



CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



Institut de Recherche
pour le Développement
(Ex ORSTOM)

ETUDE D'IMPACT DU BANC D'ESSAIS DES ETAGES A POUDRE D'ARIANE V (BEAP)

CONSEQUENCES DES REJETS GAZ EUX SUR L'ENVIRONNEMENT

RAPPORT FINAL

Convention n°89/CNES/2621, Juin 99

Sommaire

Avant propos.....	5
Contexte scientifique de l'étude.....	5
1 Liste des rapports.....	5
2 Equipes scientifiques.....	7
2.1 Pédologie.....	7
2.2 Géomorphologie.....	7
2.3 Hydrologie.....	7
2.4 Botanique.....	7
2.5 Hydrochimie.....	7
3 Dispositif expérimental.....	8
Expertise scientifique et résultats.....	11
1 Pédologie.....	11
1.1 Présentation.....	11
1.1.1 Situation et délimitation du périmètre d'étude.....	11
1.1.2 Topographie.....	12
1.1.3 Géologie.....	12
1.1.4 Zones déboisées.....	12
1.1.5 Techniques d'étude.....	12
1.2 Identification des systèmes pédologiques.....	15
1.2.1 Chemin de ronde.....	15
1.2.2 Piste Barthod.....	17
1.3 Distribution des systèmes pédologiques.....	19
1.3.1 Champ proche.....	19
1.3.2 Champ moyen.....	19
1.3.3 Champ lointain.....	20
1.3.4 Synthèse de la prospection.....	21
1.3.5 Cartographie.....	21
1.4 Discussion : effet-tampon du sol.....	25
1.4.1 Prévision du comportement des différents types de sols.....	25
2 Géomorphologie.....	27
2.1 Introduction.....	27
2.1.1 Les périmètres étudiés.....	27
2.1.2 Les moyens d'étude.....	30
2.2 L'environnement sédimentaire de la plaine côtière.....	30
2.2.1 Le contexte morphologique.....	30
2.2.2 Les matériaux détritiques de la plaine et du rivage en Guyane.....	33
3 Botanique.....	37
3.1 Généralités.....	37
3.1.1 Dispositif d'étude de la chute de litière à Passoura-Karouabo.....	37
3.1.2 Variabilité temporelle de la défeuillaison en forêt guyanaise.....	38
3.1.3 Variabilité spatio-temporelle de la défeuillaison en forêt de Passoura-Karouabo.....	39

3.1.4	Relation entre chute de litière et type de sol, recherche de groupes témoins	40
3.2	Chute de litière et pollution acide par les rejets gazeux du banc d'essai	40
3.2.1	Evaluation de l'impact de la pollution acide suite au premier essai (16.02.1993)	40
3.2.2	Evaluation de l'impact de la pollution acide suite au deuxième essai (26.06.1993)	41
3.2.3	Recherche d'un effet cumulatif.....	42
3.2.4	Défeuillaison du <i>Goupia glabra</i>	45
4	Hydrologie	47
4.1	Dispositif de mesure.....	47
4.1.1	Station pluviométrique du BEAP	47
4.1.2	Station de la Karouabo au pont ancienne RN1 :	47
4.1.3	Bassin de la Passoura :	48
4.1.4	Coordonnées des collecteurs de pluviolessivats	49
4.2	Pluviométrie au BEAP (1992) et au CSG (1993) :	50
4.2.1	Résultats.....	50
4.2.2	Contexte pluviométrique des séries d'analyses chimiques :	51
4.3	Hydrologie du bassin de la crique Karouabo.....	52
4.3.1	Morphologie.....	52
4.3.2	Homogénéisation des hauteurs de la station de la Route de l'espace (ex RN1):	52
4.3.3	Bilan annuel :	53
4.3.4	Schéma de fonctionnement du bassin :	53
4.4	Hydrologie du bassin versant de la crique Passoura.....	54
4.4.1	Morphologie.....	54
4.4.2	Sous-bassin à la station de Soumourou	55
4.4.3	Bassin de la Passoura au pont de la nouvelle RN1	55
4.5	Hydraulité et contexte des mesures chimiques :	59
4.6	Analyse des données chimiques avant et après les essais.....	60
4.6.1	du 2 au 30 octobre 1991 : saison sèche avant essais	60
4.6.2	Du 6 avril au 6 mai 1992 : saison des pluies avant essais.....	60
4.6.3	Du 4 février au 31 mars 1993 : début de saison des pluies pendant le premier essai (16	63
4.6.4	Du 22 juin au 10 juillet 1993 : fin de saison des pluies , pendant le second essai	65
5	Hydrochimie	68
5.1	Composition chimique des pluies et des pluviolessivats	68
5.1.1	Dispositif de récolte des pluies et pluviolessivats.....	68
5.1.2	Dates des prélèvements	69
5.1.3	Analyses chimiques.....	70
5.2	Pluies et pluviolessivats avant les essais des moteurs à poudre.....	70
5.2.1	Origine des éléments chimiques.....	70
5.2.2	Variabilité spatiale des pluies et des pluviolessivats	70
5.2.3	Variabilité temporelle des pluies et des pluviolessivats	70
5.3	Pluies et pluviolessivats après les essais des moteurs à poudre.....	71
5.3.1	Méthodologie d'interprétation des analyses chimiques	71
5.3.2	Après le premier essai (16 février 1993)	72
5.3.3	Après le deuxième essai (25 juin 1993).....	74
5.3.4	Après un brûlage du combustible (29 juin 1993)	77

5.4	Pluviollessivats et des eaux de rivières pour les essais M3 à M6 et Q1, Q2.	79
5.4.1	Essai du 20 juin 1994 à 14 heures au BEAP (essai M3)	79
5.4.2	Essai du 30 septembre 1994 au BEAP (essai M4).....	80
5.4.3	Essai du 15 décembre 1994 au BEAP (essai M 5).....	81
5.4.4	Essai du 10 mars 1995 au BEAP (essai Q1)	83
5.4.5	Essai du 21 juillet 1995 au BEAP (essai Q 2).....	84
6	Conclusion générale	86
6.1	Pédologie	86
6.1.1	Pollution du périmètre	86
6.1.2	Présentation "verticale".....	86
6.1.3	Présentation en plan.....	86
6.1.4	Remarques.....	87
6.2	Géomorphologie.....	87
6.2.1	Quelles seront les modalités et les vitesses du transfert des éventuels polluants entre le BEAP et les criques?.....	87
6.2.2	Une fois arrivés dans les criques, comment se produira le transit et la détection des polluants?.....	88
6.2.3	Etant donné le faible écoulement et la morphologie des bassins-versants, quelles seront les éventuelles zones de stockage de polluants?.....	88
6.2.4	Etant donné que l'accumulation d'éventuels polluants peut s'accroître en présence de l'eau salée, quel serait l'impact des marées salines?.....	88
6.2.5	Quel sera l'impact sur la mangrove où niche l'avifaune ?.....	89
6.2.6	Le comportement spécifique des vases peut-il aggraver le problème?.....	89
6.2.7	Synthèse.....	89
6.3	Botanique	90
6.3.1	En Zone 1 :	90
6.3.2	En Zone 2 :	90
6.3.3	En Zone 3 :	91
6.4	Hydrologie.....	91
6.5	Hydrochimie	92
6.5.1	Conséquences des essais sur la composition chimique des pluviollessivats.....	92
6.5.2	Conséquences sur la composition chimique des rivières Karouabo et Passoura.....	95
	Références bibliographiques	100
	Table des illustrations	104

Avant propos

L'objet de cette convention était de réaliser un état zéro de l'environnement sur le site d'essais des boosters d'Ariane V, et de pratiquer une expertise sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement des essais du n°1 au n°4.

Une proposition d'étude intégrée a été conclue en 1990 avec le CSG, en pédologie, botanique, hydrologie et géochimie, mettant à contribution les scientifiques spécialistes de ces disciplines présents en Guyane. L'installation récente, à l'époque, de l'atelier de traitement d'images de l'Orstom à Cayenne a permis de proposer dans cette étude l'intégration des techniques spatiales.

Trois lots ont été soldés durant la période 1990-1993, conformément à la convention.

Un avenant a été signé en 1993 pour un 4^e lot, incluant l'expertise sur l'essai n°4 et le rapport final.

Un important travail d'expertise a été produit (11 rapports) en plus de trois notes de C. Grimaldi (géochimiste) sur l'essai n°5 et deux brûlages à terre.

La concertation entre tous les spécialistes a permis progressivement d'ajuster le dispositif de mesure et de définir les indicateurs d'environnement les plus pertinents par rapport : les pluviollessivats et la qualité de l'eau (pH en particulier) des criques Karouabo et Soumourou sont les paramètres du milieu qui ont été retenus pour leur fonction

Ceci explique pourquoi l'expertise s'est achevée par une série de rapports en

Néanmoins, il est apparu nécessaire de réaliser une synthèse de ce travail vue la dispersion actuelle des résultats. De plus, ce document unique aura été réalisé dans des conditions qui intègrent les connaissances et les technologies actuelles, comme la réalisation d'une cartographie par Système d'Information Géographique (SIG) pour présenter le dispositif de mesure, les bassins versants étudiés et le contexte environnemental de l'étude.

Marc LOINTIER

CONTEXTE SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE

1 LISTE DES RAPPORTS

Le travail scientifique a débuté à la mi 1990, et s'est poursuivi jusqu'en 1996. Cinq disciplines ont été nécessaires à la réalisation de cette approche globale de l'environnement. Nous donnons une liste ci-après de tous rapports. Dans la partie "Expertise scientifique et résultats", nous avons préféré suivre l'ordre chronologique des interventions, suivant ainsi la logique du questionnement préalable au premier essai (le 16 février 1993), jusqu'à l'interprétation des derniers résultats de mesures (21 juillet 1995). Une expertise sur l'eau de nappe du carneau et la minéralogie des échantillons solides n'est pas reproduite ici (Grimaldi C., 1993).

Barthes B., (1991) - cartographie des sols sous le vent du banc d'essais. Etude d'impact du banc d'essais des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Inventaire préliminaire de l'environnement du site. Convention n° 89/cnes/2621. Centre orstom de cayenne. Septembre 1991.

- Grimaldi C. & Sarrazin M., 1992 - propriétés chimiques des sols, étude des pluviollessivats, composition chimique des criques karouabo et passoura. Etude d'impact du banc d'essais des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Inventaire préliminaire de l'environnement du site. Convention n° 89/cnes/2621. Laboratoire de pédologie. Centre orstom. Cayenne.
- Grimaldi C., Dhenin J.M., Litampha A., Bron R. (1 995) : composition chimique des pluies et pluviollessivats, et des rivières karouabo et passoura. Février 1995 (essais M3, M4). 27 p.
- Grimaldi C., Dhenin J.M., Litampha A., Bron R. (1 995) : composition chimique des pluies et pluviollessivats, et des rivières karouabo et passoura. Juin 1995 (essais M5, Q1). 29 p.
- Grimaldi C., Dhenin J.M., Litampha A., Bron R. (1 995) : composition chimique des pluies et pluviollessivats, et des rivières karouabo et passoura. Décembre 1995 (essai Q2). 12 p.
- Grimaldi C., Sarrazin M. (1993) : composition chimique des pluies et pluviollessivats, et des rivières karouabo et passoura. Novembre 1993 (essais M1, M2). 70 p.
- Grimaldi, C., M. Sarrazin et V. Laperche (1993) - composition chimique des eaux de pluies et pluviollessivats. Etude d'impact du banc d'essai des propulseurs à propergol solide d'Ariane V (BEAP): étude de la composition chimique des eaux. Orstom cayenne
- Lointier M., 1992 : hydrologie des bassins versants de karouabo et passoura: inventaire préliminaire de l'environnement du site, rapport convention cnes/orstom n°89.
- Lointier, M., (1991) Analyse préliminaire de situation. Zone de la karouabo et de la passoura. Contrat cnes.n°2621/orstom. Lot 1 rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 26 p.
- Lointier, M., (1992) Etude hydrologique des bassins versants de la karouabo et de la passoura. Contrat cnes n° 2621/orstom. Lot 2 rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 103 p.
- Prost M.T., 1992 : sédimentologie des formations superficielles des criques karouabo, passoura et malmanoury : inventaire préliminaire de l'environnement du site, rapport convention cnes/orstom n°89.
- Rohan R., 1990 : étude préliminaire des bassins versants de karouabo et passoura. Rapport de stage hydrologie, orstom cayenne.
- Sabatier D. & Prevost M.F., 1992 : étude du peuplement forestier sous le vent du banc d'essai : inventaire préliminaire de l'environnement du site, rapport convention

2 EQUIPES SCIENTIFIQUES

(Localisation en 1999)

2.1 Pédologie

B.Barthès, Centre de Montpellier, B.P. 5045, 3403 2 Montpellier

2.2 Géomorphologie

M.T. Prost, Museo Goeldi, Belem, Brésil

2.3 Hydrologie

M. Lointier, Centre de Montpellier, B.P. 5045, 340 32 Montpellier

R. Bron, M. Fraumar, E. D'alexis, X. D'Alexis, (Cellule hydrologique IRD, B.P. 165, 97323 Cayenne, Guyane), Aguengui, R. Rohan

2.4 Botanique

G. Elfort et C. François pour les relevés de collecteurs en zones 2 et 3;

R. Garrouste pour les relevés en zone 1 (dans l'enceinte du CSG);

J. Faustine pour le séchage des échantillons;

V. Marquette pour les pesées et la saisie informatique;

2.5 Hydrochimie

C. Grimaldi

INRA, Unité de Science du Sol et de Bioclimatologie ,
65 route de St Briec, 35042 Rennes Cedex

M. Sarrazin, J.-M. Dhenin, A. Litampha, R. Bron

ORSTOM, Laboratoire des Moyens Analytiques,

BP 165, 97323 Cayenne Cedex



Bâtiment d'assemblage des Boosters (second plan) et rails de transport vers le BEAP



Forêt environnante du BEAP



Essai de Booster au BEAP (cliché CSG)



Le carneau en excavation

1 PEDOLOGIE

1.1 Présentation

1.1.1 Situation et délimitation du périmètre d'étude

Le banc d'essais des étages d'accélération à poudre (B EAP) est situé au Sud des grandes savanes de Kourou, et plus précisément, sur les premières hauteurs bordant la savane Elizabeth, entre les criques Karouabo et Passoura. Notre cartographie concerne les zones situées à moins de 2,5 km du banc d'essais.

Nous avons également limité notre champ d'étude aux secteurs de vent les plus fréquemment observés. Les vents au sol les plus fréquents à Kourou provenant des secteurs 40° à 120° (Prévost & Sabatier, op.cit.), notre site d'étude est compris, depuis le banc d'essais, entre les directions 220° et 300° (par rapport au Nord géographique).

Le périmètre cartographié est donc un « cône » de 2500 mètres de rayon, centré sur le BEAP, balayant un angle de 80° entre les directions 220° et 300°. ce cône couvre près de 440 hectares, compris entre les latitudes 5°10'N et 5°12'N, entre les longitudes 52°46'30"W et

Sur la base des recommandations formulées dans les études antérieures, en terme notamment de conditions météorologiques lors des essais, le périmètre ainsi délimité comprend l'ensemble du champ le plus probablement exposé aux rejets gazeux.



Essai de booster au BEAP (Cliché CSG)

1.1.2 Topographie

D'un point de vue topographique, le cône d'étude comprend de nombreuses petites montagnes russes » d'altitudes modestes (<40m). En son milieu, il est traversé par un formateur important de la crique Passoura (orienté vers l'Est), laquelle draine environ les 2/3e méridionaux des 436 hectares considérés. vers le Nord, les cours d'eau du périmètre alimentent la crique Karouabo. On notera que le talweg directement voisin du carneau n'est pas véritablement drainé par une crique et s'écoule vers la savane, dans la mesure où il n'est pas

1.1.3 Géologie

D'après la carte géologique (Barruol, 1959), le périmètre étudié est situé, pour les parties hautes, sur schistes/micaschistes du Bonidoro (au Sud-Ouest) et surtout de l'Orapu, et pour les parties basses, sur alluvions fluviales et fluvio-marines.

D'après nos observations, les parties hautes de l'Est du cône semblent développées sur Série Détritique de Base (SDB) peu épaisse, cette SDB est caractérisée par une texture riche en sables moyens et grossiers, et par des pentes modérées.

Vers 1,20 mètres de profondeur, ces matériaux plus sableux reposent sur l'altérite du socle.

1.1.4 Zones déboisées

La zone d'étude, initialement sous forêt, est parcourue radialement par une piste forestière, la piste Barthod, qui permet un accès relativement aisé.

A environ 500m du banc d'essai, la forêt est coupée sur 120 mètres de large, pour laisser passer un chemin de ronde (piste sur remblai avec clôtures) qui contourne le banc. La présence de ce vaste domaine dénudé à faible distance du carneau aura très certainement une influence sur la redistribution des polluants vers les axes de drainage.

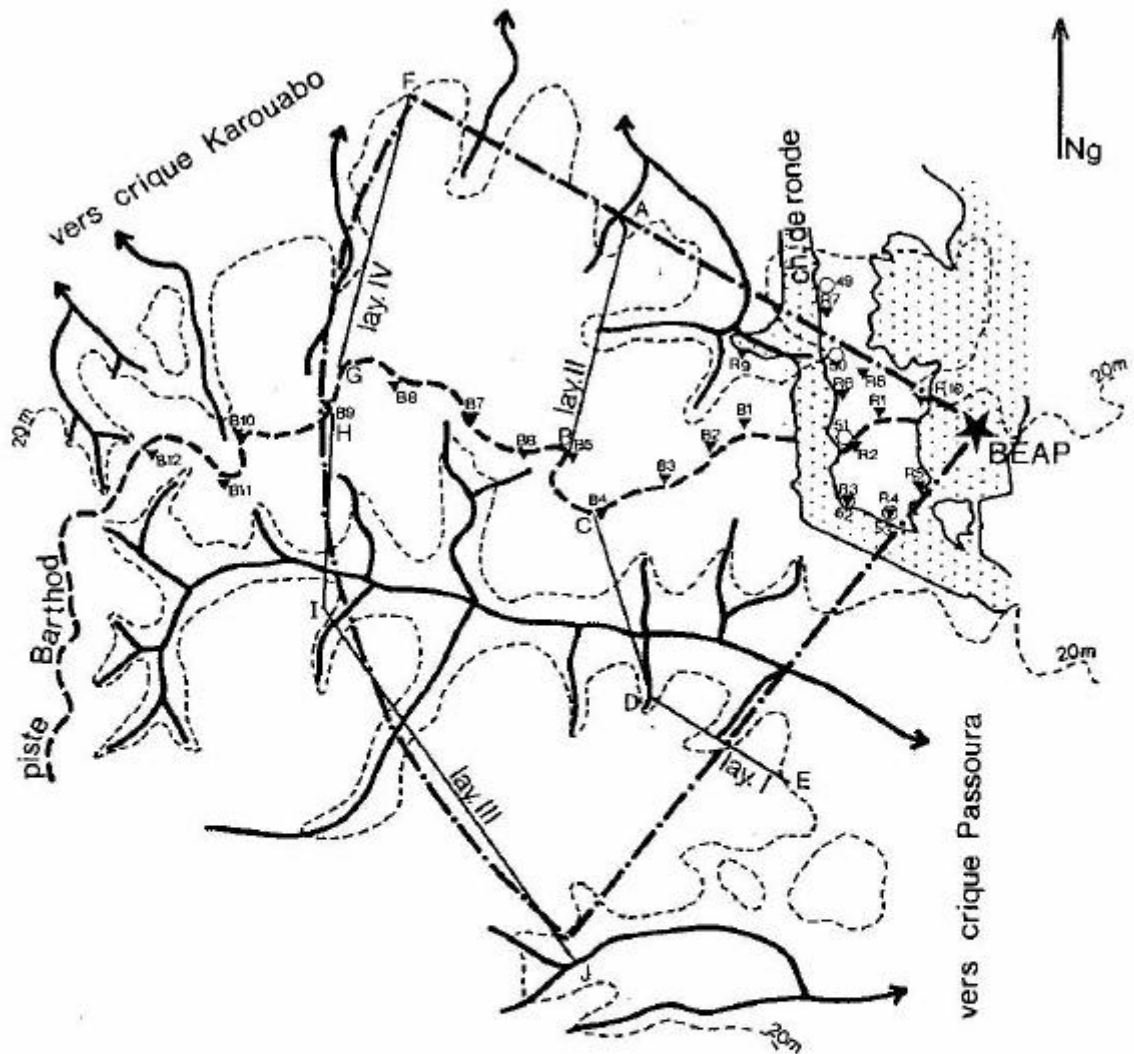
1.1.5 Techniques d'étude

Les observations pédologiques sont réalisées à la tarière à main de 1,25 mètre. La description du sol sur le terrain se fait principalement en termes de couleur, texture et humectation. Ces critères permettent d'apprécier l'équilibre air/eau dans le sol, particulièrement discriminant en Guyane.

Les sondages sont effectués le long des pistes, hors perturbations occasionnées par les bulldozers, ou sur des layons ouverts au sabre d'abattis. Ces sondages sont distants d'une centaine de mètres environ.

Ces observations de terrain sont complétées par des prélèvements pour analyses chimiques au laboratoire du centre ORSTOM de Cayenne.












-  Périimètre étudié
-  Piste Barthod
-  Courbe de niveau (20m)
-  Cours d'eau
-  Zones déforestées
-  ▼ Sondages hors layon (R1 à R10 et B1 à B12)
-  ○ Prélèvements hors layon (49 à 53)
-  — Layons I à IV (voir emplacement des sondages et prélèvements sur les coupes)

Figure 2 : dispositif de mesure

1.2 Identification des systèmes pédologiques

Une première reconnaissance a été conduite le long du chemin de ronde et de la piste Barthod. Elle a permis d'identifier les principaux types de sols représentés sur le périmètre à prospector, afin de se caler sur les systèmes étudiés par ailleurs en Guyane. L'emplacement des observations est présenté sur la Figure 2.

1.2.1 Chemin de ronde

En bordure du chemin de ronde, on a surtout observé des sols sur Série Détritique de Base (SDB), sur des versants généralement longs et peu pentus.

La SDB n'est pas figurée sur la carte géologique (Barroul, op.cit.), et on peut supposer que ce sont là les derniers lambeaux d'un faciès qui connaît une extension plus importante dans le Nord-Ouest du pays. Les systèmes pédologiques sur SDB ont été étudiés à Sinnamary (Barthès, 1984), Iracoubo (Boulet, 1986; Barthès, 1990) Mana (Barthès, 1989) et surtout Organabo (Veillon, 1990).

Sur la base de ces travaux et des observations effectuées début février (période relativement sèche) autour du chemin de ronde, on peut présenter une séquence-type (figure 3)

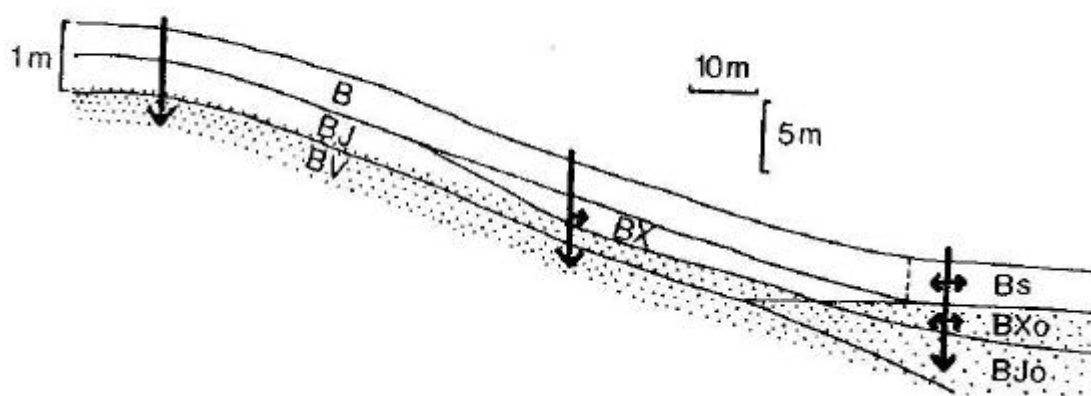


Figure 3 coupe schématique de versant sur S.D.B., près du chemin de ronde.

Légende :

BJ : horizon brun, sableux à sables grossiers, humecté.

horizon brun-jaune, argilo-sableux à sables grossiers, humecté; à l'amont, l'horizon est sablo-argileux au sommet, devenant argilo-sableux à la base ; dans la pente, il s'enrichit en sables grossiers.

BV : horizon brun vif, argileux, riche en sables grossiers, avec des micas, humecté ; à l'amont, présence de gravillons ferrugineux rouge-violacé (nodules) ; dans la pente, présence de volumes rouges.

BX : horizon de couleur hétérogène, à phases brun-jaune et brune moyennement contrastées; argilo-sableux à sables grossiers, humecté ;

Bs : horizon brun sombre, sableux à sables grossiers, humecté ;

BXo : horizon de couleur hétérogène, brun-jaune à volumes grisâtres et taches ocre à roux, sablo-argileux au sommet devenant argilo-sableux à la base, riche en sables grossiers,

Bjo : horizon de couleur hétérogène, brun-jaune à taches ocre à roux, argilo-sableux à argileux, riche en sables grossiers, avec des micas ; humecté.

* A l'amont :

0-50cm environ: horizon B, brun, sableux puis sablo-argileux, riche en sables moyens et grossiers, humecté ;

50-100cm environ: horizon BJ, brun-jaunâtre homogène, argilosableux, riche en sables moyens et grossiers, humecté ;

>100cm: horizon BV, brun vif, argilo-sableux à argileux, très riche en sables moyens et grossiers, avec des concrétions ferrugineuses et gibbsitiques et souvent quelques micas blancs

Le profil est humecté et perméable sur plus de 120 cm d'épaisseur, et ne présente pas de signe de ralentissement du drainage interne. On parle dans ce cas de sol "épais", à drainage profond, sur SDB; l'eau des précipitations se distribue sur une épaisseur de sol d'au moins 120cm, sans excès, et constitue d'importantes réserves.

* Dans la pente:

- l'horizon BJ montre un enrichissement en sables, croissant vers l'aval ;

- à son sommet se différencie un horizon BX, de couleur hétérogène avec une phase brun-jaune et une phase brune moyennement contrastées, argilo-sableux à sables moyens et grossiers;

-les graviers ferrugineux n'ont pas été observés dans BV jusqu'à 120cm, mais on trouve encore des micas et de nombreux quartz grossiers.

Le profil reste humecté et perméable sur plus de 120 cm. Mais la différenciation de l'horizon BX, de couleur hétérogène, témoigne d'un certain ralentissement du drainage interne en subsurface, au-dessus de BJ devenu plus sableux.

compte tenu des pentes modérées des versants et de la proximité de la plaine côtière aux axes de drainage congestionnés, un relatif engorgement semble se manifester dans le versant à partir de 50cm de profondeur, aux périodes humides.

* A l'aval:

- l'horizon superficiel devient plus sombre (passage de B à Bs);

- l'horizon de subsurface, déjà hétérogène depuis le milieu de pente, montre des volumes ocres à roux, dans un fond devenu plus grisâtre et plus sableux (passage de BX à BXo) ;

-dans l'horizon brun-jaune apparaissent également des volumes ocres à roux (passage

Ce type de profil est marqué par l'hydromorphie, et doit être humide aux périodes les plus pluvieuses. Mais les talwegs sur SDB étant "perchés" par rapport aux axes de drainage de la plaine, l'engorgement s'y manifeste temporairement, et le drainage interne reste vertical et profond une bonne partie de l'année.

Dans l'ensemble, ce type de versant sur SDB développe une couverture pédologique épaisse, à drainage vertical profond, avec des signes d'engorgement temporaire croissant vers l'aval.

D'après Boulet (1986), on peut parler dans ce cas de sols "appauvris-ternis", sombres et sableux à sablo-argileux jusqu'à 50cm, puis brun-jaune et argilo-sableux.

Localement, à proximité d'un talweg secondaire incisé au Sud-Ouest du carneau, on a décrit un profil (R4) plus mince, avec des horizons compacts peu humectés vers 90cm de

profondeur. Dans ce cas, qui sera présenté ci-après, le drainage interne est peu profond, et la dynamique de l'eau est principalement superficielle et latérale.

Mais le secteur du chemin de ronde reste principalement caractérisé par des sols épais sur SDB.

1.2.2 Piste Barthod

Le long de la piste Barthod, on retrouve quelques sols épais sur SDB (B4, B11). Mais on a surtout observé des sols sur socle schisteux, plus ou moins épais, sur des versants plutôt plus courts et plus pentus que ci-dessus.

Les recherches conduites à Sinnamary, piste de Saint -Elie, (Boulet, 1990), permettent de situer nos observations.

Boulet montre qu'il est possible d'organiser les coupures pédologiques des différents versants étudiés, sur socle schisteux, en une séquence évolutive retraçant les transformations successives d'une couverture initiale (figure 3).

* Au stade I, l'ensemble du versant est à drainage vertical libre, c'est-à-dire que les profils décrits aux différents niveaux de la pente sont humectés et perméables sur toute leur épaisseur. Lors des pluies, l'eau des précipitations se distribue sur une importante épaisseur de sol, sans excès, et constitue d'importantes réserves. Le sol est épais sur tout le versant.

* Au stade II, l'amont reste à drainage profond, mais on note dans la pente la présence à faible profondeur d'horizons "secs au toucher", compacts et peu perméables. Lors des pluies, les horizons perméables surmontant ces horizons secs sont rapidement saturés, du fait de leur faible épaisseur, et l'eau excédentaire s'écoule latéralement, en surface (ruissellement) ou au-dessus des horizons secs, ce type de couverture mixte associe un sol amont épais, à drainage profond, et un sol plus mince de pente, à drainage latéral; vers l'aval, le profil s'épaissit à nouveau et devient hydromorphe (sujet à l'engorgement), sous l'influence d'une nappe,

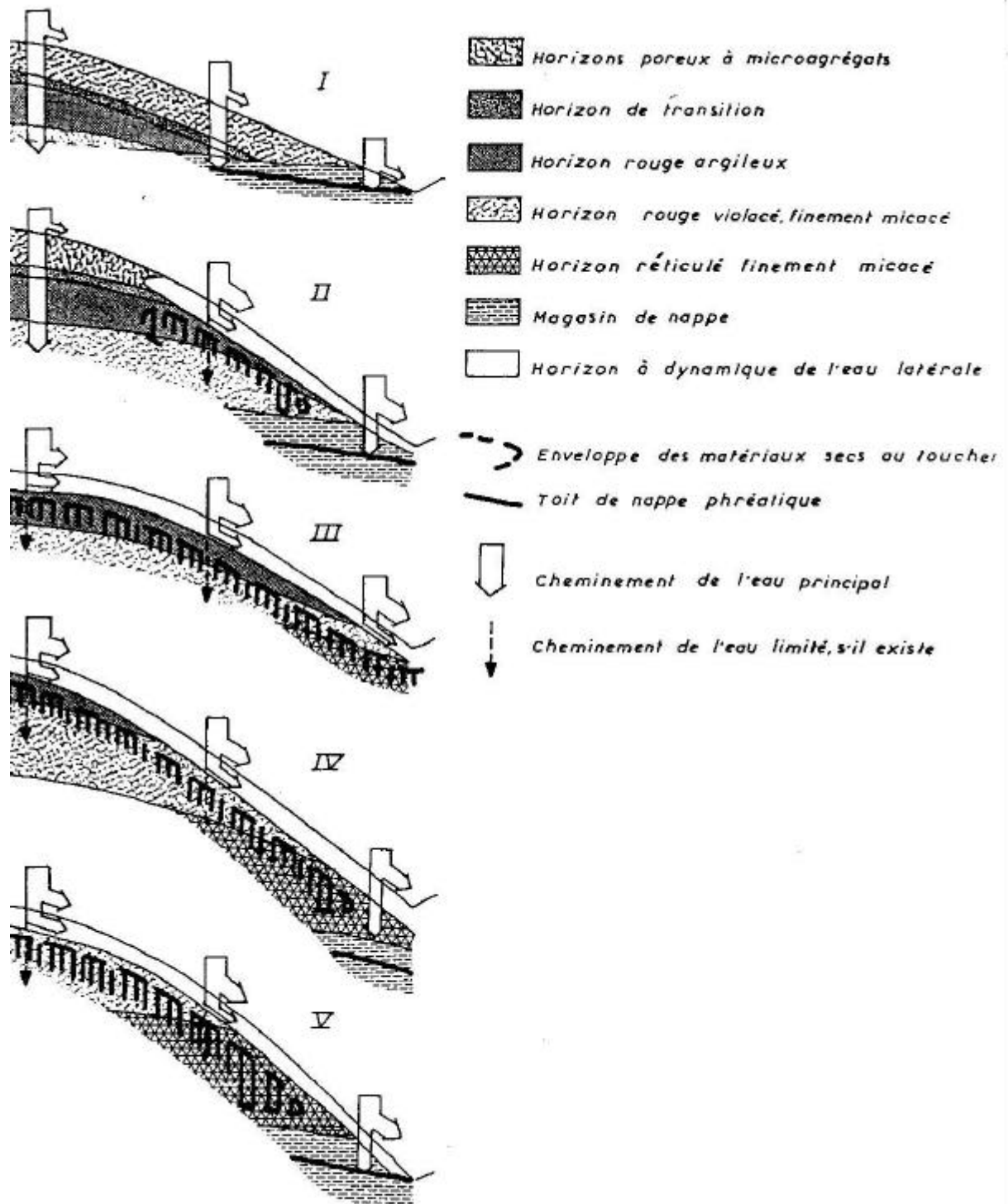


Figure 4 : Schéma d'évolution des couvertures pédologiques sur schistes (d'après Boulet, 1990)

*Aux stades III, puis IV et V, les horizons "secs au toucher" remontent jusqu'à l'amont, et l'ensemble du versant présente un drainage latéral. Les horizons perméables sont peu épais et le

sol est mince sur tout le versant, sauf vers l'aval, où la présence d'une nappe s'accompagne de l'épaississement des horizons perméables et de signes d'engorgement (hydromorphie).

Par rapport à ce modèle, on insistera sur la richesse en quartz grossiers, sables et souvent graviers, dans les horizons perméables. Les niveaux riches en quartz, qui remontent généralement jusqu'au tiers supérieur de pente, constituent des voies privilégiées de circulation de l'eau dans le sol.

Les profils décrits piste Barthod présentent généralement des horizons secs au toucher (sauf dans les talwegs), et c'est leur profondeur d'apparition qui sera déterminante:

- lorsque ces horizons secs apparaissent au-delà de 120 cm de profondeur, on considère que le sol est épais, à drainage profond ;

- entre 120 et 100cm, on parlera de sol assez épais; le drainage interne comporte encore une composante verticale;

- entre 100 et 80cm, le sol est considéré comme peu épais, avec un drainage interne présentant une composante latérale ;

- lorsque les horizons secs au toucher apparaissent à moins de 80cm de profondeur, le sol est mince, à drainage principalement latéral.

Nous verrons ci-dessous que les versants rencontrés lors de la prospection peuvent se rattacher aux différents types présentés :

- versants entièrement à drainage profond (sols épais ou assez épais) ;

- versants à couverture mixte (sols épais ou assez épais amont, sols plus minces de pente) ;

- versants entièrement à drainage latéral (sols minces) ; dans la plupart des cas, l'aval des versants développe un profil hydromorphe, marqué par l'engorgement et plus sableux.

1.3 Distribution des systèmes pédologiques

1.3.1 Champ proche

Le champ proche a été prospecté à partir de la défri che bordant le chemin de ronde, à environ 500m du banc d'essais.

Des observations ont également été réalisées au début de la piste Barthod et près du carneau.

Comme exposé précédemment, ce sont principalement des sols épais sur Série Détritique de Base (SDB) qui ont été décrits (R1, R2, R3, R5, R7) ; ceux qui occupent les positions topographiques basses sont marqués par un engorgement temporaire (R6, R8, R10).

L'une des observations, dans un bas-fond, montre un profil caractérisé par une hydromorphie permanente (R9) : horizon organique noir et gras jusqu'à 50cm de profondeur, puis horizon très riche en sables grossiers, gris et trempé.

Une autre observation, au Sud et en bordure d'un petit talweg (R4), montre un sol peu épais, marqué par une hydromorphie temporaire en surface (quelques taches grises à périphérie ocre), riche en graviers de quartz vers 50cm, avec un horizon micacé compact rouge-jaunâtre, sec au toucher, à 90cm de profondeur.

1.3.2 Champ moyen

Le champ moyen a été prospecté en ouvrant des layons à partir de la piste Barthod, à environ 1500m du banc d'essais.

***Le layon I (layon CDE), vers le Sud, est long de 13 00m; sa distance au BEAP varie de 1500m (points C et E) à 1625 m environ (point D).

* Le transect descend de la crête suivie par la piste pour déboucher assez rapidement dans un large bas-fond où coule un affluent de la crique Passoura (prélèvements 2 à 4). Au-delà, l'itinéraire parcourt deux collines (4, 5, 6 et 7, 8, 9) aux pentes assez marquées, qui bordent cet affluent de la Passoura.

* Le relief de la zone traversée est assez prononcé, et les collines développent des sols relativement profonds, sauf dans la dernière pente (9), menant au point E. Les sols des talwegs séparant ces collines sont hydromorphes, sableux, à sables grossiers; le cœur du bas-fond principal (Passoura) montre un profil hydromorphe d'argile sédimentaire grise et trempée (2, 3).

*** Le layon II (layon AB), vers le Nord, est long de 9 00m; sa distance au BEAP varie de 1500m (points A et B) à 1450 m (au milieu).

* Le transect montre d'abord une succession d'ondulations de faibles amplitudes (11 à 14), menant de la piste (crête) à une crique, suivie sur une centaine de mètres. On monte ensuite sur une colline marquée (16), avant de descendre sur une seconde plus modeste (18), puis vers un large bas-fond (19).

* Les premières ondulations, à pentes plutôt faibles dans l'ensemble, portent des sols à profil perméable peu épais (80 à 100cm). Les collines de la deuxième moitié du transect développent des sols un peu plus épais (profil perméable de l'ordre de 105cm). Les talwegs traversés sont assez étroits, et montrent des sols hydromorphes sur altérite; le dernier talweg, en A, est hydromorphe et sableux à sables grossiers (19).

1.3.3 Champ lointain

Le champ lointain a été prospecté en ouvrant des layons à partir de la piste Barthod, à environ 2500m du banc d'essais (voir Figure 2 pour la localisation des layons)

*** Le layon III (layon HIJ), vers le Sud, est long de 23 50m; sa distance au BEAP varie de 2600m (point I) à 2425m (entre I et J).

* En descendant de la crête (piste), on se retrouve après une courte pente (21) dans le lit d'un tributaire rive gauche de l'affluent de la Passoura. On le traverse pour cheminer sur un piémont (23, 24), avant d'enjamber l'affluent de la Passoura, puis un tributaire rive droite. On parcourt ensuite une succession de collines basses et peu pentues (26 à 33), avant de monter sur une colline plus haute (34). On atteint l'extrémité du layon après une tête de talweg (35), un piémont (36) puis une colline peu élevée (37) descendant sur une crique.

* Seules les collines les plus élevées (20, 34) portent des sols assez épais (profil perméable autour de 110cm d'épaisseur). Les autres (26 à 33, et 37) développent des sols plus minces (profil perméable entre 65 et 85cm d'épaisseur).

Le cœur des talwegs les plus larges (25, 30) est tapissé d'un sédiment fluvio-marin argileux typique, trempé lors de la prospection; leurs bordures (29) et les talwegs moins importants (32, 35, 38) sont hydromorphes et sableux à sables grossiers, les piémonts sont hydromorphes sur altérite (24, 36).

*** Le layon IV (layon FG), vers le Nord, est long de 11 00m; sa distance au BEAP varie de 2500m (point F) à 2425m (entre F et G).

* Un long versant à pente modérée (39, 40) descend de la piste (crête) vers deux talwegs (41, 42) séparés d'un piémont.

On monte ensuite sur une colline assez large (43, 44), puis sur une autre plus petite (45), et enfin sur une dernière (47), asymétrique, avec un versant Sud en pente douce et un versant Nord plus abrupt menant à un large bas-fond qui débouche sur une savane (F).

* Le long versant descendant depuis la crête (39, 40) porte des sols assez profonds (profil utile de 110 à 130cm), de même le sommet de la large colline (43). Par contre, les sols sont plus minces sur les pentes de cette dernière (44) et sur les deux collines suivantes (45, 47), avec un profil perméable de 70 à 90cm. Les talwegs sont hydromorphes sableux à sables grossiers (41, 42), avec des bordures hydromorphes sur altérite; le dernier bas-fond hydromorphe (F), s'ouvrant sur la savane, est argileux avec une bordure sableuse à sables grossiers (48) .

1.3.4 Synthèse de la prospection

Les observations réalisées en bordure du chemin de ronde et à proximité du carneau (champ proche) montrent surtout des sols épais sur SDB, à drainage profond, avec un modelé

Le layon I (champ moyen, Sud) traverse principalement des collines bien marquées aux sols assez épais, séparées de bas-fonds dont les plus larges sont argileux.

Le layon II (champ moyen, Nord) présente d'une part, près de la piste, des ondulations d'amplitudes modestes sur sols peu épais, d'autre part, à l'extrémité du périmètre étudié, des collines bien individualisées aux sols plus épais; des talwegs étroits séparent les différentes

Le layon III (champ lointain, Sud) parcourt surtout des collines basses aux sols minces, séparées de talwegs larges, dont certains argileux; quelques reliefs marqués portent des sols plus

On distingue sur le layon IV (champ lointain, Nord) une partie près de la piste avec des sols relativement épais, sur versants plutôt longs, et une partie au fond avec des sols plus minces, sur versants plutôt courts; les talwegs séparant les collines sont sableux, le dernier bas-

On note que :

- les sols les plus épais se rencontrent à proximité du banc d'essais, sur modelé à pentes modérées (SDB), et également sur collines marquées (socle) surtout autour du formateur de la crique Passoura;
- les sols minces, sur des reliefs plus mous à versants courts, encadrent souvent des affluents importants de ce formateur ou de la Karouabo;
- les couvertures mixtes, associant sols épais amont et sols minces de pente, occupent des situations variables;
- les bas-fonds les plus larges sont tapissés d'argile sédimentaire.

1.3.5 Cartographie

Les observations réalisées le long des 4 layons, de la piste Barthod et du chemin de ronde ont été complétés par l'examen stéréoscopique de photographies aériennes, afin d'extrapoler les observations de terrain aux secteurs non visités.

L'étude d'images satellite n'a pas permis ce type d'extrapolation jusqu'à présent, dans la mesure où les différentes partitions obtenues recourent mal les données de terrain. En l'absence de données radar, il s'avère que l'imagerie satellitale permet difficilement une discrimination satisfaisante des différents milieux pédologiques sous forêt.

Sur la base des prospections et des photos aériennes, on a établi une carte des sols au 1/25.000. et sa légende (figure 6). Cette carte distingue 4 unités :

- *couvertures pédologiques les plus épaisses, subdivisées en :
 - couvertures pédologiques épaisses sur SDB, associant sol épais à l'amont et dans les pentes / sols hydromorphes à l'aval ;
 - couvertures pédologiques assez épaisses sur altérite schisteuse, associant sol assez épais à l'amont et dans les pentes / sols hydromorphes à l'aval ;

- *couvertures pédologiques mixtes sur altérite schisteuse, associant sols assez épais ou épais à l'amont / sols minces de pente / sols hydromorphes à l'aval ;

- *couvertures pédologiques les plus minces, subdivisées en :
 - couvertures pédologiques peu épaisses sur altérite schisteuse, associant sols peu épais à l'amont et dans les pentes / sols hydromorphes aval ;
 - couvertures pédologiques minces sur altérite schisteuse, associant sols minces à l'amont et dans les pentes / sols hydromorphes aval ;

- *sols fortement hydromorphes sur argile sédimentaire.

Note

Les sols épais développent des horizons perméables de plus de 120 cm d'épaisseur.

Les sols assez épais développent des horizons perméables de 100 à 120 cm d'épaisseur.

Les sols peu épais développent des horizons perméables de 80 à 100 cm d'épaisseur.

Les sols minces développent des horizons perméables de moins de 80 cm d'épaisseur.

La typologie retenue peut être résumée ainsi:

- * couvertures les plus épaisses:
 - épais/hydromorphe;
 - assez épais/hydromorphe;
- * couvertures mixtes:
 - épais ou assez épais/mince/hydromorphe;
- * couvertures les plus minces:
 - peu épais/hydromorphe;
 - mince/hydromorphe;
- *fortement hydromorphe sur argile sédimentaire.

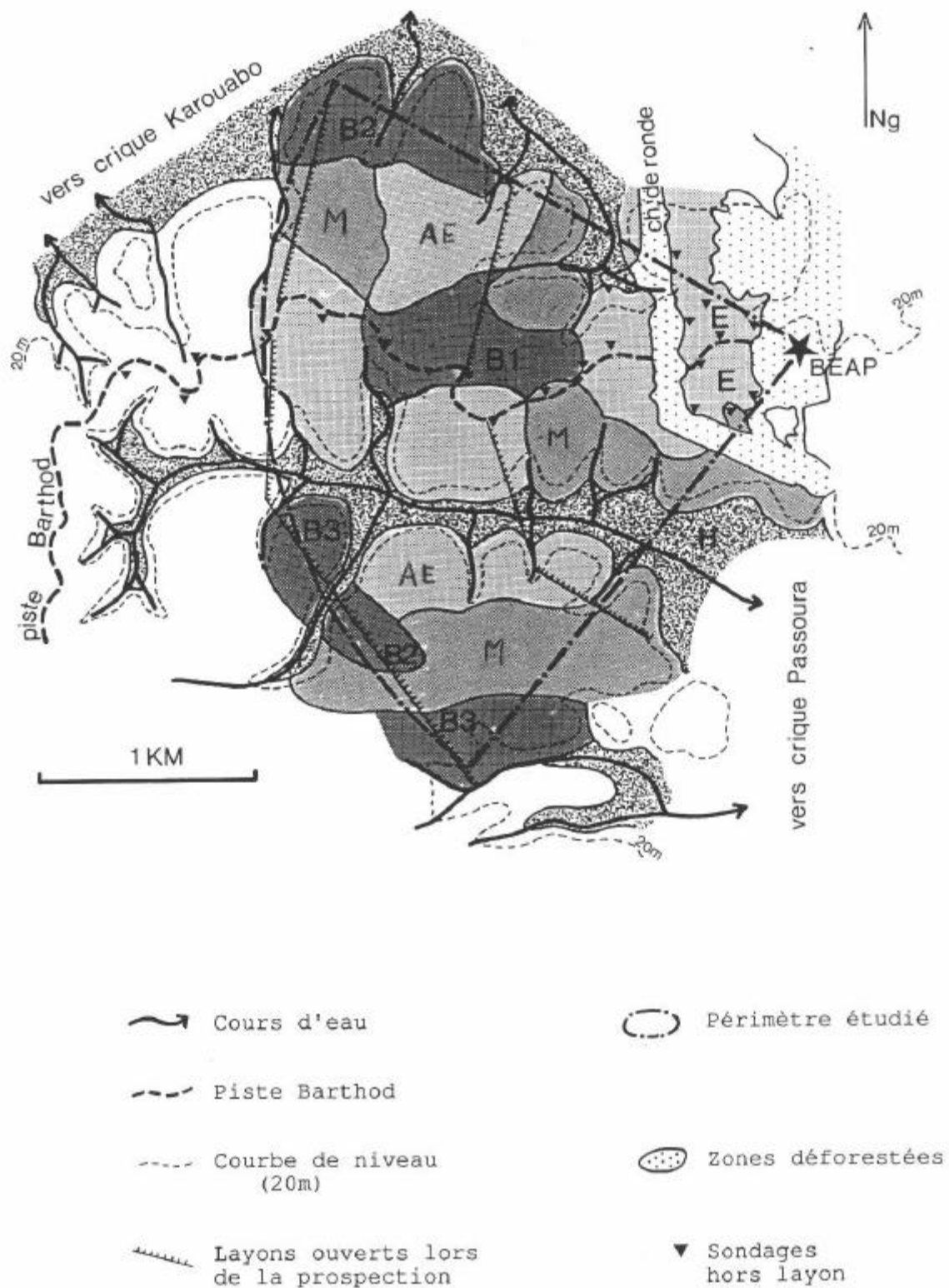


Figure 5 : Carte des sols et légende

"E" : couvertures pédologiques épaisses sur Série Détr itique de Base associant (cf 2,1) :
 -SOLS EPAIS (>120cm) à l'amont et dans les pentes ;
 -sols hydromophes épais à l'aval, devenant sableux dans les bas-fonds.

"AE" : Couvertures pédologiques **assez épaisses** sur altérite schisteuse associant (cf stade I du 2.2):

- SOLS ASSEZ EPAIS (100 à 120cm) à l'amont et dans les pentes ;
sols hydromorphes épais à l'aval, devenant sableux dans les bas-fonds.

"M" : Couvertures pédologiques **mixtes** sur altérite schisteuse associant (cf stade II du 2.2) :

-SOLS ASSEZ EPAIS (100 à 120cm) OU EPAIS (>120 Cm) à l'amont;
-SOLS MINCES (60 A 80cm) dans les pentes;
sols hydromorphes épais à l'aval, devenant sableux dans les bas-fonds.

"B1" : Couvertures pédologiques **peu épaisses** sur altérite schisteuse associant (cf stades III, IV et V du 2.2) :

SOLS PEU EPAIS (80 à 100cm) à l'amont et dans les pentes ;
sols hydromorphes plus épais à l'aval, devenant sableux dans les bas-fonds.

"B2" : Couvertures pédologiques **peu épaisses** sur altérite schisteuse associant (cf stades III, IV et V du 2.2) :

-SOLS PEU EPAIS (75 à 90cm) à l'amont et dans les pentes ;
-sols hydromorphes plus épais à l'aval, devenant sableux dans les bas-fonds.

"B3" : Couvertures pédologiques **minces** sur altérite schisteuse, associant (cf. stades III, IV et V du 2.2) :

SOLS MINCES (<75cm) à l'amont et dans les pentes ;
sols hydromorphes plus épais à l'aval, devenant sableux dans les bas-fonds.

"H" : Sols FORTEMENT HYDROMORPHES SUR ARGILE SEDIMENTAIRE grise des bas-fonds principaux.

NOTE : les épaisseurs considérées sont celles des horizons humectés et perméables.

On constate que, pour l'essentiel, les unités ou sous-unités figurées sont composites, c'est-à-dire qu'elles associent plusieurs types de sols. A l'échelle retenue, il n'est pas possible, en effet, de représenter des unités homogènes, compte tenu des variations souvent rapides, le long d'un versant par exemple. On représente donc des "couvertures pédologiques", pouvant comprendre plusieurs unités de modelé présentant les mêmes types de différenciation.

1.4 Discussion : effet-tampon du sol

1.4.1 Prévision du comportement des différents types de sols.

Nous avons distingué précédemment des sols plus ou moins épais, des sols minces et des sols hydromorphes de bas de pente ou bas-fonds.

Les travaux de Guehl (1984) sur socle schisteux, piste de Saint-Elie, ont montré que l'épaisseur des horizons humectés et perméables conditionne la dynamique de l'eau dans le sol.

* Ainsi, les **sols les plus épais**, à horizons perméables épais, connaissent un drainage vertical profond, c'est-à-dire que l'eau des précipitations s'y répartit jusqu'en profondeur, pour constituer des réserves hydriques importantes (Boulet & al., 1979).

Si cette eau est chargée en certains éléments (H^+ , Al^{3+}), ceux-ci pourront également se distribuer sur le profil perméable et interagir avec le sol : dissolution des minéraux, fixation sur le complexe adsorbant (matière organique et argile) ; On peut supposer que cette fixation sera maximale dans les horizons superficiels, qui possèdent la capacité d'échange la plus importante, liée à leur richesse en matière organique. Les éléments considérés pourront aussi, dans une certaine mesure, rejoindre la nappe phréatique et être évacués progressivement vers les axes de drainage.

On peut donc considérer que les sols les plus épais ralentissent fortement les flux hydriques et immobilisent relativement les polluants. On notera que cet effet tampon est surtout lié à l'importance des réserves hydriques. En effet, la fixation sur le complexe adsorbant est limitée, car la capacité d'échange reste faible sauf en surface. La neutralisation de l'acidité des polluants par réaction avec les constituants du sol est également limitée, car ces sols contiennent peu de minéraux susceptibles de libérer des bases.

* Les **sols les plus minces** développent des horizons perméables peu épais, et présentent des réserves hydriques modestes. Lors des pluies, ces horizons perméables sont rapidement saturés et l'eau en excès s'écoule latéralement, vers l'aval. Les polluants déposés en surface ne seront donc "emmagasinés" que pour une faible partie, et l'essentiel sera drainé, en surface (ruissellement) ou à faible profondeur, vers les talwegs voisins.

Les sols minces ont donc sans doute une faible capacité à immobiliser d'éventuels polluants, qui seront rapidement redistribués vers les axes de drainage et bas-fonds.

* Les **sols hydromorphes** de bas de pente et bas-fonds sont caractérisés par l'engorgement, temporaire ou permanent. En plus des polluants déposés à leur surface, ils peuvent recevoir, par drainage latéral, des eaux de l'amont plus ou moins chargées en éléments considérés. Le type de drainage qui prévaut dans les versants adjacents conditionnera donc l'intensité des pollutions dans les zones basses.

Les sols sujets à un engorgement temporaire mais marqué, sols qu'on rencontre souvent en position de piémont, développent généralement un profil épais, avec une texture relativement argileuse. En dehors des périodes les plus humides, ils connaissent un drainage vertical profond, et d'éventuels polluants déposés en surface s'y distribueront sur une certaine épaisseur. Lors des périodes d'engorgement, et en plus des apports directs, on peut supposer que ces sols continueront à retenir les polluants tant que leur différence de concentration avec des eaux issues de l'amont l'autorisera. Par la suite, il est probable que la stagnation d'eaux moins chargées s'accompagnera d'une déconcentration de ces éléments dans le sol.

Les sols sujets à un engorgement plus durable voire permanent, en position de bas-fond, sont de deux types : sableux, ou argileux au cœur des bas-fonds principaux. Dans les

deux cas, on peut supposer que la vitesse d'écoulement des eaux qu'ils contiennent est réduite, compte tenu des pentes et des altitudes faibles. Il est donc probable que ces milieux vont connaître une pollution durable, par apport direct et/ou drainage latéral. Les sols hydromorphes argileux vont sans doute retenir les polluants dans des proportions plus importantes et plus longtemps que les sols hydromorphes sableux, du fait de leur capacité

2 GEOMORPHOLOGIE

2.1 Introduction

2.1.1 Les périmètres étudiés

Les bassins versants des criques Karouabo, Passoura et Malmanoury ont des caractéristiques communes, à savoir :

- Les surfaces des bassins sont comparables et il existe des similitudes fonctionnelles entre les criques (R. ROHAN, 1990).
- Les vallons et vallées élémentaires des hauts bassins forment un chevelu hydrographique dense sur la bordure septentrionale du Sillon Nord-Guyanais¹.
- Les altitudes maximales sont relativement modestes (>80 mètres en tête des bassins).
- Sauf dans la bordure du socle, les pentes sont faibles et régulières jusqu'au niveau de la mer.
- Le réseau s'individualise à la sortie du socle. La hiérarchie augmente dans la plaine.
- Les moyennes et basses vallées sont le site de nombreux marais.
- Sauf pour la Passoura, l'envasement de la ligne du rivage a une influence sur l'évolution de la partie terminale des basses vallées.

Trois périmètres ont été prospectés en juin et en juillet 1992 en fonction des objectifs à atteindre, des conditions d'accès et des autorisations données par le CSG en temps réel.

2.1.1.1 Crique Karouabo

La crique Karouabo draine un bassin versant d'environ une centaine de km². Exception faite de la basse vallée (domaine d'un grand marais à palmier bêche passant à la mangrove de front de mer) le bassin versant est couvert par 80,8% de forêt primaire et 19,2% de savanes (M. LOINTIER, 1992). Une grande partie des vallons élémentaires prennent naissance près du BEAP.

La partie amont de la crique a un écoulement régulier (R. ROHAN, 1990). La partie aval a un écoulement faible à cause de la basse valeur des pentes. Le débit moyen annuel, mesuré au pont de la route de l'Espace (ex-RN1) est de 4,38 m³/sec, avec des différences entre la saison des pluies et la saison sèche : le débit maximum instantané a été de 48 m³/s le 2 juin 1991 alors qu'il y a eu arrêt des écoulements entre le 23 novembre et le 6 décembre 1991 (M. LOINTIER, 1992).

Le périmètre tout d'abord choisi pour l'étude sédimentologique était situé entre les latitudes de 5°16'17"N et 5°12'N et les longitudes de 52°45'38"W et 52°47', mais les conditions concrètes d'accès sur le terrain ont limité les prélèvements : six sondages ont été faits dans le cours moyen et inférieur entre 5°14'15" et 5°12'46" de latitude N et 52°47'57" et 52°46'41" de longitude W, à l'intérieur de la zone de nuisance proche des ELA².

¹ Le Sillon Nord Guyanais est le linéament morpho-structural majeur du nord de la Guyane. On y rencontre les roches de la série Ile de Cayenne, de la série volcanique Paramaca, de la série d'Armine (Bonidoro, Orapú), ainsi que des granites et migmatites Guyanais (LEDRU & MILESI: Carte de minéralisations du Nord de la Guyane, 1992. BRGM).

² Couverture Sécurité CSG/CNES. 50.000ème. 24/06/92. Date de l'approbation technique.

Vers l'amont, au voisinage du Carbet des Journalistes, la Karouabo se divise en deux : le bras situé à l'Est est étroit et très difficile d'accès. Le bras de l'Ouest, par contre, est large et profond sur environ 1 km ; ensuite, après une nouvelle bifurcation, la progression redevient difficile. On observe d'ailleurs, sur des images satellitales, que l'écoulement effectif de la Karouabo n'est plus visible au-delà de ces points.

L'accès à la mer par la Karouabo n'est pas praticable, le cours inférieur⁴ se perdant dans un grand marais à palmiers-bâche (*Mauritia flexuosa*). Une dénivellation d'environ 0,50 cm dans le lit de la crique, à l'aval de la route de l'Espace, marquerait le passage au "vrai" marais et serait, dans une première hypothèse, un obstacle aux remontées salines (R. Rohan, 1990)⁵. Mais ni les survols aériens⁶ ni les photographies aériennes nous ont aidés à repérer ce "saut"⁷. Par contre, la comparaison des points cotés de la carte IGN (Kourou ouest, série Bleue, 1989) montre nettement que le marais est une grande cuvette : l'intérieur de celle-ci coïncide avec le zéro IGN alors que les points cotés à l'aval se situent entre 1 et 2 mètres d'altitude.

Au-delà du marais coexistent deux "estuaires". A l'O uest, "l'embouchure" la plus⁸ est un chenal de marée qui traverse la mangrove jeune et qui draine un marais voisin (V. document de télédétection n°1) ; ce chenal disparaît en arrière d'un cordon sableux de 2 m d'altitude (chenier), couvert par la forêt. "L'embouchure" de l'Est est également un chenal de

Un essai a été fait pour joindre la Karouabo par la mer, via la Malmanoury. Il a échoué à cause de l'étendue de la vase molle, de la présence de "battures"⁹, de la multitude des chenaux de marée, des fonds très faibles et surtout vu le temps nécessaire pour faire des prélèvements¹⁰. C'est pourquoi 10 autres sondages à la tarière ont été effectués dans la basse vallée de la Malmanoury dont les matériaux détritiques sont comparables à ceux du cours inférieur de la Karouabo.

2.1.1.2 Crique Passoura

La crique Passoura, affluent du fleuve Kourou, débouche à 7 km du rivage océanique. Outre la zone de l'embouchure, domaine de la mangrove ripicole, le bassin versant est couvert par 95% de forêt primaire et 5% de savanes (M. LOINTIER, 1992). L'embouchure est le domaine de la mangrove ripicole. Le débit moyen de la Passoura est comparable à celui de la Karouabo: 13.8 m³/sec en saison de pluies (février à juillet) et 3.9 m³/sec en saison sèche (août à janvier)¹¹.

Le périmètre étudié intègre les grands marais du cours moyen (latitudes 5° 11'33"N et 5° 8'

³ Situé entre le pont de la route de l'Espace et la bordure du socle

⁴ Entre la zone du ELA 2 et la mer.

⁵ Ce point sera développé pendant la discussion.

⁶ CESSNA et ULM

⁷ Pendant la mission de terrain l'accès jusqu'au "saut" a été interdit en temps réel par les opérations de dégazage.

⁸ Designée comme telle sur la carte IGN Sinnamary 4709, 1/25 000ème . 1989

⁹ Rochers

¹⁰ La progression dans les vasières est pénible: la pirogue est ancrée à une certaine distance du rivage et on "marche" dans la vase crémeuse, avec les tarières, jusqu'au périmètre des prélèvements. Dès le retour au bateau, les carottes, non perturbées, sont photographiées et font l'objet des premières observations (texture, couleur, salinité, etc...).

¹¹ Valeurs qui donnent un ordre de grandeur. Hydrologie. ORSTOM. (Com. pers., 1992)

28"N et les longitudes 52° 42' 17" W et 52° 48' 383 W). La limite aval est le Dégrad¹² ; La limite amont, marquée par une barrière d'arbres disposés sur la crique, est l'entrée de la zone proche de nuisance des ELA. D'une manière générale et malgré les mêmes inconvénients que ceux rencontrés sur le cours moyen de la Karouabo - les conditions d'échantillonnage ont été plus faciles.



Crique Passoura

2.1.1.3 La basse Malmanoury

La crique Malmanoury, voisine de la Karouabo, s'étend sur 26 km². La surface du bassin versant est estimée à environ 100 km² (R. ROHAN, 1990). Encore peu étudiée, la crique n'a pas fait l'objet de mesures systématiques de débit. Une des rares références est celle de HOORELBECK (1966) qui a estimé un débit journalier de 5.000 m³/sec.

Le périmètre parcouru (latitudes de 5°16' et 5°18' et longitudes de 52°48' et 52°49') se situe entre le pont sur l'ex-RN1 et la mangrove de front de mer. La largeur et la profondeur de la Malmanoury permettent la progression aisée, mais les berges, couvertes par la forêt hydromorphe, rendent difficile l'accès latéral sur les deux rives. L'embouchure est nette sur les documents satellitaires : légèrement déviée vers le NW elle est le siège d'un grand banc de vase

¹² A l'amont de Degrad Saramaca, au nord de la nouvelle RN1 (déviation vers Sinnamary)

2.1.2 Les moyens d'étude

L'étude s'est déroulée en plusieurs phases, chacune correspondant à des méthodes

(a) Reconnaissance.

- utilisation des documents de base (cartes de différents types et photographies aériennes). Ils constituent le support pour les levés de terrain.

- l'analyse du réseau hydrographique de la Karouabo, de la Passoura et de la Malmanoury par les méthodes précédentes et aussi par télédétection avec C. CHARRON. Ce travail nous a été très utile pour le repérage sur le terrain.

- Des survols en basse altitude avec prises de photos.

- Des déplacements sur le terrain destinés à connaître les conditions réelles d'accès afin de pouvoir faire les levés en temps réel.

- Elaboration d'un dossier provisoire de vérités terrain.

(b) Sondages sur le terrain et analyses de laboratoire.

- Prélèvements des sédiments. Etablissement in situ d'une fiche de terrain portant sur : l'emplacement du sondage, la profondeur de la carotte, les conditions de prélèvement (milieu, PH de l'eau de surface, heure et hauteur des marées, etc...), les caractéristiques des matériaux détritiques (couleurs, textures, granulométrie, etc...). La salinité des vases a été mesurée chaque fois qu'il a été possible. Les prélèvements sur la Malmanoury ont été effectués par C. CHARRON.

- Analyses de laboratoire : granulométrie, aluminium échangeable ; bases globales ; sels 20 -KIC ; matière organique (carbone ; azote) ; attaque totale.

(c) Synthèse des résultats mettant à profit l'expérience acquise par l'étude de l'environnement côtier des Guyanes.

2.2 L'environnement sédimentaire de la plaine côtière

2.2.1 Le contexte morphologique

Dans la zone du CSG, entre le socle et la mer (figure 6), le relief est formé par les

- la bordure nord du Sillon Nord-Guyanais (80/70 m d'altitude) - où débutent les têtes des bassins de la Karouabo et de la Passoura - est une zone vallonnée couverte par la forêt ombrophile. Les sols sont ferrallitiques, sauf là où les sables de la Série Détritique de Base donnent naissance à des podzols (B. BARTHES, 1992).

Le réseau hydrographique entaille des schistes et des granites. Dans les têtes des bassins les vallons élémentaires sont nombreux mais leur densité diminue rapidement vers l'aval. Dans la zone schisteuse d'implantation des layons pilote EDF/CSG, les vallées deviennent marécageuses, plutôt larges et à fond plat, séparées l'une de l'autre par des collines allongées ou

- Une zone de transition entre le BEAP et la plaine côtière. Elle est caractérisée par une série de collines plus basses (entre 30 et 23 m d'altitude), plus au moins isolées (où se trouvent les carbet Toucan et des Journalistes), séparées par de terrains inondables (entre 8 et 5 m d'altitude) le plus souvent occupés par la forêt hydromorphe. Les limites forêt/savane sont très

Fig 1-8 : La Guyane : situation géographique de la plaine côtière à laquelle appartiennent les formations des barres pré littorales (d'après R. Boulet, 1986).

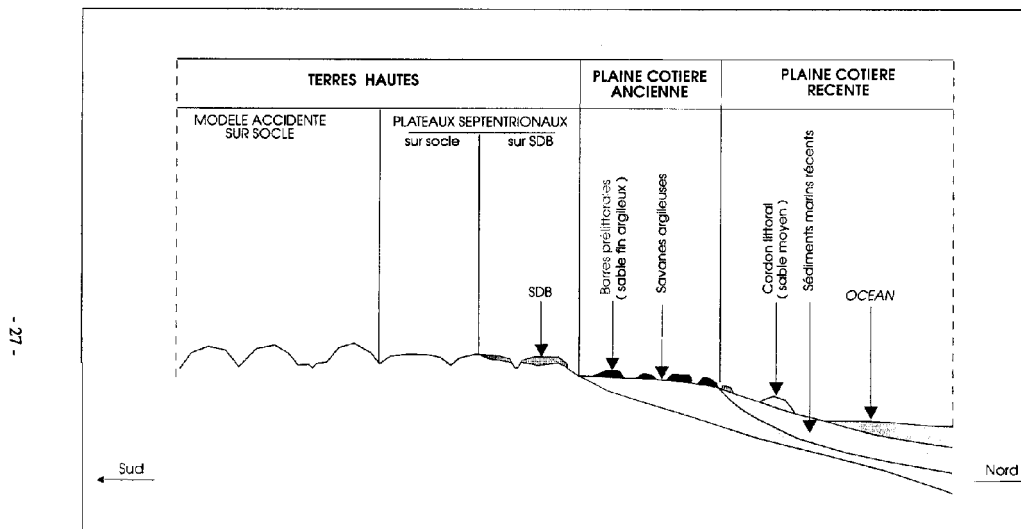


Figure 6 : Formations de la plaine côtière guyanaise (d'après Boulet, 1986)

- Les grandes savanes de Kourou traversées par la piste Corneille et par la vallée de la Karouabo. La zone a moins de 7 m d'altitude et fait partie de la haute plaine côtière¹³. Le substratum est formé par des argiles bariolées quaternaires qui reposent sur les formations du socle. La topographie de la plaine est très typique dans la zone des ELA : il s'agit de larges cordons de sable limoneux fin, les "barres pré littorales"¹⁴. Sur ces barres se trouvent Diamant et le site des Fusées sondes.

- Au-delà s'ouvrent les marais¹⁵ de la basse plaine côtière¹⁶, tapissés par des sédiments fins. Situés presque au niveau de la mer, ces marais sont sillonnés par des cordons de sable¹⁷ (PROST M.T., 1989 ; 1990). Ces derniers sont étroits, allongés et disposés à peu près parallèlement à la côte.

La basse Karouabo est formée par une grande cuvette marécageuse - couverte par des (*Mauritia flexuosa*), qui s'ouvre en éventail vers la mer.

¹³ "Plaine côtière ancienne" (Guyane) et "Old Coastal Plain" (Surinam)

¹⁴ "Offshore bar landscape" (Surinam)

¹⁵ "Pripris"

¹⁶ "Plaine côtière récente" (Guyane) et "Young Coastal Plain" (Surinam)

¹⁷ Un chenier est une ancienne plage qui devient isolée du rivage par une surface intertidale de boue. A $\pm 2/3$ m d'altitude. Leur genèse suppose: (a) une progression du rivage par accumulation de vase; (b) une interruption de celle-ci avec formation du chenier; (c) nouvelle progression de sédiments fins, etc... Des cheniers continuent à se former actuellement le long des côtes des Guyanes.

- Suivent les *vasières* de front de mer (≤ 1 m d'altitude) colonisées par la mangrove jeune.

L'étude de ces unités, bien différenciées par télédétection (CHARRON et al., 1991 ; M.T.PROST, 1989 ;), montre qu'il s'agit de générations de formes et de matériaux détritiques. (CSG, marais aval de la Karouabo, Figure 7

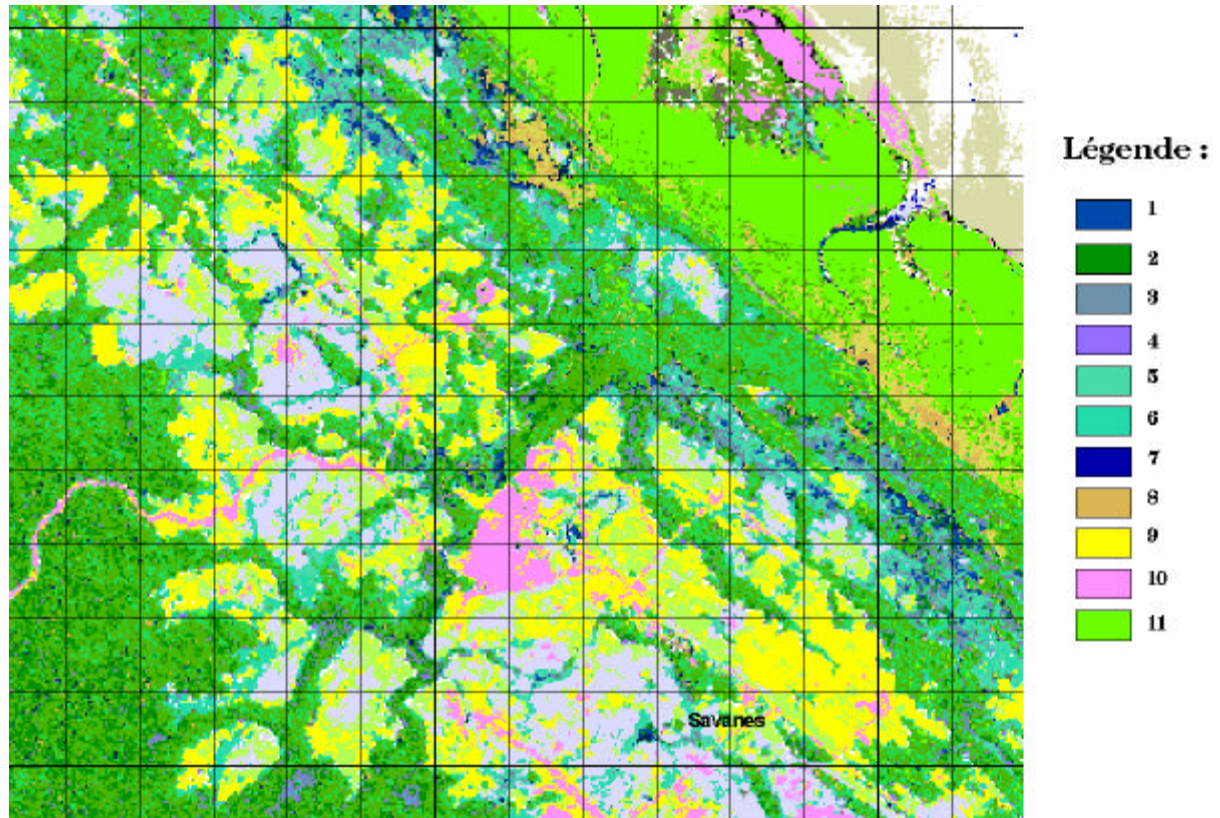


Figure 7 : Traitement de la donnée Landsat du 18 juillet 1988 sur la zone de la Karouabo.

Légende : (échelle : carroyage kilométrique)

- 1 : marais avec peu végétation de surface,
- 2 : forêt (tout confondu : primaire et sur cordon),
- 3 : marais avec végétation de surface importante,
- 4, 6, 9 : savanes (trois classes radiométriques différentes),
- 5 : zones de drains en savane,
- 7 : eau libre (fleuve Kourou),
- 8 : mangrove adulte ,
- 10 : terrains nus ou aménagés, bancs de vase,
- 11 : mangrove jeune.

2.2.2 Les matériaux détritiques de la plaine et du rivage en Guyane

S'il est vrai que l'altération des roches du socle est une source des sédiments de la plaine côtière (J.P. CAUTRU, 1992) il est aussi vrai qu'elle n'est pas unique (J.F. TURENNE, 1978 ; Ph. BOUYSSSE et al., 1977; M.PUJOS & G.S.ODIN,1986; L.KROOK,1990; entre autres), une partie des matériaux détritiques provenant d'autres milieux. L'histoire des sédiments côtiers éclaire leur répartition dans l'espace et, dans une certaine mesure, leur réponse à une éventuelle pollution. C'est pourquoi il est utile d'en rappeler les grandes lignes dans le cadre de l'état zéro

2.2.2.1 Matériaux détritiques quaternaires

"Les variations climatiques quaternaires¹⁸ ont fait monter et descendre le niveau de l'océan mondial et ont modifié les couvertures végétales, bouleversant les circulations océanique et atmosphérique, le régime des vents et des pluies"... Elles ont également bouleversé "le tracé et le débit des fleuves et rivières et donc le rythme de la sédimentation." (*l'Environnement*, 1992). La plaine côtière de la Guyane ne fait pas exception à la règle.

Les sédiments de la *haute plaine côtière* sont anciens, à faciès marin transgressif¹⁹. Ils se présentent actuellement sous la forme de cordons de sables fins argileux reposant sur une argile évoluée, dessalée et relativement compacte. Les sols développés sur ces dépôts - particulièrement sur les cordons de sables fins - se caractérisent par une grande variabilité de faciès et sont marqués par des changements rapides de couleur et de texture (R. BOULET et al., 1982; M. GRIMALDI et al., 1990). La forte différenciation pédologique, tant latérale que verticale, témoigne d'une pédogenèse passée ou récente particulièrement intense (A. ANDRIEUX, 1990).

Cet épisode transgressif quaternaire a été suivi par une baisse du niveau de l'océan d'environ 100 m²⁰, exposant à l'air l'actuelle plate-forme continentale guyanaise (BOUYSSSE Ph. et al., 1977; PUJOS M.& ODIN G.S., 1986.) ; Kourou et les îles du Salut étaient alors à l'intérieur des terres. A cette époque l'Amazonie ne déchargeait pas vers les Guyanes; les eaux au large étaient claires et chaudes, permettant le développement d'une barrière récifale (M. PUJOS & G.S. ODIN, 1968). Quant au réseau hydrographique côtier de la Guyane, il a creusé les vallées dans les formations du socle, de la haute plaine ainsi que dans l'actuelle plate-forme continentale.

Au cours du dernier réchauffement planétaire qui a suivi²¹, il y a eu une nouvelle remontée du niveau marin. En Guyane et au Surinam la mer a atteint +2 m vers 6000 BP (BOUYSSSE Ph. et al., 1977; PUJOS M. & ODIN G.S., 1968; BRINKMANN R. et PONS L.J., 1968), a envahi les estuaires (Malmanoury, Karouabo et Passoura inclus) et a accumulé des sédiments. Simultanément à l'abaissement du niveau de la mer qui a abouti à sa position actuelle, il y a eu une progressive prépondérance du système de dispersion amazonien avec formation de la basse

2.2.2.2 Sédiments fins amazoniens

Environ 280 millions de m³ de sédiments fins amazoniens sont transportés annuellement le long des côtes des Guyanes par les courants et la houle, la part de nos fleuves à

¹⁸ Alors que les températures des régions de haute latitude baissent d'une dizaine de degrés Celsius pendant les périodes glaciaires, celles des régions intertropicales variaient peu; cependant elles ont été suffisantes pour introduire des modifications dans l'environnement du nord de l'Amérique du Sud (Conférence de Rio sur l'Environnement, 1992).

¹⁹ Episode transgressif (+6/+7 m) attribué, en hypothèse de travail, à 120 000 BP (par analogie avec les datations absolues obtenues sur la façade atlantique du continent en Argentine et au Brésil).

²⁰Régression de 18 000 BP. Elle correspond à la dernière période glaciaire quaternaire pendant laquelle d'énormes calottes glaciaires ont recouvert le nord de l'Eurasie et de l'Amérique du Nord. Il est possible qu'un climat plus sec existait alors en Amazonie, favorable au développement des savanes au détriment de la forêt.

²¹ Dernier interglaciaire, dans lequel nous vivons.

la sédimentation côtière ne dépassant pas 1% (LOINTIER M. & PROST M.T., 1988). Si les eaux des embouchures sont très chargées, de couleur "café au lait", c'est que les vases sont maintenues en suspension par les marées. La vasière côtière, véritable "delta atténué de l'Amazonie" (C. NITTRouer et DeMASTER, 1987) s'étend jusqu'à environ 30 km du rivage et par des fonds de 25/30 m.

Le système de dispersion se traduit dans l'espace intertidal par une alternance de secteurs d'accumulation (bancs de boue colonisés par la mangrove dans un rivage en progradation, comme devant l'ELA) ou en érosion (cordons sableux et/ou mangrove en recul, comme à la plage de la Cocoteraie, à Kourou) cf figure 8.

La grande originalité du système est que bancs de boue et espaces interbancs migrent lentement vers le Nord-Ouest. Les embouchures de certains fleuves sont ainsi déviées (rivière de Kaw, Sinnamary, Iracoubo-Counamama, Organabo, Mana). La migration obéit au rythme annuel de la dispersion amazonienne, lui-même lié aux modalités de circulation atmosphérique et océanique de l'Atlantique Tropical de l'Ouest (C. COLIN et al, 1981; C. COLIN, Programme NOE).

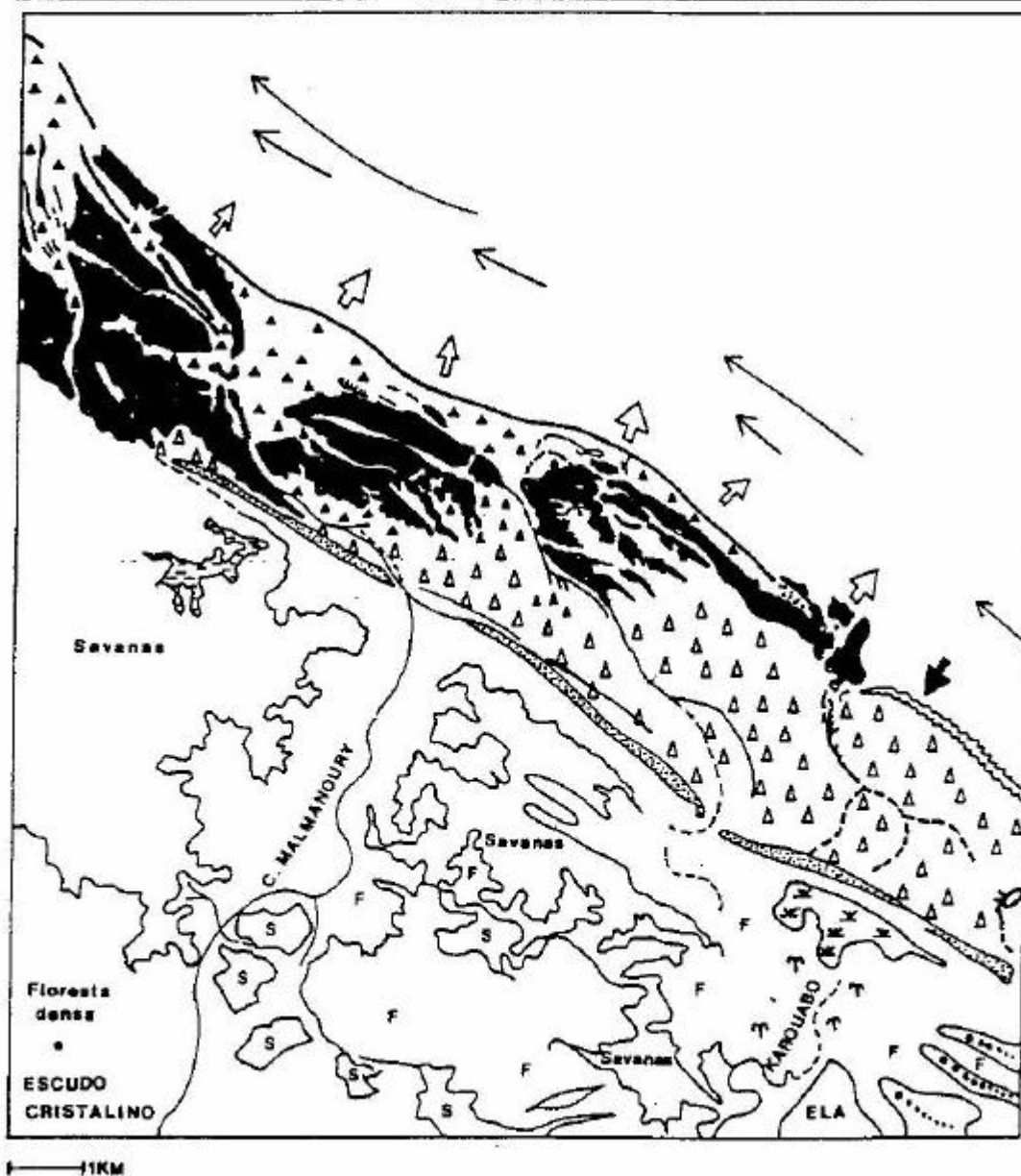
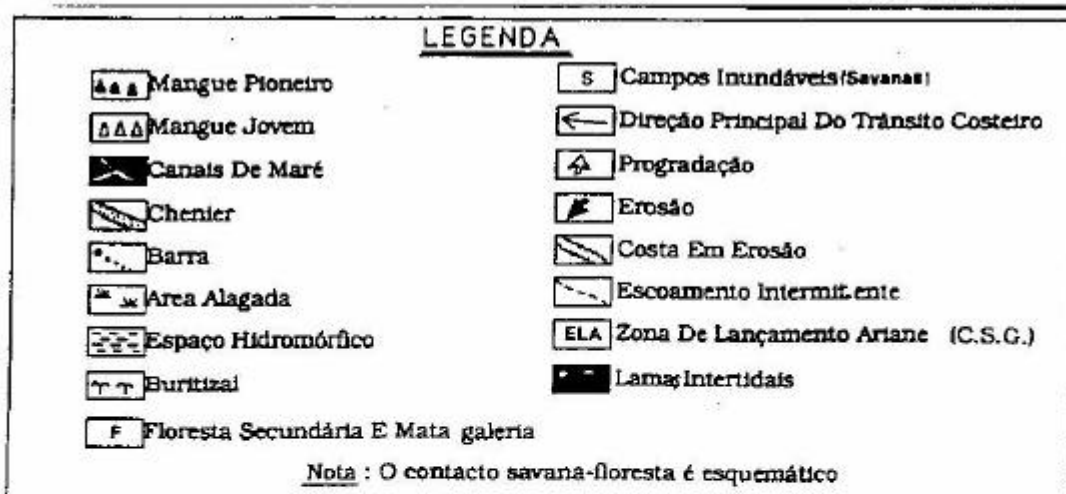


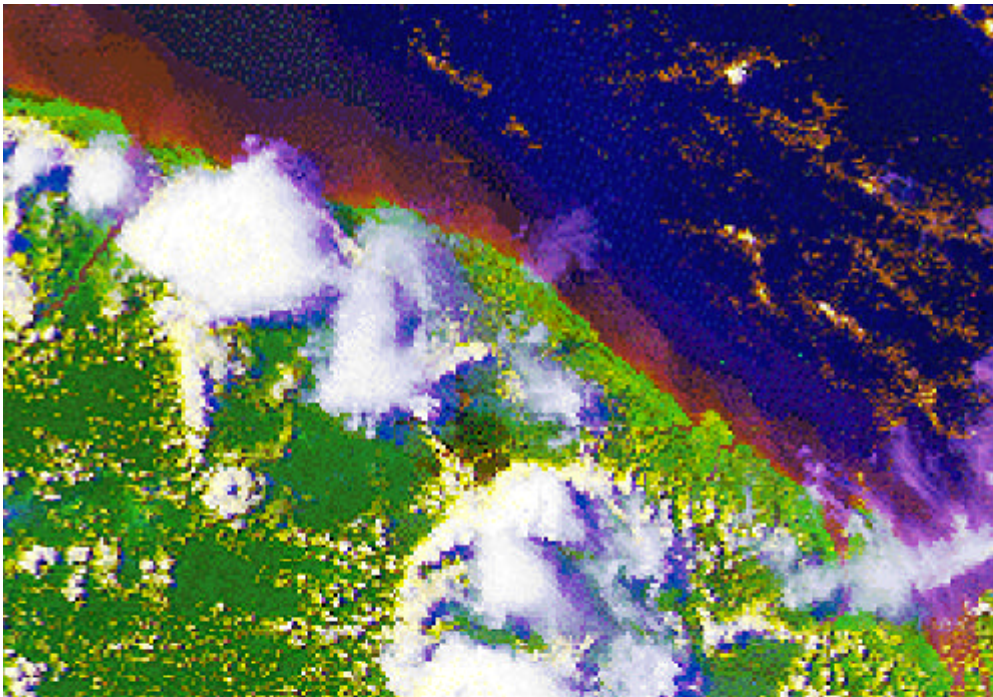
Figure 8 :cartographie des bancs de vase (Malmanou ry, Karouabo)

Grâce à la télédétection il a été possible de quantifier en Guyane ces variations multitemporelles. Entre Kourou et Iracoubo, par exemple, elles sont de l'ordre de 200 m/an (recul ou progradation)²² (LOINTIER M.; CHARRON C. & PROST M.T. ,1990) et ont un impact certain sur le comportement de la mangrove. On pourrait conclure que les vases qui se trouvent à présent devant les ELA sont de sédiments qui se déplaceront entièrement vers le NW dans le futur proche; mais les sondages montrent qu'une "traîne" de vase reste sur place dans la zone infratidale.

En conclusion l'environnement sédimentaire où se trouvent les installations du CSG

- d'une part des événements globaux traduits par *deux mouvements transgressifs de l'oc éan mondial* séparés par une grande *r égression*.

- d'autre part, d'une situation régionale représentée par l'énorme *apport sédimentaire amazonien*, "moteur" actuel de la sédimentation au long des rivages et sur la proche plate-forme continentale.



²² Chiffre sur 10 ans, obtenue par superposition de scènes satellitaires (1976-1986). D'autres observations montrent cependant que les phénomènes peuvent s'accélérer ou ralentir en fonction d'autres paramètres (variations de la décharge amazonienne, rhéologie des vases, variabilité climatique interannuelle, disposition de la ligne du rivage, etc...). Quoiqu'il en soit, il est plus correct de parler des *phases* d'invasement au lieu de *cycles*, ces derniers donnant une fausse idée d'une périodicité sans faille (15 ans + 15 ans, par ex.)

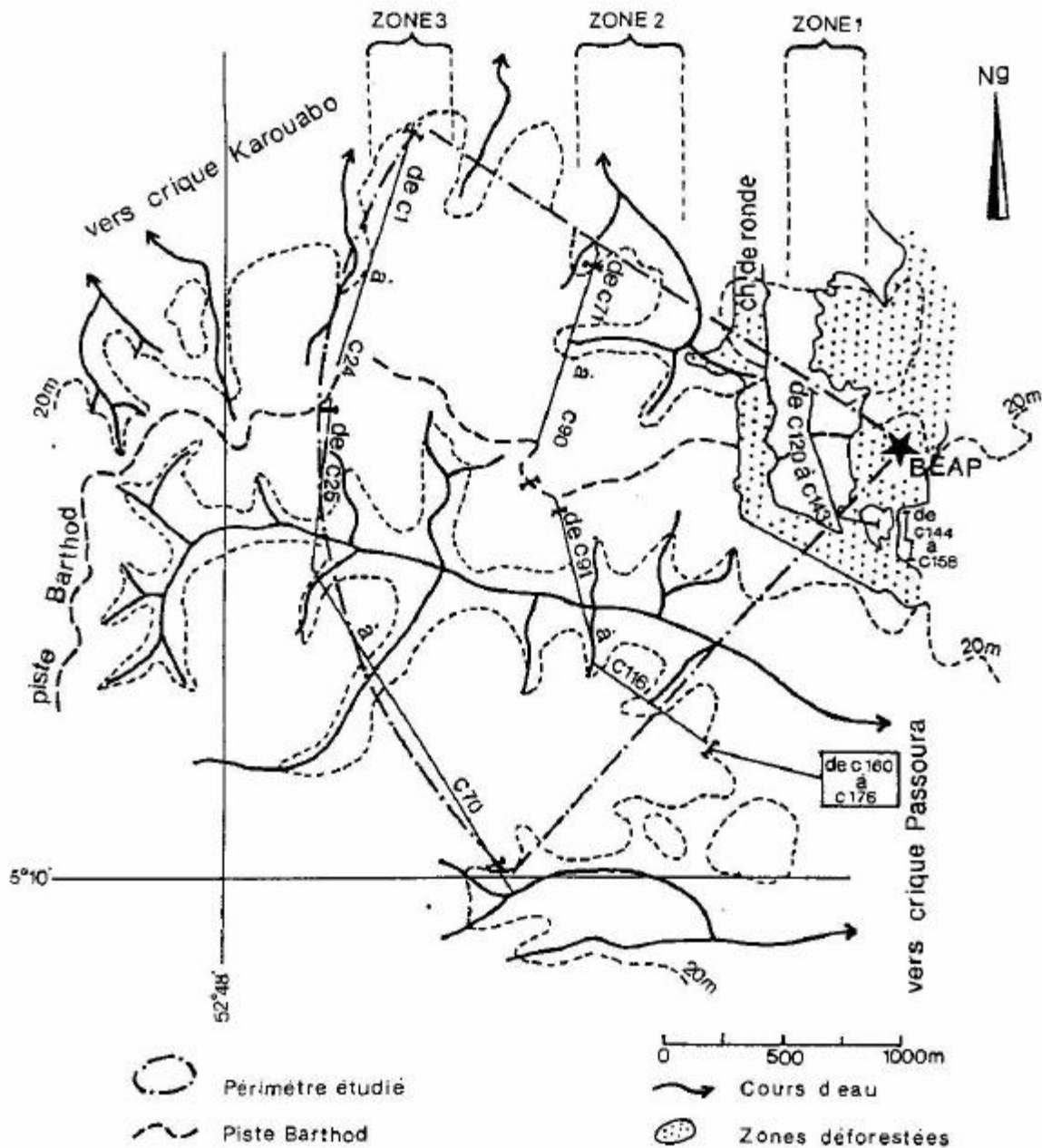


Figure 9 :Dispositif de mesure

Le relevé des collecteurs est mensuel (milieu de mois) ; leur contenu en feuilles est alors transféré dans un sac dûment étiqueté, rapporté au laboratoire, puis, séché en salle sèche à 34°C et 40% d'hygrométrie durant deux semaines. La stabilisation du poids sec est obtenue dès la première semaine. On calcule alors l'intensité de la défeuillaison en poids sec par m² et par jour.

3.1.2 Variabilité temporelle de la défeuillaison en forêt guyanaise

La chute de litière a déjà fait l'objet de mesures en forêt guyanaise, dans le cadre de l'étude du cycle de la matière organique et de la production primaire en forêt primaire, au site

ECEREX, sur la piste de St Elie, distante de 30 km du banc d'essai (Puig 1979; Puig et Delobelle 1988).

Nous comparerons les résultats obtenus à Passoura-Karouabo sur la plus longue série de récoltes (collecteurs des zones 2 et 3 entre septembre 1991 et octobre 1993; N=115; 1 collecteur éliminé par la chute d'un très gros arbre) avec ceux du site ECEREX.

Les données de Puig et Delobelle sont exprimées pour l'ensemble de leurs relevés (N=60) en biomasse sèche par ha. et par mois et mises en regard de la pluviométrie. Nous en faisons de même pour cette première approche.

Au site ECEREX comme à Passoura-Karouabo, la chute des feuilles suit un cycle saisonnier très marqué. L'amplitude des variations saisonnières est comparable dans les deux sites: maxima du même ordre, minima légèrement plus creusés au site piste de St Elie. Cependant, le calage du pic de défeuillaison sur le rythme pluviométrique ne semble pas être de même nature. Il intervient en fin de saison pluvieuse - début de saison sèche (pic entre juillet et septembre) à la piste de St Elie, alors qu'il est apparu calé sur les minima pluviométriques pour les deux premières années d'observation (1991 et 1992) à Passoura-Karouabo. Pour la troisième année d'observation (1993), nous constatons à Passoura-Karouabo un décalage du pic vers la fin de la saison pluvieuse. Cette précocité du pic pourrait être consécutive à une distribution particulière (bimodale) des pluies au cours de la saison pluvieuse de 1993; un événement assez comparable n'avait cependant pas produit le même effet en 1979, piste de St Elie. Le phénomène étudié présente quelques différences entre les deux sites notamment quant au calage climatique. Nous ne pouvons en fournir une explication définitive, mais rappelons que d'après l'étude préliminaire (Sabatier & Prévost, 1992) la forêt de Passoura-Karouabo porte dans sa composition floristique les stigmates d'une secondarisation très ancienne ce qui n'est pas le cas sur la Piste de St Elie.

3.1.3 Variabilité spatio-temporelle de la défeuillaison en forêt de Passoura-Karouabo.

Les données recueillies depuis septembre 1991 s'organisent en séries mensuelles. Ces séries mensuelles peuvent être séparées en séries indépendantes sur la base du type de sol ou après le début des essais de propulseurs de la pollution ou non.

Pour chaque collecteur et chaque mois, différentes variables peuvent être calculées:

- 1) intensité de la défeuillaison en biomasse sèche/m² /j ;
- 2) fraction de la biomasse de feuilles en % tombée durant le cycle annuel;
- 3) variation de l'intensité de défeuillaison en % du mois précédent.

L'application du test de Kolmogorov-Smirnov montre que quelle que soit la série et la variable, les valeurs ne sont jamais distribuées suivant une loi normale.

Les séries sont généralement fortement asymétriques avec une extension vers les valeurs élevées. Cela se comprend aisément d'un point de vue biologique; la phénologie de la défeuillaison comporte deux modes extrêmes:

- * défeuillaison brutale, complète et plus ou moins durable (type caducifolié);
- * défeuillaison partielle, plus lente et plus continue (type sempervirent).

Entre ces deux extrêmes, tous les intermédiaires sont possibles. Le comportement caducifolié concerne essentiellement les grands arbres mais il n'est pas dominant; la forêt guyanaise est globalement sempervirente.

La variable 2 (fraction du total annuel en %) permet de s'affranchir des variations spatiales liées à la densité du couvert végétal en exprimant le rendement de chaque collecteur

La variable 3 (variation par rapport au mois précédent en %) permet également de s'affranchir des variations spatiales liées à la densité du couvert végétal mais met l'accent sur les

La comparaison des résultats obtenus pour les différentes séries sera menée à l'aide de tests non paramétriques, tests n'impliquant pas un type de distribution particulier.

Le test U de Mann-Whitney permet de comparer deux séries indépendantes (groupes) sur l'une des trois variables quantitatives.

Le test de Kolmogorov-Smirnov permet de tester l'hypothèse alternative à l'hypothèse nulle: groupe 1 > (ou <) groupe 2 .

La représentation graphique des résultats sera faite suivant la méthode des "box plot" qui permet de caractériser la distribution de chaque série.

Les résultats d'ensemble sont présentés pour les 116 collecteurs mis en place au cours de l'étude préliminaire (sept. 1991). Ils sont situés sur les zones 2 et 3 (figure 9), c'est-à-dire à l'extérieur de l'enceinte du C.S.G. . On constate que :

- 1) les fluctuations saisonnières concernent bien l'ensemble de la distribution et non les
- 2) le pic de défeuillaison de 1993 est plus précoce (juillet-août) que ceux de 1991 et 1992 et qu'il est également plus accentué. L'application du test T de Wilcoxon (comparaison non paramétrique de deux séries dépendantes) permet de vérifier que les distributions observées en juillet et en août 1993 diffèrent significativement de celles des pics précédents ($P < 0,05$). Cela est plus net encore lorsque les résultats sont exprimés pour chaque collecteur en % du rendement annuel.

3.1.4 Relation entre chute de litière et type de sol, recherche de groupes témoins

Certains auteurs (Schaik et Mirmanto 1985; Puig et Delobelle 1988) mentionnent en forêt tropicale humide des différences de chute de litière en fonction des sols.

Bien que les séries mensuelles, comparées deux à deux par types de sol, ne présentent pas toujours de différences significatives (les séries les plus éloignées étant celles sur sol profond et sur sol hydromorphe inondable, nous avons tenu compte du type de sol afin d'établir les

D'après l'étude pédologique menée par Barthes (1992), nous avons retenu cinq grands types de sol dans les zones étudiées:

- 1) très profond (sur série détritique de base)
- 2) profond (sur schistes)
- 3) peu profond (sur schistes)
- 4) hydromorphe non inondable
- 5) hydromorphe inondable

3.2 Chute de litière et pollution acide par les rejets gazeux du banc d'essai

Démarche:

Comparaison de séries indépendantes (zone polluée, zone non polluée) sur même type de sol avec élimination des collecteurs en limite des zones. Application des tests U de Mann-Whitney et de Kolmogorov-Smirnov.

3.2.1 Evaluation de l'impact de la pollution acide suite au premier essai (16.02.1993)

D'après les indications fournies par le service Sauvegarde Sol du C.S.G., le nuage émis par l'essai n° 1 n'a pas survolé le dispositif de suivi et se trouvait encore plein sud des installations du BEAP en zone 2. Un dispositif complémentaire a été mis en place au sud du BEAP dès le 17.02.1993.

En zone 1, 15 collecteurs (c144 à c158, figure 9).

En zone 2, 17 collecteurs (c160 à c176, figure 9).

Les distributions sont comparées en intensité de défeu illaison (dg/m²/J) et en % de variation par rapport au mois précédent à partir d'avril 1993.

3.2.1.1 En zone 1

La comparaison des zones touchées et non touchées par la pollution acide du premier essai peut être effectuée avec un groupe témoin important pour les 4 mois qui suivent l'essai, le second essai (juin 1993) ayant touché les zones témoins.

Au cours des mois qui suivent l'essai, les distributions d'intensité de chute de feuilles ne diffèrent significativement ($P < 0,05$) qu'en juin (4e mois après le tir). Cependant, les variations d'intensité d'un mois sur l'autre sont toujours significativement différentes ($P < 0,05$).

3.2.1.2 En zone 2

Au cours des 4 mois qui suivent l'essai, les distributions d'intensité de chute de feuilles diffèrent significativement ($P < 0,05$) en mars (1e mois) et en juin (4e mois). Dans les deux cas, les valeurs obtenues pour le groupe "pollués" sont significativement supérieures à celles des "indemnes" ($P < 0,05$). Cependant, les distributions des variations d'intensité d'un mois sur l'autre

3.2.2 Evaluation de l'impact de la pollution acide suite au deuxième essai (26.06.1993)

Le nuage émis par l'essai n° 2 a survolé le dispositif de suivi. Les dépôts liés au passage du nuage ont pu être localisés et quantifiés par l'étude des pluvioléssivats (Grimaldi et Sarrazin, 1993). Les secteurs pollués de chacune des zones sont identifiés à l'aide des dépôts et non de la

3.2.2.1 En zone 1

Seul le mois qui suit l'essai n°2 (juillet 1993) présente une différence significative ($P < 0,05$) entre "pollués" et "indemnes" pour les distributions des valeurs d'intensité de chute de feuilles comme pour les distributions de la proportion de collecte par rapport au cycle annuel (non représenté).

Les taux de variation ne sont jamais significativement différents entre "pollués" et "indemnes" pour les 4 mois suivant l'essai (juillet à octobre), ($P > 0,05$). Cependant le groupe témoin situé exclusivement en zone 1 à une distribution des taux de variation sensiblement plus élevée qu'en zones 2 ou 3. La comparaison des groupes "pollués 2.1" et "indemnes zones 2 et 3" fait apparaître un taux de variation significativement supérieur en juillet pour les pollués.

3.2.2.2 En zone 2

Six emplacements seulement peuvent être considérés comme ayant subi une pollution par les retombées acides. La comparaison des résultats obtenus en % du cycle annuel entre ce groupe de "pollués" et un groupe de 31 collecteurs "indemnes" sur le même type de sol (peu profond sur schistes) montre que la montée en puissance du pic de 1993, en juillet, est beaucoup plus rapide pour le groupe "pollué". Les distributions observées en juillet 93 sont significativement différentes ($P < 0,05$). Cependant, une rétrospective nous montre qu'à trois autres reprises (oct.1991, juin 1992, oct. 1992) de telles différences se sont produites entre les deux groupes.

Si l'on considère le taux de variation, juillet et août 1993 présentent à nouveau des différences significatives entre "pollués" et "indemnes". L'accroissement des chutes de feuilles est plus important pour le groupe "pollué" en juillet alors qu'il est moindre le mois suivant. Pour ce type de données, la rétrospective montre que novembre 1992 présente également une différence

Pour chacun des trois pics observés (oct.91, nov.92, juil.93), le groupe "pollué" présente un maximum significativement supérieur ($P < 0,05$) à celui du groupe "indemne". De plus, pour ce groupe "pollué", le pic de 1993, postérieur à la pollution, n'est pas significativement différent de ceux de 1991 et 1992 ($P > 0,05$) antérieurs à la pollution.

3.2.2.3 En zone 3

Dix emplacements ont subi une pollution acide significative. Ils sont situés sur des sols profonds sur schistes. Un groupe témoin "indemnes" de 24 emplacements peut être constitué sur ce même type de sol.

La comparaison des groupes "indemnes" et "pollués" après le second essai ne montre pas de différences significatives quant à la quantité relative de feuillage tombé dans chaque collecteur mais montre une différence importante du taux de variation, cependant, celle-ci n'est pas significative au seuil de 5% mais de peu ($P = 0,051$). La rétrospective montre qu'entre ces deux groupes, le taux de variation a été significativement différent ou proche de l'être ($P < 0,06$) à 4 autres reprises et que les quantités relatives l'ont été à 2 reprises avant l'essai.

3.2.3 Recherche d'un effet cumulatif

Indemnes et pollués sont comparés sur une période de 8 mois après la pollution pour le premier essai et sur 4 mois après le deuxième essai. Pour le premier essai nous utilisons les valeurs cumulées en biomasse de matière sèche / m² (figure 10) , pour le second, il est possible d'utiliser les valeurs relatives en % du cycle annuel (figure 11).

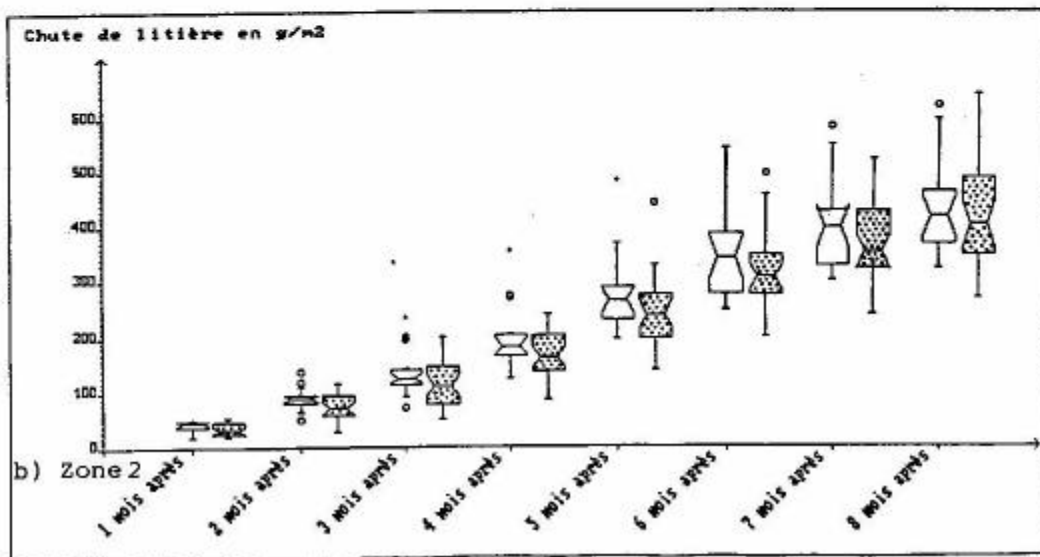
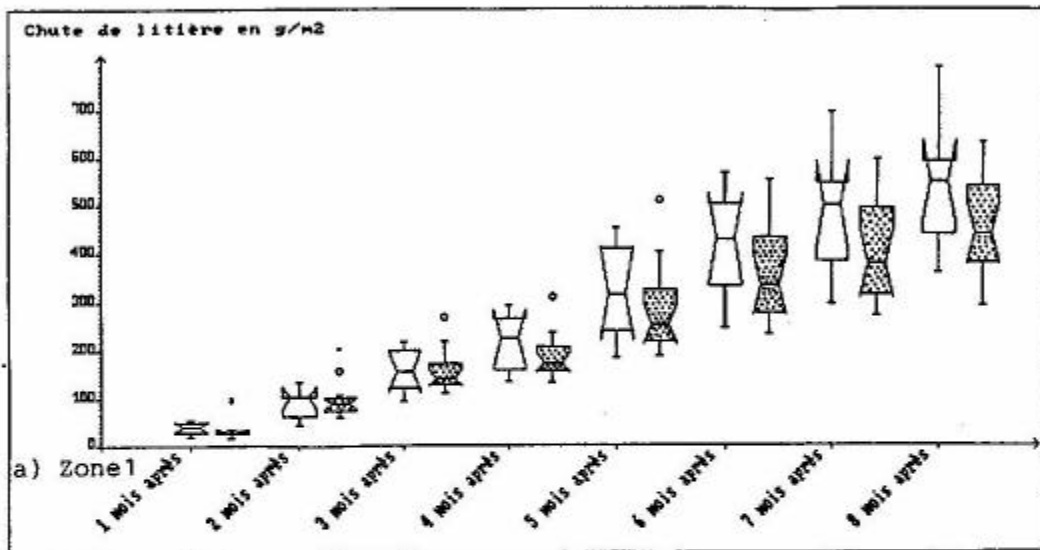
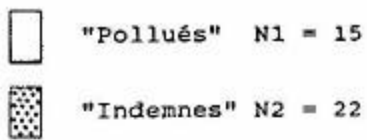


Figure 10 : Comparaison des chutes de litières cumulées après le 1^{er} essai

a) zone 1 ; b) zone 2; c) zone 3

□ "Pollués" N1a = 10 ; N1b = 6 ; N1c = 10
 ■ "Indemnes" N2a = 14 ; N2b = 29 ; N2c = 24

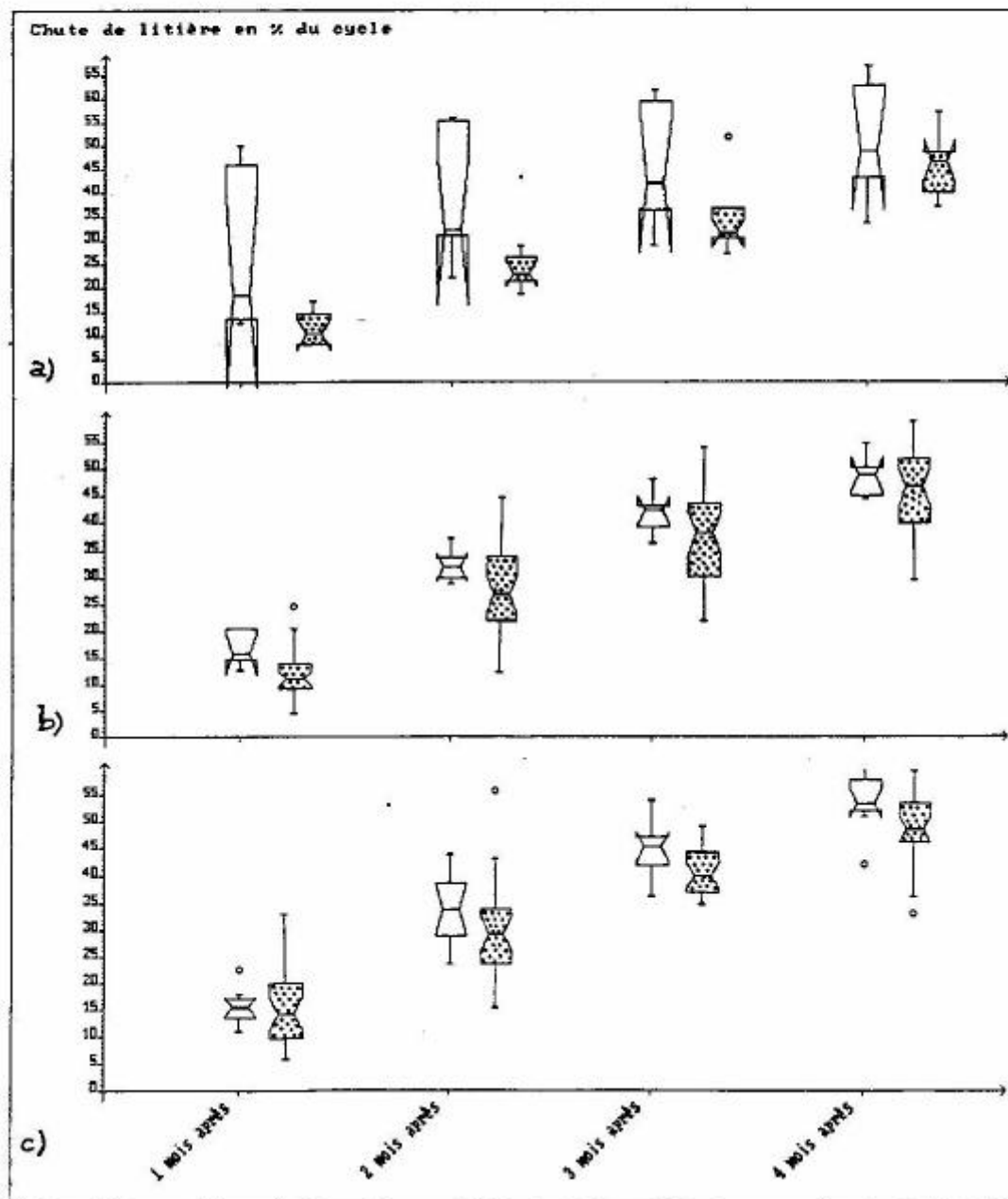


Figure 11 : Comparaison des chutes de litières cumu lées après le 2^{er} essai

3.2.3.1 Après le premier essai

La différence entre "pollués" et "indemnes" n'est signi ficative au bout de 4 mois que pour la zone 2 et ne l'est plus nulle part après 8 mois. Rétrospectivement si nous prenons le cumul des 4

mois de plus forte intensité de défeuillaison pour chacun des deux pics précédents, nous n'obtenons jamais de différence significative entre ces deux groupes, ($p_1 = 0,65$; $p_2 = 0,078$) mais observons une tendance du même type (groupe des pollués supérieur à celui des indemnes) surtout pour le pic de 1992.

3.2.3.2 Après le deuxième essai

La différence entre "pollués" et "indemnes" n'est significative au bout de 4 mois qu'en zone 3. Une tendance comparable (groupe des pollués supérieur à celui des indemnes), s'observe pour les zones 1 et 2 (figure 11). Rétrospectivement le cumul des 4 mois de plus forte intensité de défeuillaison pour les pics de 1991 et 1992 ne présentent pas de différence significative pour la

3.2.4 Défeuillaison du *Goupia glabra*

Le goupia, *Goupia glabra* (Aublet), de la famille des C ELASTRACEAE est, parmi les arbres de la voûte forestière, l'espèce la plus fréquente (Sabatier et Prévost 1992). Il atteint ici une densité 10 fois supérieure à celle qu'il a en forêt primaire. Nous la prenons comme espèce test, sa position dans la canopée permettant de supposer qu'elle est plus que d'autres exposée à la pollution par

Compte tenu de sa distribution spatiale, seules les zones 1 et 3 et le second essai peuvent être

3.2.4.1 En zone 1

Le taux de variation en juillet 1993 (un mois après l'essai) est significativement supérieur pour le groupe "pollué", dès le deuxième mois, il n'existe plus de différences significatives (figure 12 a et b).

3.2.4.2 En zone 2

Le taux de variation n'est jamais significativement différent entre "pollués" et "indemnes" (figure 12 c et d)

- a et b: en zone 1, 1er et 2ème mois après l'essai.
 N1 (indemnes) = 6 ; N2 (pollués) = 4
- c et d: en zone 2, 1er et 2ème mois après l'essai.
 N1 (indemnes) = 6 ; N2 (pollués) = 7

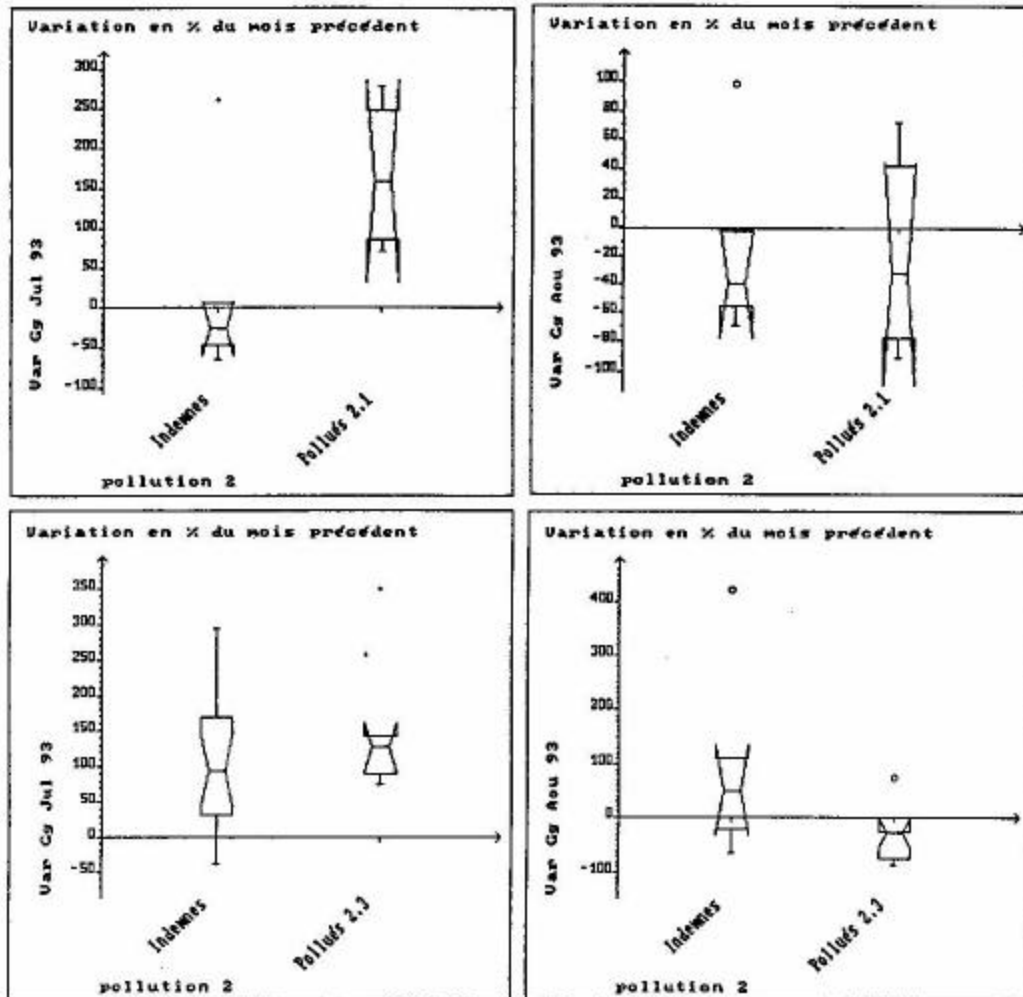


Figure 12 : Comparaison des variations d'intensité de chutes de feuilles du Goupi, après 2^e essai

4 HYDROLOGIE

Introduction

Les deux bassins versants de la crique KAROUABO et PASSOURA sont étudiés depuis 1990. Nous présentons dans cette partie les résultats du suivi hydrologique pour les années 1992 et 1993, complétant la connaissance des hauteurs d'eau, des débits et des caractéristiques

Cette démarche a été complétée par une étude des principaux paramètres chimiques des eaux : mesures du pH, de la conductivité, de la température et de l'oxygène dissous, pendant deux périodes caractéristiques du climat Guyanais (saison sèche, saison humide), avant les essais de boosters. Ces mesures ont été reprogrammées durant un mois, pendant une période qui permettait d'encadrer les dates des essais de boosters à poudre, le 16 février 1993 et le 25 juin 1993.

Une analyse de la qualité chimique des eaux a été faite par C. Grimaldi (1993). Nous discuterons de ces résultats en regard des phénomènes hydrologiques observés durant ces

4.1 Dispositif de mesure

Depuis l'installation de la plupart des appareils en 1990, leur position géographique a été améliorée par l'emploi du positionnement par satellite (GPS).

Rappel du dispositif de mesure et caractéristiques :

4.1.1 Station pluviométrique du BEAP

Type Oedipe (n° 1055)

coordonnées : + 05° 09' 00" lat. nord

- 52° 42' 05" long. ouest

Altitude : 30 mètres

numéro de code ORSTOM : 2603590102

Début des mesures : 09 février 1990

Arrêt des mesures : janvier 1993 (destruction par vandalisme, après son déplacement piste Bartod, avant le premier essai B1)

4.1.2 Station de la Karouabo au pont ancienne RN1 :

Station limnigraphique API avec télétransmission ARGOS

n° de SPI : 2552 - n° de machine : 14031

coordonnées : + 05° 13' 39" lat. nord

- 52° 47' 10" long. ouest

Altitude : 2 mètres

Zéro de l'échelle : à - 8421 mm du repère sur tablier du pont.

Surface du bassin versant à la station: 83,3 km² (67 km²)

numéro de code ORSTOM : 2608500101

Début des mesures : 1er mai 1990



Le pont de la route de l'espace sur la Karouabo (30 m ars 1990)

4.1.3 Bassin de la Passoura :

-a) Station de **Soumourou** (13 km en amont du pont, par la crique)

Station limnigraphique CHLOE "C"

n° de SPI : 2412 - n° machine : 12011

coordonnées : + 05° 08' 45" lat. nord

- 52° 44' 13" long. ouest

Altitude : 2 mètres

Zéro de l'échelle : à - **8638 mm** du repère planté dans un arbre balisé.

Surface du bassin versant : 65,5 km² (59 km²)

numéro de code ORSTOM : 2603500601

Début des mesures : 05 avril 1990

Arrêt définitif le : 28 oct 1992

(vandalisme le 15 mars 1992 - section du câble électrique - réparé le 28 mai 92, puis panne le 28 octobre 92)

b) station de la **Passoura Pont - déviation RN1** :

Station limnigraphique type OTT XX

coordonnées : + 05° 09' 02" lat. nord

- 52° 41' 57" long. ouest

Altitude : 2 mètres

Zéro de l'échelle : à - **7755 mm** du repère sur le tablier du vieux pont.

Surface du bassin versant : 109 km² (92,1 km²)

numéro de code ORSTOM : 2603500501

Début des mesures : 24 janvier 1991



Limnigraphe du PONT de la Karouabo (CHLOE)



Station limnimétrique de la Passoura au pont RN1

4.1.4 Coordonnées des collecteurs de pluviolessivats

Lors de la collecte des eaux de pluviolessivats (pluvio mètres sous couvert forestier), après le premier essai de booster, en février 1993, une série de repérages GPS ont pu être réalisés en forêt. Ceux-ci sont exprimés pour plus de simplicité en coordonnées kilométriques UTM.

1992, nous présentons les valeurs obtenues au BEAP, pour 1993, celles de la station météo du CSG.

Leur analyse au niveau mensuel, comparée aux moyennes 1969-88 du CSG, montre que 1992 est une année déficitaire (période de retour 15 ans), tandis que 1993 est normale, avec un excédent en janvier et un déficit en juillet et en décembre. Une analyse des isohyètes annuelles fournie par Météo-France confirme cette tendance.

Le tableau 2 récapitule ces différentes situations pluviométriques par rapport aux corps secondaires et principaux :

Tableau 2

Comparaison des corps pluviométriques par rapport
aux moyennes mensuelles 1969 - 1988 (CSG) et totaux annuels
(total année moyenne : 2938 mm)

	corps secondaire (janvier)			corps principal (mai)			total mm
	déficit	normal	excès	déficit	normal	excès	
1990	-	-	X	-	-	X	3464,4
1991	X	-	-	-	X	-	2324,5
1992	X	-	-	X	-	-	2040,0
1993	-	-	X	-	X	-	2927,5

Relation entre les données mensuelles des postes pluviométriques BEAP et CSG :

Une corrélation des totaux mensuels au BEAP et au CSG indique un déficit au BEAP de 14%.

Très proche de la relation définie en 1992, on obtient sur toute la série de mesures :

$$\text{BEAP} = 0,863 \text{ CSG} + 14,1 \quad \text{coef. de corrélation } R^2 = 0,941$$

Une vérification à la fiole de 20 cm³, le 16 juillet 1992, montre un détarage minorant des augets du pluviographe de l'ordre de 20%, qui explique très certainement ce déficit de 14%

A notre échelle d'analyse et par rapport aux besoins de cette étude, nous n'avons pas opéré de corrections sur les valeurs pluviométriques journalières et mensuelles au BEAP, qui sont

4.2.2 Contexte pluviométrique des séries d'analyse chimiques :

Fin 1991, dans l'impossibilité de définir une période type dans l'année pour représenter les conditions hydropluviométriques des essais prévus en 1993, nous avons opté pour un choix de dates de référence, correspondant aux saisons extrêmes rencontrées en Guyane : saison sèche d'octobre, et saison humide de mai.

Les quatre séries d'analyses chimiques pratiquées aux stations de mesures hydrologiques se sont déroulées dans les contextes pluviométriques suivants :

1-du 2 au 30 octobre 1991.

saison sèche, 70% de déficit par rapport à la moyenne 1969-88.

2-du 6 avril au 6 mai 1992.

saison humide, pluviométrie mensuelle normale.

3-du 4 février au 31 mars 1993 (essai B1 du 16 février)

pluviométrie mensuelle normale.

4-du 22 juin au 10 juillet 1993 (essai M1 du 25 juin)

pluviométrie mensuelle normale

On constate que les séries de mesures chimiques ont été effectuées dans des contextes pluviométriques très proche des moyennes mensuelles sur la période 68-88, le déficit de la première série n'étant accentué que par la faible valeur de la moyenne mensuelle (22 mm de pluie, contre 78 mm en année moyenne).

Toutes les séries de mesures chimiques ont donc été réalisées dans des contextes pluviométriques moyens à l'échelle mensuelle, et sans événement particulier à l'échelle

4.3 Hydrologie du bassin de la crique Karouabo

4.3.1 Morphologie

Le bassin de la Karouabo a une surface de 83,3 km² à la station de mesure des hauteurs, au pont sur l'ancienne RN1. Il est caractérisé par un couvert forestier dense et quelques savanes dont nous rappelons les surfaces (Lointier, 1992)

Les numéros pairs sont réservés aux savanes en rive gauche, les impairs à la rive droite. On obtient pour les savanes numéros :

- 1 - 6,18 km²
- 2 - 4,18 km²
- 3 - 9,45 km²
- 4 - 1,87 km²
- 5 - 1,63 km²
- 6 - 0,85 km²

4.3.2 Homogénéisation des hauteurs de la station de la Route de l'espace (ex RN1):

Certaines lacunes de mesure des hauteurs d'eau, dues à des problèmes d'ordre technique, ont été complétées de la façon suivante:

-du 15 au 27 juillet 1992.

Corrélation avec la station de Soumourou du bassin de la Passoura :

Une relation satisfaisante est obtenue entre les cotes mesurées à la Karouabo et les cotes d'étale de basse mer de Soumourou. Il a été retenu la relation suivante :

$$h \text{ Karouabo} = 0,606 h \text{ Soumourou (Etale BM)} + 182 \quad (r = 0,945)$$

-du 8 décembre 1992 au 25 janvier 1993 et du 16 au 23 juillet 1993 :

Une relation a été établie par Ph. Vauchel, entre la crique Toussaint (cotes échelle supérieures à 1,80 m) et la crique Passoura (étale de basse mer et cotes échelles supérieures à 5,80 m) :

$$h \text{ Karouabo} = 0,2895 \text{ Passoura} + 0,2839 \text{ Toussaint} + 258,5 \quad (r=0,94)$$

Ces relations permettent de calculer, pour 1992 et 1993 les débits avec la courbe d'étalonnage établie à partir des jaugeages antérieurs (Lointier, 1992).

4.3.3 Bilan annuel :

	année 1991
débit moyen annuel 91:	4,38 m ³ /s
débit maximum instantané :	48,5 m ³ /s, le 2 juin 91
arrêt des écoulements :	du 23 nov. au 6 déc. 91
volume écoulé durant l'année 91:	139,5 millions de m ³
débit spécifique 91:	53,1 l.s ⁻¹ .km ⁻²
Lame écoulée	1675 mm
Déficit d'écoulement	649 mm

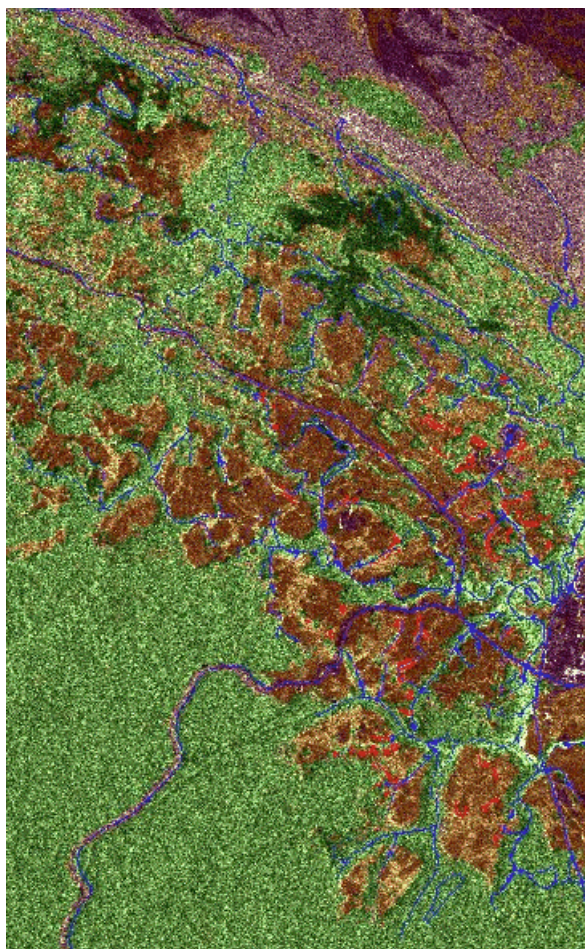
	année 1992
débit moyen annuel 92:	3,22 m ³ /s
débit maximum instantané :	25,8 m ³ /s, le 9 mars 92
arrêt des écoulements :	du 20 oct. au 29 nov. 92
volume écoulé durant l'année 92:	101,8 millions de m ³
débit spécifique 92:	38,7 l.s ⁻¹ .km ⁻²
Lame écoulée	1222 mm
Déficit d'écoulement	818 mm

	année 1993
débit moyen annuel 93:	4,96 m ³ /s
débit minimum instantané :	0,42 m ³ /s, le 23 sept. 93
débit maximum instantané :	34,2 m ³ /s, le 7 avril 93
arrêt des écoulements :	néant
volume écoulé durant l'année 93:	156,4 millions de m ³
débit spécifique 93:	59,5 l.s ⁻¹ .km ⁻²
Lame écoulée	1878 mm
Déficit d'écoulement	1049 mm

Nous avons déjà signalé la particularité de ce petit bassin côtier, qui se trouve hors de l'influence de la marée océanique : les mesures de hauteur d'eau et les mesures chimiques pratiquées en octobre 1991, pendant l'étiage, confirment encore ce fait pour les deux dernières années d'observation. Par contre, les arrêts d'écoulements constatés en 1991 (15 jours), puis en 1992 (40 j), ne se sont pas manifestés en 1993. En comparant le nombre de jours d'arrêt à la pluviométrie annuelle, on peut avancer que l'arrêt d'écoulement commencerait approximativement pour des totaux annuels inférieurs à 2500 mm de pluie, mesurés à la station du CSG.

4.3.4 Schéma de fonctionnement du bassin :

L'étude de données du radar imageur de ERS1 (Lointin et al. 1993 a&b), pendant la saison des pluies 1992, apporte quelques éléments intéressants qui précisent le schéma de fonctionnement déjà proposé dans le rapport précédent. En effet, l'étude des données radar multitemporelles à trois semaines d'intervalle, comparées aux hydrogrammes, indique que la zone de stockage en aval de la station de mesure, fonctionne à l'échelle temporelle de la crue. Il se forme donc un "marais" aval, jouant le rôle de blocage vis à vis des eaux océaniques, et dont l'écoulement vers la mer dure quelques jours, en longeant le cordon sableux littoral, vers le nord-ouest sur 2,5 km.



Définition des drains et des zones de stockage potentielles.

Avec des arrêts d'écoulements en saison sèche, pour des conditions pluviométriques inférieures à la moyenne et des processus de stockage des eaux dans les cuvettes marécageuses pendant la saison des pluies, ce bassin à petit débit est tout à fait inadapté à l'évacuation vers la mer de tout produit contenu dans ses eaux.

4.4 Hydrologie du bassin versant de la crique Passoura

4.4.1 Morphologie

Le bassin versant de la Passoura est nettement différent de celui de la Karouabo. La crique se jette dans le fleuve Kourou, non loin du pont franchissant ce dernier. La station de mesure sur la RN1, contrôlant un bassin de 109 km² est située à 7 km, par la rivière, de la confluence avec le Kourou.

Les marais sont plus nombreux et de nature plus variée (307 est et 570 nord) que sur la Karouabo. Certains se couvrent de plus d'un mètre d'eau en saison des pluies. Leurs surfaces sont les suivantes :

- 3 - 0,50 km ²	8 - 0,09 km ²
- 4 - 0,40 km ²	9 - 0,18 km ²
- 5 - 0,07 km ²	10 - 0,25 km ²
- 6 - 0,56 km ²	11 - 1,13 km ²
- 7 - 1,13 km ²	12 - 0,23 km ²



4.4.3 Bassin de la Passoura au pont de la nouvelle RN1

4.4.3.1 hauteurs observées

Les enregistrements en 1992 et 1993 sont complets. Les hauteurs moyennes journalières sont reproduites en annexe II.

L' influence de cette station au régime du Kourou et a ux marées se font sentir de la cote 560 cm jusqu'à la cote 720 cm à l'échelle.

L'amplitude maximale enregistrée est de 1,1 mètre.

Afin de faciliter les calculs de débits, deux fichiers spécifiques ont été créés par le laboratoire d'hydrologie de l'Orstom de Cayenne :

- cotes aux étales de basse mer (capteur B)
- cotes moyennes journalières (capteur J)

Ce dernier fichier permet le calcul des débits, par la méthode des corrections proposée dans le rapport relatif au lot 2 (Lointier, 1992).

Durant l'étiage de 1992 et 93, les minima de hauteurs d'eau avoisinent la cote 560 cm, comme en 1991. Le maximum enregistré s'est produit le 16 mai 1993 (801 cm).

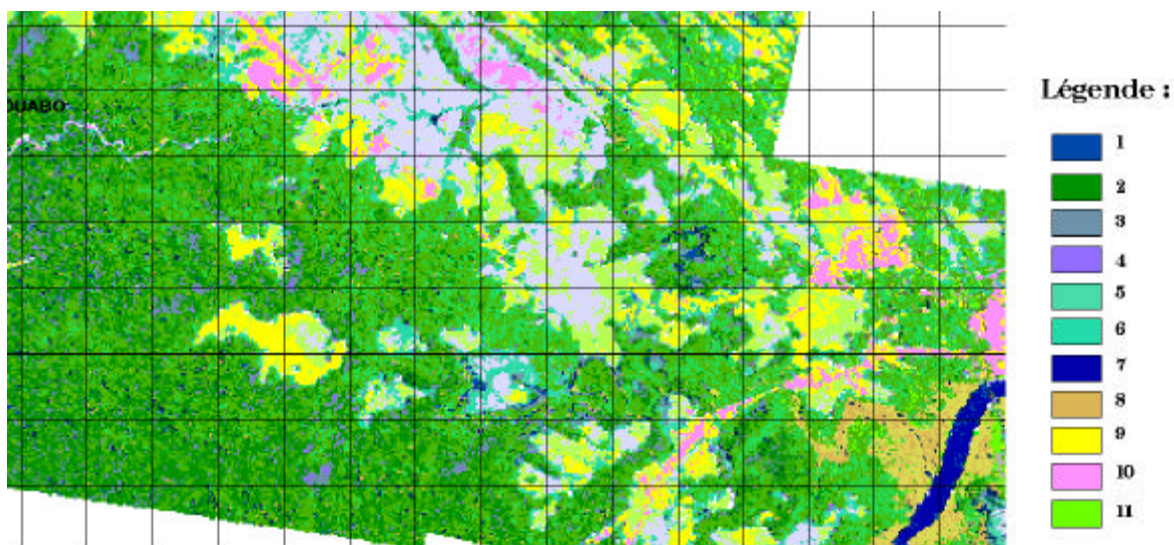


Figure 8 : donnée landsat TM du 18 juillet 1988 sur la Passoura

4.4.3.2 Calcul des débits

Ce calcul a été effectué, à partir des hauteurs moyennes journalières, en utilisant l'étalonnage corrigé, selon la formule (Lointier, 1992) :

$$Q_{Pas} = (6,2581 \cdot 10^{-4})h^2 - (0,7396)h + 218,92$$

Le résultat du calcul des débits pour 1992 et 1993 est présenté dans l'annexe II.

4.4.3.3 Bilan annuel

année 1991

débit moyen annuel 91:	5,56 m ³ /s
débit minimum journalier :	0,40 m ³ /s le 16 déc. 91
débit maximum journalier :	42,1 m ³ /s, le 3 juin 91
volume écoulé durant l'année 91:	175,3 millions de m ³
débit spécifique 91:	51,0 l.s ⁻¹ .km ⁻²
lame écoulée	1608 mm
déficit d'écoulement	716 mm

année 1992

débit moyen annuel 92:	3,74 m ³ /s
débit minimum instantané :	0,40 m ³ /s, le 20 sept. 92
débit maximum instantané :	18,5 m ³ /s, le 21 févr. 92
volume écoulé durant l'année 92:	118,3 millions de m ³
débit spécifique 92:	34,3 l.s ⁻¹ .km ⁻²
lame écoulée	1085 mm
déficit d'écoulement	955 mm

année 1993

débit moyen annuel 93:	6,94 m ³ /s
débit minimum instantané :	0,40 m ³ /s, le 8 oct. 93
débit maximum instantané :	27,8 m ³ /s, le 24 mai 93
volume écoulé durant l'année 93:	218,9 millions de m ³
débit spécifique 93:	63,7 l.s ⁻¹ .km ⁻²
lame écoulée	2008 mm
déficit d'écoulement	919 mm

On remarquera que le débit moyen annuel en 1993 est presque le double de celui de 1992, année à faible pluviosité. Par contre, le débit minimum est le même pour les trois années. Ceci confirme qu'en étiage, le débit est soutenu par la vidange des marais amont (Lointier 92) et d'une façon régulière, puisque la même cote à été observée ces trois dernières années (Figure 9).

Hydrogrammes mensuels (1990-1993) sur toute la période d'observation

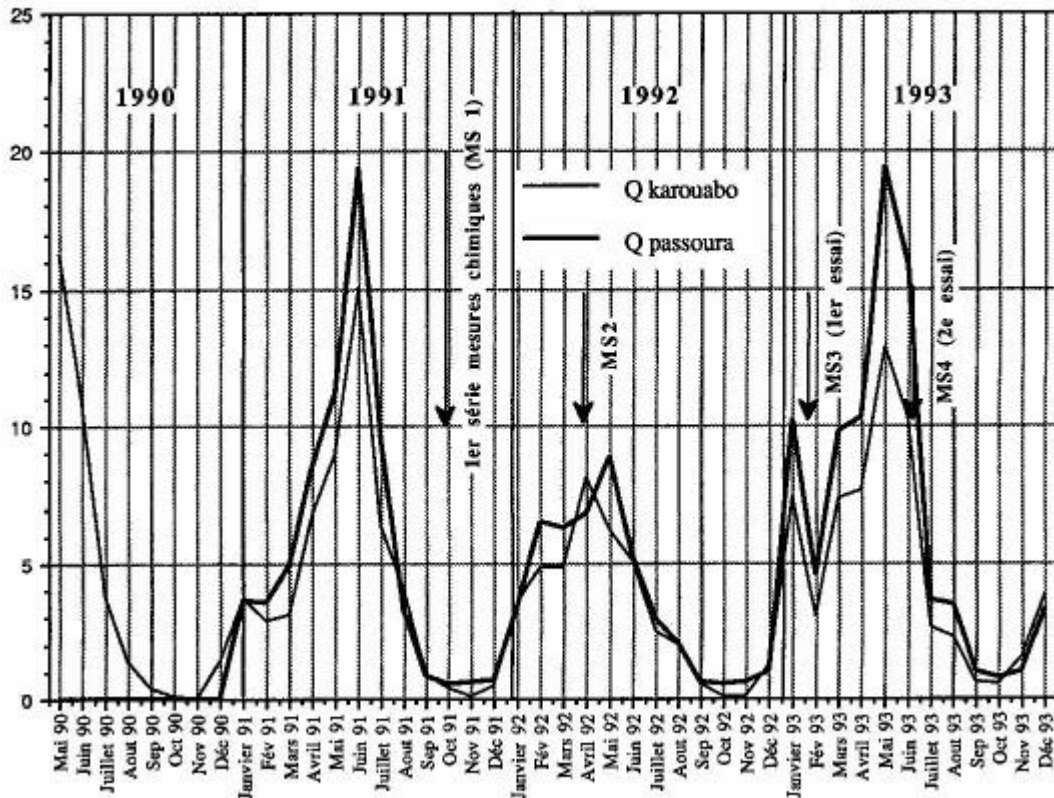


Figure 9 : Hydrogrammes pour les deux bassins aux stations de jaugeages (ponts)

En quittant les savanes et marais sans déplacements de masse d'eau apparents, on commence à observer des écoulements à partir de "Degrad Légionnaire" (UTM 310,7 est et 570,1 nord), et jusqu'au pont de la RN1. En étudiant les hydrogrammes de 1992, en septembre et octobre, pendant lesquels la pluviométrie est quasi nulle, on peut estimer que le volume d'eau déstocké par rapport aux effets de la marée, est de 1 million de m³, auxquels s'ajoutent 2 millions de m³ du débit de base, soit un total de 3 Mm³. La valeur du débit de base conduit à un volume écoulé de 4 Mm³ en septembre-octobre 1993. Ces ordres de grandeurs seront utiles, pour pratiquer par la suite, des simulations sur l'évolution du pH et des concentrations ioniques,

Avec des écoulements continus, et un volume d'eau déstocké en permanence, (environ 3 millions de m³ en étiage), ce bassin serait moins "sensible" que celui de la Karouabo, aux effets d'une dispersion de produits, d'autant qu'il se jette dans l'estuaire du Kourou, non loin de l'embouchure.

Ils convient néanmoins de connaître les processus hydrobiologiques liés aux phénomènes de diffusion et de fixation de ces produits dans les savanes et marais inondés, ainsi

4.5 Hydraulicité et contexte des mesures chimiques :

La comparaison des hydrogrammes annuels, au pas de temps journalier, des stations de la Karouabo et de la Passoura en 1992 et 1993, et au pas de temps mensuel sur toute la période de mesure (), traduit la grande différence d'hydraulicité entre ces deux années.

De décembre à juin, les crues de la Karouabo présentent toujours des débits plus élevés que sur la Passoura, mais de durée plus faible. De juillet à novembre, les débits sont très voisins en suivant la courbe de tarissement. En saison des pluies proche de la "normale", au sens statistique (soit l'année 1993), la Passoura présente un corps de saison des pluies marqué, qui dure 2 mois (mai-juin) et dont les débits ne descendent pas en dessous de 13 m³/s. Une analyse des volumes écoulés (tableau 3) et du rapport Passoura/Karouabo montre que ce rapport ne suit pas le rapport des surfaces (1,31), traduisant le fait que les régimes hydrologiques sont bien

Tableau 3

Volumes annuels écoulés aux stations (en millions de m³)

Année/ Pluviométrie	Karouabo	Passoura	Rapport Passoura/Karouabo
1991-2325mm	140	175	1,25
1992-2040 mm	102	118	1,16
1993-2928 mm	156	219	1,40

Relation entre la pluviométrie annuelle et les volumes écoulés :

On peut établir une relation entre la pluviométrie annuelle au CSG et le volume écoulé. La tendance est logarithmique ($r^2 = 0,85$ et $0,95$), mais seulement indicative (trois couples de points). Néanmoins, il est intéressant de disposer pour des simulations, d'ordres de grandeur des volumes écoulés pour des conditions climatiques variées. A partir d'un ajustement de la pluviométrie annuelle au CSG à une loi de Gauss (Rohan, 1990), nous pouvons dresser le tableau suivant :

Tableau 4

Estimation des volumes écoulés à la Karouabo et à la Passoura, en fonction de la pluviométrie d'années de récurrences variables.

Pluviométrie annuelle au CSG en mm	Période de retour années	Volumes annuels à Karouabo millions de m ³	Volumes annuels à Passoura millions de m ³
1940	20	103	112
2030	15	109	125
2170	10	119	143
2450	5	136	175
2990	5	159	229
3800	10	197	293
3950	15	203	304
4040	20	206	310

Selon les conditions climatiques, définies par les périodes de retour, en année sèche (ici de 1940 mm à 2938 mm) ou en année humides (de 2938 mm à 4040), les volumes écoulés peuvent varier du simple au double sur la Karouabo et du simple au triple sur la Passoura.

4.6 Analyse des données chimiques avant et après les essais :

Afin de faire une analyse précise des données, il nous est apparu indispensable de porter celles-ci sur des graphes temporels. En effet, l'indicateur principal des éventuels effets du nuage sur les eaux est le pH. Or, celui-ci a des variations naturelles diurnes (Grimaldi 93), et il est parfois en relation avec les variations de débit (Lointier, 94).

Les graphiques 14 à 20 présentent pour chaque station et pour chaque série de mesures, les valeurs synchrones de la conductivité, du pH, de l'oxygène dissous, des débits ainsi que la pluviométrie journalière. L'échelle des ordonnées a été fixée de 0 à 7 sur tous les graphes, permettant de porter les valeurs de pH et d'oxygène dissous sans transformation d'échelle, afin de faciliter les comparaisons entre les différentes séries temporelles. Les débits, la conductivité, et la pluviométrie ont subi une transformation d'échelle en ordonnées qui est signalée dans la

4.6.1 du 2 au 30 octobre 1991 : saison sèche avant essais

4.6.1.1 Karouabo :

Sur cette période, la pluviométrie relevée au BEAP est quasiment nulle, mis à part un petit épisode de 25 mm du 18 au 21 octobre, entraînant une petite crue de 0,3 à 0,4 m³/s.

Bien qu'en saison sèche et avec de faibles débits, l'analyse de la conductivité montre bien l'absence d'intrusion saline au niveau de cette station (valeur constante entre 32 et 33 $\mu\text{S}/\text{cm}$, caractéristique des eaux douces de rivière en Guyane).

L'oxygène dissous subit le cycle nyctéméral (Grimaldi 93) et présente une augmentation globale de 2 à 3 mg/l avant la petite crue du 23 octobre, puis une chute à 1 mg/l pendant la montée de crue. On observe une relation globalement inverse avec le débit.

Le pH est acide et oscille très faiblement autour de la valeur 5,5, sans variations majeures.

4.6.1.2 Passoura

Les débits montrent l'influence importante du Kourou et sa relation avec la mer. Sur cette période, on observe un cycle de vives eaux, puis une morte eau, puis de nouveau une vive eau, phénomène typiquement océanique. Le débit réel du bassin est masqué par ces phénomènes, et aucune crue n'est observable. Le débit enregistré est l'effet du déstockage des eaux entrées à chaque marée haute, sauf pendant la période de mortes eaux où il devient constant (0,4 m³/s).

Par ses fortes valeurs, la conductivité traduit l'effet océanique, et indique la présence d'eau saumâtre s'écoulant pendant la période de mortes eaux, sans intrusion nouvelle de sels (valeur constante, pendant 6 jours à 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

L'oxygène dissous varie globalement entre 3 et 4 mg/l, supérieur d'une unité à la Karouabo.

Le pH est acide, entre 5,5 et 6 unités.

4.6.2 Du 6 avril au 6 mai 1992 : saison des pluies avant essais

Rappelons que l'hydraulicité moyenne de la saison de pluies 92 a été déficitaire par rapport aux autres années. La pluviométrie très faible des mois de mai, juin, juillet explique ce phénomène qui lui concède une période de retour de 15 ans. Néanmoins, le mois d'avril est proche de la moyenne interannuelle, ce qui permet les comparaisons.

4.6.2.1 Karouabo :

Pendant cette période, nous observons trois crues, dont le maximum journalier est de 19,9 m³/s, le 21 avril (Figure 10).

L'oxygène dissout subit, comme en saison sèche, des variations quotidiennes, avec des valeurs moyennes supérieures d'une unité à celles de la saison sèche (variations entre 2,5 et 3,5 mg/l). Les valeurs augmentent avec le débit, traduisant une relation positive.

Le pH moyen est de 5 (inférieur à la saison sèche) et présente une légère baisse pendant les trois crues (de 0,25 unités pH). La relation avec le débit est inverse, phénomène déjà observé sur d'autres bassins versants en Guyane (Grimaldi, 1988 ; Lointier, 1993)

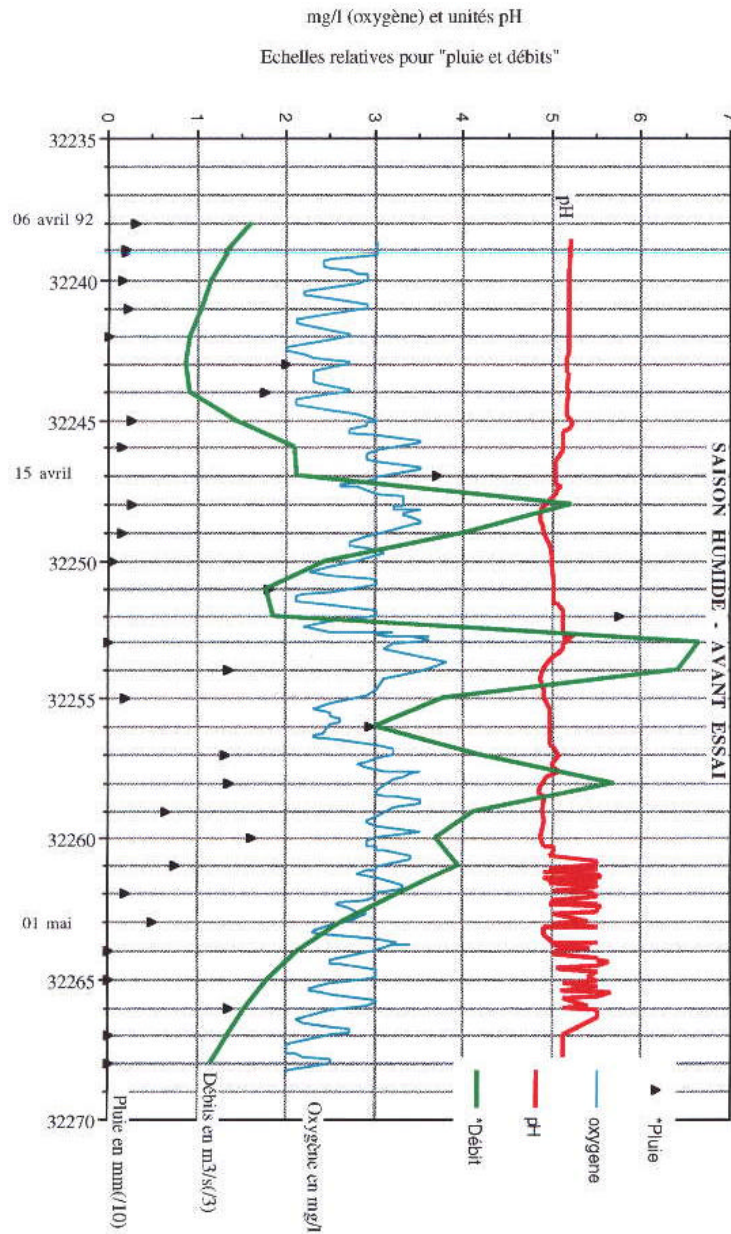


Figure 10 : Karouabo pont - Saison humide avant essai - avril 92

4.6.2.2 Passoura :

Les débits mesurés montrent trois crues, écrêtées, et en retard de un à trois jours par rapport à celles de la Karouabo du fait des nombreux plans d'eaux connexes à la rivière (Figure 11).

L'oxygène dissous présente des valeurs inférieures (entre 1 et 2 mg/l) à celles de la saison sèche. Le rythme diurne est moins marqué, et la relation avec le débit est de tendance positive. Son augmentation nette avec le débit ne s'observe toutefois qu'à la seconde crue du 24 avril, pour décroître lentement après, pendant une dizaine de jours.

Le pH est acide, proche de 5, et ne présente pas de relation nette avec le débit.

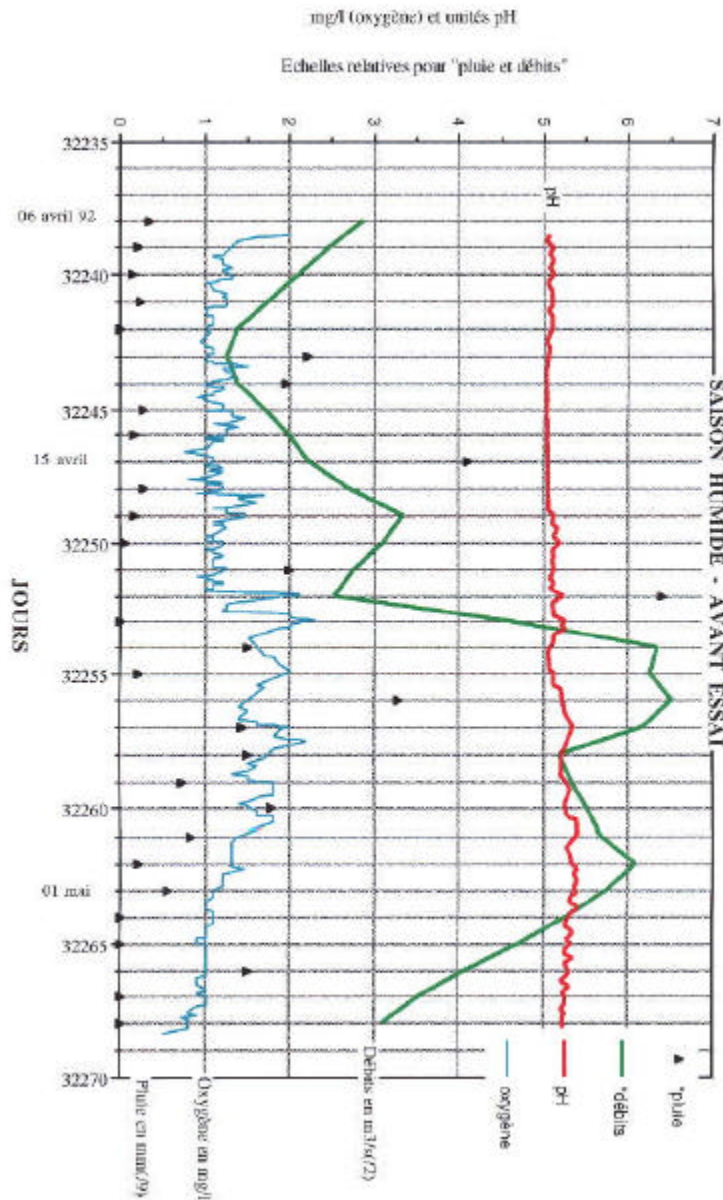


Figure 11 : Passoura pont -Saison humide avant essai - avril 92

Synthèse :

Cette analyse des deux séries de mesures chimiques en saison sèche et en saison des pluies, converge avec les conclusions du rapport de C. Grimaldi :

-pour l'oxygène dissous, il est observé une augmentation globale avec le débit, sur les deux bassins, en saison des pluies. Les autres cas de figure montrent la forte dépendance de ce paramètre avec les conditions du milieu : température, effets biologiques (variations quotidiennes) et effet du mélange avec les eaux marines.

remarque : en toute rigueur, il aurait été préférable de présenter les résultats de l'oxygène dissous en pourcentage par rapport à sa saturation dans l'eau, celle-ci étant dépendante, selon des relations connues, de la température et de la concentration en ions chlorures (Lointier, 1990).

-le pH présente une relation légèrement inverse avec les débits pendant les crues de la Karouabo, et des valeurs constantes dans les autres cas. Il est, en moyenne, de même valeur sur les deux bassins, et plus acide d'une demi-unité en saison des pluies (5 unités pH au lieu de 5,5).

4.6.3 Du 4 février au 31 mars 1993 : début de saison des pluies pendant le premier

4.6.3.1 Karouabo (fig 18) :

Cette période est marquée par 4 crues. Le débit maximum est le 10 mars avec 25,1 m³/s.

On observe les relations déjà décrites avant l'essai, dans des conditions proches du cas "saison des pluies 92", à savoir :

- une relation globalement proportionnelle avec les débits pour l'oxygène dissous.
- une relation inverse avec le débit pour la conductivité et le pH.

Les valeurs absolues de ces paramètres sont identiques au cas "saison des pluies 92".

L'essai de booster du 16 février, trois jours avant la première crue, n'a donc aucun effet observable sur les paramètres mesurés. Les baisses de pH sont naturelles, d'un quart d'unité, synchrones avec les crues (Figure 12).

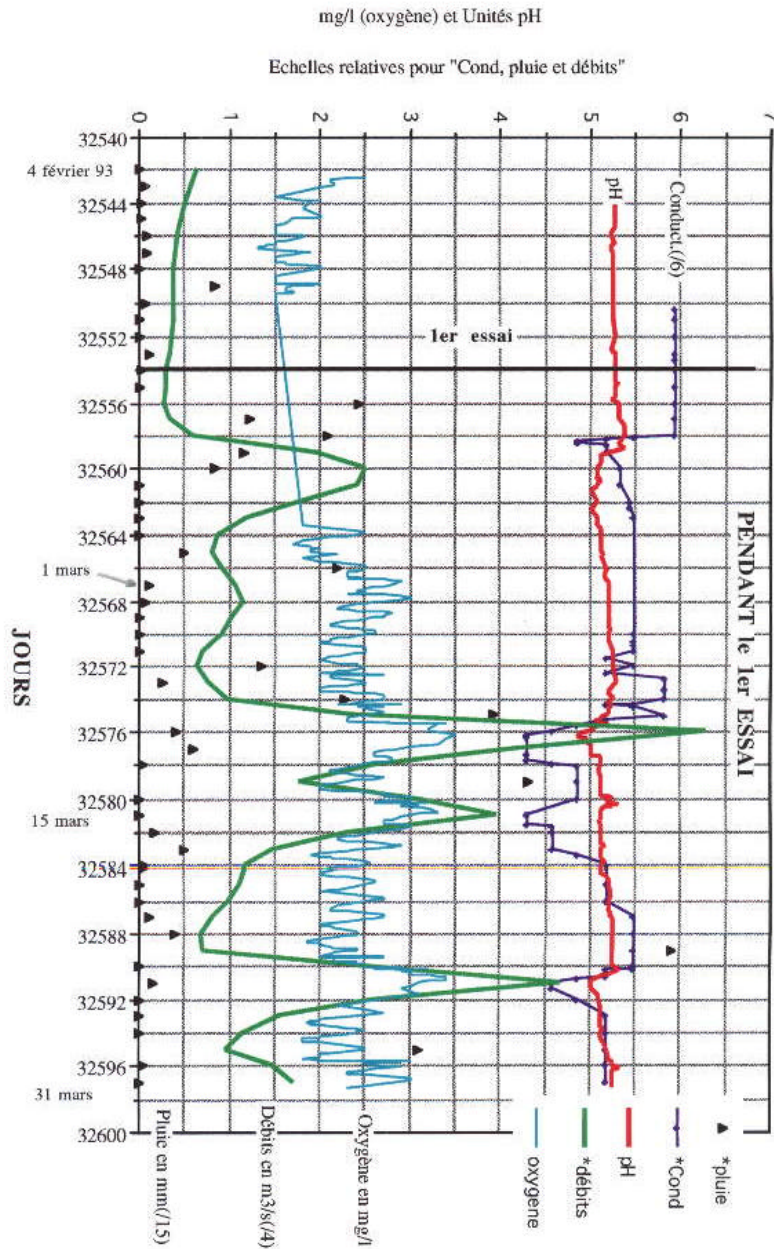


Figure 12 : Karouabo pont - pendant le premier essai - fév-mars 93

4.6.3.2 Passoura :

On observe les mêmes phénomènes sur la Passoura, q u'à la Karouabo, mis à part une légère baisse de pH le 19 février, pendant la première crue survenant trois jours après l'essai du moteur (Figure 13).

Vu les relations inverses déjà signalées entre le pH et débit, pendant les crues, on peut conclure que l'essai du 16 février n'a eu aucun effet observable sur le bassin de la Passoura.

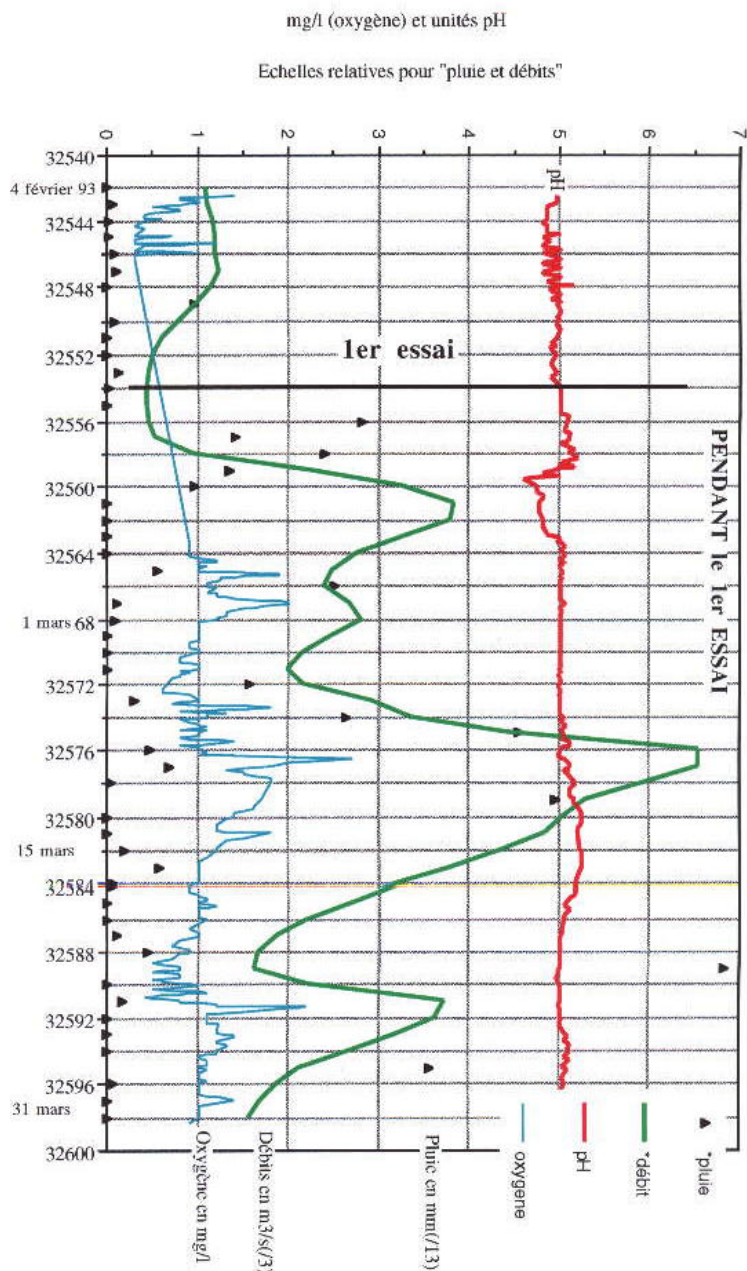


Figure 19 PASSOURA Pont : du 4 février au 31 mars 93

Figure 13 : Passoura pont -pendant le 1^{er} essai -fév-m a rs 93

4.6.4 Du 22 juin au 10 juillet 1993 : fin de saison des pluies, pendant le second essai.

Du point de vue hydrologique, cette période se situe pendant la décrue annuelle et, bien que les débits soient supérieurs à la période de mesure de référence "saison sèche avant essai", nous prendrons celle-ci comme point de comparaison. En effet, l'absence de crues et le tarissement observés, la pluviométrie faible (51 mm en 20 jours), rapprochent ce cas de figure des observations de saison sèche 91 (Figure 14).

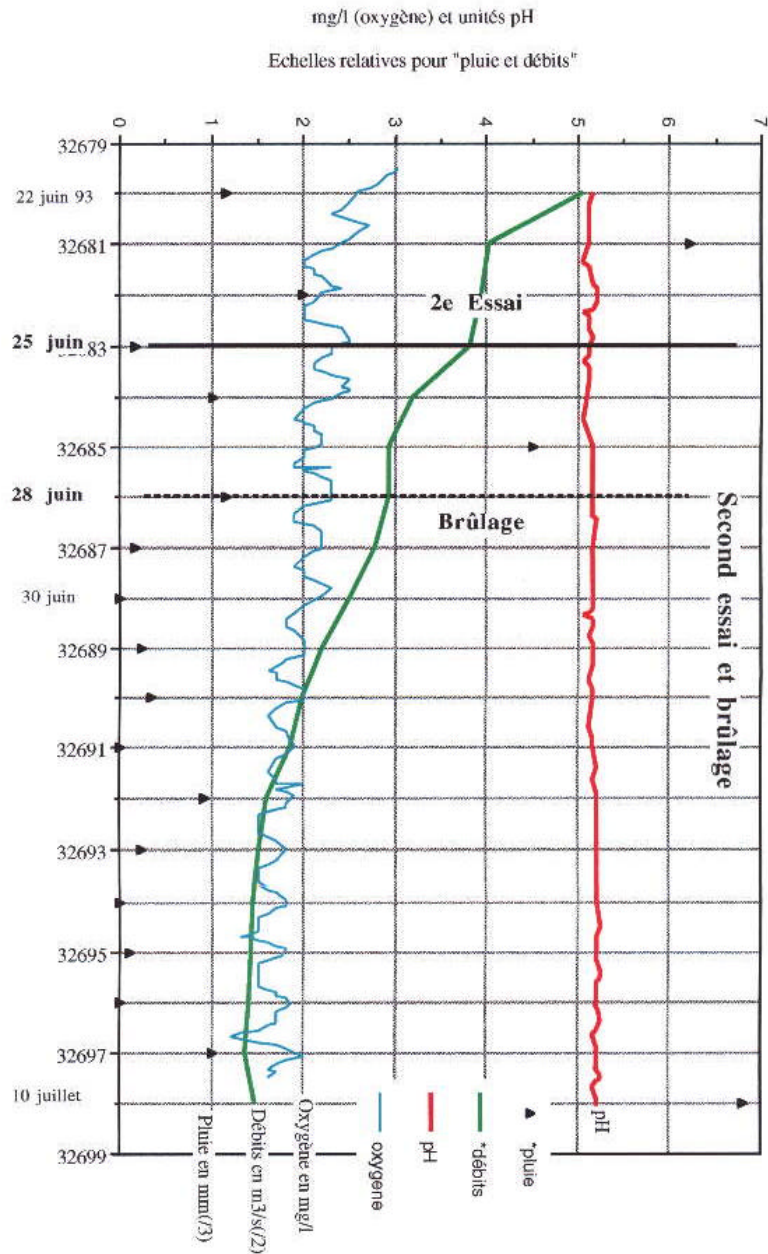


Figure 20 KAROUABO Pont : du 22 juin au 10 juillet 93

Figure 14 : Karouabo pont second essai et brûlage - j u n juillet 93

4.6.4.1 Karouabo :

-oxygène dissous : l'amplitude des oscillations quotidiennes est faible, mais bien présentes. Les valeurs globales décroissent régulièrement de 3 à 1,5 mg/l.

-pH : il est très stable, avec une valeur moyenne de 5,25. Aucun phénomène particulier n'est observé après l'essai M1 et le brûlage.

Les mesures sur le bassin de la Karouabo montrent que le nuage de M1 n'a pas eu d'effet sur ce bassin.

4.6.4.2 Passoura : absence de mesures, pas de conclusions.

Remarque : débits et pH

Comme nous l'avons signalé au début, le pH est l'indicateur le plus sensible et le plus adapté pour l'étude de ces types de pollution acide.

Il est par contre nécessaire de bien connaître l'évolution naturelle du pH, comme l'illustre la crue du 22 février 93 sur la Karouabo et du 23 février sur la Passoura (Figure 15).

Phénomène déjà observé dans d'autres bassins sous forêt en Guyane (Grimaldi, 1988 ; Lointier, 1993), la relation inversement proportionnelle au débit est fréquemment observée. Dans l'exemple présenté ici, les chutes de pH sont du même ordre de grandeur que celles qui ont été mesurés avant les essais et donc sans relation avec l'essai B1 du 16 février.

Figure 21a KAROUABO Pont : du 12 fév. au 4 mars 93

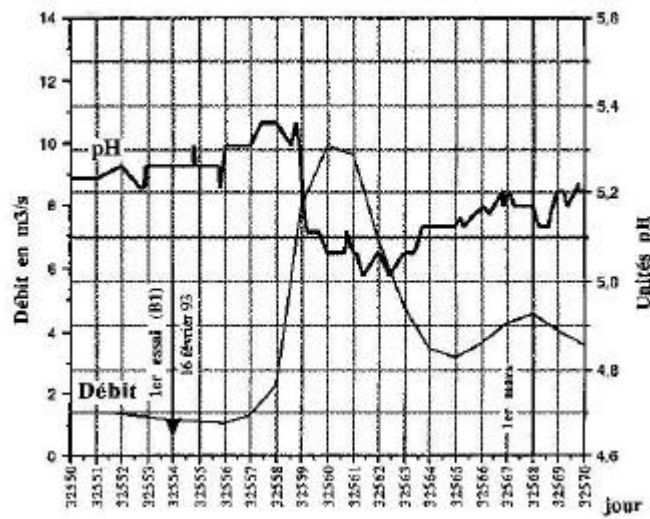


Figure 21b PASSOURA Pont : du 12 fév. au 4 mars 93

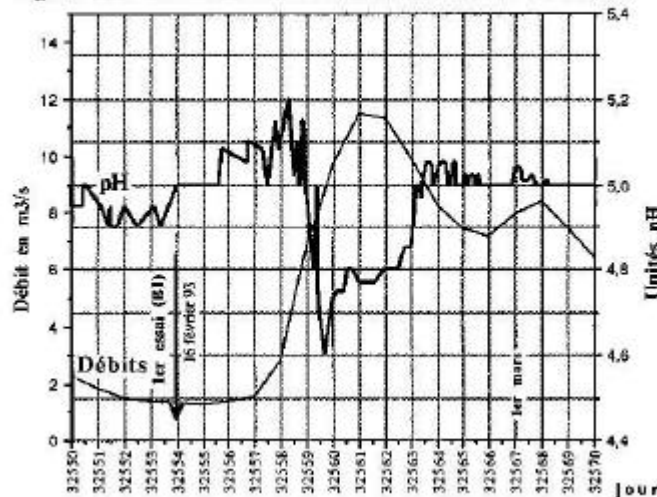


Figure 15 : analyse des débits et du pH - 1^{er} essai - fév 93

5 HYDROCHIMIE

Introduction

Afin de connaître les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement, lors des essais de moteurs fusées à propergol solide, nous nous sommes intéressés à la composition chimique de l'eau à différentes étapes de son trajet, depuis la pluie jusqu'aux rivières. En effet, non seulement l'eau est le vecteur des éléments chimiques à travers les différents compartiments de l'écosystème, mais sa composition chimique peut être modifiée dans chacun de ces compartiments : fixation d'éléments et réactions chimiques dans la canopée et dans le sol, dilution et réactions chimiques dans les rivières et les marais...

Cette étude a pour objectif d'estimer le niveau de pollution auquel la forêt située sous le vent du banc d'essai a été soumise après les deux premiers essais et après une phase de brûlage de propergol solide, et surtout de connaître la réaction de la végétation, particulièrement sa capacité à retenir les éléments chimiques issus des rejets gazeux. Le suivi de quelques paramètres chimiques (pH, conductivité...) pouvant être indicateurs d'une pollution a également été réalisé sur les deux rivières (Karouabo et Passoura) qui drainent la zone étudiée.

Afin de comparer ces données avec celles acquises avant les essais, nous reprenons ici différents résultats concernant l'inventaire préliminaire de l'environnement du site et figurant en partie dans le rapport relatif au lot 2 de la convention (GRIMALDI et SARRAZIN, 1992).

5.1 Composition chimique des pluies et des pluvioléssivats

Des éléments chimiques émis lors de l'essai sous forme de suspensions ou de gaz (essentiellement alumine et acide chlorhydrique), peuvent être interceptés par la canopée de la forêt proche. Par lavage du feuillage, les pluies suivantes les entraînent directement au sol ; ou bien, à la surface des feuilles, des réactions d'échanges se produisent, et la pluie lessive alors des ions ou molécules chimiques auparavant absorbés ou fabriqués par la plante. En particulier, si des acides sont interceptés par la canopée, des mécanismes de régulation se mettent en oeuvre pour maintenir une concentration optimale des ions H^+ dans les cellules végétales (SCHOLZ et RECK, 1977), car les processus métaboliques sont très sensibles aux variations du pH. On observe par exemple un lessivage accéléré des cations basiques K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , après échange avec les ions H^+ (ABRAHAMSEN, 1984). Un autre mécanisme possible (CRONAN & REINER, 1983) est la neutralisation des ions H^+ par des anions d'acides faibles comme les ions bicarbonate HCO_3^- ou des anions d'acides organiques, produits par la plante et lessivés par la pluie. Dans ce cas encore, d'ailleurs, des cations basiques libérés avec ces anions se retrouvent

En cas de retombées d'acide chlorhydrique et d'alumine, l'étude de la composition chimique des pluvioléssivats doit nous permettre, d'une part de quantifier la part des polluants après la traversée de la canopée, d'autre part d'évaluer les conséquences de ces retombées sur le métabolisme de la végétation. Il est alors nécessaire de disposer, pour comparaison, de données hors pollution. Il existe malheureusement peu d'études sur la composition chimique des pluvioléssivats en milieu tropical et les causes naturelles de leur variabilité sont nombreuses. Les premières collectes et analyses ont donc été effectuées avant les essais, et la localisation des prélèvements est fixée pour toute l'étude, afin de permettre une meilleure comparaison au cours du temps.

5.1.1 Dispositif de récolte des pluies et pluvioléssivats

Nous avons utilisé des pluviomètres type SPIEA modifiés pour permettre la collecte des eaux de pluie : le récipient collecteur en forme d'entonnoir, dont la surface d'interception est

connue (400cm² ou 450cm² selon le modèle), est fixé sur un support à 1 m au-dessus du sol et est relié à un bidon de 5 litres pouvant donc accumuler plus de 100mm de pluie.

5 pluviomètres, notés CR1 à CR5, ont été installés sur le chemin de ronde à l'ouest du BEAP, tous les 100m ; 7, notés PB1 à PB7, sont situés sur la piste Barthod, distants de 500m les uns des autres. Ces pluviomètres sont placés hors couvert végétal et recueillent donc directement les eaux de pluie.

Pour le recueil des pluvioloessivats, sous forêt, 5 postes de prélèvements ont été installés sur chacun des quatre layons, de part et d'autre de la piste Barthod. Ces postes sont distants de 100m les uns des autres et situés à l'intérieur des placeaux de 10m x 10m étudiés par les botanistes (SABATIER et PREVOST, 1992). Certains d'entre eux sont des postes doubles, équipés (Figure 16).

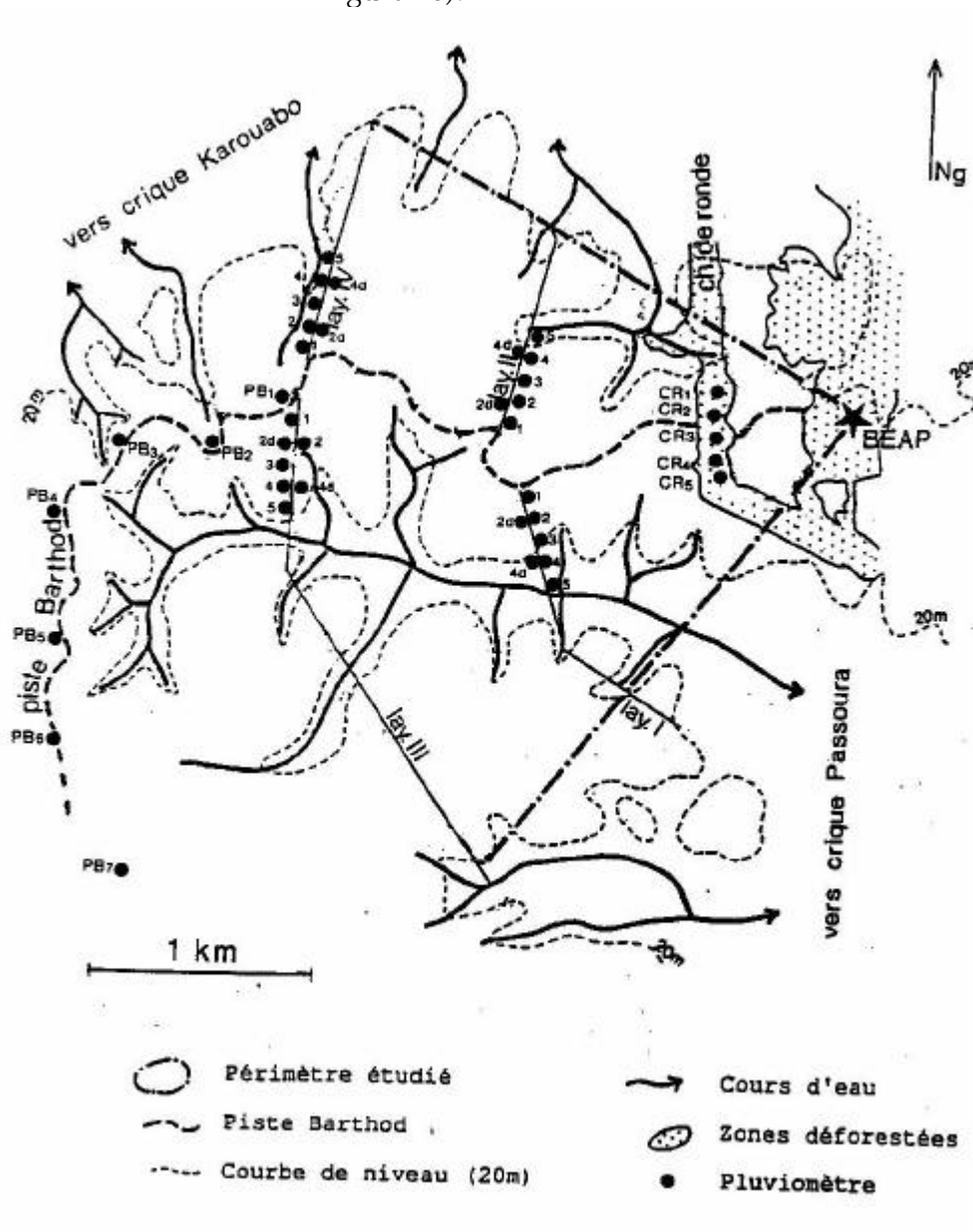


Figure 16 : dispositif de mesure des pluvioloessivats

5.1.2 Dates des prélèvements

Plusieurs séries de prélèvements ont été réalisées après des épisodes pluvieux :

- * avant le premier essai, le 8 et le 29 janvier 1993,
- * après le premier essai, le 17 et le 19 février 1993,
- * après le deuxième essai, le 28 juin 1993,
- * après un brûlage de propergol, le 2 et le 9 juillet 1993.

5.1.3 Analyses chimiques

Les mesures de conductivité, du pH, de l'alcalinité et des concentrations en calcium, magnésium, potassium, sodium, chlorure, nitrate et silice ont été effectuées au centre ORSTOM de Cayenne. L'aluminium a été dosé au Laboratoire d'analyses INRA à Arras.

5.2 Pluies et pluviollessivats avant les essais des moteurs à poudre

5.2.1 Origine des éléments chimiques

Dans les pluies, les ions sodium et chlorure sont dominants. En traversant la canopée, les eaux s'enrichissent encore en ces éléments mais aussi en potassium, calcium, magnésium, nitrate, silice, aluminium... Leur alcalinité augmente, ainsi que la somme (Alc) + (H⁺) qui représente la somme des anions d'acides faibles, ions bicarbonate HCO₃⁻ ou anions d'acides organiques. L'évolution du pH est variable selon les pluviomètres.

5.2.2 Variabilité spatiale des pluies et des pluviollessivats

Pour un même épisode pluvieux, la variabilité des quantités d'eau recueillies sous la canopée et la variabilité de leur composition chimique sont supérieures à celles des recueils de

Cependant, les matrices de corrélation établies pour les pluviollessivats du 8 et du 29 janvier 1993 mettent en évidence de nombreuses corrélations entre éléments chimiques (sodium, chlorure, magnésium, calcium, potassium, nitrate, alcalinité). Par contre les teneurs en silice et le pH semblent varier indépendamment des autres concentrations.

Les coefficients de corrélation entre la plupart des variables chimiques et les quantités d'eau recueillies, pour un même épisode pluvieux, sont négatifs car les pluviollessivats sont généralement plus concentrés lorsque l'interception par la canopée est importante. La variabilité spatiale de la composition chimique est alors liée à la morphologie de la voûte forestière au-dessus du collecteur (feuillage clairsemé ou dense, effet de gouttière ou de parapluie...), favorisant le recueil de la pluie directe ou bien interceptant largement la pluie et offrant une grande surface foliaire pour les échanges chimiques. Cependant ces corrélations restent faibles. Il est vraisemblable, en effet, qu'interviennent, dans la mobilité des éléments chimiques, des différences de perméabilité au niveau des cuticules foliaires, différences liées à l'extrême diversité floristique de la forêt tropicale, avec plus de 150 espèces différentes d'arbres par hectare dans la zone étudiée (SABATIER et PREVOST, 1992). Certains pluviollessivats sont ainsi (). Ils correspondent aux emplacements de pluviomètres n°2, 2d, 4, 4d sur le layon II et n°5 sur le layon IV.

5.2.3 Variabilité temporelle des pluies et des pluviollessivats

La composition chimique des pluies et des pluviollessivats varie également selon les : elle est liée à l'origine, à l'intensité, à la durée des précipitations, et aussi à la pluviométrie des jours précédents (échanges avec les particules en suspension dans l'air ou avec le couvert forestier). Des recueils de pluviollessivats dans un site comparable, sous forêt, (dispositif de recherches ECEREX sur la piste de St Elie) montrent en particulier que les précipitations de faible intensité sont largement interceptées par la canopée avec, pour conséquence, des échanges chimiques avec la végétation plus importants, donc des concentrations d'éléments en solution plus élevées. Au contraire, les précipitations de forte intensité ou de longue durée augmentent la dilution des pluviollessivats qui sont aussi plus homogènes en quantité et composition chimique. Or, en Guyane, l'intensité des pluies est très variable (Tab. 1).

Nombre de jours	Pluviométrie	% de la pluie annuelle
162 jours	0 - 10 mm	17 %
87 jours	10 - 50 mm	56 %
12 jours	> 50 mm	27 %

Tableau 1 : Répartition des pluies journalières à Rochambeau pour la période 1951-1985 (pluviométrie moyenne : 3685 mm) (Météorologie Nationale, Rochambeau-Aéroport).

5.3 Pluies et pluviollessivats après les essais des moteurs a poudre

5.3.1 Méthodologie d'interprétation des analyses chimiques

Dans cette étude, une question préliminaire est de déterminer dans quelle mesure (extension spatiale et quantité d'apports polluants) la zone étudiée a été touchée par la pollution. Outre des observations immédiates de retombées solides, certaines concentrations d'éléments émis lors de l'essai pourront être des indicateurs de pollution :

* L'ion chlorure est un bon traceur des apports d'acide chlorhydrique. Il est en effet conservatif : sa concentration dans les eaux de pluie est peu modifiée par la traversée de la canopée. De plus, la comparaison des teneurs en chlorure et en sodium, élément auquel il est généralement associé hors pollution, permet de distinguer un éventuel apport d'HCl. Bien que cet élément ne soit pas toxique pour les végétaux et les animaux, sa concentration dans les pluies et les pluviollessivats sera donc particulièrement étudiée. De plus, on présentera fréquemment par la suite les résultats des analyses chimiques ordonnés selon les teneurs en chlorure croissantes, afin de distinguer aisément les prélèvements les plus concentrés en cet élément et d'en étudier les autres caractéristiques.

* Le pH* est plus délicat à interpréter car diverses réactions chimiques tendent à le modifier. La végétation en particulier possède un certain "pouvoir tampon".

* Enfin l'aluminium dissous dépend des retombées d'aérosols et du pH.

A ces deux derniers paramètres chimiques sont attachés des risques de toxicité en cas de retombées importantes d'HCl et Al₂O₃ lors de l'essai des moteurs d'appoint. L'étude des pluviollessivats permettra donc de contrôler si l'acidité et la teneur en aluminium des eaux parvenant au sol restent dans des limites acceptables.

Dans un second temps, en s'intéressant aussi aux concentrations des autres éléments dans les pluviollessivats, on cherchera à déterminer comment la végétation a réagi à la pollution.

* pH = - log (H⁺)

5.3.2 Après le premier essai (16 février 1993)

Les prélèvements du 17 février, le lendemain de l'essai, correspondent à quelques millimètres de précipitations seulement. Cet épisode pluvieux n'est donc pas directement comparable aux deux épisodes précédents, ce qui est un inconvénient. Par contre, un faible volume de pluie évite une trop grande dilution du signal de pollution et dans ces conditions, un éventuel apport d'acide chlorhydrique ou d'aluminium devrait modifier nettement la composition chimique des eaux.

Pour tous les éléments analysés, l'ensemble des prélèvements du 17 février sont plus concentrés que les prélèvements des deux épisodes précédemment étudiés. Ceci est en accord avec la remarque ci-dessus, à savoir que les pluies fines produisent des pluvioléssivats plus concentrés que les précipitations de forte intensité. Afin de déterminer si ces fortes concentrations sont aussi liées à d'éventuelles retombées du nuage, ces prélèvements de pluies et de pluvioléssivats ont été classés en fonction de leurs teneurs en chlorure croissantes (Figure 17). Les pluvioléssivats les plus concentrés en cet élément ne se différencient pas significativement des autres échantillons en ce qui concerne le pH (compris entre 5 et 6,2) ou la teneur en aluminium (toujours très faible, inférieure à 10 $\mu\text{mole/l}$).

Les pluies recueillies à proximité du carneau, sur le chemin de ronde, ou sur la piste Barthod en zone découverte ne sont pas très acides ($5,5 < \text{pH} < 6$), et sont très peu concentrées en aluminium. On n'a pas remarqué non plus la présence de dépôts solides dans les collecteurs.

De même, la composition chimique des eaux des petites rivières traversant la zone étudiée ne présente pas de différences significatives avant et après l'essai.

L'épisode pluvieux du 19 février, d'intensité comparable aux pluies du 8 et 29 janvier avant l'essai, leur ressemble également en ce qui concerne la composition chimique des pluies et des pluvioléssivats.

En conclusion, lors de ce premier essai du 16 février 1993, il semble que la pollution de la zone étudiée ait été soit nulle soit très faible, et dans cette dernière hypothèse, totalement

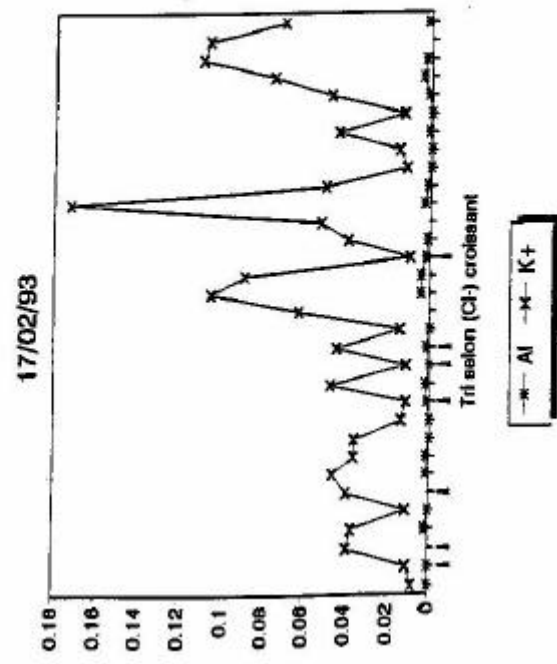
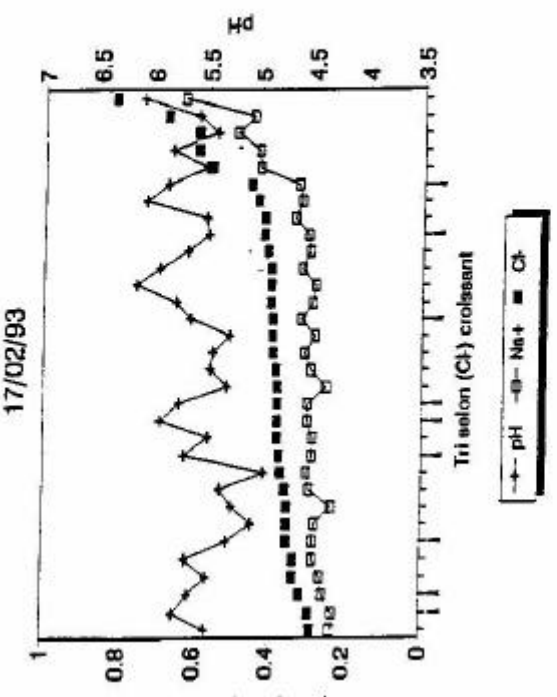
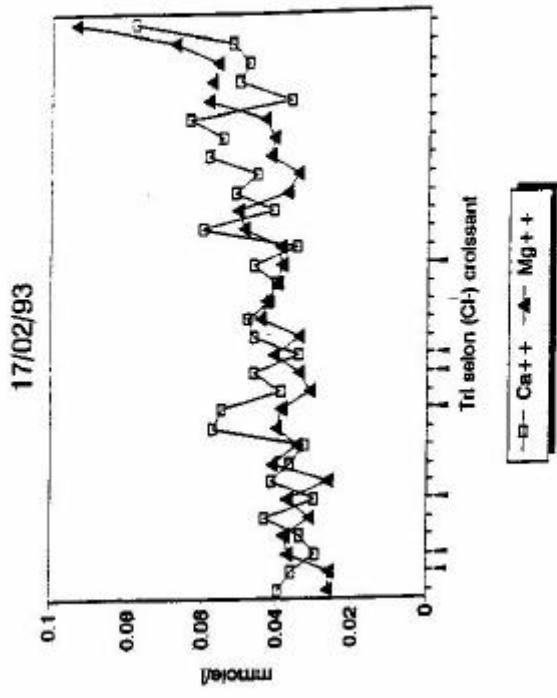


Figure 4 : Concentrations chimiques en mmole/l dans les pluies et pluviollessivats du 17 février 1993 (prélèvements classés en fonction de leur teneur en chlorure croissante).

▲ Pluie hors couvert végétal

Figure 17 : Concentrations chimiques en mmoles/l dans les pluies et pluviollessivats du 17 fev 93 (classement en fonction des teneurs en chlorure croissante)

layon III (pluviomètres sous forêt).

Figure 5 : Concentrations chimiques en mmole/l dans les pluies et pluviollessivats du 28 juin 1993 (prélèvements classés en fonction de leur teneur en chlorure croissante).

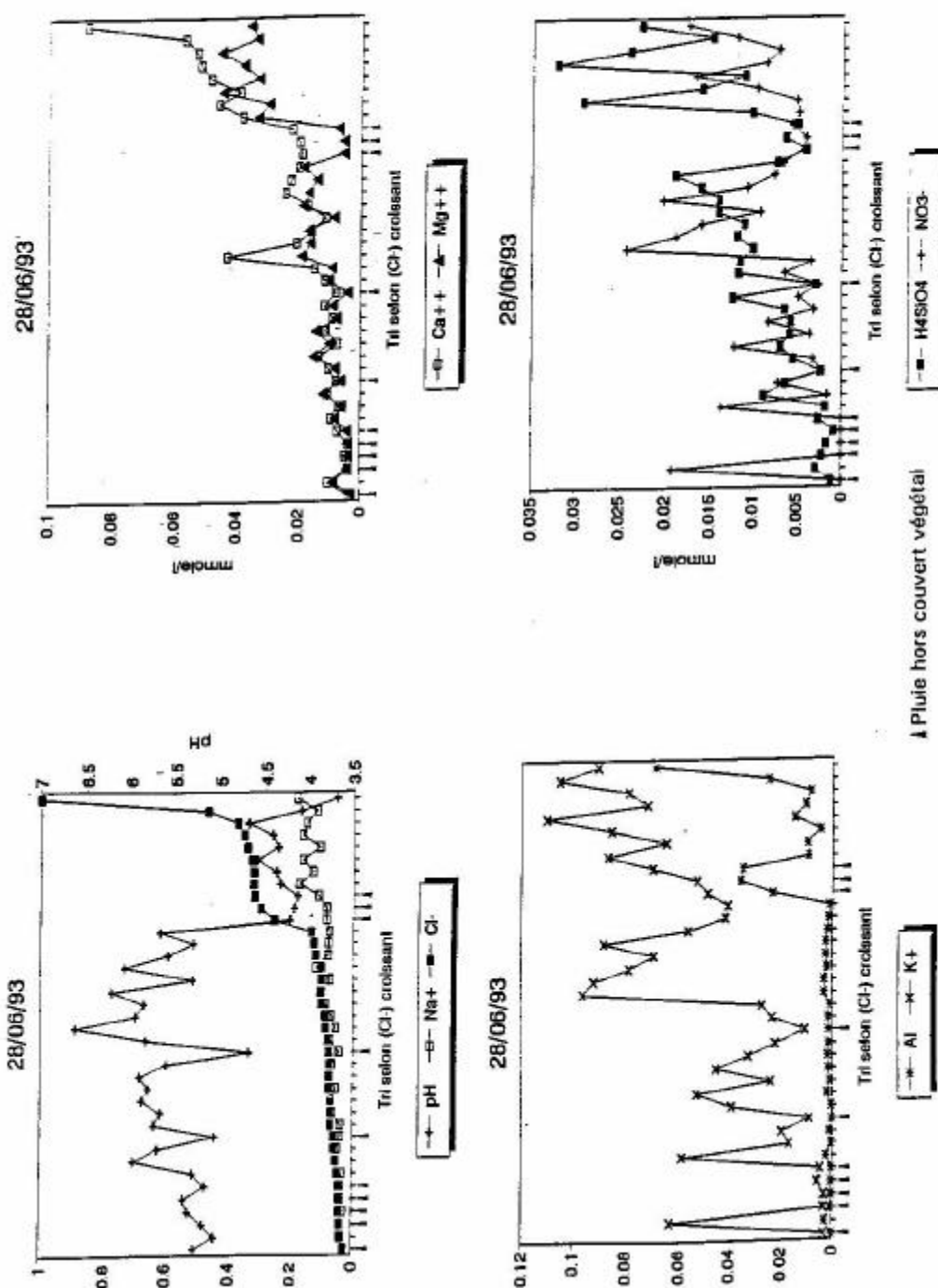


Figure 18 : Concentrations dans les pluies et pluviollessivats 28 juin 93.

Il existe pour les échantillons pollués une relation négative entre la concentration en aluminium et le pH, qui correspond sans doute à la solubilité des particules d'alumine en fonction du pH : $\log K = \log (\text{Al}^{3+}) + 3 \text{ pH}$ serait proche de 8 pour cet oxyde (Figure 19).

D'autres éléments chimiques accompagnent parfois ces retombées d'acide chlorhydrique et d'alumine : les eaux de pluie du chemin de ronde sont un peu plus concentrées en potassium, calcium et silice qu'en l'absence de pollution. Ces éléments proviennent vraisemblablement des roches du carneau, pulvérisées lors de la combustion et dissoutes. Ils sont en effet très abondants dans l'eau de la nappe analysée après l'essai.

Les pluviollessivats recueillis dans la zone manifestement touchée par le nuage sont toujours enrichis en calcium et magnésium, légèrement aussi en sodium, comparativement aux autres points de prélèvement. Ces cations ont, au moins pour partie, été échangés avec les H⁺ apportés, puisque, à teneur en chlorure égale, les pluviollessivats sont moins acides que les pluies (Figure 19). Par ailleurs, ces pluviollessivats présentent parfois des concentrations assez élevées en potassium et en silice, mais ces deux éléments sont beaucoup plus variables, pouvant aussi être relativement concentrés dans d'autres pluviollessivats a priori peu touchés par la pollution. Il est possible qu'ils soient surtout liés aux roches du carneau dont les retombées sous forme soluble ou particulaire ne coïncident pas nécessairement avec la pollution acide.

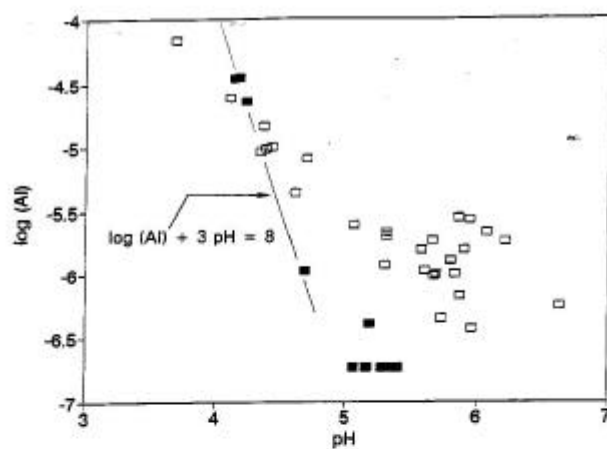


Figure 7 : Diagramme de solubilité de l'aluminium en fonction du pH (■ : pluies ; □ : pluviollessivats), pour les prélèvements du 28 juin 1993.

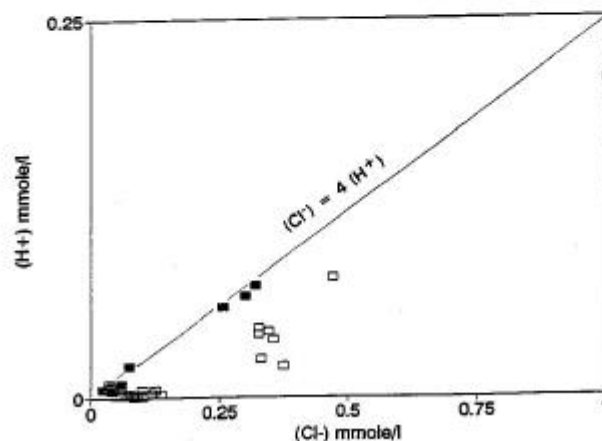


Figure 8 : Comparaison des concentrations en H⁺ et Cl⁻ dans les pluies (■) et les pluviollessivats (□), pour les prélèvements du 28 juin 1993.

Figure 19 : A) Diagramme de solubilité de l'aluminium en f(pH)

B) Comparaison des concentrations en H⁺ et Cl⁻ dans les pluies

Pour les autres prélèvements, la pollution n'est pas aussi évidente. Les recueils les plus proches de la zone manifestement polluée (pluviomètres CR4, CR5, PB2

5.3.4 Après un brûlage du combustible (29 juin 1993)

Le premier épisode pluvieux (prélèvements du 2 juill et 1993) survenu après le brûlage correspond à une pluie de quelques millimètres. Les volumes recueillis étant très faibles, seul le pH a été mesuré sur ces échantillons. Il varie entre 4,5 et 6 dans les pluies, et entre 5,3 et 6,8 dans les pluiolessivats, ce qui correspond à la variabilité naturelle du pH.

Le 9 juillet, on observe quelques concentrations en aluminium plus élevées (Figure 20) principalement sur le layon II (prélèvements 1, 2 et 2d ; annexe nts ne présentent pas des teneurs anormalement élevées en chlorure, et le 2 juillet 1993, le pH des pluiolessivats correspondants n'était pas particulièrement bas. Deux hypothèses sont à envisager : soit la zone étudiée n'a été soumise qu'aux retombées d'alumine dissociées des retombées d'acide, soit cet aluminium provient de particules d'alumine restées sur les feuilles depuis l'essai du 25 juin 1993. Cette dernière hypothèse nous paraît très vraisemblable car l'alumine, présente sous forme solide, se dissout lentement tandis que les ions H^+ et Cl^- , toujours présents sous forme soluble, sont entraînés facilement par les pluies.

Figure 9 : Concentrations chimiques en mmole/l dans les pluies et pluviollessivats du 9 juillet 1993 (prélèvements classés en fonction de leur teneur en chlorure croissante).

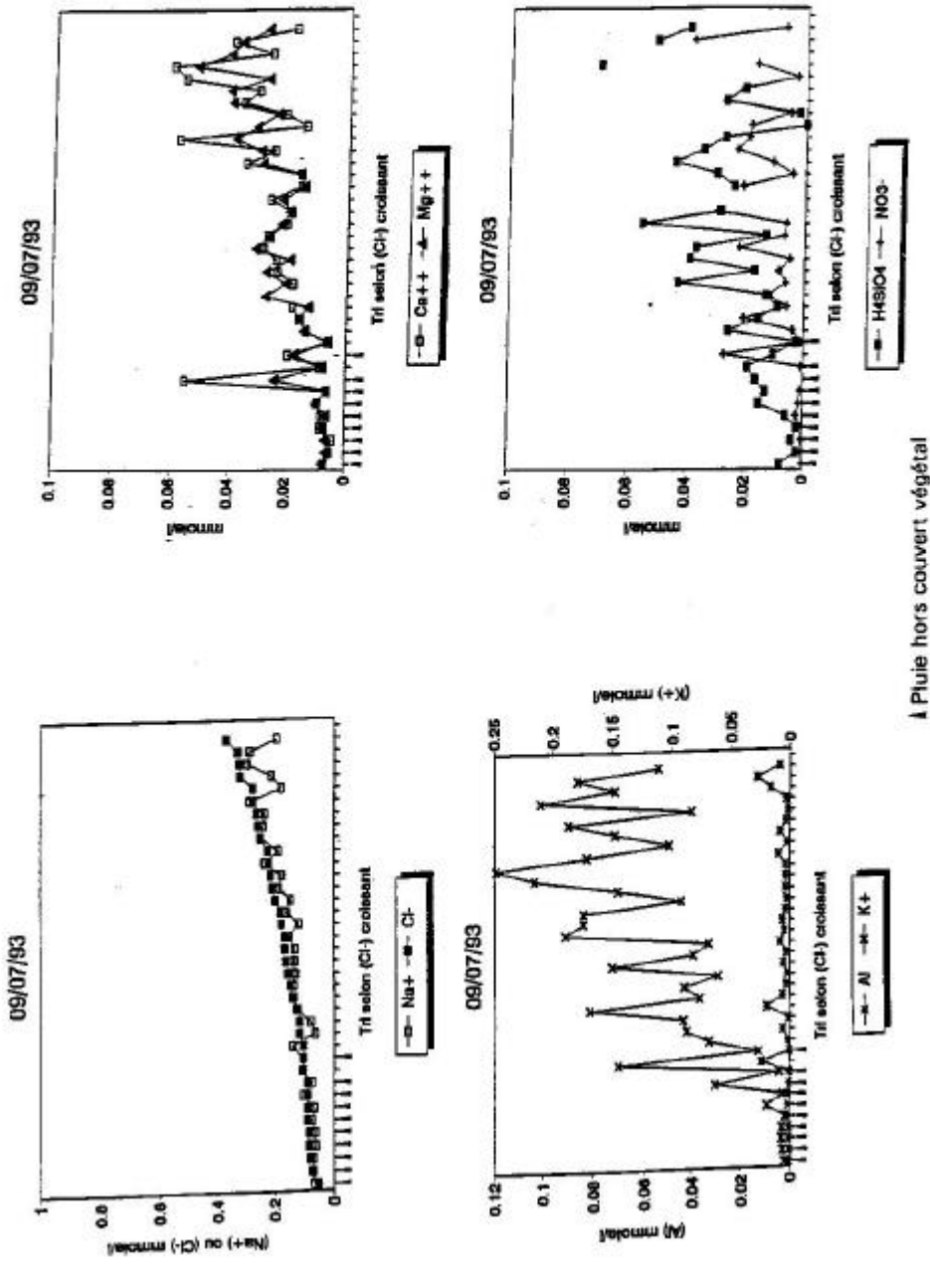


Figure 20 : concentrations dans les pluies et pluviollessivats (mmoles/l) du 9 juillet 93

Le premier essai d'étage d'accélération à propergol solide n'a pas produit de modifications significatives de la composition chimique des pluviollessivats. Même à proximité immédiate du banc d'essai, sur le chemin de ronde, les pluviomètres situés hors couvert végétal ne semblent pas avoir été pollués par des apports d'acide ou d'alumine. Le nuage de rejets gazeux a vraisemblablement été propulsé verticalement, évitant ou survolant sans l'affecter la

pluie d'environ 40 mm

Les pluviomètres placés hors couvert forestier recueilli les retombées directes sous le passage du nuage émis lors de l'essai ; ceux placés sous couvert forestier recueillent les dépôts entraînés lors du lavage des feuilles par la pluie. On dispose ainsi de données sur les apports au sol d'éléments chimiques et sur la composition chimique des eaux s'infiltrant dans le sol ou rejoignant les cours d'eau.

La trace du nuage au-dessus de la zone étudiée peut être mise en évidence par l'observation de poussières dans les pluviomètres, par un pH plus faible et des teneurs en chlorure plus élevées, dûs à l'acide chlorhydrique, ou par des teneurs en aluminium plus élevées, liées à la dissolution d'alumine. Ces indicateurs "directs" de pollution peuvent cependant être modifiés par les réactions avec la végétation ou avec les poussières minérales arrachées aux parois du carneau. Il existe de plus une variabilité naturelle de la composition chimique des pluviollessivats liée aux espèces d'arbres et à la morphologie de la canopée au-dessus du pluviomètre. Une pollution, si elle est faible, est donc parfois difficile à mettre en évidence.

De telles observations indicatrices de pollution, à la fois un pH plus faible et (Al) et (Cl⁻) plus élevées, sont assez nettes pour les pluviomètres CR5, PB4 et PB5, hors couvert végétal, et pour quelques pluviomètres sous couvert végétal situés sur le layon I, sans aucun doute pour le n°3, de manière moins certaine pour les n°2, n°2d. D'autres pluviollessivats ont des teneurs relativement élevées en chlorure mais à peine plus élevées en aluminium et sans acidité particulièrement marquée. Un autre critère pour distinguer l'effet pollution de la variabilité naturelle des concentrations est la comparaison des teneurs en sodium et chlorure : ces deux éléments sont généralement en concentrations assez proches en conditions naturelles. Un excès de chlorure par rapport au sodium, apporté sous forme d'HCl lors de l'essai, se manifeste ici pour les pluviomètres précédemment cités auquel s'ajoute le n°5 sur le layon I. Les teneurs en Na⁺ et Cl⁻ simultanément plus élevées, ce qui est observé pour un petit nombre d'échantillons, sont sans doute plutôt liées à la variabilité naturelle des échanges foliaires avec la pluie.

On peut remarquer les teneurs également plus élevées en calcium, magnésium, potassium et sodium des échantillons CR5, PB4 et PB5 où sont observées les retombées du nuage. Ces cations proviennent de la dissolution des minéraux des roches du carneau pulvérisées lors de l'essai ou bien sont déjà présents dans l'eau de la nappe du carneau (GRIMALDI et SARRAZIN, 1993) entraînée avec le nuage gazeux.

En conclusion, les pluviomètres (CR5, PB4, PB5, layon I) ayant subi le plus nettement les retombées du nuage et qui sont donc situés essentiellement dans la partie sud de la zone étudiée. Cependant, pour ces prélèvements, ni le pH ni la concentration en aluminium n'atteignent des valeurs critiques : 4,6 pour les pH les plus faibles, environ 5 $\mu\text{mole/l}$ pour les teneurs en aluminium les plus élevées. Ceci s'explique d'une part par les fortes pluies survenues le lendemain de l'essai qui ont dilué largement les retombées du nuage ; d'autre part, ces retombées, réparties de façon assez hétérogène sur la zone étudiée, ne sont pas quantitativement très importantes. A titre d'exemple, on estime ces apports à environ 1 mmole d' H^+ et 0.3 mmole (8.5 mg) d'Al par m^2 au niveau du pluviomètre CR5 sur le chemin de ronde.

La composition chimique des cours d'eau traversant les layons étudiés n'est pas significativement différente de celle observée en conditions naturelles.

5.4.1.2 Mesures dans les criques Karouabo et Passoura après l'essai.

Les enregistrements en continu du pH et de la conductivité ne témoignent d'aucune pollution dans les deux rivières pendant la semaine suivant l'essai alors que les bassins versants ont reçu des précipitations importantes (totalisant environ 100 mm).

Ceci est confirmé par les mesures réalisées sur des prélèvements dans la Karouabo. Nous ne disposons pas de prélèvements dans la Passoura : les fortes pluies ayant provoqué une montée des eaux très importante ont en effet renversé le préleveur automatique. Sur la Karouabo, le préleveur a été mis en place le 20 juin à 13h et a fonctionné pendant 6 jours avec un pas de temps de 6h entre deux prélèvements. L'évolution de la composition chimique des eaux de la Karouabo devra être étudiée en relation avec la pluviométrie et le débit de la rivière. D'ores et déjà, on peut signaler la diminution du pH qui s'accompagne d'une légère augmentation de la conductivité et des teneurs en chlorure. Cependant, le pH reste supérieur à 5,7, du même ordre de grandeur donc que les valeurs mesurées hors essai (GRIMALDI & SARRAZIN, 1993).

5.4.2 Essai du 30 septembre 1994 au BEAP (essai M4)

5.4.2.1 Prélèvements d'eaux de pluie et de pluviolessivats

Les prélèvements dans les pluviomètres ont été réalisés après une pluie de faible intensité (2 à 3 mm) comme en témoignent les volumes recueillis, exprimés en mm de pluie. Les fortes concentrations observées dans les eaux de pluie et de pluviolessivats recueillies après le quatrième essai peuvent être dues à cette faible pluviométrie. En effet l'intensité de la pluie est représentée par le rapport Volume d'eau de pluie / Surface au sol x Temps. Or les échanges foliaires augmentent lorsque le rapport Volume d'eau de pluie / Surface foliaire diminue et lorsque le temps de contact entre l'eau et les feuilles augmente : ils sont donc plus importants lorsque l'intensité de la pluie diminue. Pour des faibles intensités, les poussières de l'atmosphère ou celles déposées sur les feuilles peuvent également jouer un rôle dans la concentration des

La plupart des événements pluvieux analysés avant et après les essais correspondent plutôt à des fortes intensités de pluie. Seuls les prélèvements réalisés le 17 février 1993 après le premier essai du 16 février ou bien le 9 juillet 1993 après le brûlage du 29 juin correspondent à une pluie d'intensité semblable à cette campagne et pourront donc y être comparés.

Les conductivités (qui représentent de manière globale la plus ou moins grande concentration des solutions) sont remarquablement élevées par rapport à l'ensemble des

campagnes de prélèvement réalisées sur le site, même pour des pluviométries comparables (17/02/93 et 09/07/93).

Si l'on s'intéresse aux trois indicateurs "directs" des re tombées du nuage, à savoir le pH, les teneurs en aluminium et en chlorure, une première remarque s'impose : les pH sont particulièrement élevés pour tous les prélèvements et ne permettent pas de distinguer de traces de pollution acide. Les teneurs en aluminium et en chlorure sont par contre assez variables mais n'augmentent pas toujours simultanément : pour les pluviomètres hors couvert végétal, (Al) est plus élevé en PB3 et PB7, alors que (Cl-) est plus élevé en CR1 et PB5. Si l'on compare les concentrations des pluviolessivats (sous couvert forestier) pour les trois dates où la pluviométrie est faible, certains prélèvements du 30/09/94 apparaissent relativement plus concentrés en aluminium et chlorure. Ils correspondent essentiellement aux pluviomètres situés sur les layons II et IV, les plus au nord.

En *conclusion*, pour cette campagne de prélèvements, une pluie de faible intensité a suivi l'essai au BEAP et les concentrations des solutions recueillies sont relativement élevées car les éléments chimiques issus des échanges foliaires et de la dissolution des poussières de l'atmosphère sont peu dilués par la pluie. Les retombées du nuage touchent essentiellement la partie nord de la zone étudiée (layons II et IV) mais restent quantitativement très faibles. A titre d'exemple, on estime cet apport au niveau du pluviomètre PB3, le plus concentré en aluminium, sur la piste Barthod, à 0,026 mmole d'Al (0,7mg) par m². Lors de cet essai, il semble de plus que la végétation ait tamponné parfaitement l'acidité qui devrait accompagner les retombées de chlorure et d'aluminium. Cette acidité est vraisemblablement compensée par un lessivage plus important de cations à partir des feuilles d'arbres.

5.4.2.2 Prélèvements dans les criques Passoura et Karouabo après l'essai

Les préleveurs automatiques ont été mis en place le 28 septembre à 10h30 sur la Karouabo et à 13h sur la Passoura. Ils ont fonctionné avec un pas de temps de 6h entre deux

Pour les deux rivières, les teneurs en aluminium restent faibles du même ordre qu'en période hors essai, comprises entre 1 et 3 µM/l. Les pH varient entre 5,8 et 6,2 dans les eaux de la Passoura, et sont supérieurs à 6,3 dans les eaux de la Karouabo. Les concentrations en chlorure sont peu variables sur la Passoura, où l'on n'observe pas de remontées salines dues aux marées. Par contre sur la Karouabo, les derniers prélèvements montrent des variations avec un pas de temps de 6h qui correspondraient à des remontées d'eaux plus salées, jusqu'alors non observées au cours des précédentes campagnes de prélèvements. Ces nouveaux comportements des deux rivières devront être vérifiés grâce aux enregistrements en continu du pH et de la conductivité, mais ne modifient pas les conclusions concernant l'absence de pollution de ces deux rivières à l'aval de la zone sous le vent du BEAP.

5.4.3 Essai du 15 décembre 1994 au BEAP (essai M 5)

5.4.3.1 Prélèvements d'eaux de pluie et de pluviolessivats

Les eaux de pluie et de pluviolessivats ont été recueillies après des précipitations d'environ 18 mm.

Les pluies des pluviomètres CR5 (sur le chemin de ronde) et surtout PB7 (sur la piste Barthod) sont relativement acides (respectivement 4,5 et 3,6) et ont des teneurs en aluminium et chlorure plus élevées que les autres prélèvements sur le chemin de ronde et la piste Barthod. Ces trois variables, pH, (Al) et (Cl-), sont directement liées aux retombées du nuage émis par l'essai. Entre ces deux pluviomètres, visiblement "pollués", la composition chimique des pluies recueillies est différente : les teneurs en cations, Na+, Ca++, Mg++, (dans une moindre mesure K+), sont nettement plus élevées en CR5. Ces cations sont vraisemblablement solubilisés à partir des minéraux des roches du carneau, soit dans l'eau de la nappe propulsée avec les gaz du

moteur, soit dans le pluviomètre après dépôt sous forme de poussières. Le pluviomètre CR5 est en effet beaucoup plus proche du carneau que PB7.

Pour les pluviollessivats recueillis sous couvert forestier, les pH les plus acides (minimum 4,6) sont observés sur les layons I et II, les plus proches du BEAP (Layon I -2 et 2d, Layon II -2 et 2d). Les teneurs en aluminium sont généralement à peine détectables (autour de 1 $\mu\text{mol/l}$) ; la teneur maximale observée, 4 $\mu\text{mol/l}$, correspond au site Layon IV - 2. Trois prélèvements (Layon I -1, Layon II -5 et Layon III -5) ont des teneurs en chlorure un peu plus élevées que les autres pluviollessivats. A partir de ces observations, il semble qu'aucun prélèvement ne témoigne de retombée significative du nuage sur la zone étudiée : les teneurs en (H^+), (Al) et (Cl^-) restent faibles et l'éventuelle augmentation de l'une d'entre elles, dans un échantillon, ne s'accompagne pas d'autre signe de pollution.

Nous avons comparé cette série de pluviollessivats à celles analysées sur les mêmes sites avant les essais, qui devaient constituer une référence en conditions hors pollution. Pour les quatre séries, la pluviométrie est du même ordre de grandeur, ce qui permet une comparaison plus fiable a priori. Pour les concentrations en chlorure, on remarque de légères différences, déjà, entre les trois séries prélevées de janvier à février 93. Pour la série du 15 décembre 94, les variations de (Cl^-) sont du même ordre de grandeur que la variabilité naturelle des pluviollessivats. A titre indicatif, la série correspondant à l'essai du 28 juin 1994 où l'on avait conclu à la pollution de certains échantillons, a aussi été comparée aux trois séries de référence.

En conclusion, il semble que des apports d' HCl et d'alumine à partir du nuage émis par l'essai n'ont affecté que le Sud de la zone étudiée au niveau des pluviomètres CR5 et PB7.

5.4.3.2 Prélèvements d'eaux des criques Passoura et Karouabo

Les préleveurs automatiques ont été mis en place le 14 décembre à 8h sur la Passoura et à 9h30 sur la Karouabo et ont fonctionné pendant 6 jours avec un pas de temps de 6h.

Sur la Passoura, au pont de la route du Degrad Saram a ca, on observe une très nette et brutale diminution du pH de 5,1 à 4,3. Ce pH minimum est mesuré sur deux prélèvements le 15/12 à 14 h et à 20 h. Cette acidification des eaux s'accompagne d'une augmentation des teneurs en aluminium, d'abord progressive puis plus irrégulière. Ces teneurs ne dépassent cependant pas 10 $\mu\text{mol/l}$ (soit 0,27 mg/l), ce qui reste dans l'ordre de grandeur des concentrations naturelles. Dans les heures suivant l'essai, alors que le pH est minimum, on mesure un pic de concentrations en Cl^- (lié aux apports d' H^+ par le nuage) mais aussi en Na^+ , Ca^{++} et Mg^{++} . Ceci confirme bien le lessivage de ces cations échangés avec les H^+ , soit dans la canopée de la forêt, soit sur le complexe adsorbant du sol. On a donc une exportation de ces éléments par les rivières, exportation qui, répétée sur de longues durées, pourrait appauvrir l'écosystème forêt + sol en éléments nutritifs comme Ca^{++} et Mg^{++} , peu abondants dans les sols ferrallitiques.

Cependant, pour cet essai, les concentrations de ces éléments chimiques sont multipliées par 2 pendant moins de 12 heures. Le phénomène est bien visible mais est quantitativement tout à fait négligeable. Par contre, on peut affirmer que la forêt et le complexe adsorbant du sol ont tamponné partiellement les apports d' H^+ en les échangeant avec ces cations : si on suppose un apport d' HCl ayant produit vers 14 h un excès de chlorure dans la rivière d'environ 400 $\mu\text{mol/l}$, le lessivage supplémentaire de cations [(Na^+) + 2 (Ca^{++}) + 2 (Mg^{++})] qui en résulte étant estimé à 320 $\mu\text{eq/l}$, on peut supposer que les 3/4 des H^+ ont ainsi été neutralisés. A partir du 16 décembre, la composition chimique des eaux présente les caractères classiques des rivières guyanaises en crue : pH entre 4,6 et 4,8, teneurs en aluminium légèrement plus élevées, dilution générale de tous les autres éléments.

Sur la Karouabo, au moment où se produit l'essai du moteur au BEAP, le pH est en diminution et l'aluminium augmente de quelques micromoles par litre. L'évolution de la

composition chimique des eaux de la rivière correspond à une augmentation de son débit (caractéristiques décrites ci-dessus) puis à sa diminution à partir du 17 décembre.

En conclusion, en accord avec l'observation de deux pluviomètres pollués, au sud de la zone étudiée, sous le vent du BEAP, il semble que des retombées d'acide se soient produites sur le bassin versant de la Passoura et non sur celui de la Karouabo plus au nord. Grâce au rôle tampon joué par la forêt et le sol sur le pH des eaux de pluviolessivats puis d'écoulement rapide jusqu'aux rivières, le pH enregistré dans la Passoura vers l'aval de son bassin versant ne descend pas au-dessous de 4,3. Il est à noter que les teneurs en aluminium n'augmentent pas de manière importante, dans le même temps, comme on aurait pu s'y attendre. Les particules d'alumine sont sans doute retenues efficacement par la canopée qui jouerait alors un rôle de filtre physique.

5.4.4 Essai du 10 mars 1995 au BEAP (essai Q1)

5.4.4.1 Prélèvements d'eaux de pluie et de pluviolessivats

Les eaux de pluie et de pluviolessivats ont été recueillies le 12 mars au matin après des précipitations de plus de 60 mm. Au cours même de la campagne de prélèvements, la pluie a repris, augmentant les quantités recueillies pour certains échantillons. Cette forte pluviométrie correspond en fait à une pluie de 13 mm entre le 10 et le 11 mars, puis à des pluies d'environ 50 mm entre le 11 et le 12 mars.

Le pH des pluies est compris entre 4,8 et 5; il est sensiblement plus faible (4,3) dans le pluviomètre CR5 et un peu plus élevé (5,2) dans le pluviomètre PB7. Le pH des pluviolessivats varie entre 4,7 et 6,5, ce qui correspond à la forte variabilité naturelle de ce paramètre sous la

La teneur en aluminium dissous est toujours très faible, inférieure à 2 $\mu\text{mol/l}$, hormis sur un pluviomètre de la piste Barthod, PB7, où on relève une valeur de 9,5 $\mu\text{mol/l}$.

(Cl-) est un peu plus élevé dans le pluviomètre CR5 que dans les autres eaux de pluies. Sous forêt, on observe une forte variabilité de la composition chimique, pour le chlorure et pour les autres éléments, variabilité un peu supérieure à celle des pluviolessivats du 15 décembre 94. Une comparaison avec les séries-témoins, de janvier et février 93, montre que les prélèvements les plus concentrés en mars 95 correspondent à des sites déjà concentrés avant les essais. Cette variabilité est surtout liée à la diversité des espèces présentes ; celles-ci expliquent la morphologie diverse de la canopée au-dessus des pluviomètres, mais aussi la nature hétérogène des échanges chimiques avec les eaux de pluies qui lessivent les feuilles.

Malgré une pluviosité beaucoup plus forte que pour les prélèvements de décembre 94, les conductivités obtenues en mars 95 sont aussi élevées que les précédentes. Certains facteurs pourraient l'expliquer : pluie succédant à une période sèche prolongée ? ; pluie de longue durée mais d'intensité relativement faible ? En tout cas, les éléments chimiques éventuellement retombés sur la zone lors de l'essai ont pu être dilués, dans les pluviomètres mais aussi au sol et dans les criques, à cause des volumes importants des précipitations.

5.4.4.2 Prélèvements d'eaux des criques Passoura et Karouabo

Les préleveurs automatiques ont été mis en place le 9 mars à 8 h sur la Passoura et à 10 h sur la Karouabo, et ont fonctionné pendant 6 jours avec un pas de temps de 6h.

Sur la Karouabo, on observe à partir du 13 mars une légère diminution du pH qui reste cependant toujours supérieur à 5. Associée à la diminution du pH, la concentration en aluminium dans la rivière augmente de quelques micromoles par litre. Les autres concentrations varient peu. Ces observations ne rendent compte d'aucune pollution mais de l'arrivée d'eaux superficielles qui se produit de façon classique après de fortes pluies : ces eaux superficielles sont toujours un peu plus acides et plus riches en aluminium que la nappe générale qui alimente la rivière. A priori, la crue n'a pas été très importante car on n'observe pas la dilution des eaux en chlorure, sodium, magnésium et autres éléments qui accompagne

généralement l'augmentation du débit. Le pH n'atteint pas non plus les valeurs de 4,6 à 4,8, caractéristiques des eaux de ruissellement.

Sur la Passoura par contre, le pH diminue d'abord progressivement comme dans la Karouabo, puis plus rapidement à partir du 13 mars, le dernier prélèvement atteignant un pH de 4. Dans le même temps, cependant, (Al) augmente relativement peu ($< 7 \mu\text{mol/l}$). Les évolutions de (Cl⁻), (Mg⁺⁺), (Ca⁺⁺), (Na⁺) sont parallèles : augmentation d'abord faible puis 3 valeurs élevées dans les trois derniers prélèvements.

La forte diminution du pH jusqu'à 4 ne peut qu'être liée aux apports d'acide par les rejets gazeux sur le bassin versant de la Passoura. En effet, les eaux d'écoulement superficiel, qui alimentent les rivières en crue, on l'a vu, ont un pH supérieur, autour de 4,6 - 4,8 ; par ailleurs, les remontées salines, observées parfois sur cette rivière (cf rapports M. Lointier, Hydrologie ORSTOM), ont un pH proche de 7. Concernant les teneurs en chlorure, sodium, magnésium et

- le chlorure est entraîné avec les H⁺ auxquels il est associé dans les rejets ; les cations ont été lessivés à partir de la végétation (pluiolessivats) ou à partir du complexe adsorbant du sol. Il s'est donc produit une exportation accrue d'éléments nutritifs hors du système. Les teneurs en K⁺ restent cependant toujours faibles, ce qui confirme sa reprise très rapide par la végétation, comme cela a déjà été observé en conditions naturelles. Un calcul similaire à celui effectué pour l'essai de décembre 94 donne pour un apport de 1300 $\mu\text{mol/l}$ d'HCl, une exportation de 930 $\mu\text{eq/l}$ de cations (Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺...) qui ont donc neutralisé une quantité équivalente d'ions H⁺, soit environ les 2/3.

- les remontées salines peuvent produire des pics de concentrations en ces éléments, tels qu'on les observe pour les trois derniers prélèvements de la série (pas de temps de 12 heures entre deux pics), mais ne peuvent expliquer les augmentations, plus progressives et plus durables, observées les deux jours précédents. Dans cette hypothèse, le mélange d'une eau acide venue de l'amont et de l'eau salée, à pH et surtout à pouvoir tampon élevés (abondance dans l'eau de mer d'ions HCO₃⁻ et CO₃⁼ pouvant neutraliser des H⁺), aurait dû remonter significativement le pH. Pour cette raison, cette hypothèse de remontée saline apparaît peu probable. Si elle était vérifiée cependant, il est à craindre que l'acidité des eaux en amont de l'influence des marées n'ait été encore plus importante que celle observée au pont de la route Degrad Saramaca.

En conclusion, on observe après l'essai Q1 une acidification significative de la crique Passoura. Les deux hypothèses évoquées concernant l'origine des éléments chimiques dont les concentrations augmentent dans le même temps laissent penser que les retombées ont été plus importantes sur le bassin de la Passoura que lors des essais précédents. Il est encore une fois remarquable que, malgré les bas pH et l'apport d'alumine (peu soluble, il est vrai), les teneurs en aluminium n'augmentent pas significativement.

5.4.5 Essai du 21 juillet 1995 au BEAP (essai Q 2)

5.4.5.1 Prélèvements d'eaux de pluie et de pluiolessivats

L'essai a été réalisé par temps sec et les premières pluies ont eu lieu une semaine plus tard. Les recueils de pluie et de pluiolessivats ont été effectués le 28 juillet 1995 après des précipitations d'environ 40 mm (pluviomètres du chemin de ronde. Ces pluies sont apparemment caractérisées par une hétérogénéité spatiale importante : pluviométrie d'environ 25 mm pour les pluviomètres les plus éloignés sur la piste Barthod alors que 15 mm sont enregistrés à la station météo du CSG pendant la même période.

Comme pour les études précédentes, les pluviomètres sont «mis en service» juste avant l'essai et recueillent les particules éventuellement émises lors de cet essai. Les pluviomètres du chemin de ronde et de la piste Barthod recueillent la pluie hors couvert végétal qui peut alors dissoudre ces particules. Les pluviomètres disposés sur les layons recueillent la pluie, après

passage sur la canopée et lessivage des mêmes particules déposées sur la végétation. Dans le cas de dépôts acides, des réactions d'échanges se produisent au niveau des feuilles, dont on observe alors les conséquences sur la composition chimique des pluviollessivats.

Les pluies des pluviomètres du chemin de ronde et de la piste Barthod apparaissent très diluées (conductivité d'environ $7 \mu\text{S}/\text{cm}$) pour tous les éléments chimiques, y compris le chlorure et l'aluminium massivement émis lors de la combustion. Leur pH, autour de 5, est également dans la gamme de l'acidité naturelle de la pluie.

On retrouve, pour les pluviollessivats, l'augmentation de leurs concentrations lors du passage de la pluie à travers la canopée et la forte variabilité de leur composition chimique, déjà observées en conditions hors essai (GRIMALDI et SARRAZIN, 1993). Pour deux traceurs de la pollution, le pH et la concentration en chlorure, on vérifie qu'aucun site n'est affecté par une pollution significative, en comparant ces échantillons avec ceux recueillis le 19 février 1993, avant le début des essais, pour une pluviométrie comparable. En particulier, les pH relativement plus faibles dans les pluviomètres Lay2-5 et Lay3-1 ne s'accompagnent pas de teneurs en chlorure significativement plus élevées. Dans tous les prélèvements, les concentrations en aluminium restent extrêmement faibles ($< 1,5 \mu\text{M}$, soit $< 40 \mu\text{g}/\text{l}$).

En conclusion, l'essai Q2 ne semble pas avoir entraîné des retombées significatives d'acide chlorhydrique et d'alumine dans la zone étudiée proche du BEAP.

5.4.5.2 Prélèvements d'eaux dans la crique Karouabo

Les préleveurs automatiques ont été mis en place le 20 juillet 1995 sur la Karouabo et sur la Passoura, mais à cause d'un dysfonctionnement de l'un des appareils, nous ne disposons malheureusement pas de données pour cette deuxième rivière.

Sur la Karouabo, 24 prélèvements ont été effectués entre le 20 juillet et le 25 juillet avec un pas de temps de 6 heures. La rivière se trouve alors en régime de basses eaux et aucune pluie significative n'est survenue durant cette période. La composition chimique des prélèvements reste donc très stable. Ceci est confirmé par les enregistrements en continu du pH et de la conductivité entre le 20 et le 27 juillet.

6 CONCLUSION GENERALE

6.1 Pédologie

Hypothèses de travail concernant le transfert des polluants :

- les polluants seront immobilisés dans les sols les plus épais (ou, du moins, ils seront très retardés dans leur arrivée aux talwegs) ;
- ils transiteront, sans doute assez lentement, dans les sols hydromorphes aval, avant de rejoindre les cours d'eau ;
- ils seront peu retenus dans les sols les plus minces, qui connaissent un important drainage latéral.

6.1.1 Pollution du périmètre

En fonction de la répartition des sols sur le périmètre et de leurs comportements respectifs, on peut proposer un modèle schématique de distribution des polluants après les essais.

Pour ce faire, on suppose que les différentes directions, à l'intérieur du cône, seront touchées de manière équivalente pour l'ensemble des 10 essais.

6.1.2 Présentation "verticale".

Les sols nus et remblais, à proximité immédiate du banc d'essais et au niveau du chemin de ronde, vont relativement peu retenir les rejets, du fait de ruissellements importants liés en particulier aux tassements par les engins de terrassement. Les polluants seront principalement entraînés dans le carneau, vers la savane voisine et les axes de drainage, Passoura et Karouabo.

Par contre, les sols sous forêt entre le BEAP et le chemin de ronde seront très probablement les plus touchés, et sans doute durablement, compte tenu d'une part de l'importance du nuage à proximité des essais, d'autre part de la capacité de ces couvertures épaisses à retenir l'eau, donc les polluants.

On peut donc supposer que ces sols épais sous forêt, proches du banc d'essais, vont s'acidifier et s'appauvrir en cations nutritifs, mais ils ne devraient alimenter les talwegs que de manière limitée.

Les couvertures assez épaisses sous forêt, situées juste après le chemin de ronde, quoique plus éloignées du carneau et présentant un drainage interne moins profond (donc des réserves hydriques moindres), vont également retenir des quantités assez importantes de rejets.

Les talwegs environnants seront également touchés, principalement par apport direct, du fait de la relative épaisseur des sols des collines adjacentes; mais les pluies y occasionneront sans doute une dilution des polluants.

Au-delà, le nuage devenant moins important avec l'éloignement du BEAP, et les couvertures peu épaisses connaissant un fort drainage latéral, les polluants seront peu retenus, du moins à l'amont et dans les pentes des interfluves. Ils seront redistribués vers l'aval, transitant plus ou moins lentement par les sols hydromorphes, avant de rejoindre les cours d'eau.

6.1.3 Présentation en plan

En supposant que toutes les directions du cône ont une probabilité égale d'être affectées.

Les sols sous forêt les plus proches du banc d'essais et les plus épais vont retenir les plus grandes quantités de polluants le plus durablement. Les concentrations fixées diminuent avec l'épaisseur des horizons perméables et à mesure qu'on s'éloigne du carneau.

En fin de compte, la prédominance du vent dans l'une ou l'autre direction s'accompagne d'un déplacement des effets vers le Nord ou le Sud, mais ne modifie pas radicalement le schéma proposé, en particulier en coupe.

On notera également que l'occurrence de fortes pluies après les essais aura pour conséquence d'accentuer les contrastes : les sols les plus minces s'appauvriront plus rapidement en polluants, au détriment des sols hydromorphes dont la teneur augmentera, au moins temporairement. Les sols épais pourraient être le siège d'une redistribution en profondeur des éléments considérés. Suivant les cas, les pluies s'accompagneront donc d'une redistribution des polluants vers l'aval ou la profondeur.

6.2 Géomorphologie

Au terme de cette analyse quelques questions doivent être formulées :

6.2.1 Quelles seront les modalités et les vitesses du transfert des éventuels polluants entre le BEAP et les criques?

Dans le domaine de l'hydrogéologie N. KLEINMANN (1990) soutient que compte tenu des caractéristiques de la nappe phréatique et la porosité des formations géologiques, les polluants épanchés accidentellement pourraient avoir deux cheminements : soit une infiltration dans le sous-sol jusqu'à la nappe, soit une migration à la surface du sol, puis dans le réseau hydrographique. L'infiltration s'effectuera plus facilement dans les horizons plus perméables (sables) et dans les cuvettes topographiques en période de nappe basse, si le sol n'est pas saturé. L'auteur estime qu'une telle infiltration engendrerait une pollution durable des eaux souterraines et des sols. Par contre, si l'épanchement des polluants a lieu pendant la période de pluies, ceux-ci seraient susceptibles de migrer rapidement en surface (par ruissellement) en direction du réseau hydrographique.

L'étude pédoologique de B. BARTHES (1992) nuance le transfert en fonction des sols: il rappelle que le transit dans les sols ferrallitiques plus au moins épais et dans les podzols de la "Série Détritique de Base" dépend directement des réserves hydriques, de l'épaisseur, de la nature et du drainage interne des sols. L'auteur conclut que:

- au bout du transit, les sols hydromorphes de talwegs et bas fonds, même éloignés des essais, seront relativement touchés du fait d'une possible pollution indirecte suite au drainage latéral depuis l'amont.

- ce transit serait plus au moins durable.

- les polluants, après un temps plus au moins long, arriveront aux criques.

6.2.2 Une fois arrivés dans les criques, comment se produira le transit et la détection des polluants?

Il dépend en grande partie de la morphologie des bassins-versants, des modalités de l'écoulement et de la composition chimique des eaux.

Les criques Karouabo et de la Passoura, aux pentes faibles (sauf dans le cours supérieur), développent de grands méandres, de zones basses inondables et des marais où

L'écoulement de la Karouabo (M. LOINTIER, 1992) et de la Passoura sont de très ²³ surtout en saison sèche. A la station du pont sur la Karouabo dans l'ex-RN1 (zone des ELA) par exemple, le débit de la station sèche a provoqué, en 1992, la stagnation de l'eau et une augmentation de sa température jusqu'à 30°C (C. GRIMALDI & M. SARRAZIN, 1992).

Certes, en saison des pluies les eaux de crue sont plus diluées et légèrement plus acides que les eaux de décrue mais, dans l'ensemble, les eaux de la Karouabo et de la Passoura ne présentent que des faibles variations annuelles de composition chimique: une éventuelle pollution, acide ou aluminique, devrait donc être détectée même à des seuils relativement faibles (C. GRIMALDI & M. SARRAZIN, 1992).

6.2.3 Etant donné le faible écoulement et la morphologie des bassins-versants, quelles seront les éventuelles zones de stockage de polluants?

Les zones tampon susceptibles d'être des aires de stockage sont:

- pour la Passoura, les marais à *Eleocharis Interstincta* du cours moyen (à l'aval et à l'amont de la crique Soumourou), où les eaux de crue peuvent s'étaler. Un suivi régulier est

- pour la Karouabo, il s'agirait:

(a) des marais à *Pterocarpus officinalis* situés à la hauteur de la bifurcation principale de la crique à l'aval du Carbet des Journalistes.

(b) du grand marais à *Mauritia flexuosa* situé entre le pont de la Route de l'Espace (ELA) et les savanes inondées proches de la mer.

Dans un cas comme dans l'autre - et sous réserve du comportement des nappes et des sols dans le transfert d'éventuels polluants - tout écoulement vers ces points en provenance des savanes et des barres pré littorales augmentera les risques.

6.2.4 Etant donné que l'accumulation d'éventuels polluants peut s'accroître en présence de l'eau salée, quel serait l'impact des marées salines?

- Pour la Karouabo, l'hypothèse d'une influence océanique provoquant des modifications de l'écoulement océan-crique, tout d'abord émise par R. ROHAN (1990), a été ensuite écartée par l'auteur: l'écoulement principal se fait dans le sens crique-océan et l'action des marées est limitée à la zone occupée par la mangrove. En outre, la station des mesures sur la Karouabo n'a enregistré, en octobre 1991, aucune remontée saline, la conductivité restant toujours faible (C. GRIMALDI & M. SARRAZIN, 1992).

Le marais à palmier bêche (*Mauritia flexuosa*) situé à l'aval de l'ex-RN1 est une cuvette située à zéro m IGN; l'écoulement est nul, dans un espace envahi par une végétation dense avec

²³ Pendant l'étiage de la saison sèche de 1964, la crique Malmanoury a été vraisemblablement en situation de débit nul, comme la Passoura et la Karouabo (in, R. Rohan, 1990).

Il se dégage que l'écoulement de la crique est contraint par la morphologie. La marée haute pouvant difficilement déborder le chenier, l'influence océanique principale reste limitée aux chenaux de marée qui entaillent les vases et la mangrove intertidale. Si des éventuels polluants arrivent à ce marais ils auront toutes les chances de subir un stockage important.

- Pour la Passoura, des remontées salines lors des marées hautes se produisent régulièrement jusqu'au Dégrad Saramaca, n'atteignant pas les marais du cours moyen.

6.2.5 Quel sera l'impact sur la mangrove où niche l'avifaune ?

Il est certain que la présence des eaux salées et basique des mangroves crée des conditions d'accumulation accrue. Cependant, la ligne des rivages en Guyane est instable, caractérisée par des modifications morphologiques importantes à très court terme. Dans l'hypothèse d'une pollution du milieu, il y a deux cas de figure: en situation d'envasement durable les conditions seraient favorables à un stockage; par contre, en phase de dévasement - avec remise en suspension des sédiments et migration des bancs de boue - un départ de polluants peut se produire. Quoi qu'il en soit, la pollution de ce milieu serait vraisemblablement la dernière à se produire, compte tenu du régime des vents et de l'emplacement des différentes zones potentielles de stockage entre le BEAP et la mer.

6.2.6 Le comportement spécifique des vases peut-il aggraver le problème?

Il est certain que les vases ont un comportement spécifique qu'il faut connaître. En suspension dans les eaux marines et fluviales elles sont soumises à la floculation, avec formation d'agrégats ("flocons") très riches en eau et avec un réseau très lâche. "Décantées sur les fonds, les vases seront soumises à un tassement long et leur cohésion variera en fonction de leur teneur en eau, présentant tous les états physiques possibles: liquides, visqueux ou solides" (C. MIGNIOT, 1989)

En Guyane, les vases marines et estuariennes sont très fines, à dominante kaolinique; elles se tassent difficilement - sauf lorsqu'elles sont mélangées à des limons ou à des sables. Les sédiments estuariens, en général plus hétérogènes, augmenteraient l'accumulation. Mais cette tendance est contrariée par le débit plus au moins important des fleuves et par l'énergie des courants de marée, facteurs qui entretiennent l'agitation des eaux et la suspension de la charge. C'est dire que les embouchures des criques (Karouabo, Malmanoury, Passoura) sont, toutes conditions égales, des zones potentielles d'accumulation vis-à-vis des grands fleuves (Kourou). Mais nous sommes là dans l'interface eau marine - eau fluviale, ce qui introduit des modifications.

En ce qui concerne les vases marines, s'il est certain que la salinité des eaux affecte peu leur cohésion et leur rigidité, il est également vrai qu'elle augmente leur viscosité, 2 à 3 fois plus forte qu'en eau douce. La vase semi-fluide des parties frontales des bancs de boue prend l'apparence d'un gel qui a le pouvoir d'amortir les vagues et d'accentuer l'accumulation des sédiments et des éventuels polluants. Quoi qu'il en soit, dans les voisinages des principaux estuaires, il y a le plus souvent un mélange de sédiments fins (argiles, limons, sables fins) continentaux et marins. Par la télédétection il est possible de constater des modifications significatives des panaches estuariens en mer.

Enfin, fait important à signaler en cas de pollution, les vases peuvent "*garder en mémoire*" des événements passés: par exemple, il a été constaté (campagne SAREX 92) que la vase de sub-surface dans les mangroves est parfois hypersalée par rapport à la salinité des eaux estuariennes de surface et des vases superficielles; vraisemblablement elle a enregistré l'impact d'une (des) saison(s) sèche plus longue que d'habitude.

6.2.7 Synthèse

1. En ce qui concerne le milieu fluvial :

Une fois parvenus - dans un délai plus au moins long - aux "zones tampon" (marais intérieurs) les éventuels polluants pourraient y être lentement stockés grâce à la faiblesse de l'écoulement, à la morphologie des marais et à la nature des sédiments.

2. Dans les estuaires les vases hétérométriques (comp ortant des argiles, limons et sable fin) sont moins favorables à l'accumulation par tassement que les vases "pures" kaolinitiques.

3. Sur la ligne de rivage

(a) Dans la mangrove les vases peuvent accumuler les éventuels polluants.

(b) En situation d'envasement, la pollution serait plus importante dans la partie frontale des bancs (à cause de la nature physique de la vase) que dans leurs parties distales.

(c) En situation de dévasement, l'énergie du milieu engendrerait un départ des polluants.

6.3 Botanique

La modification du rythme et de l'intensité de la défeuillaison en forêt, à la suite des retombées acides liées aux essais des propulseurs à propergol solide d'Ariane V, a été étudiée à trois distances du banc d'essai (BEAP) soit 250 à 400 m en Zone 1 ; 1500 m en Zone 2 et 2500 m en Zone 3.

6.3.1 En Zone 1 :

L'impact des essais ne fait aucun doute. Il se traduit notamment par un fort accroissement des chutes de litières au premier mois, beaucoup plus perceptible au second essai. La non prise en compte au premier essai du jour J (les collecteurs n'avaient été mis en place qu'à J+1) explique probablement cette différence. L'effet immédiat, certainement dû aux facteurs physiques (température, turbulences, vibrations à basse fréquence) semble donc important à courte distance; l'intensité de défeuillaison a été multipliée par 10, entre le mois précédent et le mois suivant le tir, dans la zone touchée par le 2ème essai, alors qu'elle doublait seulement pour le témoin indemne. Cet effet immédiat est suivi d'un effet à plus long terme puisque les différences entre secteurs indemne et touché restent importantes au premier mois (m) si le jour J n'est pas pris en compte (1er essai) .

Les effets du second essai accompagnent un phénomène naturel (phase de défeuillaison intense) ce qui peut expliquer également les différences entre les deux essais.

Le goupier, grand arbre de la voûte ou émergent, manifeste au second essai une réaction significative et du même ordre que l'ensemble de la végétation.

6.3.2 En Zone 2 :

Les phénomènes observés après le premier et le second essai sont concordants et semblent montrer un accroissement de la défeuillaison consécutif à la pollution. Comme en zone 1 l'effet après pollution semble plus bref et plus intense au second essai, les mêmes raisons peuvent être invoquées. Cependant (grâce au suivi mené depuis Septembre 1991), une rétrospective permet de constater que les groupes "indemne" et "pollué" ont présenté à quelques reprises des différences significatives et du même ordre que celles observées suite au deuxième essai. De plus les valeurs obtenues pour le pic de défeuillaison de Juillet 1993, un mois après le second essai sont pour le groupe "pollué" très comparables à celles des pics précédents. Il n'est donc pas certain que les différences observées soient dues aux retombées acides ; elles présentent même un caractère systématique au moment des pics de défeuillaison annuel.

Notre analyse par rapport aux débits, des deux séries de mesures chimiques en saison sèche et en saison des pluies, converge avec les conclusions du rapport de C. Grimaldi :

-pour l'oxygène dissous, il est observé une augmentation globale avec le débit, sur les deux bassins, en saison des pluies. Les autres cas de figure montrent la forte dépendance de ce paramètre avec les conditions du milieu : température, effets biologiques (variations quotidiennes) et effets du mélange avec les eaux marines.

-le pH présente une relation inverse avec les débits pendant les crues de la Karouabo, et des valeurs constantes dans les autres cas. Il est, en moyenne, de même valeur sur les deux bassins, et plus acide d'une demi-unité en saison des pluies (5 unités pH au lieu de 5,5).

Après analyse des données hydrochimiques correspondant à l'essai de booster du 16 février (B1), trois jours avant une crue, on doit conclure qu'il n'y a aucun effet observable sur les paramètres mesurés, en particulier le pH. La baisse de celui-ci est naturelle, d'un quart d'unité, synchrone avec les crues, comme nous l'avons observé sur la Karouabo avant les essais.

Pour la seconde série (M1) et brûlage, les 25 et 28 juin 1993, seule la Karouabo a pu être mesurée. Le pH est très stable, avec une valeur moyenne de 5,25. Aucun phénomène particulier n'est observé après ces essais. Ce bassin n'a probablement pas subi l'effet du nuage.

Enfin, sur le plan des écoulements des deux bassins, les mesures 92-93 confirment que le bassin de la Karouabo présente des arrêts d'écoulements en saison sèche, et en première approximation pour des conditions pluviométriques annuelles inférieures à la moyenne (vers 2500 mm annuels, à la station du CSG). Les processus de stockage des eaux dans les cuvettes marécageuses avals sont importants, et ce bassin à petit débit paraît tout à fait inadapté à l'évacuation vers la mer de tout produit contenu dans ses eaux.

Le bassin de la Passoura présente aussi des phénomènes de stockage des eaux dans ses multiples marais, mais de façon temporaire et servant d'alimentation à l'aval de la crique en saison sèche, vers le Kourou. A cette période les eaux marines pénètrent dans la crique et remontent, aux marées hautes dans la Passoura. On peut estimer en septembre-octobre 1992, que le volume d'eau mis en jeu par les effets de la marée, est de 1 million de m³, auxquels s'ajoutent 2 millions de m³ du débit de base, soit un total de 3 Mm³.

Ces ordres de grandeurs seront utiles, pour pratiquer par la suite, des simulations sur l'évolution du pH et des concentrations ioniques, après de nouveaux essais en saison sèche.

Avec des écoulements continus, et un volume d'eau déstocké en permanence, ce bassin serait moins "sensible" que celui de la Karouabo, aux effets d'une dispersion de produits, d'autant qu'il se jette dans l'estuaire du Kourou, non loin de l'embouchure.

Comme pour la Karouabo, il conviendrait de connaître les temps de résidence des eaux et les processus hydrobiologiques liés aux phénomènes de diffusion et de fixation des produits dans l'eau des savanes, ainsi que leur temps de rémanence.

6.5 Hydrochimie

Remarques préliminaires :

Le dispositif de recueil des pluviollessivats a été placé en champ proche, dans la zone le plus fréquemment sous le vent du BEAP. Aucun système de mesures au sol ne peut espérer rendre compte de l'extension spatiale des retombées du nuage en forêt. Par cette étude, il s'agissait surtout de connaître la nature des mécanismes de réponse de la forêt à la pollution et sa capacité à la "tamponner", non de quantifier ou de cartographier les retombées.

La composition chimique des pluviollessivats en conditions naturelles est très hétérogène : hétérogénéité spatiale due à l'extrême diversité des espèces d'arbres présentes et de la morphologie de la canopée, hétérogénéité temporelle due aux pluies d'intensité et de durée différentes. Pour apprécier cette variabilité naturelle, deux séries de prélèvements ont été réalisées avant les essais. On dispose aussi de données concernant d'autres sites, en forêt guyanaise. Il est apparu également intéressant de rechercher des indicateurs "inertes" de la pollution : Cl⁻ par exemple qui accompagne H⁺ dans le nuage gazeux et qui, contrairement aux protons, n'est pas échangé avec d'autres ions dans la canopée.

6.5.1 Conséquences des essais sur la composition chimique des pluviollessivats

La Figure 21, Figure 22 et Figure 23 représentent pour chaque campagne de prélèvements, avant les essais et après chaque essai, la gamme des valeurs obtenues pour le pH, les teneurs en chlorure et en aluminium. Pour chaque campagne de prélèvements, on a distingué les pluies recueillies hors couvert végétal sur le chemin de ronde et la piste Barthod, et les pluviollessivats recueillis sous forêt. Ces figures reprennent de manière synthétique les

Parmi les 7 essais suivis, les pluies et pluviollessivats r ecueillis après les essais M1 et M4 correspondent à des précipitations de très faible intensité (quelques mm) alors que les autres campagnes de prélèvement ont été effectuées après des précipitations nettement plus importantes (15 à 40 mm). Une partie des différences observées entre les essais est vraisemblablement liée à cette variabilité des épisodes pluvieux étudiés.

C'est après l'essai M2 que les retombées sur le dispos itif de recueil des pluies et pluviollessivats ont été les plus significatives, avec des pH diminuant jusqu'à 4 et même 3,7 dans un pluviomètre sous forêt. Quelques valeurs fortes d'aluminium ont été également mesurées, jusqu'à 70 $\mu\text{mole/l}$. Les prélèvements correspondants montrent des teneurs en calcium, magnésium et sodium relativement élevées, qui permettent de supposer que ces cations ont été + et mobilisés à partir de la végétation.

Lors de l'essai M4, le recueil des pluviollessivats a été effectué après une pluie de 2 à 3 mm (saison sèche). En conditions naturelles, les faibles pluies ont pour conséquence à la fois des pluviollessivats plus concentrés (lavage des poussières de l'atmosphère, augmentation du temps de contact avec la surface foliaire, moindre rapport volume des pluies/surface foliaire...) et une hétérogénéité plus importante de leur composition chimique (augmentation des échanges foliaires dont la nature est très liée à l'espèce d'arbre). L'effet de la pollution est donc plus difficile à discerner. Malgré cela, une partie des pluviomètres (sur les layons II et IV) apparaissent relativement plus concentrés en chlorure et aluminium. Par contre, leur pH n'est pas significativement plus faible que celui des autres prélèvements. Il semble donc que, dans l'hypothèse d'une pollution sur la zone, pour cet épisode pluvieux de très faible intensité, la voûte forestière a parfaitement joué son rôle de filtre chimique par rapport aux retombées d'acide.

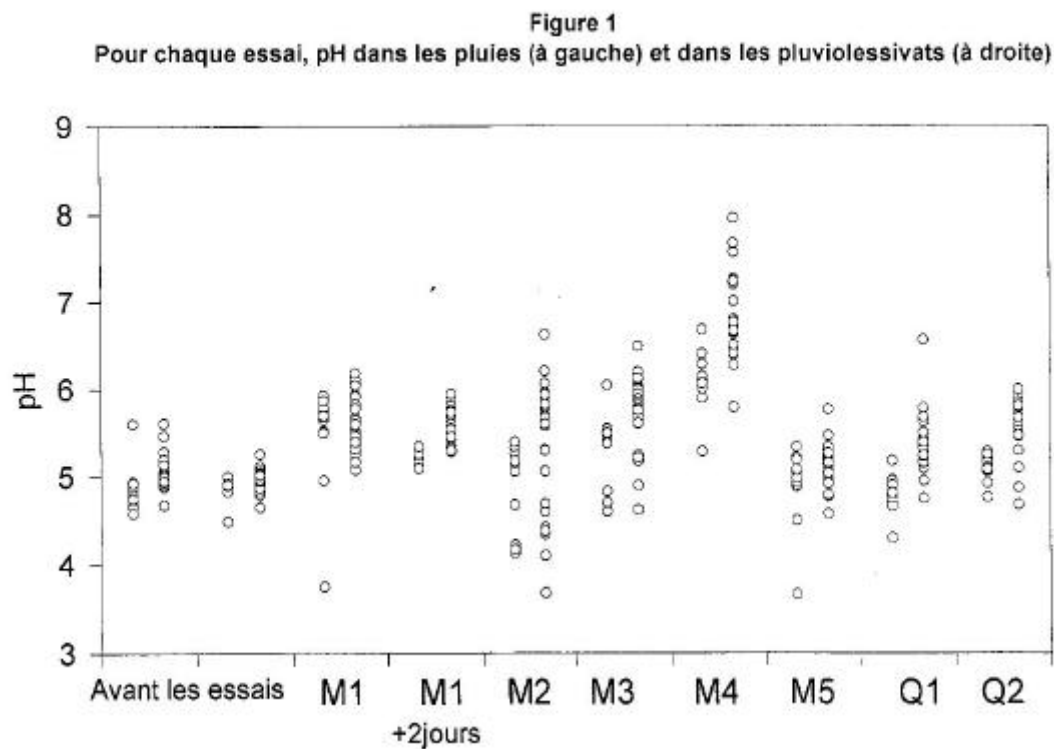


Figure 21 : Valeurs de pH pour les pluies (à gauche) et les pluviollessivats (à droite)

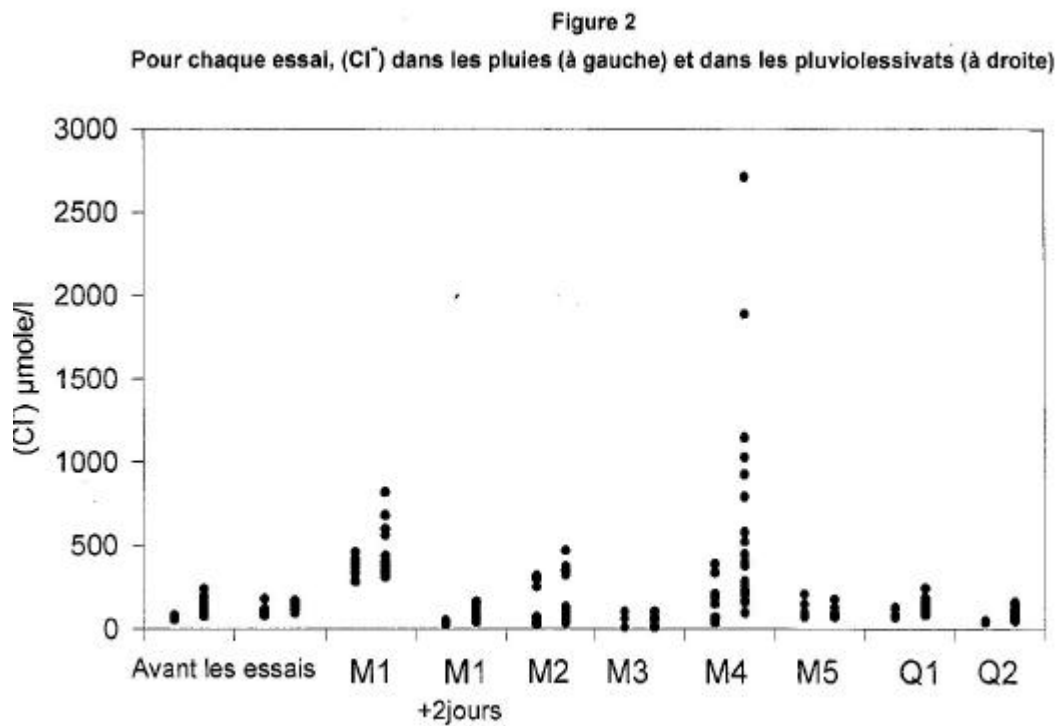


Figure 22 : Chlorure

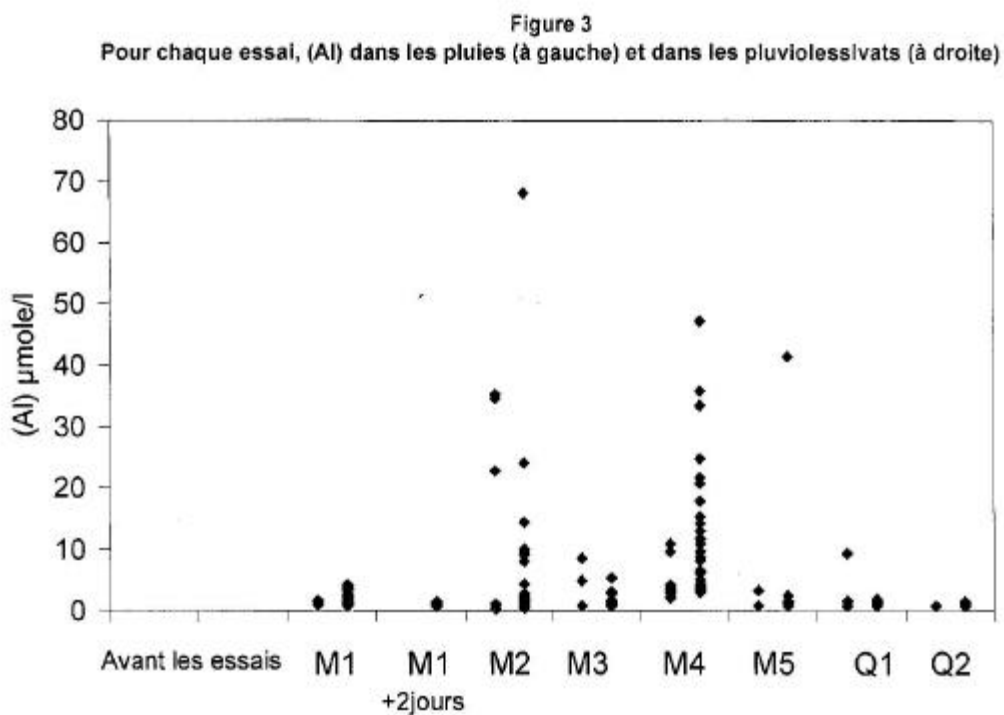


Figure 23 : Aluminium

Pour les autres essais, ou bien les retombées n'ont affecté que de rares pluviomètres isolés (pH inférieur à 4 sur un pluviomètre après l'essai M1 et l'essai M5, (Al) de l'ordre de 40 µmole/l sur un pluviomètre après l'essai M5) ou bien les pluies d'intensité moyenne à forte ont dilué les apports éventuels d'HCl et d'Al. C'est ainsi que pour l'essentiel des pluviomètres, les

teneurs en aluminium restent inférieures à 10 $\mu\text{mole/l}$ et le pH supérieur à 4,5, valeurs qui restent dans la gamme des variations observées en conditions naturelles.

6.5.2 Conséquences sur la composition chimique des rivières Karouabo et Passoura

Remarques préliminaires :

La rivière Passoura présente des remontées salines, surtout lorsque son débit est faible, qui sont susceptibles de masquer l'arrivée d'eaux polluées mais sont en revanche capables de les neutraliser. En effet, l'eau de mer est concentrée en ions bicarbonate HCO_3^- et carbonate $\text{CO}_3^{=}$ qui peuvent réagir avec les protons. Ces anions confèrent donc à l'eau de mer un important pouvoir tampon. De plus, l'augmentation du pH résultant du mélange avec les eaux salées entraîne une précipitation de l'aluminium. Cet élément n'est en effet significativement soluble

En conditions naturelles, au cours des pluies généralement intenses qui se produisent en Guyane, des eaux de ruissellement se chargent en acides organiques à la surface du sol ce qui produit un pH de l'ordre de 4,8. Parallèlement les teneurs en aluminium augmentent légèrement. Ainsi lors des crues dans les rivières, on observe généralement une baisse du pH et une mobilité accrue de l'aluminium lors de l'arrivée massive de ces eaux de ruissellement. Cette baisse du pH ne doit pas être confondue avec une manifestation de pollution acide.

Lors des essais M1, M2, M3, M4 et Q2, aucune pollution significative en HCl et Al dans les deux rivières n'a pu être observée.

Après les pluies qui ont succédé aux essais M5 et Q1, et ont provoqué une augmentation du débit dans les deux rivières, la composition chimique de la Passoura évolue par contre nettement : le pH diminue jusqu'à 4,3 (essai M5 ; Figure 24) et 4 (essai Q1, Figure 25). Lorsque le pH diminue, (Cl^-) augmente simultanément. (Al) augmente également, respectivement jusqu'à 9 $\mu\text{mole/l}$ et 7 $\mu\text{mole/l}$. La capacité du préleveur automatique étant limitée à 24 flacons, nous avons contrôlé sur les enregistrements automatiques prolongés quelques jours de plus, que les perturbations enregistrées dans la composition chimique de la Passoura ne s'accroissent pas après la fin des prélèvements (Figure 26).

En conditions naturelles, lors des crues, le pH diminue mais reste plus élevé (4,6 à 4,8 pour les valeurs minimales enregistrées) et (Cl^-) diminue généralement avec l'augmentation du débit de la rivière (arrivée d'eaux de ruissellement plus diluées que l'eau de la nappe qui alimente la rivière hors crue). L'évolution observée après les essais M5 et Q1 ne peut donc être expliquée que par des retombées acides sur le bassin versant de la Passoura.

Il est alors intéressant de noter que la forêt a joué un rôle assez efficace dans la neutralisation des retombées acides. En effet, on observe parallèlement à la diminution du pH et (Cl^-) , une augmentation notable de (Na^+) , (Ca^{++}) et (Mg^{++}) . Un simple calcul de la quantité d' H^+ échangés avec ces cations et de la quantité d' H^+ apportés sous forme d'HCl permet d'estimer que les 3/4 des H^+ apportés lors de l'essai M5 et les 2/3 des H^+ apportés lors de l'essai Q1 ont été neutralisés par la canopée de la forêt mais aussi peut-être par les échanges avec le complexe argilo-humique du sol au cours du ruissellement. S'y ajoute vraisemblablement la reprotonation des anions organiques présents dans les eaux de ruissellement. Le phénomène d'exportation accrue des cations Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , (mais pas K^+ , qui est rapidement recyclé au niveau du mat racinaire dans la litière), est nettement visible mais ne correspond pas à un appauvrissement dramatique du milieu en éléments nutritifs. Dans le cas de l'essai M5, les concentrations de ces éléments chimiques sont multipliées par deux pendant moins de 12 h.

Figure 4

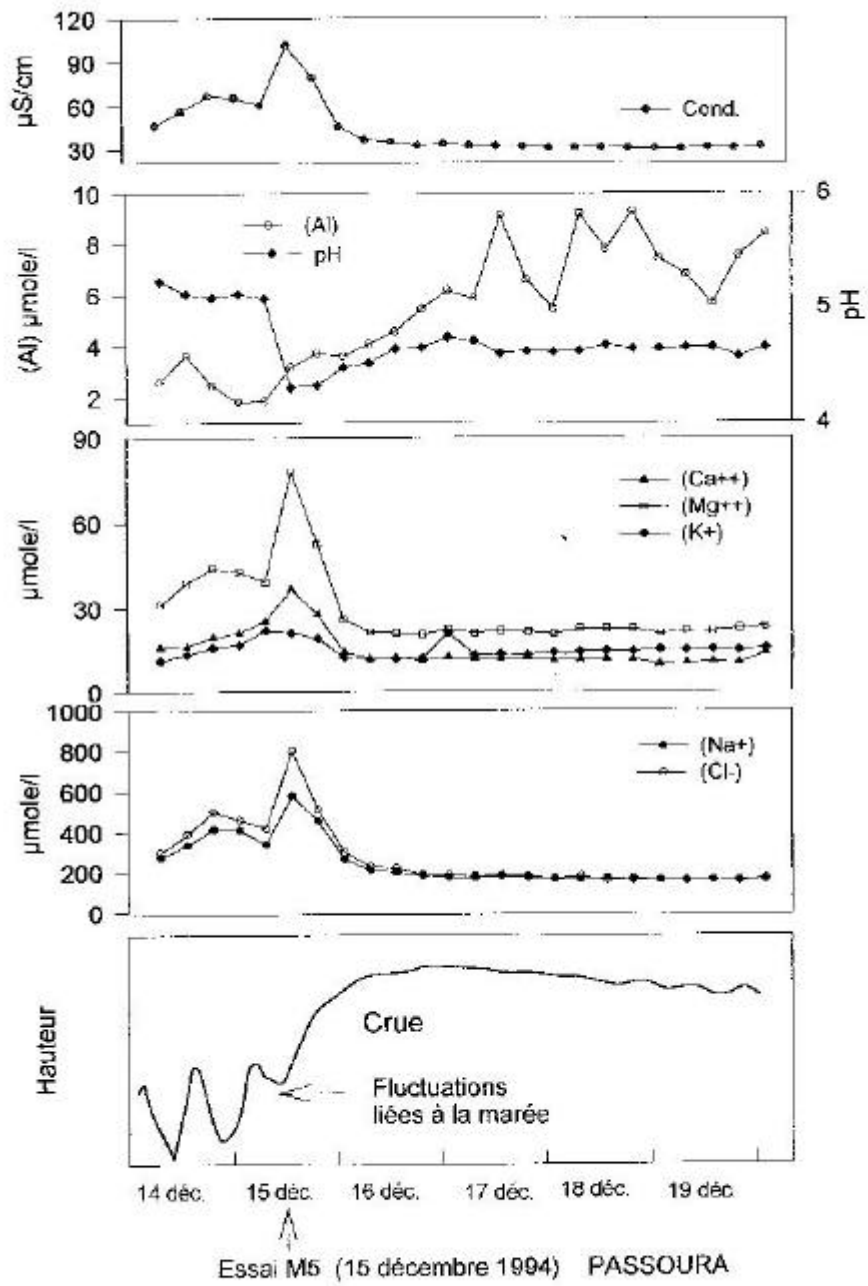


Figure 24 : Essai M5, Passoura

Figure 5

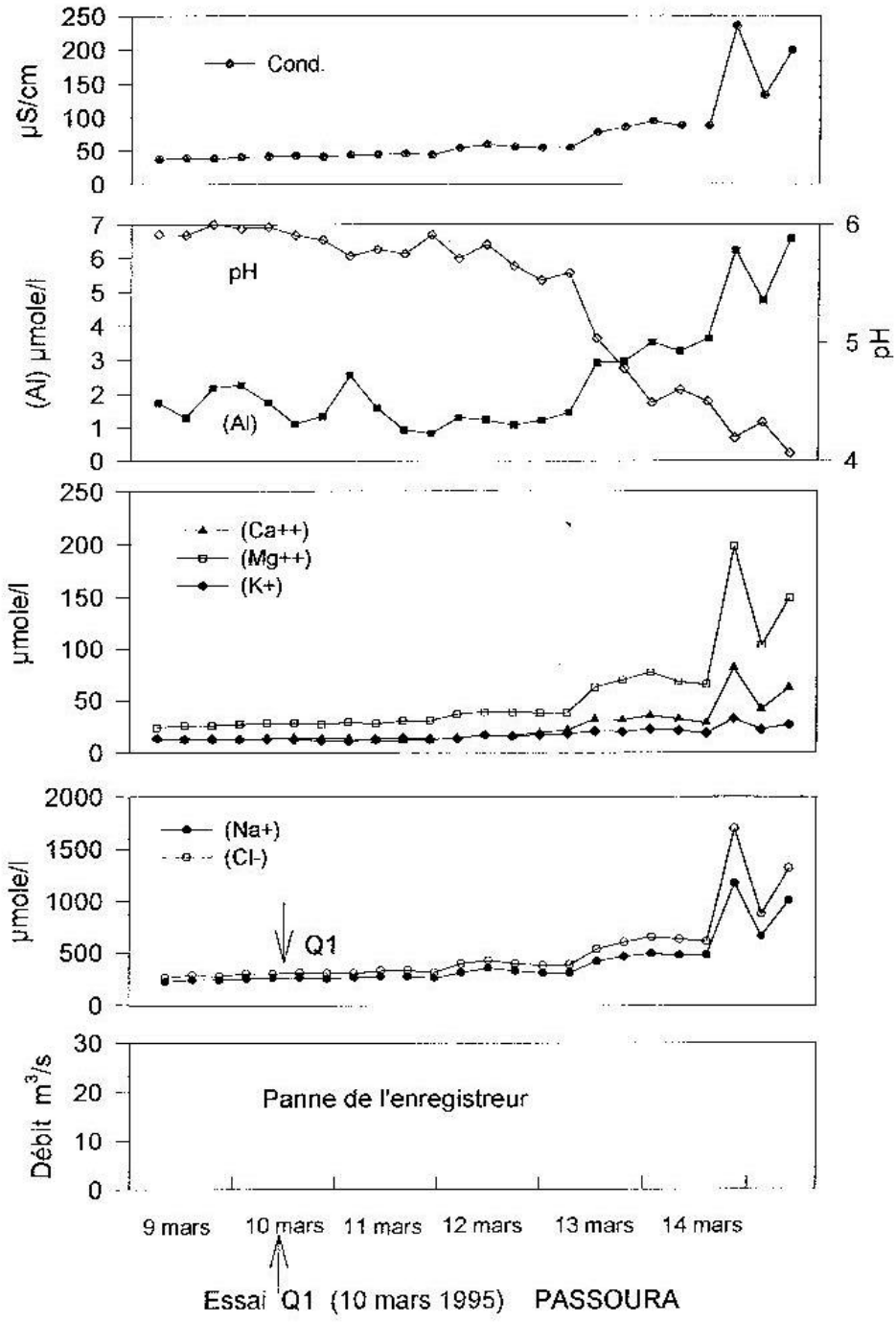


Figure 25 : Essai Q1, Passoura

Figure 6

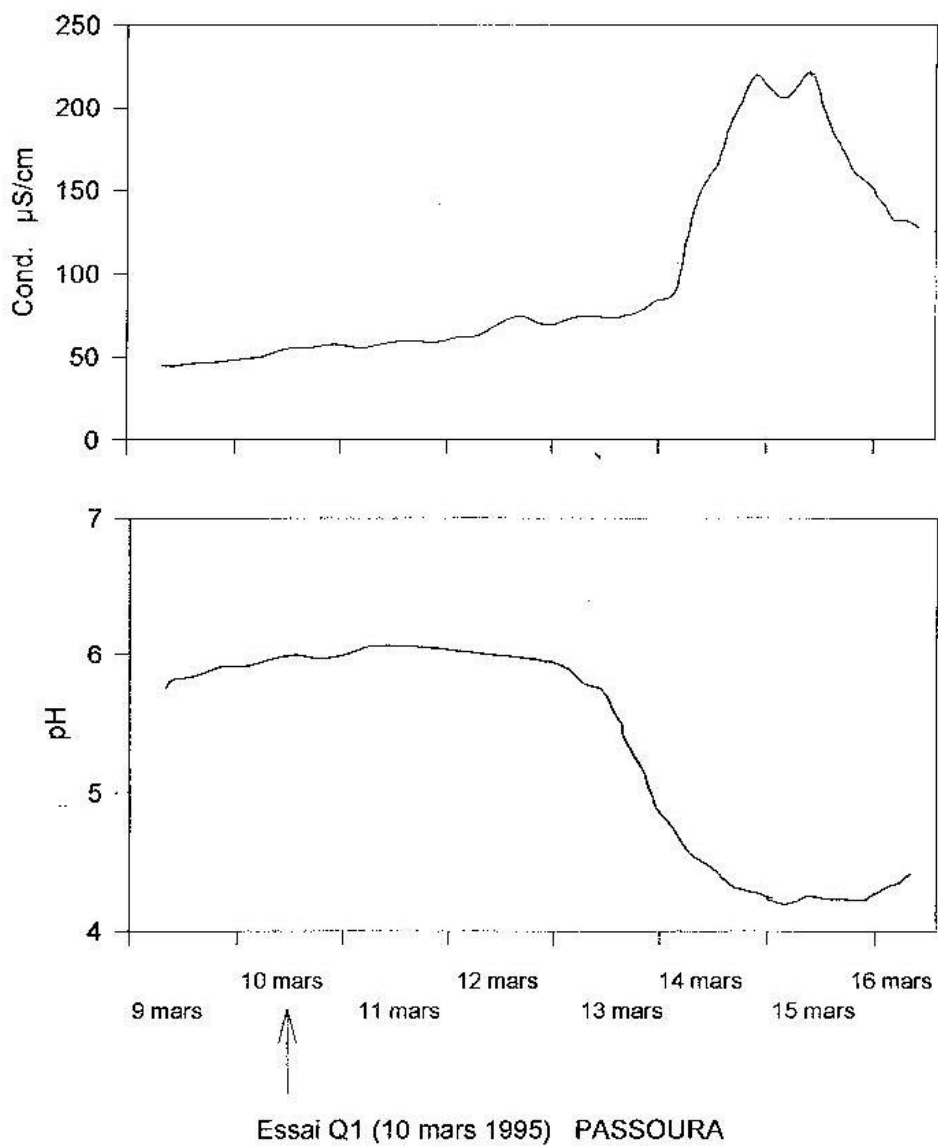


Figure 26 : Essai Q1, Passoura - pH et Conductivité

Malgré la neutralisation d'une partie de l'acidité apportée par les retombées du nuage sur le bassin versant, la diminution du pH dans la Passoura après les essais M5 et Q1 reste significative. L'aluminium étant plus soluble à pH acide, l'augmentation de sa concentration augmente, parallèlement à la baisse du pH. Il appartient alors aux hydrobiologistes de déterminer quels effets pathologiques sont produits par cette évolution chimique sur les différentes espèces de poissons et autres organismes vivants.

Ces prélèvements réalisés vers l'aval des bassins versants de la Passoura et de la Karouabo, représentent un mélange d'eaux issues de zones diversement touchées par les retombées du nuage et diluées par les pluies qui permettent leur ruissellement jusqu'aux axes de drainage. Il est donc vraisemblable que plus localement, à l'amont, sur le bassin versant de la Passoura après les essais M5 et Q1, l'acidité et la teneur en aluminium des eaux aient été plus fortes encore.

Références bibliographiques

- ABRAHAMSEN G., 1984 : Effects of acidic deposition on forest soil and vegetation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 305, p369-382.
- ANDRIEUX P.(1992)- Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques physiques des sols sur la dynamique hydrique d'une barre pré-littorale (plaine côtière ancienne de la Guyane française). Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le quaternaire. Coll. "Colloques et Séminaires", ORSTOM Paris. Symposium. PICG 274/ORSTOM. p. 7-16.
- BARRUOL J., 1959.- carte géologique au 1/100.000e, feuille de Kourou et notice explicative. Ministère de l'industrie et du commerce, Paris, 17p.+ carte.
- BARTHES B., (1991) - Cartographie des sols sous le vent du banc d'essais. Etude d'impact du banc d'essais des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Inventaire préliminaire de l'environnement du site. Convention n° 89/CNES/2621. Centre ORSTOM de Cayenne. Septembre 1991.
- BARTHES B., 1984.- Prospection IRCA: cartographie des sols sur la concession du GERDAT (CIRAD) à Sinnamary (Guyane). ORSTOM, Cayenne, 42p.+ carte et coupes.
- BARTHES B., 1989.- Etude agropédologique sur une parcelle en manioc à Mana, Guyane (projet UTAP). ORSTOM, Cayenne, 21p.+ carte et coupes.
- BARTHES B., 1990.- Cartographie des sols, propriétés agronomiques et possibilités d'extension de Rocoucoua Sud (Iracoubo). ORSTOM, Cayenne, 21p.+ carte et coupes.
- BARTHES, B. (1992) - Cartographie des sols sous le vent du banc d'essai. Rapport ORSTOM Cayenne 20 p. . Convention n° 89/CNES/2621.
- BOULET R., 1986.- Carte pédologique du périmètre de Rocoucoua, commune d'Iracoubo. ORSTOM, Cayenne, 3p.+ carte.
- BOULET R., 1990.- Organisation des couvertures pédologiques des bassins-versants ECEREX. Hypothèses sur leur dynamique. In Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais, opération ECEREX. J.M. SARRAILH (dir.). Coll. Ecologie et Aménagement Rural, INRA, Paris - CTFT, Nogent, pp 15-45.
- BOULET R., BRUGIERE J.M. & F.X. HUMBEL, 1979.- Relation entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane Française septentrionale. *Sc. du sol*, 1: 3-18.
- BOULET R.; CHAUVEL A.; HUMBEL F.X. & LUCAS Y.,(1982) - Analyse structurale et cartographie en pédologie. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, vol XIX, 4 : 309-339. Paris.
- Boulet, R., (1986), Etat des recherches sur les sols Guyanais : apport de la pédologie au développement 12p. ORSTOM Cayenne.
- BOUYASSE Ph., KUDRASS H.R. & LE LANN, (1977) - Reconnaissance sédimentaire du plateau continental de la Guyane française (mission Guyamer, 1976). *Bull. BRGM*, IV, 2. Paris.
- BRINKMAN R. & PONS L.J., (1968) - A pedo-geomorphological classification and map of the Holocene sediments in the coastal plain of the three Guianas. Soil Survey Institute, 4. Wageningen. The Netherlands
- CAUTRU J.P. (1992). L'altération du socle ancien de la région de Cayenne (Guyane française): source d'approvisionnement de la sédimentation quaternaire. Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le quaternaire. Coll. "Colloques et Séminaires", ORSTOM Paris. Symposium. PICG 274/ORSTOM. p. 49-59.
- CHARRON C, LOINTIER M., PROST M.T., Rudant J.P.(1992).Etude du littoral et des estuaires guyanais par télédétection. Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le quaternaire. Coll. "Colloques et Séminaires", ORSTOM Paris. Symposium. PICG 274/ORSTOM. p. 61-72.
- CHARRON C., LOINTIER M. PROST M.T., & RUDANT J., (1991) - Etude multitemporelle du littoral et des estuaires guyanais utilisant l'imagerie SPOT. V Colloque International ISPRS. Courchevel : p.14-18.
- COLIN C. & B. Bourlès (1992) - Western Boundary Currents in front of French Guiana. Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le quaternaire. Coll. "Colloques et Séminaires", ORSTOM Paris. Symposium. PICG 274/ORSTOM. p. 73-92.
- COLIN C., BORE J.M., CHUCHLA R. & CORRE D., (1981) - Résultats de courantométrie (mouillage de

41, 3-4, 247-262.

- Grimaldi, C. Sarrazin, M. (1993) - Composition chimique des eaux des rivières Karouabo et Passoura. Rapport
- GRIMALDI, C., M. SARRAZIN et V. LAPERCHE (1993) - Composition chimique des eaux de pluies et pluviollessivats. In GRIMALDI & SARRAZIN 1993, Etude d'impact du banc d'essai des propulseurs à propergol solide d'Ariane V (BEAP): ETUDE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX. ORSTOM Cayenne
- J.M. GUEHL, 1984.- Dynamique de l'eau en forêt tropicale humide guyanaise. Ann. Sci. For., 41 (2): 195-236.
- KROOK L., 1990 - Evidence of Amazon provenance of part of sandy sediments in the coastal and shelf areas of the Guianas. Evolution des littoraux de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le quaternaire. Coll. "Colloques et Séminaires", ORSTOM Paris. Symposium. PICG 274/ORSTOM. p. 307-326
- LEDRU P., LASSERE J.L., MANIER E. & MERCIER D., 1991 - Le Pérozoïque inférieur nord-guyanais: révision de la lithologie, tectonique transcurrente et dynamique des bassins sédimentaires. Bull. Soc. Géol. Fr.,
- LOINTIER M. & PROST M.T., 1988 - Coastal sedimentation and local rivers supply in French Guiana: comparisons with the Amazon. Abstracts of the Chapman Conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System: River and Ocean. Nittrouer & DeMaster Ed. Charleston. Wild Dunes. USA.
- LOINTIER M., 1992 : Hydrologie des bassins versants de Karouabo et Passoura: Inventaire préliminaire de l'environnement du site, Rapport Convention CNES/ORSTOM n°89.
- Lointier, M., (1990) Evolution de la qualité des eaux et dynamique de l'intrusion saline dans l'estuaire du Sinnamary. Contrat EDF-CNEH/Orstom. Cayenne. Mult. 81 p.

- Lointier, M., (1991) Analyse préliminaire de situation. Zone de la Karouabo et de la Passoura. Contrat Cnes.n°2621/Orstom. Lot 1 Rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 26 p.
- Lointier, M., (1992) Etude hydrologique des bassins versants de la Karouabo et de la Passoura. Contrat Cnes n° 2621/Orstom. Lot 2 Rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 103 p.
- Lointier, M., (1993 -c-) Variations saisonnières et flux de quelques éléments majeurs dans trois rivières de Guyane Française. Colloque Grands bassins fluviaux péri-atlantiques Cnrs-Insu-Orstom. Coll.
- Lointier, M., Rudant, J.P. Sabatier, D. & Prost, M.T., (1993 -b-) Contribution of ERS1 Sar data to hydrologic approach in tropical area : example in French Guiana. Second ERS1 Symposium. Hamburg. ESA Ed.
- Lointier, M., Rudant, J.P., Deroin, J.P. & Prost, M.T., (1993 -a-) Apport des données du Sar ERS1 à l'étude de l'environnement côtier tropical Guyanais. Colloque Cnes, "de l'optique au radar" Cnes Ed., Paris, France.
- MERIAN E., 1991 : Metals and their Compounds in the Environment. Ed. E. MERIAN, D-Weinheim. 1438 p.
- MIGNIOT C., 1989 - Tassement et rhéologie des vases. Première partie :La Houille Blanche, 293. 1 (1989): 11:30. Paris. Deuxième Partie: La Houille Blanche, 294. 2(1989). 95-112. Paris
- NITTROUER C. & DeMASTER, D.J. (1987) - Sedimentary Processes on the Amazon Continental Shelf. Depart. of Marine, Earth and Atmospheric Sciences. North Carolina State University. Pergamon Press. 379 pp. New York. USA.
- PREVOST M.F. & D. SABATIER (1988) - Complément à l'étude d'impact du banc d'essai des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Etude relative à l'impact des rejets gazeux sur l'environnement. ORSTOM Cayenne, 30 p.
- PREVOST M.F. & D. SABATIER, 1988.- Complément à l'étude d'impact du banc d'essais des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Etude relative à l'impact des rejets gazeux sur l'environnement. ORSTOM Cayenne, 30p.
- PREVOST M.F. & SABATIER D., 1988 - Complément à l'étude d'impact du banc d'essais des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Etude relative à l'impact des rejets gazeux sur l'environnement. Laboratoire d'écologie végétale. Décembre 1988. Centre ORSTOM. Cayenne. Convention CNES 88.26605. 19 pp. 5 fig., 7 tabl.
- PROST M.T., 1989 - Changes in coastal sedimentary environments and Remote Sensing data in French Guiana. Abstracts of the International Symposium on Global Changes in South America during the Quaternary. São Paulo. Brazil. May 1990.
- PROST M.T., 1990 - Les côtes des Guyanes. Rapport final de convention Conseil Régional de la Guyane et Centre ORSTOM. Programme "Environnement Côtier". Série Géomorphologie-Sédimentologie. Mai 1990. 213 pp., 51 fig. 44 photos, 20 documents de télédétection, 15 tabl.
- PROST M.T., 1991 - Symposium PICG 274/ORSTOM : synthèse finale. Rapport. Centre ORSTOM. Programme PICG 274. 32 pp.
- PROST M.T., 1992 : Sédimentologie des formations superficielles des criques Karouabo, Passoura et Malmanoury : Inventaire préliminaire de l'environnement du site, Rapport Convention CNES/ORSTOM n°89.
- PUIG, H. & J.P. DELOBELLE (1988) - Production de litière, nécromasse, apports minéraux au sol par la litière en forêt guyanaise. Rev. Ecol. (Terre Vie) 43 (1), 3-22.
- PUIG, H. (1979) - Production de litière en forêt guyanaise. Résultats préliminaires. Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse, 115 (3-4), 338-346.
- PUJOS M. & ODIN G.S., 1986 - La sédimentation au Quaternaire Terminal sur la plate-forme continentale de la Guyane française. Oceanologica Acta, vol 9., p.363-382. France.
- PUJOS M., BOUYSSSE Ph. & PONS J.C., 1988 - Sources and distribution of heavy minerals in Late Quaternary environments of the French Guiana continental shelf. Abstracts of the Chapman Conference on the fate of particulate and dissolved components within the Amazon Dispersal System: River and Ocean. AGU. Charleston. Wild Dunes. 1988. USA.
- ROHAN R., 1990 - Etude préliminaire des bassins versants de Karouabo et Passoura. Rapport de stage de 3ème année. 56 pp. Annexes. ISIM (Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier). ORSTOM. Centre de Cayenne. Juin 1990.
- ROHAN R., 1990 : Etude préliminaire des bassins versants de Karouabo et Passoura. Rapport de stage Hydrologie, ORSTOM Cayenne.

- Rohan, R., (1990) Etude préliminaire des bassins versants de la Karouabo et de la Passoura. Rapport de stage de 3e année. Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier (ISIM).
- SABATIER D. & PREVOST M.F., 1992 - Etude du peuplement forestier sous le vent du banc d'essai. Etude d'impact des étages d'accélération à poudre d'Ariane V. Conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Inventaire préliminaire de l'environnement du site. Juillet 1992; Convention n° 89/CNES/2621. Centre ORSTOM. Cayenne.
- SABATIER D. & PREVOST M.F., 1992 : Etude du peuplement forestier sous le vent du banc d'essai : Inventaire préliminaire de l'environnement du site, Rapport Convention CNES/ORSTOM n°89.
- SABATIER, D. & M.F. PREVOST (1992) - Etude du peuplement forestier sous le vent du banc d'essai. Rapport ORSTOM, Cayenne, 13 p. + 11 fig. et 4 tabl. Convention n° 89/CNES/2621.
- Sabatier, D., Prévost, M.F., (1993) Etude de la défeuillaison en forêt de Passoura-Karouabo sous le vent du banc d'essai. Contrat Cnes n° 2621/Orstom. Lot 3 Rapport sur les conséquences des rejets gazeux sur l'environnement. Cayenne. Mult. 23 p.
- SCHAIK, C. van & E. MIRMANTO (1985) - Spatial variation in the structure and litterfall of a Sumatran rain forest. *Biotropica*, 17 (3), 196-205.
- SCHOLZ F. & RECK S., 1977 : Effects of acids on forest trees as measured by titration in vitro, inheritance of buffering capacity in *Picea Abies*. *Water Air and Soil Pollution*, n°8, p 41-45.
- TURENNE J.F., 1978 - Sédimentologie des plaines côtières (Guyane française). In Atlas de la Guyane, CNRS. ORSTOM, pl.6.
- VEILLON L., 1990.- Sol ferrallitiques et podzols en Guyane septentrionale. Relations entre systèmes de transformations pédologiques et évolution historique d'un milieu tropical humide et forestier. Thèse Doctorat Paris 6, 194p.

Table des illustrations

Figure 1: Cartographie des bassins versants et du périmètre de mesure.....	8
Figure 2 : dispositif de mesure	14
Figure 3 coupe schématique de versant sur S.D.B., près du chemin de ronde.	15
Figure 4 : Schéma d'évolution des couvertures pédologiques sur schistes (d'après Boulet, 1990)	18
Figure 5 : Carte des sols et légende	23
Figure 6 : Formations de la plaine côtière guyanaise (d'après Boulet, 1986)	31
Figure 7 : Traitement de la donnée Landsat du 18 juillet 1988 sur la zone de la Karouabo.	32
Figure 8 : cartographie des bancs de vase (Malmanoury, Karouabo)	35
Figure 9 : Dispositif de mesure.....	38
Figure 10 : Comparaison des chutes de litières cumulée après le 1 ^{er} essai.....	43
Figure 11 : Comparaison des chutes de litières cumulée après le 2 ^{er} essai.....	44
Figure 12 : Comparaison des variations d'intensité de chutes de feuilles du Goupi, après 2 ^e essai.....	46
Figure 13 : donnée landsat TM du 18 juillet 1988 sur la Passoura	56
Figure 14 : Hydrogrammes pour les deux bassins aux stations de jaugeages (ponts)	58
Figure 15 : Karouabo pont - Saison humide avant essai - avril 92.....	61
Figure 16 : Passoura pont -Saison humide avant essai - avril 92	62
Figure 17 : Karouabo pont - pendant le premier essai - fév-mars 93	64
Figure 18 : Passoura pont -pendant le 1 ^{er} essai -fév -mars 93.....	65
Figure 19 : Karouabo pont second essai et brûlage - juin juillet 93	66
Figure 20 : analyse des débits et du pH -1 ^{er} essai -fév 93.....	67
Figure 21 : dispositif de mesure des pluviollessivats.....	69
Figure 22 : Concentrations chimiques en mmol/l dans les pluies et pluviollessivats du 17 fév 93 (classement en fonction des teneurs en chlorure croissante)	73
Figure 23 : Concentrations dans les pluies et pluviollessivats 28 juin 93.	75
Figure 24 : A) Diagramme de solubilité de l'aluminium en f(pH)	76
Figure 25 : concentrations dans les pluies et pluviollessivats (mmol/l) du 9 juillet 93..	78
Figure 26 : Valeurs de pH pour les pluies (à gauche) et les pluviollessivats (à droite)	93
Figure 27 : Chlorure.....	94
Figure 28 : Aluminium.....	94
Figure 29 : Essai M5, Passoura	96
Figure 30 : Essai Q1, Passoura.....	97
Figure 31 : Essai Q1, Passoura - pH et Conductivité.....	98