ce polluant sont mesurées en zones rurales.

Les concentrations de benzène relevées autour de la station Caltex sont plus élevées que celles relevées autour de la station Elf. Sur cette dernière, on n'observe pas de caractéristiques particulières dans la distribution de la concentration du benzène, contrairement à la station Caltex où le maximum est enregistré sur le point le plus proche de la station.

Cette tendance est observée durant les deux campagnes. Cette importante différence de distribution du polluant d'un secteur à l'autre de l'île peut en partie être expliquée par les effets de brises terrestres, qui diffèrent suivant la localisation. La variabilité saisonnière des concentrations de benzène s'explique principalement par la variabilité de l'intensité des sources. Cependant, les conditions météorologiques et le relief peuvent également expliquer en partie la variabilité de la concentration de ce polluant.

Les résultats de cette étude constituent une première pour La Réunion et représentent une base de données importante pour des analyses complémentaires, notamment concernant des études épidémiologiques. Il est indispensable de refaire d'autres campagnes de mesures, après le passage aux phases I et II. Il est également important d'effectuer un suivi sur des points de mesures où des niveaux élevés de concentration de benzène ( $\geq 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ont été observés, afin de déterminer si l'objectif de qualité et la valeur limite sont respectés. Il serait également intéressant d'effectuer des campagnes de mesures du benzène, en distinguant les périodes de vacances scolaires et

celles d'activités habituelles. Enfin, les résultats de cette étude peuvent également être utilisés comme paramètres d'entrée dans des modèles de chimie atmosphérique et de transport.

## Remerciements

Nous remercions le Conseil régional de La Réunion, le Conseil général de La Réunion, la Communauté intercommunale du nord de La Réunion (CINOR), le Territoire de la côte ouest (TCO), l'Agence nationale de la valorisation de la recherche (ANVAR), l'Agence nationale de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), la Société réunionnaise des produits pétroliers (SRPP), Ingénierie, Conception et Maîtrise (InCOM), et l'Observatoire réunionnais de l'air (ORA), qui ont financé cette étude. Nous remercions aussi les membres du Groupe de travail Post-Doc pour leur collaboration et leur participation aux différentes étapes de l'étude.

Nos remerciements vont également, pour leur soutien et leurs conseils, au Dr C. Roth, d'Airparif ; au Dr H. Plaisance, de l'École de mines de Douai ; au Dr. V. Cocheo, de la *Fondazione Salvatore Maugeri* ; à Mme A. Frezier, de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS). Nous remercions Mme C. Boaretto, de la *Fondazione Salvatore Maugeri*, pour la préparation et l'analyse des échantillons de benzène. Enfin, nos sincères remerciements à Météo-France, pour la mise à disposition des données météorologiques nécessaires à ce travail.

### Mots clés

Benzène. Toluène. Activité anthropique. Source fixe. Trafic automobile. Pollution. Loi sur l'air. Valeur limite. Tropical marin.

### Keywords

Benzene. Toluene. Anthropogenic activity. Stationary source. Vehicle traffic. Pollution. Air law. Limit value. Tropical marine.

## Références

1. IARC (International Agency for Research on Cancer), IARC Monographs [Suppl.] 1987; 7: 120-1.
2. Finlayson-Pitts B, Pitts JN Jr. Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere, Theory, Experiments and Applications. Finlayson-Pitts B, Pitts JN Jr (eds), Academic Press 1999.
3. Levine JS. Biomass Burning and Global Change. Remote sensing, modeling and Inventory development, and Biomass burning in Africa 1996; 1.
4. Monod A. La réactivité troposphérique de composés organiques oxygénés en phase aqueuse : Étude expérimentale et évaluation de son impact sur la capacité oxydante de l'atmosphère par une approche multiphasique. Thèse, Université Paris VII, 1997.
5. Brémaud PJ, Taupin F, Thompson AM, Chaumerliac N. Ozone night time recovery in the marine boundary layer: measurement and simulation at Reunion Island. *J Geophys Res* 1998; 103: 3463-73.
6. Bhugwant C, Cachier H, Brémaud P, Roumeau S, Leveau J. Chemical effect of carbonaceous aerosols on the diurnal cycle of MBL ozone at a tropical site: Measurements and Simulations. *Tellus B* 2000; 52 (5): 1232-48.
7. Bhugwant C, Cachier H, Bessafi M, Leveau J. Impact of Traffic on Black Carbon Aerosol Concentration at la Réunion Island (South Indian Ocean). *Atmos Environ* 2000; 34: 3463-73.
8. Lecloirec P. Les composés organiques volatils (COV) dans l'environnement, Éd. Lavoisier TEC & DOC 1998.
9. Bhugwant, C. Étude physico-chimique des aérosols de combustion et de l'ozone troposphérique à La Réunion. Thèse, Université de La Réunion, septembre 2001.
10. Bhugwant C, Hoareau JL. Variability of NO<sub>2</sub> at a fairly polluted island over the South Western Indian Ocean. *Atmos Res* 2003; 66 (4): 241-59.
11. De Saeger E, Perez Ballesta P. Measurement of BTX levels in the vicinity of petrol stations in Brussels (1993-1994) NO<sub>2</sub> and BTX monitoring campaigns by diffusive samplers. ERLAP, EUR 16309 EN, 1995.
12. INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques). Étude de la distribution des concentrations en BTX autour d'une station-service, Rapport final, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Loi sur l'Air Convention n° 13-98, rédigé par Gonzalez-Flesca N, Vardoulakis S, Pinard JC, Frezier A, INERIS-DRC-00-20889-ERSA-n° 134,-Ngo/CQ, 2000.
13. Bogo H, Gomez DR, Reich SL, Negri RM, San Roman E. Traffic pollution in a downtown site of Buenos Aires City. *Atmos Environ* 2001; 35: 1717-27.
14. Bhugwant C. Étude de la qualité de l'air sur le projet de la route des Tamarins, Rapport final, DDE, juin 2001.
15. Météo-France. Atlas climatique de La Réunion 2000.
16. Hastenrath S. Climate dynamics of the tropics, Updated from Climate and circulation of the tropics. Kluwer Academic Publishers, London 1991.
17. Code de l'environnement, Législation et Réglementation, Commission Supérieure de Codification. Éd. Direction des Journaux Officiels 2000.
18. WHO (World Health Organization : Regional Office for Europe) : WHO Air Quality Guidelines for Europe 1996.
19. MACBETH, Monitoring of Atmospheric Concentration of Benzene in European Towns and Homes, project LIFE 96 ENV/IT/070, final report, Padua 1999.
20. RESOLUTION, Development of a high spatial resolution atmospheric monitoring model to verify the actual emissions reduction of ozone precursors foreseen by « Auto-Oil » program, project LIFE 99 ENV/IT/081, final report, Padua 2002.
21. Bates M, Gonzalez-Flesca N, Cocheo V, Sokhi R. Ambient volatile organic compound monitoring by diffusive sampling. Compatibility of high uptake rate samplers with thermal desorption. *Analyst* 1977 ; 122 : 1481-4.
22. Cocheo V, Boarett, C, Sacco P. High uptake rate radial diffusive sampler suitable for both solvent and thermal desorption. *Am Ind Hyg Assoc J* 1996 ; 57 : 897-904.
23. Bhugwant C. Étude de la distribution des concentrations en benzène autour de sources fixes à La Réunion. Rapport final, mars 2003.
24. Charlson RJ, Ogren JA. The atmospheric cycle of elemental carbon, Particulate carbon : Atmospheric life cycle. Wolff GT, Klimisch RL (eds) 1982 ; 6-16.
25. Ogren JA, Groblicki PJ, Charlson RJ. Measurement of the removal rate of elemental carbon from the atmosphere. *Sci Tot Environ* 1984 ; 36 : 329-38.
26. Pérez Ballesta P, Parrissat M, De Saeger E, Cancenlinha J, Galatà R. BTX monitoring campaign in the City of Catania, ERLAP, EUR 17272 EN, 1997.
27. AIRPARIF Actualité. Les premiers résultats de la campagne LIFE « RESOLUTION » : un effet de loupe sur l'Île-de-France, février 2001 ; 14.