

Origine du chlore particulaire sur le littoral Guyanais

Alexis JEANNOT

2010



Tuteur pédagogique
Jean-Luc BESOMBES
Tuteur entreprise
Kathy PANECHOU-PULCHERIE



Observatoire Régional de l'air de Guyane
(ORA)

Pointe Buzaré BP 1059
97345 Cayenne
Tel : 0594282270
Fax : 0594303258



UNIVERSITE
CHAMBERY
ANNECY
DE
SAVOIE

Remerciements

Ce stage a été effectué au sein de l'Observatoire Régional de l'Air de Cayenne, dans le cadre de ma formation en master de l'université de Savoie.

Je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à Kathy Panechou-Pulcherie, Rodney Pansa et Maria Genevieve pour leur accueil au sein de l'ORA.

Je remercie également Jack Molinié et Jean-Luc Besombes pour l'aide technique qu'ils m'ont apportée lors de cette étude.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous les membres du bureau de l'ORA, et plus particulièrement à monsieur Rodolphe Sorps pour m'avoir permis d'effectuer ce stage.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu et aidé dans la réalisation de mon projet en Guyane (hébergement, visite de la région...)

J'adresse également mes remerciements à l'université de Savoie pour m'avoir permis de professionnaliser mon parcours par l'exécution de ce deuxième stage en milieu professionnel.

Sommaire

A)	Introduction.....	5
I.	Structure et compétence de l'ORA.....	5
II.	Gestion de l'ORA.....	6
B)	Evaluation des concentrations en chlore particulaire d'origine naturelle.....	7
I.	Contexte de l'étude.....	7
1)	Objectifs du plan de mesure.....	7
2)	Sites de prélèvements.....	7
3)	Dispositif.....	10
4)	Résultats obtenus avec les bacs à eau.....	10
5)	Résultats obtenus par la méthode du barbotage.....	12
II.	Contexte environnemental de la Guyane.....	12
1)	Saisons guyanaises.....	12
2)	Transfert du chlore de l'Océan à l'atmosphère.....	14
a)	Emission et dispersion du sel marin.....	14
b)	Transformations subies par le chlore.....	15
c)	Immissions du chlore présent dans l'atmosphère.....	16
III.	Etude des Paramètres météorologiques.....	17
1)	Vent.....	17
a)	Méthode d'interprétation des résultats.....	17
b)	Couplage vitesse / direction du vent.....	17
2)	Particules d'origines naturelles.....	21
3)	Pluviométrie.....	24
4)	Humidité relative et salinité de l'eau.....	24
a)	Humidité relative mesurée au sol.....	24
b)	Salinité de l'eau.....	25
IV.	Discussions des résultats.....	25
1)	Vent.....	25
a)	Résultats de Kourou.....	26
b)	Résultats de Sinnamary.....	27
c)	Comparaison des résultats de Kourou et de Sinnamary.....	29
2)	Particules.....	29
3)	Vent et particules.....	32
a)	Résultats de Kourou.....	32

b)	Résultats de Sinnamary	34
c)	Comparaison des résultats de Kourou et de Sinnamary	35
4)	Pluviométrie	38
a)	Evolution de la concentration en chlore particulaire en fonction de la pluviométrie	38
b)	Résultats de Kourou	39
c)	Résultats de Sinnamary	40
d)	Comparaison des résultats de Kourou et de Sinnamary	40
V.	Conclusion	41
C)	Impact éventuel des lancements d'Ariane V sur l'environnement	43
I.	Etude des retombées du nuage de combustion en Guyane.	43
1)	Caractéristiques d'Ariane V.	43
2)	Résultats obtenus de 2005 à 2008	44
3)	Paramètres météorologiques.....	46
a)	Vent :	46
b)	Stabilité atmosphérique	46
c)	Pluviométrie	47
d)	Pollution inconnue de nos échantillons	47
4)	Discussion des résultats	49
a)	Impact à Sinnamary	49
b)	Impact à Kourou	50
c)	Impact simultané à Kourou et à Sinnamary	53
5)	Conclusion	58
II.	Destruction de la couche d'ozone par l'activité spatiale	61
1)	Généralité sur la couche d'ozone.....	61
2)	Impact éventuel de l'activité spatiale dans la destruction de la couche d'ozone.....	61
a)	Impact à une échelle local.	62
b)	Impact à une échelle synoptique.	64
3)	Impact de l'activité spatial sur la couche d'ozone dans les années futures.	66
a)	Evolution du marché du spatial.....	66
b)	Mise en place de la surveillance de la couche d'ozone.....	67
D)	Conclusion	68
	Bibliographie	69
	Annexes	71
	Table des illustrations.....	73

A) Introduction

L'une des spécificités de la Guyane est la présence du centre de lancement européen de fusée spatial, qui est situé entre les villes de Kourou et de Sinnamary. Une étude menée par l'INERIS en 2001 et 2002 a révélé qu'une surveillance du chlorure d'hydrogène serait opportune. Donc, de fin 2004 à fin 2008, une campagne de mesures a été mise en place par l'Observatoire Régional de l'Air de Guyane (ORA), afin de déterminer l'impact de l'activité spatiale sur la ville de Sinnamary. Des prélèvements d'air furent effectués en dehors des périodes de tir afin d'évaluer le bruit de fond naturel en chlore dû à la proximité direct de l'Océan Atlantique.

Dans un premier temps, après avoir présenté l'ORA, nous décrirons les paramètres météorologiques ayant une influence sur la présence de chlore dans l'atmosphère Guyanaise. Cela permettra de différencier la part naturelle et la part anthropique des émissions en chlore.

Ensuite, nous en déduirons les retombées en HCl sur les villes de Kourou et de Sinnamary lors de chaque lancement.

Et enfin, nous réaliserons un état des lieux des composés chimiques émis par Ariane V susceptibles de détruire la couche d'ozone.

I. Structure et compétence de l'ORA

L'ORA fut créé le 13 Août 1998 par anticipation de la loi sur l'air du 30 Décembre 1996. C'est une association agréée par le ministère de l'écologie et du développement durable, et membre de la fédération nationale ATMO France regroupant 35 réseaux.

Les missions de l'ORA sont :

- la mesure et la surveillance de la qualité de l'air du département,
- l'information de la population sur les niveaux de la pollution atmosphérique,
- la sensibilisation des jeunes aux problèmes et aux métiers de l'environnement,
- la prise en compte du critère de « qualité de l'air » à préserver dans les futurs axes de développement de la Guyane.

L'ORA dispose de plusieurs équipements :

- Depuis novembre 2002, une station fixe est installée avenue Jubelin dans le centre de Cayenne, et permet de donner l'indice de la qualité de l'air du chef lieu de Guyane. Les polluants mesurés sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), l'ozone (O₃), les particules fines (PM10/FDMS et PM2.5/FDMS).
- Depuis fin 2003, une station mobile permet de faire des campagnes de mesures dans les communes du littoral non dotées de stations fixes. Elle est équipée d'analyseurs en dioxydes de soufre (SO₂), oxydes d'azote (NO_x), ozone (O₃), particules fines (PM10), ainsi que d'une station météorologique complète.
- De 2004 à 2008, un dispositif de surveillance spécifique à l'activité du centre spatial de Guyane a été mis en place par l'ORA. Il a permis de déterminer les concentrations naturelles en chlore de l'air des villes de Sinnamary et de Kourou.

II. Gestion de l'ORA

Trois permanents assurent le fonctionnement de l'ORA : une directrice, une secrétaire et un technicien pour la mesure de l'air de ce vaste département.

Tableau 1 : organisation du bureau, organe décisionnel

Collège des "Collectivités"		
Président	Mairie de Rémire-Montjoly	M. Rodolphe SORPS
1er Vice-présidente	Mairie de Cayenne	Mme Aline PORTET
2ème Vice-président	Conseil régional	Mme Hélène SIRDER
Collège des "Entreprises"		
Trésorier	ARIANESPACE	M. Jean-Jacques AUFFRET
Trésorier-Adjoint	SARA	M. Jean-Marc CLAVEAU
Collège de "l'Etat et services de l'Etat"		
Secrétaire	DRIRE	Mlle Noëlle THINE/ Mme Julie Desmarest Mme Julie DESMAREST
Conseiller Technique	ADEME	Mme Suzanne PONS
Collège des "Associations et personnes qualifiées"		
Membre	UDAF - Pôle des consommateurs	Mme Irène MATOURA
Membre	ORSG	M. Roger Michel LOUPEC

Tableau 2 : les membres de l'ORA, regroupés en 4 collèges

Collège des "Entreprises"	
REGULUS	Chambre de Commerce et d'Industrie de la Guyane
EDF	SARA
Centre Spatial Guyanais	ARIANESPACE
Collège des "Associations et personnes qualifiées"	
UDAF	SEPANGUY
ORSG	Association des Maires de Guyane
Représentant du Corps Médical	Météo France
IESG/UMR ECOFOG (labo. Des Matériaux molécules en milieu amazonien)	
Collège des "Collectivités"	
Municipalité de REMIRE-MONTJOLY	Municipalité de SINNAMARY
Municipalité de KOUROU	CONSEIL GENERAL
Municipalité de CAYENNE	CONSEIL REGIONAL
Municipalité de MATOURY	
Collège de "l'Etat et services de l'Etat"	
D.D.E	PREFECTURE
ADEME	DRIRE
DIREN	ARS

B) Evaluation des concentrations en chlore particulaire d'origine naturelle.

I. Contexte de l'étude

1) Objectifs du plan de mesure

Une étude menée par l'INERIS (M. Ramel, 2002) qui est à l'origine de cette campagne de mesure, fixe en partie les objectifs :

- Détermination du bruit de fond naturel en chlore.
- Etude de l'influence des conditions météorologiques sur les concentrations naturelles en chlore dans l'atmosphère.
- Déduction des retombées en chlore sous forme gazeuses et particulaires sur les zones habitées lors des lancements d'Ariane V.

2) Sites de prélèvements

Afin de déterminer l'impact sur la zone habitée de Sinnamary, dix sites de prélèvements ont été mis en place. Le dernier point se situe à Kourou afin de servir de référence lors des tirs de fusées.

Compte tenu du nombre d'habitants à Kourou, le Centre Spatial Guyanais (CSG) reporte le lancement lorsque les vents dominants sont en direction de la commune. D'où ce dernier site qui est considéré comme site témoin et qui est à l'abri du nuage de combustion.

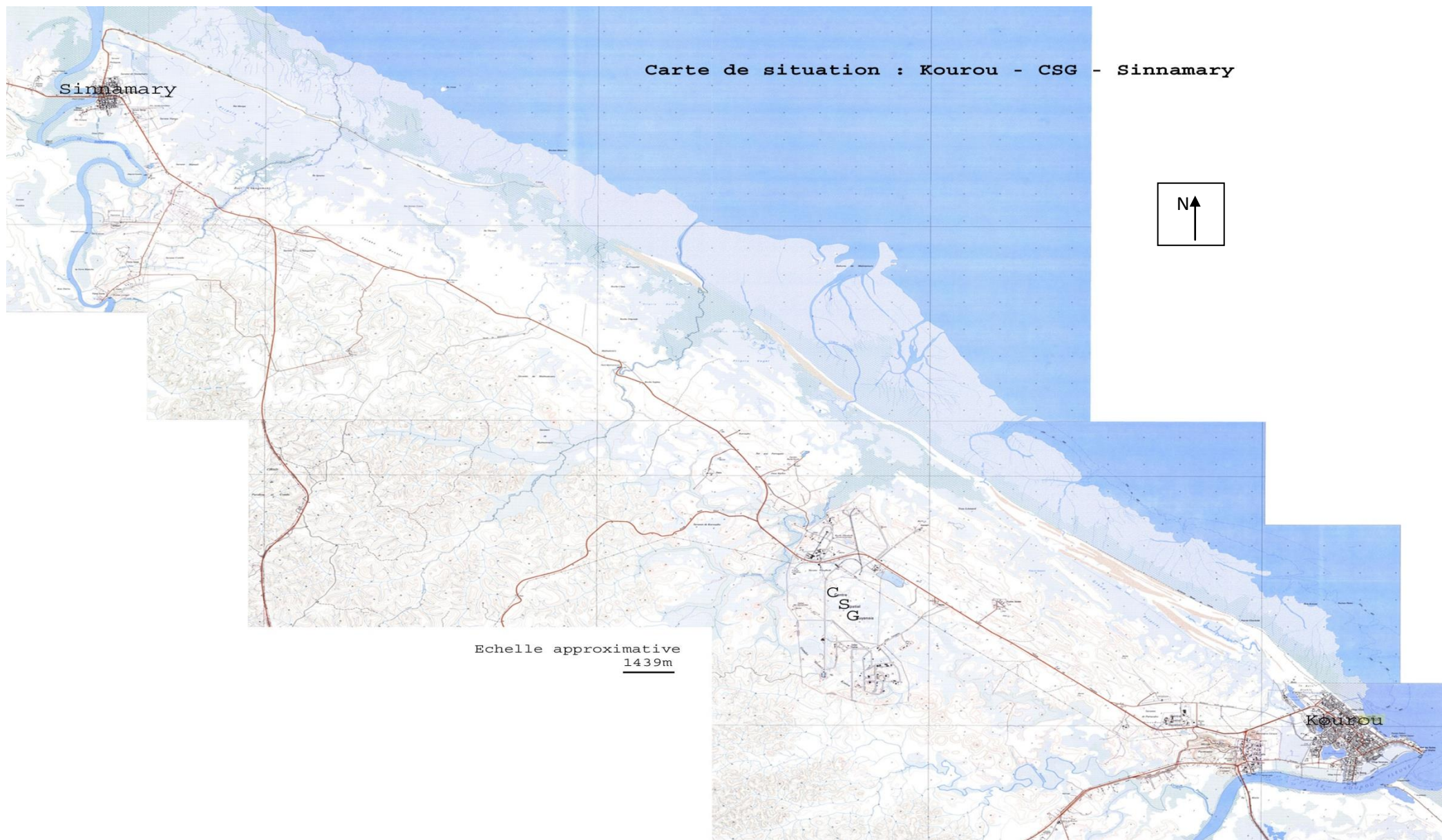


Figure 1 : zones d'études

- Emplacement géographique des sites à Sinnamary et à Kourou.

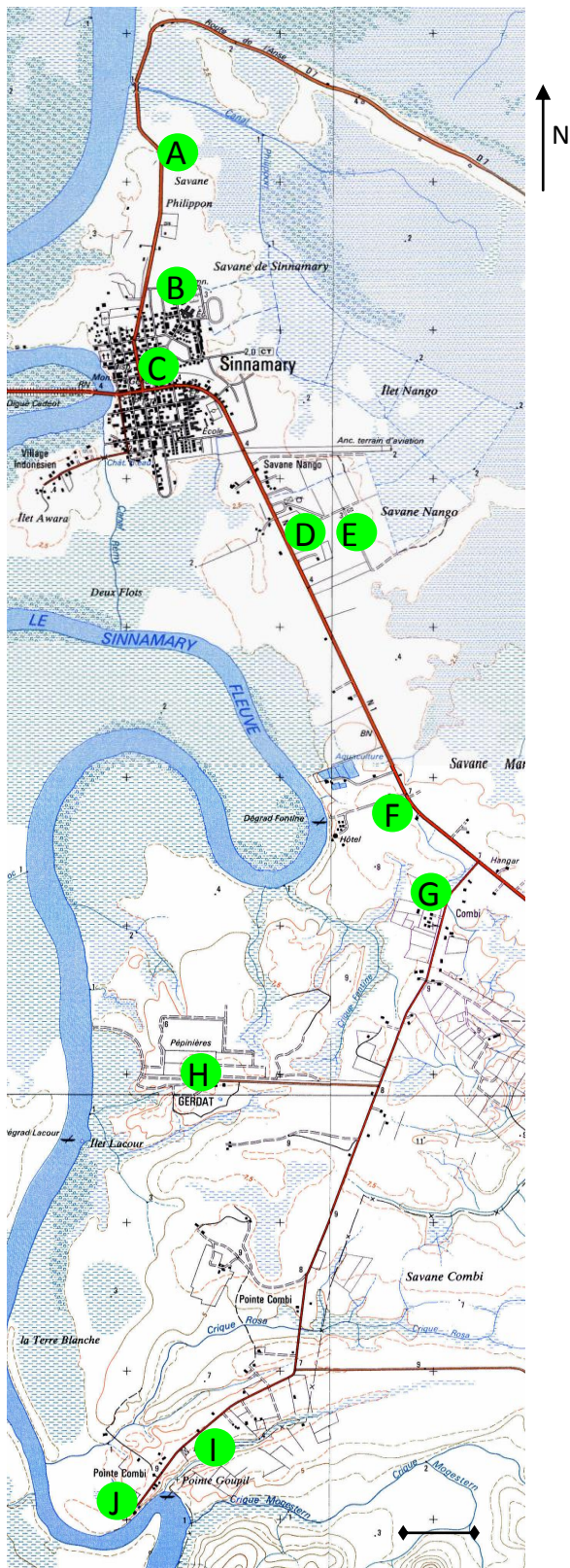


Figure 2 : sites de Sinnamary

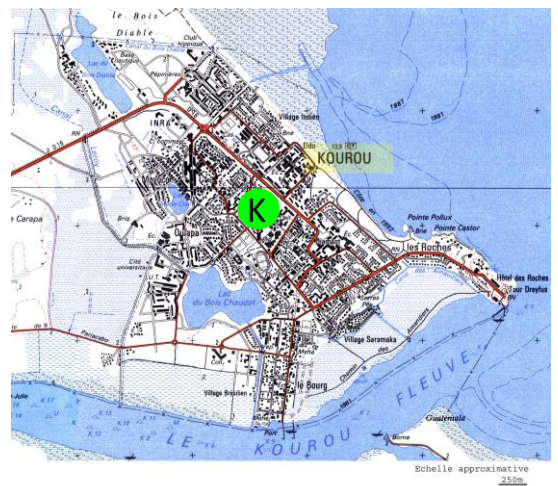


Figure 3 : site de Kourou

3) Dispositif

Sur chaque site, les prélèvements des retombées atmosphériques au sol réalisés à l'aide d'un bac à eau permettent de récolter les ions chlorures sous forme particulaire. Le bac contient 300ml d'eau distillée. Les prélèvements s'effectuent en continu pendant plusieurs jours en dehors des périodes de lancement et pendant 24 heures lors des lancements.

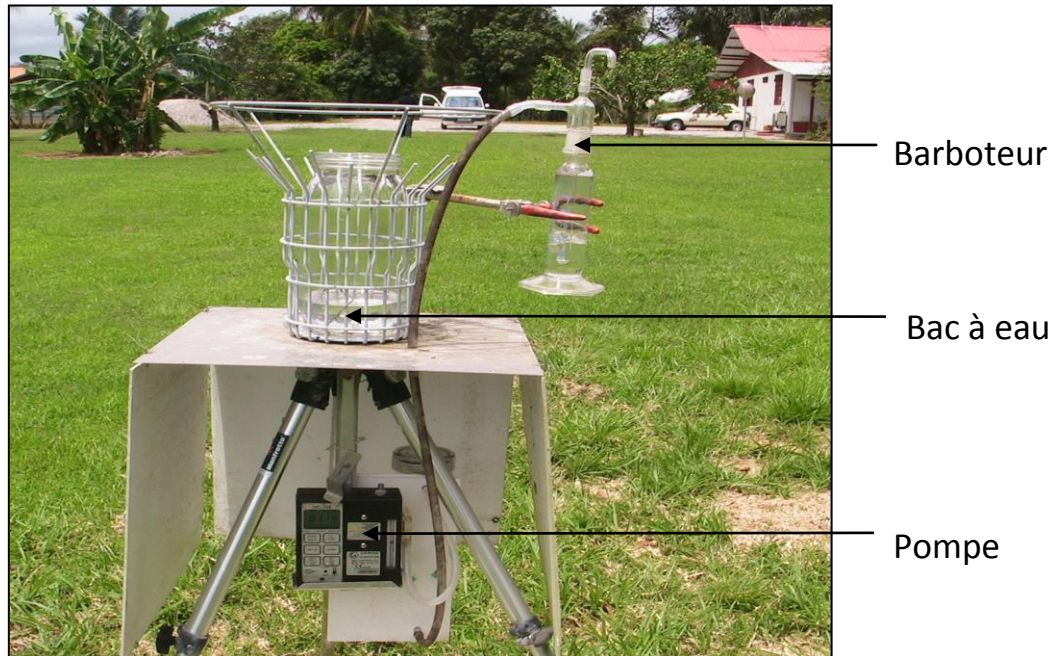


Figure 4 : montage utilisé

Sur chaque site, les prélèvements d'air effectués dans un barboteur, permet de saisir les ions chlorures sous forme gazeuse. Le barbotage s'effectue sur une période de 2 ou 4 heures dans 50ml d'eau distillée, à l'aide d'un système de pompe automatique programmable. L'échantillonnage est orienté vers le bas pour privilégier le prélèvement des particules les plus fines, représentatives de l'exposition des personnes, par inhalation.

Les échantillons d'eau prélevée sont récupérés chaque semaine et l'analyse des ions chlorures est réalisée par l'Institut Pasteur, par chromatographie d'échange d'ions, avec un seuil de détection de 0,05 mg/l.

4) Résultats obtenus avec les bacs à eau

La sédimentation des particules contenant du chlore est recueillie par les bacs à eaux. Les résultats sont similaires d'un site à l'autre : une périodicité des valeurs obtenues à Sinnamary (sites A à J), due aux conditions climatiques variant au cours de l'année, a été observée. De Novembre à Juin, les concentrations en chlore sous forme particulaire sont importantes, puis deviennent faibles de Juillet à Octobre (Figure 5, Figure 6 et Figure 7).

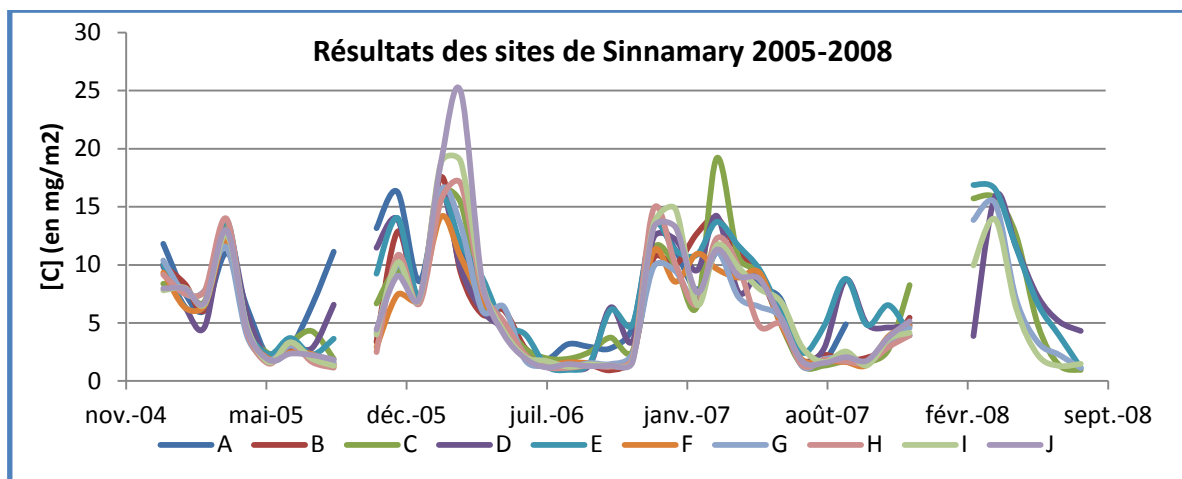


Figure 5 : résultats des bacs à eaux sur les sites de Sinnamary, les données utilisées sont des moyennes mensuelles.

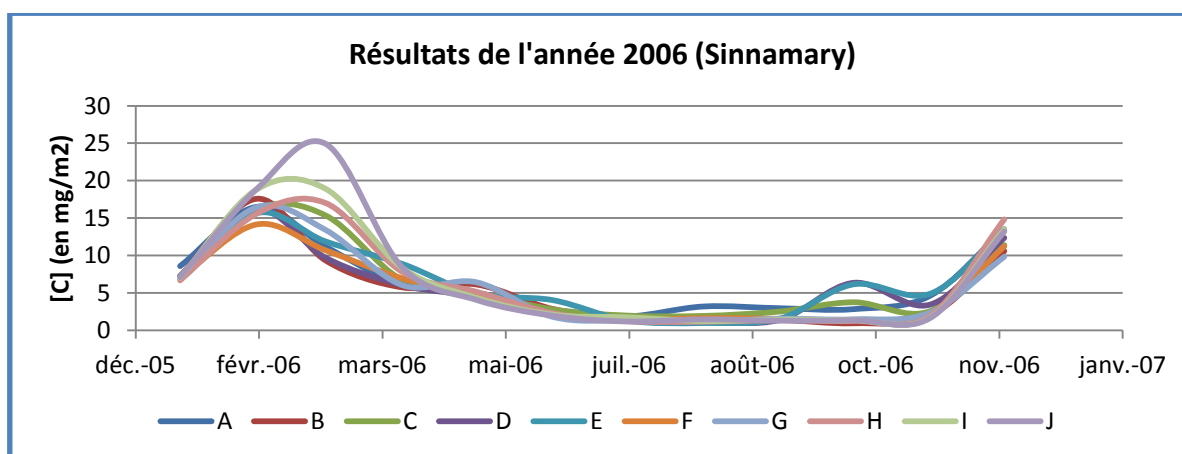


Figure 6 : variation des concentrations en ions chlorure mesurées en 2006

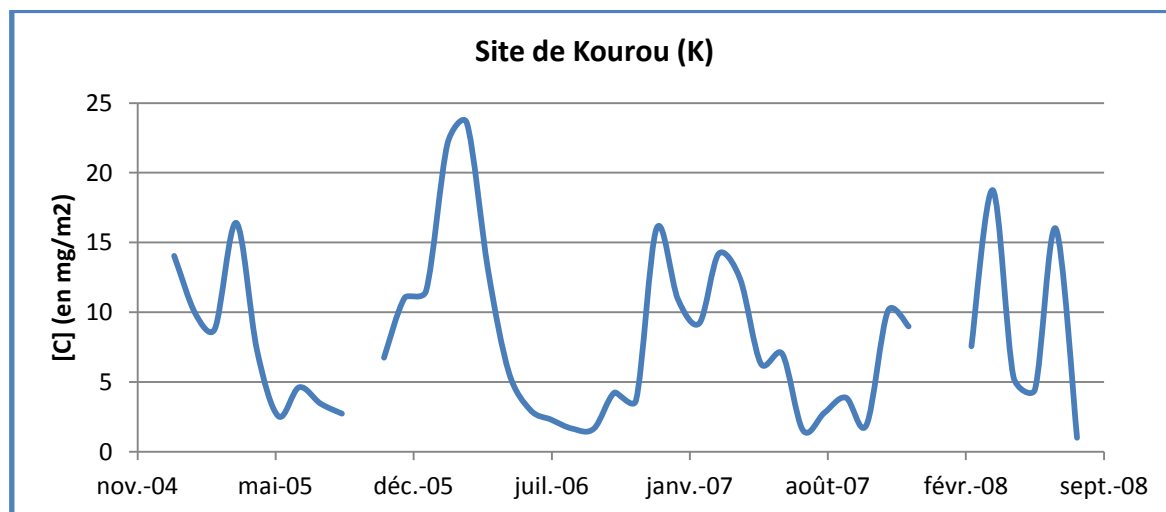


Figure 7 : résultats des bacs à eaux sur le site de Kourou, les données utilisées sont des moyennes mensuelles.

5) Résultats obtenus par la méthode du barbotage

L'étude des valeurs relevées sur nos différents sites, révèle de grandes différences entre les lieux étudiés (Figure 8 et Figure 9). De plus, aucune périodicité n'est relevée d'une année sur l'autre. Par conséquent, ne seront utilisés que les résultats recueillis avec les bacs à eau pour le reste de l'étude.

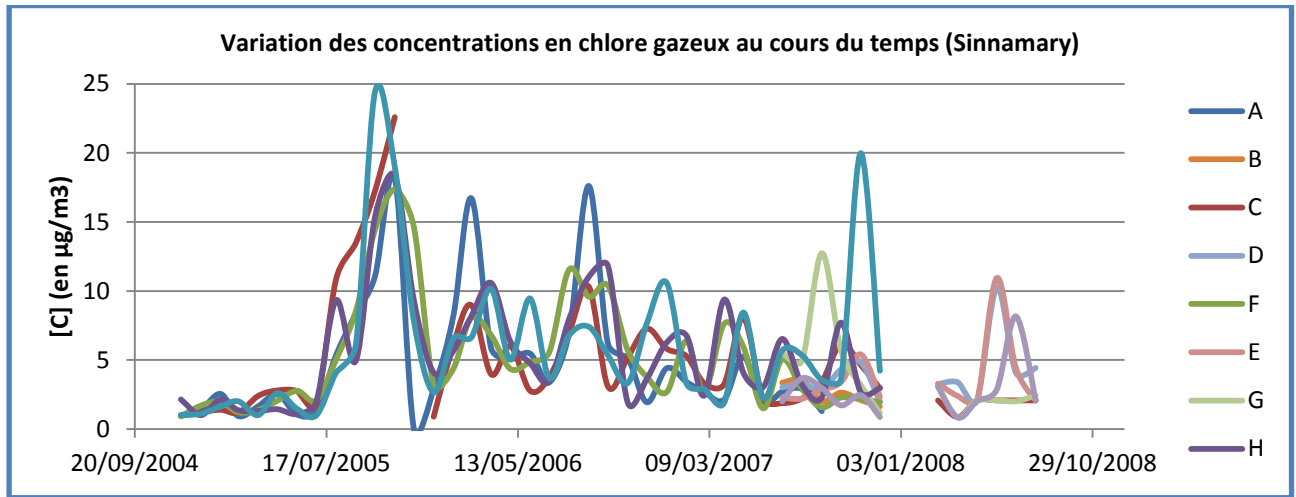


Figure 8 : résultats (concentrations moyennes mensuelles) des barbotages sur les sites de Sinnamary.

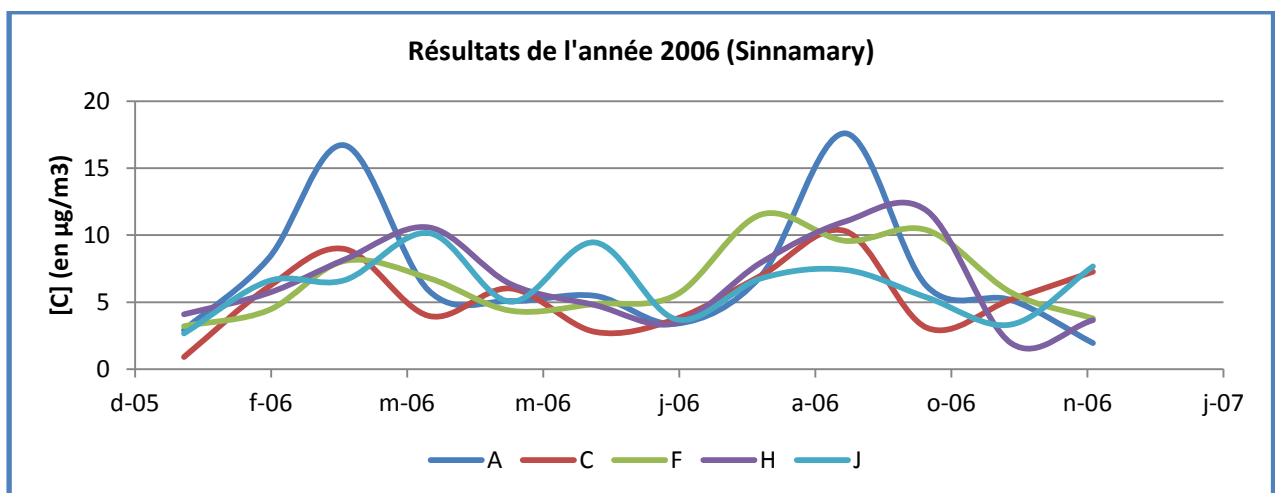
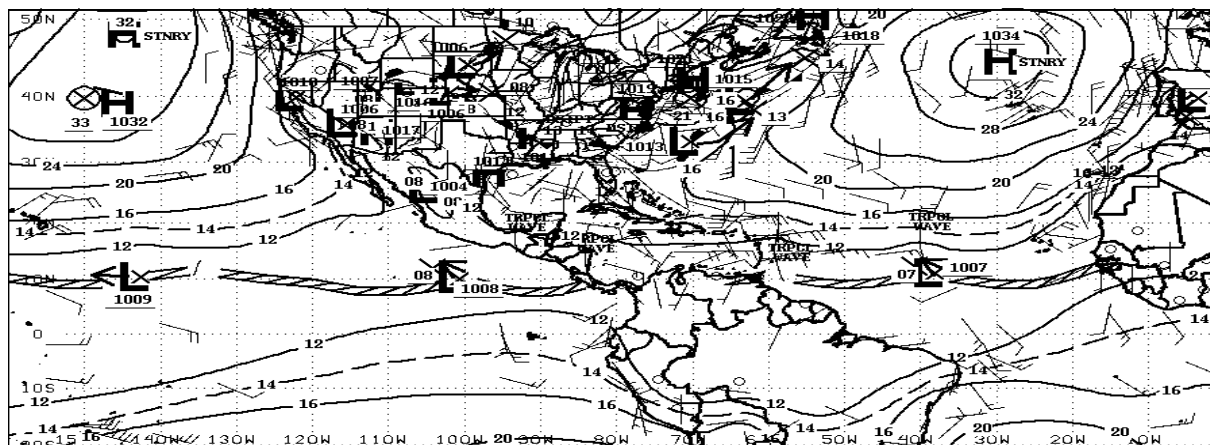


Figure 9 : variation des concentrations en chlorure d'hydrogène gazeux mesurées en 2006

II. Contexte environnemental de la Guyane

1) Saisons guyanaises

La Guyane, de par sa position, a un climat équatorial et maritime. En effet, l'anticyclone des Açores situé dans l'hémisphère Nord, dirige des vents de direction nord Est vers l'équateur. D'autre part, l'anticyclone de Sainte Helene produit des vents de direction Sud Est vers l'équateur. Les vents créés par ces deux anticyclones rentrent en contact au niveau d'une zone dépressionnaire appelée Zone Intertropicale de Convergence (Z.I.C.) qui influe sur le climat Guyanais, et donc sur les conditions climatiques. Elle est principalement constituée de cumulonimbus qui sont des nuages générateurs de grandes précipitations (MeteoFrance).



06Z TROPICAL SURFACE ANALYSIS
ISSUED: Mon Aug 2 08:28:12 UTC 2010
TROPICAL PREDICTION CENTER
MIAMI, FLORIDA
BY TAFB ANALYST: PAW
COLLABORATING CENTERS: TPC OPC HPC HFO

Figure 10 : position de la ZIC en début de saison sèche (le 02/08/2010) (Tropical Prediction Center, 2010)

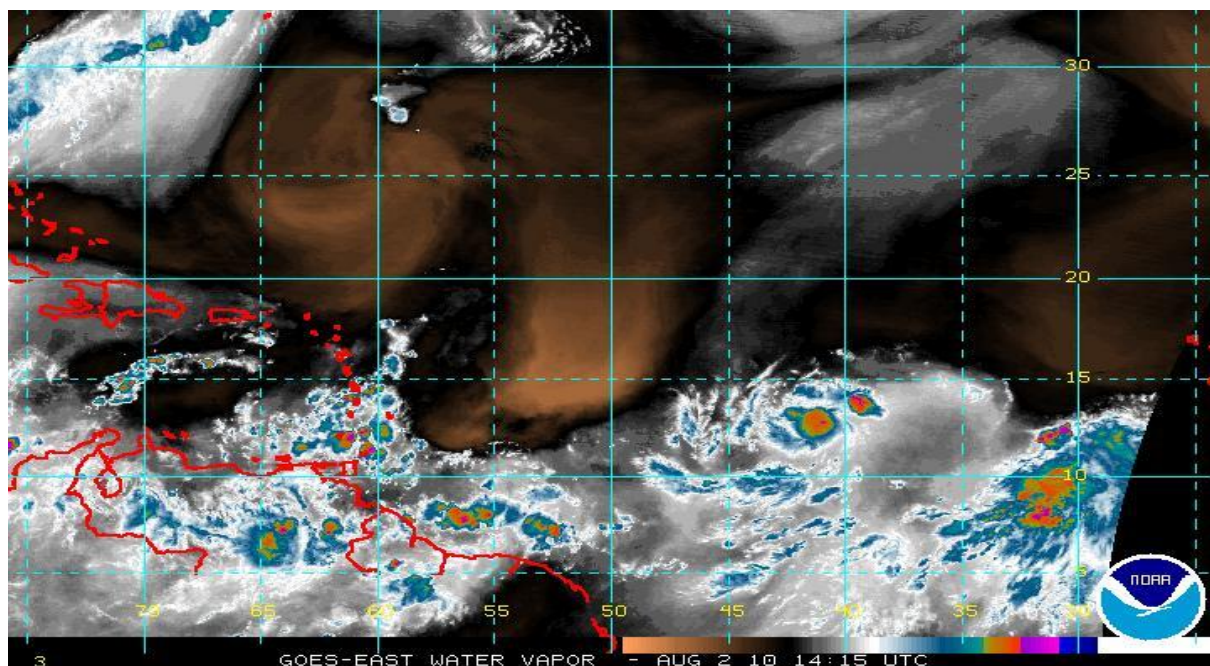


Figure 11 : image satellite de la vapeur d'eau composant la ZIC (le 02/08/2010) (NOAA, 2010).

La ZIC, par l'influence de la position apparente du soleil, se déplace au cours de l'année :

De Juillet à Octobre :

La ZIC se trouve au Nord de la Guyane. Les vents dominants sont donc les Alizés du Sud-est. C'est la saison sèche.

De Novembre à Avril :

La ZIC va vers le Sud, et passe au-dessus de la Guyane. Lors de cette période, appelée petite saison des pluies, il y a beaucoup de précipitations. Les vents sont variables.

En Mars :

La ZIC a traversé la Guyane et se retrouve au Sud de celle-ci, au niveau de l'équateur. Durant cette période, les alizées du Nord-est sont les vents dominants, et les précipitations sont rares. C'est le petit été de Mars.

D'Avril à Juin :

La ZIC se déplace en direction du Nord. Elle repasse au niveau de la Guyane. C'est la saison des pluies. Durant cette période les vents sont variables.

Le vent et la pluviométrie qui sont des paramètres essentiels à notre étude, sont dépendants des saisons qui elles mêmes sont fonction du positionnement de la ZIC. Le vent en provenance du Nord-est a une vitesse moyenne de 6.11 ms^{-1} de 2005 à 2009 alors que celui du Sud-est a une moyenne de 4.28 ms^{-1} de 2005 à 2009 (station météo de Kourou).

2) Transfert du chlore de l'Océan à l'atmosphère

a) Emission et dispersion du sel marin

Il y a chaque année une **émission naturelle d'environ 82.1 Téra-grammes (1 Téra-grammes valant 10^6 Tonnes) de sel de mer de petite taille (0-2 μm), et 2460 Téra-grammes de plus grande taille (2-20 μm)** (Raes, 2000). Le sel contenu dans l'Océan Atlantique est à l'origine de la présence du chlore dans l'air marin Guyanais (en l'absence de lancement de fusée). Il y a un transfert de l'Océan à la troposphère qui se fait par les processus suivants (Satheesh, 2002) (Figure 12):

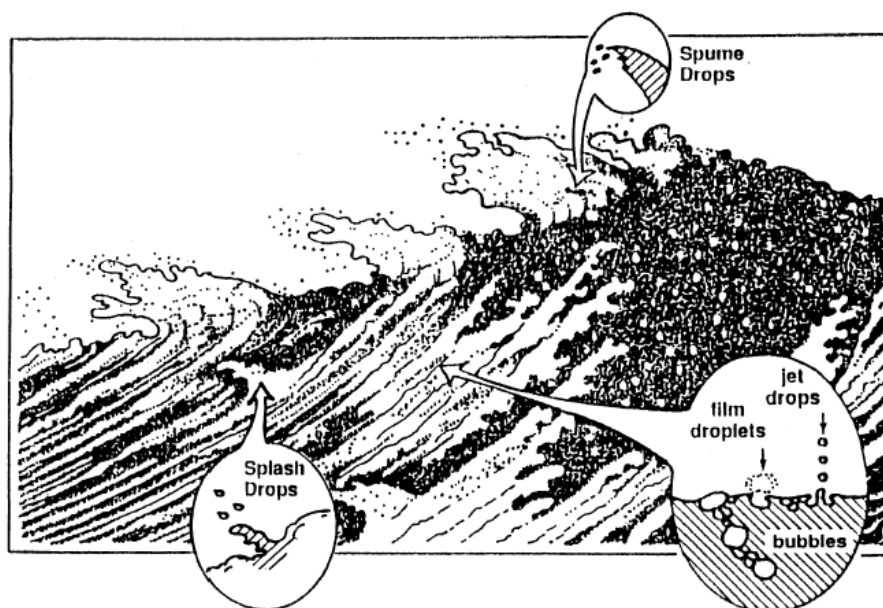


Figure 12 : processus du transfert du chlore de l'océan à l'atmosphère. (Marchand)

i. « spum drops » :

La vitesse du vent est supérieure à 10 ms^{-1} , il y a production d'embruns marins dus à l'action du vent sur la crête des vagues.

ii. « jet droplet » et « film droplet » :

Le vent est plus modéré ($3\text{-}5\text{ ms}^{-1}$), les vagues vont, lors de leur renversement, « capturer » de l'air : un grand nombre de petites bulles d'air vont se former à la surface de l'Océan. Elles vont éclater, et entraîner l'éjection de gouttelettes d'eau dans l'atmosphère marine. **Ce phénomène est appelé « jet droplet ». Lors de l'éclatement de ces bulles, il y a aussi éjection de petites particules appelé « film droplet ».**

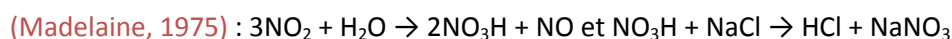
iii. « splash drops » :

Des gouttelettes sont éjectées lorsque les vagues s'impactent contre un objet. Par exemple, lorsqu'elles se cassent sur la côte, **elles forment un embrun, qui contient du sel marin.**

Ensuite, ces gouttelettes vont s'évaporer afin de maintenir l'humidité relative à son équilibre. Le sel de mer qu'elles contiennent cristallisera si l'humidité relative est inférieure à 75%, ce qui est très rarement le cas en basse altitude le long des côtes Guyanaise. Or, dans cette région, l'humidité relative diminue avec l'altitude, le sel marin cristallisera dans certaines couches de l'atmosphère. La gamme de taille s'étend de $0.1\mu\text{m}$ à $20\mu\text{m}$ (Gustafsson, 1995).

b) Transformations subies par le chlore

Le sel marin réagit dans l'atmosphère. Plusieurs publications ont proposé des réactions.



L'acide nitrique formé va être dissous dans la gouttelette d'eau contenant NaCl, et la réaction résultante synthétisera du chlorure d'hydrogène.

Au niveau de l'équateur, Andreae explique que les particules de sels de mers vont interagir avec les gaz et les aérosols présents dans l'atmosphère marine (Andreae, 1986) :

i. « sea salt »

Il est composé en majorité de chlore et de sodium, mais aussi de magnésium, potassium, calcium et soufre. Il résulte de la cristallisation des gouttelettes de l'eau de mer. Le mélange dans l'atmosphère marin de ces particules et de différents composés tels que NH_3 , HNO_3 , H_2SO_4 et SO_2 entraîne des réactions qui consistent en la substitution du chlore par des nitrates ou des sulfures.

ii. « CaSO_4 »

Ce sont des particules de CaSO_4 qui contiennent peu, ou pas de chlores d'origine marine.

iii. « Silicate »

Ce type de particule résulte de l'association entre des particules de sels marins et de silicates.

Les filtres recueillis à Sinnamary ont été analysés avec un microscope à balayage électronique par le laboratoire de physique de l'atmosphère tropical de l'université des Antilles Guyane (Figure 13). Ils ont été recueillis après un passage de « brumes du Sahara » (poussières soulevées dans le désert du Sahara due à la présence d'une zone dépressionnaire, qui traversent l'océan Atlantique dans la couche atmosphérique appelée Sahara Air Layer, et qui sédimentent le long de leur parcours).

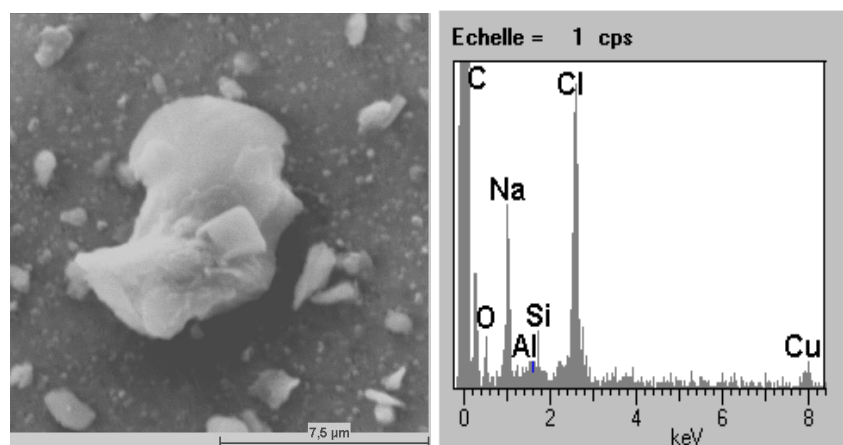


Figure 13 : cristal de sel imbriqué dans un aluminosilicate

Au final le chlore est présent dans les atmosphères marines sous de nombreuses formes.

c) Immissions du chlore présent dans l'atmosphère

Elle peut se faire de deux façons (Debry, 2010) :

i. Par Dépôt sec :

Dû à la force gravitationnelle. La masse du chlore particulaire va l'entraîner au sol. C'est ce que nous étudions avec à la méthode des bacs à eaux.

ii. Par Dépôt humide :

Dû au lessivage de l'atmosphère par la pluie. Dans les zones où l'humidité relative est importante, ce qui est le cas en Guyane, « le mouillage du sel » augmente, entraînant une augmentation de la taille de la particule (Meira, 2006). L'action de la pluie sera d'autant plus efficace.

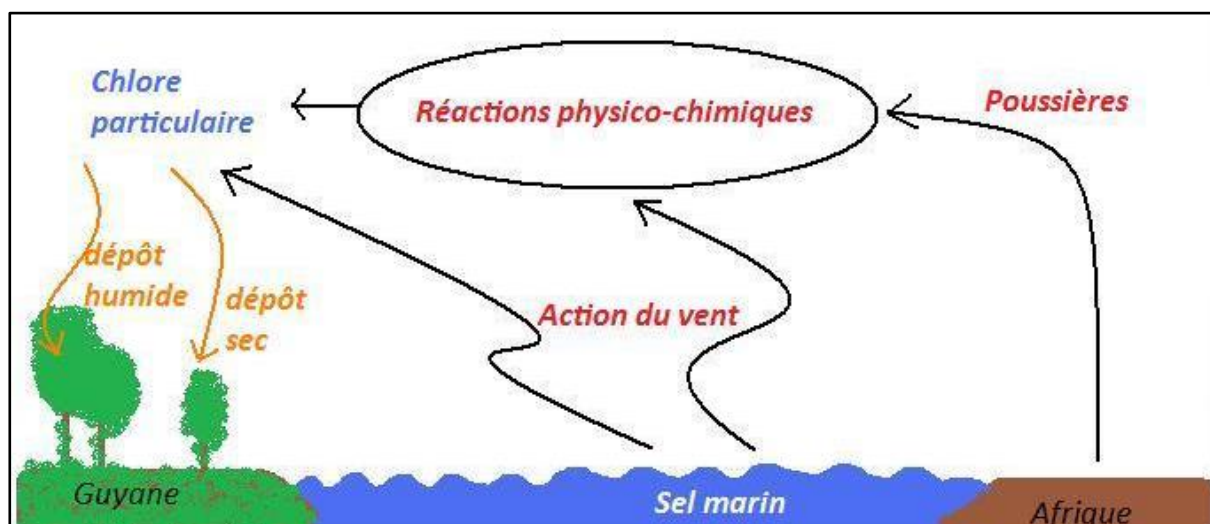


Figure 14 : cycle simplifié du chlore d'origine naturelle en Guyane

III. Etude des Paramètres météorologiques

L'objectif est de déterminer les paramètres météorologiques qui sont à l'origine des variations des concentrations naturelles en chlore sous forme de particules.

1) Vent

a) Méthode d'interprétation des résultats

De nombreuses publications (Meira, 2007)_(Satheesh, 2002)_(Gustafsson, 1995)_(Zielinski, 2004) ont montré que les concentrations naturelles en Chlore dans une atmosphère côtière, étaient dues à l'action du vent sur les vagues. La formule utilisée pour interpréter des données expérimentales est la suivante :

Équation 1

$$\ln [C] = aF + b$$

$[C] \rightarrow$ concentration en chlore (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$F \rightarrow$ vitesse du vent en m/s

a et $b \rightarrow$ constantes

Or, dans le cadre de notre étude, la direction du vent est aussi un facteur important. En effet, un air provenant du continent n'apportera pas de chlore. Nous avons donc couplé les données de vitesse et de direction du vent.

b) Couplage vitesse / direction du vent

Nous avons projeté les données des vents sur l'axe E de façon à coupler les données de vitesses et de directions (F et θ) et de n'avoir qu'une seule valeur, plus facile à interpréter. Par exemple, sur la Figure 15, le vent (dessiné en rouge) de direction θ et de vitesse F est projeté sur l'axe E, et devient $V(E)$. Pour ce faire, nous avons la formule suivante :

Équation 2

$$\sin(\vartheta) = V(E)/F$$

$\vartheta \rightarrow$ direction du vent (en radian)

$V(E) \rightarrow$ projection de V sur l'axe E

$F \rightarrow$ la vitesse du vent (en m/s)

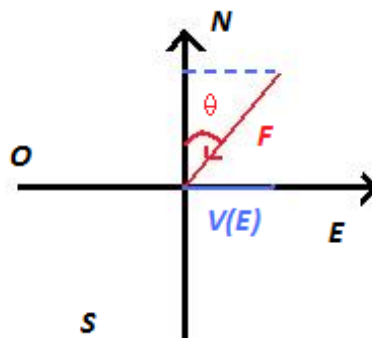


Figure 15 : projection des données du vent sur l'axe E

Note : pour passer des degrés au radian : $(\text{angle}/180).\pi$

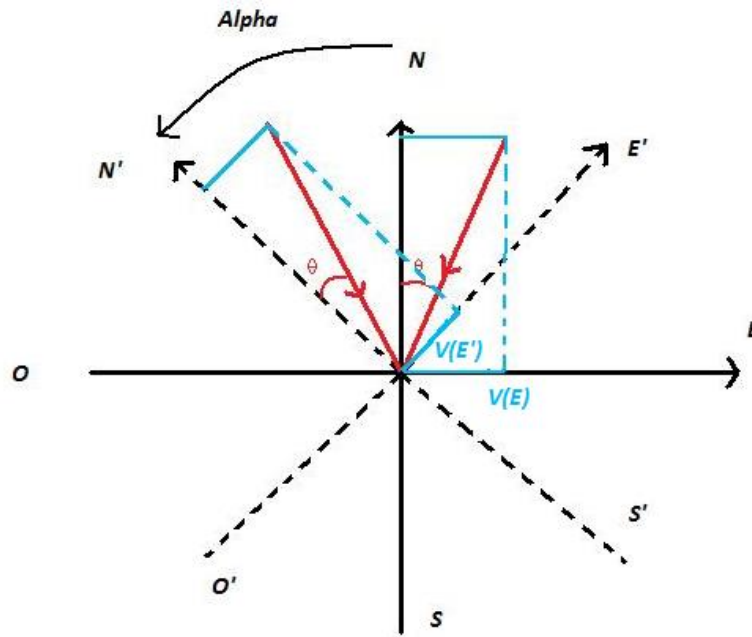


Figure 16 : changement de référentiel afin de rendre les valeurs de vents plus « lisibles ».

Sachant que les vents du Nord Est (qui sont les alizés arrivant sur les côtes en formant un angle d'environ 90°) entraînent les plus fortes concentrations en chlore dans l'atmosphère Guyanaise, un changement de référentiel permet de projeter nos valeurs sur ce nouvel axe (E'). D'une projection de la valeur de couplage « vitesse/direction du vent » sur l'axe (E) donnant $V(E)$, nous passons à une projection sur l'axe (E') donnant une valeur $V(E')$. Plus un vent sera fort, et aura une direction proche du Nord Est (axe E'), et plus la valeur correspondante sera élevée. La formule devient donc :

Équation 3

$$V(E') = \sin(\vartheta + \alpha).F$$

$\vartheta \rightarrow$ direction du vent (en radian)

$\alpha \rightarrow$ angle correspondant au changement de référentiel (en radian)

$V(E') \rightarrow$ projection de V sur l'axe E'

$F \rightarrow$ vitesse du vent (en m/s)

Note : nous avons une valeur α proche de 50° soit 0.87 radian.

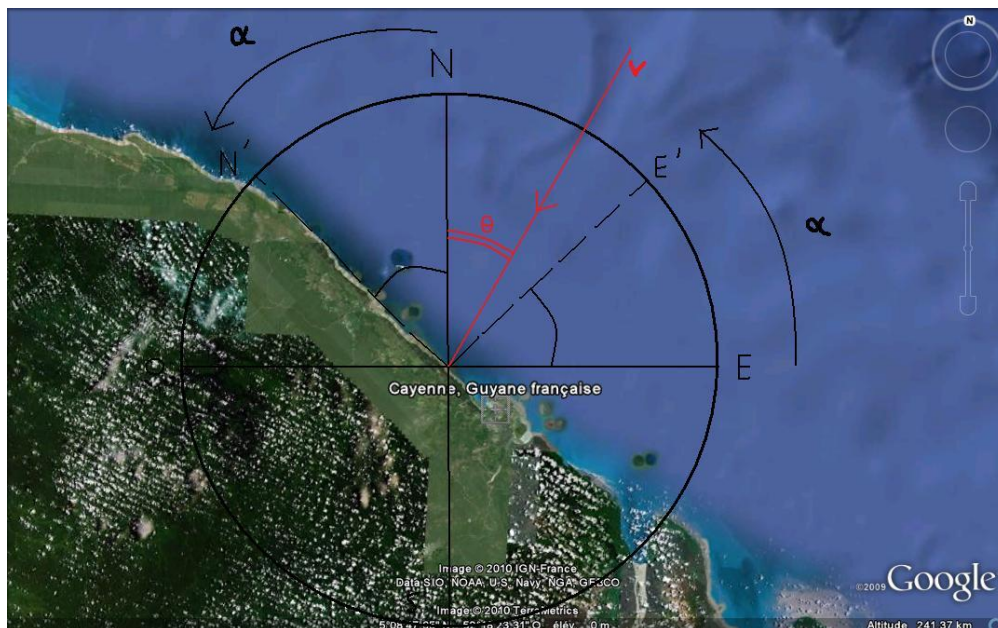


Figure 17 : schématisation des modifications mathématiques effectuées sur les données de vents.

Avec les modifications effectuées, nous avons pu tracer le logarithme népérien des concentrations en chlore en fonction du couplage « vitesse/direction du vent ».

Équation 4

$$\ln [C] = a V(E') + b$$

$[C] \rightarrow$ concentration en chlore (en mg/m^2)*

$V(E') \rightarrow$ couplage vitesse direction du vent (en m/s)

A et $b \rightarrow$ constantes

*une étude (Meira, 2007) a utilisé cette équation en utilisant les valeurs de dépôt sec en chlore.

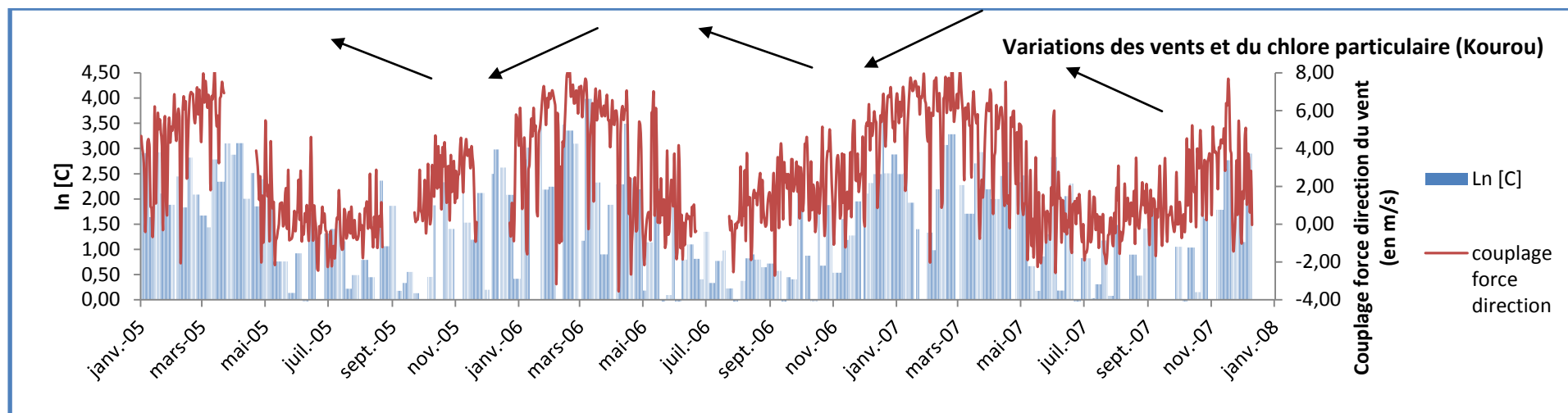


Figure 18 : résultats pour le site de Kourou (les flèches représentent la direction des vents dominants)

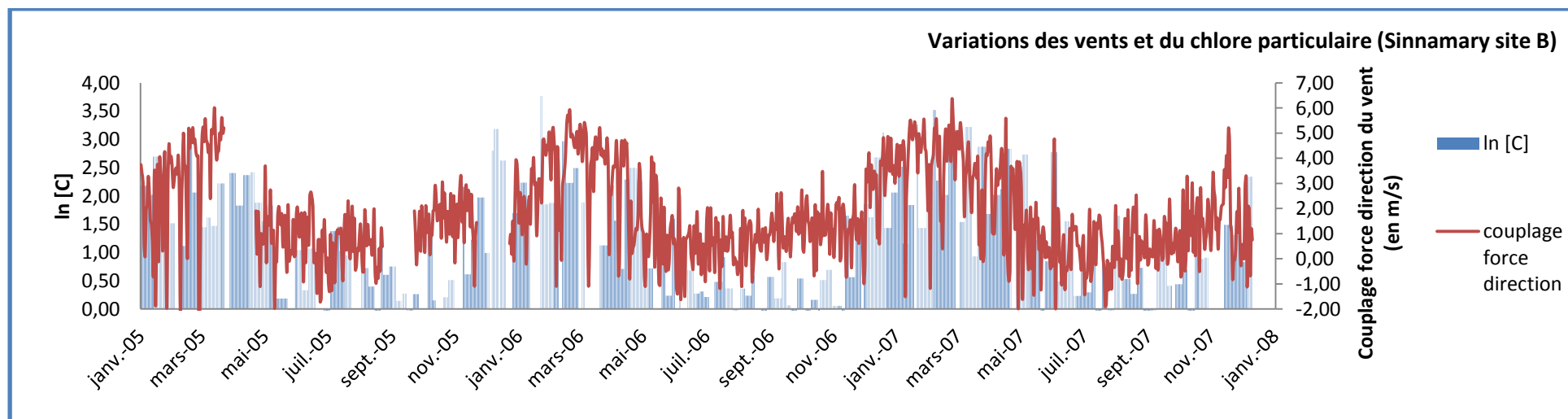


Figure 19 : résultats pour le site B

Les tracés des sites pour Kourou (K) et pour Sinnamary (B) ont été choisis à titre d'illustration (Figure 18 et Figure 19). Ils montrent des variations similaires durant les différents mois de l'année. Il est possible de distinguer deux saisons, dont une est divisible en trois périodes. Cela confirme les hypothèses émises par Mme Claire Eugénie et Mr Eber lors de leur stage à l'ORA (EBER, 2007) (Claire-Eugénie, 2005).

i. Basse saison en chlore particulière (de Juillet à Octobre) :

Il y a un faible bruit de fond en chlore : C'est la saison sèche, et la ZIC est au Nord de la Guyane. Les vents dominants sont les Alizés du Sud-est et sont moins forts que ceux du Nord-est. De plus, ils longent la côte et ne permettent pas la « capture » d'un maximum de chlore, présent sous forme de sel dans l'Océan. L'impact sur la Guyane de la production en chlore de l'océan Atlantique est faible, voir nul.

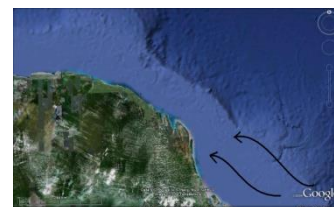


Figure 20 : vent du Sud Est

ii. Haute saison en chlore particulière (de Novembre à Juin) :

La Période de Novembre à Mars (augmentation des concentrations en chlore) :

Il y a une augmentation des concentrations en chlore dans l'atmosphère, dû à la production de chlore d'origine océanique. La ZIC se déplaçant vers le Sud, le vent dominant devient l'alizé du Nord Est. Ce dernier, d'origine marine, permet le transfert du chlore de l'océan à l'atmosphère : il y a une plus forte production de chlore particulière.

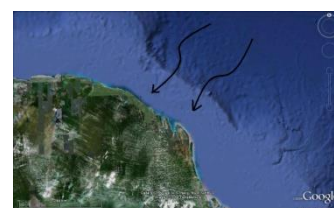


Figure 21 : vent du Nord Est

Le mois de Mars (pic de concentration en chlore) :

Etant dans le petit été de Mars, la ZIC est au Sud de la Guyane. La très grande majorité des vents proviennent du Nord-est et produisent beaucoup de chlore particulière.

La Période d'Avril à Mai (diminution des concentrations en chlore) :

C'est une période de transition due au passage de la ZIC. Les vents commencent à changer de direction, et il y a une diminution des concentrations en chlore sous forme particulières dans l'atmosphère Guyanaise.

Note : les mois ne sont donnés qu'à titre indicatif. Il peut y avoir des décalages d'une année sur l'autre.

2) Particules d'origines naturelles

Sachant que les poussières réagissent avec le sel marin, et participent à l'apport de chlore dans l'atmosphère Guyanaise, nous avons comparé nos résultats avec les données en aérosols mesurées par l'ORA pour calculer l'indice ATMO et obtenues via la station fixe de Cayenne (PM10 : particules de diamètres inférieurs à 10µm). Le faible nombre de données des campagnes de mesures à

Sinnamary n'a pas permis une exploitation plus approfondie. De plus, les concentrations en particules sont relativement homogènes le long des côtes Guyanaise (Figure 22).

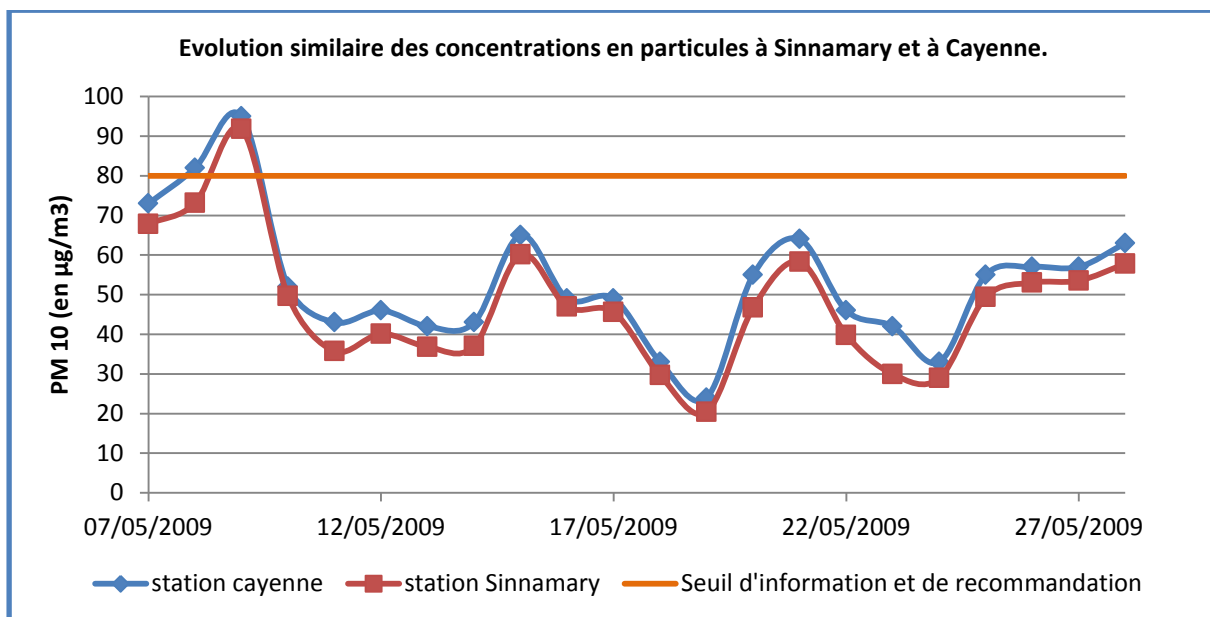


Figure 22 : Evolution des concentrations en PM10 à Cayenne et à Sinnamary durant le mois de Mai 2009.

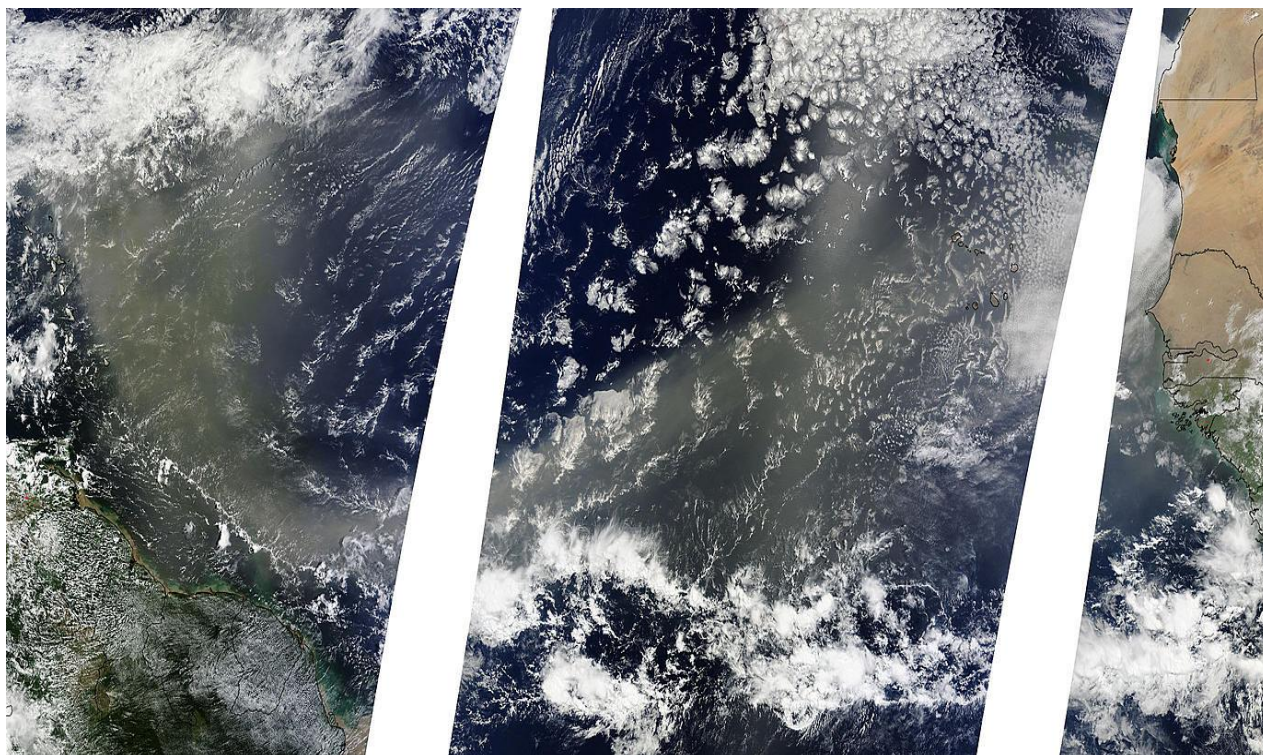


Figure 23 : poussière du Sahara parcourant l'Océan Atlantique et atteignant la Guyane. (Images du satellite TERRA du 01/06/2010) (NASA, 2010)

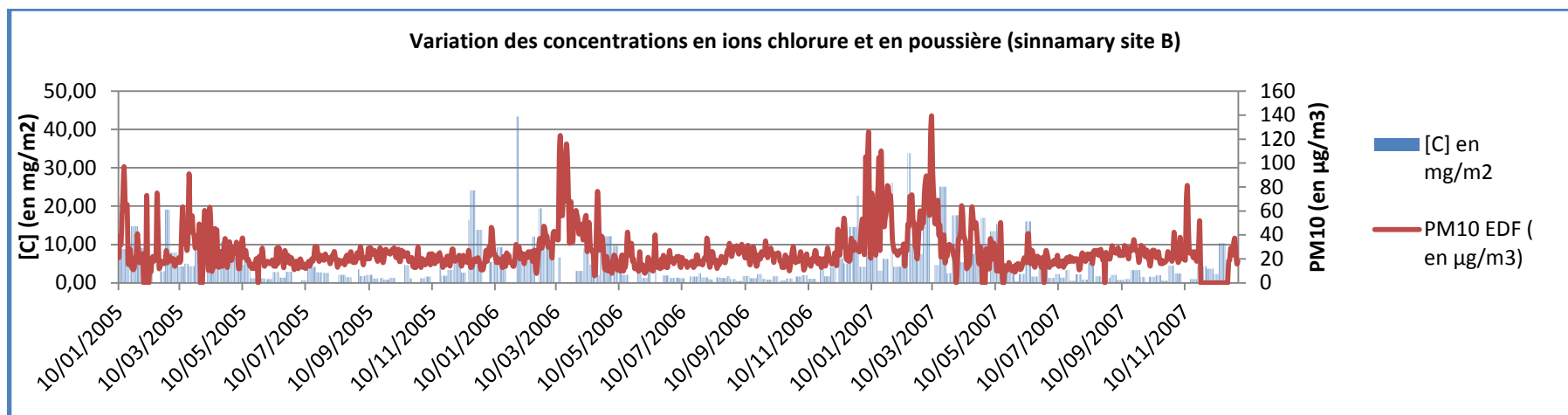


Figure 24 : influence des PM10 pour le site B de Sinnamary

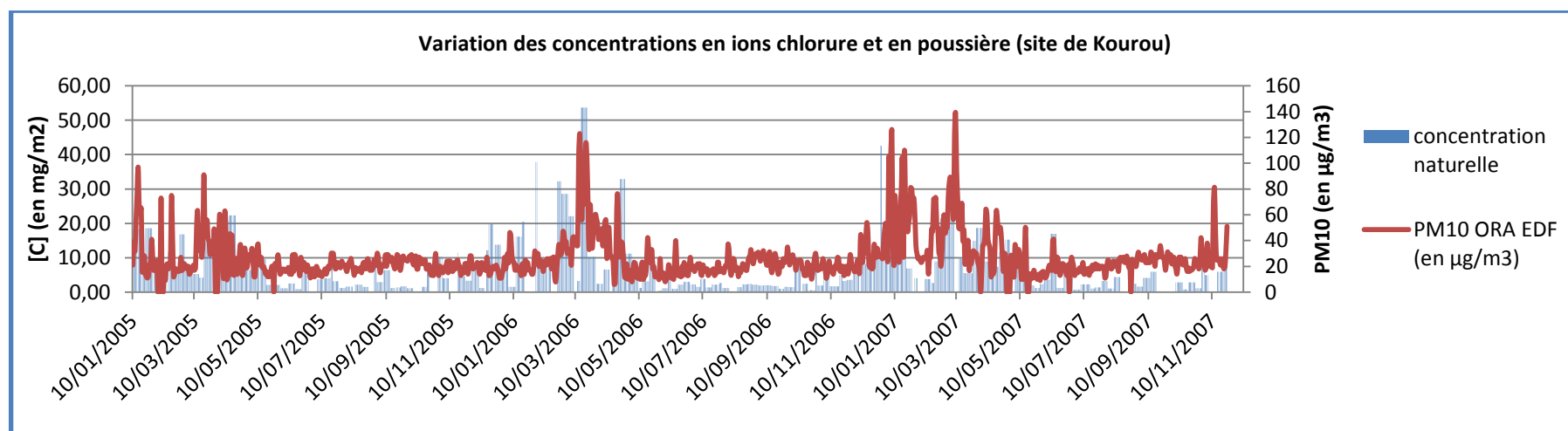


Figure 25 : influence des PM10 pour le site de Kourou

3) Pluviométrie

Les déplacements de la zone intertropicale de convergence expliquent les variations de la pluviométrie sur Sinnamary, et plus généralement de la Guyane. Nous observons (Figure 26) une pluviométrie faible pendant la saison sèche, puis une augmentation de début Décembre à début Juillet, du au passage de la ZIC (avec un creux correspondant au petit été de Mars) (Figure 27).

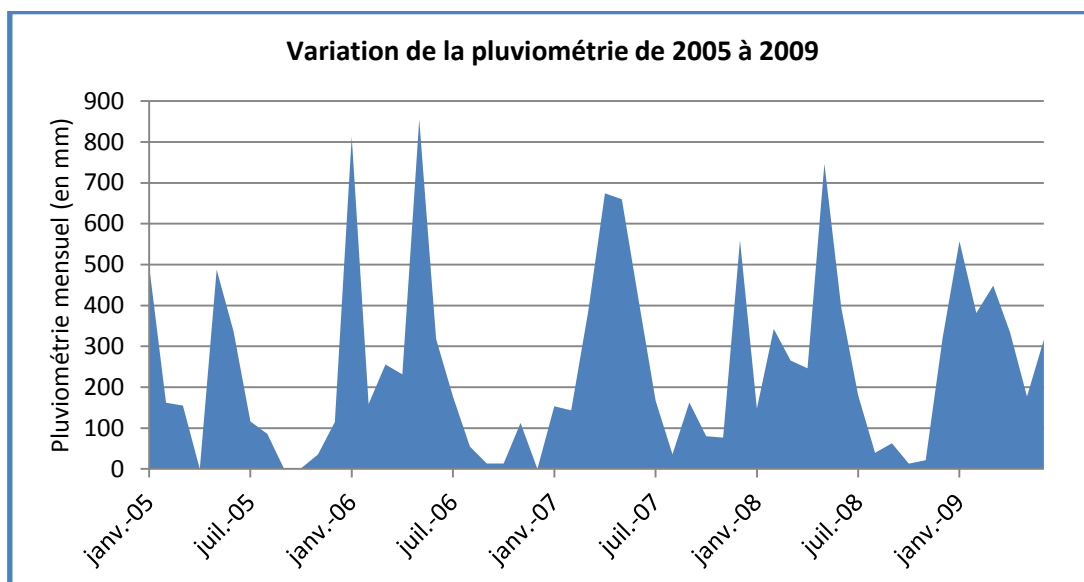


Figure 26 : pluviométrie sur la ville de Sinnamary

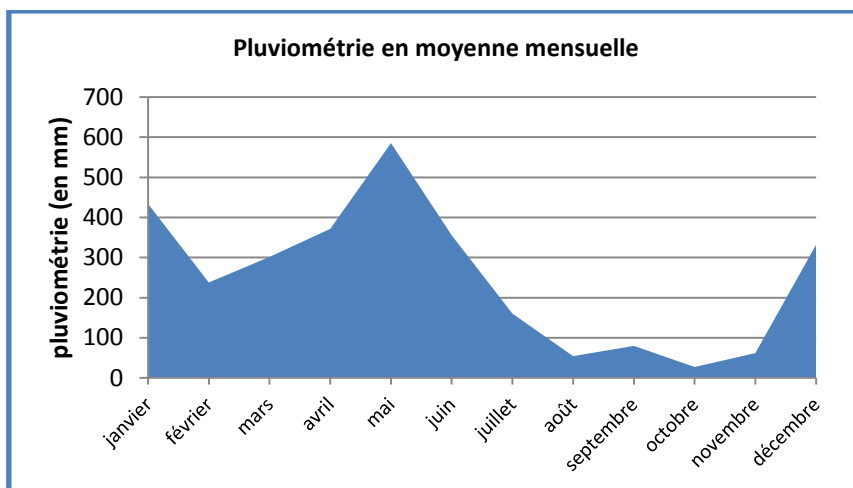


Figure 27 : pluviométrie de la ville de Sinnamary sur une année

4) Humidité relative et salinité de l'eau

a) Humidité relative mesurée au sol

L'humidité relative au sol est élevée toute l'année en Guyane. Elle descend rarement en dessous de 75%, condition de cristallisation du sel de mer (Gustafsson, 1995). Cette dernière se fait dans les couches supérieures de l'atmosphère, où l'humidité relative est inférieure à 75%.

Le vent et les particules ayant une influence beaucoup plus importants que l'humidité relative au sol, nous en négligeons l'impact.

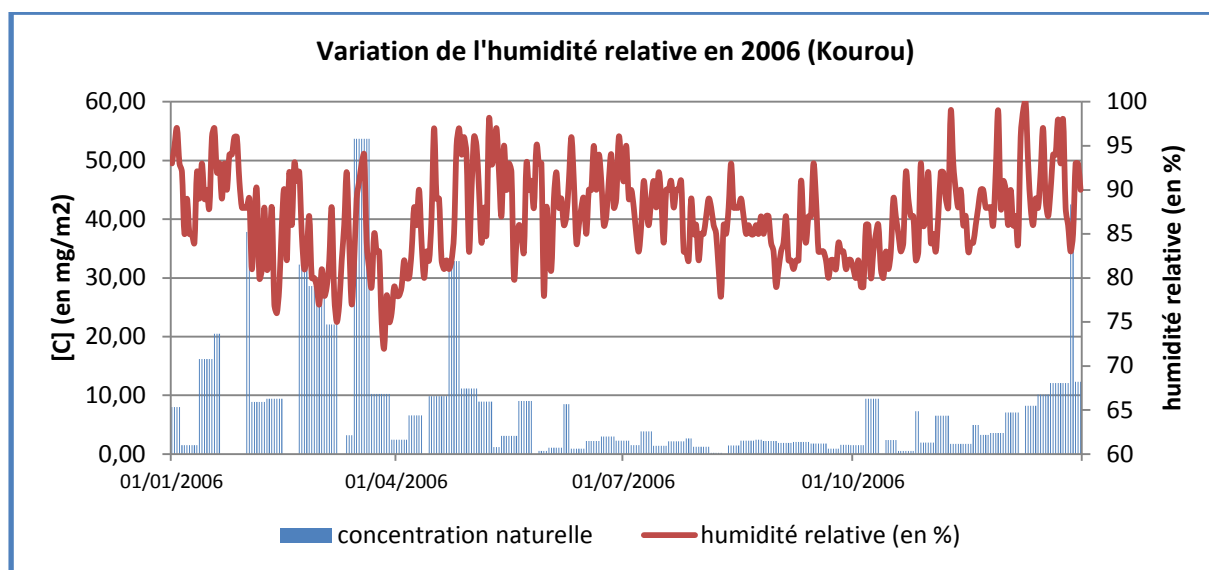


Figure 28 : influence de l'humidité relative

b) Salinité de l'eau

Avec les nombreux fleuves Guyanais alimentant l'océan Atlantique en eau douce, nous pouvons supposer que la salinité de l'eau le long des côtes de Guyane puisse varier suivant les saisons et les marées. Comme le chlore d'origine naturelle présent dans l'atmosphère provient de l'océan alors plusieurs scénarii sont possibles:

- La salinité maximale à marée haute en saison sèche, entraînent une augmentation des concentrations en chlore dans l'atmosphère Guyanaise.
- La salinité minimale à marée basse en saison des pluies, entraînent une baisse des concentrations en chlore dans l'atmosphère Guyanaise.

Mais, les résultats obtenus révèlent que la salinité de l'eau n'a que peu d'impact en comparaison avec le vent, et le passage de particules dans l'atmosphère guyanaise.

IV. Discussions des résultats

1) Vent

Afin de déterminer les coefficients a et b de l'équation 1, $\ln [C] = aF+b$,

$[C] \rightarrow$ concentration en chlore (en $\mu g/m^3$)

$F \rightarrow$ vitesse du vent en m/s

a et b $\rightarrow$ constantes

Nous avons tracé le logarithme népérien des concentrations en ions chlorures en fonction du couplage force/direction du vent (Figure 29, Figure 30, Figure 31 et Figure 32).

a) Résultats de Kourou

Deux saisons sont considérées:

- De Novembre à Juin, il y a production de chlore depuis la zone Océanique. Cette période est la haute saison en chlore.
- De Juillet à Octobre, il n'y a plus de production de chlore. C'est la basse saison.

i. La haute saison en chlore :

Il y a une corrélation entre les paramètres du vent, et des concentrations en chlore particulaire dans l'atmosphère Guyanaise (le coefficient de corrélation est de 0.9433). Les concentrations augmentent avec les données de vents calculées (Figure 29).

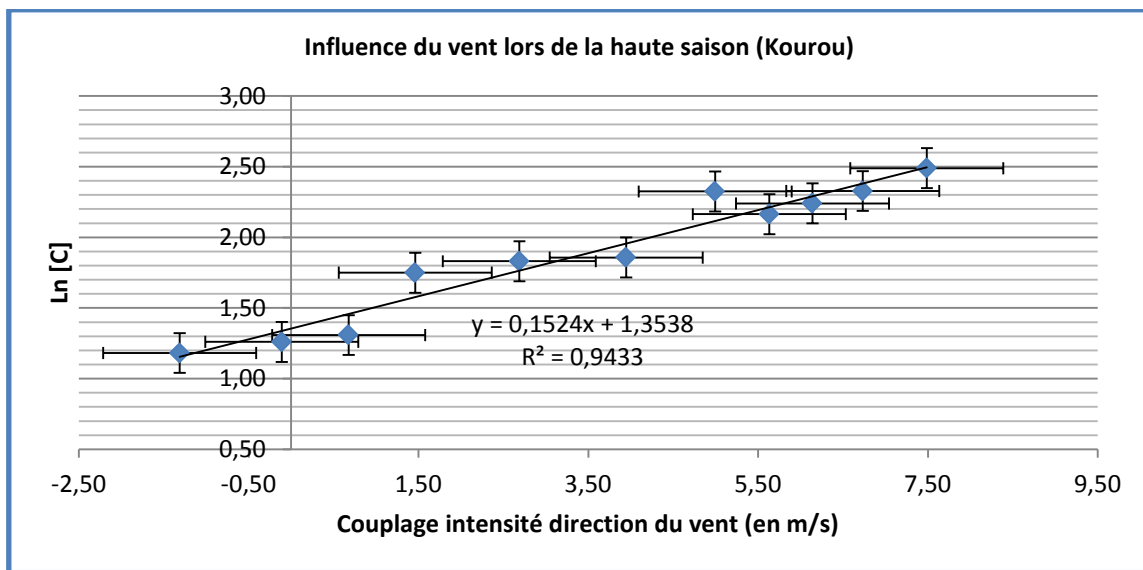


Figure 29 : Influence du vent sur les résultats de Kourou pendant la haute saison

Durant la haute saison, la relation suivante permet d'avoir la concentration en chlore particulaire en fonction des paramètres du vent.

Équation 5

$$\ln [C] = 0.1524 \sin (\vartheta + \alpha).F + 1.3538$$

$[C] \rightarrow$ concentration en chlore (en mg/m^2)

$\vartheta \rightarrow$ direction du vent (en radian)

$\alpha \rightarrow$ en radian

$F \rightarrow$ force du vent (en m/s)

ii. La basse saison en chlore :

La production de chlore d'origine océanique diminue fortement : les concentrations recueillies par les bacs à eau sont moins importantes et il n'y a plus de corrélation avec le vent. Il y a un bruit de fond régulier dont la valeur est $2.06 \pm 4.29 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (Figure 30).

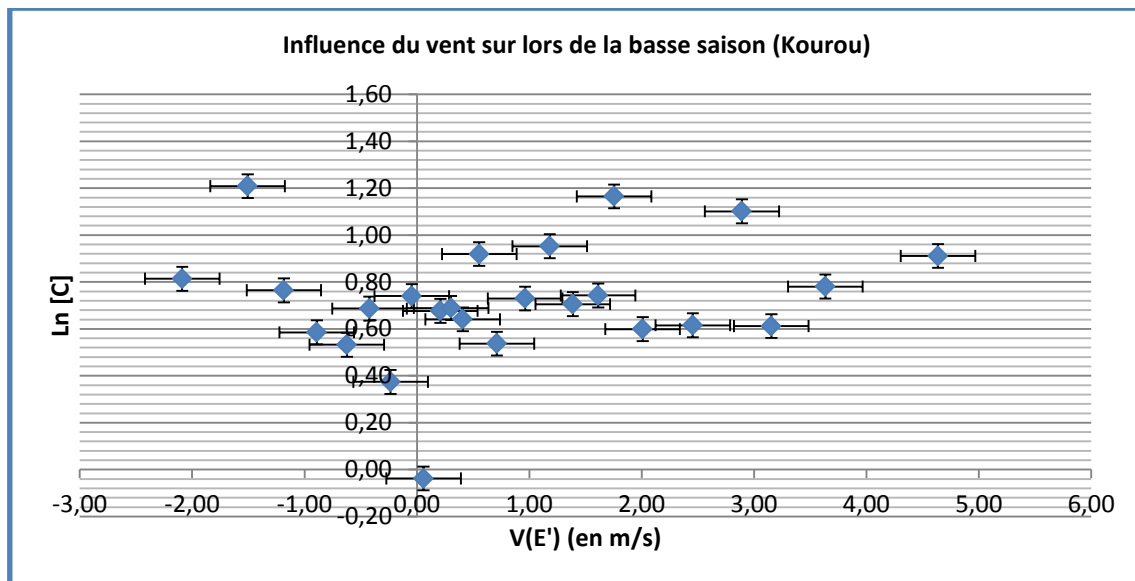


Figure 30 : influence du vent sur les résultats de Kourou durant la basse saison

b) Résultats de Sinnamary

i. La haute saison en chlore :

Les sites de Sinnamary sont plus éloignés de l'océan que celui de Kourou. De plus, la topographie est différente. A Sinnamary, la côte est composée d'une mangrove très dense alors qu'à Kourou il y a des plages de sables.

Gustafsson et Meira expliquent que les concentrations en chlore d'origine marine diminuent avec la distance aux côtes (Gustafsson, 1995)(Meira, 2008). **Une autre étude faite par Meira au Brésil note que 85 à 95% du chlore d'origine marine se dépose à moins de 500 mètres des côtes** (Meira, 2006).

A Sinnamary, contrairement à Kourou, les variations des concentrations en chlores peuvent être divisées en trois phases (Figure 31):

Bruit de fond minimum :

Durant la première phase, le vent n'est pas favorable, la faible quantité de chlore produit par l'océan se dépose sous l'effet de la gravité, avant d'atteindre Sinnamary : le bruit de fond en chlore particulaire est de $3.54 \pm 6.73 \text{ mg.m}^{-2}$.

Augmentation de la concentration en chlore :

Lorsque les conditions de vents sont meilleures, et permettent le transport des particules de chlores sur de plus longues distances, il y a une relation entre les concentrations en chlore particulaire et le vent (en rouge sur la Figure 31). Dans ce cas là, une régression linéaire permet d'avoir une formule mettant en relation nos deux paramètres, avec une bonne précision (le coefficient de corrélation est supérieur à 0.9).

Bruit de fond maximum :

Quand les valeurs des vents calculés sont supérieures à 3.20 m.s^{-1} , la concentration en chlore particulaire cesse d'augmenter, et garde une valeur constante. La distance à la côte de

Sinnamary limiterait l'apport de chlore d'origine marine. En conséquence, ce maximum diminuerait avec la distance à la côte. La valeur moyenne maximale atteinte est de $7.82 \pm 3.92 \text{ mg.m}^{-2}$.

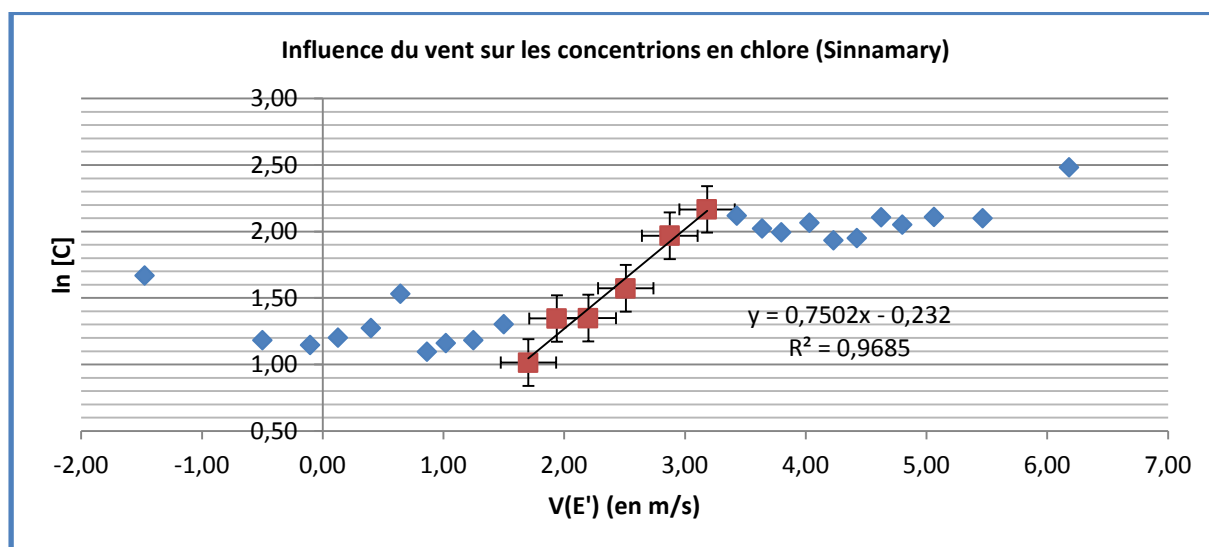


Figure 31 : résultats pour Sinnamary

Couplage vent (en m/s)	concentration en chlore (en mg.m^{-2})
$V(E') < 1.6$	3.54 ± 6.73
$1.6 < V(E') < 3.4$	$e(0.7502V(E') - 0.232)$
$3.4 < V(E')$	7.82 ± 3.92

Tableau 3 : détermination des retombées naturelles en chlore suivant les paramètres du vent.

ii. La basse saison en chlore :

Comme la production en chlore particulaire par l'Océan est faible durant cette période, il n'y a pas de corrélation entre le vent et les concentrations en chlore. La moyenne permet de déterminer le bruit de fond présent sur la ville de Sinnamary : $1.63 \pm 2.23 \text{ mg.m}^{-2}$ (Figure 32).

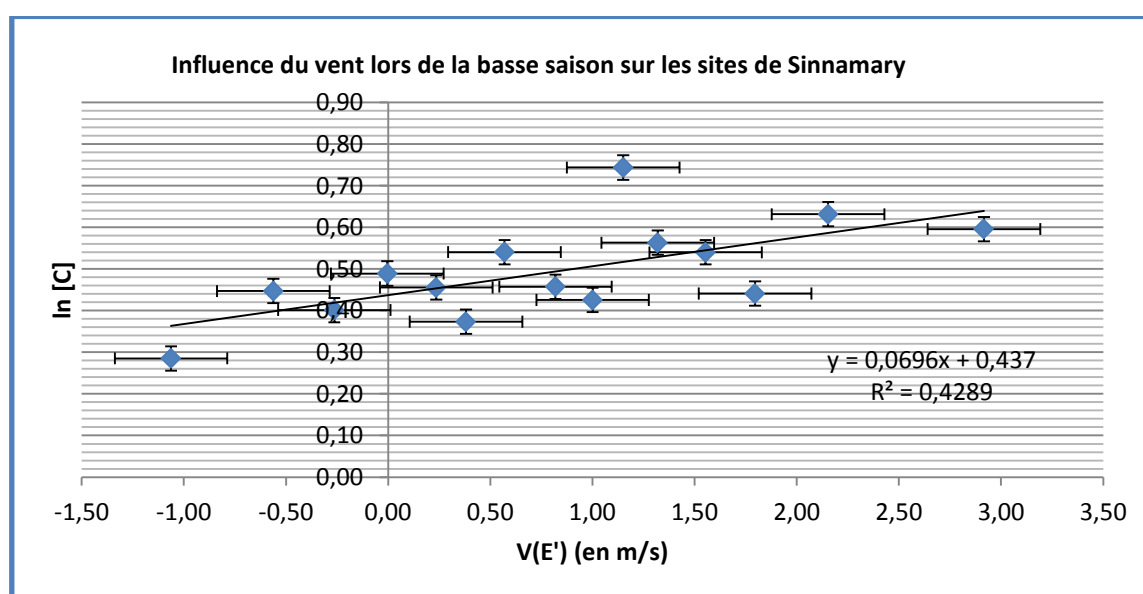


Figure 32 : influence du vent lors de la basse saison sur les sites de Sinnamary

c) Comparaison des résultats de Kourou et de Sinnamary

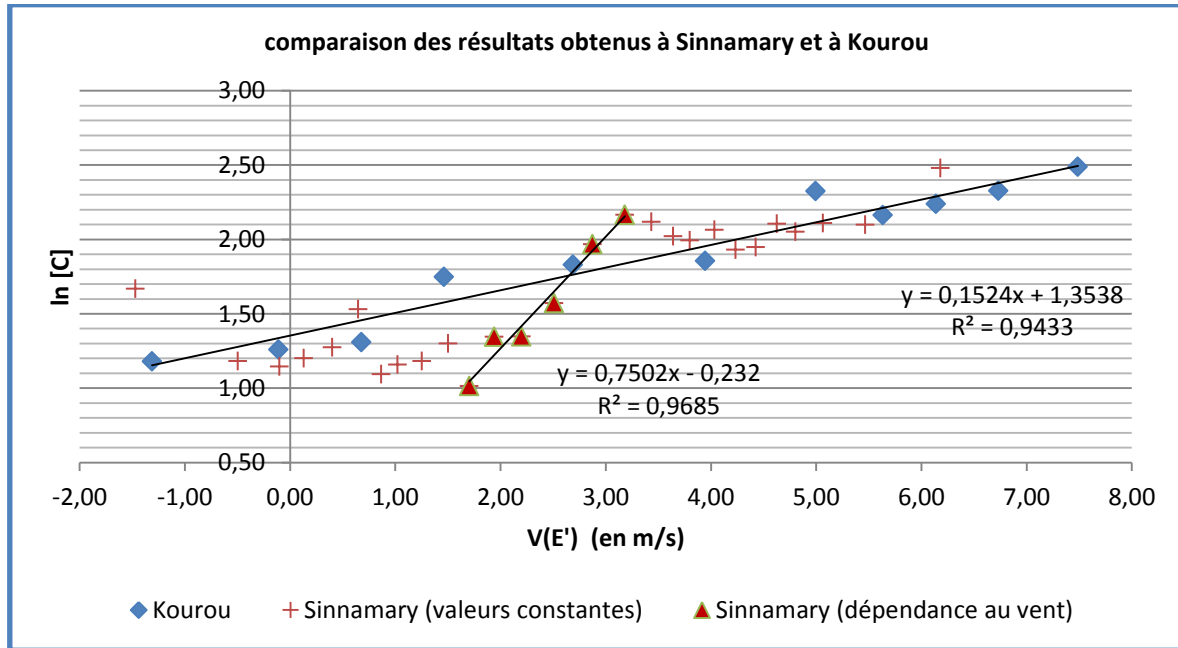


Figure 33 : comparaison des résultats obtenus à Sinnamary et à Kourou lors de l'étude des vents

A Sinnamary, lorsque le vent augmente en même temps que les concentrations en HCl, le coefficient directeur de l'équation est de 0,7502. Dans le cas de Kourou, ce coefficient n'est que de 0.1524 (Figure 33) : la dépendance au vent est plus importante à Sinnamary qu'à Kourou.

En effet, les molécules contenant du chlore atteindront Sinnamary lorsque le vent aura une direction favorable et une vitesse suffisante. **Le coefficient «a» reflète la dépendance au vent.**

Le bruit de fond en basse saison du site de Kourou est supérieur à celui de Sinnamary ($2.06 \pm 4.29\text{mg.m}^{-2}$ contre $1.63 \pm 2.23\text{mg.m}^{-2}$). En effet, ce dernier diminue avec la distance à la côte lors de la basse saison. **Nous pouvons en déduire, au vu de la topographie, et de la distance à l'océan, qu'un site tel que le croisement entre la RN1 et la route de Petit Saut a un bruit de fond très faible en chlore.**

2) Particules

Les concentrations en chlore particulaire recueillies avec les bacs à eau en fonction des données de la station fixe de Cayenne sont présentées ci-dessous (Figure 34 et Figure 35). Dans les deux cas nous observons une corrélation faible entre ces deux paramètres (coefficient de corrélation de 0.6084 pour Kourou et 0.5365 pour Sinnamary).

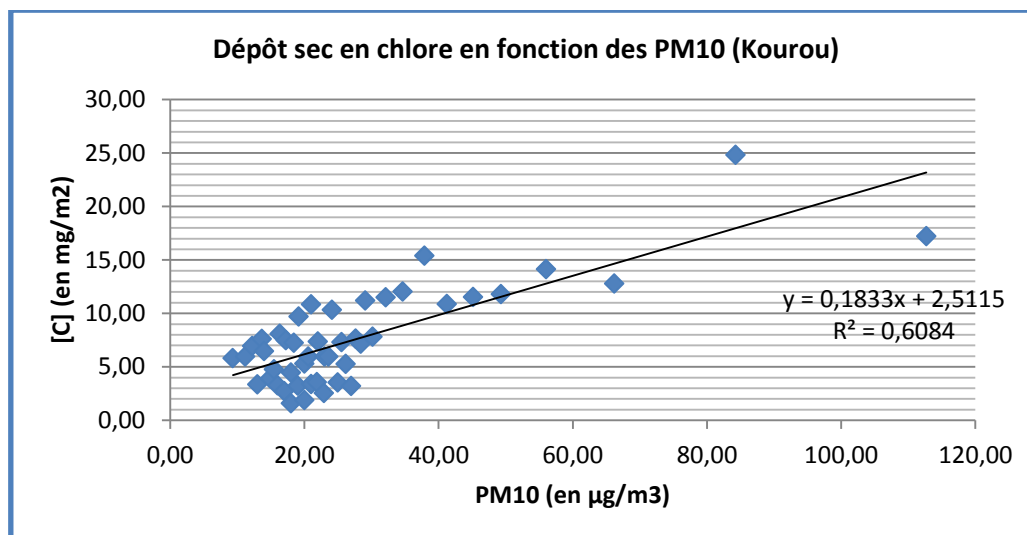


Figure 34 : [PM10] en fonction des concentrations en chlore pour le site de Kourou

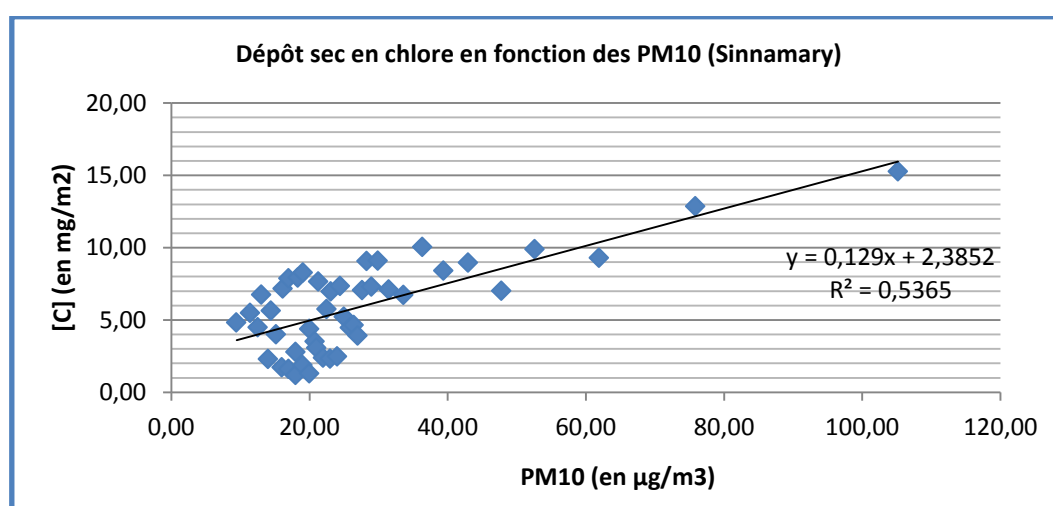


Figure 35 : [PM10] en fonction des concentrations en chlore pour les sites de Sinnamary

Les particules d'origine naturelle circulant au-dessus de l'Océan Atlantique s'agrègent avec des atomes de chlore provenant du sel marin. Ensuite, par dépôt sec ou humide, elles se retrouvent dans les bacs à eaux d'où la relation entre les concentrations en PM10 et celles en chlore particulaire.

En Guyane, la grande majorité des particules d'origine naturelle, circulant au-dessus de l'Océan Atlantique, proviennent des brumes Sahariennes. Elles n'auront un impact sur nos mesures que lorsqu'elles seront présentes en grandes concentrations (souvent de Janvier à Mai).

En ne considérant que ces périodes où les concentrations en PM10 sont supérieures ou égales à 36 µg.m⁻³ (correspondant à un épisode de poussières faible à modéré d'après l'étude du LaRGE (ELLAPIN, 2010) les coefficients de corrélation deviennent meilleurs (Figure 36 et Figure 37). Ils passent de 0.6084 à 0.8191 pour Kourou et de 0.5365 à 0.6603 pour Sinnamary. Lors d'un pic de poussières (en particulier de brumes Sahariennes), il y a un apport supplémentaire en chlore dans l'atmosphère guyanaise.

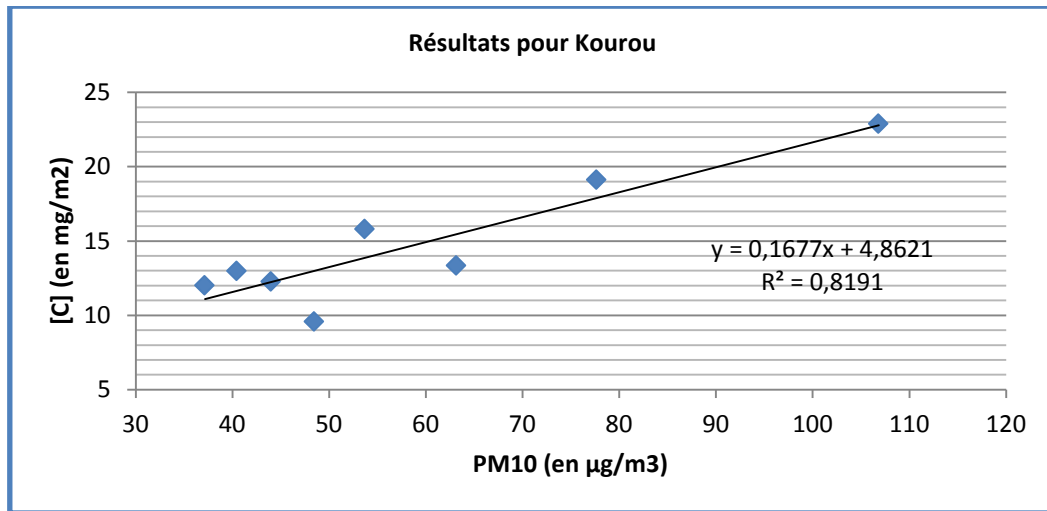


Figure 36 : étude lors des passages de poussières à Kourou

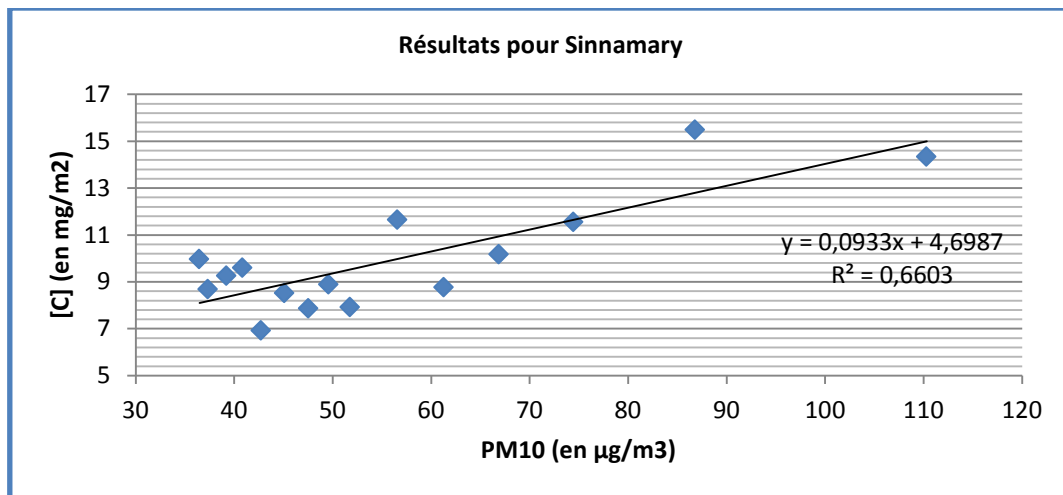


Figure 37 : étude lors des passages de poussières à Sinnamary

Comme pour les vents, il est possible d'écrire une équation mettant en relation les retombées atmosphériques en chlore particulaire et les concentrations en aérosols sur la ville de Cayenne.

La relation est du type : « $[C] = a \cdot [PM10] + b$ »

avec [C] le dépôt sec en chlore (en $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$), et [PM10] les concentrations en particules de moins de $10\mu\text{m}$ de diamètre (en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

Afin d'améliorer les résultats donnés dans la partie « 1) Vent », nous avons couplé les valeurs de poussières (PM10) à celles du vent, afin d'établir une relation prenant en compte les concentrations en particules.

3) Vent et particules

a) Résultats de Kourou

i. La haute saison en chlore (de Novembre à Juin) :

Pour améliorer nos résultats en utilisant les données de particules, une équation du type : « $\ln [C] = a.X+b$ »

avec [C] les concentrations chlore particulaire et X la variable inconnue comprenant les paramètres du vent et de la concentration en particule

est recherchée

Équation 6

$$X = \ln [PM10] + V(E').\beta$$

$X \rightarrow$ variable correspondant aux valeurs de [PM10] et de vent

[PM10] $\rightarrow$ concentration de particules de moins de $10\mu\text{m}$ de diamètre (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$V(E') \rightarrow$ couplage des valeurs de forces et directions des vents (en m/s)

$\beta \rightarrow$ constante (en $(\text{m/s})^{-1}$)

Les données utilisées sont celles de la haute saison en chlore particulaire (de Novembre à Juin). La concentration en chlore particulaire augmente avec les concentrations en particules et le couplage du vent (Figure 38).

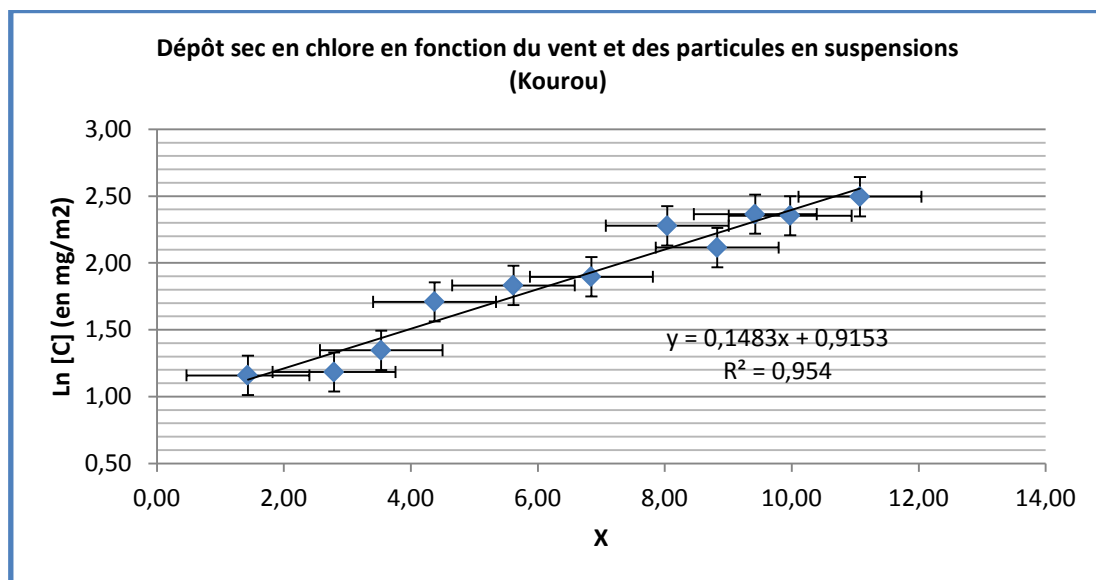


Figure 38 : variable X en fonction des concentrations en chlore à Kourou lors de la haute saison

La régression linéaire donne un coefficient de corrélation (0.954) légèrement supérieur à celui calculé pour l'étude des vents (0.9433) et celui calculé dans l'étude des particules (0.8191). En prenant en compte le paramètre « PM10 » l'équation est devenue plus précise :

Équation 7

$$\ln [C] = 0.1483(\ln [PM10] + V(E')0.95)+0.9153$$

$PM10 \rightarrow$ concentration de particules de moins de $10\mu m$ de diamètre (en $\mu g/m^3$)

$V(E') \rightarrow$ couplage des valeurs de forces et directions des vents (en m/s)

(Rappelle : $V(E') = \sin(\vartheta + \alpha) \cdot F$)

$\beta \rightarrow$ ici elle vaut $0.95 (m/s)^{-1}$

i. La basse saison en chlore (de Juillet à Octobre) :

Il n'y a plus de relation entre les paramètres météorologiques et les concentrations en chlore particulaire. Durant cette période les concentrations sont faibles. Nous avons déterminé un bruit de fond qui est de $2.06 \pm 4.29 mg.m^{-2}$.

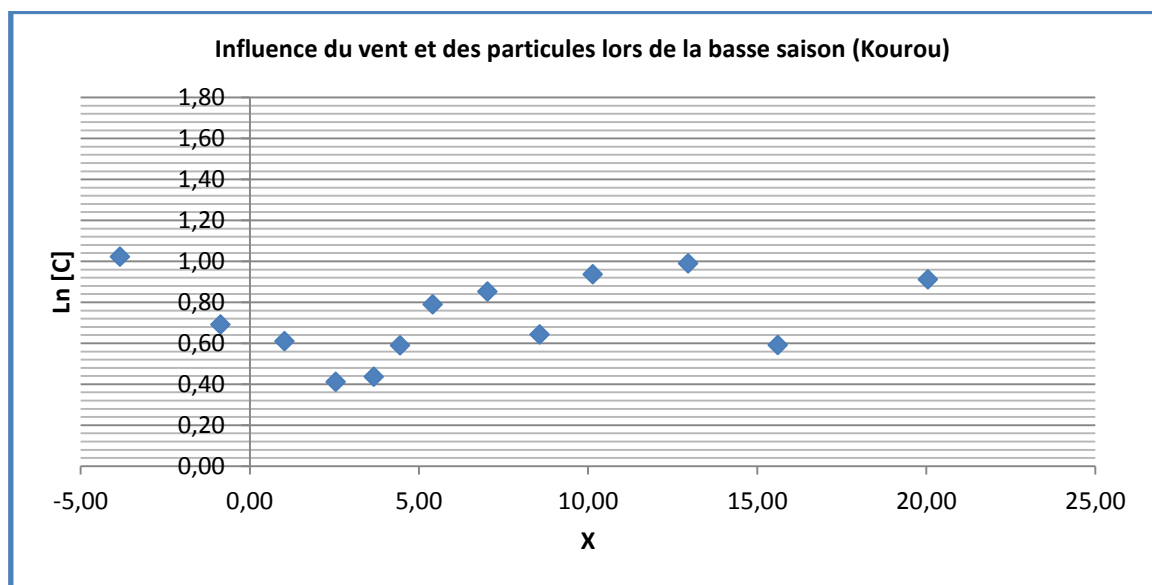


Figure 39 : influence du vent et des particules sur les résultats de Kourou lors de la basse saison

Note : ici $X = V(E') \cdot 3.70 + \ln[PM10]$

Il y a donc une corrélation entre le vent, les particules d'origine naturelle, et les concentrations en chlore particulaire. Nous utiliserons les résultats obtenues par cette méthode par la suite.

b) Résultats de Sinnamary

i. La haute saison en chlore (de Novembre à juin):

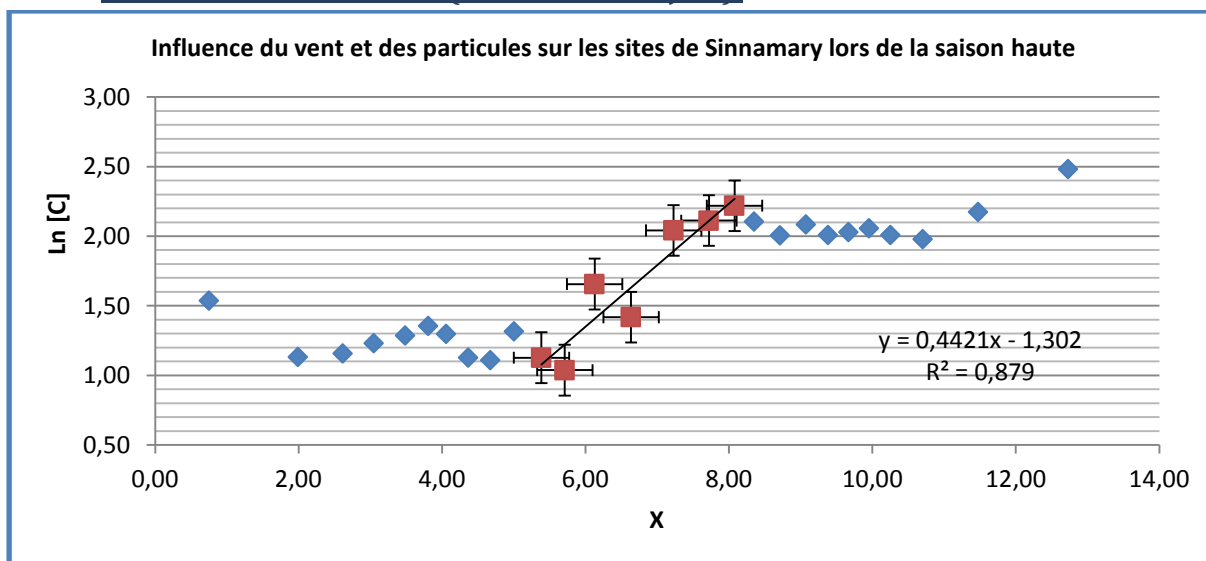


Figure 40 : l'influence du vent et des particules sur les sites de Sinnamary lors de la saison haute

La variation de la concentration en chlore se fait toujours en trois étapes :

Bruit de fond minimum :

Pour X compris entre 0.0 et 5.4 : Il y a peu de production de chlore par l'action du vent sur l'océan, et, Sinnamary étant éloigné des côtes, l'apport par le vent est limité. Nous observons des valeurs constantes correspondant à un bruit de fond minimum présent sur nos sites. Cette valeur moyenne est de $3.49 \pm 6.71 \text{ mg.m}^{-2}$.

Augmentation de la concentration en chlore :

Pour X compris entre 5.4 et 8.0, l'apport combiné du chlore par le vent et des particules entraînent une augmentation linéaire des concentrations en chlore particulaire. Le coefficient de corrélation est de 0.879 contre 0.9685 dans l'étude du vent et 0.6603 dans l'étude des PM10. L'utilisation des données de particules a diminué le coefficient directeur de la courbe (0.4421 (Figure 40) contre 0.7502 (Figure 31) lors de l'étude du vent), mais a aussi diminué la précision de l'équation.

Bruit de fond maximum :

Pour X supérieur à 8.0, une valeur limite est atteinte de par le dépôt sec du chlore dans la mangrove. Le vent ne peut apporter qu'une concentration limitée en chlore sur des sites éloignés à la côte. Cette valeur est de $7.90 \pm 3.87 \text{ mg.m}^{-2}$ pour les sites de Sinnamary.

Nous pouvons écrire :

Couplage particule/vent	[C] en chlore (en mg.m^{-2})
$X < 5.4$	3.49 ± 6.71
$5.4 < X < 8.0$	$e(0.4421X - 1.302)$
$8.0 < X$	7.90 ± 3.87

Tableau 4 : détermination des retombées naturelles en chlore en fonction des particules et du vent.

Note : $X = \ln [PM10] + V(E')1.36$

$PM10 \rightarrow$ concentration de particules de moins de $10\mu m$ de diamètre (en $\mu g/m^3$)

$V(E') \rightarrow$ couplage des valeurs de forces et directions des vents (en m/s)

$\beta \rightarrow$ ici elle vaut $1.36(m/s)^{-1}$

ii. La basse saison en chlore (de Juillet à Octobre):

Le bruit de fond est de $1.63 \pm 4.96 \text{ mg.m}^{-2}$ (Figure 41).

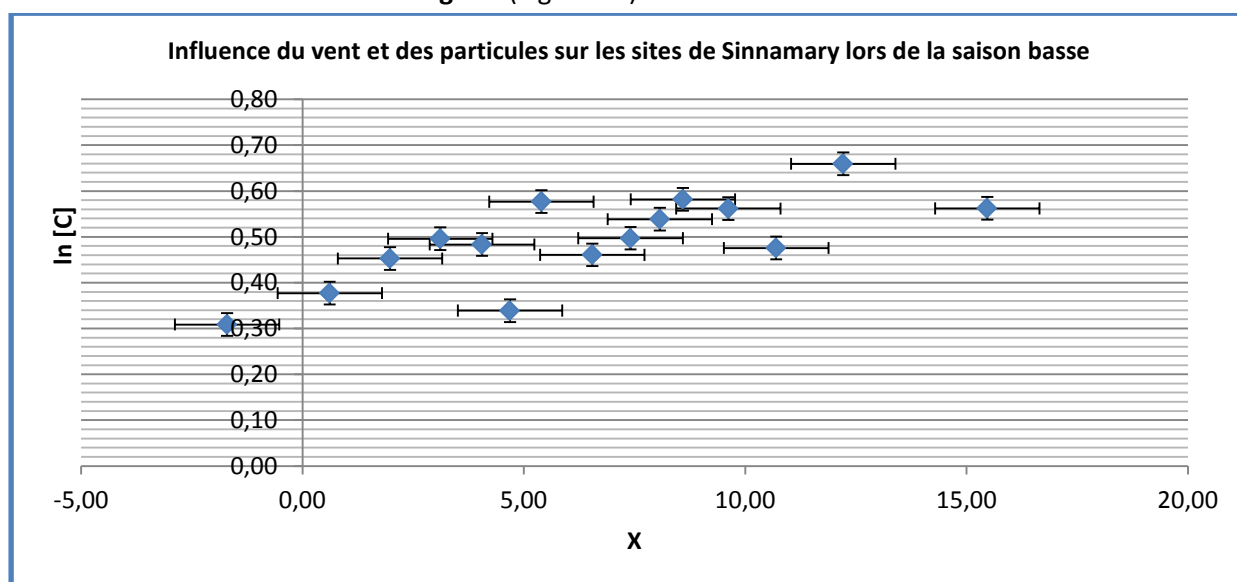


Figure 41 : influence du vent et des particules sur les sites de Sinnamary lors de la saison basse

Le vent est le paramètre principal influençant les concentrations en chlore particulaire de par la position géographique de Sinnamary.

c) Comparaison des résultats de Kourou et de Sinnamary

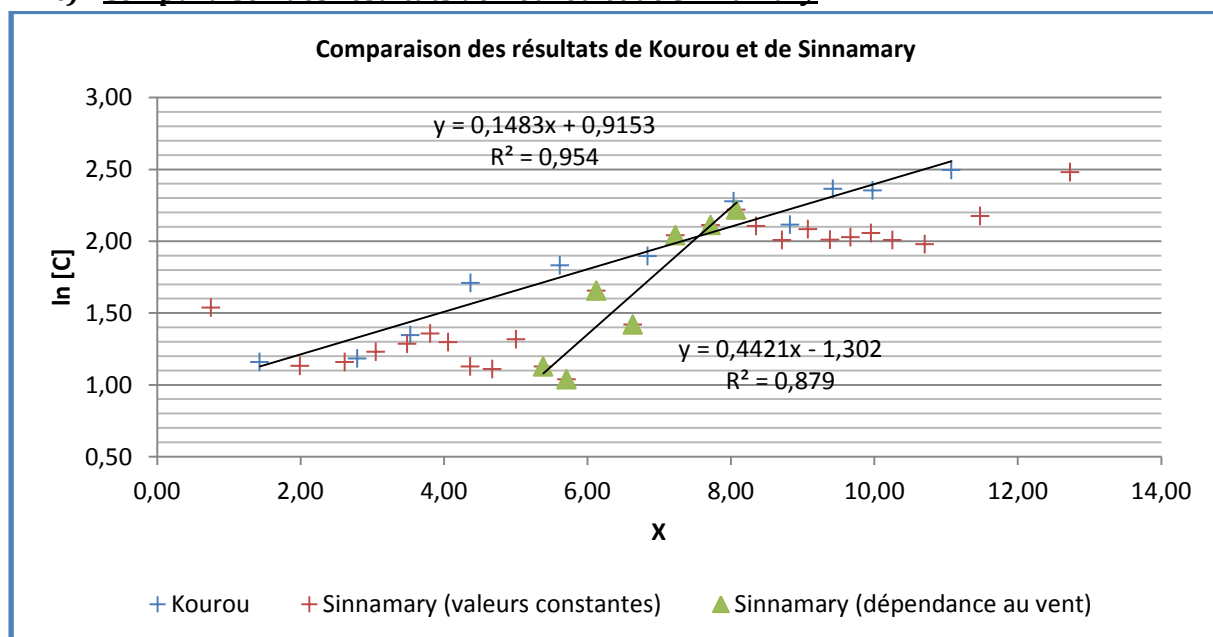


Figure 42 : comparaison des résultats des villes de Kourou et de Sinnamary

Pour Kourou, le coefficient directeur de la droite passe de 0.1524 dans l'étude du vent (Figure 29) à 0.1483 (Figure 38), soit une diminution d'environ 3%. Dans le cas de Sinnamary, il passe de 0.7502 (Figure 31) à 0.4421 (Figure 40), soit une diminution d'environ 41%. Les coefficients directeurs de Sinnamary et de Kourou sont plus proches que lors de l'étude du vent. La prise en compte des particules permet un rapprochement de l'évolution des concentrations en chlore sur les deux villes. En effet, les particules étudiées ont un impact à une échelle synoptique (échelle mondiale), et leur répartition en Guyane est homogène (Figure 22).

A Kourou, les particules d'origine naturelle entraînent une augmentation des concentrations en chlore particulaire. Il y a une corrélation entre le vent, les poussières, et les concentrations en chlore Particulaire.

A Sinnamary, les particules d'origine naturelle apportent moins de chlore particulaire qu'à Kourou. Celles ayant réagi avec du sel marin, voient leur taille augmenter, ce qui laisse supposer qu'elles sédimentent entre la côte et Sinnamary. L'utilisation des données de PM10 n'améliore pas les résultats. Le vent étant le paramètre prédominant, la meilleure corrélation est celle entre le vent et le chlore particulaire.

En basse saison, les concentrations en chlore à Kourou et à Sinnamary ne varient pas, ou peu avec le vent. Il y a un bruit de fond régulier. La distance à la côte étant plus importante pour Sinnamary, celui-ci est plus faible qu'à Kourou ($1.63 \pm 4.96 \text{ mg.m}^{-2}$ contre $2.06 \pm 4.29 \text{ mg.m}^{-2}$).

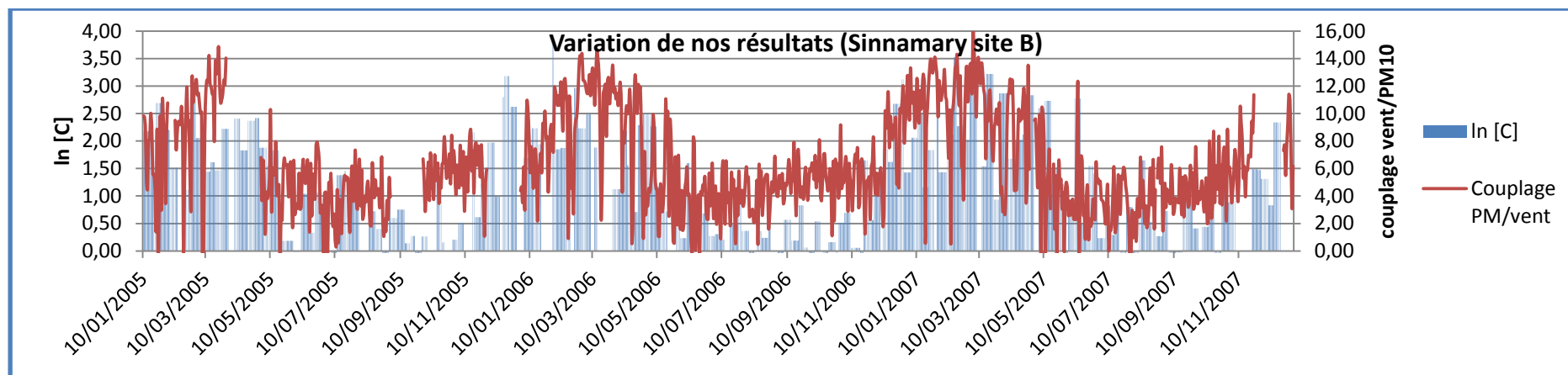


Figure 43 : influence du vent et des PM10 à Sinnamary (site B)

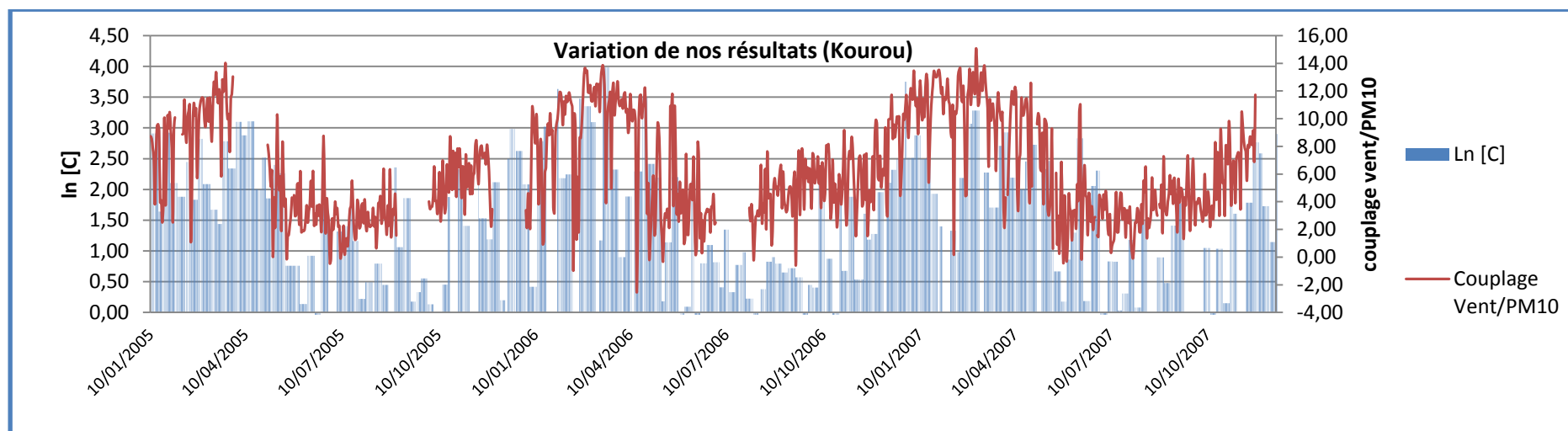


Figure 44 : influence du vent et des PM10 à Kourou

4) Pluviométrie

La pluviométrie joue un rôle important car elle est à l'origine des dépôts humides du chlore « rain out » sous forme gazeuse et particulaire. D'après une étude (Meira, 2006), plus l'humidité relative est importante, plus le « mouillage » du sel présent dans l'atmosphère augmente. La taille des particules étant plus importante, alors le lessivage de l'atmosphère par la pluie est plus efficace.

Lors des campagnes de mesures, les bacs à eaux étaient laissés sur site pendant plusieurs jours. Lorsqu'il pleuvait, le chlore résultant du lessivage de l'atmosphère a aussi été recueilli.

a) *Evolution de la concentration en chlore particulaire en fonction de la pluviométrie*

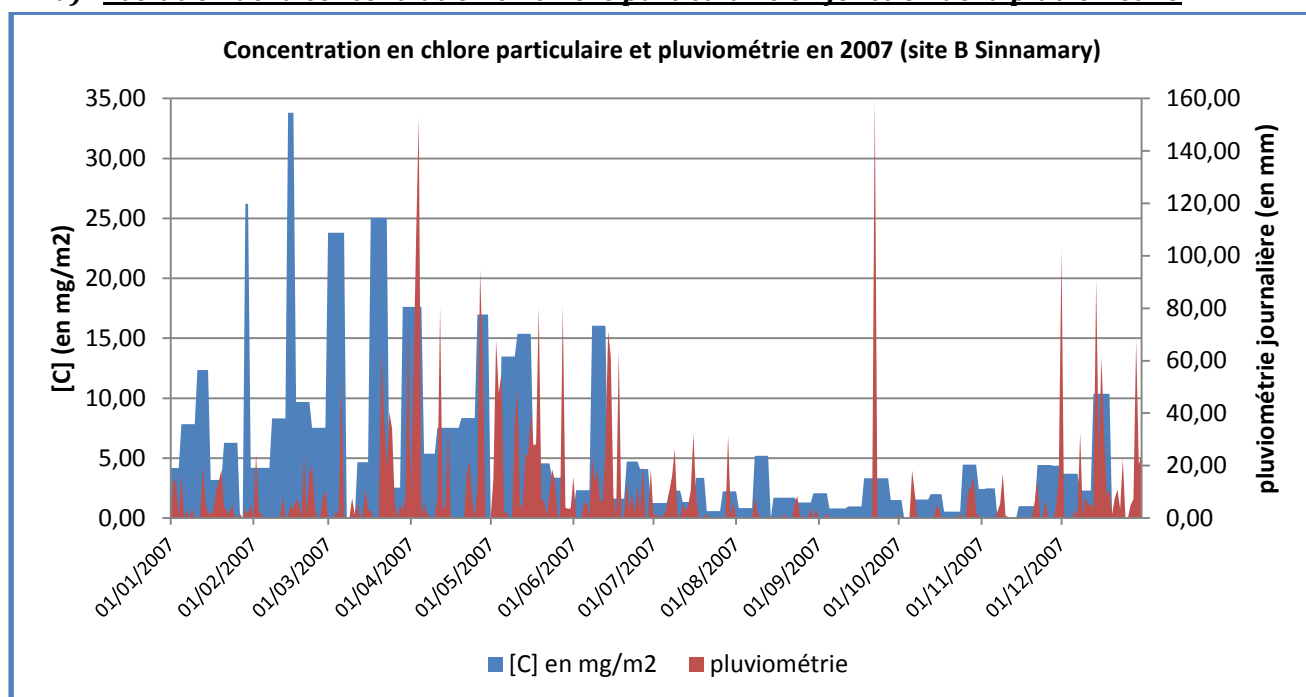


Figure 45 : résultats du site B de Sinnamary

Une grande concentration en chlore particulaire est mesurée dans les bacs à eau lors d'une pluie si l'atmosphère est riche en chlorure d'hydrogène. Le lessivage de l'atmosphère entraîne ces particules au sol, ce cas est généralement observé lors de la haute saison en chlore (exemple : 1 Avril 2007 sur la Figure 45).

Quand l'atmosphère est pauvre en chlore particulaire, surtout durant la basse saison en chlore, l'influence de la pluie est faible (la pluie de septembre 2007 n'entraîne pas l'augmentation des concentrations en chlore (Figure 45)).

b) Résultats de Kourou

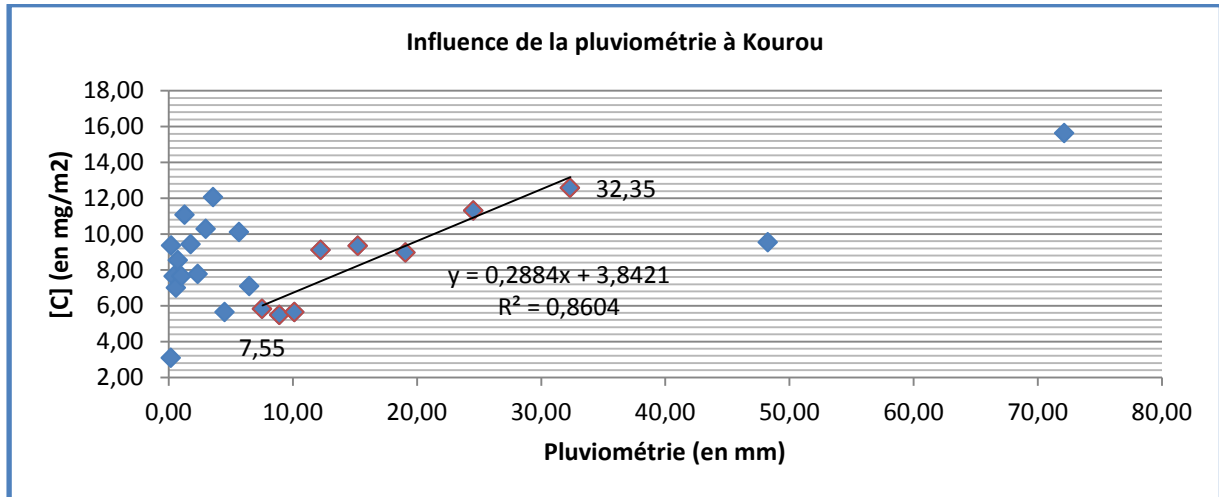


Figure 46 : influence de la pluviométrie à Kourou

i. Une pluviométrie inférieure à 8 mm :

n'est pas suffisamment intense pour influencer sur nos résultats. L'apport en chlore, ou la dilution de notre échantillon sera minimal. Les paramètres prédominants sont le vent et les particules.

ii. Une pluviométrie comprise entre 8mm et 32mm :

permet de mettre en évidence une relation linéaire entre la concentration en chlore particulaire et la hauteur d'eau de la précipitation. Les particules de chlore présentes dans l'atmosphère sont rabattues au sol par la pluie, et recueillies dans les bacs à eau.

iii. Une pluviométrie supérieure à 32 mm :

Au début du passage pluvieux :

Le chlore particulaire est rabattu par la pluie dans les bacs à eau. Il y a une augmentation de la concentration.

A la fin du passage pluvieux :

La forte pluviométrie peut avoir deux effets :

- l'apport en chlore de l'océan à Kourou diminue, car le lessivage de l'atmosphère est important, d'où une diminution du chlore dans les bacs à eaux.
- Par contre, si la production en chlore de l'Océan est toujours importante, alors le chlore produit sera recueilli dans les bacs, par l'action de la pluie.

Il n'y a pas de relation exploitable entre la pluviométrie et la concentration en chlore particulaire.

c) Résultats de Sinnamary

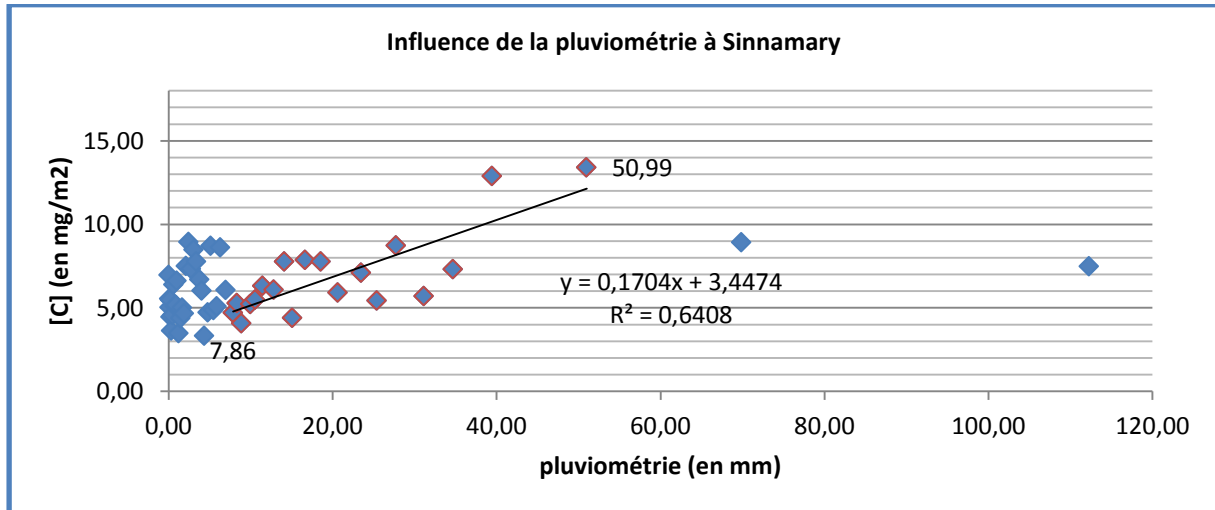


Figure 47 : influence de la pluviométrie à Sinnamary

i. Une pluviométrie inférieure à 8 mm :

n'est pas suffisamment intense pour influencer sur nos résultats. L'apport en chlore, ou la dilution de notre échantillon sera minimum. Le paramètre prédominant est le vent.

ii. Une pluviométrie comprise entre 8 et 50 mm :

La concentration en chlore particulaire augmente avec la pluviométrie de par le lessivage de l'atmosphère, qui entraîne le chlore particulaire dans les bacs à eaux.

iii. Une pluviométrie supérieure à 50 mm :

Au début du passage pluvieux :

Le chlore particulaire est rabattu par la pluie dans les bacs à eau augmentant la concentration de ce dernier

A la fin du passage pluvieux :

La forte pluviométrie lessive le chlore particulaire de la côte à Sinnamary, entraînant une diminution du chlore transporté par le vent jusqu'à Sinnamary : il y a moins de chlore présent dans l'atmosphère, et l'eau de pluie s'accumule dans les bacs à eau. Les échantillons sont dilués, et les concentrations relevées diminuent.

d) Comparaison des résultats de Kourou et de Sinnamary

La dépendance de nos résultats à la pluie est plus importante à Kourou qu'à Sinnamary. Leurs coefficients directeurs sont respectivement 0.2884 et 0.1704 (Figure 46 et Figure 47).

Comme la quantité de chlore transporté de l'océan Atlantique à Kourou est plus importante, le lessivage de l'atmosphère par la pluie entraînera une augmentation plus importante des concentrations en chlore particulaire dans les bacs à eau.

Lorsque la pluie devient très intense (hauteur d'eau supérieure à 50mm), une partie du chlore, amené par le vent de l'océan à Sinnamary, subit le lessivage de la pluie au cours du transport. Il y a donc une diminution des concentrations. Kourou étant au bord de l'Océan, les particules de chlore

subissent moins le lessivage de la pluie lors de leur transport. Les concentrations relevées dans les bacs à eau de Kourou sont plus importantes qu'à Sinnamary.

V. Conclusion

A Kourou, il y a deux paramètres météorologiques qui auraient une grande influence sur la présence naturelle de chlore dans l'atmosphère Guyanaise : le vent (vitesse et direction) et la présence de poussières (en provenance de l'océan atlantique).

A Sinnamary, le paramètre prédominant est le vent (vitesse et direction).

Plus un site est éloigné de la côte, une augmentation des concentrations en chlore particulaire pourra être observée si la vitesse du vent est élevée et l'origine marine de ce dernier dominant.

Par contre, si la distance devient trop importante, il n'y aura qu'un léger bruit de fond.

En règle générale, la **pluviométrie est aussi un paramètre important**. Elle rabat au sol, et dans les bacs à eau, une partie du chlore particulaire présent dans l'atmosphère.

Grâce à toutes les données recueillies par l'ORA depuis 2005, nous pouvons déterminer les concentrations d'origine naturelle en chlore particulaire sur les sites de Kourou et de Sinnamary quelque soit la période de l'année.

Le bruit de fond en chlore particulaire déterminé dans ce rapport est en accord avec l'étude menée par Arnould EBER au sein de l'ORA. Il avait déterminé un bruit de fond pour l'année 2006 de 5.79mg.m^{-2} à Sinnamary et de 7.29mg.m^{-2} à Kourou. Notre étude a permis d'affiner ces valeurs en fonction des paramètres météorologiques **(EBER, 2007)**.

En conclusion, trois données sont nécessaires : la force et la direction du vent, et les concentrations en PM10 de la station fixe de Cayenne voire celles mesurées sur le site d'étude. **Lors d'un lancement d'Ariane V, il est alors possible de déduire par soustraction de la concentration totale comprenant le bruit de fond naturel relevée dans nos bacs à eau, la part anthropique des concentrations en chlore.**

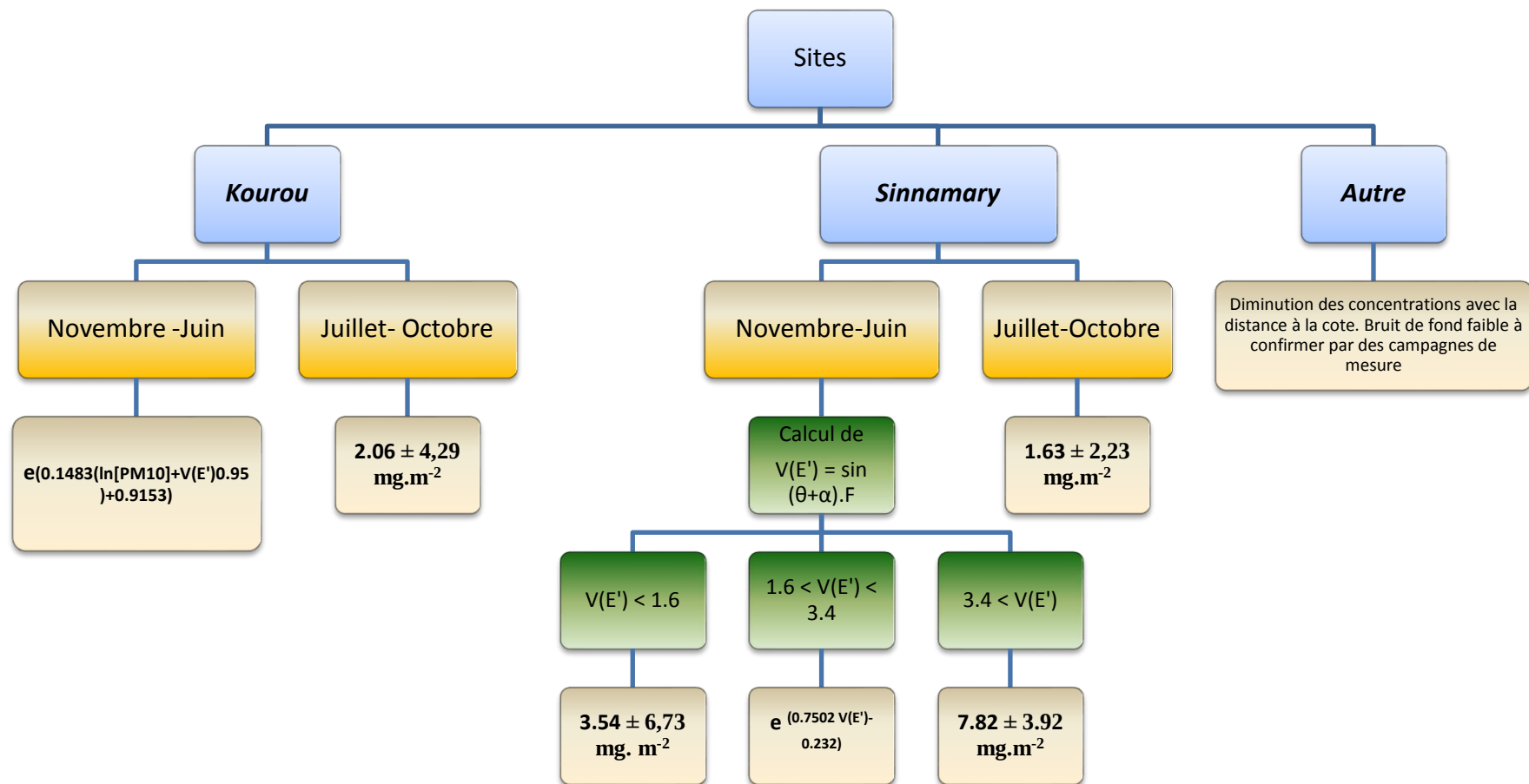


Figure 48 : détermination des concentrations en chlore particulaire d'origine marine (bruit de fond naturel).

Paramètre	Unité
PM10	Concentration en particule sur le littoral Guyanais ($\mu\text{g.m}^{-3}$)
V(E') Kourou	Couplage vitesse direction du vent (m.s^{-1}), données de la station météo « Kourou plage »
V(E') Sinnamary	Couplage vitesse direction du vent (m.s^{-1}), données de la station météo du « CSG »

C) Impact éventuel des lancements d'Ariane V sur l'environnement

I. Etude des retombées du nuage de combustion en Guyane.

1) Caractéristiques d'Ariane V.

Les paramètres météorologiques ayant une grande influence sur les retombées en produits chimiques et la pollution engendrée par Ariane V se faisant dans un plan vertical, la difficulté d'analyse repose sur leur variation avec l'altitude. Après chaque tir, le CSG réalise un radiosondage, permettant d'obtenir les données météorologiques dans différentes couches de la troposphère.

A l'occasion de chaque lancement, le CSG modélise la trace des retombées du nuage de combustion au sol grâce au code de calcul SARRIM qui utilise les données suivantes :

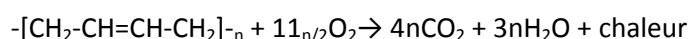
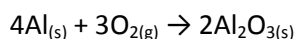
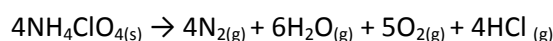
- caractéristiques du propergol,
- caractéristiques du lanceur,
- position géographique de la zone de lancement (latitude, longitude),
- paramètres météorologiques recueillies à l'aide du radiosondage.

Les Etages d'Accélérateurs à Poudres (EAP) permettent le décollage d'Ariane V de la table de lancement. Ils sont utilisés jusqu'à des altitudes comprises entre 55 et 70 km suivant les lancements puis détachés de la fusée et retombent dans l'Océan Atlantique. [\(Arianespace, 2005\)](#)

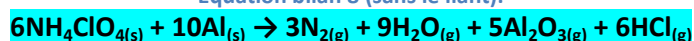
La composition des deux EAP est la suivante (pour une Ariane 5G) :

- 237 tonnes de propergols solides chacune
- 68 % de perchlorate d'ammonium (avec NH_4^+ utilisé comme combustible et ClO_4^- comme comburant)
- 18 % de polybutadiène (liant servant de combustible)
- 14 % d'aluminium (réducteur)

Les réactions chimiques mis en jeu sont les suivantes [\(Les ergols solides, 2007\)](#):



Équation bilan 8 (sans le liant):



2) Résultats obtenus de 2005 à 2008

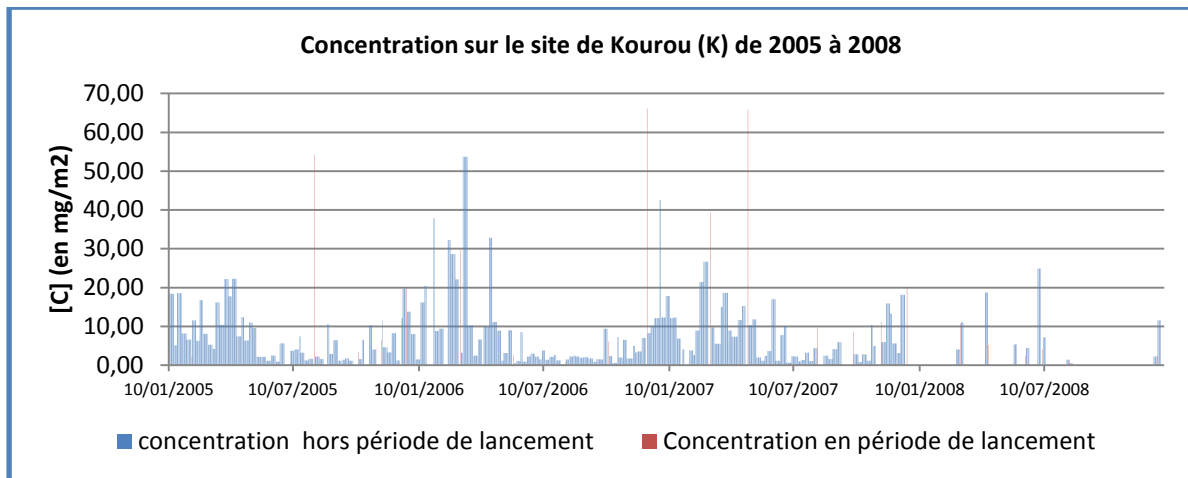
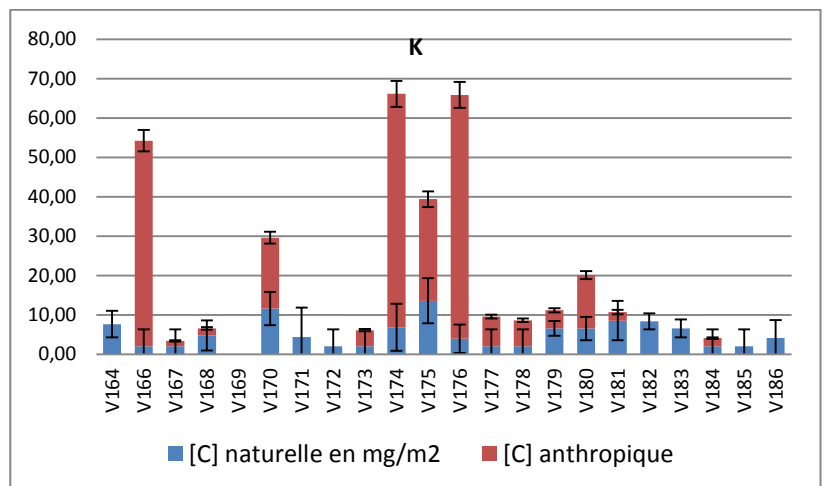
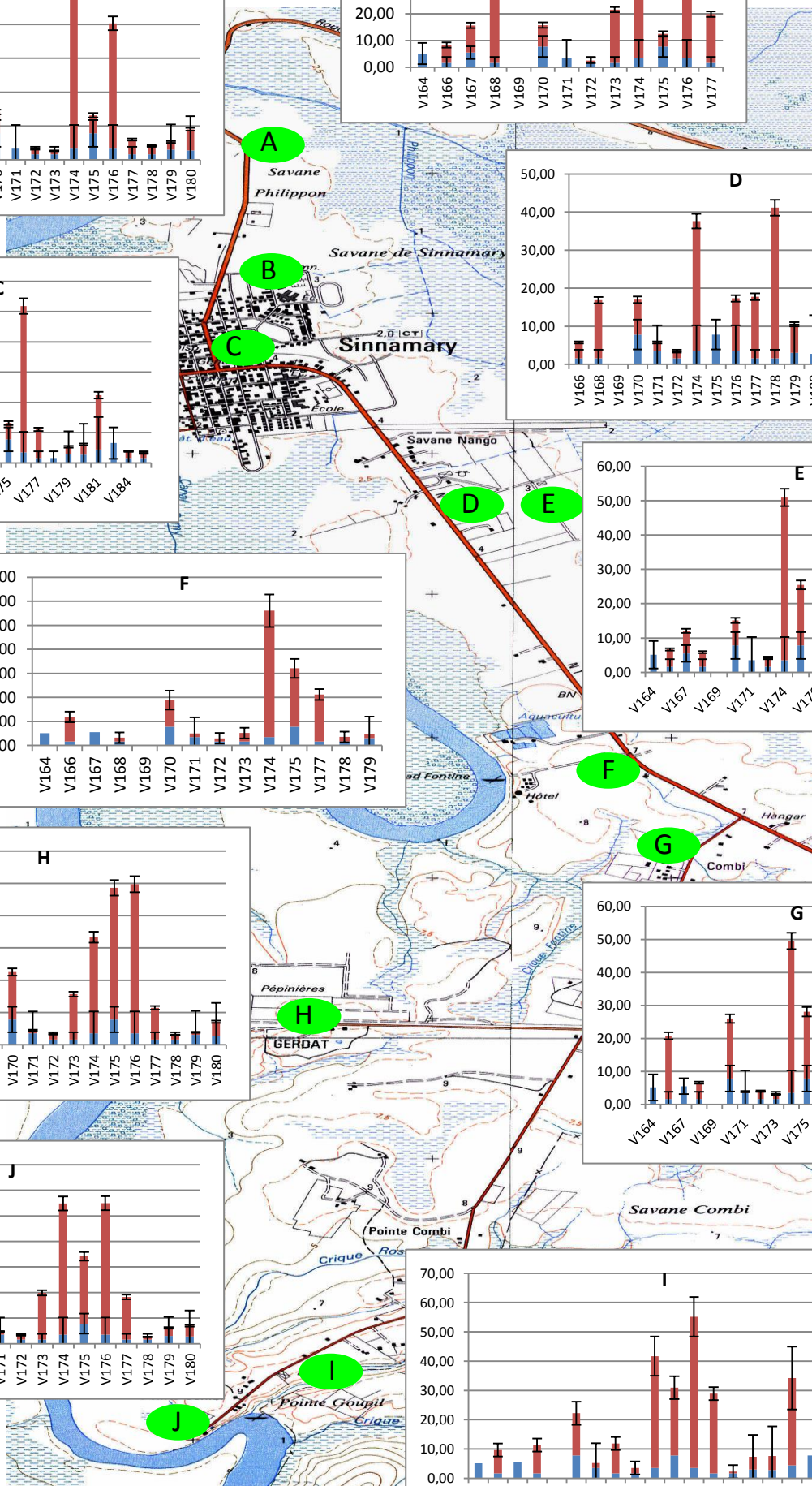
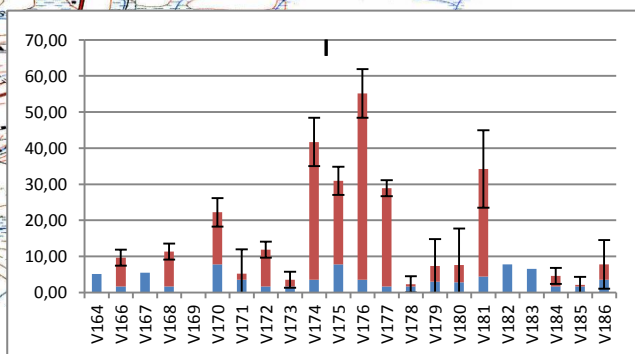
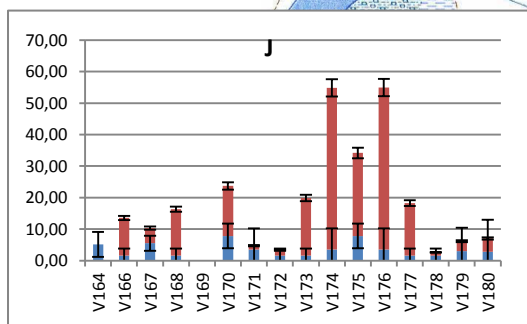
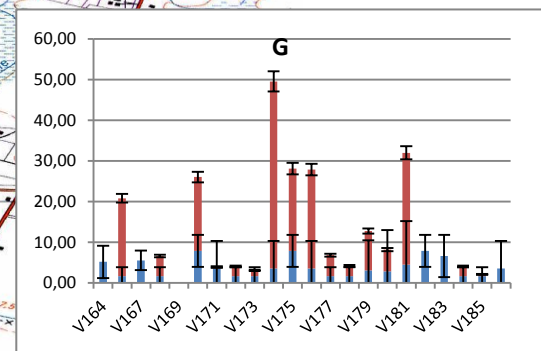
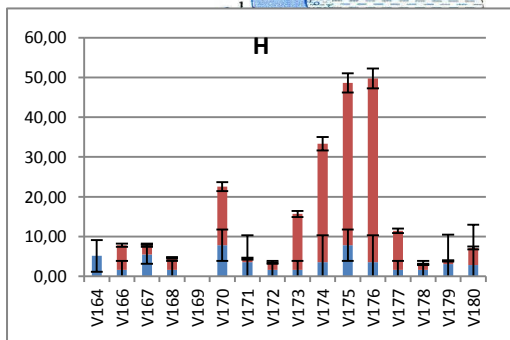
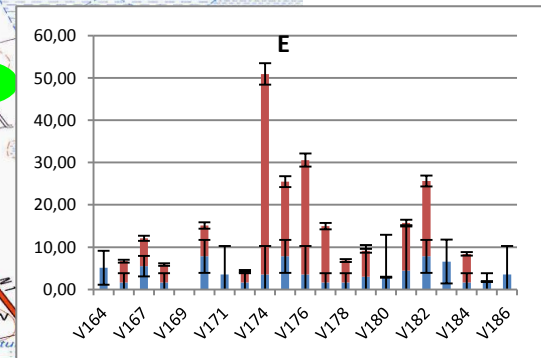
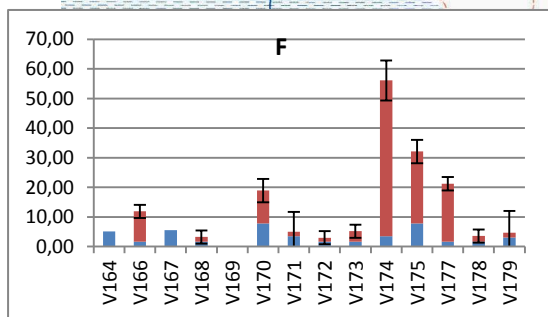
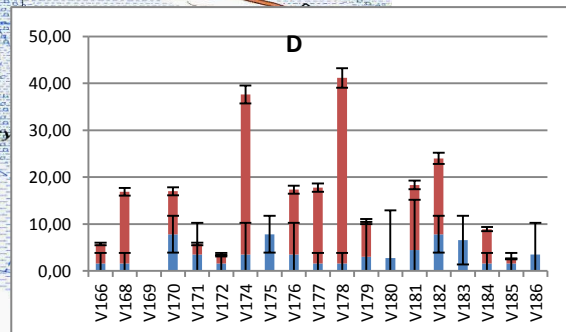
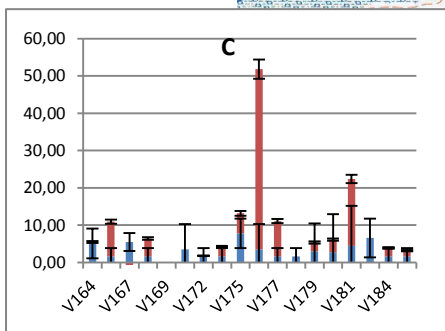
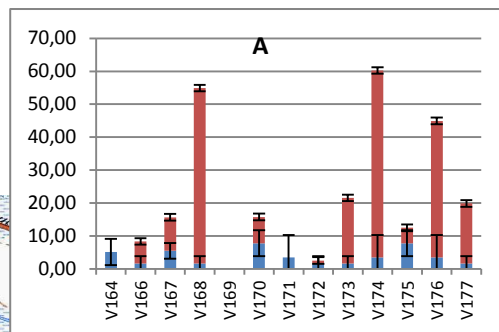
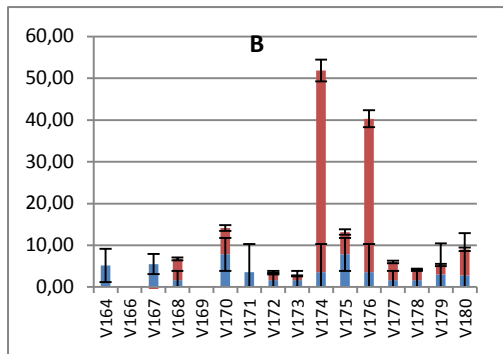


Figure 49 : concentration en chlore particulaire sur la ville de Kourou

Sur la Figure 49 on observe des concentrations importantes lors de certains lancements.

Des prélèvements ont été réalisés pour 22 tirs dont les caractéristiques sont en annexe. Ci-dessous, pour chaque site, le chlore particulaire d'origine naturelle (en bleu) a été calculé à partir de l'étude précédente, et celui d'origine anthropique (n rouge), obtenu par soustraction de la concentration totale mesurée. L'axe des ordonnées donne les concentrations (en mg.m^{-2}) et l'axe des abscisses le numéro de vol. Les concentrations sont très variables d'un tir à l'autre.





3) Paramètres météorologiques

a) Vent:

Il disperse le nuage de combustion de la fusée. Les sites qui seront impactés par les retombées en chlore particulaire dépendent de la vitesse et de la direction du vent. Le CSG modélise les retombées du panache de fumée en utilisant un radiosondage effectué dans la journée. Les sites qui ne sont pas compris dans cette zone de modélisation, ne devraient pas subir l'impact d'Ariane V. Mais l'utilisation des données du vent à une heure précise, et non au cours du temps pose problème.

En connaissant les caractéristiques du vent à l'heure du lancement, nous ne pouvons pas en déduire les sites qui seront les plus touchés. Elles changent constamment au cours du temps (passage de direction 110° à 80 ° en une heure par exemple). Durant un tir, il peut y avoir des retombées simultanées en chlore particulaire sur les villes de Kourou et de Sinnamary, qui sont pourtant dans des directions opposées.

De plus, si les alizés sont faibles, les vents dus aux brises de mer et de Terre peuvent devenir dominants. De nombreux lancements sont effectués en fin de soirée, lors du changement de régime entre brise de mer et brise de terre (entre 18h et 20h), entraînant des changements rapides de vent.

Les radiosondages révèlent que les paramètres du vent changent avec l'altitude. Suivant la couche atmosphérique où il se trouve, le panache de fumée sera dispersé dans plusieurs directions. Comme le vent de surface, les vents d'altitude évoluent au cours du temps. Ces changements ne sont pas connus car, un seul radiosondage est effectué lors d'un lancement.

b) Stabilité atmosphérique

La façon dont le panache de fumée se dilue dans l'atmosphère est un paramètre important. Avec le radiosondage réalisé par le CSG lors des lancements, nous pouvons connaître la stabilité de l'atmosphère, puis, déduire de la table de Pasquill-Gifford (Tableau 5) la facilité qu'aura un polluant à se disperser. Plus l'atmosphère est instable, plus la dispersion d'un polluant est bonne et inversement. Un seul radiosondage étant réalisé, les températures potentielles calculées correspondent à un temps t , et non à une durée. Nous ne savons pas comment évolue la stabilité atmosphérique le jour d'un lancement. Il faudra étudier ce paramètre avec la vitesse du vent, qui joue aussi un rôle dans la façon dont un polluant se dispersera.

Classe de stabilité	stabilité	Gradient de température potentiel $\delta\theta/\delta z$ (°C/100m)
A	Extrêmement instable	< -0.9
B	Modérément instable	-0.9 à -0.7
C	Légèrement instable	-0.7 à -0.5
D	Neutre	-0.5 à 0.5
E	Légèrement stable	0.5 à 2.5
F	Modérément stable	>2.5

Tableau 5 : classe de stabilité de Pasquill-Gifford

c) Pluviométrie

La pluie a la propriété de lessiver l'atmosphère. Les particules, mais aussi les gaz très solubles dans l'eau tel que le chlorure d'hydrogène seront rabattus au sol. Après un lancement, la pluie rabattra une petite partie des produits de combustions d'Ariane V au sol.

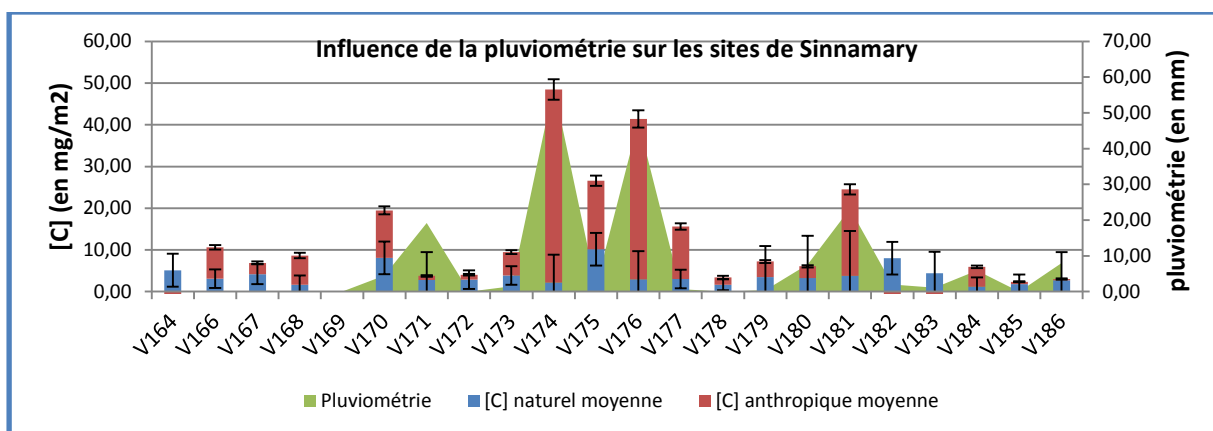


Figure 50 : influence de la pluviométrie lors des lancements sur Sinnamary.

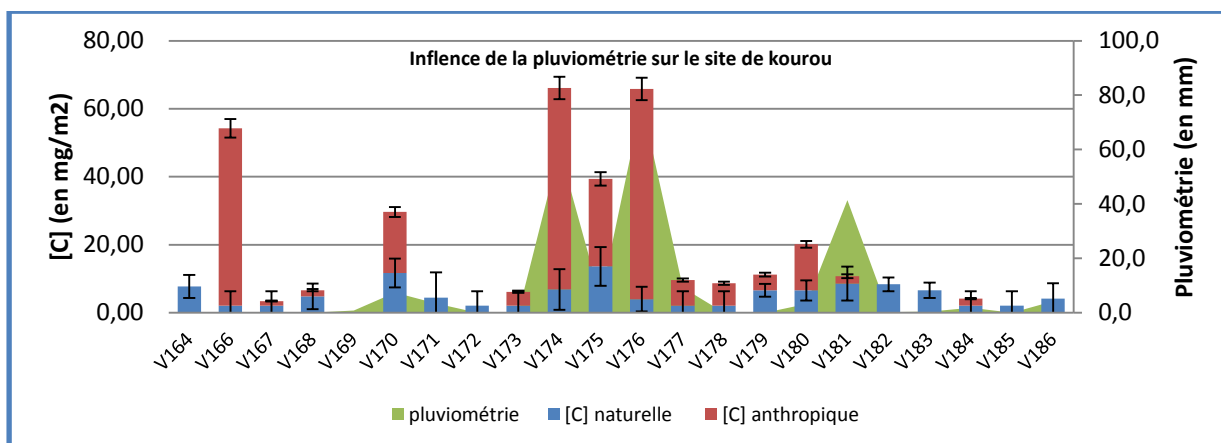


Figure 51 : influence de la pluviométrie lors des lancements sur Kourou

d) Pollution inconnue de nos échantillons

Lors de nos mesures, il peut y avoir eu contamination de nos échantillons par une pollution inconnue (activité humaine, animaux, ...). La dizaine de sites de Sinnamary permettent de déterminer si un échantillon a été contaminé. Par contre, un seul site de prélèvement étant installé à Kourou, nous ne pouvons pas être certains que cette mesure est valide. Il aurait fallu placer deux bacs à eaux dans la ville, afin de comparer les résultats.

Certains échantillons (vols 168, 175 et 178) ont été écartés en raison de l'incohérence des résultats.

i. Le vol 168 du 16 Novembre 2005 à 20h46 (haute saison en chlore naturelle) :

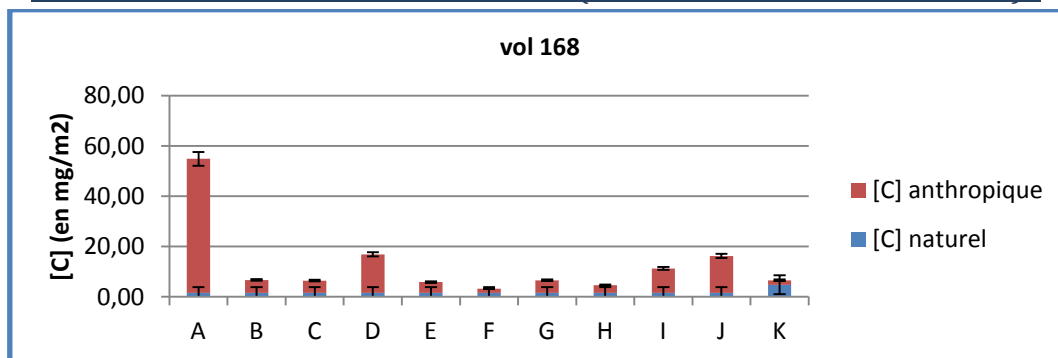


Figure 52 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 168

Le site A, a une concentration importante en chlore particulaire. Les retombées du panache de fumée ne semblent pas être à l'origine de ce pic, car, les sites B et C, qui lui sont proches, n'en subissent pas l'impact. Nous pouvons supposer que ce site A a été contaminé par une pollution anthropique de source inconnue.

ii. Le vol 175 du 11 Mars 2007 :

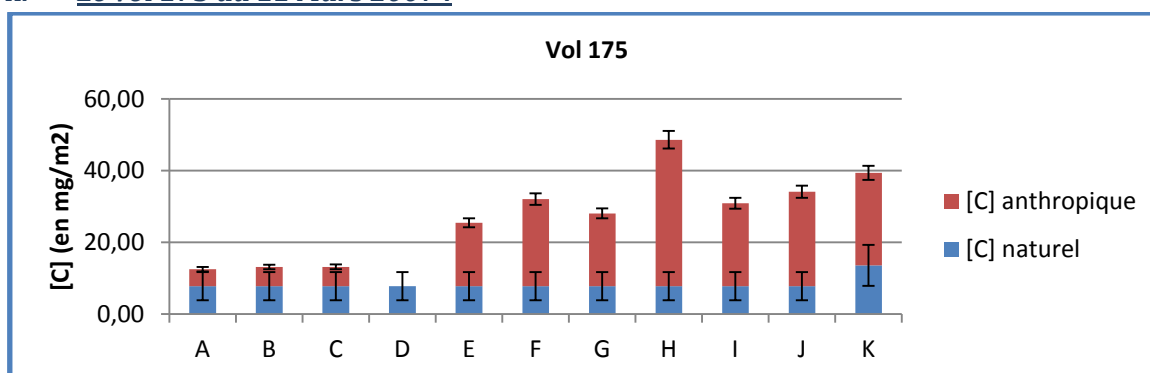


Figure 53 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 175

Les données des bacs à eaux D et E, situés tous les deux au service des sports de Sinnamary, ont des valeurs très éloignées. Il y a eu contamination de l'un de ces bacs à eau par une pollution inconnue. Les données de ces sites D et E ont été invalidées. Lors du vol 178, le site D semble aussi avoir été contaminé.

i. Le vol 182 du 18 avril 2008 à 19h14 (haute saison en chlore):

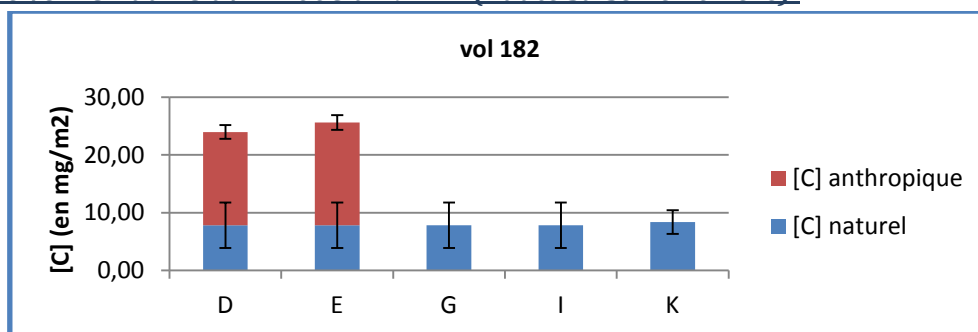


Figure 54 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 182

Les concentrations en chlore particulaire des sites D et E sont plus importantes que sur les autres endroits de l'étude. Nous pouvons supposer qu'un élément extérieur anthropique a contaminé ces deux échantillons.

4) Discussion des résultats

Les lancements où les concentrations en chlore sont significatives ont été étudiés.

a) Impact à Sinnamary

i. La haute saison en chlore

Il y a de nombreux lancements qui sont suivis d'une pluie, ce qui engendrent une augmentation de la concentration en chlore particulaire.

Par contre, le chlore d'origine naturel étant à son maximal, la déduction de la par anthropique est moins précise qu'en basse saison.

Le vol 181 du 9 Mars 2008 à 01h03:

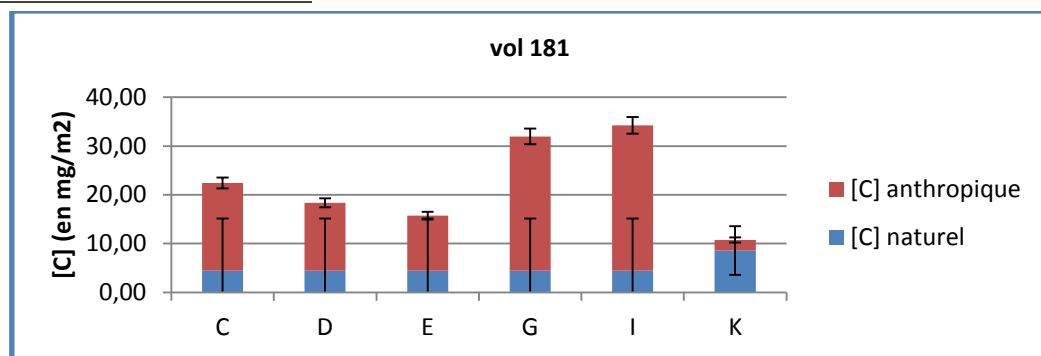


Figure 55 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 181

Ce vol est le seul de l'étude à avoir décollé en direction du Nord Est, et pas vers l'Est. Il a ravitaillé la station spatiale internationale (ISS) (Marie-Sainte, 2008). La trajectoire d'Ariane V était exceptionnellement plus proche de la ville de Sinnamary. Le lessivage de l'atmosphère par la pluie a entraîné une légère augmentation des concentrations en chlore particulaire à Sinnamary.

ii. La basse saison en chlore naturel

Il y a un léger bruit de fond en chlore naturel sur la côte Guyanaise. Il est plus facile de déterminer la par anthropique du chlore recueilli dans les bacs à eau. La pluviométrie étant faible, c'est la mauvaise dispersion du panache qui entraînerait une augmentation des concentrations en chlore anthropique.

Le vol 177 du 14 Août 2007 à 20h44 :

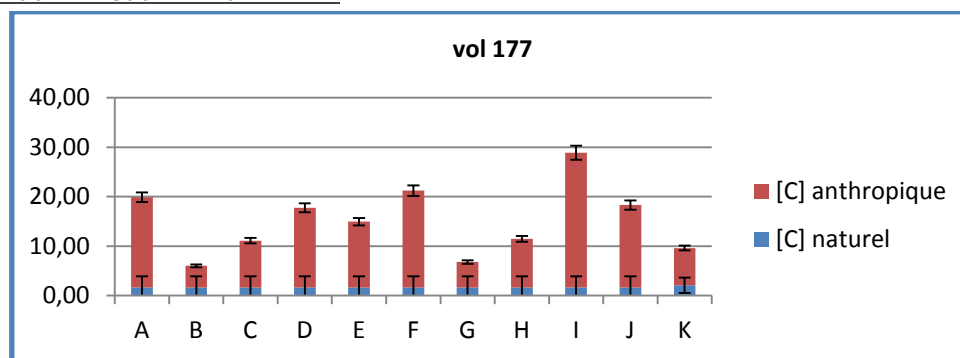


Figure 56 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 177

heures	vent CSG		vent Kourou	
	direction (en °)	vitesse (en m/s)	direction (en °)	vitesse (en m/s)
21:00	70	5	80	7
00:00	100	2	100	4
03:00	170	4	250	2
06:00	190	2	170	1
09:00	140	1	140	2
12:00	120	4	110	6

Tableau 6 : données météo France du vent lors du vol 177

Lors de ce vol, il y a des retombées en chlore d'origine anthropique sur tous les sites de Sinnamary. A 21h00, le vent de surface n'est pas en direction de Sinnamary. Par contre, dans les heures qui suivent, le vent tourne jusqu'à avoir une direction de 190° (Tableau 6). Sa vitesse étant faible (environ 3.2m/s de moyenne au CSG), le panache de fumée ne sera pas dispersé rapidement. Il se déplacera lentement au cours de la soirée, et prendra la direction du vent (70° à 21:00 ; 100° à 00:00...).

b) Impact à Kourou

Quand la vitesse du vent est très faible jusqu'à une altitude importante, et que l'atmosphère ne facilite pas la dispersion des polluants (quand elle est stable), nous pourrions observer des retombées en chlore particulaire anthropique.

i. La haute saison en chlore naturel

Le Vol 180 du 21 Décembre 2007 à 18h53:

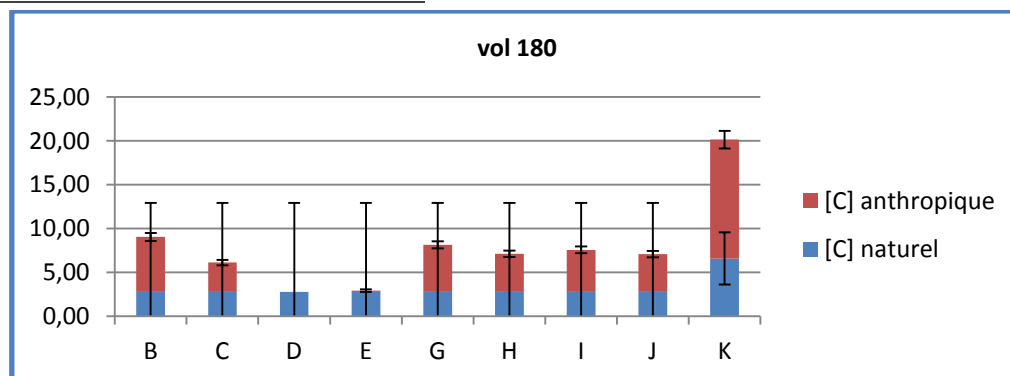


Figure 57 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 180

De 100 à 500 mètres d'altitudes, l'**atmosphère étant légèrement stable (classe E)**, et la vitesse du vent y étant relativement faible (5.7m/s sur le radiosondage du CSG (Marie-Sainte, 2008)), alors la dispersion du panache de fumée dans cette couche atmosphérique est mauvaise. En conséquence, il y a des retombées en chlore anthropique sur Kourou.

Vent CSG			Vent Kourou	
heure	direction (en °)	vitesse (en m/s)	direction (en °)	vitesse (en m/s)
18:00	80	2	80	4
21:00	120	1	90	2
00:00	0	0	80	4
03:00	90	2	80	5
06:00	220	1	80	5
09:00	90	4	80	8

Tableau 7 : données météo France du vent lors du vol 180

altitude (en m)	Vitesse du vent	direction du vent	Température potentiel (en K)	$\delta\theta/\delta z$	classes de Pasquill Gifford	Stabilité
12	2	80	300,3	-0,514	C	Légèrement instable
100	5,7	100	299,9			
500	9,1	87	302,4	0,650	E	Légèrement stable
1000	10,5	91	303,9	0,487	D	neutre
1500	8,2	85	306,2			
2000	8,6	97	309,3			
2500	8,9	87	312,8			
3000	7,5	101	315,0			
3500	8,4	109	317,0			
4000	7,1	97	319,5			

Tableau 8 : radiosondage réalisé par le CSG lors du vol 180

ii. La basse saison en chlore naturel

Le Vol 166 du 11 Août 2005 à 5h20 :

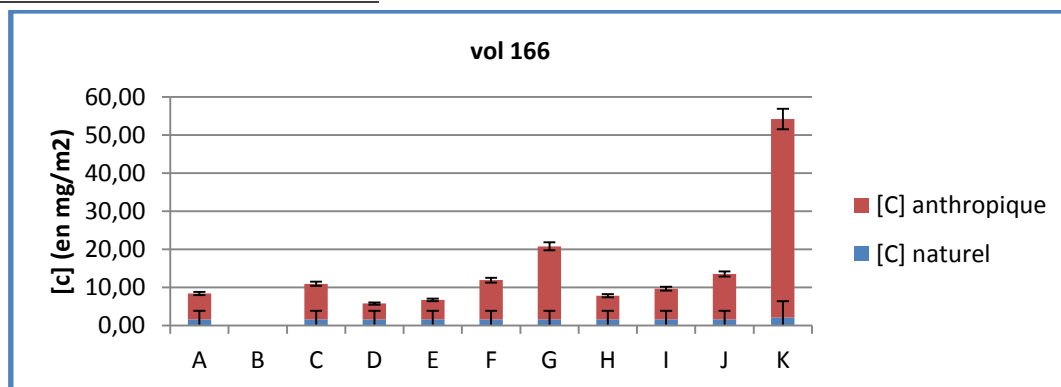


Figure 58 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 166

La vitesse du vent est très faible jusqu'à 1500 mètres d'altitude, ce qui ne permet pas une bonne dispersion du panache de fumée (inférieur à 3m.s^{-1} jusqu'à une altitude de 1500m (Tableau 10) (Richard, 2006)). De plus l'atmosphère est **modérément stable de 0 à 100 m d'altitude (classe F), ralentissant d'autant plus la dispersion des polluants** dans cette couche. Le nuage de combustion est moins bien dilué dans l'atmosphère, et les concentrations à proximité du CSG sont plus importantes que d'habitude. Kourou étant plus proche de la table de tir que Sinnamary, les concentrations y sont plus importantes. La vitesse du vent reste très faible plusieurs heures après le tir (Tableau 9).

Vent CSG			vent Kourou	
heure	direction (en °)	vitesse (m/s)	direction (en °)	vitesse (m/s)
03:00	210	2	220	1
06:00	170	1	200	1
09:00	100	2	100	2
12:00	130	2	90	4
15:00	90	6	110	6
18:00	90	4	110	7

Tableau 9 : données météo France du vent lors du vol 166

altitude	Vitesse du vent	direction du vent	Température et potentiel (en K)	$\delta\theta/\delta z$	classes de Pasquill Gifford	Stabilité
12	1	200	297	3,59781552	F	Modérément stable
100	2,7	146	300	0,45725964	D	neutre
500	2,6	111	302			
1000	0,9	45	304			
1500	1,9	116	307			
2000	3,1	152	309			
2500	3,6	80	311			
3000	3,6	59	313			
3500	5,2	79	317	0,45725964	D	neutre
4000	7,6	86	318			

Tableau 10 : radiosondage réalisé par le CSG lors du vol 166

Lors des vols 166 et 180, les caractéristiques de l'atmosphère entre 100 et 500 mètres d'altitude semblent entraîner un impact sur la ville de Kourou.

c) Impact simultané à Kourou et à Sinnamary

La haute saison en chlore naturel

Le vol 174 du 8 Décembre 2006 à 19h08 :

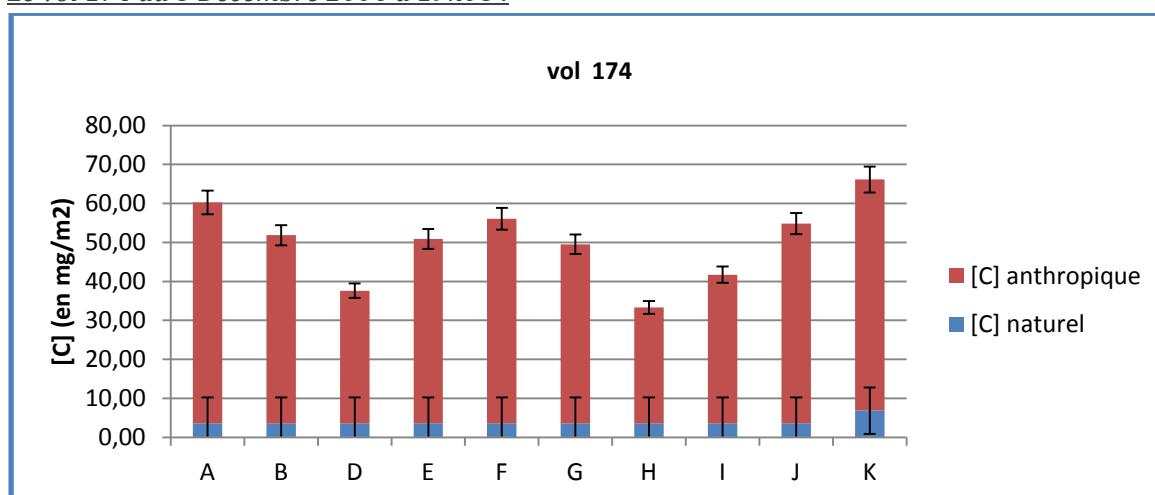


Figure 59 : concentrations en chlore particulaire pour le vol 174

Le radiosondage effectué lors du vol 174 (Richard, 2007) révèle un vent n'allant pas en direction de Sinnamary et Kourou. Ses caractéristiques varient lors des heures qui suivent le tir (Tableau 13, Tableau 12) : En cinq heures, la direction du vent de basse altitude passe de 50° à 100°, pour une vitesse de 2m.s^{-1} . Or à cette vitesse, plus de trois heures sont nécessaires aux produits de combustions pour parcourir la distance séparant le pas de tir d'Ariane V et Sinnamary. Durant ce laps de temps, le vent change de direction.

Un seul radiosondage étant effectué au CSG lors du lancement, nous ne connaissons pas l'évolution précise des vents d'altitude. Un radiosondage effectué à Rochambeau par météo France donne les données météorologiques deux heures après le tir (Tableau 12). De 0 à 245 mètres d'altitude, les vents sont en directions de Sinnamary. Ces résultats sont à nuancer, la distance séparant le CSG de Rochambeau étant importante.

altitude (en m)	Pression (bar)	Vitesse du vent (en m/s)	direction du vent (en °)
12	1,0083	2,0	50
100	0,9984	5,2	53
500	0,9542	10,4	58
1000	0,9012	13,0	61
1500	0,8506	11,0	74
2000	0,8022	7,7	69
2500	0,7562	7,4	81
3000	0,7125	6,0	104
3500	0,671	6,6	132
4000	0,6316	4,3	133

Tableau 11 : radiosondage du CSG lors du vol 174

Altitude (en m)	Pression (bar)	Vitesse du vent (en m/s)	Direction du vent (en °)
9	1.011	1,0	130
102	1.00	2,6	120
245	0.984	5,1	103
600	0.984	11,8	60
788	0.945	12,8	60
854	0.918	13.4	61
1239	0.878	14.9	65

Tableau 12 : radiosondage de météo France Rochambeau à 21h00 le jour du vol 174

heure	Vent CSG		Vent Kourou	
	vitesse (en m/s)	direction (en °)	vitesse (en m/s)	direction (en °)
18:00	2	50	4	40
21:00	2	70	4	60
00:00	2	100	6	80
03:00	4	70	6	90
06:00	1	180	4	110
09:00	2	190	1	170

Tableau 13 : données météo France du vent lors du tir 174

En principe, les particules de chlore en altitude sont bien dispersées, car l'atmosphère favorise la dilution des polluants au dessus de 100 mètres d'altitude (classe D). Mais, la pluie étant forte, et présente sur une grande partie du territoire, elle va lessiver l'atmosphère, et entraîner au sol une partie des produits de combustions d'Ariane V. Tous les sites d'études placés à Sinnamary et celui de Kourou révèlent des concentrations en chlore anthropique (Figure 52). Avant de se mélanger à l'eau de pluie, le chlore anthropique est présent à la fois au-dessus de Kourou et de Sinnamary. Cela confirme que le vent change avec l'heure, et l'altitude, et explique qu'il y a un impact dans deux villes pourtant situées à des directions opposées au CSG.

Résultats du CSG (Richard, 2007) :

Le CSG a installé 35 bacs à eaux en champs lointains. Quatorze ont eu des concentrations supérieures à la limite de détection (2mg/L soit 96 mg/m²). La moyenne pour ces points de prélèvement est de 119 mg/m², avec des valeurs comprises entre 96 mg/m² et 187 mg/m². Douze étaient au Nord Ouest du pas de tir et deux à Kourou (129mg.m⁻² et 134mg.m⁻²). Les résultats du CSG confirment que le chlore anthropique est lessivé par la pluie, mais aussi qu'il peut y avoir des impacts dans différentes directions du CSG. Les variations des paramètres météorologiques au cours du temps en sont à l'origine.

Note : Il n'y avait pas de pluviollessivats lors de ce tir.

Le vol 176 du 4 Mai 2007 à 19h29 :

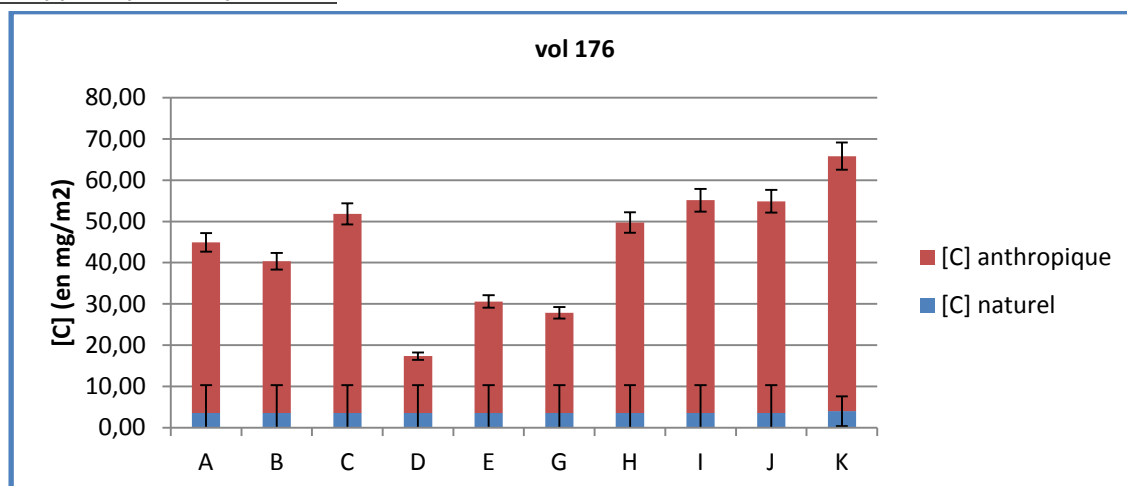


Figure 60 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 176

Les vols 174 et 176 ont la particularité d'avoir des résultats similaires. Après le lancement, les vents de basses altitudes sont en direction de Sinnamary (Tableau 14). L'évolution des vents d'altitude est inconnue, mais nous pouvons supposer que le panache de fumée se disperse dans plusieurs directions, suivant la couche atmosphérique où il se trouve. Le jour du lancement, la pluviométrie étant importante de Kourou à Sinnamary (77.2mm de pluie à Kourou et 47.6 mm à Sinnamary), l'atmosphère est lessivée. En conséquence, l'impact d'Ariane V est observable sur tous les sites de l'étude.

altitude (en m)	Vitesse du vent (en m/s)	direction du vent (en °)
12	2	120
100	4,2	119
500	10	89
1000	10,1	87
1500	10,3	84
2000	8,1	107

Tableau 14: radiosondage effectué par le CSG lors du vol 176

Résultats du CSG (Marie-Sainte, 2008) :

En champs lointain, aucun bac à eau n'a dépassé la limite de détection de 2mg/l. Mais comme expliqué ci-dessous, cette limite paraît élevée. Cinq pluviollessivats (avec une limite de détection du chlore de 0.1mg/l) ont été installé en champ lointain. Ils sont éloignés de nos sites d'études, mais confirment que la pluie a rabatte une partie des produits de combustion d'Ariane V.

Echantillon	[Cl] (en mg/L)	Conductivité (µs/cm à 25°C)	pH
1	1.3	8	5.31
2	1.2	7	5.48
3	1.1	7	5.49
4	1.2	8	5.51
5	1	7	5.55

Tableau 15 : résultats des pluviollessivats du CSG

Note : La limite de détection du CSG est de 2mg/l alors que celle utilisé dans le cadre de notre étude est de 0.05mg/l. Si nous avions utilisé la limite de détection du CSG, nous n'aurions aucunes données à analyser, et nous n'aurions pas pu différencier le chlore d'origine naturelle et anthropique.

Le vol 170 du 11 Mars 2006 à 19h32 :

Lors du vol 170, l'**atmosphère est légèrement stable (classe E)** de 0 à 100 mètres et au dessus de 500 mètres d'altitude. La mauvaise dispersion des polluants, et la faible vitesse du vent en basse atmosphère (3m.s^{-1}), peuvent expliquer l'impact observé à Kourou. De plus le radiosondage du CSG indique un vent de direction 50° . La fusée partant à l'Est, le panache de la fusée est émis sur cette trajectoire et pourra être dispersé en direction de Kourou. Ensuite, la pluie a pu entrainer une partie des polluants au sol (7.4 mm de pluie à Kourou le jour du vol)

A Sinnamary, la pluviométrie était de 4.2mm. Des vents d'altitudes ont pu entrainer une partie du nuage de combustion en direction de Sinnamary, qui aurait été en partie rabattu au sol par l'effet de la pluie.

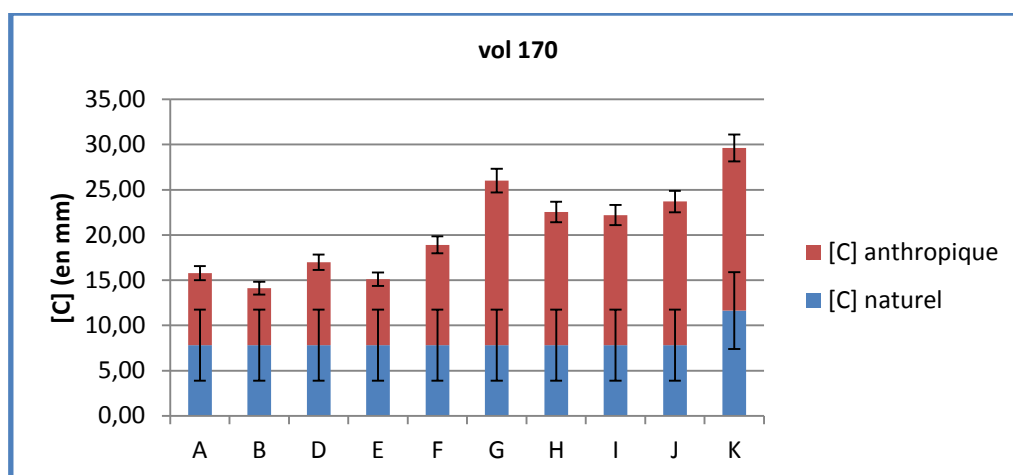


Figure 61 : concentrations en chlore particulaire los du vol 170

altitude (en m)	Pression (bar)	Vitesse du vent	direction du vent	T potentiel (en K)	$\delta\theta/\delta z$	classes de Pasquill Gifford	Stabilité
12	1,0098	3	50	300,8	0,974	E	légèrement stable
100	0,9998	9,8	50	301,6			
500	0,9554	11,8	52	301,8	0,042	D	Neutre
1000	0,9022	10,3	51	303,2	0,519	E	légèrement stable
1500	0,8509	9	41	305,3			
2000	0,8022	8,4	23	307,0			
2500	0,7559	5,2	51	310,2			
3000	0,712	5	101	314,1			
3500	0,6704	5,1	113	316,3			
4000	0,6309	4,9	108	320,0			

Tableau 16 : radiosondage du vol 170

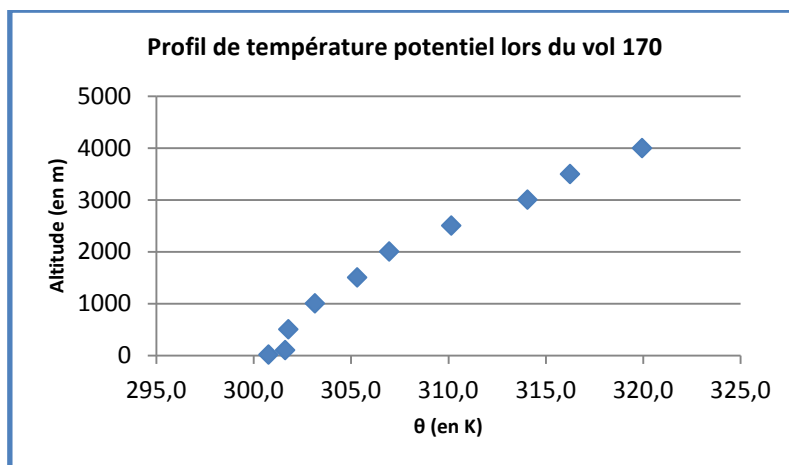


Figure 62 : profil de température potentiel du vol 170

Le vol 171 du 27 Mai 2006 à 18h09 :

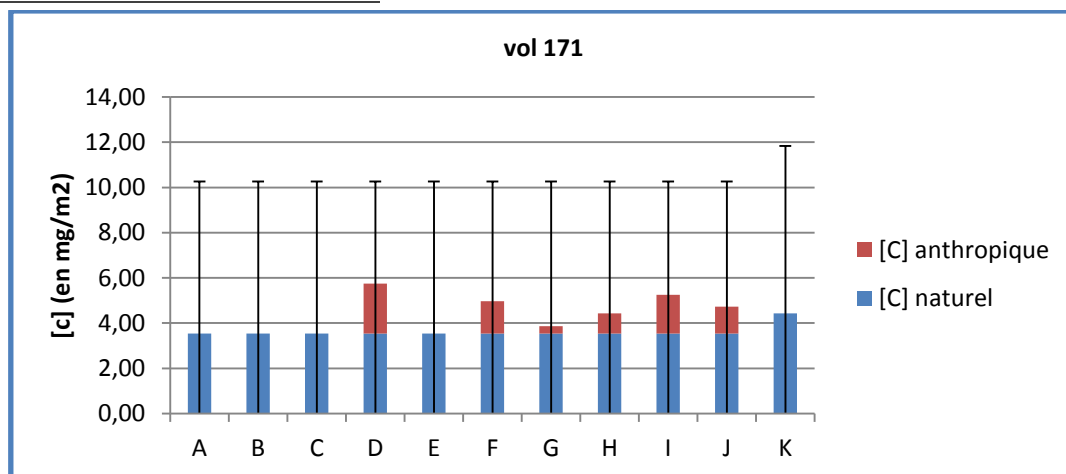


Figure 63 : concentration en chlore particulaire lors du vol 171

Malgré une pluviométrie au CSG de 17.2mm les concentrations en chlore particulaire recueillies à Sinnamary sont faibles. Mais sur 17.2 mm de pluie, seulement 3.4mm ont précipité entre 18h et 24h, après le tir (Tableau 17). Ces précipitations, faibles et localisées, n'ont pas eu d'impacts sur nos résultats. Ensuite **l'atmosphère étant de classe (D) au-dessus de 100m d'altitude**, les polluants se sont bien dispersés.

Horaires (en h)	06-12	12-18	18-24	00-06
Hauteur d'eau (en mm)	11.2	2.6	3.4	-

Tableau 17 : donnée de pluviométrie du 27 mai 2006 (vol 171)

5) Conclusion

Les différents paramètres ayant une influence sur les retombées en produits de combustion sont :

- **Les précipitations : C'est le paramètre le plus important.** Les polluants qui se diluent normalement en altitude sont rabattus au sol par l'eau de pluie. Les lancements ayant lieu pendant la saison des pluies semblent avoir un impact plus fort sur les villes Guyanaise.
- **Le vent** : Le déplacement des produits chimiques de combustions dépendent du vent. Un seul radiosondage étant effectué lors de chaque tir, la vitesse et la direction du vent variant beaucoup en quelques heures, il est difficile d'interpréter tous nos résultats. Le CSG modélise la dispersion du panache de fumée en utilisant un seul radiosondage. Il serait intéressant d'en réaliser plusieurs les jours de tir.
- **La stabilité de l'atmosphère** : Quand l'atmosphère est stable, elle ne favorise pas la dispersion d'un polluant. Si le vent est en direction de Kourou ou de Sinnamary, il peut y avoir des retombées sur ces villes.
- **La mauvaise dispersion du panache de fumée** : Lorsque l'atmosphère est stable, ou que la vitesse du vent est très faible entre 100 mètres et 1000 mètres d'altitude, il peut y avoir des retombées en chlore particulaire d'origine anthropique sur la ville de Kourou.

Il n'y actuellement aucune réglementation européenne et française pour les retombées totales en poussières. La norme Allemande dans l'environnement (TA LUFT) indique comme limite la teneur de 350 mg/ (m².jour) en moyenne annuelle afin d'éviter une pollution importante. Ici il s'agit de la concentration en poussières, or nous étudions seulement le chlore particulaire qui ne représente qu'une fraction de celle-ci (ORAMIP, 2010).

L'Observatoire Régional de l'air de Guyane ainsi que le CSG analysent l'air avec des bacs à eau lors de chaque lancement de fusée. Certaines périodes et certains sites semblent plus appropriés afin de diminuer les erreurs d'interprétations, et de ne pas confondre le chlore d'origine naturelle de celui d'origine anthropique.

- **Il est plus facile de déterminer une origine anthropique du chlore durant la basse saison en chlore particulaire (Juillet à Octobre)**, le chlore d'origine naturelle étant faiblement présent en Guyane. Si un pic est observé durant cette période, il y a de grandes chances qu'il soit d'origine anthropique.
- **Des sites éloignés de l'océan, comme le croisement de Petit Saut sont faiblement touchés par le chlore d'origine naturelle.** Les concentrations relevées sur ces sites seraient d'origine anthropique (Ariane V, pollution ponctuelle...)

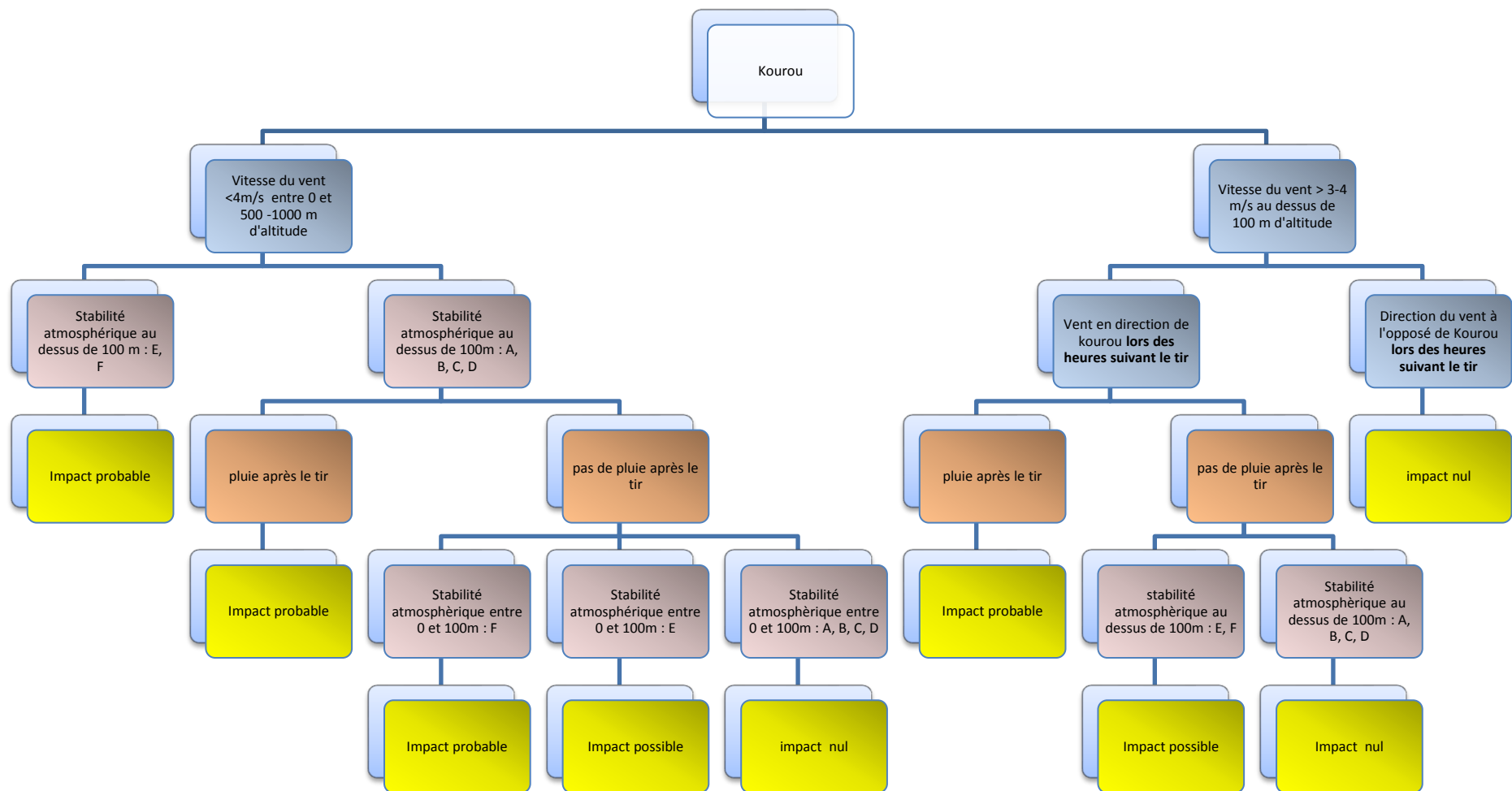


Figure 64 : impact d'Ariane V à Kourou

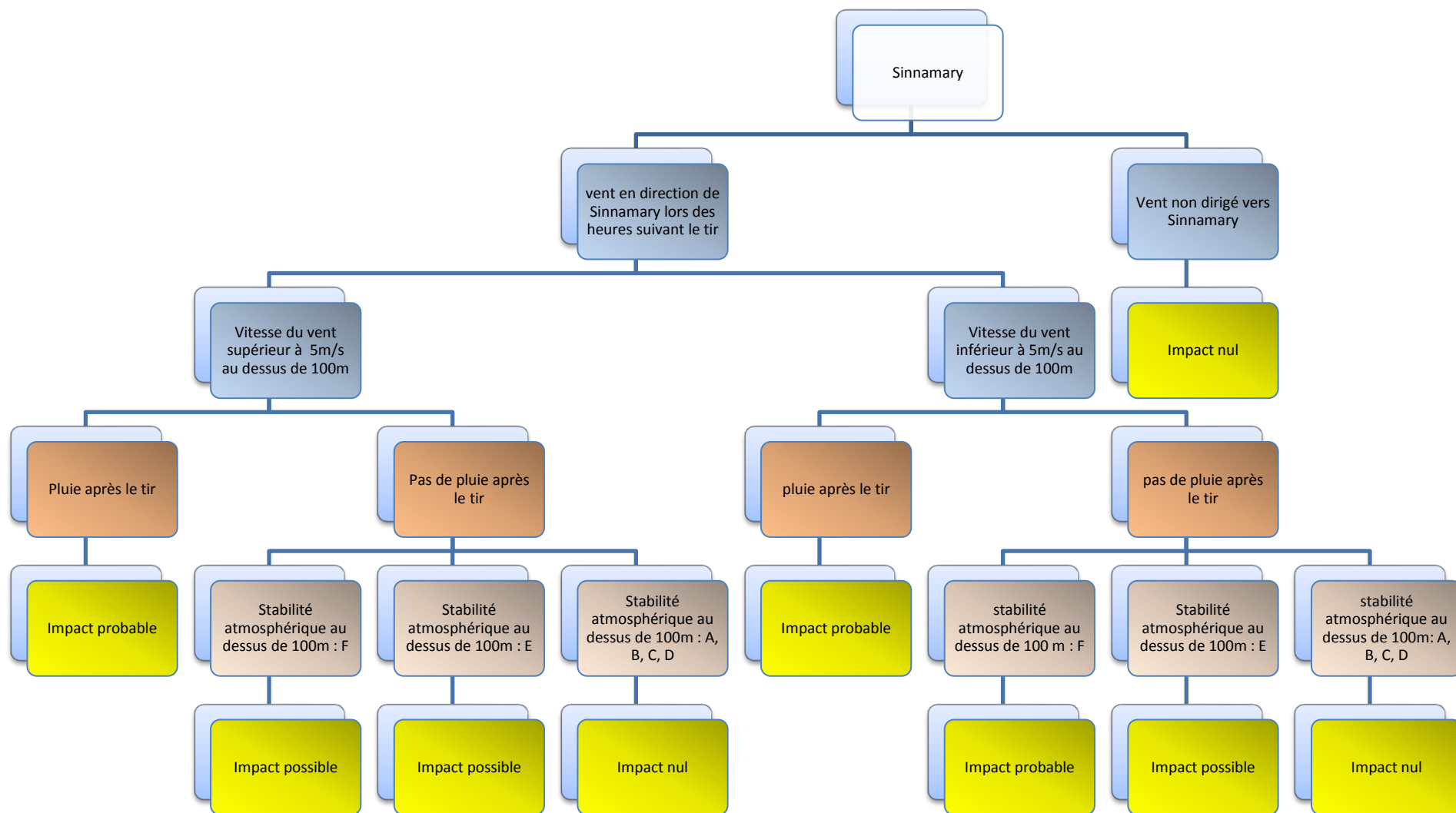


Figure 65 : impact d'Ariane V à Sinnamary

II. Destruction de la couche d'ozone par l'activité spatiale

1) Généralité sur la couche d'ozone

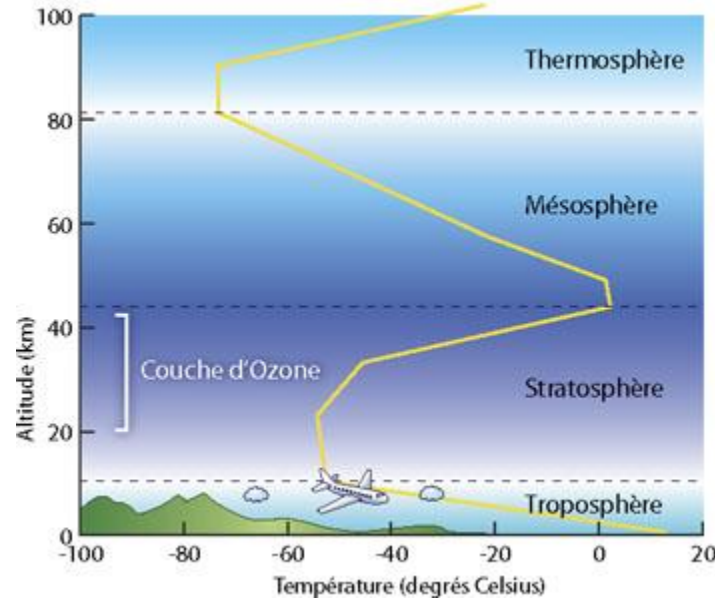


Figure 66 : la couche d'ozone

Il y a dans la stratosphère une grande concentration d'ozone appelée couche d'ozone. Elle forme une protection contre les UV-B (280 à 315 nm) émis par le soleil. Une exposition aux UV-B, entraîne une augmentation des risques de cancers de la peau, de cataracte et de suppression du système immunitaire. Ils nuisent aussi au développement des plantes terrestres, des écosystèmes aquatiques, et des organismes monocellulaires. Les UV-A (315 à 400 nm) ainsi que les autres formes de radiations solaires ne sont que partiellement absorbées par la couche d'ozone (Fahey, 2006).

Ces dernières années un appauvrissement de la couche d'ozone a été observé par les scientifiques (Ricaud, 2006). Afin de lutter contre cette destruction, le protocole de Montréal a été signé en 1987. Il fut amendé 5 fois : Londres (1990), Copenhague (1992), Vienne (1995), Montréal (1997) et Beijing (1999). Il régleme nte certains composés halogénés (CFC, halon, tétrachlorure de carbone, méthylchloroforme, hydrochlorofluorocarbones, hydrobromofluorocarbones, bromure de méthyle et bromochlorométhane) (PNUE, Secrétariat de l'ozone, 1987). Le perchlorate d'ammonium, ainsi que tous les autres réactifs utilisés dans l'aérospatial ne font pas partis de cette réglementation.

2) Impact éventuel de l'activité spatiale dans la destruction de la couche d'ozone

Lors des lancements, la fusée traverse les différentes couches de l'atmosphère, dont la stratosphère et sa couche d'ozone, qui est situé entre 20 et 50 km d'altitude.

Sachant que les EAP sont utilisés comme propulseur de la fusée jusqu'à des altitudes comprises entre 55 et 70 km, alors, les produits résultants de ces combustions (Équation bilan 8), vont être répandus dans la zone où se situe la couche d'ozone. Il y a émission **d'eau, de diazote, d'alumine et de**

chlorure d'hydrogène. Actuellement la destruction de la couche d'ozone due à l'activité spatiale mondiale serait d'environ 0,03%, ce qui est négligeable (Ross, 2009).

Les effets de ces polluants sont décrits ci-dessous :

Effet du diazote :

Il est inerte. Dans certaines conditions, il peut se transformer en radical réactif.

Effet de l'eau :

C'est une source de radicaux HOx qui peut réagir avec l'ozone. De plus, sous forme de particules de glaces, l'eau forme des nuages stratosphériques polaires qui participent à la destruction de la couche d'ozone au niveau des pôles.

Effet de l'alumine :

A la surface des particules d'aluminium dont le diamètre est inférieur à 1µm, des molécules réservoirs telles que le HCl vont pouvoir réagir, et libérer des oxydes de chlore qui participent à la destruction de la couche d'ozone.

Effet du chlorure d'hydrogène :

L'atome de chlore étant sous la forme d'acide chlorhydrique, il ne réagira pas (dans un premier temps) avec l'ozone. Le chlorure d'hydrogène est considéré comme une « réserve » en chlore, qui dans certaines conditions, devient disponible et réactif.

La composition du panache des fusées en fraction massique sont présentés ci-dessous (Tableau 18) (Ross, 2009). La composition du panache d'Ariane V correspond au propulseur de type solide.

	Inerte	Inerte	Source OH	Radicaux	Réservoir de radicaux	Particules
	N ₂	CO ₂ + CO	H ₂ O + H ₂	ClOx ; HOx, NOx	HCl	aluminium et suie
NH ₄ ClO ₄ /Al (solide)	0.08	0.27	0.48	0.1	0.15	0.33
LOx/H ₂ O (cryogénique)	-	-	1.24	0.02	-	-
LOx/RP-1 (kérosène)	-	0.88	0.3	0.02	-	0.05
UDMH/N ₂ O ₄ (hypergolique)	0.29	0.63	0.25	0.02	-	Trace

Tableau 18 : approximation des émissions en fraction massique suivant le type de propulseurs utilisés. La masse totale excède l'unité car l'air mélangé au panache de fumée oxyde le CO et H₂.

a) Impact à une échelle local.

La température et la présence d'oxygène atmosphérique dans le panache de fumée entraînent des réactions de post combustions. Une certaine quantité des produits chimiques initialement inertes vont se transformer en radicaux (HOx, NOx, ClOx) réagissant très vite avec l'ozone. Il y a destruction de l'ozone dans le panache de fumées des lanceurs.

Par exemple, le HCl qui ne réagit normalement pas avec l'ozone, sera transformé en atome de chlore et en Cl₂ réactif. La modélisation du rapport entre le chlore « réservoir non réactif » et le chlore

« réactif » à la sortie du panache d'une fusée de type Athena II est présentée ci-dessous (Figure 67) (Ross, *Rockets and the ozone layer*, 2000).

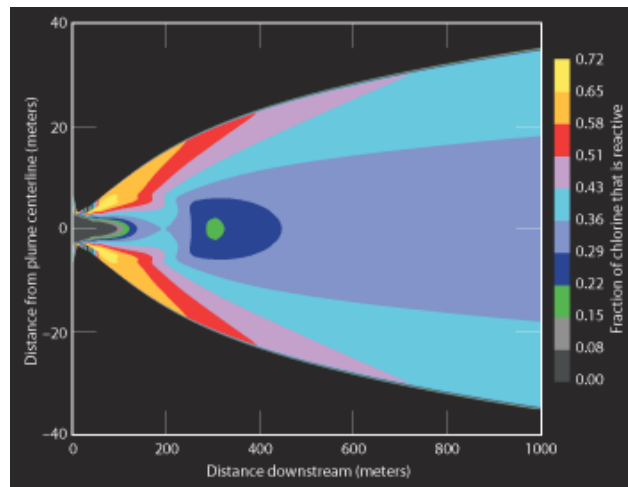
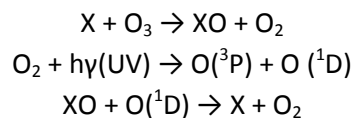


Figure 67 : effet de la post combustion dans le panache d'une fusée Athena II (Ross, *Rockets and the ozone layer*, 2000)

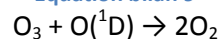
Une partie du HCl subit la postcombustion et se transforme en composés réactifs. Ces derniers réagiront avec l'ozone stratosphérique (voir cycle 1).

Il peut commencer soit par l'action du chlore atomique (X) sur l'ozone, soit par la réaction entre le monoxyde de chlore (XO) et l'atome d'oxygène excité :

cycle 1



Équation bilan 9



Une molécule d'ozone et un atome d'oxygène sont convertis en deux atomes de dioxygènes. Ce cycle est prédominant dans les zones géographiques où le rayonnement Ultra Violet est le plus important, soit aux latitudes tropicales. Cl et ClO agissant comme catalyseurs, sont régénérés et un atome de chlore pourra détruire un grand nombre de molécules d'ozones. Pour casser ce cycle catalytique, il faut que les atomes de chlore réagissent avec d'autres composés chimiques, où alors une diminution des rayons Ultra Violet, conduisant à la diminution de la formation d'oxygène atomique (Fahey, 2006)(Codron, 2009).

Une étude (RISO) a été menée dans les années 2000 afin d'étudier la composition chimique des panaches de fumées émis par différents lanceurs. Pour ce faire, un avion avec des appareils de mesures à son bord volait dans le panache des fusées. Les lanceurs étudiés sont le Titan IVA, l'Atlas IIAS, la navette spatiale et Delta II.

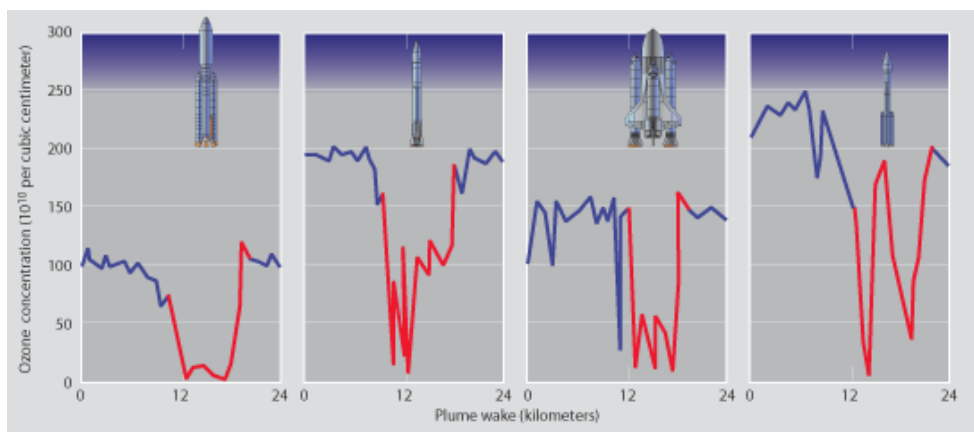


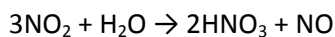
Figure 68 : perte d’ozone dans les panaches de fumées de différentes fusées (Ross, *Rockets and the ozone layer*, 2000)

Les courbes en rouge représentent le passage de l’avion de mesure dans le panache de fumée des fusées environ une heure après le tir. Une baisse de la concentration en ozone est observée (Figure 68). De plus, en 1996, cette mission a mis en évidence la présence de Cl_2 dans le panache d’une fusée de type Titan IVA ; molécule qui en dehors du panache n’était pas présente dans la stratosphère, et que nous pouvons donc imputer au lanceur (Ross, *Rockets and the ozone layer*, 2000).

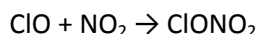
b) Impact à une échelle synoptique.

Des semaines et des mois après le tir, les produits chimiques composants le panache des fusées sont transportés et mélangés dans la stratosphère. Ce domaine n’a été que peu étudié à l’heure actuelle. Des études mettent en avant la capacité des particules d’alumine à servir de support à des réactions rendant le chlore qui était initialement non réactif (HCl et ClONO_2), en des formes qui détruiront l’ozone (Ross, 2009).

De plus, les chlores contenus dans les molécules de HCl et de ClONO_2 seront libérés dans certaines conditions au niveau des pôles. Lors des hivers Arctique et Antarctique, les températures stratosphériques diminuent beaucoup (surtout en Antarctique où elles étaient comprises entre -70°C et -90°C (Figure 69) (Fahey, 2006)). Or à partir de -78°C , l’acide nitrique (HNO_3) et les composés sulfurés sous forme gazeux condensent avec la vapeur d’eau pour former des particules solides et liquides. C’est le processus de formation des nuages stratosphériques polaires (PSCs pour Polar Stratospheric Clouds). Les oxydes d’azote sont transformés en acide nitrique gelé et se fixe sur les PSCs.



La réaction suivante qui transforme le radical ClO destructeur d’ozone en nitrate de chlore (molécule réservoir de chlore non destructrice d’ozone) n’a plus lieu.



Minimum Air temperatures in the Polar Lower Stratosphere

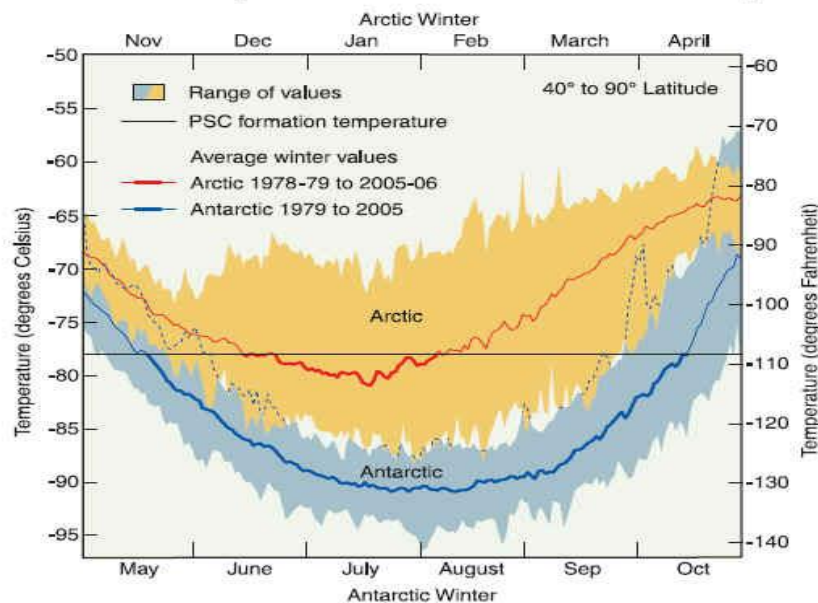
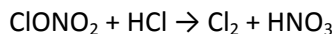


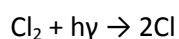
Figure 69 : températures aux pôles permettant la formation de PSCs

De plus à la surface des PSCs, il y a des réactions en phases hétérogènes qui convertissent les formes réservoirs de chlore (HCl et ClONO_2) en atomes destructeurs d'ozone. Certaines publications expliquent que le radical ClO est synthétisé (Fahey, 2006) et va réagir dans les cycles catalytiques présentés ci-dessous (cycle 2, cycle 3).

D'autres publications montrent que la réaction suivante a lieu à la surface des PSCs et va libérer du dichlore.

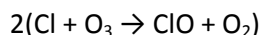
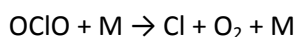
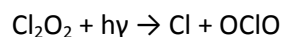


A l'issue de la nuit polaire, sous l'effet des rayonnements lumineux, le dichlore va à son tour libérer deux molécules de chlore destructrices d'ozone :

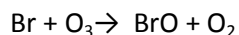
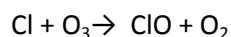
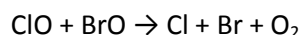


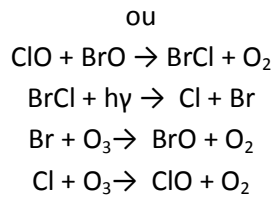
Ensuite les atomes de chlore et les radicaux ClO détruisent l'ozone via les cycles catalytiques suivants :

cycle 2



cycle 3





Équation bilan 10 :
 $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$

Il y a donc une destruction des molécules d'ozones qui sont ici aussi catalysées par le chlore, qui lui, est régénéré. La lumière solaire utilisée pour le cycle 2 et le cycle 3 n'est pas suffisante pour permettre la formation d'ozone qui requière des rayonnements ultra violet de forte énergie. Au final, la couche d'ozone aux pôles est très fine durant la fin de l'hiver et le début du printemps (Codron, 2009)(Fahey, 2006).

Note : les différentes réactions des produits de combustions d'Ariane V sont présentées sous forme schématique en Annexe.

3) Impact de l'activité spatial sur la couche d'ozone dans les années futures.

a) Evolution du marché du spatial

L'impact du spatial sur la couche d'ozone est pour le moment faible (destruction de 0.03% de la couche d'ozone). Mais, suivant l'évolution qu'il y aura dans les années futures, la situation pourra changer (augmentation de la demande des pays émergents, le développement du tourisme spatial, diminution du coût des lancements...). Par exemple, dans un futur proche, il y aura deux nouveaux lanceurs au centre spatial Guyanais (Soyouz qui utilisera du kérosène (Tableau 18) et Vega) entraînant une augmentation du nombre de tirs dès l'année 2011. Une équipe Américaine (Ross, 2009) a étudié l'évolution de la couche d'ozone suivant différents scénarios (Figure 70) (Ross, 2009). Si l'activité spatiale reste au niveau actuel, l'impact est minime. Par contre, un doublement ou un triplement des émissions par décennie du à l'activité spatial entrainerai une augmentation de la destruction de l'ozone stratosphérique non négligeable...

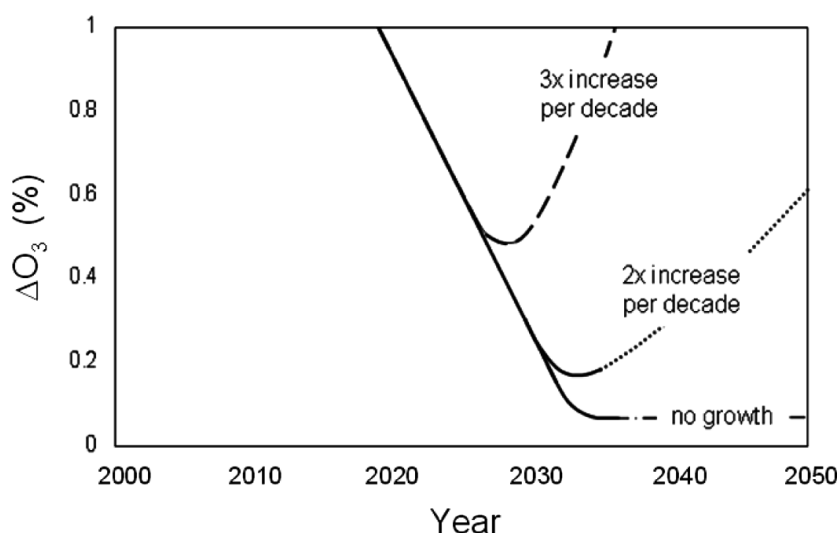


Figure 70 : évolution de la destruction de l'ozone stratosphérique suivant l'évolution de l'activité spatial mondial

Martin Ross propose une limite haute acceptable de destruction de la couche d'ozone comprise entre 0.2% et 1%. Par contre au-delà de 1%, il faudrait limiter le nombre de tirs. Ces valeurs ne sont que des propositions dont le but est d'être discuté (Ross, 2009).

b) Mise en place de la surveillance de la couche d'ozone

En Guyane

Il serait intéressant de modéliser au niveau local l'impact d'Ariane V dans la stratosphère, comme dans l'étude des retombées au sol (code de calcul SARRIM), de mettre en place une étude du « type RISO » afin de connaître la composition exacte du panache de fumé d'Ariane V et bientôt de Soyuz et Vega et d'étudier les rayonnements UV autour du centre spatial Guyanais après un tir, pour une meilleure connaissance de la destruction de la couche d'ozone à une échelle locale.

Au niveau mondial

Une coopération entre les différents acteurs du spatial serait nécessaire pour connaître exactement les quantités de produits chimiques émis dans la stratosphère. Et pourquoi pas mettre en place un amendement du Protocole de Montréal afin de contrôler les produits émis par les acteurs du spatial ?

D) Conclusion

La Guyane, de par son climat équatorial, et son activité spatiale, est un site d'étude unique. La présence de chlore d'origine naturelle se divise en deux saisons : la haute saison, de novembre à Juin, avec des concentrations élevées, et la basse saison, de Juillet à Octobre, avec un bruit de fond plus faible.

Le vent, les particules et la pluviométrie ont le plus d'influence sur la présence de chlore d'origine naturelle à Kourou.

A Sinnamary, la distance à la côte étant plus importante, la dépendance au vent prédomine. Les concentrations diminuent avec l'augmentation de la distance à l'océan.

Nous avons différencié, lors des lancements de fusées, la part de chlore particulaire d'origine anthropique de celle d'origine naturelle. Nous avons déduit qu'une mauvaise dispersion du panache de fumée (vitesse du vent faible et atmosphère stable), entraîne un impact sur Kourou. De plus, s'il pleut après un lancement, l'atmosphère sera lessivée, et une partie des produits de combustion sera rabattue au sol. Il serait intéressant d'effectuer plusieurs radiosondages lors des jours de lancements. Nous pourrions comparer l'évolution du vent, avec les concentrations relevées sur les sites d'études.

Par ailleurs, il ne faut pas écarter l'éventualité de pollutions ponctuelles anthropiques autres que l'activité spatiale pouvant perturber les résultats.

Afin de mieux connaître l'influence d'un lancement de fusée sur la couche d'ozone, il faudrait mettre au point un modèle numérique modélisant la quantité d'ozone détruite, effectuer des analyses de l'air aux altitudes de la couche d'ozone, après le passage de la fusée, mais aussi dans son panache avec un avion, un ballon sonde... L'analyse du panache d'Ariane V permettrait de connaître les produits chimiques formés par la postcombustion.

Il y a de nombreuses études à effectuer afin de mieux connaître l'impact de l'activité spatiale sur la Guyane, surtout, sachant que celle-ci est grandissante, et va se diversifier avec l'arrivée de Soyouz et de Vega, qui n'utilisent pas le même type de propergols...

Bibliographie

Andreae, M. O. (1986, Juin 27). Internal mixture of sea salt, silicates and excess sulfate in marine aerosols. *Deep Sea Research Part B. Oceanographic Literature Review* , pp. 1620-1623.

Arianespace. (2005). *Insat 4A-MSG2*. Kourou: Arianespace.

Claire-Eugénie, C. (2005). *Détermination du bruit de fond en ion chlorure sur la commune de Sinnamary*. Cayenne: ORA.

Codron, F. (2009). *LP211 Sciences de l'Atmosphère*. Consulté le 06 07, 2010, sur Jussieu: <http://web.lmd.jussieu.fr/~fcodron/LP211.html>

Debry, E. (2010). *Modélisation des aérosols atmosphériques*. INERIS.

EBER, A. (2007). *Détermination du bruit de fond en ion chlorure à Sinnamary (Guyane Française)*. Cayenne: ORA.

Ellapin, L. (2010). *Caractérisation et transport des poussières Sahariennes et sub-sahariennes vers la guyane*. Pointe-à-Pitre: LaRGE.

Fahey, D. (2006). *TWENTY QUESTIONS AND ANSWERS ABOUT THE OZONE LAYER*. World meteorological organization.

Gustafsson, M. E. (1995, Septembre 01). Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, sw Sweden. *Atmospheric environment* , 30 (6), pp. 977-989.

M. Ramel, c. F. (2002). *Aide à la définition d'une stratégie de surveillance de la qualité de l'air dans les zones habitées autour du Centre Spatial Guyanais*. DRIRE Antilles-Guyane. INERIS.

Madelaine, G. (1975). Formation et évolution de l'aérosol atmosphérique. *Journal de physique* , C8-1.

Marchand, N. *Aérosol atmosphérique*. laboratoire chimie provence - instrumentation et réactivité atmosphérique: CNRS.

Marie-Sainte, S. (2008). *Resultats du plan de mesures environnement ariane vol 176 du 04 mai 2007 à 19h29 mn*. Centre Spatial Guyanais: CNES.

Marie-Sainte, S. (2008). *Resultats du plan de mesures environnement ariane vol 180 du 21 décembre 2007 à 18h53 mn*. CSG: CNES.

Marie-Sainte, S. (2008). *Resultats du plan de mesures environnement ariane vol 181 du 09 mars 2008 à 01h03 mn*. CSG: CNES.

Meira, G. (2006, Avril 28). *Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil*. Consulté le Avril 19, 2010, sur sciencedirect: www.sciencedirect.com

Meira, G. (2008, Juillet 03). Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone – A tool for corrosion studies. *Corrosion Science* , pp. 2724-2731.

- Meira, G. (2007, Juillet 03). *Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area—Influence of wind regime*. Consulté le Avril 26, 2010, sur sciencedirect: www.sciencedirect.com
- MeteoFrance. (s.d.). *le climat guyanais*. Consulté le Avril 28, 2010, sur meteo france: http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/meteoPLUS/climat/clim_guy.htm
- Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. (2007). *Les ergols solides*. Consulté le Juin 4, 2010, sur educnet: <http://www.educnet.education.fr/orbito/lanc/chimie/chim11.htm>
- NASA. (2010, Juin 1). *Image Gallery*. Consulté le Août 2, 2010, sur MODIS Rapid Response System: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/>
- NOAA, N. O. (2010, août 2). *latest satellite imagery*. Consulté le Août 2, 2010, sur National Weather Service, National Hurricane Center: <http://www.nhc.noaa.gov/satellite.shtml>
- ORAMIP. (2010). *RÉSEAU DE SUIVI DES ACTIVITÉS DE DÉPOLLUTION DE LA SOCIÉTÉ UMICORE À VIVIEZ*. Colomiers: ORAMIP.
- PNUE, Secrétariat de l'ozone. (1987). Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. *Protocole de Montréal* (pp. 1-30). Montréal: PNUE.
- Raes, F. (2000). *Formation and cycling of aerosols in the global troposphere*. Ispra: Atmospheric Environment.
- Ricaud, P. (2006, Septembre 12). *Ozone, la déchirure*. Consulté le Juin 2, 2010, sur cnes: <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/5372-ozone-la-dechirure.php>
- Richard, S. (2006). *Resultats du plan de mesures environnement ariane V166 du 11 août 2005 à 05h20 mn*. CSG: CNES.
- Richard, S. (2007). *Resultats du plan de mesures environnement ariane vol 174 du 8 décembre 2006 à 19h08 mn*. CSG: CNES.
- Richard, S. (2007). *Resultats du plan de mesures environnement ariane vol 175 du 11 mars 2007 à 19h03 mn*. CSG: CNES.
- Ross, M. (2009). *Limits on the space launch market related to stratospheric ozone depletion*. Los Angeles: Taylor and Francis Group.
- Ross, M. (2000, été). *Rockets and the ozone layer*. Consulté le juin 28, 2010, sur Aerospace: <http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2000/01.html>
- Satheesh, S. (2002, Avril 01). Aerosols and Climate. *Resonance* , pp. 48-59.
- Tropical Prediction Center. (2010, Août 2). *index of /tafb_latest*. Consulté le Août 2, 2010, sur National Weather Service, National Hurricane Center: http://www.nhc.noaa.gov/tafb_latest/
- Zielinski, T. (2004, Août 08). Studies of aerosols in the marine boundary layer in the coastal area during the eospace'99 campaign. *Boundary-layer Meteorology* , pp. 533-541.

Annexes

vol	type de fusée	Date	Heure (h)	direction
V164	Ariane ECA	12/02/2005	18h03	Est
V166	Ariane 5G	11/08/2005	05h20	Est
V167	Ariane 5G	13/10/2005	19h32	Est
V168	Ariane ECA	16/11/2005	20h46	Est
V169	Ariane 5G	21/12/2005	19h33	Est
V170	Ariane ECA	11/03/2006	19h32	Est
V171	Ariane ECA	27/05/2006	18h09	Est
V172	Ariane ECA	11/08/2006	19h15	Est
V173	Ariane ECA	13/10/2006	17h56	Est
V174	Ariane ECA	08/12/2006	19h08	Est
V175	Ariane ECA	11/03/2007	19h03	Est
V176	Ariane ECA	04/05/2007	19h29	Est
V177	Ariane ECA	14/08/2007	20h44	Est
V178	Ariane 5GS	05/10/2007	19h02	Est
V179	Ariane ECA	14/11/2007	19h06	Est
V180	Ariane 5GS	21/12/2007	18h53	Est
V181	Ariane 5ES	09/03/2008	01h03	Nord-est
V182	Ariane 5ECA	18/04/2008	19h14	Est
V183	Ariane 5ECA	12/06/2008	19h02	Est
V184	Ariane 5ECA	07/07/2008	18h47	Est
V185	Ariane 5ECA	14/08/2008	17h44	Est
V186	Ariane 5ECA	20/12/2008	19h35	Est

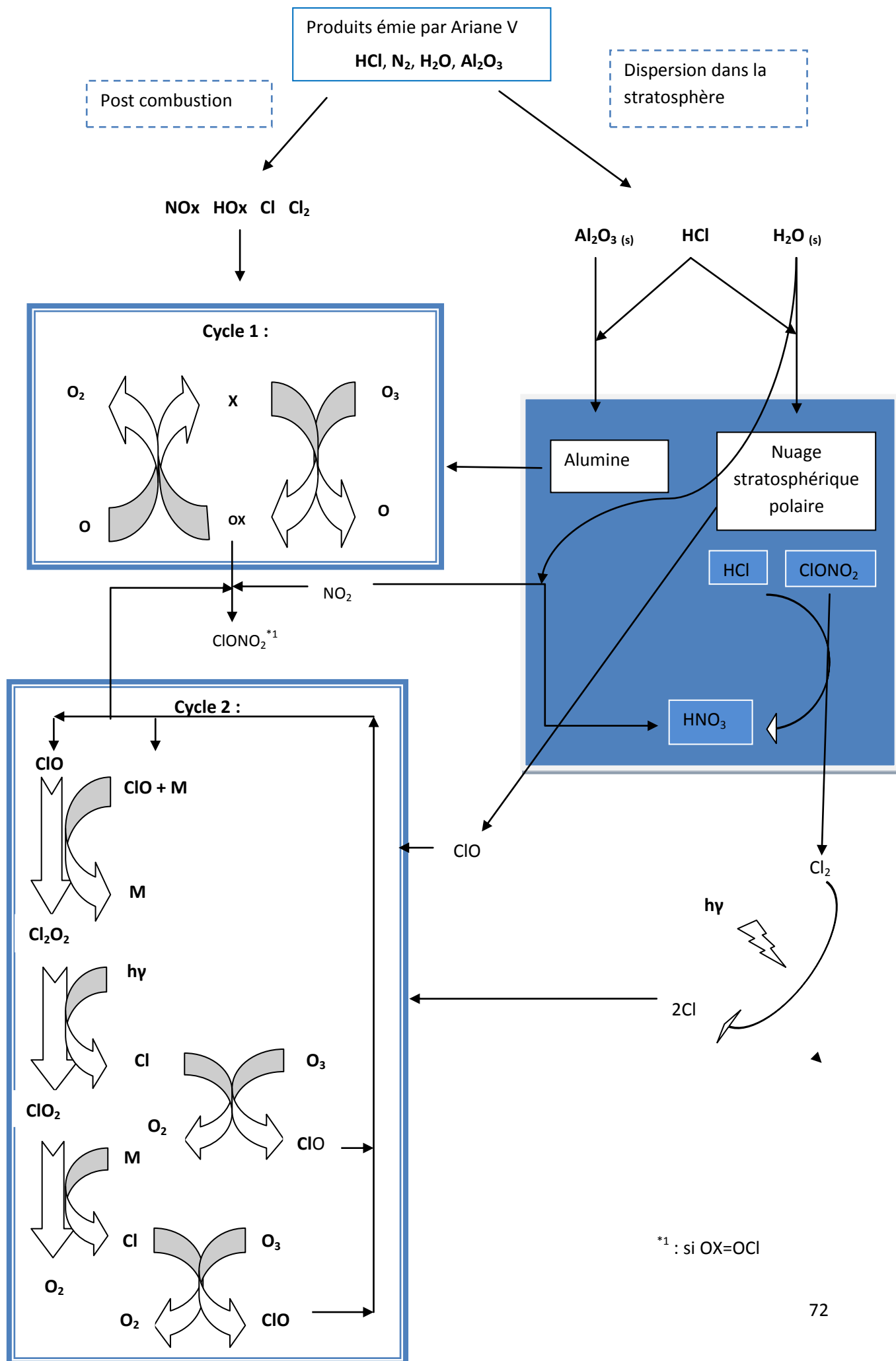


Table des illustrations

Figures

Figure 1 : zones d'études.....	8
Figure 2 : sites de Sinnamary	9
Figure 3 : site de Kourou.....	9
Figure 4 : montage utilisé.....	10
Figure 5 : résultats des bacs à eaux sur les sites de Sinnamary, les données utilisées sont des moyennes mensuelles.....	11
Figure 6 : variation des concentrations en ions chlorure mesurées en 2006	11
Figure 7 : résultats des bacs à eaux sur le site de Kourou, les données utilisées sont des moyennes mensuelles.....	11
Figure 8 : résultats (concentrations moyennes mensuelles) des barbotages sur les sites de Sinnamary ici sont des.....	12
Figure 9 : variation des concentrations en chlorure d'hydrogène gazeux mesurées en 2006.....	12
Figure 10 : position de la ZIC en début de saison sèche (le 02/08/2010) (Tropical Prediction Center, 2010)	13
Figure 11 : image satellite de la vapeur d'eau composant la ZIC (le 02/08/2010) (NOAA, 2010)	13
Figure 12 : processus du transfert du chlore de l'océan à l'atmosphère (Marchand).....	14
Figure 13 : cristal de sel imbriqué dans un aluminosilicate.....	16
Figure 14 : cycle simplifié du chlore d'origine naturelle en Guyane	16
Figure 15 : projection des données du vent sur l'axe E.....	17
Figure 16 : changement de référentiel afin de rendre les valeurs de vents plus « lisibles ».....	18
Figure 17 : schématisation des modifications mathématiques effectuées sur les données de vents.	19
Figure 18 : résultats pour le site de Kourou (les flèches représentent la direction des vents dominants).....	20
Figure 19 : résultats pour le site B.....	20
Figure 20 : vent du Sud Est	21
Figure 21 : vent du Nord Est.....	21
Figure 22 : Evolution des concentrations en PM10 à Cayenne et à Sinnamary durant le mois de Mai 2009.	22
Figure 23 : poussière du Sahara parcourant l'Océan Atlantique et atteignant la Guyane. (Images du satellite TERRA du 01/06/2010) (NASA, 2010)	22
Figure 24 : influence des PM10 pour le site B de Sinnamary.....	23
Figure 25 : influence des PM10 pour le site de Kourou	23
Figure 26 : pluviométrie sur la ville de Sinnamary	24
Figure 27 : pluviométrie de la ville de Sinnamary sur une année.....	24
Figure 28 : influence de l'humidité relative	25
Figure 29 : Influence du vent sur les résultats de Kourou pendant la haute saison	26
Figure 30 : influence du vent sur les résultats de Kourou durant la basse saison	27
Figure 31 : résultats pour Sinnamary.....	28
Figure 32 : influence du vent lors de la basse saison sur les sites de Sinnamary.....	28
Figure 33 : comparaison des résultats obtenus à Sinnamary et à Kourou lors de l'étude des vents.....	29
Figure 34 : [PM10] en fonction des concentrations en chlore pour le site de Kourou	30
Figure 35 : [PM10] en fonction des concentrations en chlore pour les sites de Sinnamary	30
Figure 36 : étude lors des passages de poussières à Kourou.....	31
Figure 37 : étude lors des passages de poussières à Sinnamary	31
Figure 38 : variable X en fonction des concentrations en chlore à Kourou lors de la haute saison	32
Figure 39 : influence du vent et des particules sur les résultats de Kourou lors de la basse saison	33
Figure 40 : l'influence du vent et des particules sur les sites de Sinnamary lors de la saison haute	34
Figure 41 : influence du vent et des particules sur les sites de Sinnamary lors de la saison basse	35

Figure 42 : comparaison des résultats des villes de Kourou et de Sinnamary	35
Figure 43 : influence du vent et des PM10 à Sinnamary (site B)	37
Figure 44 : influence du vent et des PM10 à Kourou	37
Figure 45 : résultats du site B de Sinnamary	38
Figure 46 : influence de la pluviométrie à Kourou	39
Figure 47 : influence de la pluviométrie à Sinnamary	40
Figure 48 : détermination des concentrations en chlore particulaire d'origine marine (bruit de fond naturel). ..	42
Figure 49 : concentration en chlore particulaire sur la ville de Kourou	44
Figure 50 : influence de la pluviométrie lors des lancements sur Sinnamary	47
Figure 51 : influence de la pluviométrie lors des lancements sur Kourou	47
Figure 52 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 168	48
Figure 53 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 175	48
Figure 54 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 182	48
Figure 55 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 181	49
Figure 56 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 177	50
Figure 57 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 180	51
Figure 58 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 166	52
Figure 59 : concentrations en chlore particulaire pour le vol 174	53
Figure 60 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 176	55
Figure 61 : concentrations en chlore particulaire lors du vol 170	56
Figure 62 : profil de température potentiel du vol 170	57
Figure 63 : concentration en chlore particulaire lors du vol 171	57
Figure 64 : impact d'Ariane V à Kourou	59
Figure 65 : impact d'Ariane V à Sinnamary	60
Figure 66 : la couche d'ozone	61
Figure 67 : effet de la post combustion dans le panache d'une fusée Athena II (Ross, Rockets and the ozone layer, 2000)	63
Figure 68 : perte d'ozone dans les panaches de fumées de différentes fusées (Ross, Rockets and the ozone layer, 2000)	64
Figure 69 : températures aux pôles permettant la formation de PSCs	65
Figure 70 : évolution de la destruction de l'ozone stratosphérique suivant l'évolution de l'activité spatial mondial	67

Tableaux

Tableau 1 : organisation du bureau, organe décisionnel	6
Tableau 2 : les membres de l'ORA, regroupés en 4 collèges	6
Tableau 3 : détermination des retombées naturelles en chlore suivant les paramètres du vent.	28
Tableau 4 : détermination des retombées naturelles en chlore en fonction des particules et du vent.	34
Tableau 5 : classe de stabilité de Pasquill-Gifford	46
Tableau 6 : données météo France du vent lors du vol 177	50
Tableau 9 : données météo France du vent lors du vol 180	51
Tableau 10 : radiosondage réalisé par le CSG lors du vol 180	51
Tableau 7 : données météo France du vent lors du vol 166	52
Tableau 8 : radiosondage réalisé par le CSG lors du vol 166	52
Tableau 11 : radiosondage du CSG lors du vol 174	53
Tableau 12 : radiosondage de météo France Rochambeau à 21h00 le jour du vol 174	54
Tableau 13 : données météo France du vent lors du tir 174	54
Tableau 14 : radiosondage effectué par le CSG lors du vol 176	55

Tableau 15 : résultats des pluviollessivats du CSG	55
Tableau 16 : radiosondage du vol 170	56
Tableau 17 : donnée de pluviométrie du 27 mai 2006 (vol 171)	57
Tableau 18 : approximation des émissions en fraction massique suivant le type de propulseurs utilisés. La masse totale excède l'unité car l'air mélangé au panache de fumée oxyde le CO et H ₂	62

Cycles

cycle 1.....	63
cycle 2.....	65
cycle 3.....	65

Equations

Équation 1	17
Équation 2	17
Équation 3	18
Équation 4	19
Équation 5	26
Équation 6	32
Équation 7	33
Équation bilan 8 (sans le liant):	43
Équation bilan 9	63
Équation bilan 10 :	66