

Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison sèche 2006 : résultats et comparaison avec la campagne de saison des pluies 2005

Rapport final

BRGM/RP-54909-FR

Septembre 2006

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 06EA UD10

E. Malcuit, B. Vittecoq, N. Baran, Ph. Negrel

Vérificateur :

Nom : E. PETELET-GIRAUD

Date : 25 septembre 2006

Original signé par E. PETELET-
GIRAUD

Approbateur :

Nom : JP. Comte

Date : 17 octobre 2006

Original signé par JP. Comte

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AF AQ ISO 9001:2000.



Mots clés : qualité, eaux souterraines, physico-chimie, éléments majeurs, éléments traces, métaux, réseau de surveillance, produits phytosanitaires, pesticides, DOM, Martinique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

E. Malcuit, B. Vittecoq, N. Baran, Ph. Negrel, (2006) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison sèche 2006 : résultats et comparaison avec la campagne de saison des pluies 2005. BRGM/RP-54909-FR. 110 pages, 39 illustrations, 3 cartes, 5 annexes.

Synthèse

Depuis 2004, le BRGM est chargé par la DIREN Martinique, du suivi de la qualité des eaux souterraines. Un réseau évolutif de 35 points a été défini sur la base des forages et piézomètres existants. Plusieurs campagnes ont ainsi été réalisées afin d'appréhender la qualité physico-chimique des eaux (éléments majeurs, mineurs et certains métaux), ainsi que leurs concentrations en certains produits phytosanitaires.

Ce présent rapport présente les résultats de la quatrième campagne de prélèvements et d'analyses, réalisée en période de carême 2006 (avril et mai 2006). 34 points d'eau souterraine ont été prélevés, ainsi qu'un échantillon d'eau de pluie. Les objectifs étaient de continuer l'acquisition de chroniques de données, permettant de suivre l'évolution chimique des eaux, ainsi que de mesurer la concentration en produits phytosanitaires de certains sites à risque.

Globalement la qualité des eaux souterraines est bonne :

- 50 % des sites montrant une bonne qualité physico-chimique pour cette campagne de saison sèche 2006, avec des concentrations inférieures aux normes des eaux brutes destinées à l'alimentation en eau potable ;
- 20 % des sites ne dépassent cette norme que pour le fer et le manganèse, éléments caractéristiques du fond géochimique de Martinique, et dont le traitement est très aisé.
- 30 % dépassent la norme pour divers éléments : le pH (6 sites), l'Arsenic (2 sites), le chlorure, le cuivre, le potassium, les nitrites (1 site), mais ces dépassements, et notamment concernant le pH, sont ponctuels et correspondent à des pollutions anthropiques et/ou à des spécificités hydrogéologiques et géochimiques localisées. Le traitement est là aussi aisé.

Le principal problème concernant la qualité des eaux souterraines est la présence, à des concentrations relativement importantes, de **produits phytosanitaires dans les 10 sites** où ces produits ont été recherchés. La plupart de ces sites se trouvent sur la façade atlantique (du François à Basse Pointe) et sont tous **situés en aval de zones cultivées**.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Campagne de prélèvements de la saison sèche 2006.....	13
2.1. LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS.....	13
2.2. LES ANALYSES REALISEES IN SITU ET AU LABORATOIRE.....	14
2.3. CONDITIONS DE PRELEVEMENT ET DE CONDITIONNEMENT	15
2.4. LES METHODES D'ANALYSES.....	16
2.4.1. Les méthodes d'analyses in situ.....	16
2.4.2. Les modes opératoires au laboratoire	16
3. Résultats et interprétations.....	17
3.1. LES PARAMETRES NON CONSERVATIFS DEL'EAU.....	17
3.1.1. La température.....	17
3.1.2. Le pH.....	17
3.1.3. La salinité	18
3.1.4. Relation pH - salinité	22
3.1.5. L'oxygène dissous : O ₂	23
3.1.6. Le potentiel d'oxydoréduction : Eh	23
3.2. LES METAUX	24
3.2.1. L'argent (Ag)	24
3.2.2. L'aluminium (Al)	24
3.2.3. L'arsenic (As)	25
3.2.4. Le Bore (B)	25
3.2.5. Le Baryum (Ba)	26
3.2.6. Le Béryllium (Be).....	27
3.2.7. Le Cadmium (Cd)	27
3.2.8. Le Cobalt (Co)	27
3.2.9. Le Chrome (Cr)	27
3.2.10. Le Cuivre (Cu).....	27
3.2.11. Le Lithium (Li)	28
3.2.12. Le Nickel (Ni).....	28
3.2.13. Le Plomb (Pb)	28

3.2.14.	Le Strontium (Sr)	29
3.2.15.	Le Zinc (Zn).....	29
3.2.16.	Le Fer (Fe)	30
3.2.17.	Le Manganèse (Mn).....	30
3.2.18.	Corrélation Fer - Manganèse	31
3.3.	LES PRODUITS AZOTES ET PHOSPHORES.....	33
3.3.1.	L'Ammonium (NH ₄)	34
3.3.2.	Les Nitrates (NO ₃)	34
3.3.3.	Les Nitrites (NO ₂)	35
3.3.4.	Les Orthophosphates (PO ₄)	36
3.4.	LES ELEMENTS MAJEURS.....	37
3.4.1.	Caractère chimique des eaux.....	37
3.4.2.	Les relations inter-éléments : comparaison saison des pluies 2005 – saison sèche 2006.....	39
3.5.	COMPARATIF SAISON DES PLUIES 2005 - SAISON SECHE 2006	47
3.6.	LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES.....	53
3.6.1.	Les sites pollués par les produits phytosanitaires	55
3.6.2.	Synthèse des résultats	67
3.7.	LES FORAGES PRESENTANT UNE EAU ALCALINE	71
4.	Etat hydrochimique des eaux souterraines de la campagne de prélèvements de la saison sèche 2006	73
4.1.	FACIES HYDROCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES.....	73
4.2.	LE SEQ EAU	74
4.2.1.	Introduction	74
4.2.2.	La classe d'aptitude « production d'eau potable »	75
4.3.	CARTOGRAPHIE SYNTHETIQUE.....	77
5.	Conclusion.....	79
5.1.	PHYSICO-CHIMIE	79
5.2.	PRODUITS PHYTOSANITAIRES.....	80
6.	Bibliographie.....	83

Liste des illustrations

Illustration 1 : Récapitulatif des 3 campagnes de prélèvements réalisées en 2004 et 2005.....	12
Illustration 2 : Ouvrages prélevés lors de la saison sèche 2006.....	13
Illustration 3 : Analyses physico-chimiques in situ et éléments analysés sur les 35 points pendant la saison sèche 2006.....	14
Illustration 4 : Photographie du matériel et flacons utilisés lors des prélèvements (de gauche à droite : sonde piézométrique indiquant en plus la conductivité de l'eau et sa température, flacons en polyéthylène et en verre ambré, malette d'analyses physico-chimiques in situ, échantillonneur en polyéthylène à usage unique).....	14
Illustration 5 : Modes opératoires des analyses physico-chimiques faites au laboratoire BRGM pour les 35 points pendant la saison sèche 2006.....	16
Illustration 6 : Représentation du pH des eaux souterraines des campagnes de prélèvements en saison de pluies 2005 (nommée SP) et en saison sèche 2006 (nommée SS).....	18
Illustration 7 : Diagramme de la conductivité électrique en fonction des campagnes en saison des pluies 2005 (SP) et en saison sèche 2006 (SS).....	19
Illustration 8 : Diagramme de la conductivité en fonction du TDS pour les échantillons des campagnes en saison de pluies (nommée SP) 2005 et en saison sèche (nommée SS) 2006, vue globale et vue agrandie.....	21
Illustration 9 : Diagramme du pH en fonction de la conductivité électrique pour les échantillons des campagnes de saison des pluies (SP) 2005 et de saison sèche (SS)2006.....	22
Illustration 10 : Diagramme de Eh en fonction du pH pour les échantillons de la campagne de saison sèche (SS) 2006.....	23
Illustration 11 : Diagramme de la concentration en fer (en mg/l) en fonction de la concentration en manganèse (en µg/l) pour les échantillons des campagnes en saison des pluies (SP)2005 et en saison sèche (SS) 2006, vue globale et vue agrandie.....	32
Illustration 12 : Diagramme de la concentration en fer (en mg/l) en fonction de la concentration en manganèse (en µg/l) pour les échantillons des campagnes en saison de pluies (SP) 2005 et en saison sèche (SS) 2006, vue agrandie.....	33
Illustration 13 : Diagramme somme des anions Σ^- en fonction des cations Σ^+ pour les points de la campagne en saison sèche 2006.....	37
Illustration 14 : Balance ionique en fonction des sommes en cations et anions des analyses de la campagne en saison sèche 2006.....	38
Illustration 15 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en sodium (SS correspond à la saison sèche, SP à la saison des pluies).....	40
Illustration 16 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en calcium.....	41
Illustration 17 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en bore.....	42

Illustration 18 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en magnésium.....	43
Illustration 19 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en potassium.....	44
Illustration 20 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en sulfates.....	45
Illustration 21 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en nitrates.....	46
Illustration 22 : Variations des éléments NO ₃ , Cl, SO ₄ , HCO ₃ entre les campagnes en saison des pluies (SP) 2005 et en saison sèche (SS) 2006.....	47
Illustration 23 : Variations des éléments Na, K, Mg, Ca entre les campagnes en saison des pluies (SP) 2005 et en saison sèche (SS) 2006.....	48
Illustration 24 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en chlore entre la saison sèche 2006 et la saison des pluies 2005.....	49
Illustration 25 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en sodium entre la saison sèche 2006 et la saison des pluies 2005.....	51
Illustration 26 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en bore entre la saison sèche 2006 et la saison des pluies 2005.....	51
Illustration 27 : Liste des 120 molécules phytosanitaires analysées. Les molécules en vert correspondent à celles détectées dans les rivières par la DIREN ; les noms inscrits en gras correspondent aux molécules détectées dans les eaux souterraines lors de la campagne d'avril 2006. Les limites de quantifications associées sont indiquées en µg/l.....	54
Illustration 28 : Evolution des concentrations en produits phytosanitaires détectés à Vert Pré, en µg/l.....	56
Illustration 29 : Produits phytosanitaires détectés à Basse Pointe – Piézomètre à proximité de la Rivière Falaise, concentrations en µg/l.....	57
Illustration 30 : Evolution du niveau piézométrique mesuré au niveau de Rivière Falaise – chez Lélène.....	59
Illustration 31 : Produits phytosanitaires détectés dans le forage de Marigot – Anse Charpentier, concentration en µg/l.....	60
Illustration 32 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du point Marigot-Anse Charpentier.....	61
Illustration 33 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du piézomètre François – Grand Fond.....	63
Illustration 34 : Evolution du niveau piézométrique au piézomètre Gros Morne – La Borelli.....	64
Illustration 35 : Produits phytosanitaires détectés au piézomètre Chalvet – Commune de Basse Pointe, concentration en µg/l.....	65
Illustration 36 : Evolution du niveau piézométrique au point Basse Pointe – Chalvet.....	66
Illustration 37 : Synthèse des résultats par forage de la campagne d'avril 2006, pour chaque molécule quantifiée au moins une fois.....	68
Illustration 39 : Diagramme de Piper.....	73

Liste des annexes

Annexe 1 Tableau des résultats des analyses.....	85
Annexe 2 Cartes de suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique	87
Annexe 3 Informations générales sur les molécules phytosanitaires détectées.....	89
Annexe 4 Propriétés physico-chimiques des molécules phytosanitaires et comportement.....	97
Annexe 5 Bref historique de l'usage des produits phytosanitaires en Martinique.....	103

1. Introduction

La Directive Cadre Européenne 2000/60/CE du 23 octobre 2000 demandait de dresser à l'échéance 2004 un état des lieux sur la qualité chimique de la ressource en eau. A la suite de cet état des lieux, un réseau de suivi pérenne doit être mis en place, et ceci d'ici fin 2006.

En janvier 2004, le BRGM a ainsi été chargé, par la DIREN Martinique, d'établir un premier état de la qualité des eaux souterraines. Cet état constitue le corps du rapport BRGM/RP-52997-FR. Un total de 34 points d'eaux souterraines avait été prélevé en 2004.

Ces premières constatations, ponctuelles et effectuées durant la saison sèche (janvier à mars 2004) devaient être vérifiées et mieux connues dans l'espace et dans le temps. Une deuxième campagne a été réalisée en octobre et novembre 2004 lors de la période des pluies. Les mêmes 34 points d'eau souterraine ont été prélevés. Les objectifs étaient d'observer les évolutions chimiques dues à la pluviométrie et de vérifier la présence de molécules phytosanitaires. Lors de cette étude, la qualité des eaux souterraines a été caractérisée bonne, avec 35 % des sites présentant une eau de qualité « eau brute » selon les normes en vigueur pour l'AEP, et 25 % ne dépassant cette norme que pour le manganèse ou le fer, éléments caractéristiques du fond géochimique de Martinique.

Une autre campagne avait été réalisée pendant la saison des pluies 2005, afin de confirmer les observations déjà réalisées. 35 points avaient été prélevés, dont 25 communs avec les précédentes campagnes. Lors de cette campagne, 53 % des sites se sont révélés de bonne qualité et 20 % ne dépassant la norme AEP que pour le manganèse ou le fer. D'autre part, 7 sites se sont révélés pollués par des produits phytosanitaires.

L'ensemble des données, concernant les trois campagnes précédentes, est résumé dans l'illustration 1.

La présente étude a pour objet une quatrième campagne de prélèvements et d'analyses, réalisée en période de carême 2006 (avril 2005 - mai 2006).

Cette campagne avait pour objectifs :

- Observer les évolutions chimiques dues au carême par rapport à la saison des pluies de 2005,
- Vérifier la présence de molécules phytosanitaires (120 molécules analysées) dans 10 points choisis en concertation avec la DIREN,
- améliorer la caractérisation qualitative des masses d'eaux souterraines,

- Identifier d'éventuelles évolutions tendanciennes de dégradation de la qualité des eaux, dans l'espace et dans le temps.

Date de prélèvements	Nombre total de points prélevés	Nombre d'analyses physico-chimiques	Éléments physico-chimiques analysés	Nombre d'analyses phytosanitaires	Nombre de molécules phytosanitaires analysées	Observations / Résultats
Saison sèche 2004 (janv - mars 2004)	34	34	Ions majeurs, métaux traces	34	5	Rapport BRGMRP-52997-FR Aucune pollution importante en produits azotés et phosphorés 6 sites indiquent des produits phytosanitaires
Saison des pluies 2004 (oct - nov 2004)	34	34	Ions majeurs, métaux traces	10	111	Rapport BRGMRP-52997-FR 35 % des prélèvements ont une eau de qualité "eaux brutes" selon les normes en vigueur pour l'AEP 4 sites pollués par des produits phytosanitaires
Saison des pluies 2005 (nov - jan 2006)	35	35	Ions majeurs, métaux traces	10	120	Rapport BRGMRP-54717-FR 53 % des prélèvements ont une eau de qualité "eaux brutes" selon les normes en vigueur pour l'AEP 7 sites pollués par des produits phytosanitaires

Illustration 1 : Récapitulatif des 3 campagnes de prélèvements réalisées en 2004 et 2005

Elle a été menée en trois étapes :

- Campagne de prélèvements sur le terrain pour 35 points : 34 ouvrages (piézomètres, forages exploités, sources) et un prélèvement d'eau de pluie. Ces 35 points sont identiques à ceux de la campagne de saison des pluies 2005.
- Conditionnement et expédition des échantillons pour analyses par le laboratoire du BRGM à Orléans (agrégé COFRAC).
- Présentation et interprétation des résultats sous forme de ce présent rapport.

2. Campagne de prélèvements de la saison sèche 2006

2.1. LOCALISATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS

Dans le cadre de cette campagne de prélèvements en saison sèche, 34 points (piézomètres, forages exploités et sources), ainsi qu'un échantillon d'eau de pluie ont été analysés. L'eau de pluie a été prélevée suite aux précipitations du 25 avril 2006 (10 mm). Les points échantillonnés sont présentés dans le tableau ci-dessous, ainsi que sur la carte 1 dans l'annexe 2 :

N° terrain 2004	n° BSS	Date du prélèvement SS 2006	Type	Commune	Lieu dit
9	1186ZZ0118	20/04/2006	Piézo mètre	Marin	Grand Fond
11	1183ZZ0052	20/04/2006	Piézo mètre	Rivière Pilote	Fougainville
36	1183ZZ0024	20/04/2006	Piézo mètre	Rivière Pilote	La Mauny
29	1185ZZ0120	27/04/2006	Piézo mètre	Ste Luce	Stade communal
27	1168ZZ0054	25/04/2006	Piézo mètre	Basse Pointe	Rivière Falaise
3	1169ZZ0006	25/04/2006	Piézo mètre	Marigot	Anse Charpentier
17	1175ZZ0153	26/04/2006	Source	Trinité	Mome Figue
24	1174ZZ0088	28/04/2006	Piézo mètre	Gros Mome	La Borelli
30	1167ZZ0024	21/04/2006	Piézo mètre	Prêcheur	Rivière du Prêcheur
1	1167ZZ0023	21/04/2006	Piézo mètre	Saint Pierre	Rivière Blanche
26	1177ZZ0173	19/04/2006	Piézo mètre	Case Pilote	Maniba
4	1177ZZ0161	18/04/2006	Piézo mètre	Schoelcher	Fond Lahaye
5	1177ZZ0165	24/04/2006	Piézo mètre	Schoelcher	Case Navire
12	1174ZZ0087	24/04/2006	Piézo mètre	Saint Joseph	La Charmille
20	1183ZZ0053	05/05/2006	Source	Saint Esprit	Source Caraïbe
8	1184ZZ0016	05/05/2006	Forage exploité	Diamant	Habitation Dizac
25	1181ZZ0131	27/04/2006	Piézo mètre	Anses d'Arlet	Grande Anse
28	1175ZZ0132	27/04/2006	Piézo mètre	Trois Ilets	Vatable
21	1179ZZ0070	27/04/2006	Piézo mètre	Lamentin	Habitation Ressource
16	1179ZZ0158	24/04/2006	Piézo mètre	Lamentin	Sarrault
37	EP/RODATE	25/04/2006	Eau de pluie	Fort De France	Rodate
34	1179ZZ0282	20/04/2006	Source	Lamentin	Mome Pitault La Frédée
33	1179ZZ0228	05/05/2006	Forage d'exploitation	François	La Victoire
38	1179ZZ0299	26/04/2006	Piézo mètre	François	Grand Fond
39	1179ZZ0300	26/04/2006	Piézo mètre	Robert	Pontalery
40	1175ZZ0154	26/04/2006	Piézo mètre	Trinité	Le Galion
32	1174ZZ0089	04/05/2006	Source	Saint Joseph	Coeur Bouliki
41	1169ZZ0082	04/05/2006	Source	Lorrain	Source Carabin
42	1166ZZ0026	25/04/2006	Piézo mètre	Basse Pointe	Chalvet
15	1168ZZ0055	21/04/2006	Source	Mome Rouge	Habitation Citron
18	1173ZZ0076	04/05/2006	Source	Fond Saint Denis	Source de l'Alma
19	1175ZZ0106	04/05/2006	Forage d'exploitation	Gros Mome	Vert Pré
43	1173ZZ0082	19/04/2006	Piézo mètre	Bellefontaine	Fond Laillet
44	1167ZZ0045	24/04/2006	Piézo mètre	St Pierre	CDST
45	1169ZZ0084	25/04/2006	Piézo mètre	Lorrain	Fond Brulé

Illustration 2 : Ouvrages prélevés lors de la saison sèche 2006.

2.2. LES ANALYSES REALISEES IN SITU ET AU LABORATOIRE

Pour tous les points suivis, des analyses physico-chimiques *in situ*, concernant les paramètres non conservatifs, ont été effectuées.

De plus, pour chacun de ces points, des prélèvements ont été réalisés et envoyés au laboratoire. Deux types d'analyses ont été réalisés. Tout d'abord, les éléments majeurs et traces ont été analysés sur les 35 points du suivi. Puis les produits phytosanitaires ont été analysés sur 10 ouvrages. Les éléments analysés, présentés dans les Illustration 3 et Illustration 27 ont été choisis en concertation avec la DIREN (sur la base des usages connus en Martinique et des produits retrouvés dans les rivières, pour les phytosanitaires).

Analyses physico-chimiques <i>in situ</i>	pH, Conductivité, Température, Potentiel d'oxydoréduction, Oxygène dissous
Éléments majeurs	Ca, Mg, K, Na, Cl, SO ₄ , HCO ₃ , CO ₃ , NO ₃ , SiO ₂ , NH ₄ , NO ₂ , PO ₄
Éléments en traces	Al, Mn, Fe, Ni, As, B, F, Ag, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Pb, Sr, Zn

Illustration 3 : Analyses physico-chimiques *in situ* et éléments analysés sur les 35 points pendant la saison sèche 2006.



Illustration 4 : Photographie du matériel et flacons utilisés lors des prélèvements (de gauche à droite : sonde piézométrique indiquant en plus la conductivité de l'eau et sa température, flacons en polyéthylène et en verre ambré, malette d'analyses physico-chimiques *in situ*, échantillonneur en polyéthylène à usage unique).

2.3. CONDITIONS DE PRELEVEMENT ET DE CONDITIONNEMENT

Selon la particularité de chaque site, diverses méthodes de prélèvement ont été appliquées :

- ◆ Sources : prélèvement direct.
- ◆ Forage d'exploitation : prélèvement au robinet.
- ◆ Piézomètre : pompage puis prélèvement

Pour la majorité des piézomètres, le prélèvement a été réalisé à la suite d'un pompage autonome réalisé au moyen d'une pompe immergée de 2 pouces, reliée à un groupe électrogène. Ce pompage préalable d'une durée comprise entre 30 et 90 minutes selon les sites, permet de renouveler l'eau dans l'ouvrage. Le prélèvement de l'eau de la nappe a ensuite été effectué à l'aide d'un préleveur à bille en polyéthylène.

- ◆ Piézomètre : prélèvement à l'aide un échantillonneur en polyéthylène sans pompage préalable

Les 2 piézomètres des Anses d'Arlets et des Trois Ilets ont été prélevés sans pompage préalable, suite à une diagraphie de conductivité, afin d'éviter toute remontée d'eau salée dans le forage. Par ailleurs, en raison de contraintes techniques sur le terrain (tubage ne permettant pas le passage d'une pompe en toute sécurité), 4 autres ouvrages ont aussi été prélevés sans pompage préalable. *Dans tous les cas, une vidange manuelle de l'eau « en surface » du piézomètre a été réalisée avant le prélèvement. L'eau n'a donc pas été prélevée directement.*

L'eau prélevée est ensuite répartie dans différents flaconnages, selon les analyses à réaliser.

- Flacons en polyéthylène de 100 ml pour les anions et NH_4 , remplis avec l'eau filtrée sans réactif.
- Flacons en polyéthylène de 50 ml pour les cations majeurs, traces et métaux, remplis avec l'eau filtrée et acidifiée (acide nitrique pour obtenir un $\text{pH} = 2$).
- 4 flacons en verre ambré de 1000 ml, pour les produits phytopharmaceutiques, dont un acidifié avec du H_2SO_4 pour obtenir un $\text{pH} = 2$.

Le pH des eaux acidifiées est vérifié à l'aide de papier pH. L'ensemble des flacons est transporté dans des glacières, conservé à basse température (2 à 8 °C) et à l'abri de la lumière. Les glacières ont été envoyées par transport express au Service Métrologie Monitoring Analyse, laboratoire BRGM agréé COFRAC, basé à Orléans. Pour chaque échantillon, une bouteille en verre ambré d'un litre a été conservée au BRGM Martinique, pour témoin en cas de nécessité d'analyse de contrôle ou pour palier à une éventuelle perte d'échantillon (casse, ...), pendant le transport.

2.4. LES METHODES D'ANALYSES

2.4.1. Les méthodes d'analyses in situ

Les appareils utilisés sur le terrain lors de la campagne de prélèvements sont les suivants :

- Bandelette indicatrice de pH : CARLO ERBA REAGENTI, pH 1 - 12
- Multi-paramètres WTW 340i :
 - Electrode pH/ Température / Rédox : pH SenTix 20
 - Domaine de mesure du pH : -2.00 à 19.99 pH, 0.01 ± pH,
 - Domaine de mesure de Ehmes : ± 1250 mV, ± 1 mV
 - Domaine de température : -5.0 à +105.0 °C, ± 0.1 °C
 - Electrode de Conductivité / Température / Salinité : TétraCon 325
 - Domaine de mesure : 1 µS/cm à 500 mS/cm (± 1% lecture + 1 chiffre)
 - Domaine de mesure de la température : -5.0 à +105.0 °C, ± 0.1 °C
 - Electrode mesurant l'Oxygène dissous : CellOx 325
 - Domaine de mesure : 0.0 à 90.0 mg/l et 0 à 600 % (± 0.5 % lecture + 1 chiffre)
 - Electrode rédox gélifiée combinée de référence (Ag, AgCl), corps époxy.

2.4.2. Les modes opératoires au laboratoire

Les modes opératoires utilisés par le laboratoire du BRGM sont les suivants :

Éléments	Mode opératoire	Intitulé
Pb	MO 108	Analyses d'éléments traces par ICP/MS
Cl, SO ₄ , NO ₃	NF EN ISO 10304	Méthode par chromatographie ionique (DIONEX)
NH ₄ (Ammonium exprimé en NH ₄)	NF EN ISO 11732	Analyse en flux (FFA et FIA), détection spectrométrique
Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, Sr, Zn	NF EN ISO 11885	Analyse par ICP/AES séquentiel
Ca, Fe, K, Mg, Na, SiO ₂	NF EN ISO 11885	Analyse par ICP - spectrométrie d'émission
PO ₄ (OrthoPhosphates en PO ₄)	NF EN ISO 6878	Analyse des orthophosphates selon §3 de la norme
CO ₃ , HCO ₃	NF EN ISO 9963-1	Alcalinité TA/TAC par potentiométrie, CO ₃ /HCO ₃ calculés à partir des valeurs de l'alcalinité
NO ₂	NF EN 26777	Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire
F	NF T 90-004	Méthode par potentiométrie (électrode combinée)

Illustration 5 : Modes opératoires des analyses physico-chimiques faites au laboratoire BRGM pour les 35 points pendant la saison sèche 2006.

3. Résultats et interprétations

3.1. LES PARAMETRES NON CONSERVATIFS DE L'EAU

3.1.1. La température

La température des eaux analysées lors de la saison sèche 2006 varie de 21.9 à 31.1°C. On remarque que les températures les plus importantes ont été enregistrées pour les forages, notamment deux forages en exploitation (n° 19 Gros Morne - Vert Pré et n° 8 Diamant - Habitation Dizac). Il est possible que ces températures plus élevées soient causées par le réchauffement de l'eau dans les canalisations, en effet, les prélèvements se font au robinet. Le piézomètre du Précheur - Rivière Précheur (n°30) conserve lors de cette campagne de saison sèche 2006 une température d'eau proche de 26°C. Seul le forage d'exploitation de François - La Victoire enregistre une température inférieure ou égale à 25°C. Ceci est certainement dû aux conditions climatiques, comme l'atteste la température ambiante, le prélèvement ayant eu lieu sous une pluie battante de plusieurs heures. Quant aux 7 sources analysées, elles présentent des températures comprises entre 21.9 et 26.8°C, équivalentes à la température ambiante. (c.f. Annexe 1).

3.1.2. Le pH

Les pH des eaux analysées varient de 5.4 à 10.5 (Illustration 6). Parmi tous les points suivis, 26 d'entre eux ont une eau dans les limites de potabilité vis-à-vis du pH (pH compris entre 6.5 et 8.5).

Par contre, 8 autres points présentent soit un pH supérieur à 11, soit inférieur à 6.5. Le forage exploité de Diamant - Habitation Dizac (n° 8, pH = 5.4), la Source Carabin au Lorrain (n°41, pH = 5.8), le piézomètre de St Joseph - La Charmille (n°12, pH = 6.10), la source de St Esprit - Source Caraïbe (n°20, pH = 6.3) et le forage exploité de François - La Victoire (n°33, pH = 6.4) présentent des pH limites mais ces eaux peuvent subir un traitement physico-chimique.

Néanmoins, ce n'est pas le cas des eaux des 3 piézomètres réalisés en fin d'année 2005 situés à François - Grand Fond (n°38, pH = 10.5), Trinité - Le Galion (n°40, pH = 10.2) et Robert - Pontalery (n°39, pH = 10.1). Ces eaux sont inaptes à la production d'eau potable.

En comparant les 34 points en commun entre les campagnes de prélèvements en saison de pluies 2005 et en saison sèche 2006, (cf. Illustration 6) on s'aperçoit que la majorité des points présentent un pH relativement stable entre les 2 campagnes de mesures. On note que 6 points indiquent une baisse visible de pH entre ces deux campagnes, dont les 3 piézomètres aux eaux alcalines (Robert - Pontalery (n°39), François - Grand Fond (n°38) et Trinité - Le Galion (n°40)).

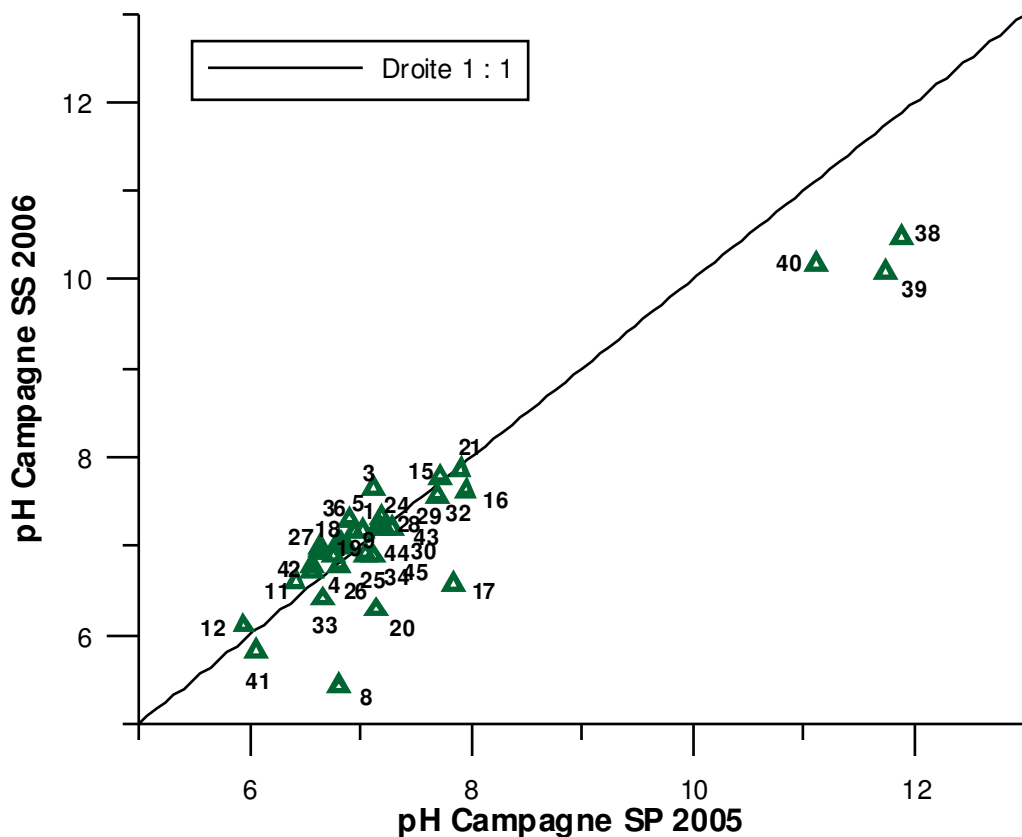


Illustration 6 : Représentation du pH des eaux souterraines des campagnes de prélèvements en saison de pluies 2005 (nommée SP) et en saison sèche 2006 (nommée SS).

3.1.3. La salinité

La salinité des eaux est en partie liée aux interactions eau-roche et à la capacité des eaux à dissoudre les minéraux contenus dans les roches. Elle peut être représentée par la conductivité électrique (exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Lors de la saison sèche 2006, la conductivité électrique enregistrée pour les 34 points suivis varie de 105 à 1780 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux des piézomètres de François - Grand Fond (n°38) et Anses d'Arlets - Grande Anse (n°25) qui présentaient des conductivités supérieures à 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lors de la campagne en saison des pluies 2005 ont une conductivité tout à fait dans la norme en saison sèche 2006.

L'illustration 7 montre les variations de ce paramètre, mesuré *in situ*, lors des deux campagnes de prélèvements en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006. 34 points en commun lors de ces deux campagnes peuvent être étudiés. On s'aperçoit que la majorité de ces points s'alignent de manière quasi parfaite sur la droite 1 :1,

démontrant une très faible variabilité des conductivités électriques entre les deux périodes d'étude. La faible variabilité de la conductivité (et donc par la même de la salinité des eaux) laisse à penser que les réservoirs d'eau sont importants et ne subissent que très peu l'impact de la dilution par les eaux de pluies. Par contre, ce n'est pas le cas pour quelques uns des points prélevés : François - Grand Fond (n°38), Robert - Pontalery (n°39), Rivière Pilote - La Mauny (n°36), Trinité - Le Galion (n°40), Ste Luce - Stade communal (n°29) et Trois Ilets - Vatable (n°28). Ces points indiquent une baisse assez importante de leur conductivité entre la campagne en saison des pluies 2005 et celle en saison sèche 2006. Les raisons de cette baisse de conductivité entre les 2 campagnes diffèrent selon le point. On peut tout de même noter l'influence de la méthode de prélèvement entre les 2 campagnes. En effet, certaines eaux avaient été directement prélevées à l'exhaure de la pompe en saison des pluies 2005 ; alors qu'en saison sèche 2006, leur prélèvement a été effectué en surface à l'aide d'un tube préleveur en polyéthylène après pompage préalable. Cette différence de profondeur de prélèvement a pu influencer ces résultats, notamment pour les piézomètres n°25, n°28 et n°29.

Toutefois, pour les autres points, il est nécessaire d'attendre les résultats de la campagne de prélèvements en saison des pluies 2006 afin de pouvoir donner des éléments d'interprétation fiables.

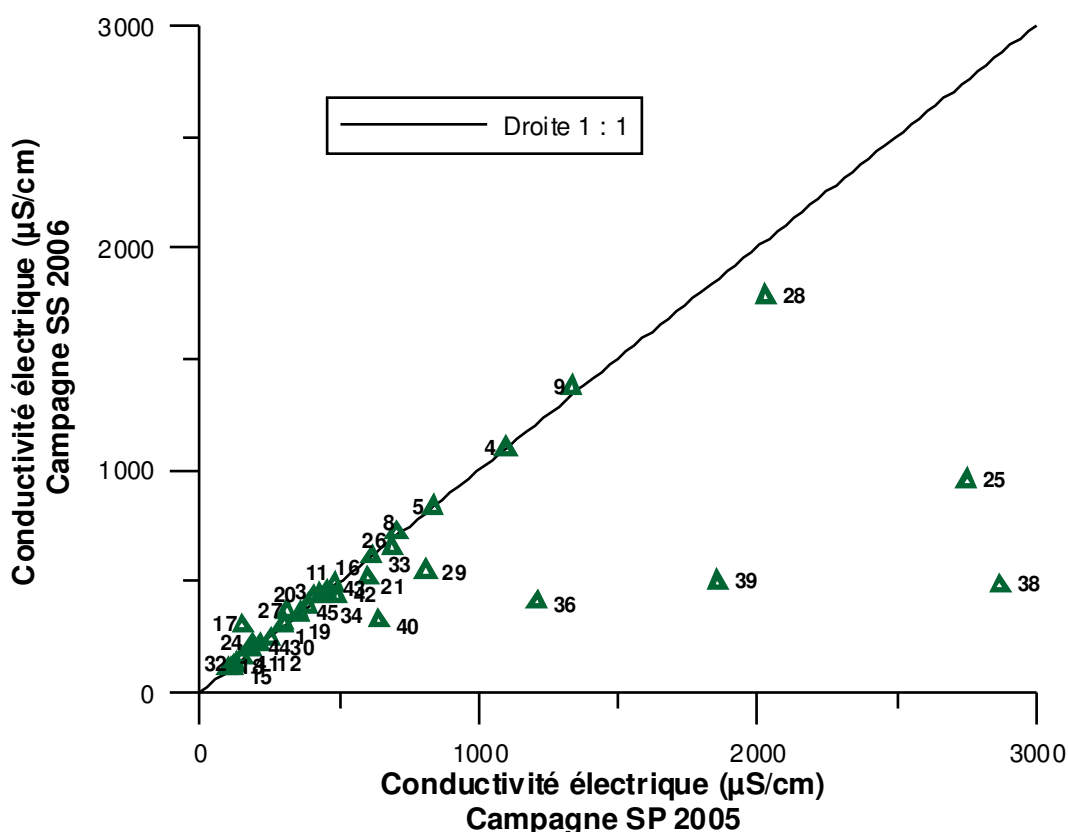


Illustration 7 : Diagramme de la conductivité électrique en fonction des campagnes en saison des pluies 2005 (SP) et en saison sèche 2006 (SS)

La salinité des eaux peut aussi être représentée par le TDS (pour Total Dissolved Solids) qui correspond ici à la somme des concentrations des éléments chimiques majeurs (Ca, Na, Mg, K, Cl, SO₄, NO₃, HCO₃ et CO₃) issues des mesures faites en laboratoire.

L'illustration 8 montre les variations de ces paramètres pour les deux campagnes de prélèvements en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006.

On constate une très bonne relation entre conductivité électrique et TDS pour les points de la campagne en saison sèche 2006.

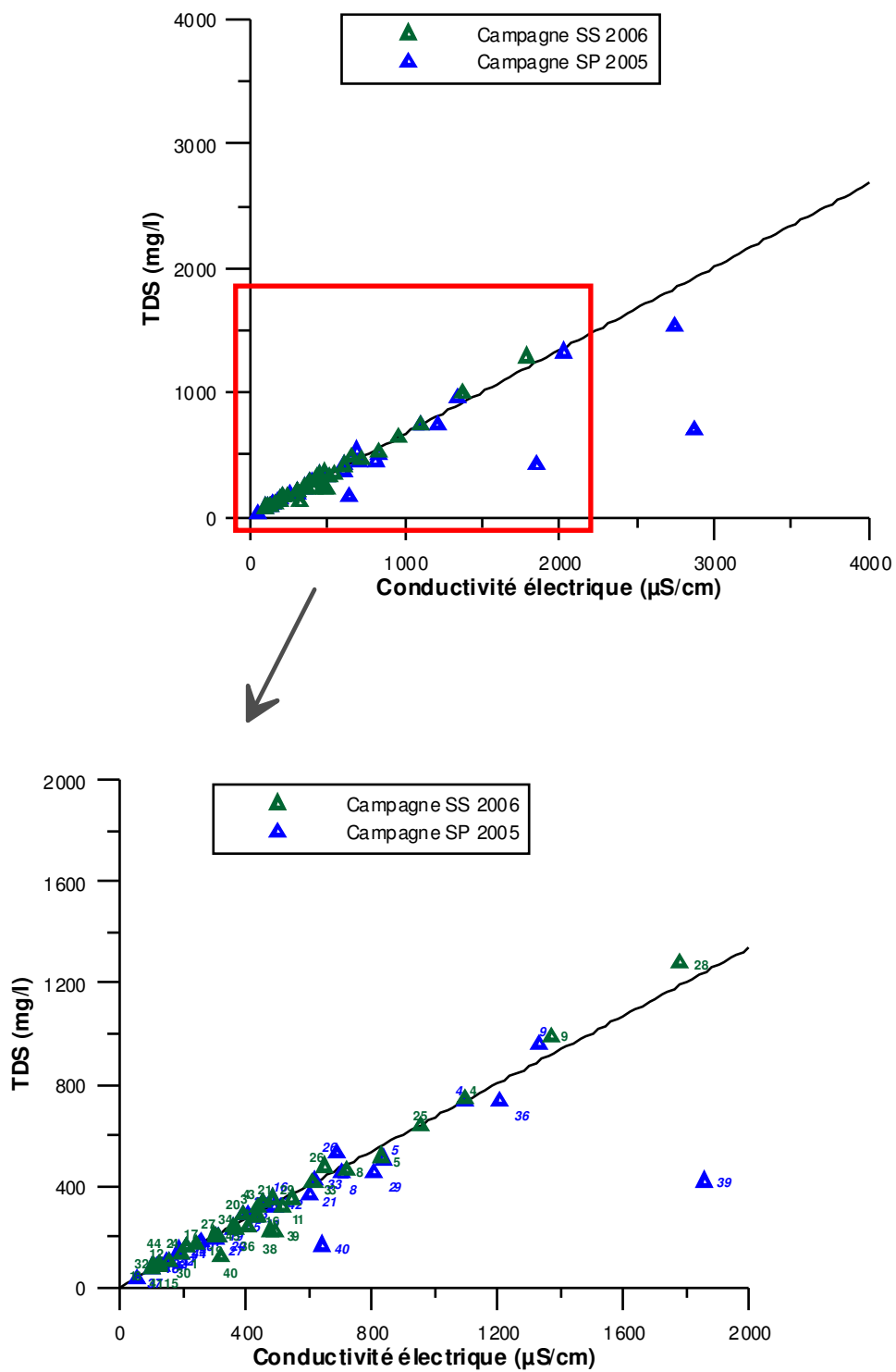


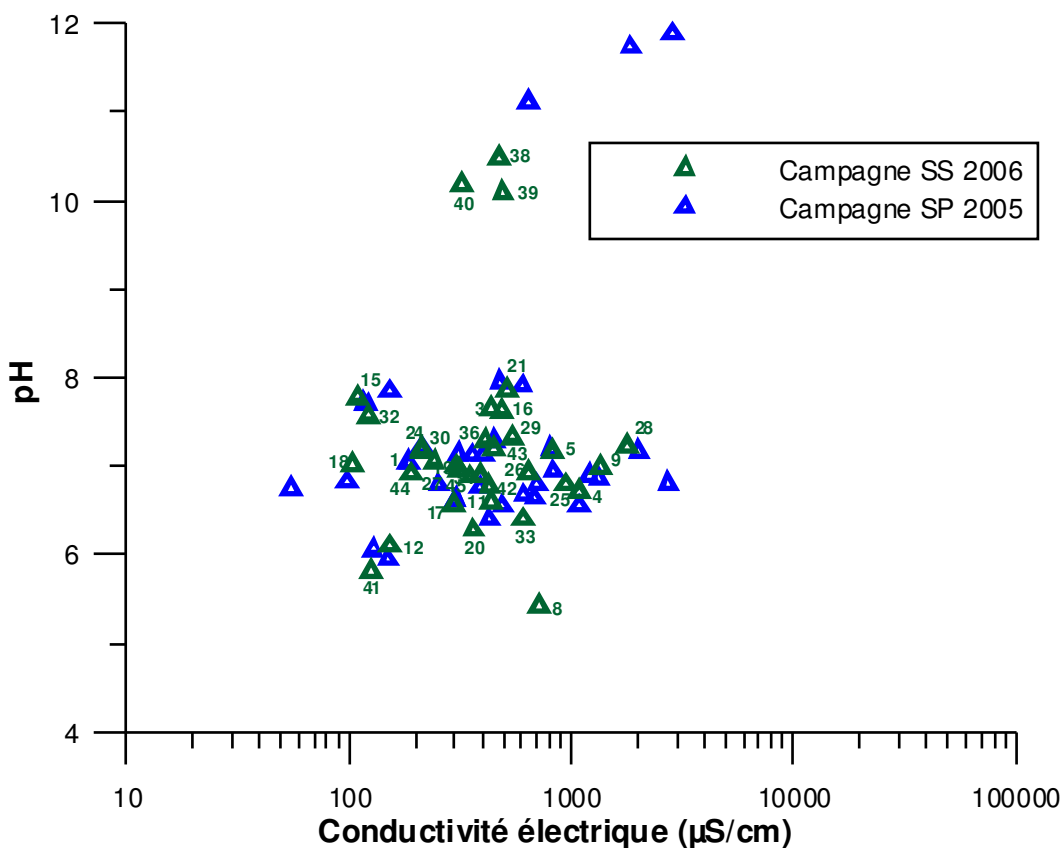
Illustration 8 : Diagramme de la conductivité en fonction du TDS pour les échantillons des campagnes en saison de pluies (nommée SP) 2005 et en saison sèche (nommée SS) 2006, vue globale et vue agrandie.

3.1.4. Relation pH - salinité

La salinité de l'eau, sous forme de la conductivité électrique, est représentée par l'illustration 9 en fonction du pH.

On n'observe pas de lien avec le pH, mais certains points sont décalés par leur valeur de pH entre les différentes campagnes.

Les forages du François - Grand Fond (n° 38), de Robert - Pontalery (n°39) et de Trinité - Le Galion (n°40) sont très excentrés de l'ensemble des points, en raison de leur pH alcalin, bien que légèrement plus faible lors de la saison sèche 2006. On peut aussi noter le forage exploité de Diamant – Habitation Dizac (n°8) qui avec son pH à 5.4 s'individualise légèrement.



3.1.5. L'oxygène dissous : O₂

Ce paramètre a été mesuré *in situ* et est exprimé en mg/l ou en % (c.f. : Annexe 1). Il correspond à la quantité d'oxygène dissous dans l'eau souterraine en liaison avec l'état d'oxydoréduction de l'eau. Les valeurs pour la campagne en saison sèche 2006 varient de 1.4 à 10.4 mg/l. Les valeurs les plus fortes ont majoritairement été rencontrées pour les eaux de source.

3.1.6. Le potentiel d'oxydoréduction : Eh

Le potentiel rédox pour la campagne 2005, corrigé de la valeur de l'électrode, varie de 92.7 à 261 mV. Plus le potentiel d'oxydoréduction est faible, plus le milieu est réducteur, et inversement, plus le potentiel Eh est fort plus le milieu est oxydant.

Ces variations ne semblent pas liées avec le pH comme l'atteste l'illustration 10 (Eh vs. pH).

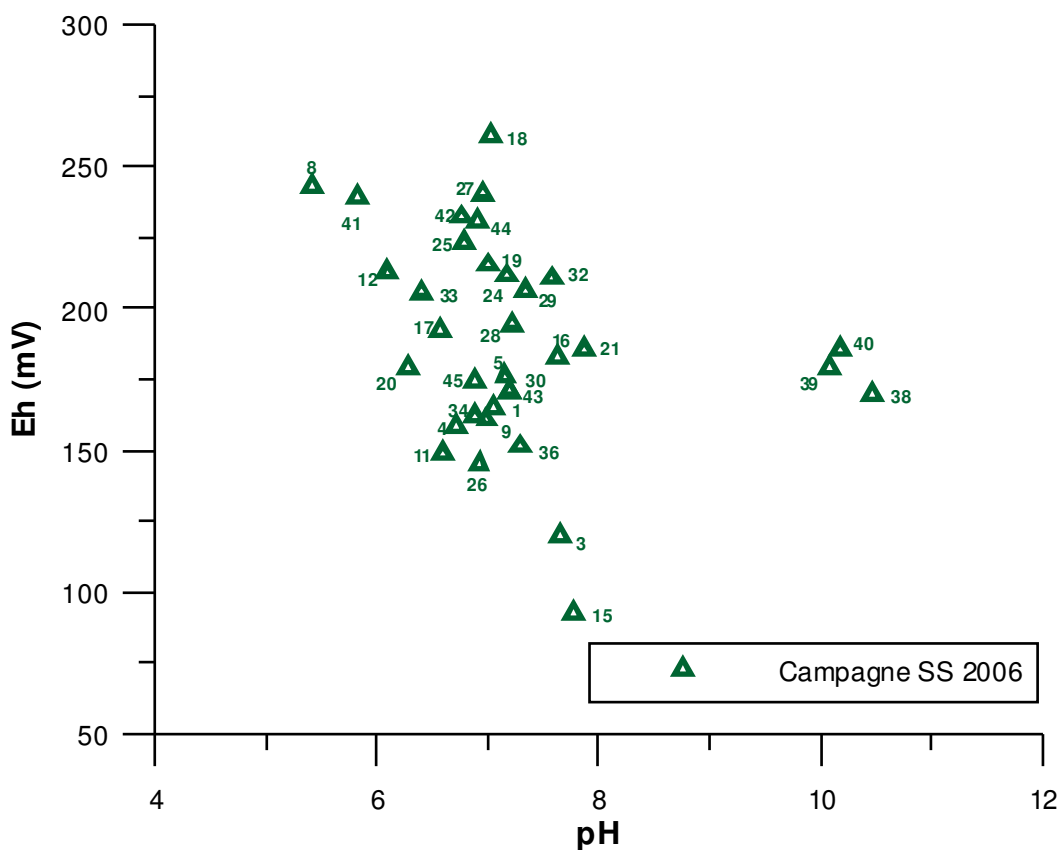


Illustration 10 : Diagramme de Eh en fonction du pH pour les échantillons de la campagne de saison sèche (SS) 2006.

3.2. LES METAUX

Les valeurs utilisées comme normes sont fixées par le Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 et la directive du Conseil de l'Union européenne n°98/83/CE du 3 novembre 1998.

3.2.1. L'argent (Ag)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 5 µg/l. Au dessous de 10 µg/l, cette eau reste de qualité acceptable pour être consommée, mais peut faire l'objet d'un traitement. Au dessus de 200 µg/l, l'eau est inapte à la production d'eau potable.

Tous les points suivis lors de la saison sèche 2006 présentent des concentrations en argent inférieures à la limite de quantification du laboratoire (5 µg/l).

Les caractéristiques chimiques de l'argent n'autorisent pas l'existence, dans les eaux naturelles, de concentrations significatives (>1 µg/l). La solubilité de l'argent est limitée par celle de l'argent natif. Des teneurs supérieures à 10 µg/l seraient tout de même possibles dans des conditions oxydantes.

3.2.2. L'aluminium (Al)

Norme : Si la concentration dépasse 0.2 mg/l, cette eau brute (avant traitement) devra être traitée. La concentration maximale admissible des eaux destinées à la consommation humaine est de 0.05 mg/l.

L'aluminium n'a pas été retrouvé en saison sèche 2006 sur les mêmes points qu'en saison des pluies 2005.

Lors de la saison sèche 2006, 5 points présentent une concentration en aluminium supérieure à la limite de quantification. On y retrouve 4 forages (François - Grand Fond (n°38), Robert - Pontalery (n°39), Trinité - Le Galion (n°40) et Gros Morne - La Borelli (n°24)), ainsi que la source de St Joseph - Cœur Bouliki (n°32).

Un seul point enregistre une concentration supérieure à la norme : François - Grand Fond (n°38, 420 µg/l). On peut noter que la concentration en aluminium du point de François - Grand Fond (n°38) a quasiment été multipliée par 10 entre les deux campagnes de prélèvements.

L'aluminium, entrant dans la composition des feldspaths, feldspathoïdes, des micas et des amphiboles, en se substituant au fer et au silicium, est relativement abondant dans les roches ignées. Au cours de l'altération de ces roches, l'aluminium se concentre dans les phases solides néoformées : gibbsite $[Al(OH)_3]$. C'est dans les argiles que l'aluminium est le plus présent.

Une étude, menée en 1997 (BRGM R 39359 ANT 97 : Caractérisation des excès d'aluminium dans les eaux superficielles de la Martinique) a montré que les teneurs en aluminium dans les eaux superficielles se caractérisaient par une grande variabilité dans l'espace et dans le temps, avec des dépassements caractérisés par des pics brutaux. Les teneurs seraient liées à la turbidité de l'eau, et aurait pour origine les produits d'altération pédoclimatique facilement mobilisables du substratum volcanique.

Une autre étude, menée en 2001 (BRGM/RP-50991-FR : teneurs naturelles en aluminium des eaux brutes de Guyane.) a montré que les teneurs en aluminium dans l'eau sont aussi liées au mode de filtration.

Si la teneur en aluminium est liée à la turbidité (l'aluminium étant lié aux colloïdes), elle-même liée à la pluviométrie, on pourrait en déduire une augmentation des teneurs en aluminium pendant la saison des pluies.

3.2.3. L'arsenic (As)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 5 µg/l. Au dessus de 100 µg/l, cette eau est inapte à la production d'eau potable.

L'arsenic a été retrouvé sur 4 sites, dont 3 avec des valeurs au dessus de la norme : Marigot - Anse Charpentier (n°3, 25 µg/l), Schœlcher - Fond Lahaye (n°4, 14 µg/l), Robert - Pontalery (n°39, 11 µg/l) et Bellefontaine - Fond Laillet (n°43, 10 µg/l).

Le point du Marigot - Anse Charpentier, qui indiquait en janvier 2004 une teneur en Arsenic de 30 µg/l, présente en saison sèche 2006 une concentration proche (25 µg/l).

L'arsenic est présent naturellement dans tous les milieux qui constituent l'environnement. Il est généralement rencontré sous la forme de composés de soufre et de nombreux métaux (cuivre, cobalt, plomb, zinc, 245 minerais au total) et a déjà été retrouvé dans des roches volcaniques (Massif Central, Vosges). L'arsenic est relativement concentré dans les verres volcaniques, les minéraux silicatés et les roches ignées contenant du fer ferrique. Il peut également être adsorbé sur les argiles, dans les marnes et être associé à de la matière organique ou à de la pyrite. Dans l'eau, il se présente sous forme inorganique (arséniate et arsénite) ; de plus, les conditions d'oxydo-réduction interviennent dans le contrôle de la mobilité de l'arsenic.. Il est présent dans l'eau de mer à environ 20 µg/l.

3.2.4. Le Bore (B)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 50 µg/l. Au dessous de 1000 µg/l, cette eau reste de qualité acceptable pour être consommée, mais peut faire l'objet d'un traitement.

Le Bore a été déterminé sur les 34 point suivis, mais aussi dans l'eau de pluie (25 µg/l) avec une gamme de concentration qui varie entre 17 et 562 µg/l. Il est à noter que 16 points présentent une concentration supérieure à 50 µg/l (c.f. annexe 1).

Le bore est un élément présent naturellement dans l'environnement, mais les rejets de bore dus aux activités humaines demeurent fortement liés aux rejets d'eaux usées, notamment domestiques (le borate de sodium est présent dans les détergents). Un traitement par osmose inverse permettrait de réduire d'environ un tiers les teneurs en bore dans l'eau.

L'exploitation des données de 17400 concentrations de bore sur 6400 eaux souterraines (Italie, Chypre, Grèce, Gaza) synthétisées dans le cadre du projet BOREMED (European Union, 5th Framework Program, contract EVK1-CT-2000-00046) a mis en évidence que 30% des valeurs sont inférieures à 300 µg/l, 23% inférieures à 500 µg/l et 14% inférieures à la limite fixée par la Directive EU des eaux potables (1 000 µg/l).

La plupart des anomalies en bore est liée aux spécificités de l'environnement géologique et à la nature lithologique des aquifères. Une des principales conclusions de ce projet est la mise en évidence d'une origine naturelle géogénique (via les interactions eau-roche) pour les teneurs élevées en bore des aquifères étudiés.

Toutefois la grande variabilité vers des teneurs fortes n'exclut pas une pollution (lessives, engrais). Là tout particulièrement, l'utilisation des isotopes du bore pourrait amener de plus amples informations sur l'origine et la variabilité de cet élément.

3.2.5. Le Baryum (Ba)

Norme : La valeur guide de 100 µg/l est indiquée pour les eaux de surface destinée à l'alimentation en eau potable, si le traitement est minimal. Le décret français 2001 - 1220 du 20/12/2001 s'accorde avec les recommandations de l'OMS et fixe une concentration maximale de 700 µg/l.

16 des prélèvements effectués lors de la saison sèche 2006 présentent une concentration supérieure à la limite de quantification (5 µg/l). L'eau de pluie qui indiquait une concentration de 8 µg/l en saison des pluies 2005 présente en saison sèche 2006 une concentration inférieure à la limite de quantification. Les concentrations varient de 5 à 52 µg/l. Les concentrations les plus importantes ont été mesurées dans les eaux des piézomètres du François - Grand Fond (n°38, 52 µg/l) et du Robert - Pontalery (n°39, 51 µg/l). Ces 2 points qui avaient en saison des pluies 2005 une concentration supérieure à 100 µg/l ont vu leur concentration en baryum divisé par 4 entre les deux campagnes de prélèvement.

Le baryum est relativement important dans les roches ignées, et l'est un peu moins dans les roches sédimentaires. Le principal minéral contenant du baryum est la barytine BaSO₄. Il peut également entrer dans la composition de feldspaths. La présence de barytine, quelle que soit la lithologie de l'aquifère, peut être un élément favorable à l'occurrence de baryum dans les eaux souterraines, bien que ce minéral ne soit que peu soluble (adsorption possible sur des oxydes de manganèse).

3.2.6. Le Béryllium (Be)

Aucun des points suivis lors de la campagne de prélèvements en saison sèche 2006 n'indique une concentration supérieure à la limite de quantification (5 µg/l).

3.2.7. Le Cadmium (Cd)

Aucun des points suivis lors de la campagne de prélèvements en saison sèche 2006 n'indique une concentration supérieure à la limite de quantification (2 µg/l).

3.2.8. Le Cobalt (Co)

Aucun des points suivis lors de la campagne de prélèvements en saison sèche 2006 n'indique une concentration supérieure à la limite de quantification (2 µg/l).

3.2.9. Le Chrome (Cr)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 25 µg/l. Au dessous de 50 µg/l, cette eau reste de qualité acceptable pour être consommée, mais peut faire l'objet d'un traitement.

3 points suivis en saison sèche 2006 présentent une concentration supérieure à la limite de quantification (5 µg/l). Ils correspondent à 3 des forages réalisés fin 2005 (François - Grand Fond (n°38), Robert - Pontalery (n°39) et Trinité - le Galion (n°40)). Parmi ces derniers, les piézomètres du François - Grand Fond et du Robert - Pontalery qui avaient en saison des pluies 2005 des concentrations en Cr supérieures à 50 µg/l présentent en saison sèche 2006 des concentrations inférieures à 25 µg/l.

Un contexte volcanique ou intrusif semble être le plus favorable à l'existence de concentrations en chrome significatives (Robertson, 1991). Le temps de résidence semble également jouer un rôle important ; les eaux les plus vieilles étant les plus concentrées. De plus, un pH alcalin et un milieu oxygéné favorise la mise en solution du chrome. Enfin, certains auteurs comme Roberston (1991) ont remarqué une corrélation entre le chrome hexavalent et le fluor, cette relation serait indirecte et proviendrait d'une influence commune du pH.

C'est ce qui est observé ici pour les 3 forages du François - Grand Fond, Robert - Pontalery et Trinité - Le Galion. Ces eaux à pH alcalins, sont décrites dans un paragraphe particulier (cf. §3.7).

3.2.10. Le Cuivre (Cu)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 100 µg/l. Au dessous de 200 µg/l, cette eau reste de qualité acceptable pour être consommée, mais peut faire l'objet d'un traitement.

10 points suivis en saison sèche 2006 présentent une concentration supérieure à la limite de quantification (2 µg/l). Les concentrations varient de 2 à 560 µg/l (c.f. : Annexe 1). La concentration la plus importante correspond au piézomètre de Basse Pointe - Rivière Falaise (n°27), puis vient celle du forage exploité de Gros Morne - Vert Pré (n°19) avec 8 µg/l.

Le cuivre est référencé comme un élément indésirable, mais sa toxicité n'est pas certaine. L'environnement géologique peut être une source de cuivre, surtout dans le cas d'eaux acides et en présence, en profondeur, de sulfures de cuivre plus ou moins oxydés. Mais généralement les caractéristiques chimiques du cuivre (pH, Eh, solubilité des minéraux, coprécipitation) n'autorisent pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Celles-ci ne dépassent pas habituellement 1 µg/l.

3.2.11. Le Lithium (Li)

8 points suivis en saison sèche 2006 présentent une concentration supérieure à la limite de quantification (10 µg/l). Les concentrations varient de 11 à 37 µg/l (c.f. Annexe 1). Les valeurs les plus importantes ont été retrouvées pour les piézomètres de Trois Ilets - Vatable (n°28, 37 µg/l) et de Marigot - Anse Charpentier (n°3, 30 µg/l).

3.2.12. Le Nickel (Ni)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 10 µg/l. Au dessus de 20 µg/l, l'eau n'est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation.

Le Nickel a été détecté sur 3 points lors de la saison sèche 2006, avec une limite de quantification de 5 µg/l. Les concentrations varient de 6 à 8 µg/l. Les piézomètres de Ste Luce - Stade Communale (n°29, 8 µg/l), de Schœlcher - Fond Lahaye (n°4, 8 µg/l) et de Schœlcher- Case Navire (n°5, 6 µg/l) présentent tous les trois des valeurs inférieures à la norme.

Le nickel est un allergène connu depuis longtemps. Il agit principalement par voie cutanée et par ingestion d'aliments et d'eau de boisson. Il existe d'autres effets du nickel, en particulier suite à une exposition par voie respiratoire. Son inhalation peut provoquer de l'asthme et est, à forte dose, cancérigène.

Dans les eaux souterraines, la principale source de nickel est l'oxydation de la pyrite contenant du nickel substitué au fer. Les concentrations en nickel sont généralement inférieures à quelques µg/l, même pour des eaux issues de milieux potentiellement riches en nickel comme les basaltes à olivine.

3.2.13. Le Plomb (Pb)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 5 µg/l. Au dessus de 10 µg/l, l'eau n'est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation.

6 des points suivis lors de la campagne de prélèvements en saison sèche 2006 indiquent une concentration supérieure à la limite de quantification (2 µg/l). Parmi ces derniers, le point de Gros Morne - La Borelli (n°24, 12 µg/l) dépasse la norme des 10 µg/l et 4 autres ont une concentration supérieure ou égale à 5 µg/l.

Dans les eaux souterraines, des concentrations en plomb d'origine naturelle supérieures au seuil analytiques sont très rares, même si le contexte géologique en est riche. Similairement au bore, une approche isotopique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) permettrait de mieux contraindre l'origine du plomb dans les eaux (Négre et al., 2006)

3.2.14. Le Strontium (Sr)

Norme : Le strontium n'est source d'aucune contrainte pour les eaux destinées à la consommation humaine. C'est pourquoi, aucun texte réglementaire ne fixe de concentration maximale admissible.

Le strontium a été retrouvé dans 33 des points suivis en saison sèche 2006, mais pas dans l'eau de pluie contrairement à la campagne en saison des pluies 2005. Le piézomètre du Lamentin - Sarault (n°16) indique comme en saison des pluies 2005 une concentration inférieure à la limite de quantification (10 µg/l). Les concentrations varient entre 10 et 673 µg/l (c.f. Annexe 1). La valeur la plus importante correspond au piézomètre de Marin – Grand Fond (n°9).

Chimiquement le strontium s'apparente au calcium auquel il se substitue dans les roches ignées comme dans les carbonates.

Les milieux sédimentaires semblent être les contextes les plus favorables à l'occurrence de strontium dans l'eau, notamment les niveaux évaporitiques, riches en célestine SrSO_4 . Les filons hydrothermaux, dans lesquels la strontianite SrCO_3 est abondante, peuvent être des milieux privilégiés pour trouver du strontium.

3.2.15. Le Zinc (Zn)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 100 µg/l. Au dessus de 5000 µg/l, l'eau n'est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation.

Le zinc a été retrouvé dans 22 des points suivis en saison sèche 2006, ainsi que dans l'eau de pluie (44 µg/l). Les 7 sources analysées et 5 piézomètres indiquent une concentration inférieure à la limite de quantification (5 µg/l).

Les concentrations varient entre 5 et 114 µg/l (c.f. Annexe 1). La valeur la plus importante correspond au piézomètre de Trois Ilets – Vatable (n°28), c'est aussi la seule concentration supérieure à 100 µg/l.

3.2.16. Le Fer (Fe)

Norme : la concentration en Fer, pour une eau destinée à la consommation humaine, ne doit pas dépasser 0.2 mg/l (0.05 mg/l pour une eau de qualité optimale pour être consommée). Une valeur d'expert (c.f. SEQ eau souterraine) fixe à 10 mg/l, la concentration maximale au delà de laquelle on ne peut plus utiliser les procédés usuels de traitement de déferrisation.

Le fer a été retrouvé dans 10 des points suivis en saison sèche 2006. 9 piézomètres et un forage exploité indiquent une concentration supérieure à la limite de quantification (0.02 mg/l).

Les concentrations varient entre 0.02 et 2.9 mg/l (c.f. Annexe 1). Les valeurs les plus importantes correspondent aux piézomètres de Marigot - Anse Charpentier (n°3, 2.92 mg/l) et de Rivière Pilote - La Mauny (n°36, 1.95 mg/l). Ces fortes valeurs sont probablement liées à l'état d'oxydoréduction de l'eau. En effet, leur potentiel d'oxydoréduction (Eh) est faible pour ces points et leur taux d'oxygène dissous est aussi un des plus faibles. Par ailleurs, parmi ces 10 points, 3 d'entre eux présentent une concentration supérieure ou égale à 0.2 mg/l, et 4 autres une concentration supérieure à 0.05 mg/l.

Le fer est un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre. Il est naturellement présent dans les eaux souterraines. Généralement une forte valeur en fer donne un des indices sur la captivité de la nappe. Le fer est un oligo-élément indispensable à la santé humaine. Des concentrations en fer, même élevées, ne constituent pas de risque pour la santé humaine. Plusieurs techniques d'élimination existent.

3.2.17. Le Manganèse (Mn)

Norme : la concentration en manganèse ne doit pas dépasser, pour une eau destinée à la consommation humaine, les 50 µg/l. (20 µg/l pour une eau de qualité optimale pour être consommée). Une valeur d'expert (c.f. SEQ eau souterraine) fixe à 1000 µg/l la concentration maximale au-delà de laquelle l'eau est inapte à la production d'eau potable.

Le manganèse est associé au fer dans les eaux souterraines de Martinique. On le retrouve généralement dans les mêmes piézomètres que ceux où l'on a trouvé du fer.

Le manganèse a été retrouvé dans 16 des points suivis en saison sèche 2006. L'eau de pluie indique une concentration égale à la limite de quantification (5 µg/l).

Les concentrations varient entre 5 et 1115 µg/l (c.f. : Annexe 1). La valeur la plus importante correspond au piézomètre du Gros Morne - La Borelli (n°24). Par ailleurs, parmi ces 16 points, 1 présente une concentration supérieure ou égale à 1000 µg/l, 6 autres une concentration supérieure à 50 µg/l et 3 autres une concentration supérieure à 20 µg/l.

Le manganèse est lui aussi présent, mais en quantité moindre, dans les roches, et on le retrouve aussi dans les eaux souterraines, là aussi en quantité moindre au fer. Sa présence dans les eaux souterraines, ainsi que celle du fer, est liée à la géologie de l'aquifère.

Remarque : Les piézomètres de Schoelcher - Case Navire (n°5) et de Gros Morne - La Borelli (n°24) qui indiquaient des valeurs proches de 1000 µg/l pour les saisons des pluies 2004 et 2005 ont des comportements différents vis-à-vis du manganèse lors de la saison sèche 2006. Le point de Gros Morne - La Borelli (n°24) continue à enregistrer en saison sèche 2006 une valeur élevée de Mn (> 1000 µg/l), alors que le point de Schoelcher - Case Navire (n°5) a une teneur en Mn de 7 µg/l.

3.2.18. Corrélation Fer - Manganèse

Le fer et le manganèse ont un comportement assez proche ; l'un peut être considéré comme majeur, le fer, avec des concentrations atteignant plusieurs mg/l et l'autre comme mineur, le manganèse, avec des concentrations plus faibles.

Les mesures effectuées lors des campagnes de prélèvements en saison sèche et saison de pluies 2004 ne permettaient pas de voir un lien entre les concentrations en fer et en manganèse. La concentration en fer la plus élevée n'est pas supportée par une forte concentration en Mn, et inversement.

Néanmoins, en comparant les données des campagnes en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006 (c.f. Illustration 11 et Illustration 12), on remarque une relation entre certains des points suivis.

De plus, ces deux éléments sont sensibles à l'état d'oxydoréduction des eaux. Le potentiel redox (Eh) n'a été déterminé que sur les deux dernières campagnes de prélèvements. Pour l'instant ces données préliminaires ne sont pas suffisantes pour une interprétation précise.

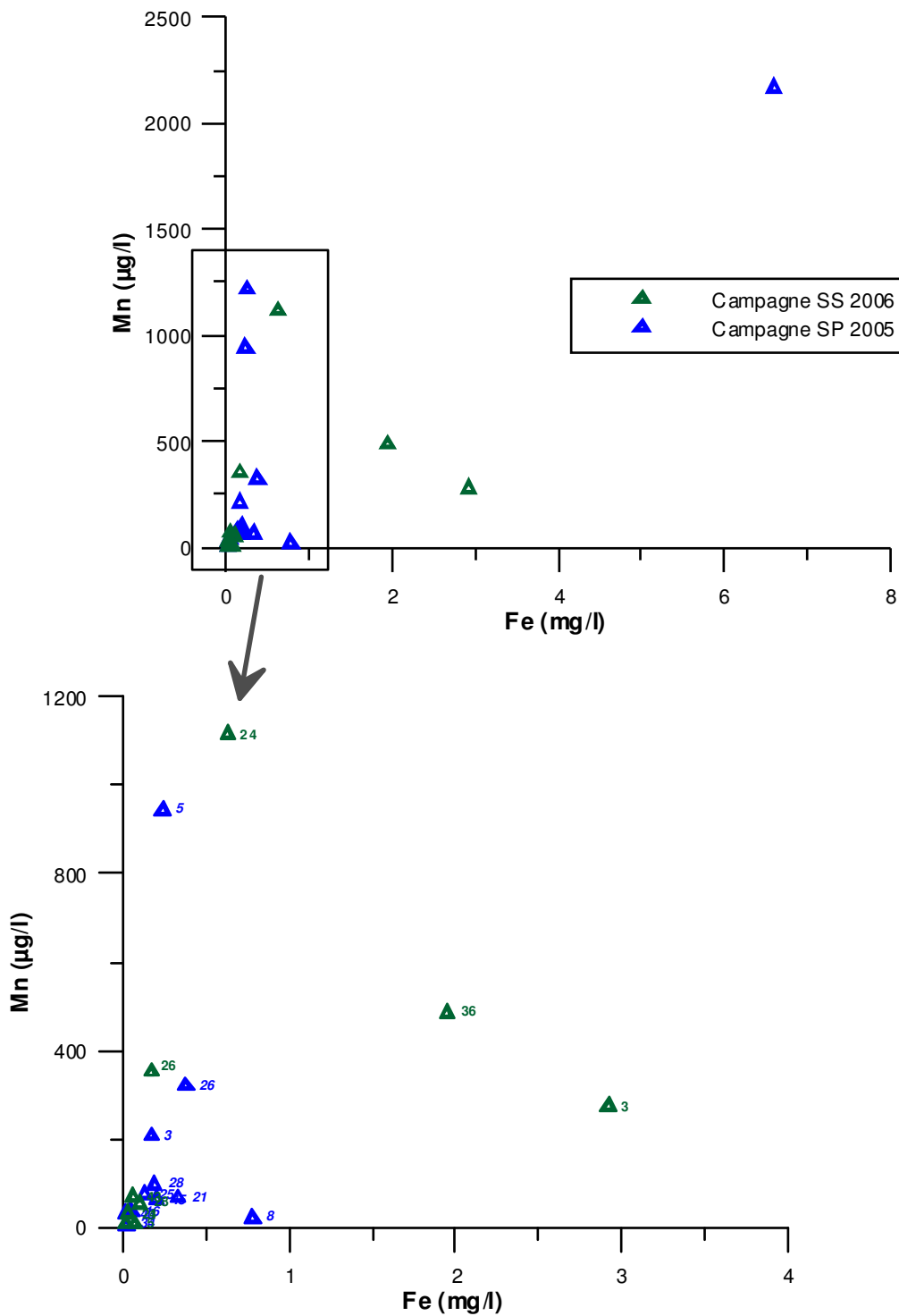


Illustration 11 : Diagramme de la concentration en fer (en mg/l) en fonction de la concentration en manganèse (en µg/l) pour les échantillons des campagnes en saison des pluies (SP)2005 et en saison sèche (SS) 2006, vue globale et vue agrandie.

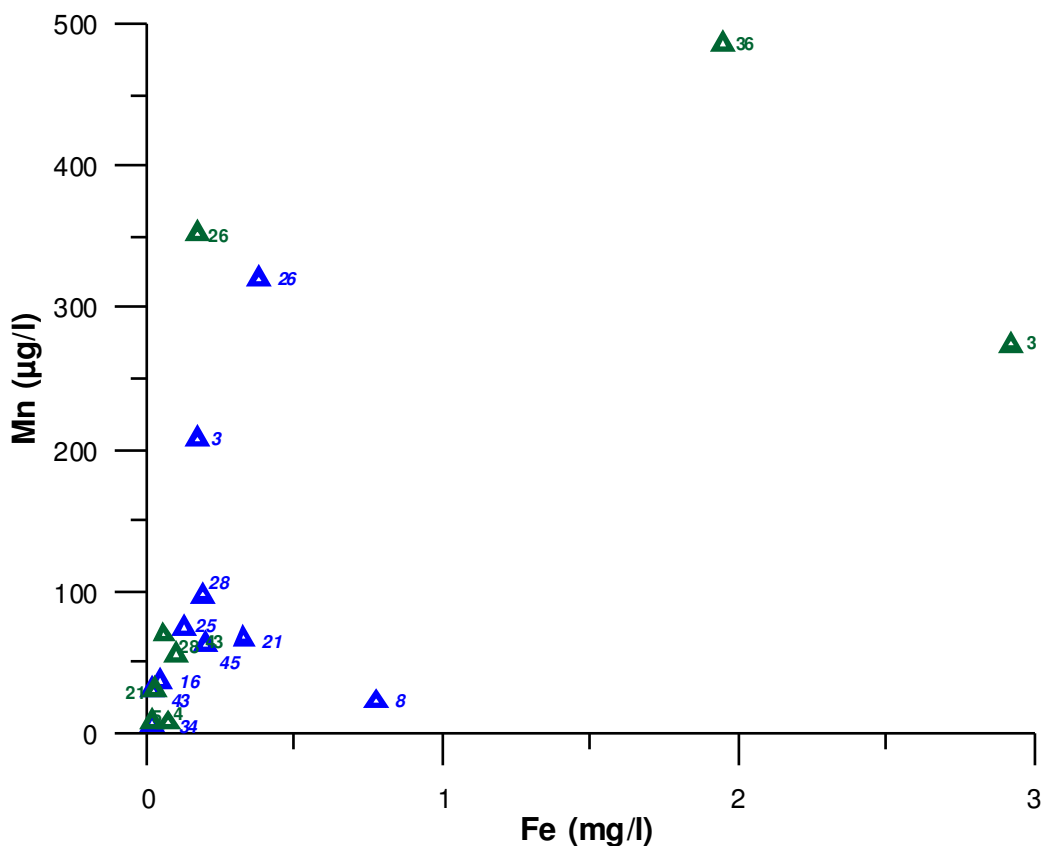


Illustration 12 : Diagramme de la concentration en fer (en mg/l) en fonction de la concentration en manganèse (en µg/l) pour les échantillons des campagnes en saison de pluies (SP) 2005 et en saison sèche (SS) 2006, vue agrandie.

3.3. LES PRODUITS AZOTES ET PHOSPHORES

Les valeurs utilisées comme norme sont fixées par le Décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 et la directive du Conseil de l'Union européenne n° 98/83/CE du 3 novembre 1998.

L'eau d'une nappe ne contient naturellement que peu de composés azotés: ceux-ci, provenant de la décomposition de la matière vivante par les micro-organismes, sont minéralisés en azote gazeux ou restent en faible quantité dans le sol. C'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et produit un excès d'azote qui est finalement entraîné vers la nappe. Cet azote se trouve sous forme de nitrates et d'ammonium.

Le type de nappe et la réactivité de celle-ci, ainsi que la nature géochimique de l'aquifère mais aussi le temps de transit de l'eau dans la nappe jouent un rôle important vis-à-vis des teneurs en produits azotés et phosphorés dans les eaux souterraines. Dans l'état actuel des connaissances, nous ne disposons que de trop peu d'analyses,

à un pas de temps trop espacé, pour proposer une hypothèse valable sur les variations des teneurs en produits azotés et phosphorés dans les eaux.

3.3.1. L'Ammonium (NH₄)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 0.05 mg/l. Au dessus de 0.5 mg/l, l'eau n'est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation. Une eau dépassant les 4 mg/l est inapte à la production d'eau potable.

L'ammonium a été retrouvé sur 8 piézomètres en saison de pluies 2005, ainsi que dans l'eau de pluie (0.3 mg/l) qui indique une concentration supérieure à la limite de quantification (1 mg/l). Les concentrations varient entre 0.1 et 0.5 mg/l.

Les points qui présentaient en saison des pluies 2005 des concentrations supérieures à la norme (0,05 mg/l) enregistrent en saison sèche 2006 des concentrations égales ou légèrement supérieures.

Dans les eaux souterraines, l'ammonium peut être lié à la réduction des nitrates (en association avec le fer). Outre cette origine naturelle, il peut aussi être d'origine agricole (élevage), urbaine (rejets d'effluents) ou industrielle. La présence d'ammonium dans les eaux souterraines provient d'une contamination de surface à partir d'effluents ou d'un phénomène de réduction des nitrates fréquent dans les nappes captives et nous donne un indice sur la pollution organique. Elle peut également donner un indice sur une éventuelle pollution microbiologique.

L'excès d'ammonium peut modifier le goût de l'eau (présence de chloramines) ou provoquer la prolifération de bactéries nitrifiantes dans les réseaux de distribution.

3.3.2. Les Nitrates (NO₃)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 0.25 mg/l. Au dessus de 50 mg/l, l'eau n'est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation.

Les nitrates ont été retrouvés dans 27 des points suivis en saison sèche 2006, dont l'eau de pluie (0.6 mg/l) qui indique une concentration légèrement supérieure à la limite de quantification (0.5 mg/l).

Les concentrations varient entre 0.6 et 47 mg/l (c.f. Annexe 1). Les valeurs les plus importantes correspondent à des piézomètres du nord - atlantique de l'île, dont deux sont situés sur la commune de Basse Pointe : Basse Pointe - Chalvet (n° 42, 47 mg/l), Basse Pointe - Rivière Falaise (n°27, 36.6 mg/l) et Lorrain - Fond Brulé (n°45, 35.5 mg/l). Ces trois valeurs sont équivalentes à celles mesurées en saison des pluies 2005, bien que légèrement plus faibles. Tous les autres points présentent des concentrations inférieures à 0.5 mg/l.

Les nitrates sont des sels très solubles qui sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration. Leur origine est principalement agricole, la pollution engendrée est diffuse et est le résultat d'un excès de matières organiques végétales en décomposition sur et dans le sol après la récolte, après un déboisement, un épandage d'engrais azotés en quantité supérieure aux besoins des plantes cultivées: engrais chimiques (nitrates de potasse, scories, ...) et engrais organiques (fumier, lisier, boues de stations d'épuration...).

L'origine domestique et industrielle est secondaire; la pollution engendrée est plus ponctuelle (assainissement défectueux par exemple). La pollution de l'eau des nappes par les nitrates est malheureusement un phénomène généralisé. Elle atteint la quasi-totalité des nappes libres en France (c.f. L'état des eaux souterraines en France : aspects qualitatifs et quantitatifs, collection Etudes et Travaux n°43, Editions Ifen, 35 p. (téléchargeable <http://www.ifen.fr/publications/ET/et43.htm>).

3.3.3. Les Nitrites (NO₂)

Norme : Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 0.05 mg/l. Au dessus de 0.1 mg/l, l'eau n'est plus potable et nécessite un traitement de potabilisation. Une eau dépassant les 0.7 mg/l est inapte à la production d'eau potable.

Les nitrites ont été retrouvés dans 15 des points suivis en saison sèche 2006. Tous les autres points suivis, ainsi que l'eau de pluie indiquent une concentration inférieure à la limite de quantification (0.01 mg/l).

Les concentrations varient entre 0.01 et 1.64 mg/l (c.f. Annexe 1). Les valeurs les plus importantes correspondent au piézomètre du Robert - Pontalery (n°39, 1.64 mg/l). et du forage exploité de François - La Victoire (n°33, 0.1 mg/l). Tous autres points présentent des concentrations inférieures à 0.05 mg/l.

Les nitrites sont une espèce instable et en conséquence, rarement présents dans les eaux souterraines. Dans ce cas, ils sont issus d'une pollution de surface proche. Ils sont donc un bon indice de contamination organique et bactériologique. En excès dans les eaux de consommation, les nitrites sont susceptibles dans de rares cas de provoquer une méthémoglobinémie chez les nourrissons. En nappes profondes, ou captives, les nitrites se transforment en ammonium.

En saison de pluies, les nitrites sont normalement beaucoup moins présents qu'en saison sèche. On peut penser que la dilution par la pluviométrie joue un rôle. Les analyses doivent cependant être pérennisées pour confirmer cette hypothèse, d'autant plus qu'aucune tendance ne s'est dégagée pour les nitrates.

Les produits azotés et les nappes captives : la transformation des nitrates en nitrites et ammonium est un indice supplémentaire pour définir le type de nappe. Ainsi les nappes où l'on a détecté ces 3 produits ont une forte propension à être captives. Ces indices doivent ensuite être corrélés avec les connaissances hydrogéologiques disponibles (suivi piézométrique, coupe de forages, paramètres hydrodynamiques...).

3.3.4. Les Orthophosphates (PO4)

Norme : la concentration maximale admissible des eaux destinées à la consommation est de 5 mg/l.

Les orthophosphates ont été retrouvés dans 17 des points suivis en saison sèche 2006. Tous les autres points suivis, ainsi que l'eau de pluie indiquent une concentration inférieure à la limite de quantification (0.1 mg/l).

Les concentrations varient entre 0.1 et 0.6 mg/l (c.f. Annexe 1). La valeur la plus importante correspond aux piézomètres ST Pierre – Rivière Blanche (n°1) et de Ste Luce – Stade communal (n°29).

Les orthophosphates sont connus pour provenir des lessives.

3.4. LES ELEMENTS MAJEURS

3.4.1. Caractère chimique des eaux

Les eaux des forages du François - Grand Fond (n°38) et Trinité - Le Galion (n°40), ayant des caractéristiques trop différentes, ne seront pas étudiées avec l'ensemble des points suivis lors de la saison de pluies 2005. Ces points font l'objet d'une description séparée (§ 3.9).

Dans les eaux étudiées, les sommes des cations (Σ^+) et des anions (Σ^-) analysés ont été calculées en $\mu\text{eq/l}$. Reportée dans un diagramme somme des anions Σ^- en fonction de la somme des cations Σ^+ (Illustration 13), la totalité des échantillons présente un équilibre des charges en se positionnant sur la droite 1 : 1.

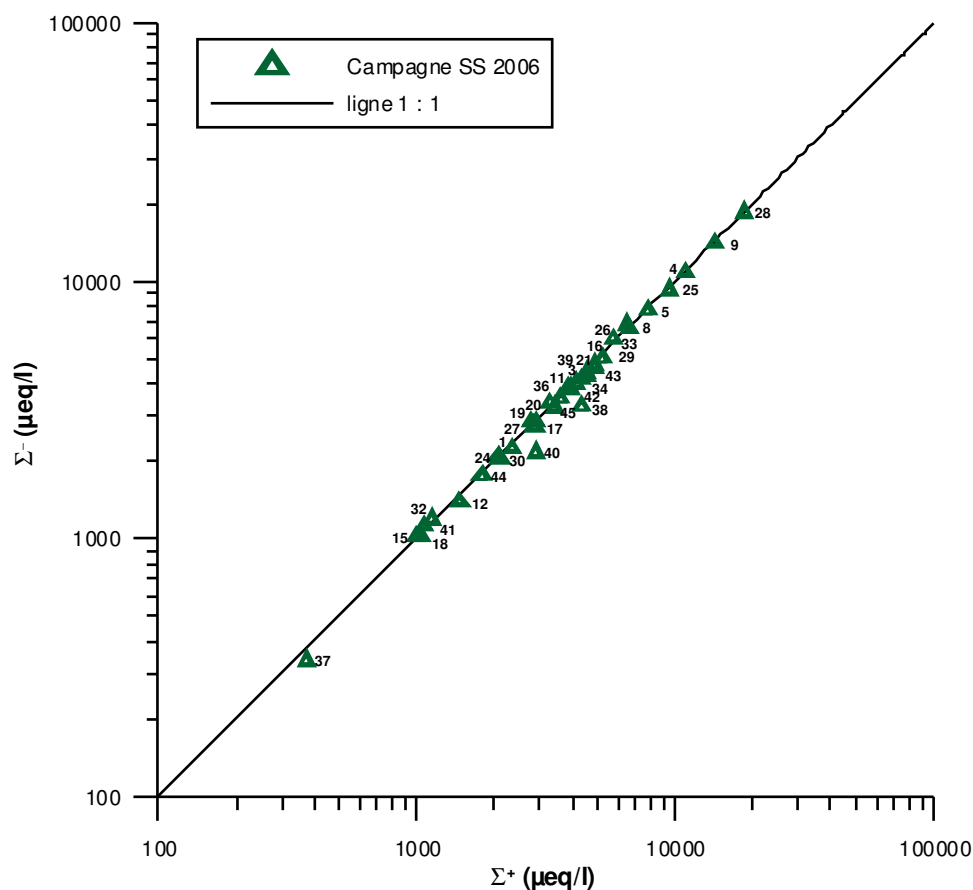


Illustration 13 : Diagramme somme des anions Σ^- en fonction des cations Σ^+ pour les points de la campagne en saison sèche 2006.

La somme des cations (Σ^+) et des anions (Σ^-) calculée en $\mu\text{eq/l}$ permet de calculer la balance ionique (NICB pour Normalized Inorganic Charge Balance) selon la formule :

$$NICB = \left[\frac{\Sigma^+ - \Sigma^-}{\Sigma^+ + \Sigma^-} \right] * 100$$

La balance ionique (différence entre les charges positives et négatives) permet de définir les analyses chimiques correctes ; une balance ionique < 0 traduit un excès d'anions, et une balance ionique > 0 traduit un excès de cations. En règle générale, on considère que la balance ionique est excellente entre $- 1 \%$ et $+ 1 \%$ et qu'elle est acceptable entre $- 5 \%$ et $+ 5 \%$. C'est cette valeur de l'ordre $\pm 5 \%$ qui sera retenue. La balance ionique est un élément permettant de contrôler la qualité des analyses uniquement pour les éléments majeurs.

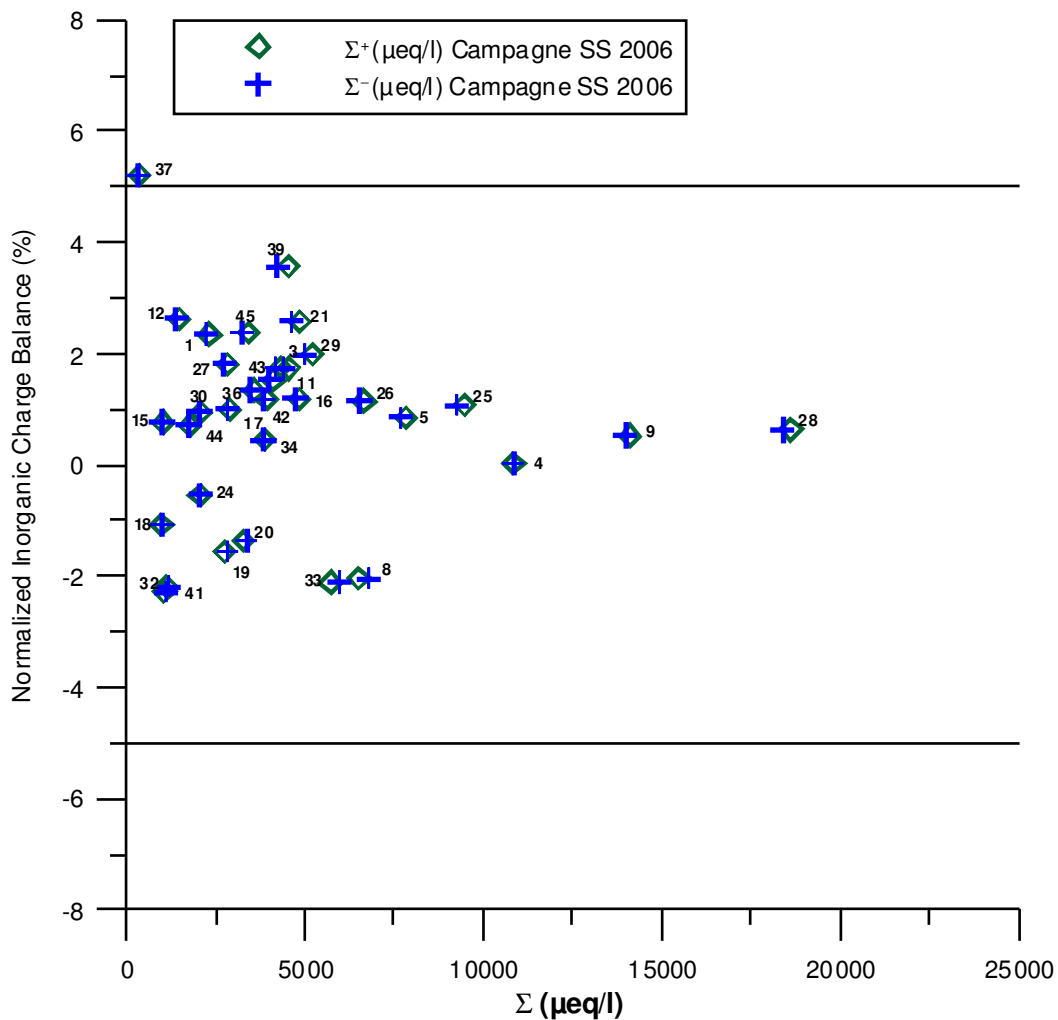


Illustration 14 : Balance ionique en fonction des sommes en cations et anions des analyses de la campagne en saison sèche 2006.

L'illustration 14 représentant la relation entre la balance ionique (NICB) et les sommes des cations (Σ^+) et anions (Σ^-) met en évidence que la totalité des points analysés de la campagne en saison des pluies 2005 ont une balance ionique comprise entre +5 % et -5 % (de 0,03 à 3.56 en valeur absolue).

Seule l'eau de pluie (n°37) a une balance ionique légèrement supérieure à 5 % (5,21 %). Les mauvaises balances ioniques dans les eaux de pluies sont un phénomène connu et fréquemment décrit dans la littérature.

3.4.2. Les relations inter-éléments : comparaison saison des pluies 2005 – saison sèche 2006

Les chlorures retrouvés dans l'eau de pluie (10.2 mg/l) sont d'origine marine exclusivement (Meybeck, 1986, Berner & Berner, 1987) dans la mesure où aucun affleurement de roches salines de type évaporitique ne peut produire des aérosols continentaux susceptibles d'apporter une contribution en chlorures à la pluie.

De même, l'absence de ce type de dépôt ne permet pas d'apport de chlorures aux eaux, en dehors de celui provenant des apports de pluie. Les chlorures sont donc tout naturellement un élément de référence et il est possible de comparer les autres éléments chimiques à ces derniers.

Diagramme Chlorures – Sodium

Chlorures et sodium sont les deux éléments majeurs de l'eau de mer. La droite dite 'de dilution de l'eau de mer', et correspondant à la pente donnée par [Cl/Na] dans un diagramme Cl vs. Na est fréquemment utilisée pour étudier le comportement de ces deux éléments. Cette utilisation est encore plus remarquable dans les études des eaux continentales sur des zones proches de l'océan (comme c'est le cas ici) car les aérosols marins véhiculés par les vents et les pluies ont des rapports Cl/Na marin. Ces apports constituent le signal d'entrée dans les eaux et la droite de dilution de l'eau de mer permet de caractériser des apports supplémentaires de ces deux éléments.

L'illustration 15 montre la relation entre Na et Cl, la ligne représente la droite de dilution de l'eau de mer. Les échantillons d'eau présentent :

- ⇒ des caractéristiques proches de l'eau de mer pour certains points : 37, 19, 20, 33, 21, 5, 4, 9,
- ⇒ un net enrichissement en Na pour d'autres, cet enrichissement étant à relier aux processus d'interaction eau-roche (les roches volcaniques étant riches en sodium) :
 - 15 : Morne Rouge - Habitation Citron,
 - 18 : Fond Saint Denis - Source de l'Alma
 - 24 : Gros Morne - La Borelli,
 - 12 : St Joseph - La Charmille,
 - 30 : Prêcheur - Rivière Prêcheur,

- 44 : St Pierre - CDST,
- 1 : Saint Pierre – Rivière Blanche,
- 40 : Trinité - Le Galion,
- 3 : Marigot- Anse Charpentier,
- 43 : Belle Fontaine - Fond Laillet,
- 26 : Case Pilote - Maniba,

⇒ un enrichissement en Cl (pouvant être rapproché à des activités anthropogéniques comme par exemple les engrais agricoles) pour le point :

- 36 : Rivière Pilote - La Mauny,

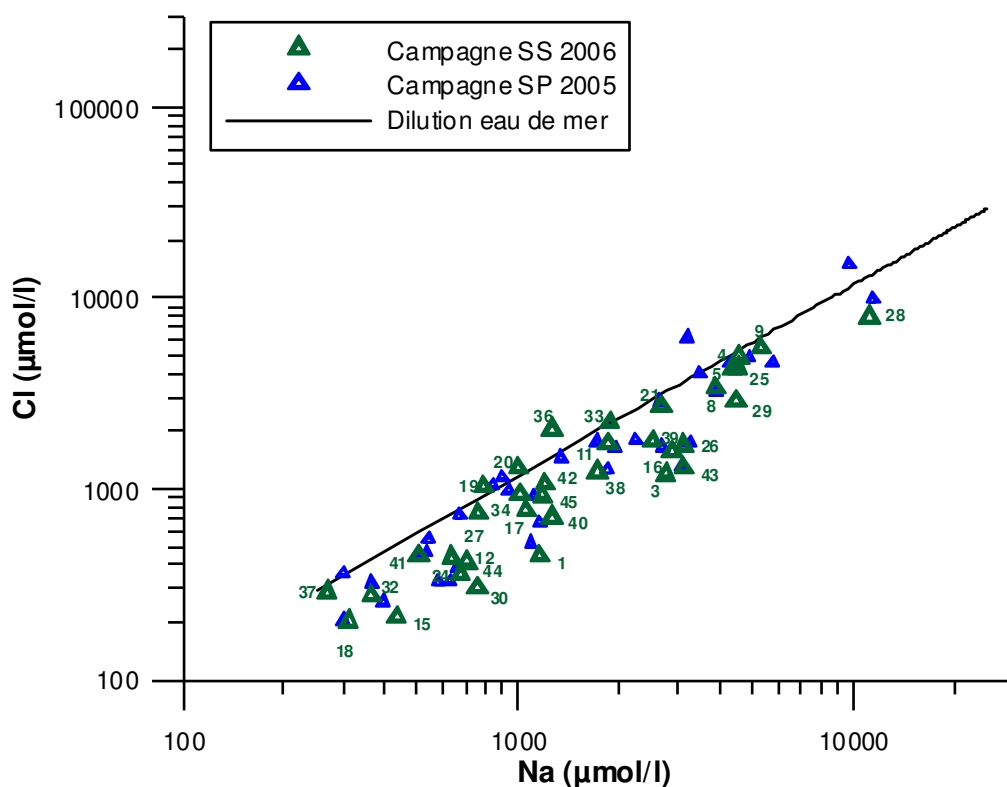


Illustration 15 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en sodium (SS correspond à la saison sèche, SP à la saison des pluies).

⇒ Sur les 35 points en commun lors des deux campagnes en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006, peu de variations sont visibles entre Cl et Na.

L'impact du biseau salé sur la concentration en ces deux éléments n'est pas négligeable : la répartition géographique du sodium montre en effet des concentrations plus importantes pour les points situés près du littoral.

Diagramme Chlorures - Calcium

D'une manière identique, l'illustration 16 montre les relations entre Cl et Ca. **On observe un enrichissement en Ca de toutes les eaux par rapport à l'eau de mer.**

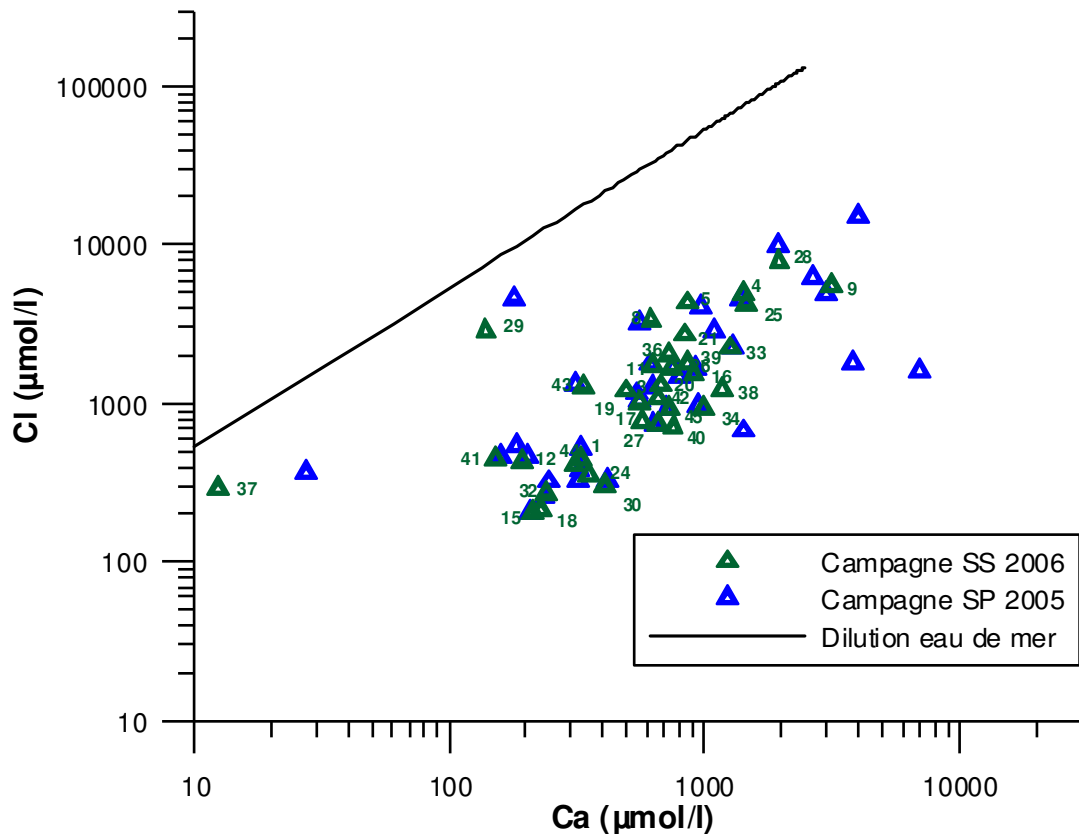


Illustration 16 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en calcium.

Pour expliquer ces concentrations en calcium supérieures à la moyenne marine, un apport d'origine continentale doit donc être envisagé. Ce calcium peut être lié soit à des apports de poussières continentales par les pluies (issues de source(s) locale(s)), soit à une circulation de particules carbonatées plus générale à l'échelle de l'atmosphère (comme l'ont envisagé Négrel et al. 1997), soit à un apport de Ca par l'altération des roches. La présence de rares formations calcaires dans la zone d'étude ne suffit pas à expliquer ces apports supplémentaires en calcium. De plus, lors de la campagne en saison sèche 2006, seul le point 9, traverse des formations calcaires qui peuvent expliquer ses concentrations élevées.

Le point de Trois Ilets - Vatable (n°28) indique lui aussi des concentrations importantes.

Toutefois, l'altération de formations calcaires par les eaux, si elle peut être en faveur des concentrations en Ca, ne peut expliquer les fortes concentrations en Cl relevées

pour ces points. **Une étude plus fine, notamment via les codes de calculs géochimiques doit être menée pour mieux comprendre la chimie des eaux.**

Pour les autres points, l'excès de calcium provient au moins en partie de l'altération des roches volcaniques contenant une forte proportion de Ca.

Diagramme Chlorures - Bore

L'illustration 17 montre les relations entre Cl et B. **On observe un enrichissement en bore de toutes les eaux analysées.** Cet enrichissement est certainement le reflet des interactions eau-roche libérant du bore (Négreil et al., 2002). **Des apports de bore anthropique ne sont cependant pas à exclure.**

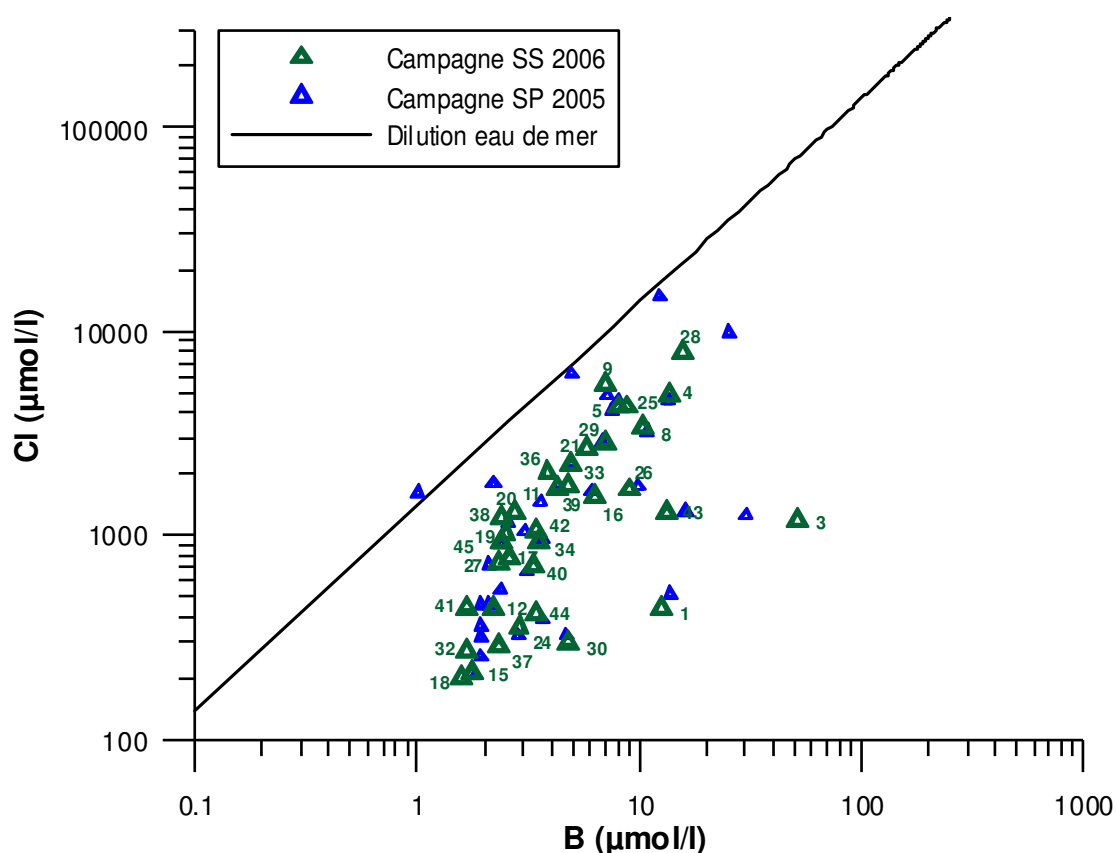


Illustration 17 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en bore.

On note également peu de variations entre les campagnes de prélèvements en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006. Seuls les points, 25, 36 et 38 (respectivement : Anses d'Arlets - Grande Anse, Rivière Pilote - La Mauny, et François - Grand Fond) qui présentaient des teneurs dans les mêmes proportions que l'eau de mer lors de la saison des pluies 2005 ont vu leurs eaux s'enrichir en bore lors de la saison sèche 2006.

Les concentrations en bore observées n'indiquent pas un circuit hydrothermal très profond, qui généralement libère beaucoup de bore. Cependant, l'interaction eau-roche est bien mise en évidence par l'enrichissement en bore dans la plupart des eaux.

Diagramme Chlorures - Magnésium

Contrairement aux éléments chimiques précédents, la comparaison entre Cl et Mg (Illustration 18) montre un **enrichissement en Cl par rapport à Mg** pour toutes les eaux. **Le magnésium est peu amené par les pluies et aérosols marins et semble peu lié avec les interactions eau - roche.**

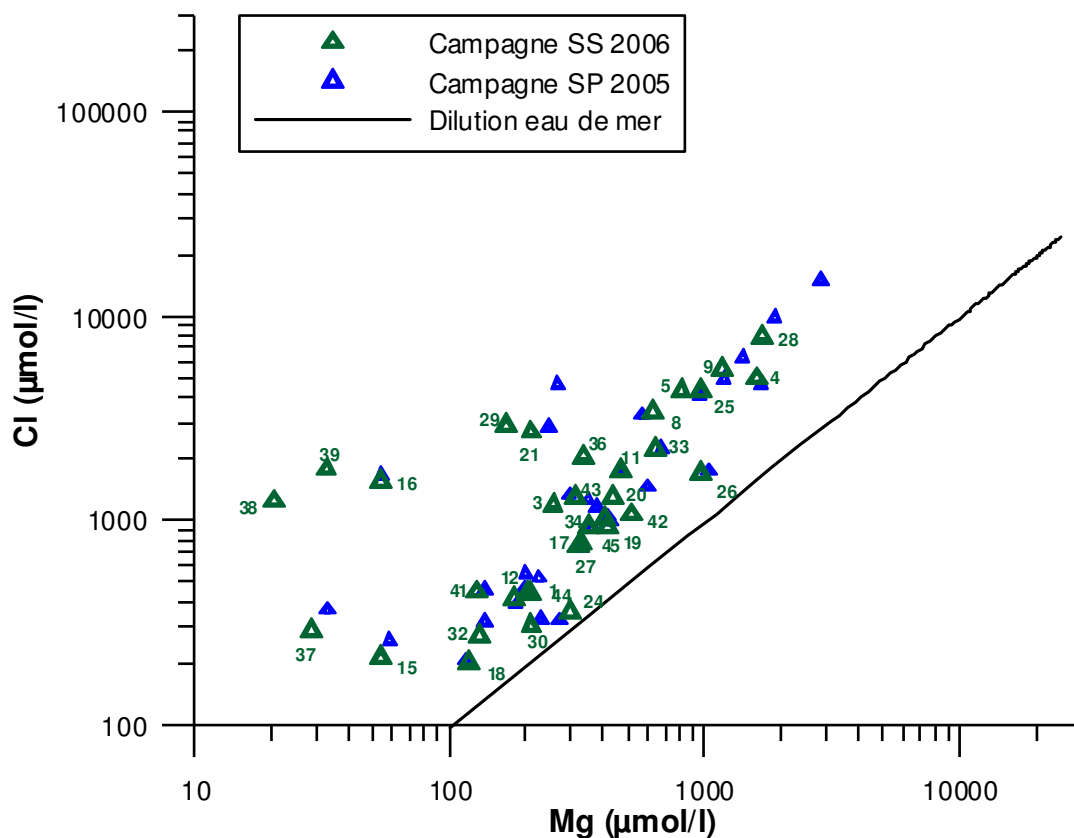


Illustration 18 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en magnésium.

Diagramme Chlorures - Potassium

La relation entre Cl et K est également en faveur de l'enrichissement en Cl (Illustration 19). Le potassium est un élément très contraint par la végétation et sa concentration peut être diminuée dans les eaux par l'effet du « pompage » par la végétation.

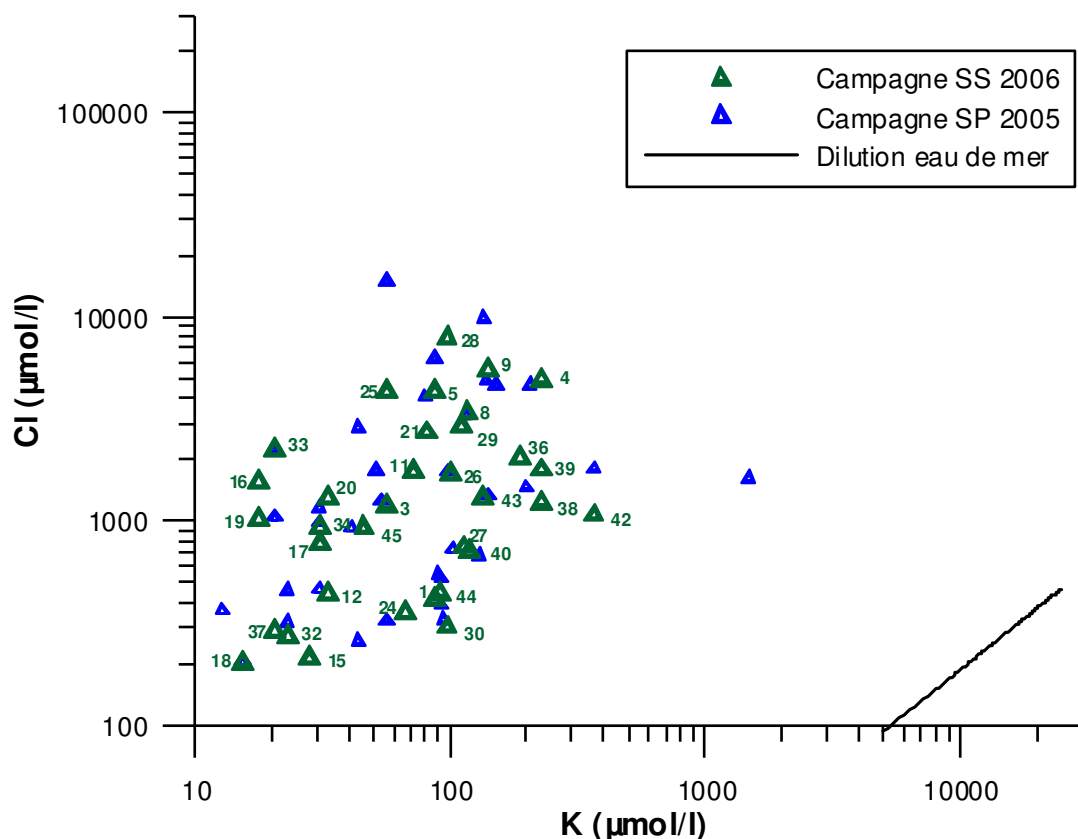


Illustration 19 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en potassium.

Globalement, on constate peu de variations entre la campagne en saison des pluies 2005 et celle en saison sèche 2006, à l'exception des points 38, 39 et 25.

Les points qui étaient dispersés par rapport à l'ensemble des points lors de la saison des pluies 2005 ne le sont plus lors de cette saison sèche 2006. Le point 38 (François - Grand Fond) a vu sa concentration en K nettement baisser entre les 2 campagnes de prélèvements. Il est de même pour le point 39 (Robert - Pontalery) mais dans une moindre mesure. Le point 25 (Anses d'Arlets - Grande Anse) a vu quant à lui sa concentration en Cl nettement baisser entre les 2 campagnes.

Diagramme Chlorures - Sulfates

La relation entre Cl et SO₄ est aussi en faveur de l'enrichissement en Cl pour toutes les eaux, comme le montre l'illustration ci-dessous.

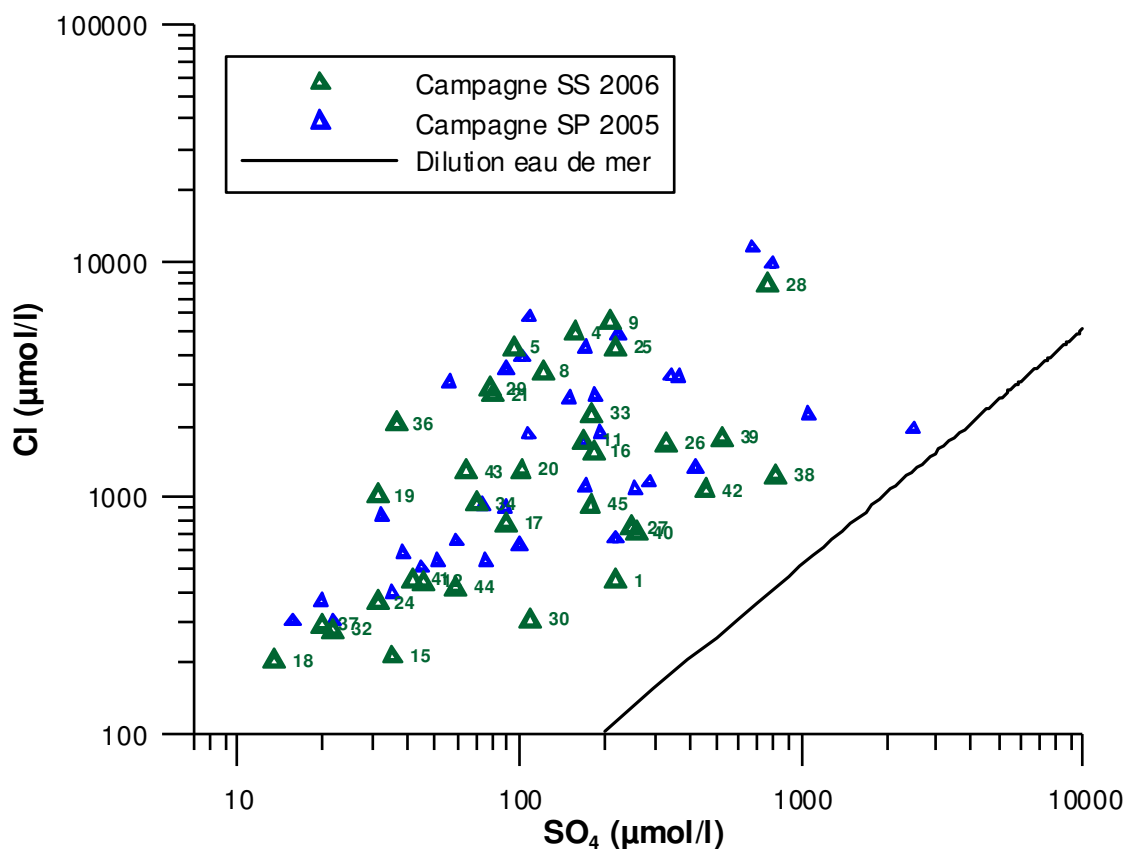


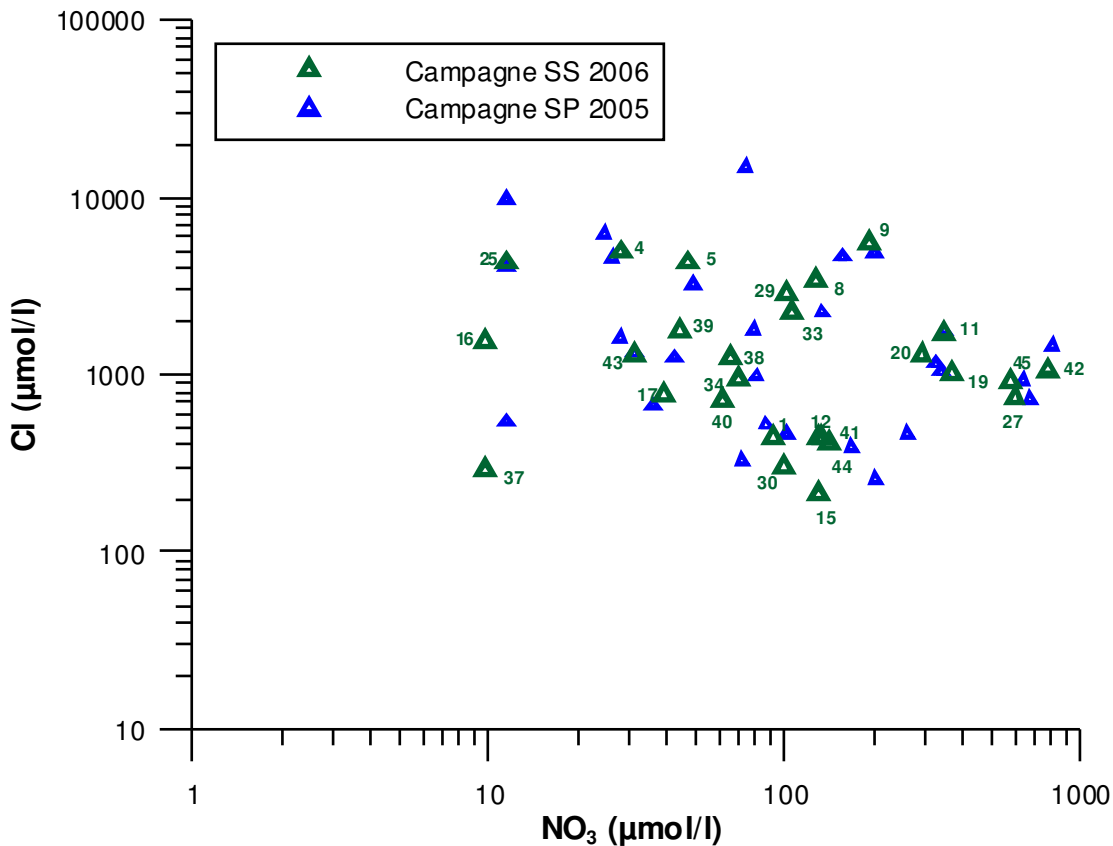
Illustration 20 : Diagramme de la concentration en chlorures en fonction de celle en sulfates.

Globalement, on constate peu de variations entre les campagnes.

Diagramme Chlorures - Nitrates

La comparaison des concentrations en Cl et NO₃ ne montre pas de relation particulière (Illustration 21).

Les plus fortes concentrations en NO₃ ne sont pas particulièrement associées à de fortes concentrations en Cl. Il n'y a pas de reflet particulier des possibles impacts anthropiques sur ces deux éléments.



3.5. COMPARATIF SAISON DES PLUIES 2005 - SAISON SECHE 2006

Lors des campagnes de prélèvements en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006, les mêmes 35 points ont été suivis. Deux jeux de données sont donc disponibles sur les mêmes ouvrages entre les mesures faites pour ces deux campagnes.

Les diagrammes des Illustration 22 et Illustration 23 montrent les variations des anions (NO_3 , Cl , SO_4 , HCO_3) et cations (Na , K , Mg , Ca), tous exprimés en mg/l, pour les deux campagnes.

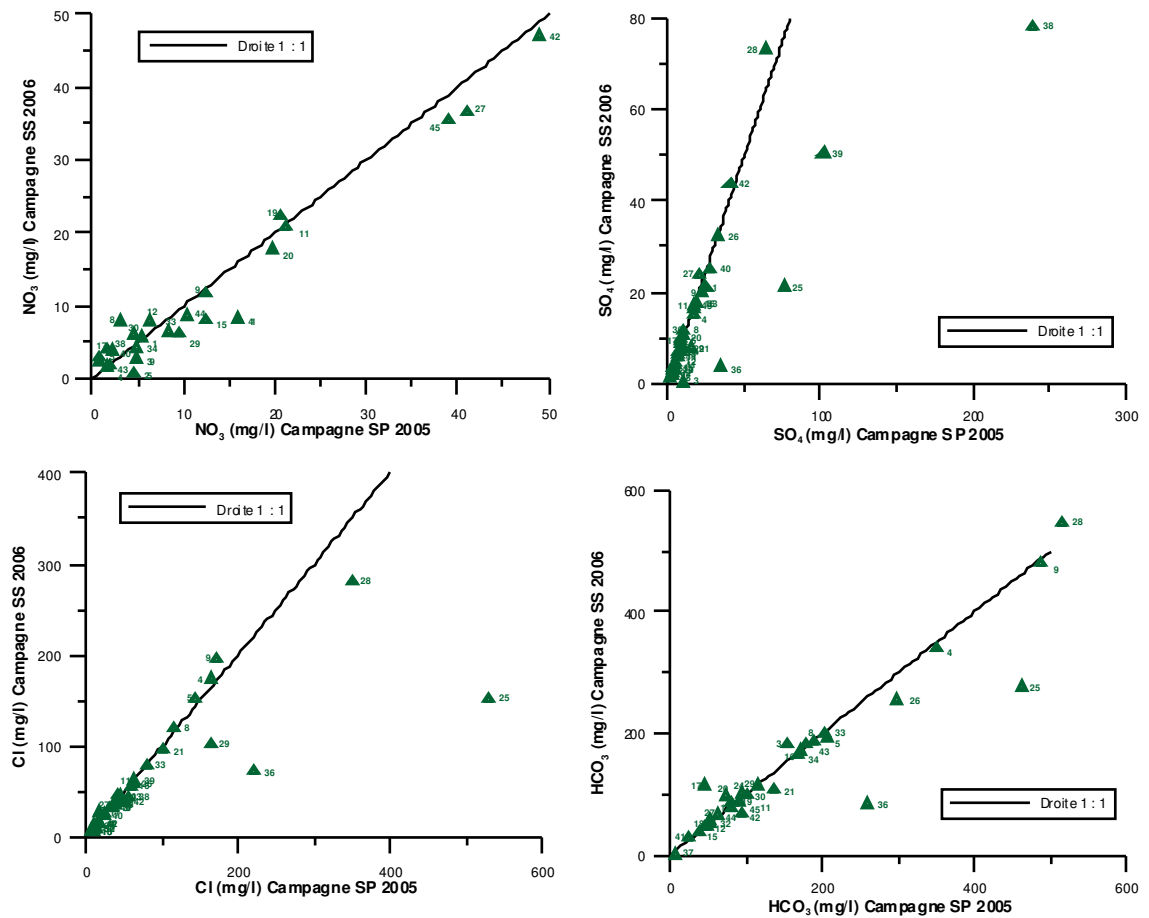


Illustration 22 : Variations des éléments NO_3 , Cl , SO_4 , HCO_3 entre les campagnes en saison des pluies (SP) 2005 et en saison sèche (SS) 2006.

La droite 1 : 1 représente un état de concentration identique : les points situés sur cette droite n'ont pas eu de variation de concentration significative entre les deux campagnes.

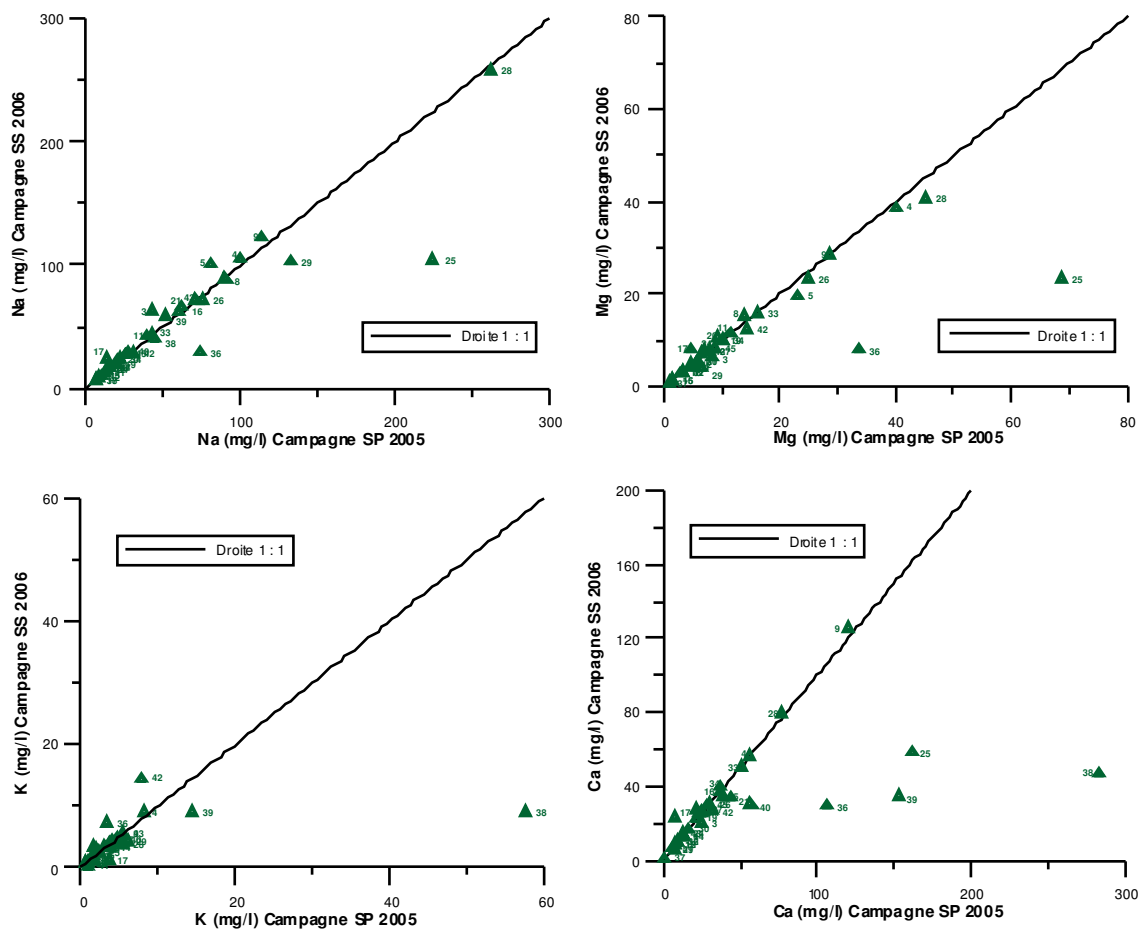


Illustration 23 : Variations des éléments Na, K, Mg, Ca entre les campagnes en saison des pluies (SP) 2005 et en saison sèche (SS) 2006.

Par rapport à la droite 1 : 1, on observe :

- ⇒ peu de variations pour les nitrates (NO_3), une légère dispersion de part et d'autre de la droite 1 : 1,
- ⇒ peu de variations en général pour les chlorures (Cl), le sodium (Na), les sulfates (SO_4), les bicarbonates (HCO_3) le calcium (Ca) et le magnésium (Mg), à l'exception des points 25 (Anses d'Arlets - Grande Anse), 36 (Rivière Pilote - La Mauny), 29 (Ste Luce - Stade communal), 38 (François - Grand Fond), 39 (Robert - Pontalery) et 28 (Trois Ilets - Vatable),
- ⇒ pour le potassium (K), une dispersion importante entre le point 38 (François - Grand Fond) et le reste des points.

Le fait de retrouver en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006 des concentrations proches pour certains éléments, confirme que la qualité des ressources en eau souterraine ne varie pas beaucoup malgré des états hydrogéologiques

différents et que **ces ressources en eau sont localisées dans des réservoirs de taille relativement importante.**

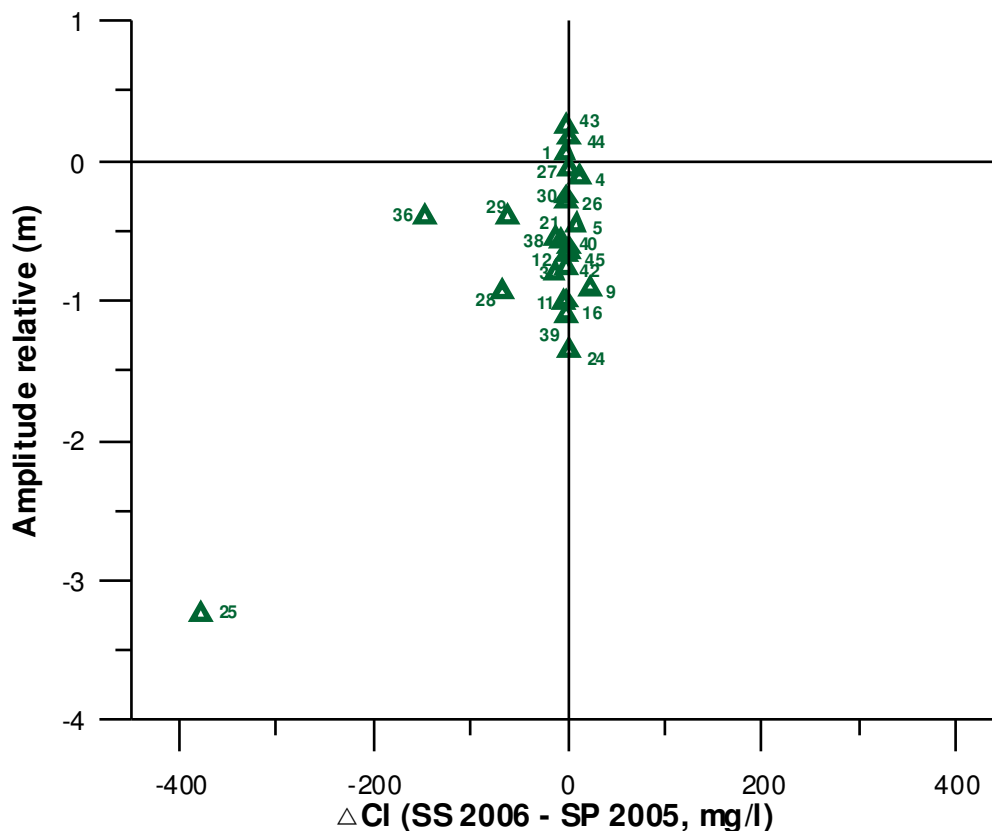


Illustration 24 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en chlore entre la saison sèche 2006 et la saison des pluies 2005.

L'utilisation du chlore (exprimé en unité $\Delta = Cl_{HE} - Cl_{BE}$) en fonction de l'amplitude relative de la hauteur d'eau dans les ouvrages met en évidence :

- ⇒ la majorité des points où la hauteur d'eau varie entre les deux campagnes mais pas la teneur en Cl (la teneur en Cl reste stable),
- ⇒ des points où ni la hauteur d'eau, ni la teneur en Cl ne varient entre les deux campagnes,
- ⇒ des points où la hauteur d'eau et la teneur en Cl varient entre les deux campagnes : notamment le point 25 (Anses d'Arlets – Grande Anse), mais aussi les points 28 (Trois llets - Vatable), 36 (Rivière Pilote - La Mauny) et 29 (Ste Luce - Stade communal).

Ce type de répartition est observé pour le sodium (c.f. Illustration 25) et le bore (c.f. Illustration 26).

Le schéma du sodium indique quasiment les mêmes tendances que le schéma des chlorures. La seule différence notable vient du point 28 (Trois llets - Vatable) qui indique seulement une variation de hauteur d'eau.

L'illustration du bore est quant à elle un peu plus marquée. On distingue, les tendances suivantes :

- ⇒ des points où ni la hauteur d'eau, ni la teneur en bore ne varient entre les deux campagnes,
- ⇒ la majorité des points où la hauteur d'eau varie entre les deux campagnes mais pas la teneur en bore,
- ⇒ un point où la teneur en bore varie légèrement entre les deux campagnes sans variation du niveau d'eau : le 43 (Bellefontaine – Fond Laillet),
- ⇒ des points où la hauteur d'eau et la teneur en bore varient entre les deux campagnes : les points 25 (Anses d'Arlets – Grande Anse) et 28 (Trois llets - Vatable) qui connaissent une baisse de leur teneur en bore et le point 3 (Marigot - Anse Charpentier) qui enregistre une nette hausse de sa teneur en bore.

La plupart des anomalies en bore sont liées aux spécificités de l'environnement géologique et à la nature lithologique des aquifères via les interactions eau-roche. Toutefois la grande variabilité vers des teneurs fortes n'exclut pas une pollution (lessives, engrais). **Là encore, l'utilisation des isotopes du bore devrait amener de plus amples informations sur l'origine et la variabilité de cet élément ainsi que sur l'histoire de ces ressources en eau.**

Globalement, et pour les paramètres présentés dans ce chapitre, les concentrations varient peu entre les campagnes de hautes eaux et de basses eaux.

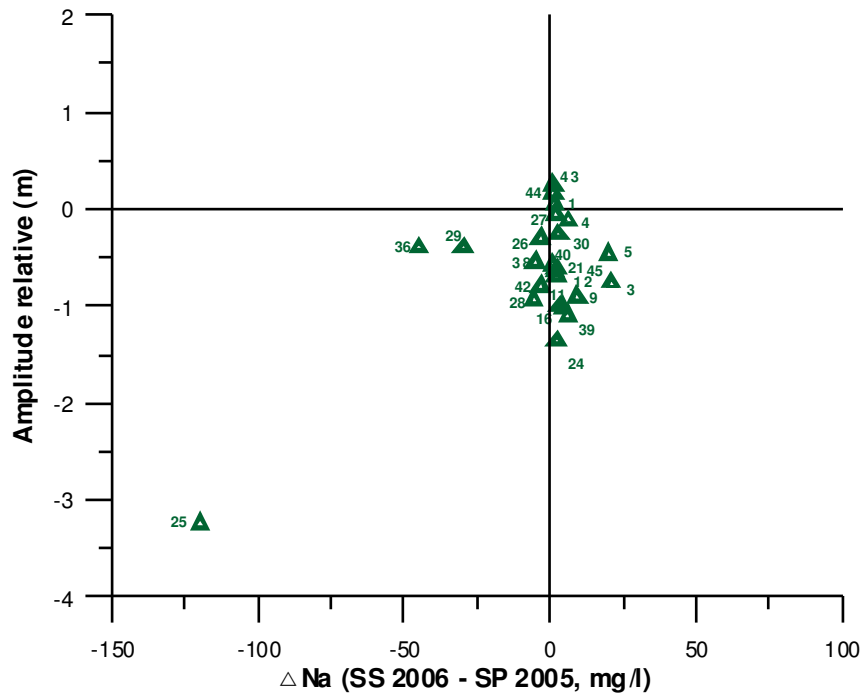


Illustration 25 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en sodium entre la saison sèche 2006 et la saison des pluies 2005.

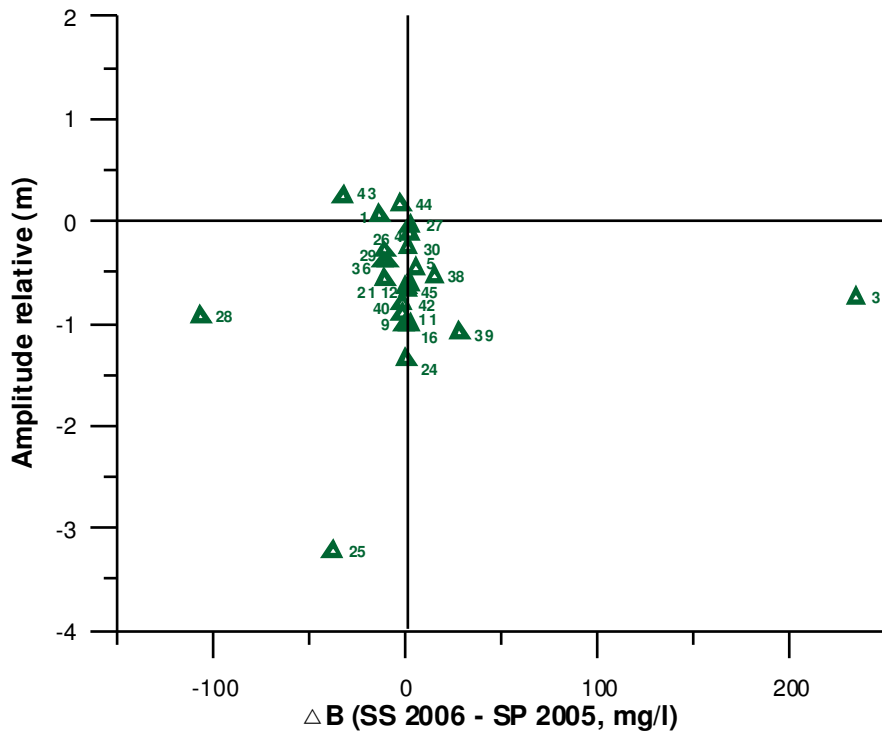


Illustration 26 : Amplitude piézométrique relative en fonction de la variation en bore entre la saison sèche 2006 et la saison des pluies 2005.

3.6. LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES

En janvier-mars 2004, une première campagne de mesures de teneurs en phytosanitaires a été effectuée sur 34 points d'eaux souterraines. Seulement 5 molécules avaient alors été recherchées (chlordécone, diuron, hexazinone, beta HCH et l'atrazine). En octobre-novembre 2004, une seconde campagne de mesure a été réalisée sur seulement 10 points choisis en concertation entre le BRGM et la DIREN ; 111 molécules ont été recherchées. Elles correspondaient à la liste type du laboratoire d'analyses (BRGM/MMA) et ne correspond pas à une liste qui aurait été établie en fonction des usages et caractéristiques des molécules. *(Il est possible que certaines des substances recherchées ne soient pas appliquées en Martinique ou en quantités extrêmement faibles. Le besoin de connaissances des apports en phytosanitaires passés et actuels a été clairement identifié ; le SRPV, par des travaux en cours, s'emploie à répondre à cette question).*

En novembre et décembre 2005, une troisième campagne de mesure a été réalisée (période théorique de hautes eaux). 120 molécules phytosanitaires ont été analysées par le laboratoire MMA du BRGM (Illustration 27) sur 10 ouvrages choisis, en concertation avec la DIREN, en fonction du risque potentiel de pollution de la nappe. Le risque a été établi sur la base de la présence de parcelles agricoles en amont du forage. 9 autres molécules ont aussi été ajoutées à cette liste type, à la demande de la DIREN, car elles sont utilisées sur l'île. Sur ces 10 points, 7 sites se révèlent contaminés par au moins une molécule.

En avril 2006, une quatrième campagne, objet de ce présent rapport, a été menée toujours sur 10 points, dont les 7 sites ayant déjà révélé une contamination en 2005. La recherche a également été menée sur 3 nouveaux points qui n'avaient jamais fait l'objet d'analyses phytosanitaires (2 de ces 3 sites sont des nouveaux piézomètres réalisés en 2005 par le BRGM dans le cadre du réseau piézométrique).

Les 10 sites étudiés (cf. Carte n°2, annexe 2) se sont révélés contaminés par 12 des produits recherchés (tableau 1). Sur ces 12 molécules 9 ont également fait l'objet de détection dans les eaux de surface lors de campagnes de mesures gérées par la DIREN.

Les résultats détaillés sont présentés dans les paragraphes ci-dessous, dans un tableau récapitulatif en annexe 1 et sur la carte n°3 en annexe 2. Les valeurs utilisées comme norme sont celles données par la directive 98/83/CE pour les eaux distribuées destinées à la consommation humaine à savoir 0.1 µg/l pour la plupart des substances. La concentration en produits phytosanitaires (somme de tous les produits phytosanitaires) ne doit pas dépasser 0.5 µg/l (ces concentrations ont été reprises par la DCE).

Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique

Nbre	Molécule	LQ	Nbre	Molécule	LQ	Nbre	Molécule	LQ	Nbre	Molécule	LQ
1	2,4 DDD	0.0005	31	Chlortoluron	0.0500	61	Fénamiphos	0.0500	91	Nicosulfuron	0.1000
2	2,4 DDE	0.0005	32	Congénère 101	0.0005	62	Fénitrothion	0.0500	92	Néburon	0.0500
3	2,4 DDT	0.0005	33	Congénère 118	0.0005	63	Heptachlore	0.0005	93	Parathion-méthyl	0.0500
4	2,4,5-T	0.0500	34	Congénère 138	0.0005	64	Heptachlore époxyde	0.0005	94	Parathion-éthyl	0.0500
5	2,4,D	0.1000	35	Congénère 153	0.0005	65	Hexachlorobenzène	0.0005	95	Penconazole	0.0500
6	4,4' DDD	0.0020	36	Congénère 180	0.0005	66	Hexaconazole	0.0500	96	Pen diméthaline	0.0500
7	4,4' DDE	0.0010	37	Congénère 194	0.0005	67	Hexazinone	0.0500	97	Pentachlorophénol	0.5000
8	4,4' DDT	0.0020	38	Congénère 28	0.0005	68	Imazalil	0.1500	98	Phosalone	0.0500
9	Aétochlore	0.0500	39	Congénère 52	0.0005	69	Imazaméthabenz	0.0500	99	Phostiasate	0.5000
10	Alachlore	0.0500	40	Cyanazine	0.0500	70	loxynil	0.0500	100	Piperonyl butoxyde	0.0500
11	Aldicarbe	0.0700	41	Desmétryne	0.0500	71	Isoproturon	0.0500	101	Prochloraze	0.0500
12	Aldrine	0.0010	42	Diazinon	0.0500	72	Isoproturon-1CH3	0.0500	102	Prométryne	0.0500
13	Alphametrine	0.0500	43	Dichlorprop	0.0500	73	Isoproturon-2CH3	0.0500	103	Propanil	0.0500
14	Amétryne	0.0500	44	Dieldrine	0.0010	74	Linuron	0.0500	104	Propazine	0.0500
15	Atrazine	0.0500	45	Difenoconazole	0.0500	75	MCPA	0.0500	105	Propiconazole	0.0500
16	Bentazone	0.0500	46	Diméthénamide	0.1000	76	Malathion	0.0500	106	Propoxur	0.0500
17	Bifénox	0.1000	47	Dinoterb	0.0500	77	Monolinuron	0.0500	107	Simazine	0.0500
18	Biphényl	0.0500	48	Diuron	0.0500	78	Monuron	0.1000	108	Sébutylazine	0.0500
19	Bitértaol	0.0500	49	Désisopropylatrazine	0.2000	79	Mécoprop	0.0500	109	Tebuconazole	0.0500
20	Bromacil	0.0500	50	Déséthylatrazine	0.1000	80	Métamitron	0.0500	110	Tebutame	0.0500
21	Bromopropylate	0.0500	51	Endosulfan I	0.0005	81	Métazachlore	0.0500	111	Terbutylazine	0.0500
22	Bromoxynil	0.0500	52	Endosulfan II	0.0005	82	Méthabenzthiazuron	0.0500	112	Terbutryne	0.0500
23	Cadusafos	0.0500	53	Endosulfan sulfate	0.0020	83	Méthomyl	0.1000	113	Thiabendazole	0.7000
24	Captan	0.1000	54	Endrine	0.0020	84	Méthoxychlore	0.0005	114	Trifluraline	0.0500
25	Carbendazime	0.0500	55	Fenpropimorphe	0.0500	85	Métobromuron	0.0500	115	Tétraconazole	0.0500
26	Carbofuran	0.0500	56	Fenthion	0.0500	86	Métolachlor	0.0500	116	alpha HCH	0.0005
27	Carbophenothion	0.0500	57	Flufenoxuron	0.0500	87	Métoxuron	0.0500	117	beta HCH	0.0005
28	Chlordécone	0.2000	58	Flurochloridone	0.0500	88	Métribuzine	0.0500	118	delta HCH	0.0005
29	Chlorfenvinphos	0.0500	59	Fluzilazole	0.0500	89	Métsulfuron Méthyle	0.1000	119	epsilon HCH	0.0005
30	Chlorpyrifos éthyl	0.0500	60	Folpel	0.1000	90	Napropamide	0.0500	120	gamma HCH (lindane)	0.0005

Illustration 27 : Liste des 120 molécules phytosanitaires analysées. Les molécules en vert correspondent à celles détectées dans les rivières par la DIREN ; les noms inscrits en gras correspondent aux molécules détectées dans les eaux souterraines lors de la campagne d'avril 2006. Les limites de quantifications associées sont indiquées en µg/l

3.6.1. Les sites pollués par les produits phytosanitaires

Les 10 sites échantillonnés sont tous contaminés par un ou plusieurs produits phytosanitaires. Les chapitres ci-dessous présentent les résultats site par site, en comparant les données de cette campagne avec les autres données disponibles.

Il convient de noter que la stratégie d'échantillonnage retenue, qui vise à n'échantillonner une deuxième fois que les sites dans lesquels des molécules ont été trouvées, conduit à une évolution constante de la liste de sites échantillonnés. La plupart des points ne présente donc qu'une ou deux campagnes de mesures. Seuls 4 points (Vert Pré, Rivière Falaise, Anse Charpentier, Morne Figue) disposent d'au moins 4 campagnes de mesures. Le recul dont nous disposons est encore limité pour une analyse pertinente de ces chroniques de données.

Convention de représentation : pour tous les graphiques relatifs à chaque point de suivi, aucune valeur n'est indiquée lorsque la molécule n'a pas été recherchée (par exemple pour Vert Pré, l'heptachlore époxyde n'a pas été recherché en janvier 2004) et une valeur négative, correspondant à la valeur de la limite de quantification – LQ -, est portée quand les molécules n'ont pas été quantifiées (par exemple l'heptachlore époxyde a été recherché mais non quantifié en novembre 2004 et mai 2005 avec une technique présentant pour cette molécule une limite de quantification de 0.005 µg/L). Une valeur 0 correspond au cas où la molécule est détectée mais à des teneurs non quantifiables.

Un rappel sur les caractéristiques des molécules phytosanitaires détectées ainsi que les usages est porté en annexe.

Forage 1175ZZ0106 – Vert Pré

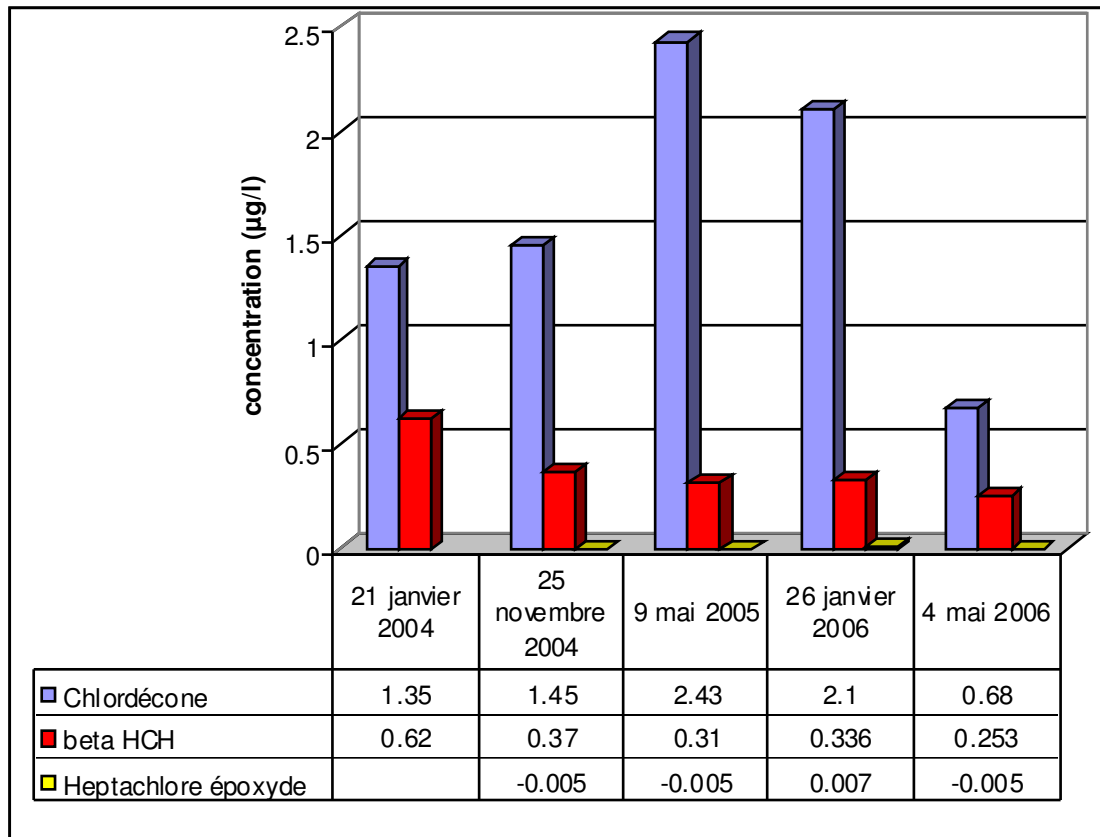


Illustration 28 : Evolution des concentrations en produits phytosanitaires détectés à Vert Pré, en µg/l

Ce forage est marqué par la présence systématique de deux insecticides : le chlordécone et le β-HCH. Ces produits étaient anciennement utilisés dans les champs de banane pour lutter contre le charançon. Leur emploi est désormais interdit. L’heptachlore époxyde, quant à lui, a été quantifié une seule fois en janvier 2006 à une teneur proche de la limite de quantification (0.007 µg/l pour une LQ de 0.005 µg/l), ce qui pourrait expliquer l’absence de quantification lors des campagnes précédentes et de la campagne suivante.

Il n’existe pas de données piézométriques relatives à ce point qui auraient pu être utilisées pour préciser le contexte hydrologique lors des prélèvements (début/fin des périodes de hautes-eaux, basses-eaux...). L’évolution des teneurs est donc difficilement interprétable.

Ce forage est un forage privé et les prélèvements s’effectuent dans l’usine et non sur le forage lui-même. La visite de ce forage a montré qu’il n’était pour l’instant pas possible de mesurer les niveaux, le tube guide étant bouché, et le forage lui-même étant équipé d’une protection empêchant tout accès.

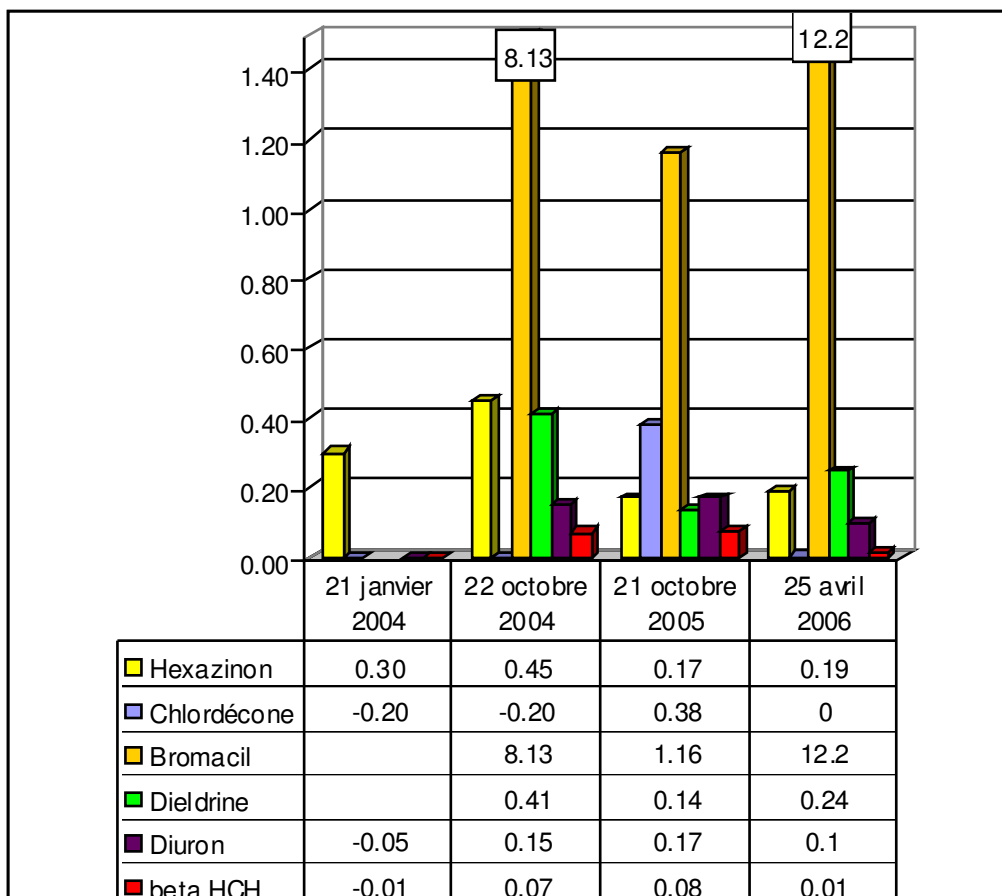
Piézomètre 1168ZZ0054 – Basse Pointe – Rivière Falaise

Illustration 29 : Produits phytosanitaires détectés à Basse Pointe – Piézomètre à proximité de la Rivière Falaise, concentrations en µg/l

Ce piézomètre, situé à Basse Pointe à proximité de la Rivière Falaise (en contrebas du restaurant « Chez Lélène »), est le site le plus pollué, à la fois en nombre de molécules et en concentration totale en produits phytosanitaires.

- **Cas du Bromacil**

Le bromacil est un herbicide généralement utilisé dans les champs d'ananas. Son utilisation est officiellement interdite depuis 2003. La durée de demi-vie (DT50 -durée nécessaire pour que 50% du produit soit dégradé) du bromacil est de 346 jours selon la base de donnée PAN.

Ce produit avait été quantifié, en octobre 2004 à une très forte concentration (8.13 µg/l). En 2005, il avait été mesuré à une concentration beaucoup plus faible (1.16 µg/l). En 2006, le bromacil est mesuré, à nouveau, à une très forte concentration (12.2 µg/l),

supérieure à celle mesurée en 2004. Dans tous les cas, les teneurs rencontrées sont importantes pour des eaux souterraines.

L'augmentation constatée des concentrations pourrait résulter d'une remobilisation de ce produit qui aurait été stocké temporairement dans le sol et/ou la zone non saturée. Pour valider cette hypothèse, il conviendrait de disposer d'informations sur le stock de phytosanitaires existant ainsi que sur les mécanismes de relargage. L'hypothèse d'usages illicites doit également être évoquée.

- **Cas de l'atrazine et de l'heptachlore époxyde**

Ces deux produits avaient été détectés en octobre 2004, à de très faibles teneurs. Ils n'avaient pas été détectés lors de la campagne de prélèvement d'octobre 2005, et n'ont pas non plus été détectés en avril 2006.

- **Cas du diuron et du β -HCH**

Ces deux herbicides ont été retrouvés en octobre 2004 et en octobre 2005 à des teneurs similaires. Les concentrations de ces deux substances ont diminué sensiblement lors des analyses de basses eaux d'avril 2006.

- **Cas de la dieldrine et de l'hexazinone**

Ces deux produits sont systématiquement détectés ; leurs concentrations ont diminué entre octobre 2004 et octobre 2005 et ont augmenté en avril 2006.

- **Cas du chlordécone**

Le chlordécone n'avait pas été détecté lors des 2 précédentes campagnes, et a été détecté à une teneur de 0.38 $\mu\text{g/l}$ (soit 2 fois la limite de quantification) en octobre 2005. Il a été détecté mais non quantifié en avril 2006 (concentration $<LQ$).

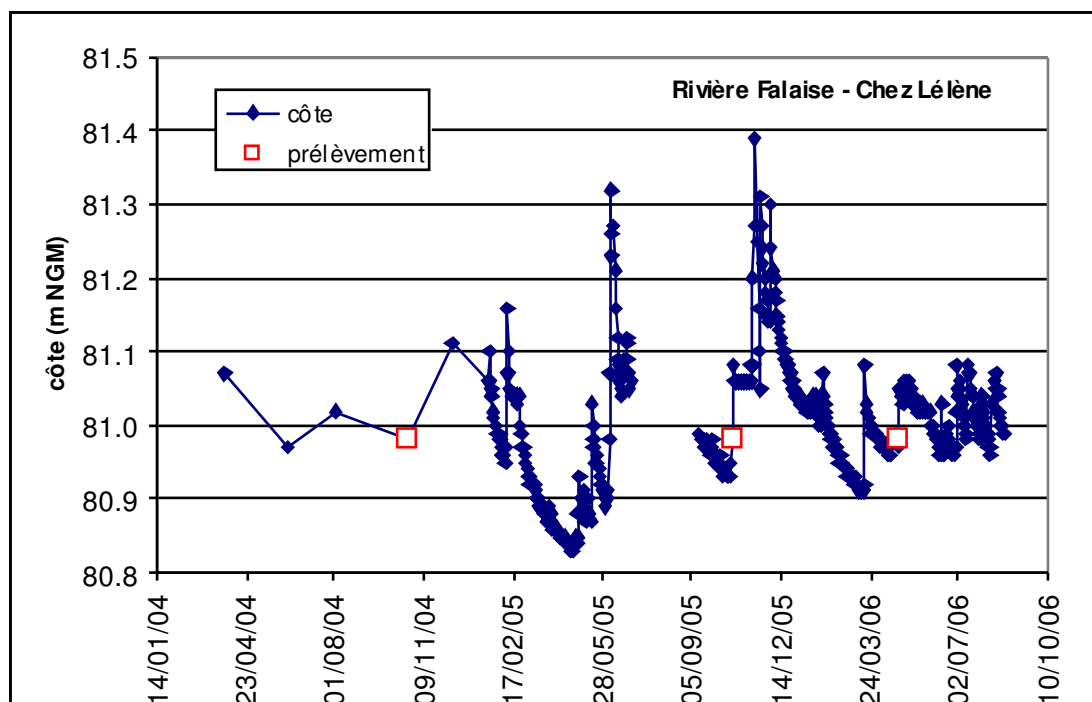


Illustration 30 : Evolution du niveau piézométrique mesuré au niveau de Rivière Falaise – chez Lélène

Quelle que soit la molécule considérée, aucune tendance d'évolution des concentrations ne se dégage actuellement au vu des analyses disponibles. Les concentrations mesurées pour certains produits sont stables, alors qu'elles augmentent ou diminuent pour d'autres. Les données piézométriques (Illustration 30) montrent que les campagnes de mesures phytosanitaires théoriquement prévues en hautes et basses ont finalement été réalisées pour des niveaux piézométriques assez proches. Les périodes de hautes eaux n'ont par exemple pas été réellement échantillonnées.

Forage 1169ZZ0006 – Marigot – Anse Charpentier

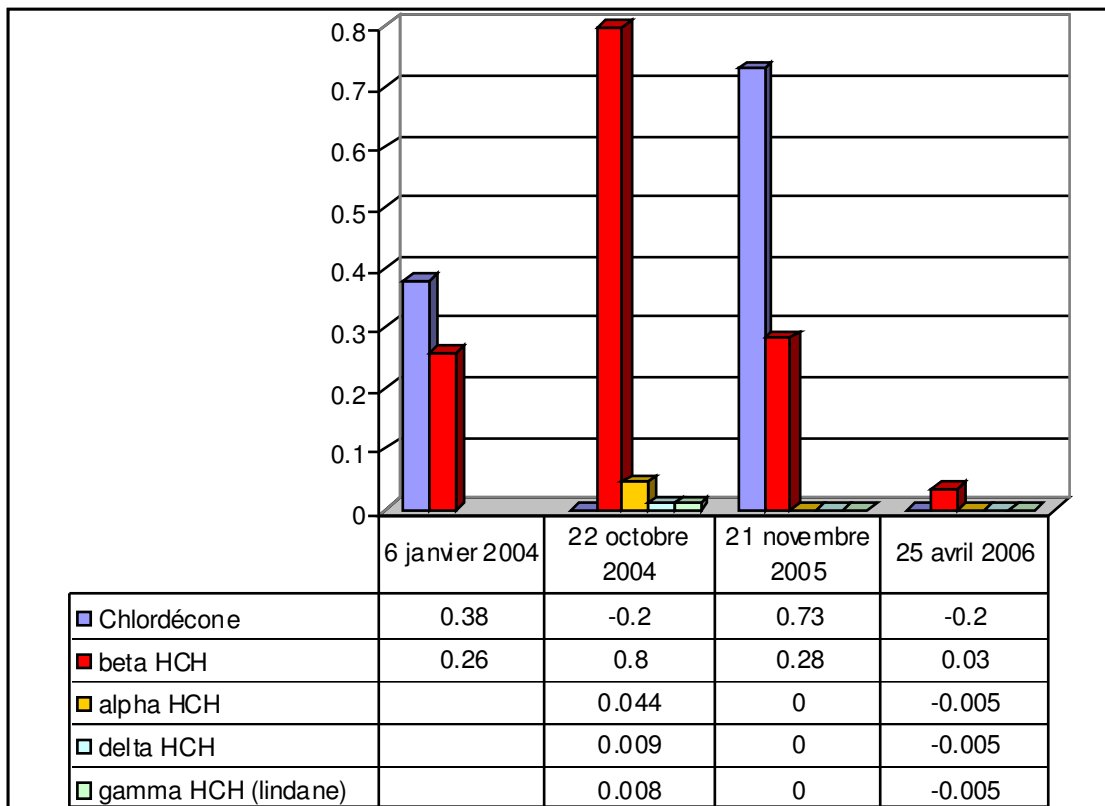


Illustration 31 : Produits phytosanitaires détectés dans le forage de Marigot – Anse Charpentier, concentration en µg/l

Ce forage est lui aussi marqué par la présence des deux insecticides les plus retrouvés à savoir le chlordécone et le β -HCH, ce dernier étant systématiquement détecté.

Les concentrations en β -HCH diminuent depuis fin 2004, tandis que les concentrations en chlordécone ne permettent pas de détecter de tendance, d'autant plus que ce produit n'est quantifié qu'une fois sur deux (alors qu'il est recherché à chaque fois).

Il est à noter que ce secteur est situé en zone rouge de la cartographie statistique du risque de pollution des sols par le chlordécone et le β -HCH. Les sols en amont et à l'aplomb de ce forage sont donc très certainement pollués, et la nappe souterraine sous-jacente a très probablement été contaminée par infiltration de ces deux produits.

Un relargage lent et régulier de ces deux produits depuis le sol vers la nappe pendant une période assez longue, vraisemblablement de plusieurs années, est à craindre laissant ainsi perdurer la contamination de la nappe. Le suivi des concentrations en phytosanitaires permettra de mieux connaître les processus de transfert entre les sols et la nappe souterraine ainsi que les mécanismes de relargage.

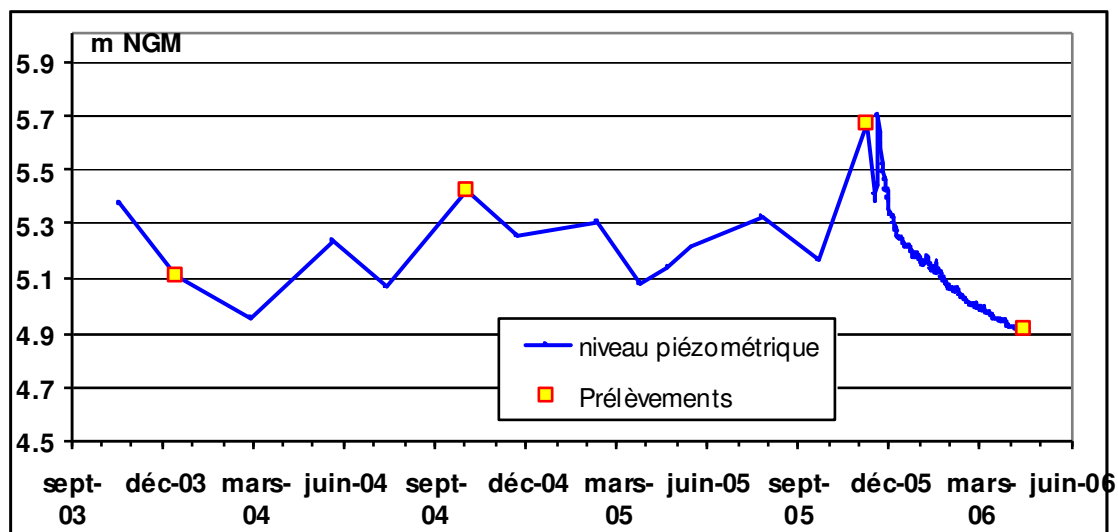


Illustration 32 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du point Marigot-Anse Charpentier.

L'illustration 32 permet de visualiser les dates de prélèvement par rapport à l'évolution du niveau piézométrique au niveau de ce forage. Les campagnes du 22 octobre 2004 et du 21 novembre 2005 correspondent effectivement à des périodes de hautes eaux ; le prélèvement d'avril 2006 a bien été réalisé en basses eaux alors que celui de janvier 2004 semble correspondre à une situation plus intermédiaire. La faible densité de mesures piézométriques au début du suivi rend l'appréciation délicate. Les concentrations en beta HCH les plus fortes ont été enregistrées en octobre 2004 et novembre 2005 c'est-à-dire pendant les périodes de hautes eaux. Il est possible que l'eau récemment infiltrée soit chargée en beta HCH et contribue à augmenter la contamination. Cette substance, non utilisée, serait donc remobilisée régulièrement.

Ce constat ne semble pas pouvoir être généralisé et notamment pour le chlordécone, l'absence de détection en octobre 2004 allant à l'encontre du constat fait pour le bêta HCH. Il convient toutefois de noter que les limites de quantification des 2 molécules sont très différentes (0.0005 vs. 0.2 µg/l), la limite de quantification du chlordécone étant particulièrement élevée.

Source 1175ZZ0153 – Trinité – Morne Figue

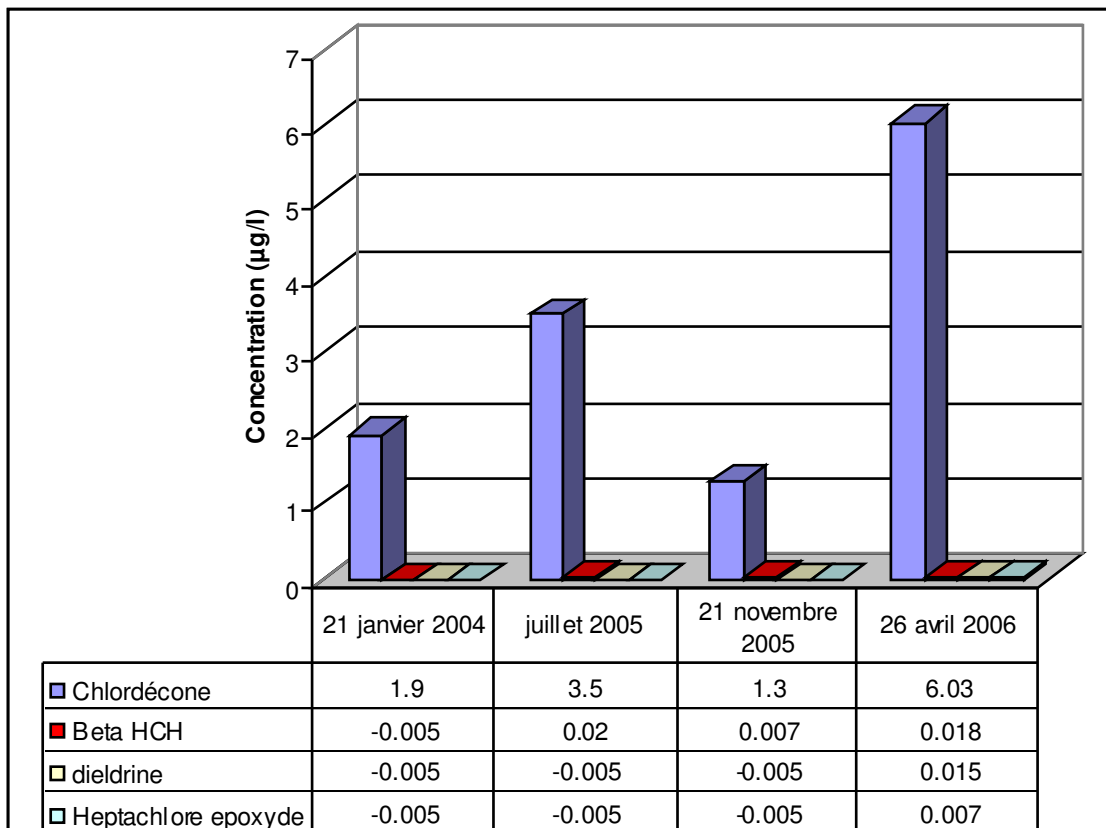


Figure 1 : Produits phytosanitaires détectés à la source Morne Figue – Commune de la Trinité, concentration en µg/l

Cette source est elle aussi contaminée par les deux insecticides les plus retrouvés, à savoir le chlordécone et le beta-HCH.

Sur la base des 4 mesures disponibles, on peut suspecter une tendance : les valeurs de janvier 2004 et de novembre 2005, les plus faibles, correspondent à des mesures réalisées pendant la « saison des pluies » et les valeurs de juillet 2005 et d’avril 2006 peuvent être attribuées à la « saison sèche ».

Ainsi, on observerait une concentration plus élevée en chlordécone et en beta-HCH pendant la saison sèche. L’eau qui s’infiltré récemment serait donc moins contaminée en chlordécone et beta H-CH que l’eau de la nappe à l’inverse de ce qui est suspecté au niveau de Marigot-Anse Charpentier. Cette différence pourrait être liée au fait que Marigot-Anse Charpentier se trouve dans un secteur où les sols sont fortement contaminés en chlordécone et beta HCH contrairement à Morne Figue (secteur blanc, c’est-à-dire – à vérifier).

Pour pouvoir interpréter correctement les variations de teneurs mesurées sur une source, il est indispensable de connaître le débit de celle-ci. Malheureusement, le débit de cette source n'est pas mesurable dans sa configuration actuelle, et le site nécessiterait des travaux de génie civil pour que l'on puisse mesurer le débit de cette source.

Piézomètres François – Grand Fond 1179ZZ0299 et habitation Victoire 1179ZZ0228

Le chlordécone avait été détecté en décembre 2005 à une concentration de 0.4 µg/l. Il a été détecté à nouveau en avril 2006 à la même concentration dans le piézomètre François – Grand Fond.

Une première analyse phytosanitaire a été réalisée sur le forage de l'habitation Victoire. Le chlordécone a été détecté à une concentration de 0.22 µg/l. En consultant l'atlas de la sole agricole réalisé par le CNASEA, on se rend compte qu'il n'y a actuellement pas de bananeraie en amont topographique de ce site. Une recherche historique doit être menée afin de savoir si ce produit a déjà été utilisé en amont (présence de culture de bananes depuis ces 30 dernières années).

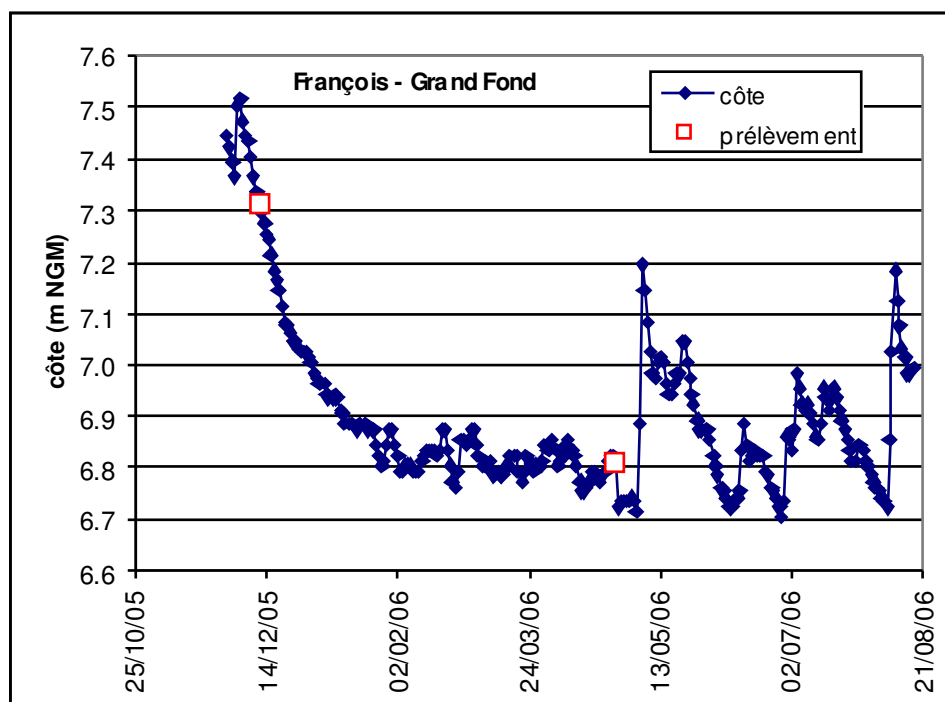


Illustration 33 : Evolution du niveau piézométrique au niveau du piézomètre François – Grand Fond

L'illustration 33, bien que la chronique piézométrique soit de très courte durée, permet de vérifier que les deux prélèvements effectués pour le dosage des phytosanitaires ont bien été réalisés en conditions hydrologiques différentes.

Piézomètre 1174ZZ0088 Gros Morne – La Borelli

Deux produits ont été détectés :

- Le carbendazime avec une concentration de 0.48 µg/l, concentration supérieure à celle mesurée pendant la dernière saison des pluies (0.18 µg/l). Ce produit est généralement utilisé sur les cultures légumières. Il serait intéressant de connaître les lieux d'épandages de ce produit en amont de ce piézomètre, afin de mieux appréhender les transferts de polluants.
- Le chlordécone (0.21 µg/l) avec une concentration tout juste supérieure à la limite de quantification. Il est à noter qu'actuellement aucune bananeraie ne se trouve en amont de ce piézomètre : une recherche historique doit donc être menée afin de connaître la sole agricole (et notamment les bananeraies) du secteur depuis ces 30 dernières années.

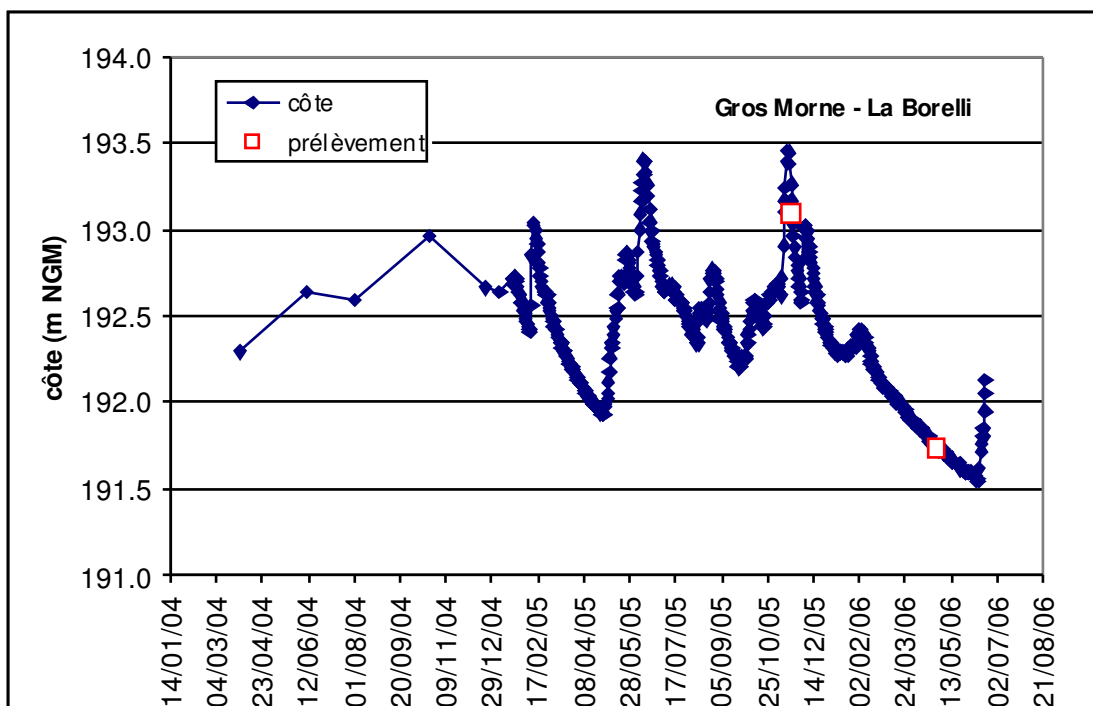


Illustration 34 : Evolution du niveau piézométrique au piézomètre Gros Morne – La Borelli

Les deux premières campagnes de mesure effectuées au niveau de ce point ont bien été effectuées lors de contextes hydrodynamiques différents au regard de la chronique qui reste de courte durée (Illustration 34). Pour ces deux substances, les teneurs les plus élevées ont été observées lors du prélèvement en basses eaux.

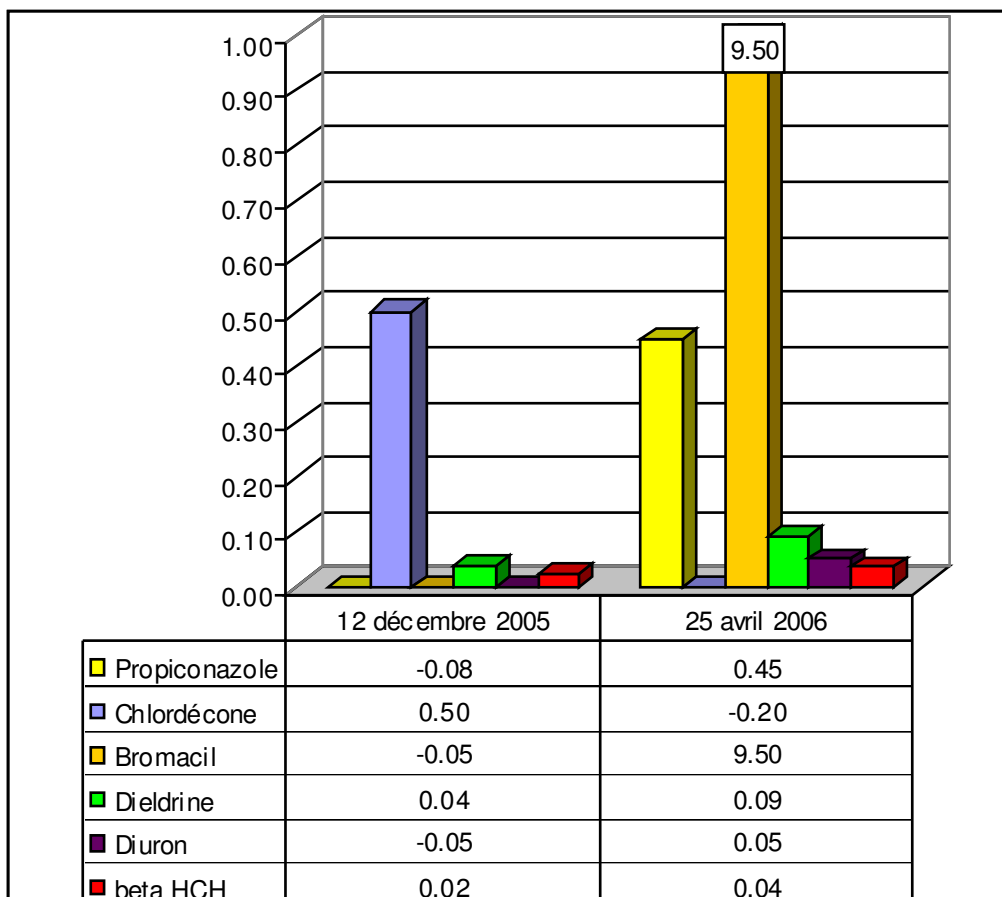
Piézomètre 1166ZZ0026 Basse pointe – Chalvet

Illustration 35 : Produits phytosanitaires détectés au piézomètre Chalvet – Commune de Basse Pointe, concentration en µg/l

Ce point est marqué par la présence de deux nouvelles molécules par rapport à la campagne de décembre 2005 : le Bromacil avec une très forte concentration (9.5 µg/l) et le propiconazole avec une concentration non négligeable (0.45 µg/l).

Une bonne connaissance des usages en amont de ce piézomètre serait nécessaire pour caractériser au mieux les transferts de polluants.

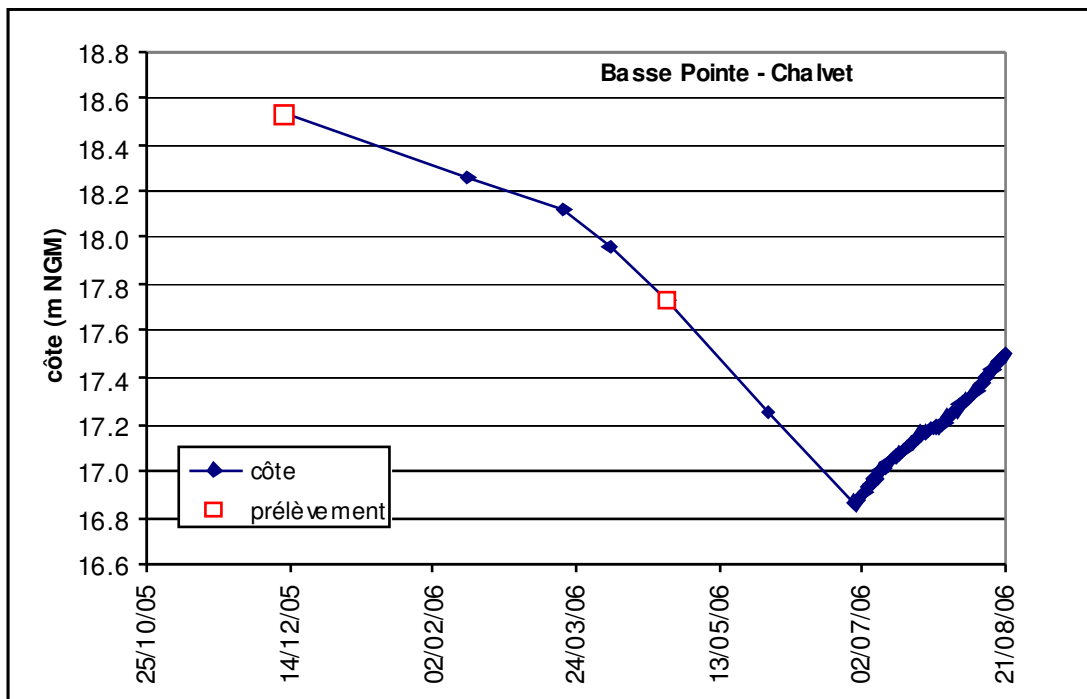


Illustration 36 : Evolution du niveau piézométrique au point Basse Pointe – Chalvet

Bien que le suivi piézométrique soit très court (Illustration 36), il semble que les deux prélèvements effectués n'aient pas été réalisés dans des contextes hydrodynamiques très différents. On observe toutefois une forte variabilité de la contamination de la nappe (concentrations et molécules observées).

Piézomètre 1169ZZ0084 Lorrain – Fond Brulé

Ce piézomètre, réalisé en 2005, a été échantillonné pour la première fois en avril 2006. 3 produits ont été détectés : la dieldrine à 0.0104 µg/l et surtout le chlordécone avec une concentration très élevée de 21.2 µg/l et le β-HcH avec une concentration aussi très élevée de 5.79 µg/l.

Ces concentrations très élevées sont à mettre en rapport avec l'historique cultural. En effet, le bassin versant en amont de ce forage est constitué essentiellement de bananeraies, et ce depuis environ 30 années. Néanmoins les concentrations observées sont exceptionnellement élevées. Une recherche spécifique sur l'environnement de ce nouveau forage pourrait peut être permettre de mettre en évidence une seconde origine comme la présence d'ancien site de stockage de produit par exemple.

Bien que ces produits ne soient plus utilisés, le stock présent dans le sol, voire dans la zone non saturée, serait donc susceptible de relarguer progressivement cette substance.

Piézomètre 1167ZZ0045 Saint Pierre – CDST

Ce piézomètre, réalisé lui aussi fin 2005, a été échantillonné pour la première fois en avril 2006. Un seul produit a été détecté : le chlordécone avec une concentration de 0.52 µg/l.

3.6.2. Synthèse des résultats

En guise de synthèse, la carte 3 représente les points contaminés par les produits phytosanitaires pour la campagne d'avril 2006.

L'illustration 37 récapitule les résultats obtenus par forage et par molécule quantifiée au moins une fois au cours de la campagne de basses eaux 2006. Elle permet de montrer la variabilité de la contamination entre les points tant au niveau des concentrations mesurées que des molécules détectées. Les teneurs rencontrées sont en effet fortement variables d'une molécule à une autre. D'un point de mesure à l'autre, le nombre et la nature des molécules quantifiées apparaissent également très différents. Le chlordécone est ainsi détecté dans 7 des 10 points échantillonnés ; les points présentant le plus grand nombre de molécules quantifiées sont situés sur la commune de Basse Pointe (7 Chez Lélène et 6 à Chalvet).

L'illustration 38 permet de visualiser la répartition des détections cumulées en avril 2006 ou pour l'ensemble des campagnes de mesures en fonction des usages. Même si cette figure doit être considérée avec précaution vu le nombre très faibles d'analyses, les insecticides apparaissent comme les molécules les plus détectées pour la dernière campagne de mesures mais aussi pour l'ensemble des campagnes.

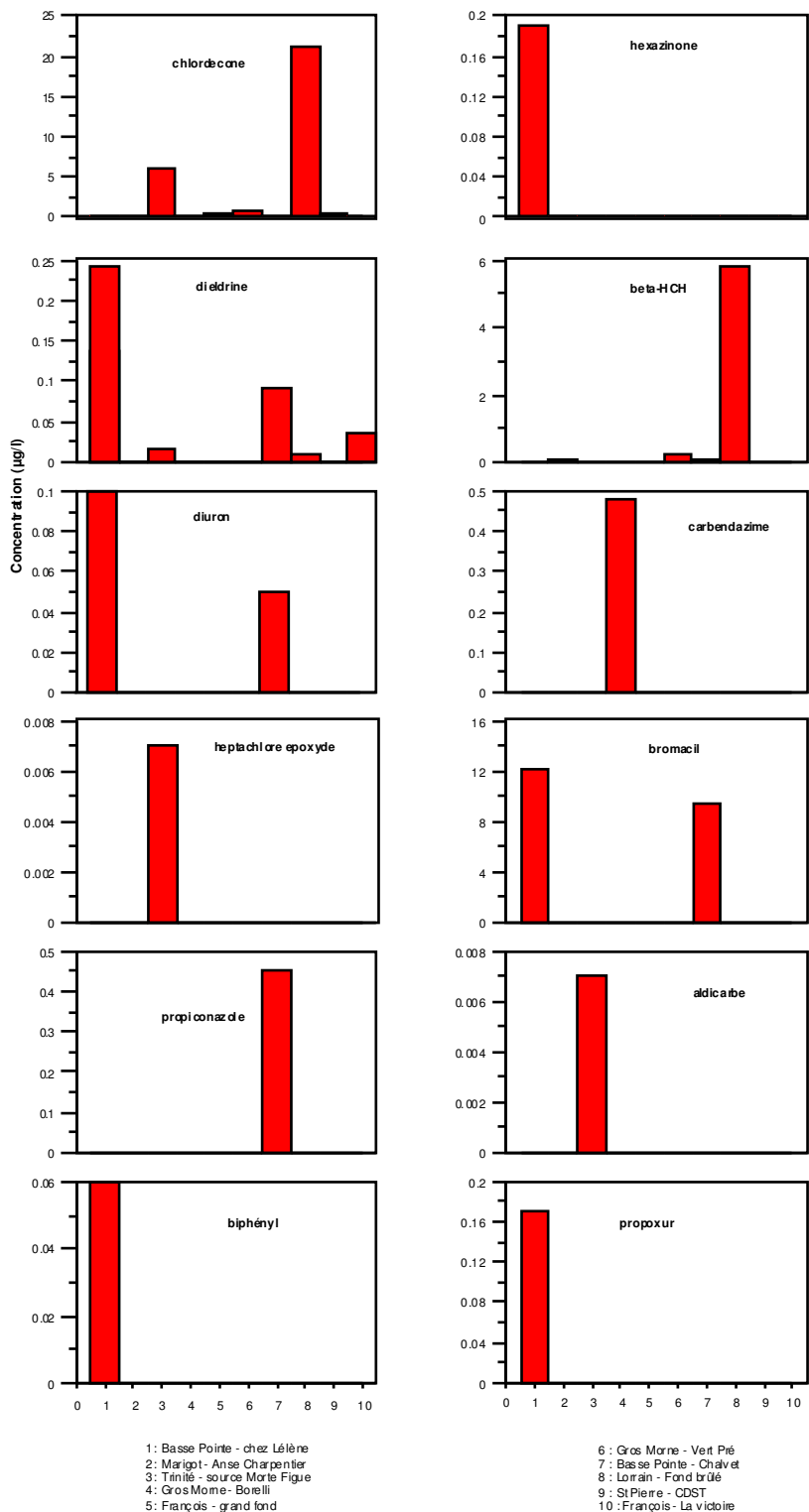


Illustration 37 : Synthèse des résultats par forage de la campagne d'avril 2006, pour chaque molécule quantifiée au moins une fois

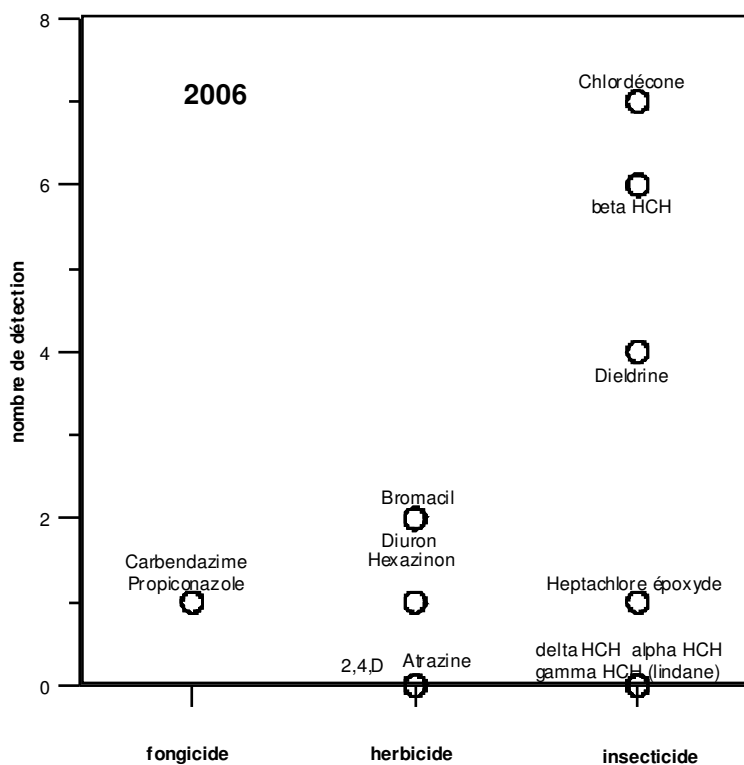
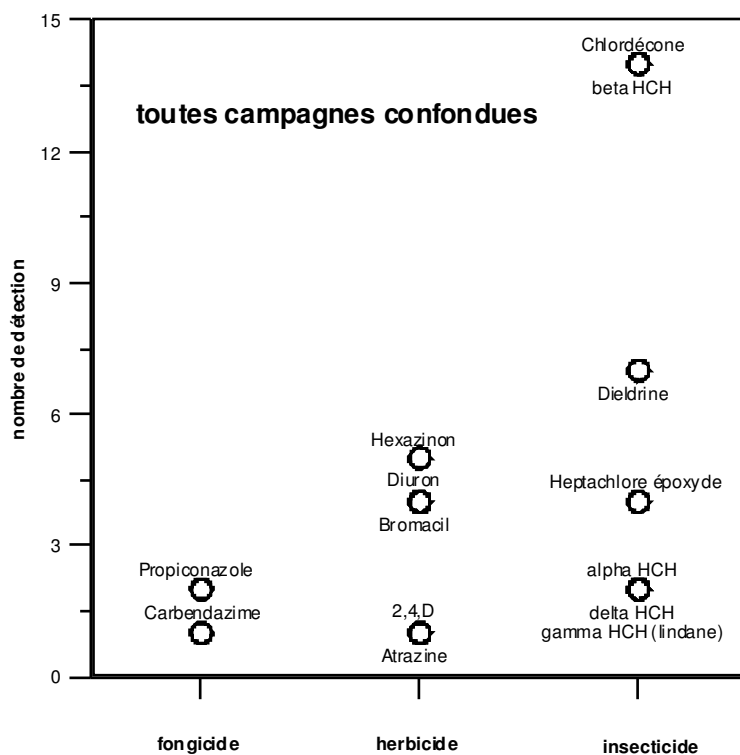


Illustration 38 : Répartition du nombre de détections des molécules en avril 2006 et pour l'ensemble des campagnes de mesure en fonction de leurs usages



3.7. LES FORAGES PRESENTANT UNE EAU ALCALINE

Lors de cette nouvelle campagne de prélèvements en saison sèche 2006, on retrouve les 3 points qui présentaient des caractéristiques complètement différentes en saison des pluies 2005. Ces 3 forages réalisés fin 2005, sont les suivants :

- François - Grand Fond (n°38),
- Robert - Pontalery (n°39),
- Trinité - La Galion (n°40).

Globalement, ces eaux ont conservé les mêmes caractéristiques entre les deux campagnes de prélèvements en saison des pluies 2005 et en saison sèche 2006.

Les eaux de ces forages montrent toujours un pH alcalin, avec pour la saison sèche 2006 des valeurs de pH > 10, des salinités relativement peu élevées avec des TDS entre 117.7 et 221.8 mg/l. Les caractéristiques chimiques montrent des teneurs en Mg très faibles voire inférieures à la limite de quantification, l'absence d'HCO₃ remplacés par CO₃ (en accord avec les valeurs de pH observées) ; des nitrates en très faible teneur. Contrairement à la saison des pluies 2005 où les teneurs en Ca, K et SO₄ étaient beaucoup plus importantes comparativement aux autres eaux, ces teneurs ont baissé et ne s'individualisent plus aussi nettement. Ces éléments en saison sèche 2006 montrent des teneurs semblables par rapport à l'ensemble des eaux prélevées lors de cette campagne.

Il est clair que ces trois ouvrages nécessitent plus de données (géochimie, environnement, aquifères, ...), ainsi que plus de recul pour être replacés dans le contexte hydrogéologique général de la Martinique. Un suivi à plus long terme (pompage de longue durée, suivi chimique et isotopique) serait à envisager pour comprendre ces fortes anomalies.

4. Etat hydrochimique des eaux souterraines de la campagne de prélèvements de la saison sèche 2006

4.1. FACIES HYDROCHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite).

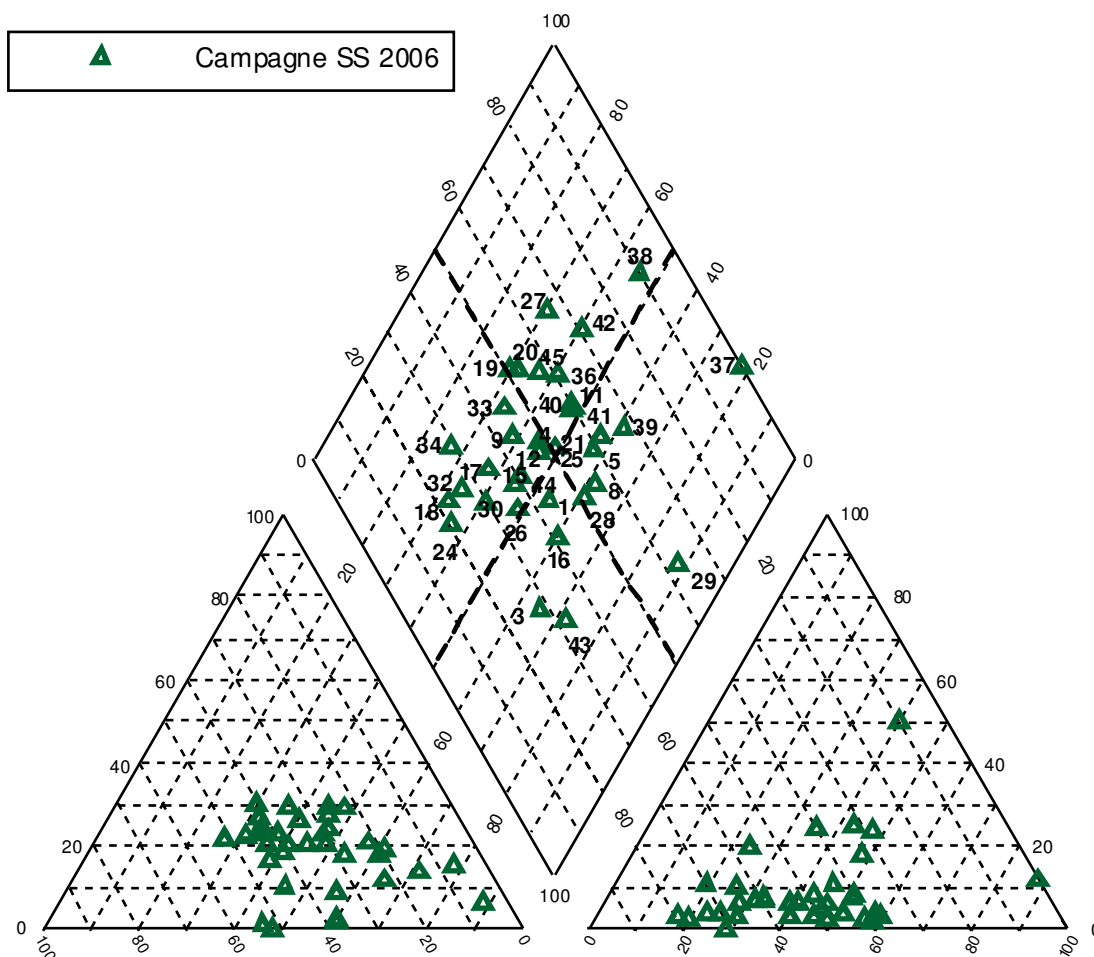


illustration 39 : Diagramme de Piper

La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique.

A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau minérale concernée :

- sommet du losange = faciès sulfaté/chloruré, calcique/magnésien,
- base du losange = faciès bicarbonaté, sodique,
- pointe droite du losange = faciès sulfaté/chloruré, sodique,
- pointe gauche du losange = faciès bicarbonaté, calcique/magnésien.

Ainsi, le diagramme de Piper permet, pour chaque piézomètre, et ainsi pour chacune des nappes suivies de connaître son faciès. Selon les nappes, les faciès peuvent être très différents, et il n'y a donc pas « un faciès » caractérisant les eaux souterraines de Martinique.

Chaque nappe a ses caractéristiques propres, principalement contrôlée par la géologie de l'aquifère et des caractéristiques hydrodynamique de la nappe (nappe libre ou captive par exemple). Il sera donc intéressant d'étudier le fond géochimique des eaux souterraines de Martinique (pour plus de renseignement sur le fond géochimique, consulter l'ouvrage « guide technique : qualité naturelle des eaux souterraines, méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français, 2006, éditions BRGM).

4.2. LE SEQ EAU

Ce chapitre est extrait du SEQ Eau souterraine, rapport de présentation, version 0.1 – Aout 2003, disponible en PDF sur Internet.

4.2.1. Introduction

Depuis 1971, la qualité des eaux des cours d'eau était évaluée en France à partir d'une grille qui associait, pour une série de paramètres physico-chimiques et hydrobiologiques, des valeurs seuils à 5 classes de qualité représentées par des couleurs. Cette grille permettait une évaluation sommaire de l'aptitude aux principaux usages et fonctions.

Pour les eaux souterraines, bien que certaines grilles aient été établies par certains organismes, pour leurs propres besoins, jusqu'à présent aucune grille n'avait fait l'objet d'une large adhésion chez les utilisateurs potentiels.

Les Agences de l'eau et le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement ont souhaité harmoniser, moderniser et enrichir le système d'évaluation de la qualité des cours d'eau et mettre en place pareillement, un système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines (SEQ Eaux souterraines) qui puisse

rendre compte de leur spécificité tout en restant cohérent avec le système mis au point pour les eaux superficielles.

Dans le cadre du programme d'étude inter-agences, un groupe de travail s'est constitué en 1994 pour l'élaboration d'un système d'évaluation (SEQ) faisant référence au plan national. Ce groupe, animé par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, était composé de représentants des autres agences, du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et des DIREN. En outre, la collaboration de deux chargés d'études a été sollicitée : SOGREAH pour la phase initiale et le BRGM pour l'élaboration de l'outil proprement dit.

La phase initiale a permis, par le biais d'une enquête, d'appréhender les pratiques et les besoins des utilisateurs potentiels de grilles d'évaluation de la qualité des eaux souterraines. Une revue critique des grilles utilisées au plan national et international a également été réalisée dans le cadre de cette phase initiale. L'enquête a confirmé la nécessité de créer un tel système et a proposé une démarche pour y parvenir. Cette démarche repose sur la notion de degré d'anthropisation tout en prenant en compte les potentialités relatives aux divers usages et fonctions de l'eau. Les attentes recueillies indiquent que l'outil issu de cette démarche doit permettre de comparer entre elles les eaux souterraines de l'ensemble du territoire et d'apprécier l'évolution de leur qualité.

L'une des difficultés dans l'évaluation de la qualité d'une eau réside dans le fait que cette notion est relative et qu'elle dépend des usages auxquels cette eau est destinée. Il n'existe pas a priori de qualité intrinsèque d'une eau mais des qualités d'eau qui permettent de satisfaire tel ou tel usage.

L'outil SEQ a été élaboré pour tenter d'évaluer le plus simplement possible, mais de manière rigoureuse, ce concept complexe de qualité d'une eau :

- la qualité de l'eau est définie par rapport à un certain nombre d'**usages** sélectionnés dans l'outil SEQ ;
- dans un but de simplification et de meilleure compréhension, les nombreux paramètres qui servent à appréhender la qualité d'une eau ont fait l'objet de regroupements appelés **altérations** ;
- enfin, afin de rendre plus explicite cette appréciation de la qualité de l'eau, il a été conçu un **indice de qualité** qui varie entre la valeur 100 (eau de la meilleure qualité) à la valeur 0 (la moins bonne).

4.2.2. La classe d'aptitude « production d'eau potable »

L'aptitude de l'eau à l'usage, pour l'altération considérée, est déterminée par le paramètre le plus déclassant, c'est-à-dire celui qui définit la classe d'aptitude la moins bonne.

L'adoption du système d'évaluation de la qualité des eaux pour la production d'eau destinée à l'alimentation en eau potable a fait l'objet de nombreuses réunions du groupe chargé de la conception du SEQ - Eaux souterraines. Les raisons à cela tiennent aux faits :

- que la production d'eau potable est un des usages majeurs des eaux souterraines,
- qu'en raison de cette importance, les valeurs seuils des différentes classes d'aptitude doivent être choisies de manière à être le moins possible sujet à discussion du fait des implications qu'elles sont susceptibles d'induire en matière de traitements correctifs. Une part importante des réunions a été consacrée à définir les règles de choix de ces valeurs seuils,
- qu'il a été souhaité qu'un maximum de cohérence soit recherché entre les SEQ "Eau des cours d'eau" et "Eau souterraine". Ce souci de cohérence s'est adressé à la fois à la définition des classes d'aptitude de l'eau aux différents usages et au choix des valeurs seuils des altérations.

La démarche choisie, pour définir les classes d'aptitude à la production d'eau potable, s'appuie sur :

- les réglementations française et européenne qui sont retenues comme prioritaires pour définir les seuils bleu/jaune d'aptitude à la consommation et jaune/rouge d'inaptitude à la production d'eau potable,
- le point de vue du traiteur et du distributeur d'eau pour définir les seuils d'aptitude aux traitements.

Les classes d'aptitude "**bleu clair**" et "**bleu foncé**" correspondent à des **eaux conformes à la réglementation française ou à la directive européenne 98/83 sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine**.

La classe "**bleu clair**" permet d'identifier des eaux dont les différents paramètres de qualité sont significativement en deçà de ces normes (**eau de qualité optimale pour être consommée**).

La classe "**bleu foncé**", quant à elle, identifie des eaux dont les valeurs des différents paramètres de qualité se rapprochent des normes de potabilité tout en restant inférieur à ces normes (**eau de qualité acceptable pour être consommée, mais pouvant le cas échéant faire l'objet d'un traitement de désinfection**).

- La classe d'aptitude "**jaune**" correspond à la nécessité de faire subir un traitement correctif à l'eau pour la rendre conforme aux normes de potabilité, quel que soit le type de traitement à appliquer ;
- La classe d'aptitude "**rouge**" correspond à des eaux dont la qualité les rend inaptés à la production d'eau potable en regard de la réglementation.

Les seuils issus de la législation ont été prioritairement appliqués. Lorsque la CMA_d était égale à la CMA_b (Concentrations maximums admissibles dans les eaux distribuées) (cas des sulfates par exemple), il y a passage direct de la classe bleu foncé à la classe rouge.

Origine des seuils du SEQ :

- *Décret français n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine,*
- *Directive européenne 98/83/CE du 3 novembre 1998 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, parue au journal officiel des Communautés européennes du 5/12/98,*
- *Décret français n°89-3 du 3 janvier 1989, modifié par les décrets n°90-330, 91-257 et 95-363, sur les eaux destinées à la consommation humaine,*
- *Directive européenne n°80-778 de juillet 1980 sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine,*
- *Directive européenne n°75-440 de juin 1975 sur la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire,*
- *Recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé de 1994 sur les eaux de boisson,*
- *Avis d'experts.*

4.3. CARTOGRAPHIE SYNTHETIQUE

Les cartes n°2 « Saison sèche 2006 - analyses physico-chimiques » et n°3 « Saison sèche 2006 - analyses des produits phytosanitaires » synthétisent les analyses de la campagne en saison sèche 2006. Elles permettent de hiérarchiser les ouvrages selon leurs teneurs en éléments au regard de la potabilité de l'eau.

Le SDAGE stipule que les eaux souterraines de Martinique doivent être privilégiées pour l'alimentation en eau potable (AEP). Ainsi, les critères qui ont été appliqués pour réaliser cette carte sont ceux de la grille du « SEQ eau souterraine v0 » (cf. Chapitre précédant).

Pour la carte n°2 « Saison sèche 2006 - analyses physico-chimiques », les différentes classes d'aptitude pour l'usage production d'eau potable sont les suivantes :

- en bleu : eau de qualité acceptable pour être consommée mais pouvant faire l'objet d'un traitement de désinfection
- en jaune : eau non potable nécessitant un traitement de potabilisation

- en rouge : eau inapte pour l'alimentation en eau potable,

Pour la carte n°3 « Saison sèche 2006 - analyses des produits phytosanitaires », une classe d'aptitude est représentée :

- en rouge : eau inapte pour l'alimentation en eau potable

Il s'agit de points contaminés par les produits phytosanitaires, avec des concentrations supérieures aux normes.

Ces cartes dressent ainsi un état de la qualité des eaux souterraines de Martinique en saison sèche 2006.

On peut distinguer les éléments limitant naturels comme le fer, le manganèse, l'arsenic mais aussi les chlorures qui correspondent au fond géochimique de Martinique. D'un autre côté, les chlorures, le potassium et le cuivre, en cette saison sèche 2006, n'ont été retrouvés qu'une seule fois avec des valeurs supérieures aux normes « eaux brutes ». Ces valeurs correspondraient surtout à des « effets de sites » plutôt qu'à une représentativité de l'état qualitatif des masses d'eau.

Enfin, on distingue les produits phytopharmaceutiques pour lesquels des actions spécifiques doivent être menées : réglementation ou interdiction des usages, suivi et retrait des stocks de produits interdits, sensibilisation pour un usage raisonné...

5. Conclusion

5.1. PHYSICO-CHIMIE

En Martinique, la qualité physico-chimique des eaux souterraines est plutôt bonne : plus de 50 % des sites montrent une bonne qualité physico-chimique pour cette campagne de saison sèche 2006, avec des concentrations inférieures aux normes des eaux brutes destinées à l'alimentation en eau potable.

Néanmoins, le fer et le manganèse présents dans l'eau dépasse cette norme « eaux brute » pour 20% des sites.

Pour cette campagne en saison sèche 2006, les chlorures ne sont présents que sur le site des Trois llets - Vatable avec une concentration supérieure aux normes de potabilité. Néanmoins, les chlorures et le sodium restent présents sur la majorité des sites proches du littoral (69%) avec un concentration dans la norme des eaux brutes destinées à l'AEP. Ceci met en évidence l'importance de la connaissance et du suivi du biseau salé et/ou de la présence d'eaux salées à proximité du littoral.

Enfin, certains sites montrent encore des concentrations supérieures à la limite autorisée pour les « eaux brutes » en certains éléments (nitrites, cuivre, potassium, arsenic) correspondant à des pollutions anthropiques et/ou à des spécificités hydrogéologiques et géochimiques localisées.

Le fait de retrouver de nouveau, lors de la saison sèche 2006, et pour certains éléments, des concentrations proches en dépit des états hydrologiques différents, permet de penser que les analyses sont cohérentes. D'autre part cela confirme aussi que ces ressources en eau correspondent à des réservoirs de taille importante. En effet, les suivis, réalisés en saison des pluies et en saison sèche, ont permis jusqu'à présent de montrer la faible variation des paramètres chimiques dans les eaux souterraines. Il est donc possible d'envisager l'existence de ressources en eau de taille suffisamment importante pour permettre de tamponner les entrants en période de pluies.

La mise en œuvre d'un réseau de suivi périodique qui permet d'obtenir un état de référence de la qualité des eaux souterraines, constitué par plusieurs mesures faites à des pas de temps réguliers et donnant des résultats similaires ou cycliques, semble donc pertinente.

5.2. PRODUITS PHYTOSANITAIRES

120 produits phytosanitaires ont été analysés sur 10 sites lors de la campagne de prélèvement de 2006. Sur ces 10 sites, 7 avaient déjà été analysés lors de la précédente campagne et avaient révélé une contamination. Les 3 nouveaux sites choisis en raison de leur niveau de risque par rapport à une pollution se sont tous révélés eux aussi pollués.

Tous les sites échantillonnés en avril 2006 se révèlent pollués par au moins une molécule, systématiquement à des teneurs supérieures à la norme de potabilité. Certains produits sont interdits à l'usage depuis de nombreuses années comme le chlordécone ou la dieldrine. D'autres produits, dont l'usage est actuellement autorisé, sont également retrouvés en quantité importante.

Malgré sa limite de quantification élevée (0.2 µg/l) par rapport à celles des autres molécules détectées, le chlordécone apparaît comme la molécule la plus fréquemment détectée (7 fois sur 10) et avec la concentration la plus élevée mesurée au Lorrain Fond Brulé. Le Beta-HCH (détecté 5 fois sur 10) apparaît comme la deuxième molécule la plus fréquemment détectée mais à des teneurs moindres. Ces observations résultent du long historique d'usage de ces molécules ainsi que de leur persistance dans le milieu naturel. Le bromacil (herbicide utilisé sur l'ananas interdit depuis 2003), quant à lui, se retrouve à des concentrations exceptionnellement élevées sur les 2 piézomètres de Basse Pointe.

Les 9 autres molécules se retrouvent à des concentrations moindres (<0.5 µg/l), mais restent tout autant problématique. Par exemple la dieldrine que l'on retrouve sur 4 sites est interdite depuis 1972.

Il n'est pour l'instant pas possible, avec les quelques valeurs acquises depuis 2004, de décrire des tendances d'évolution de la qualité de l'eau souterraine. Il est nécessaire de continuer l'acquisition de données régulières afin de connaître l'évolution temporelle de la concentration des produits phytosanitaires détectés. La stratégie d'échantillonnage qui consiste à ne suivre que les points contaminés a conduit à une évolution perpétuelle de la liste de points échantillonnés. En conséquence seulement 4 points ont fait l'objet d'au moins 4 campagnes de mesures.

Parallèlement, le suivi des niveaux piézométriques (ou de débit des sources) informant sur l'hydrodynamique de l'aquifère d'une manière globale et plus spécifiquement lors des prélèvements, est lui aussi très récent voire inexistant (pour les sources notamment). Cette absence de connaissance sur le fonctionnement des aquifères rend encore plus difficile l'interprétation des données phytosanitaires notamment en terme de tendance.

Il semble que, selon les cas, l'eau d'infiltration plus récente (recharge) soit plus ou moins contaminée en phytosanitaires engendrant une baisse ou à l'inverse une augmentation des teneurs dans la nappe ; la composition de l'eau d'infiltration étant

affectée par la disponibilité ou non des produits contaminés dans le sol et la zone non saturée (incidence des pratiques culturales, propriétés physico-chimiques des molécules, hydrodynamique,...). Le nombre très restreint d'observations engendre bien évidemment la plus grande prudence dans ces premières pistes d'interprétation.

Ces aspects hydrodynamiques doivent être étudiés parallèlement à l'acquisition de données spécifiques aux phytosanitaires. Le devenir (dégradation, sorption,...) de certaines des molécules sur lesquelles peu d'information existe (molécules anciennes comme le chlordécone, ou à l'inverse molécules nouvellement homologuées) et notamment dans le contexte tropical reste souvent mal connu.

A ce jour l'interprétation des données observées ne peut être que restreinte. 100 % des points suivis font l'objet d'une contamination par les produits phytosanitaires, chiffre qu'il convient de nuancer dans la mesure où les points suivis ont volontairement été sélectionnés pour mettre en évidence une contamination (seuls les points contaminés font l'objet d'une nouvelle campagne d'analyses, les points retenus sont choisis dans des secteurs a priori plus à risque). Le chlordécone et le beta-HCH sont les molécules les plus fréquemment retrouvées.

6. Bibliographie

Berner-Kay, E., Berner, R.A. 1987. The Global Water Cycle. Geochemistry and Environment. Prentice Hall, 396 p.

Blum A., Chery L., Barbier J., Baudry D., Petelet-Giraud E., 2002. Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final, Rapport BRGM RP-51549-FR, 5 volumes.

Code de la Santé Publique, livre III, titre II, chapitre 1^{er} Eaux potables.

Comte J-P., Charguéron C., Négrel Ph. (2004) –. Qualité des eaux souterraines de Martinique : état de référence pour un réseau de surveillance. BRGM/RP52997-FR, 59p., 12 tableaux, 21 figures, 4 annexes.

Cottez S., Mouret C., 1977. Etude hydrogéologique au Robert et dans la presqu'île des Trois Ilets – Compte rendu d'exécution des sondages et des pompages. Rapport BRGM 77A NT3.

Décret du 3 janvier 1989 « relatif aux eaux destinées à la consommation humaine à l'exclusion des eaux minérales naturelles ». Annexes 1.1 et 1.3 pour limites d' « usage sensible ». Annexe 3 pour les limites d' « usage non sensible ».

Desprats JF, Comte JP, Chabrier Ch (2004) FR – cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés – phase 3. BRGM/RP-53262.

Direction de la Santé et de la Direction Sociale de la Martinique – Analyses 2003 effectuées par la DSDS sur les eaux prélevées pour L'Alimentation en Eau Potable. Pour les éléments suivants : physico-chimie, métaux, 5 molécules phytosanitaires, phosphates et nitrates.

Directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000.

Fiquet, Lallier, Riou, Sanjuan (1997) : Caractérisation des excès d'aluminium dans les eaux superficielles de la Martinique – 31 p, 10 figures, 6 tableaux, 5 annexes, rapport R 39359 ANT 97

Gaillardet, J., Dupre, B., Allegre, C.J., Négrel, PH. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. Chem. Geol. 142: 141-173.

Gustafson D.I., 1989. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. Environmental Toxicology and Chemistry, 8 : 339-357.

INDEX PHYTOSANITAIRE ACTA 2005.

Malcuit E, Vittecoq B, Baran N, Negrel Ph, (2006) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, campagne de saison des pluies 2005 : résultats et comparaison avec la 1^{ère} campagne de basses eaux (2004) et 1^{ère} campagne de saison des pluies (2004). BRGM/RP-54717-FR. 101 pages, 7 tableaux, 47 figures, 2 photos, 4 cartes, 1 annexe.

MEYBECK, M., 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués en France. Sci. Géol. Bull. 39, 1: 3-77.

Négre, Ph, Allègre, C.J., Dupré, B., Lewin, E. 1993. Erosion sources determined from inversion of major, trace element ratios and strontium isotopic ratio in river water: the Congo Basin case. Earth, Planet. Sci. Lett. 120: 59-76.

Négre, Ph., Lachassagne, P., Laporte, P. 1997. Caractérisation chimique et isotopique des pluies de Cayenne (Guyane Française). C.R. Académie des Sciences 324: 379-386.

Négre, Ph., Millot, R., Robert, M., Cocherie, A. 2006. Traçage isotopique du plomb dans les eaux : mesure directe par MC-ICP-MS et exemples d'application. SFIS - Société française des Isotopes stables - Nantes - France - 11-14/09/2006, pp 244.

Négre, Ph., Petelet-Giraud, E., Casanova, J., Kloppmann, W. 2002. Boron isotope signatures in the coastal groundwaters of French Guiana. Water Resources Research. 10.1029/2002WR001299.

Paulin Ch., 1979. Recherche d'eau souterraine en Martinique. Résultats de la campagne de reconnaissance par sondages mécaniques. Rapport BRGM 79A NT20.

SEQ eau souterraines version 0 – les études des agences de l'eau n°80 ou plus facile à avoir : <http://www.rnde.tm.fr/francais/frame/acgen.htm?page=%27../ac/seq/seq0005.htm%27>

Stollsteiner P., Lachassagne P., Paulin Ch., Neel F. (2000) – Bilan des connaissances hydrogéologiques de la Martinique – Volume 1 – Rapport BRGM RP-50 071-FR, 137 p., 1 fig., 7 tab., 5 annexes, 1 annexe hors texte

Vittecoq B, Negrel Ph, (2005) – Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique, 2^{ème} campagne 2004 (saison des pluies) : résultats et comparaison avec la 1^{ère} campagne de basses eaux. BRGM/RP-53838-FR. 63 pages, 4 tableaux, 27 figures, 6 cartes, 3 annexes.

Annexe 1

Tableau des résultats des analyses

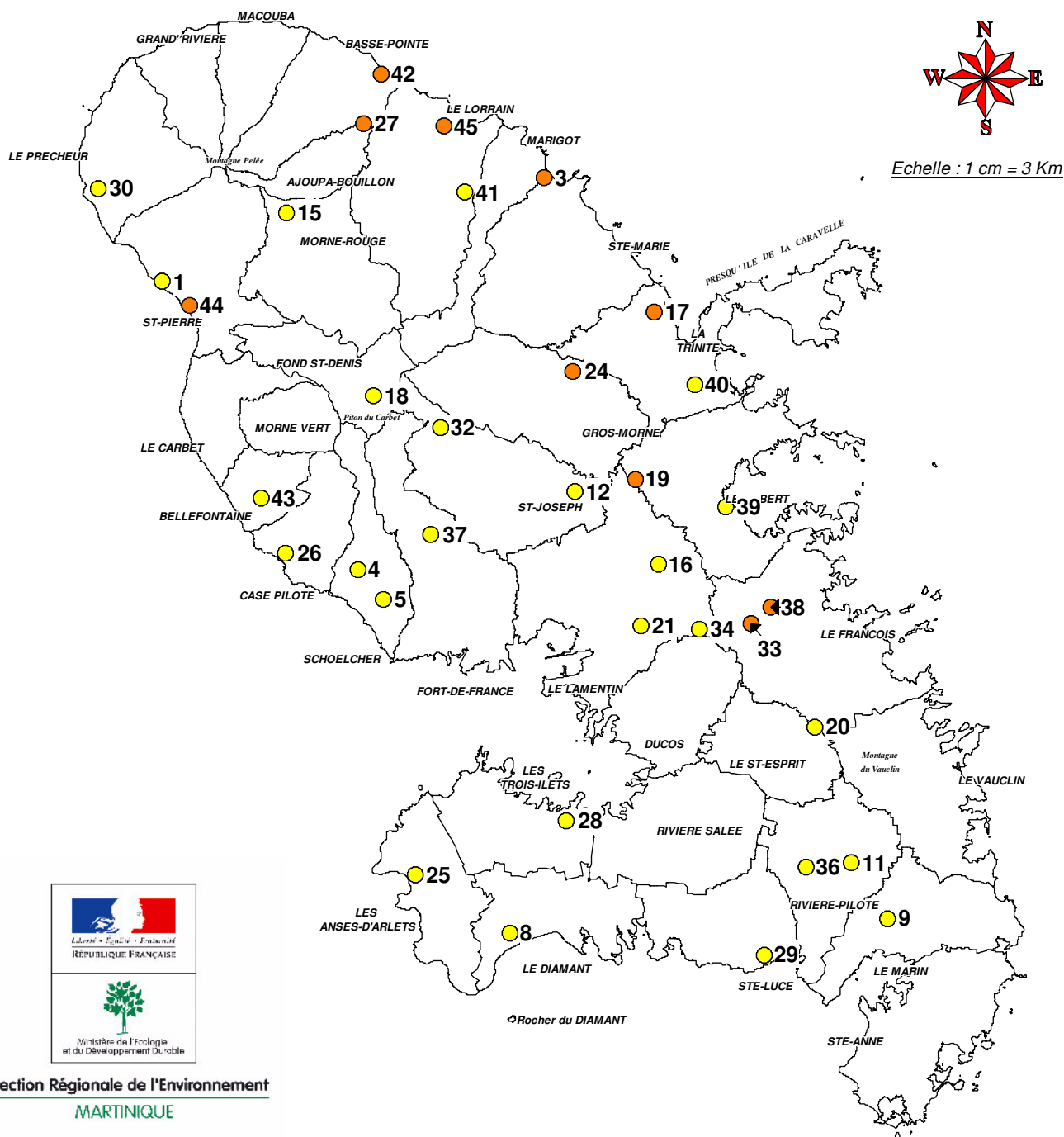
N° terrain 2004	n° BSS	Type d'analyses SS 2006	Date du prélèvement SS 2004	Date du prélèvement SP 2004	Date du prélèvement SP 2005	Date du prélèvement SS 2006	Type	Commune	Lieu dit	X	Y
9	1186ZZ0118	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	11/01/04	26/10/04	18/11/05	20/04/06	Piézomètre	Marin	Grand Fond	729040.1	1602330.0
11	1183ZZ0052	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	30/01/04	26/10/04	18/11/05	20/04/06	Piézomètre	Rivière Pilote	Fougainville	727295.6	1604983.9
36	1183ZZ0024	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	X	X	18/11/05	20/04/06	Piézomètre	Rivière Pilote	La Mauny	725109.0	1604786.3
29	1185ZZ0120	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	25/03/04	26/10/04	18/11/05	27/04/06	Piézomètre	Ste Luce	Stade communal	723102.7	1600563.4
27	1168ZZ0054	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	29/03/04	22/10/04	21/11/05	25/04/06	Piézomètre	Basse Pointe	Rivière Falaise	703854.8	1640502.1
3	1169ZZ0006	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	06/01/04	22/10/04	21/11/05	25/04/06	Piézomètre	Marigot	Anse Charpentier	712530.7	1637909.3
17	1175ZZ0153	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	21/01/04	27/10/04	21/11/05	26/04/06	Source	Trinité	Morne Figue	717831.6	1631449.2
24	1174ZZ0088	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	06/02/04	22/10/04	21/11/05	28/04/06	Piézomètre	Gros Morne	La Borelli	713936.1	1628627.1
30	1167ZZ0024	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	06/04/04	25/10/04	22/11/05	21/04/06	Piézomètre	Prêcheur	Rivière du Prêcheur	691089.5	1637393.7
1	1167ZZ0023	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	06/01/04	25/10/04	22/11/05	21/04/06	Piézomètre	Saint Pierre	Rivière Blanche	694182.4	1632933.9
26	1177ZZ0173	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	29/03/04	25/10/04	22/11/05	19/04/06	Piézomètre	Case Pilote	Maniba	700126.5	1619880.2
4	1177ZZ0161	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	07/01/04	25/10/04	24/11/05	18/04/06	Piézomètre	Schoelcher	Fond Lahaye	703597.4	1619099.7
5	1177ZZ0165	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	13/01/04	25/10/04	24/11/05	24/04/06	Piézomètre	Schoelcher	Case Navire	704803.6	1617676.2
12	1174ZZ0087	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	15/01/04	20/10/04	24/11/05	24/04/06	Piézomètre	Saint Joseph	La Charmille	714013.7	1622831.0
20	1183ZZ0053	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	20/01/04	26/10/04	24/11/05	05/05/06	Source	Saint Esprit	Source Caraïbe	725538.3	1611528.7
8	1184ZZ0016	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	08/01/04	26/10/04	25/11/05	05/05/06	Forage exploité	Diamant	Habitation Dizac	710881.8	1601610.8
25	1181ZZ0131	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	25/03/04	26/10/04	25/11/05	27/04/06	Piézomètre	Anses d'Arlet	Grande Anse	706369.6	1604409.9
28	1181ZZ0132	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	25/03/04	19/10/04	25/11/05	27/04/06	Piézomètre	Trois Ilets	Vatable	713619.5	1607019.4
21	1179ZZ0070	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	06/02/04	20/10/04	25/11/05	27/04/06	Piézomètre	Lamentin	Habitation Ressource	717200.5	1616358.7
16	1179ZZ0158	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	23/01/04	20/10/04	25/11/05	24/04/06	Piézomètre	Lamentin	Sarrault	718049.8	1619358.6
37	EP/RODATE	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	X	X	08/12/05	25/04/06	eau de pluie	Fort de France	Rodate	707109.0	1620790.0
34	1179ZZ0282	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	05/04/04	25/11/04	09/12/05	20/04/06	Source	Lamentin	Morne Pitault La Frédée	720019.0	1616242.0
33	1179ZZ0228	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	05/04/04	25/11/04	09/12/05	05/05/06	Forage d'exploitation	François	La Victoire	722462.0	1616514.0
38	1179ZZ0299	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	X	X	09/12/05	26/04/06	Piézomètre	François	Grand Fond	723380.0	1616705.0
39	1179ZZ0300	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	X	X	09/12/05	26/04/06	Piézomètre	Robert	Pontalery	721295.0	1622109.5
40	1175ZZ0154	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	X	X	09/12/05	26/04/06	Piézomètre	Trinité	Le Galion	719772.0	1627983.0
32	1174ZZ0089	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	06/04/04	25/11/04	12/12/05	04/05/06	Source	Saint Joseph	Coeur Bouliki	707578.8	1625925.8
41	1169ZZ0082	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	X	X	12/12/05	04/05/06	Source	Lorrain	Source Carabin	708738.0	1637216.0
42	1166ZZ0026	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	X	X	12/12/05	25/04/06	Piézomètre	Basse Pointe	Chalvet	704700.0	1642890.0
15	1168ZZ0055	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	20/01/04	22/10/04	12/12/05	21/04/06	Source	Morne Rouge	Habitation Citron	700137.3	1636204.0
18	1173ZZ0076	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	20/01/04	22/10/04	12/12/05	04/05/06	Source	Fond Saint Denis	Source de l'Alma	704330.5	1627423.4
19	1175ZZ0106	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	21/01/04	25/11/04	26/01/06	04/05/06	Forage d'exploitation	Gros Morne	Vert Pré	716936.6	1623425.4
43	1173ZZ0082	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr)	X	X	30/01/06	19/04/06	Piézomètre	Bellefontaine	Fond Laillet	698915.0	1622510.0
44	1167ZZ0045	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	X	X	30/01/06	24/04/06	Piézomètre	St Pierre	CDST	695500.0	1631760.0
45	1169ZZ0084	physico, métaux, isotopes (B, H ₂ O, Sr), phyto	X	X	30/01/06	25/04/06	Piézomètre	Lorrain	Fond Brulé	707735.0	1640405.0
35	1167ZZ0031	physico	06/04/04	27/10/04	X	X	Piézomètre	Saint Pierre	Pécoul	696457.6	1631822.3
23	1167ZZ0037	physico	17/02/04	25/10/04	X	X	Piézomètre	Saint Pierre	Fond Canonville	692760.2	1634724.6
2	1168ZZ0037	physico	06/01/04	22/10/04	X	X	Piézomètre	Morne Rouge	Desgrottes	702106.0	1632646.8
14	1173ZZ0072	physico	13/01/04	22/10/04	X	X	Piézomètre	Fort de France	La Médaille	705248.7	1625654.7
22	1179ZZ0157	physico	04/02/04	25/11/04	X	X	Piézomètre	Ducos	Bois Rouge	718891.8	1614819.9
6	1183ZZ0026	physico	09/01/04	19/10/04	X	X	Piézomètre	Vauclin	Puyferrat	732205.3	1604411.4
7	1184ZZ0001	physico	08/01/04	26/10/04	X	X	Piézomètre	Diamant	Habitation Dizac	710708.0	1601762.2
13	1185ZZ0121	physico	20/01/04	26/10/04	X	X	Source	Sainte Luce	Source du Riz	723017.5	1603438.1
10	1186ZZ0119	physico	08/01/04	19/10/04	X	X	Piézomètre	Marin	Cap Macré	732151.8	1601814.4

unité
bleu claire - max eau distribuée
bleu foncé - max eau brute
jaune - max pour traitement physico chimique
rouge - eau inapte à la production d'eau potable
Limite de quantification
Unité de limite de quantification

Annexe 2

Cartes de suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique

Carte n° 1 : Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique - Saison sèche 2006 - Type d'analyses et localisation des prélèvements



Direction Régionale de l'Environnement
MARTINIQUE

Légende :

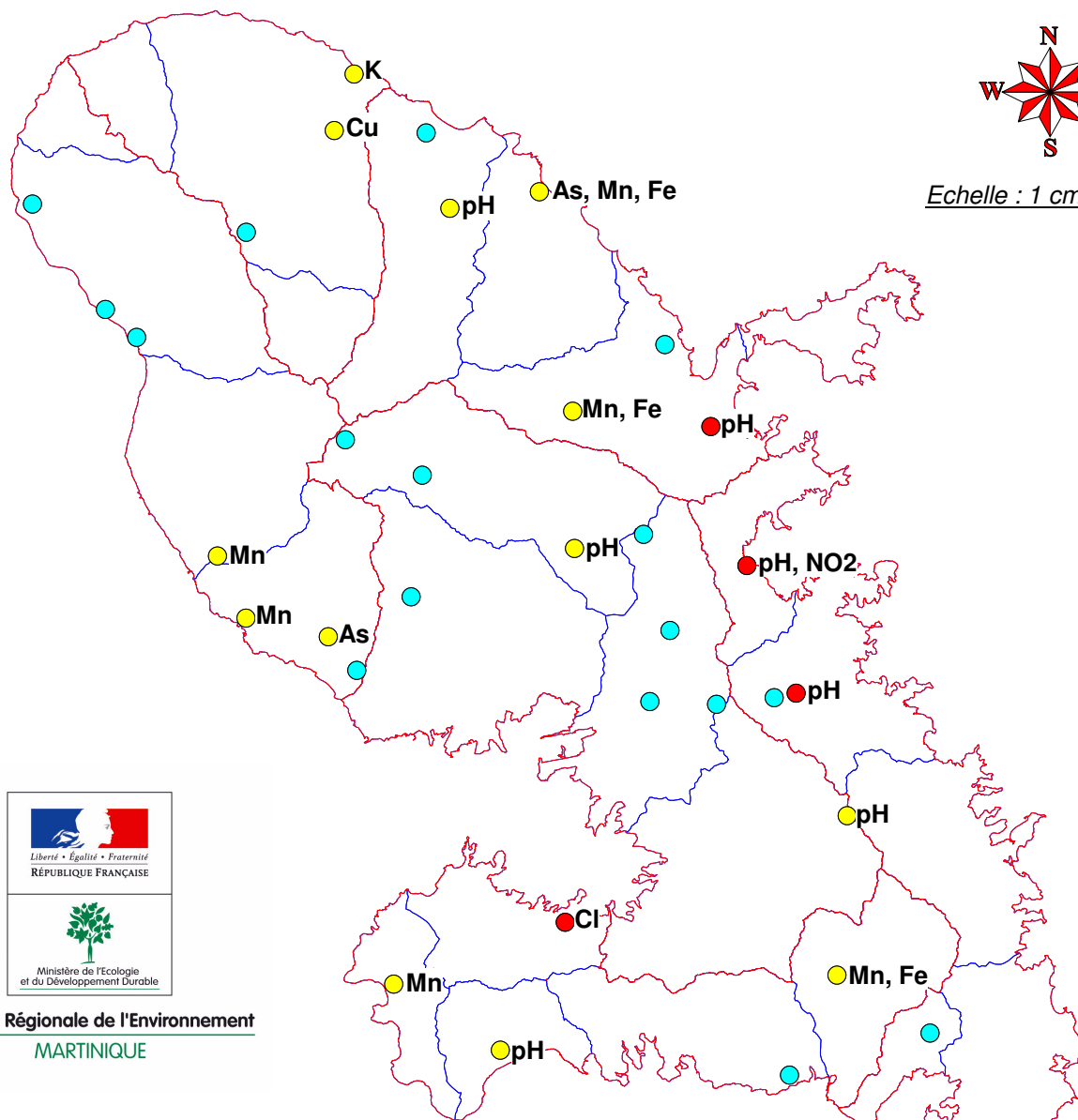
— Limite des communes

Type d'analyses réalisées

- éléments majeurs, traces et métaux (25)
- éléments majeurs, traces, métaux et produits phytosanitaires (10)



Carte n° 2 : Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique - Saison sèche 2006 - Analyses physico-chimiques



Direction Régionale de l'Environnement
MARTINIQUE

Légende

- Limite des masses d'eau souterraine
- Limites hydrogéologiques

Classes d'aptitude pour l'usage production d'eau potable - SEQ ESO v0

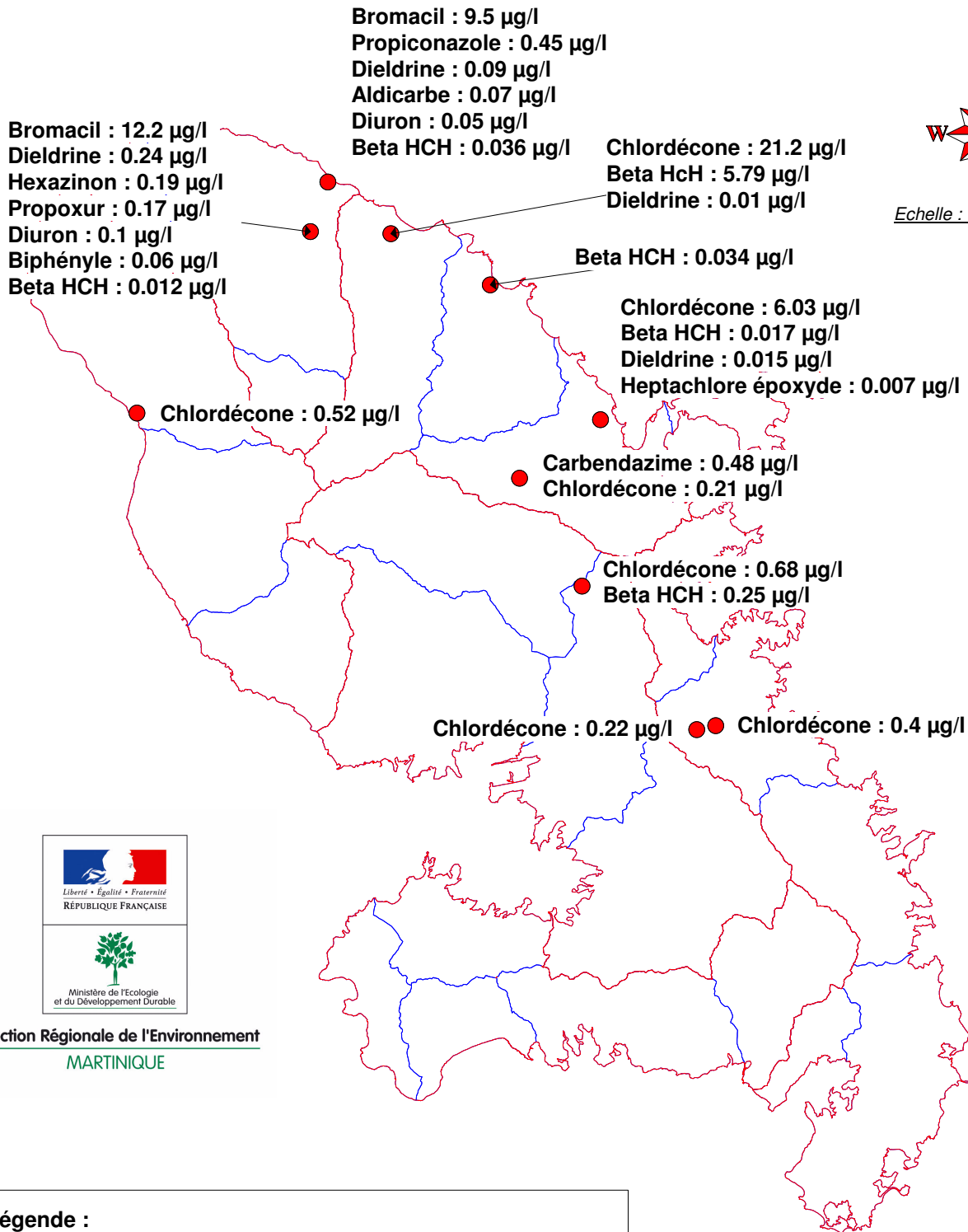
- eau de qualité acceptable pour être consommée * (18)
- Eau non potable nécessitant un traitement de potabilisation (13)
- Eau inapte à la production d'eau potable (4)

* uniquement selon les paramètres mesurés, et pouvant, le cas échéant, faire l'objet d'un traitement de désinfection (les produits phytosanitaires et la bactériologie ne sont pas pris en compte sur cette carte)



Pour chaque station sont indiqués les paramètres déclassant :
Le fer (Fe), le manganèse (Mn), l'arsenic (As) et dans une moindre mesure les chlorures (Cl)
sont présent naturellement dans les eaux souterraines de Martinique
Les nitrites (NO₂), potassium (K) et cuivre (Cu) sont d'origine anthropique
Le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une eau, il se corrige facilement pour un usage AEP

Carte n° 3 : Suivi de la qualité des eaux souterraines de Martinique - Saison sèche 2006 - Analyses des produits phytosanitaires



Direction Régionale de l'Environnement
 MARTINIQUE



Légende :

- Limite des masses d'eau souterraine
- Limites hydrogéologiques

Classe d'aptitude pour l'usage production d'eau potable SEQ ESO v0

- eau inapte à la production d'eau potable (10)

Annexe 3

Informations générales sur les molécules phytosanitaires détectées

Les informations portées dans les paragraphes suivants sont extraites principalement de la base de données « e-phy » gérée par le Ministère de l'Agriculture et « PAN » géré par le Pesticide Action Network North America.

➤ **Le 2,4,D (2,4-dichlorophenoxy acide acétique)**

Le 2,4,D (sel d'amine, de diméthylamine ou ester de butyl glycol) est un herbicide généralement utilisé dans les champs de canne à sucre.

➤ **L'Atrazine**

L'Atrazine est un herbicide de la famille des Chlorotriazines, utilisé généralement pour l'entretien des espaces verts et les bords de route ; cet herbicide est utilisé en Martinique dans les champs de canne à sucre. Il est interdit depuis le 1^{er} octobre 2003. Sa demi-vie dans le sol est de 60 jours.

➤ **Le Bromacil**

Le Bromacil est un herbicide utilisé pour combattre les graminées et les broussailles, il est généralement utilisé dans les champs d'ananas. Le Bromacil est officiellement interdit depuis l'année 2003. La durée de demi-vie (DT50 -durée nécessaire pour que 50% du produit soit dégradé) du bromacil est de 346 jours selon la base de donnée PAN.

➤ **Le Chlordécone**

Le chlordécone (commercialisé dans deux formulations commerciales dénommées Curlone et Képone) est un insecticide organochloré interdit depuis 1993 dans les DOM. Il fut utilisé pour lutter contre le charançon du bananier. Les effets du chlordécone sur la santé sont multiples : troubles neurologiques, stérilité....

➤ **La Dieldrine**

La dieldrine est un insecticide hautement toxique pour les organismes aquatiques et est très persistante dans le milieu naturel. En outre, elle provoque également de sérieuses intoxications chez l'homme. Son usage est officiellement interdit depuis 1972. En théorie, entre 75 et 100% de la dieldrine sont dégradés ou décomposés en l'espace de 3 à 25 ans. La dieldrine est classée comme probablement cancérigène pour l'homme (foie, seins).

➤ **Le Diuron**

Le diuron est un herbicide systémique de la famille des urées substituées pour le désherbage des zones non agricoles, ainsi que des cultures types bananes, cannes à sucre et ananas. Sa demi-vie dans le sol est de 90 jours. L'usage de diuron est autorisé, mais avec des restrictions d'usage. Le ministre de l'agriculture, par décisions

des 15 février et 4 juillet 1997, a interdit l'emploi du diuron seul pour le désherbage des zones non agricoles.

Le diuron a une faible toxicité aiguë. Les effets toxiques observés chez les animaux sont la perte de poids et des anomalies du sang, du foie et de la rate.

➤ **Heptachlore époxyde**

L'heptachlore est un insecticide qui agit par contact, et est utilisé essentiellement contre les insectes rampants et les termites. L'heptachlore est présent sous forme d'impuretés dans le Chlordane, utilisé comme insecticide dans les champs de bananes. L'heptachlore époxyde est un produit de dégradation de l'heptachlore.

L'heptachlore époxyde a des effets cancérogènes démontrés chez l'animal. Chez l'homme, il s'accumule essentiellement dans les tissus adipeux mais aussi dans le foie, les reins et les muscles. Il a été démontré que, chez la femme, l'heptachlore traversait le placenta pour atteindre le fœtus en développement.

➤ **Hexazinone**

L'hexazinon est un herbicide organoazoté interdit au 31 décembre 2003, mais avec des dérogations au 31 décembre 2007 pour la canne à sucre notamment. Sa demi-vie dans le sol est de 90 jours. Il est classé comme moyennement toxique.

➤ **Propiconazole**

Le propiconazole est un fongicide généralement utilisé par traitement aérien pour lutter contre la cercosporiose (champignon réduisant la production) des bananiers.

➤ **Les hexachlorocyclohexanes (HCH)**

Les hexachlorocyclohexanes ont été utilisés pour lutter contre le charançon du bananier. Leur emploi est actuellement interdit. (1997 pour le Gamma HCH).

Les isomères du HCH ont principalement des effets hépatiques (augmentation des enzymes hépatiques sanguines) et des effets endocriniens (altération des niveaux d'hormones sexuelles). Il est possible que l'exposition au lindane ait des effets cancérogènes.

Le lindane serait encore utilisé comme insecticide (anti-poux, anti-puces...) dans les hôpitaux et les écoles. Les quantités utilisées ne sont pas connues et cette information est à vérifier.

➤ **La Carbendazime**

La Carbendazime est un fongicide systémique servant à détruire maints pathogènes des céréales, des fruits, des plantes ornementale et des légumes. Ce fongicide est absorbé par les organes verts et les racines des végétaux et véhiculé par le courant de

sève brute. Son action peut être préventive en empêchant l'installation du champignon ou curative en limitant son développement et en empêchant sa sporulation. Sa persistance d'action est de l'ordre de 2 à 3 semaines (Source : index phytosanitaire Acta 2005) Les formulations commerciales en renfermant se présentent essentiellement sous forme de poudres mouillables ou de liquides pour pulvérisation.

Effets sur la santé : les seules observations disponibles rapportent des modifications au niveau du sang, de l'intestin, des testicules, du thymus et de la moelle osseuse, après administration de 500 mg/kg chez le rat. Il n'existe pas de publication d'intoxication chronique ou aiguë chez l'homme. (Source : fiche toxicologique n°214 de l'INRS).

➤ **Aldicarbe**

L'aldicarbe est un insecticide de la famille des carbamates. Il fut utilisé en Martinique notamment en banane comme nématicide mais il fut aussi utilisé dans les cultures légumières (avec de forts risques de résidus en récolte). Il s'agit d'une molécule connue pour présenter un risque de présence dans les eaux souterraines. La constante de sorption (K_{oc}) est de 239, le temps de demi-vie court (environ 2 jours).

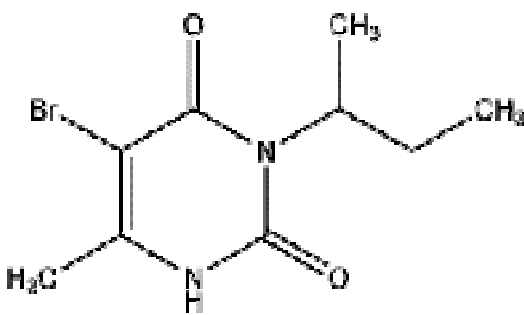
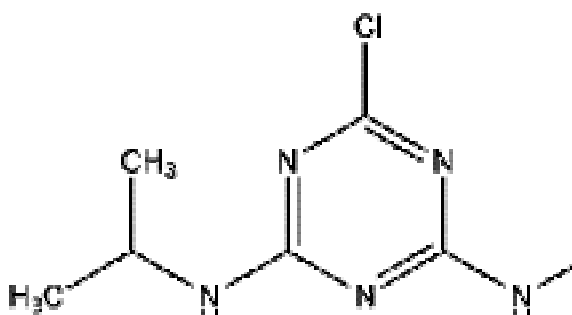
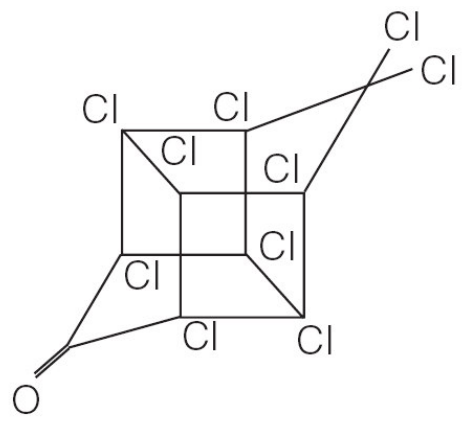
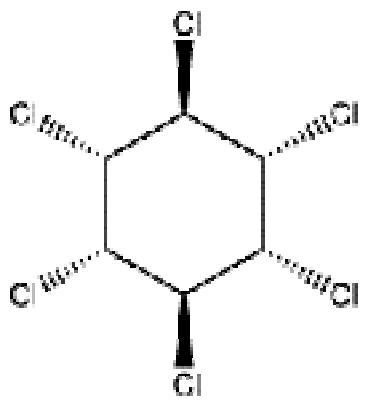
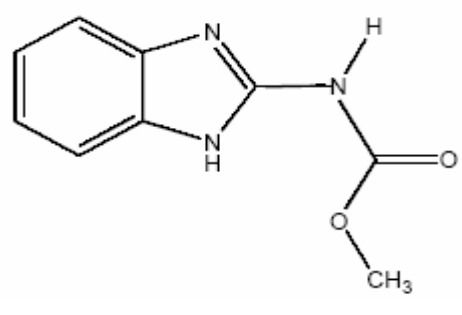
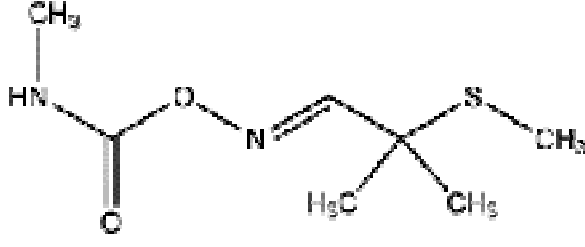
Ce produit a été interdit par le SPV par arrêté préfectoral le 24 décembre 2002 puis au niveau national le 31 décembre 2003 avec délai d'utilisation jusqu'en juin 2004.

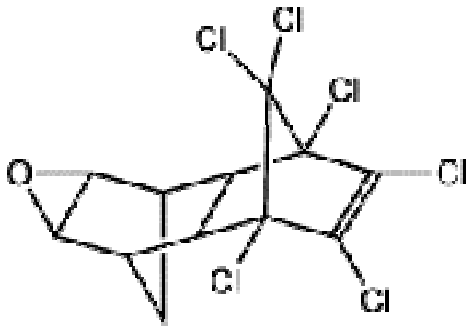
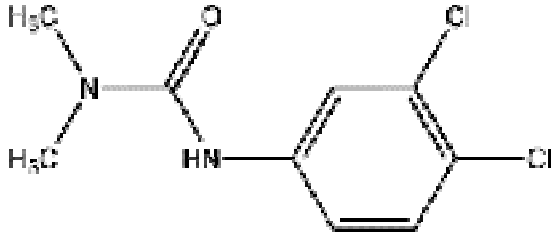
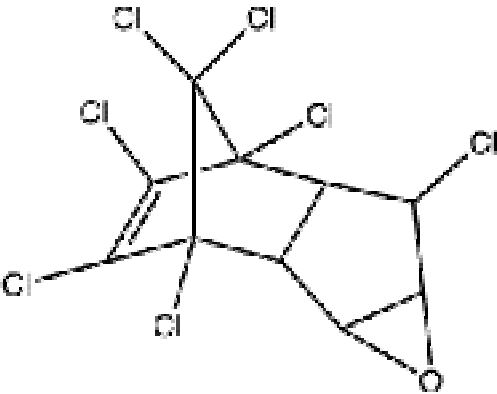
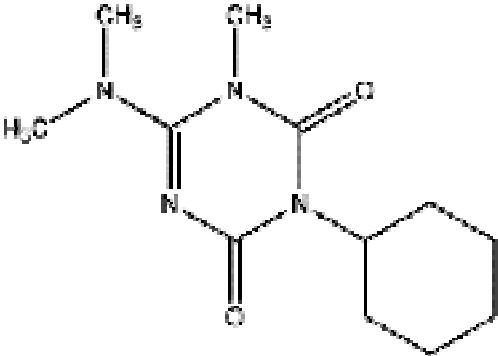
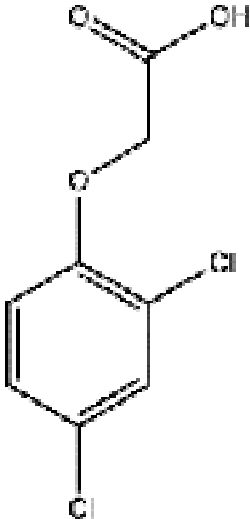
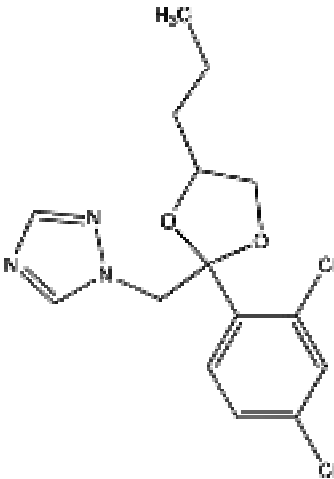
➤ **Biphényl**

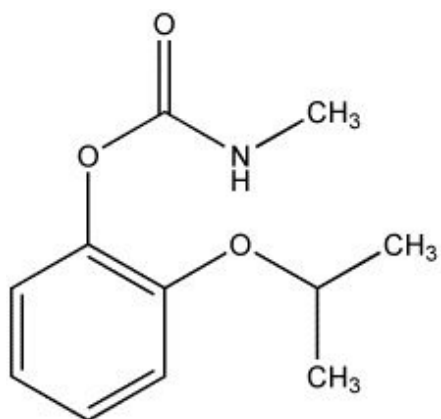
Il s'agit d'un fongicide pour lequel très peu de données sont disponibles. Il n'y a à priori pas d'usage autorisé.

➤ **Propoxur**

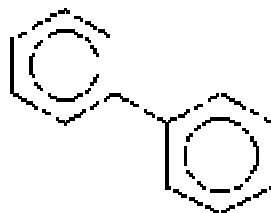
Le propoxur est un insecticide de la famille des carbamates. Cet insecticide n'est pas autorisé en France en usage agricole, mais il est possible qu'il puisse être utilisé pour un usage biocide de type anti moustique. Ce produit serait aussi utilisé comme acaricide pour les tiques des chiens aux USA. Il s'agit d'une molécule connue pour présenter un risque important de lessivage vers les eaux souterraines (K_{oc} de l'ordre de 13-30), présentant une demi-vie de l'ordre de 70-143 jours.

 <p>Structure moléculaire du Bromacil</p>	 <p>Structure moléculaire de l'Atrazine</p>
 <p>Structure moléculaire du Chlordécone</p>	 <p>Structure moléculaire des Hexachlorocyclohexanes</p>
 <p>Structure moléculaire du Carbendazime</p>	 <p>Structure moléculaire de l'Aldicarbe</p>

 <p><u>Structure moléculaire de la dieldrine</u></p>	 <p><u>Structure moléculaire du diuron</u></p>
 <p><u>Structure moléculaire de l'heptachlore époxyde</u></p>	 <p><u>Structure moléculaire de l'hexazinone</u></p>
 <p><u>Structure moléculaire du 2,4, D</u></p>	 <p><u>Structure moléculaire du propiconazole</u></p>



Structure moléculaire du Propoxur



Structure moléculaire du Biphényl

Annexe 4

Propriétés physico-chimiques des molécules phytosanitaires et comportement

Les propriétés physico-chimiques des molécules (solubilité dans l'eau, pression de vapeur, constant de Henry, coefficient de partage eau-octanol) conditionnent fortement le devenir de ces molécules dans l'environnement et notamment leur aptitude à être transportées vers les eaux superficielles ou souterraines.

La persistance des molécules dépend de l'intensité des processus de biotransformation, de dégradation abiotique telle que l'hydrolyse ou la photolyse, eux-mêmes influencés par les propriétés des molécules. A cela, s'ajoutent les conditions de milieu (température, humidité du sol,...) qui peuvent modifier l'intensité des différents processus.

Les processus de sorption et de biodégradation sont classiquement considérés comme deux processus majeurs susceptibles de réduire la quantité de phytosanitaires pouvant transiter au-delà du sol.

En effet, la mobilité de la matière active est réduite par son adsorption sur les particules du sol. La sorption est généralement corrélée au taux de carbone organique des sols dans la mesure où la matière active est adsorbée sur la matière organique du sol. Le coefficient de partage carbone organique-eau K_{oc} (en $dm^3.kg^{-1}$) permet d'estimer le degré d'adsorption du pesticide par le sol. La constante d'adsorption mesurée en laboratoire est normalisée par rapport à la teneur en carbone organique ce qui autorise la comparaison des résultats obtenus pour différentes molécules et différents sols. Dans les faits, la valeur de K_{oc} pour une molécule donnée n'est pas unique car la nature même de la matière organique influence les processus de sorption ; ceci explique les larges gammes de valeurs de K_{oc} rencontrées dans la littérature pour une molécule donnée.

La cinétique de la dégradation est souvent décrite par une simple loi exponentielle, traduisant le fait que la quantité dégradée par unité de temps est proportionnelle à la quantité restante. La vitesse de dégradation est indiquée par la durée de demi-vie (DT50 ou $t_{1/2}$) qui correspond à la durée nécessaire pour que 50 % du produit soit dégradé.

	selon Gustafson (1989)		Selon base de données PAN	
molécule	Temps de demi- vie (j) et K_{oc} (ml/g)	GUS	Temps de demi- vie (j) et K_{oc} (ml/g)	GUS
2.4D	$DT_{50} = 7$ $K_{oc} = 53$	1.92	$DT_{50} = 34$ $K_{oc} = 45$	3.59
Atrazine	$DT_{50} = 74$ $K_{oc} = 107$	3.68	$DT_{50} = 146$ $K_{oc} = 93$	4.40
Bromacil	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = 346$ $K_{oc} = 17$	2.53
Chlordécone	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Dieldrine	$DT_{50} = 934$ $K_{oc} = 12100$	-0.25	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Diuron	$DT_{50} = 188$ $K_{oc} = 389$	3.21	$DT_{50} = 372$ $K_{oc} = 499$	3.35
Heptachlore	$DT_{50} = 109$ $K_{oc} = 13330$	-0.25	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Hexazinone	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = 222$ $K_{oc} = 640$	4.53
Propiconazole	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = 71$ $K_{oc} = 656$	2.19
Alpha HCH	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Beta HCH	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Delta HCH	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Gamma HCH (lindane)	$DT_{50} = 569$ $K_{oc} = 1727$	2.1	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?
Carbendazime	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?	$DT_{50} = ?$ $K_{oc} = ?$?

Tableau 1 : Principales caractéristiques des molécules phytosanitaires ayant été détectées lors des différentes campagnes de mesures

Le Tableau 1 permet de visualiser les principales caractéristiques des molécules qui ont été détectées dans les eaux souterraines. Les données proviennent de la base de données PAN (<http://www.pesticideinfo.org>) ou de la littérature (Gustafson, 1989). Il convient de noter que les informations ne sont disponibles pour plusieurs molécules.

Les valeurs connues sont très variables en fonction des molécules variant entre 28 et 929 mg/l pour la solubilité, de 17 à 13300 pour le K_{oc} et de 7 à 934 jours pour la demi-vie, laissant présager des comportements variables.

Afin d'apprécier *a priori* le comportement des molécules et le risque de lessivage vers les eaux souterraines, Gustafson (1989) a mis au point un indicateur mécaniste simple à faible niveau d'agrégation qui prend uniquement en compte les propriétés de la substance active sans intégrer de variables liées à l'usage et au milieu : l'indice GUS.

$$GUS = [\log(DT_{50})] * [4 - \log(K_{oc})]$$

L'avantage est qu'il est donc possible de disposer d'une base de données avec la valeur du GUS pour l'ensemble des substances actives utilisées. Cet indicateur a d'ailleurs souvent été repris comme donnée d'entrée dans d'autres méthodes.

L'indice repose sur l'hypothèse que plus un produit est facilement adsorbé par les particules de sol et moins il est persistant, moins le risque est grand de le voir être entraîné en profondeur. Des valeurs seuils (1,8 et 2,8) permettent de définir trois classes de risque : si $GUS > 2,8$ les substances actives sont considérées comme lessivables ; si $GUS < 1,8$ les substances actives sont considérées comme non lessivables ; dans l'intervalle [1,8-2,8] il est difficile de conclure sur la capacité de la substance active à être lessivée. A titre indicatif, le Tableau 1 liste les indices GUS pour les molécules pour lesquelles les données de K_{oc} et de DT_{50} sont disponibles.

Selon Gustafson (1989), la dieldrine et l'heptachlore sont considérées comme des molécules non lessivables alors que l'atrazine et le diuron apparaissent comme les molécules lessivables. Le 2.4-D et le lindane apparaissent comme des molécules de transition.

Lorsque les données de PAN sont utilisées pour calculer ce même indice GUS, toutes les molécules pour lesquelles l'indice de GUS peut être estimées présentent des valeurs >2.8 , sauf le propiconazole ($GUS = 2.2$), laissant imaginer que toutes ces molécules peuvent potentiellement se trouver dans l'eau souterraine.

La différence entre les indices définis par Gustafson et les données de PAN illustrent la variabilité des valeurs moyennes retenues pour le K_{oc} ou la DT_{50} . Cette variabilité résulte de l'évolution des connaissances, l'influence de la nature de la matière organique sur le K_{oc} mais aussi des conditions de milieu rencontrées pour la détermination de la DT_{50} . A noter que la plupart des molécules sont étudiées sur des sols et conditions de milieu spécifique à l'Amérique du Nord ou l'Europe. **Très peu d'études sont réalisées dans des contextes tropicaux ce qui permettrait d'obtenir des valeurs plus spécifiques et représentatives.**

Dans la liste des substances recherchées et pour lesquelles Gustafson avait fourni un indice, l'aldicarbe, la cyanazine, le métolachlore, la métribuzine, le prometryne et la simazine apparaissent comme des molécules susceptibles d'être retrouvées dans les eaux souterraines, ce qui n'est pas le cas, ces molécules n'ont pas été quantifiées lors des campagnes de 2004 et de 2005, l'aldicarbe a, en revanche, été détecté en 2006. Il est à noter que la cyanazine, le métolachlore et la métribuzine ne sont pas non plus détectés dans les eaux de surface ; la question de leur usage peut donc se poser. L'absence de détection des 3 autres molécules peut vraisemblablement être mise en relation avec les quantités de matières actives apportées ainsi que de leur répartition sur l'île.

En effet, les herbicides ne représentent que 22% des quantités de matières importées contre 58% pour les insecticides et les nématicides. Les fongicides ne représentent que 6%, ce qui, en plus de leurs propriétés physico-chimiques, pourrait expliquer cette faible présence dans les eaux souterraines (données correspondant aux importations de l'année 2002, Bocquene 2002).

Annexe 5

Bref historique de l'usage des produits phytosanitaires en Martinique

Les premiers produits phytosanitaires utilisés, dans les années 1960, dans la lutte contre les « pestes animales », appartenaient à la famille des organochlorés (HCH, dieldrine et aldrine).

Ces molécules furent remplacées, à la fin des années 1960, par un autre organochloré : le chlordécone. Dès 1971, les organochlorés firent progressivement l'objet de restriction d'usage, car ils étaient soupçonnés de contaminer les sols et les rivières (dieldrine interdite d'usage en 1972, chlordécone en 1993).

Dans les années 1980-1990, de nouvelles molécules à rémanence plus courte et à toxicité immédiate, les organophosphorés et les carbamates, remplacèrent progressivement les organochlorés. Les organophosphorés de type malathion, méthylparathion, disulfoton, diazinon furent largement utilisées sur l'île à cette période.

Sous l'impulsion des nouvelles réglementations européennes, ces molécules ont été remplacées à leur tour par d'autres molécules organophosphorées moins toxiques (terbuphos, cadusaphos, izasophos, phénamiphos). En 1998 les organophosphorés représentaient 90 % des produits importés.

Ces dernières années, des réglementations sévères ont été mises en place à l'échelle européenne et nationale. En 2003, 160 substances actives et 600 produits commerciaux ont été retirés du marché français.

Les points suivants sont importants sont à noter :

- Les organochlorés, produits les plus toxiques à l'origine de la contamination des sols, rivières et eaux souterraines, furent employés de 1960 à 1997.
- parmi les produits phytosanitaires actuellement importés en Martinique, 50 % seraient utilisés par la profession agricole et 50 % pour des activités non agricoles (étude CIRAD, 1996).
- En 2002, 60 % des produits phytosanitaires importés étaient des insecticides / nématocides, 22 % des herbicides et 6 % des fongicides (quantités de produits bruts, d'après le service des douanes).
- La culture de la banane est de loin (86 %) la culture qui utilise le plus de produits phytosanitaires, devant la culture de l'ananas (7%) et les cultures maraîchères (4%) (Balland et al, 1998).



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de Martinique
4 lot. Miramar
Route Pointe des Nègres
97200 – Fort de France – France
Tél. : 05 96 71 17 67