

**ETUDE DE LA FILIERE MATERIAUX
ET MINERAUX INDUSTRIELS
A LA REUNION**

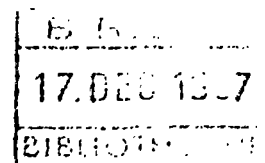
**Analyse des ressources potentiellement
renouvelables dans le lit des principales ravines**

Mars 1997
97 REU 14
R 39391



BRGM

L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE



Mots clés : Ile de la Réunion, ravines, torrents, extractions, matériaux, transport solide, géomorphologie, photo-interprétation, évolution récente, aménagement , cyclones

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

© BRGM 1996

SYNTHESE

Le travail réalisé s'inscrit dans le cadre de "l'Etude de la filière matériaux et minéraux industriels à la Réunion", au titre de l'année 1996. Elle concerne plus particulièrement l'analyse des ressources potentiellement renouvelables dans les lits des ravines.

Des extractions sont opérées dans le lit mineur de certaines ravines de la Réunion (Rivière du Mât, Rivière St Etienne) ; certaines sont arrêtées depuis peu (Rivière des Galets). L'une des questions posées à propos de ces extractions est de savoir si le niveau actuel des extractions dans les ravines est compatible avec la "production annuelle" de sédiments évacués par les rivières.

L'évaluation des transports solides (moyennes inter annuelles par exemple) dans la situation climatique et géomorphologique de la Réunion demeure hors de portée au stade des connaissances actuelles. En effet les conditions d'une véritable quantification des transports solides nécessitent au préalable :

- une meilleure connaissance du régime hydraulique des rivières concernées, d'autant plus importante qu'on se situe en régime torrentiel soumis à un climat de type cyclonique,
- et surtout un suivi effectif de l'évolution de la morphologie du lit des ravines, qu'elle soit naturelle ou liée aux extractions. Ceci afin d'en tirer des enseignements en matière de prélèvement de granulats dans les alluvions récentes. Il est évidemment nécessaire de connaître avec plus de précision les volumes extraits par la profession ainsi que les zones d'extraction.

En ce qui concerne le second point, une démarche a été proposée. Elle consiste à analyser les modifications éventuelles enregistrées par les rivières entre deux dates et à les confronter aux pressions exercées sur le stock sédimentaire en tenant compte des conditions hydrologiques ayant régné durant cette même période.

Dans le cadre de la présente étude la méthode utilisée a consisté à :

- 1 - recueillir l'ensemble des données disponibles dans les différentes administrations (DDE, DAF, DIREN, DRIRE) et organismes (Université, BRGM) ayant réalisé ou coordonné des études sur ces ravines ;
- 2 - effectuer des relevés de terrain dans les segments aval des rivières (secteurs alluviaux et cônes) pour une reconnaissance des formes et une analyse du comportement actuel des ravines ;
- 3 - analyser des séries de photographies aériennes (1961 à 1989) en stéréoscopie sur les secteurs aval de chacune des trois ravines concernées ;
- 4 - retracer les évolutions topométriques, notamment à partir des mesures réalisées sur les ouvrages d'art, et l'évolution "historique" des volumes extraits (ceux-ci n'ayant pas pu faire l'objet d'une reconstitution fiable par manque de données).

Les trois ravines étudiées ont un fonctionnement complexe et polyphasé. Malgré leur apparente ressemblance, elles présentent des comportements différents.

La **Rivière des Galets** est très nettement, dans le cône et son segment alluvionnaire, dans une phase érosive. Celle-ci se manifeste par une reprise de ses alluvions antérieures laissant sur place les plus gros blocs (>1 m) non remobilisables lors des dernières crues. On observe une modification au niveau des chenaux qui s'individualisent de plus en plus, s'encaissent et incisent les niveaux alluvionnaires plus anciens présents dans son lit. Cette individualisation a tendance à concentrer les écoulements. La décision d'arrêter les extractions dans le lit de la rivière des Galets semble justifiée non seulement par les travaux d'endiguement récents, mais aussi par les tendances actuelles à l'érosion constatées sur le terrain.

Le segment aval de la **Rivière St Etienne** est clairement affecté par une érosion linéaire. Celle-ci a été mise en évidence par l'ensemble des observations réalisées. Cette forte érosion peut atteindre localement 5 m bien au delà des extractions ainsi qu'entre les fosses aval et la zone d'extraction amont. Le comportement de la Rivière St Etienne apparaît donc comme fortement perturbé. Par ailleurs le lit s'est localement encaissé au droit du pont de la RN depuis 1990.

Le lit de la **Rivière du Mât** présente des zones où le lit est localement rehaussé suite à des dépôts de type laves torrentielles ("bouffées"), c'est à dire des dépôts effectués en une phase d'accumulation, lors d'une crue et limitées dans l'espace. Dans ces zones, les apports ont contraint la rivière à divaguer sur un lit rehaussé occasionnant des inondations. A la différence des deux autres rivières, on constate donc l'existence d'un stock de matériaux. Il faut toutefois signaler que les fosses d'extractions ont été localisées sur des positions fixes qui ne correspondent pas nécessairement aux zones de dépôt, le lit évoluant et se déplaçant latéralement. De ce fait, l'extraction des matériaux ne s'effectue pas toujours dans les zones où elle pourrait se justifier par un dragage préventif de lutte contre les inondations. Ainsi la situation de ces zones devrait, également, être évolutive.

Le comportement actuel des trois ravines étudiées n'est pas uniquement dû aux extractions : il est sous le contrôle initial des phénomènes naturels. Dans certains cas, rivières St Etienne et des Galets, les extractions n'ont fait qu'exacerber un comportement érosif endémique. Dans d'autres cas, Rivière du Mât, et sur certains secteurs, les processus naturels ont permis une accumulation importante de sédiments. Le bilan sédimentaire est donc, dans ces zones, excédentaire; l'impact des extractions n'est plus perceptible.

Les Rivières des Remparts et des Pluies n'ont pas fait l'objet d'études particulières dans le cadre de la mission. Toutefois un état des connaissances a pu être effectué grâce aux documents disponibles (DDE-BRGM). Il est annexé au présent rapport. Pour ces deux ravines, on peut formuler les observations ci-après :

- **Rivière des Remparts** : l'apport en matériaux est très important du fait de la dislocation progressive du "barrage de Mahavel" et des écroulements persistants du rempart. Mais ces matériaux s'évacuent difficilement vers l'aval du fait de la présence de verrous rocheux qui tendent à ralentir la vitesse du courant en période de crue et favorisent donc la sédimentation dans le cours moyen. La mise en place de coulées volcaniques tardives qui ont "figé" le lit majeur freine également de façon notable l'érosion régressive. Ainsi les volumes extraits par les exploitants sont limités par la faible épaisseur des matériaux dans le cours aval, et par les difficultés d'accès aux engins (pas de piste d'accès hors du lit de la rivière dans la zone d'extraction) vers les zones plus facilement exploitables du cours moyen. Les matériaux sont, par ailleurs, de nature très hétérogène du fait des apports de fines liés à la nature du rempart et à la composition lithologique du barrage de Mahavel.
- **Rivière des Pluies** : d'après les études récentes (DDE-SOGREAH-BCEOM 96) qui reprennent les analyses anciennes, il apparaît que globalement le volume cumulé des extractions (1963-95) est très nettement supérieur aux apports théoriques calculés à partir des modélisations de la rivière. Ceci tend à expliquer un surcreusement très net du lit de la rivière en particulier depuis 89 ; les années 92 et 93 étant marquées pour des volumes extraits importants. Les extractions actuelles ou futures devront donc tenir compte de ce facteur.

Afin de mettre en place une gestion raisonnée et éclairée des extractions, nécessaire à la conservation des équilibres naturels, il apparaît nécessaire de disposer d'éléments tangibles et indiscutables. Ces éléments sont :

- suivre les évolutions des lits des rivières (cartographie 3D) pour une appréciation quantitative de l'impact des événements cycloniques (dynamique naturelle d'évolution des lits, stockages et déstockages) et des extractions qui continueraient d'être autorisées (notamment les curages préventifs),

- localiser les sites d'extraction de granulat de façon exacte et complète,
- estimer de manière fiable les volumes extraits et leur localisation, au-delà des fosses d'extractions qui ont été prédéfinies à l'origine et dont le périmètre n'est pas toujours respecté.

Pour atteindre ces objectifs, des recommandations sont formulées :

- Il est nécessaire d'effectuer en premier lieu, un état "0" de chaque ravine, puis en second lieu un suivi de chaque ravine après chaque saison cyclonique afin de déterminer qualitativement (tracé) et quantitativement (volume) l'évolution du lit. Ce suivi pourrait être effectué par la réalisation de levés photogrammétriques (photogrammétrie classique ou orthophotographies numériques) à haute résolution sur les cônes et segments avals des ravines. Ces levés pourraient être associés à des reconnaissances de terrain (géomorphologie) afin de repérer et de caractériser le comportement des segments plus à l'amont. Elles permettraient de déterminer l'évolution des zones de stockage temporaire et les zones à comportement érosif.
- Il est nécessaire de définir une méthode de planification des curages. Ceci implique une surveillance régulière (après chaque saison cyclonique) des zones de stockage temporaires potentielles. Sachant qu'il existe un délai entre le dépôt dans un "réservoir" et l'arrivée de cette charge solide dans les zones aval (cônes), ces délais devront être estimés, l'évolution des stocks dans les réservoirs suivie. Cette approche passe par l'analyse des évolutions observées (point précédent) afin de s'inscrire dans une démarche prospective.

SOMMAIRE

Synthèse	3
Sommaire	6
Liste des figures.....	8
Liste des planches.....	9
Liste des tableaux	10
1. Introduction.....	11
1.1. Rappel des objectifs	11
1.2. Les transports solides : Généralités	11
1.2.1. Rivière à sable et rivière à gravier	12
1.2.2. Capacité de transport et capacité maximale de transport	13
1.2.3. Transport en suspension	13
1.2.4. Théorie du régime (ou théorie de l'équilibre).....	13
1.3. Les rivières étudiées	14
1.4. Méthodes d'approche.....	14
2. Les bassins versants	16
2.1. Le bassin versant de la rivière des Galets	16
2.1.1. Généralités	16
2.1.2. Le profil en long.....	16
2.1.3. Hypsométrie.....	16
2.1.4. Pluviométrie.....	17
2.1.5. Evaluation des débits.....	17
2.2. La Rivière du Mât et le Cirque de Salazie	20
2.2.1. Généralités	20
2.2.2. Profil en long	20
2.2.3. Hypsométrie.....	20
2.2.4. Pluviométrie.....	20
2.2.5. Evaluation des débits.....	22
2.3. La rivière St Etienne: Le Bras de la plaine	25
2.3.1. Généralités	25
2.3.2. Profil en long	25
2.3.3. Hypsométrie.....	25
2.3.4. Evaluation des débits.....	25
2.4. La rivière St Etienne: Le Bras de Cilaos.....	26
2.4.1. Généralités	26
2.4.2. Profil en long	26
2.4.3. Hypsométrie.....	26
2.4.4. Pluviométrie.....	26
2.4.5. Evaluation des débits.....	27
2.5. Rivière St Etienne	27
2.6. Synthèse du milieu physique	30
3. Chroniques des extractions.....	33

4.	Evolution géomorphologique des zones alluviales et impact des extractions	35
4.1.	Reconnaissance de terrain	35
4.1.1.	Rivière des Galets	35
4.1.2.	Rivière St Etienne.....	36
4.1.3.	Rivière du Mât	37
4.2.	Analyse des photographies aériennes	41
4.2.1.	Rivière des Galets	41
4.2.2.	Rivière St Etienne.....	41
4.2.3.	Rivière du Mât	42
4.3.	Enregistrement des variations du lit sur les ouvrages d'art.....	43
4.3.1.	Evolution du lit au niveau du pont de la Rivière des Galets.....	43
4.3.2.	Evolution du lit au niveau du pont de la Rivière St Etienne.....	43
4.4.	Evolution des ravines: recherche des causes possibles	47
4.4.1.	Rivière des Galets (planche 4.4).....	47
4.4.2.	Rivière St Etienne (planches 4.5 et 4.6).....	47
4.4.3.	Rivière du Mât (planche 4.7 et 4.8).....	48
5.	Conclusions.....	55
5.1.	Recommandations sur les extractions.....	55
5.2.	Recommandations pour un suivi	56
5.3.	Proposition d'une méthodologie de suivi.....	57
5.3.1.	L'orthophotographie numérique	57
5.3.1.1.	Avantages.....	57
5.3.1.2.	Coûts.....	58
5.3.1.3.	Spécifications techniques générales.....	58
6.	Bibliographie	59
	ANNEXE 1 - Analyse préliminaire des conditions de transports solides et exploitation des matériaux dans la Rivière des Remparts	60
	ANNEXE 2 - Analyse préliminaire des conditions de transports solides et exploitation des matériaux dans la Rivière des Pluies.....	70

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : La rivière des Galets et son bassin versant

Figure 2.2 : Pluies efficaces de 1971-1994 dans le cirque de Mafate (Aurère)

Figure 2.3 : La rivière du Mât et son bassin versant

Figure 2.4 : Pluies efficaces de 1971-1994 dans le cirque de Salazie (Hell Bourg)

Figure 2.5 : Pluies efficaces de 1971-1994 dans le cirque de Salazie (Grand Ilet)

Figure 2.6 : La rivière St Etienne et son bassin versant

Figure 2.7 : Pluies efficaces de 1971-1994 dans le cirque de Cilaos (Cilaos)

Figure 2.8 : Pluviométrie moyenne interannuelle (1971-1994)

Figure 3.1 : Volume des extractions déclarées sur la rivière du Mât

Figure 3.2 : Volume des extractions déclarées sur la rivière St Etienne

Figure 4.1 : Evolution du lit de la rivière des Galets au niveau du pont de la RN

Figure 4.2 : Evolution du lit de la rivière St Etienne au niveau du pont de la RN

LISTE DES PLANCHES

Planche 4.1 : Morphologie du lit de la rivière des Galets

Planche 4.2 : Morphologie du lit de la rivière St Etienne

Planche 4.3 : Morphologie du lit de la rivière du Mât

Planche 4.4 : Evolution de la rivière des Galets (1961-1989)

Planche 4.5 : Evolution de la rivière St Etienne (1961-1989)

Planche 4.6 : Evolution de la rivière St Etienne au Cap Assiette (1961-1989)

Planche 4.7 : Evolution de la rivière du Mât (1961-1989)

Planche 4.8 : Evolution de la rivière du Mât de 1978 à 1989 en aval du pont de la RN

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Evaluation des débits de crue de la rivière du Mât

Tableau 2.2 : Evaluation des débits de crues de la Rivière St Etienne

Tableau 3.1 : Volume des extractions déclarées, évalué et estimé de 1993 à 1995

1. INTRODUCTION

1.1. RAPPEL DES OBJECTIFS

Le travail réalisé s'inscrit dans le cadre de l'étude des "Ressources en matériaux et minéraux industriels de la Réunion" et plus particulièrement dans l'analyse des ressources potentielles renouvelables dans les lits des ravines.

Des extractions sont opérées dans le lit mineur de certaines ravines de la Réunion (Rivière du Mat , Rivière St Etienne, Rivière des Pluies et Remparts), certaines sont arrêtées depuis peu (Rivière des Galets).

L'une des questions posées à propos de ces extractions est de savoir si le niveau actuel des extractions dans les ravines est compatible avec la production annuelle de sédiments évacués par les rivières.

Compte tenu de la difficulté à évaluer les transports solides dans ces ravines en raison de leur très grande variabilité, une démarche a été proposée. Elle consiste à analyser les modifications éventuelles enregistrées par les rivières entre deux dates et à les confronter aux pressions exercées sur le stock sédimentaire en tenant compte des conditions hydrologiques ayant régné durant cette même période. Cette démarche permet, sans avoir estimé les transports solides, de déterminer les éventuels impacts pour chacune des exploitations et leur nature.

1.2. LES TRANSPORTS SOLIDES : GENERALITES

Le transport solide est le phénomène qui permet le déplacement d'une masse solide composée d'éléments granulaires (sédiments fins, sables, galets, ...) sous l'action de l'écoulement de l'eau. Ce transport a lieu sur les versants (érosion des sols) et dans le réseau hydrographique (thalwegs, rivières et fleuves). Il s'effectue selon trois modes différents, fonction de la taille des particules :

- suspension (transport sur de longues distances dans la masse de l'écoulement)
- saltation (mode intermédiaire, sauts sur de courtes distances)
- charriage (déplacement des particules au contact du fond)

Dans la pratique, on ne retient généralement que les transports par **suspension** et par **charriage**. Il est en effet difficile de déterminer une limite objective, dans le cas d'écoulements réels et en présence d'un contexte granulométrique naturel (souvent hétérogène), à la distance du saut d'une particule en delà de laquelle le charriage de fond ferait place à la saltation.

Le cas des sédiments cohésifs (particules colloïdales, minérales ⁽¹⁾, organiques ou chimiques) ne trouve pas d'application dans les rivières étudiées et ne sera donc pas abordé.

¹ argiles

1.2.1. Rivière à sable et rivière à gravier

Il est d'usage, surtout sur un plan pratique (condition d'application de modèles théoriques ou numériques), de classer les rivières en deux catégories, selon les caractéristiques des sédiments qui constituent le substrat (matériau mobilisable) du lit de la rivière.

- 1- Rivière à sable : le substrat est constitué de particules (sédiments) de petite dimension, diamètre inférieur à 2 mm (limite de la classe granulométrique des sables), et la granulométrie ⁽²⁾ est généralement peu étendue ⁽³⁾.
- 2- Rivière à gravier : le substrat contient un grand nombre d'éléments grossiers (petits graviers à gros galets). La granulométrie est toujours étendue.

Dans la pratique, cette distinction doit être réalisée avec prudence. Une même rivière peut présenter les caractéristiques de l'une et de l'autre des rivières-type. Deux formes d'organisation sédimentaire réservées à l'un ou l'autre type de rivière apparaissent :

- les ondulations de fond (rides, dunes ou antidunes) qui couvrent le fond des rivières à sable. Les ondulations sont régulières en amplitude et longueur d'onde et dépendent de l'intensité du transport solide.
- le pavage, apparaissant par décapage du fond du lit en éléments fins (seuls restent en place les sédiments grossiers), par brassage granulométrique intense du substrat et des apports (les gros éléments se déposent les premiers sur le fond) ou par accumulation d'apports intempestifs (crues) en sédiments plus grossiers que ceux constituant le substrat "habituel" du lit. Le phénomène de pavage est généralement observé dans les rivières à gravier.

Les différences fondamentales entre les caractéristiques et comportement des rivières à sable et rivières à gravier sont résumées dans le tableau ci-dessous :

	Rivière à sable	Rivière à gravier
granulométrie des sédiments	< 2mm, sables	< 2mm , graviers, galets et blocs
étendue granulométrique	faible	élevée
pente du profil en long	plutôt faible	plutôt forte
tracé en plan plutôt rectiligne	non	oui
organisation sédimentaire du substrat du lit	ondulations (rides, dunes, antidunes)	pavage
en montée de crue, déstructuration rapide du substrat	oui : augmentation rapide du débit solide	non ⁽⁴⁾ : le pavage modère le débit solide (effet du tri granulométrique)
le transport solide affecte le profil en long :	déformations régulières (ondulations du fond)	influence des discontinuités et points durs
le transport solide affecte le tracé en plan :	modifications de méandres	si changement de pente

² Distribution (classes de fréquence) de la taille des sédiments qui composent le matériau du substrat

³ On appelle étendue granulométrique, un paramètre caractéristique de l'écart entre la taille des sédiments et un diamètre médian (appelé D50, 50% du poids d'un échantillon de matériau a un diamètre inférieur à D50). On considère généralement le rapport D90/D50 pour renseigner de l'étendue granulométrique.

⁴ Pour de très fortes valeurs de la *contrainte de cisaillement au fond*, l'effet pavage disparaît et le substrat peut ainsi être totalement déstructuré.

1.2.2. Capacité de transport et capacité maximale de transport

Les notions de capacité de transport ont leur origine dans une représentation théorique et simplificatrice des phénomènes observés. Elles font référence à deux situation-type. L'écoulement liquide s'effectue en **régime uniforme** ⁽⁵⁾ et la granulométrie du matériau constituant le lit est uniforme (une seule taille de grains). Le débit solide est exclusivement constitué des mêmes matériaux qui constituent le lit (substrat).

- 1- On appelle **capacité de transport**, en une section donnée (hypothèse d'une largeur grande afin de négliger les effets de bord) et pour un débit liquide donné, le débit solide qui transite à travers cette section donnée qui garantisse l'équilibre sédimentaire du fond (bilan arrachement/dépôt nul en toute surface élémentaire du lit). On dit que le **débit solide transite à saturation**. Il est d'usage d'exprimer la capacité de transport en terme d'un débit solide par unité de largeur du cours d'eau (largeur active pour le transport).
- 2- On appelle **capacité maximale de transport** ou encore **débit solide à l'équilibre**, le débit solide qui transite de l'amont vers l'aval, après adaptation du lit (forme de la section, largeur et profondeur, pente du fond) à des conditions de débit liquide imposées (écoulement à plein bord du lit en régime uniforme).

1.2.3. Transport en suspension

A l'inverse de ce qui a été présenté sur le débit de matériaux du lit (ci-dessus), il n'existe pas de valeur limite au transport solide en suspension qui serait imposée par la mise en adéquation des caractéristiques morphologiques d'un lit de rivière avec les conditions hydrauliques données, dès lors que les dimensions des particules transportées en suspension sont plus faibles que celles entrant dans la composition du substrat du lit. Ce que l'on observe par contre c'est le passage d'un transport de type suspension en transport de type charriage, voire dépôt au fond du lit, pour un débit liquide dont la vitesse d'écoulement ne permettrait plus le maintien en suspension (cas des débordements lit mineur vers lit majeur, par exemple).

1.2.4. Théorie du régime (ou théorie de l'équilibre)

Cette théorie s'énoncerait de la façon suivante :

- En tout point d'une rivière, l'alimentation en débit solide est définie par les caractéristiques géologiques et morphologiques de son bassin versant
- Les caractéristiques géométriques de la rivière (pente, largeur, courbures, ...) sont le résultat d'un modelage, à travers les siècles, et donnent à la rivière une capacité de transport correspondant à l'alimentation en matériaux solides qu'elle reçoit de son bassin versant

⁵ **Écoulement permanent** (toutes les variables, en un point donné quelconque du cours d'eau sont indépendantes du temps : $d/dt = 0$) dans un chenal à géométrie constante et dont la granulométrie du substrat reste homogène tout au long du cours d'eau.

1.3. LES RIVIERES ETUDIEES

Le fonctionnement dans les secteurs à l'aval des rivières de l'île de la Réunion et au niveau des cônes ne peut être appréhendé qu'à travers une compréhension de l'ensemble du fonctionnement de la rivière et du comportement du bassin versant.

L'évolution du bassin versant contrôle *pro parte* l'évolution du secteur aval et plus particulièrement, dans le cas qui nous préoccupe, du cône de la rivière. C'est en ce sens que l'évolution de l'aval des trois rivières (rivières des Galets, St Etienne et rivière du Mât) ne peut être dissociée de celle de chacun des bassins versants.

Les processus d'évolution de l'ensemble du bassin versant, et des ravines associées, sont discontinus aussi bien sous l'aspect de la mise à disposition de matériaux dans la partie amont de la rivière que pour le transport de ces matériaux vers l'aval.

Les bassins versants et leurs rivières sont sous contrôle météorologique, géologique et anthropique (aménagement). On entend ici le contrôle géologique au sens large c'est à dire incluant les caractéristiques des roches en place mais aussi l'aspect géodynamique et chronologique (glissement de terrain, éboulements, etc.).

L'évolution actuelle du bassin versant et de la rivière s'inscrit dans un *continuum* par rapport à son évolution passée. Il nous paraît, de ce fait, nécessaire de replacer le comportement actuel des Rivières du Mât, St Etienne et des Galets par rapport à celle-ci.

Le comportement et la dynamique d'une rivière résulte de l'adaptation de son cours à l'ensemble des conditions qui affectent son bassin versant. L'état du lit d'une rivière, sa géométrie et sa dynamique reflète l'équilibre entre les conditions topographique, géologique, les précipitations et l'occupation du sol. Ces paramètres vont contrôler les débits liquides et solides des rivières en terme de quantité et de fréquence; ces derniers assurent une grande part de la morphogenèse des rivières.

Il en résulte que toute modification dans le fonctionnement hydrologique ou dans la charge solide disponible pour le transport entraîne un rééquilibrage de la rivière à cette nouvelle condition. Ce sont ces indices de rééquilibrage que nous nous proposons de rechercher.

1.4. METHODES D'APPROCHE

La méthode mise en oeuvre dans cette étude a consisté à travailler sur quatre niveaux :

- 1 - A recueillir l'ensemble des données disponibles dans les différentes administrations (DDE, DAF, DIREN) et organismes (Université, BRGM) ayant participé ou coordonné des études sur ces ravines;
- 2 - A effectuer des tournées de terrain dans les segments aval des rivières (secteurs alluviaux et cônes) afin d'effectuer une reconnaissance des formes et une analyse du comportement actuel des ravines. Les observations ont porté sur les points suivants: érosion des berges, indices d'affouillement, reprise des alluvions plus anciennes présentes dans le lit, indices d'érosion régressive, évolutions latérales des cours et des chenaux etc. Ces tournées de terrain ont aussi permis de fixer les limites des systèmes à étudier et l'étendue des zones d'influences (actuelles et potentielles) à l'amont des extractions. Ces limites sont fixées par les berges, les "verrous" armés de roche massive ou les zones de seuils (naturels ou non), les terrasses "anciennes" etc.;

- 3 - A analyser des séries de photographies aériennes diachrones (1961 à 1989) en stéréoscopie sur les secteurs aval de chacune des trois ravines concernées. Cette analyse a visé à mettre en évidence les évolutions morphologiques du lit dans le temps : évolution des berges, évolution des barres graveleuses et des basses terrasses, évolution de la chenalisation, évolution des aménagements dans les secteurs concernés (pont, route, culture etc.) pouvant induire des modifications du comportement des rivières. L'objectif de cette approche est de retracer les évolutions temporelles ayant aboutit à la morphologie actuelle;
- 4 - A retracer les évolutions topométriques, notamment à partir des mesures réalisées sur les ouvrages d'art, et l'évolution "historique" des volumes extraits (ceux-ci n'ayant pas pu être l'objet d'une reconstitution fiable par manque de données).

L'ensemble de ces investigations a été réalisé dans l'objectif d'analyser et de comprendre l'évolution des ravines, tout en les replaçant dans leur contexte géodynamique et anthropique.

Dans la suite de ce rapport, nous présentons successivement pour les trois ravines principales (Rivières des Galets, Rivière St Etienne et Rivière du Mât) le fonctionnement global de la rivière incluant son bassin versant, l'évolution géomorphologique des zones alluviales à l'aide des observations de terrain, de l'analyse des photographies aériennes et des évolutions topométriques. Dans le dernier chapitre, les résultats synthétiques et des recommandations seront présentés.

Enfin, les observations relatives aux Rivières des Remparts et des Pluies, qui n'ont pas fait l'objet d'études de terrain dans le cadre de cette mission, résultent de la compilation des documents disponibles (DDE-BRGM). Elles sont annexées au présent rapport.

2. LES BASSINS VERSANTS

2.1. LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE DES GALETS

2.1.1. Généralités

La rivière des Galets prend naissance dans le cirque de Mafate (figure 2.1), dans le massif du Grand Morne vers 1900 m d'altitude, sa longueur est de l'ordre de 33 km. La superficie du bassin versant de la rivière des Galets, en amont du Canal Le Marchand (à 150 m d'altitude) est de 105 km².

Ses principaux affluents sont en rive droite, la Ravine Cimendail, le Bras d'Oussy et le Bras St Suzanne. En rive gauche ce sont les Ravines de Roche Plate et des Orangers.

Le lit est principalement constitué d'alluvions torrentielles, on notera (en 1961) la présence de gros blocs anguleux dans le cours supérieur.

2.1.2. Le profil en long

Le profil en long de la rivière des Galets est constitué par quatre principaux secteurs :

- du Gros Morne (2992m) au confluent de la Ravine de Marla (1280m) la pente moyenne est de 40%,
- du confluent de la ravine à Marla jusqu'à la ravine de Roche Plate (420m) la pente moyenne est de 8%,
- de Roche Plate aux deux Bras (230 m) la pente moyenne est de 2,8%,
- tandis que des Deux Bras jusqu'à la mer la pente est évaluée à 1,8%.

On notera la présence de cascades et de gorges très profondes entre l'Ilet des Roches et la Ravine Cimendail.

2.1.3. Hypsométrie

La répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant sont les suivantes :

- 4,5% des altitudes sont supérieures 2000m,
- 28% des altitudes sont comprises entre 1500 et 2000 m,
- 28% entre 1500 et 1000 m,
- 30,5% entre 1000 et 500m,
- 9% inférieures à 500m.

2.1.4. Pluviométrie

Le bassin versant de la rivière des Galets se situe sur la côte "sous le vent" de l'île, la moyenne des précipitations inter annuelles est de l'ordre de 1500 mm/an à 2500 mm/an.

Les pluies efficaces mensuelles de 1971 à 1994 mesurées à la station d'Aurère sont présentées dans la figure 2.2. On notera que le maximum mensuel a été évalué lors du cyclone Hyacinthe avec près de 3000 mm durant le mois de Janvier, ces précipitations représentent quasiment la valeur annuelle de cette même année mettant en évidence le caractère concentré des événements. Les années 1985-86-87 ont vu des pluies efficaces assez fortes au dessus de 1000 mm durant le mois Février, ces pluies se sont accompagnées durant ces mêmes années de précipitations complémentaires durant les mois de Janvier et parfois Mars. Enfin, l'année 1993 a été l'objet de précipitations relativement modérées mais réparties sur les mois de Janvier, Février et Mars.

2.1.5. Evaluation des débits

Des crues historiques ont fait l'objet d'évaluation avec la formule de Manning-Stricker. Ainsi, la crue du 18/03/1952 au pont de la RN1 a permis d'évaluer le débit de pointe à 950 m³/s, celle du 24/02/1959 un débit de pointe à 300 m³/s, celle du 5/03/1959 un débit de pointe de 480 m³/s.

Les crues exceptionnelles ont été évalué (Touchebeuf de Lussigny) à 1850 m³/s soit un débit spécifique de 17,5 m³/s/km².

L'étiage moyen a été évalué à 1,25 m³/s (1951-1960).

Figure 2.1: La Rivière des Galets et son bassin versant

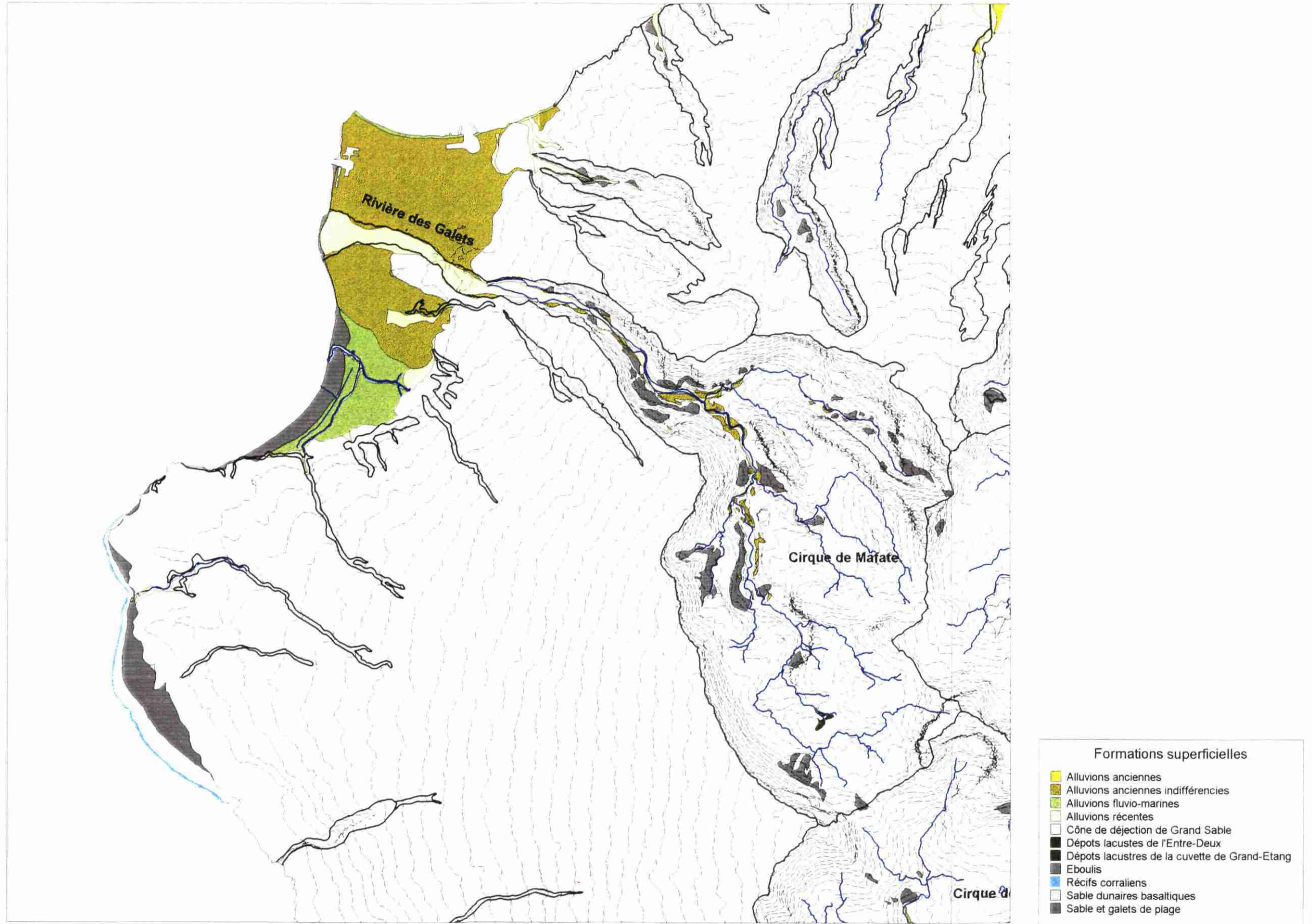
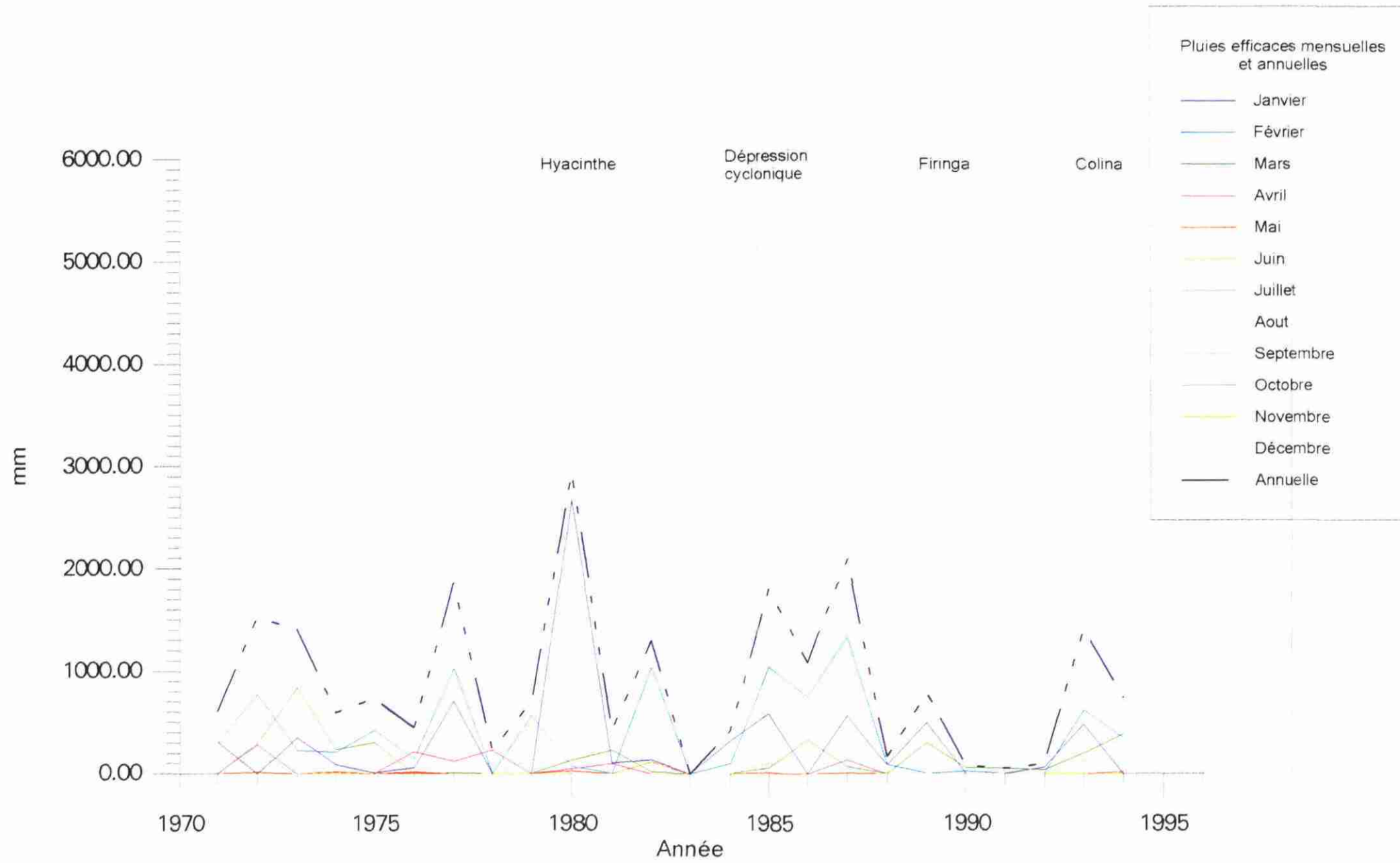


Figure 2.2: Pluies efficaces de 1971-1994 dans le cirque de Mafate (station d'Aurère)



2.2. LA RIVIERE DU MAT ET LE CIRQUE DE SALAZIE

2.2.1. Généralités

La rivière du Mât s'étend sur 35 km environ. Ses principaux affluents sont la rivière des Fleurs Jaunes en rive gauche et le bras de Caveme en rive droite (figure 2.3). Dans la plus grande partie de son cours, le lit de la rivière du Mât est recouvert par des alluvions torrentielles. Un peu en amont du Bras des Demoiselles, le lit s'enfonce progressivement dans une couche de basalte ancien et forme un étroit couloir sur plusieurs kilomètres. L'encaissement atteint 40 m sous le pont de Salazie. Le bassin versant de la rivière du Mât est de 145 km² au niveau du pont de la route nationale.

2.2.2. Profil en long

Trois secteurs se distinguent:

- Le cours supérieur au-dessus de 1000 m jusqu'au kilomètre 30,5 possède une pente moyenne de 30%,
- Du km 30,5 jusqu'au confluent du Bras des Demoiselles (22,4 km à 440 m d'altitude) la pente moyenne de la rivière est de l'ordre de 7%,
- Du Bras des Demoiselles jusqu'à la mer la pente est de 2% en moyenne.

2.2.3. Hypsométrie

La répartition des surfaces en fonction des altitudes du bassin versant sont les suivantes:

- 9% des altitudes sont supérieures à 2000 m,
- 12% des altitudes sont comprises entre 2000 m et 1500 m,
- 29% entre 1500 et 1000 m,
- 38% entre 1000 m et 500 m,
- 12% inférieures à 500 m.

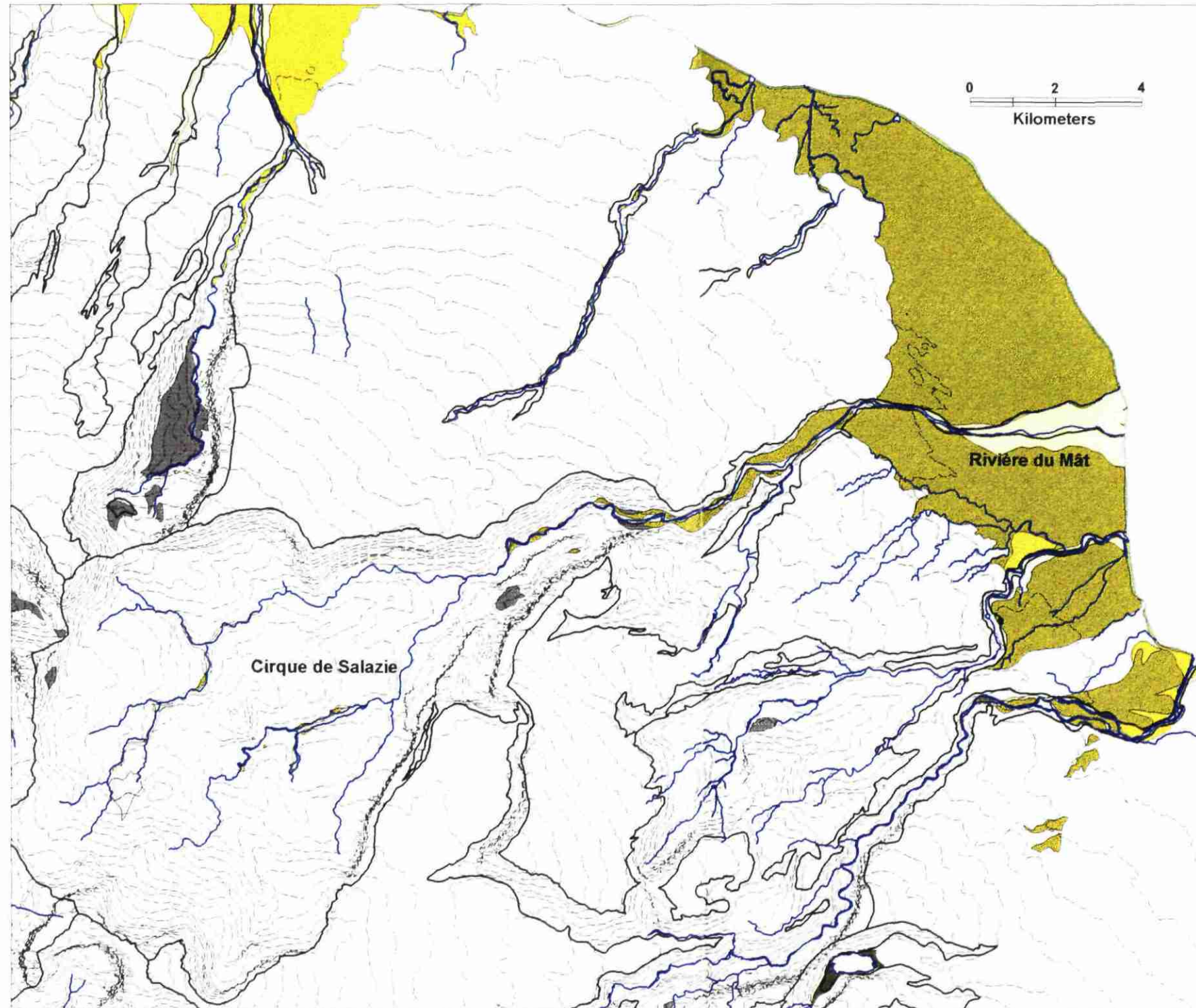
2.2.4. Pluviométrie

Les pluviomètres les plus anciens sont ceux de Manciol et Ravine Creuse mis en service en 1921, Rivière du Mât mis en 1950, Hell-Bourg et Salazie en 1951 puis Bélouve, Bras-Panon et le Colosse en 1956 et 1958.

Les pluies efficaces de 1971 à 1994 sont représentées dans la figure 2.4. On notera la même séquence d'événements que celle présentée pour le cirque de Mafate avec toutefois des valeurs largement supérieures. Ces événements répondent de plus à une répartition mensuelle identique à celle du Cirque de Mafate. Par exemple les pluies efficaces lors de Hyacinthe correspondent à la très grande majorité de la pluie efficace de l'année (pluviosité concentrée sur 10 jours) tandis que durant les années 1985-86-87 elles sont mieux réparties, enfin durant l'année 1993 les précipitations ont des valeurs comparables durant les mois de Janvier, Février et Mars.

La station de Grand Ilet (figure 2.5) confirme la forme et la séquence des précipitations sur ces 33 années. Par contre, elle illustre la variabilité des précipitations dans le bassin versant de la rivière du Mât en terme de valeur. Ainsi, les pluies efficaces durant Hyacinthe sont de l'ordre de 3700 mm à Hell Bourg alors qu'elles atteignent 4500 mm à Grand Ilet. Par contre, pour les événements cycloniques de plus faibles ampleurs comme ceux des années 1982, 1985, 1986, 1987, la variabilité semble moins marquée.

Figure 2.3 : La Rivière du Mât et son bassin versant



- Formations superficielles
- Alluvions anciennes
 - Alluvions anciennes indifférenciées
 - Alluvions fluvio-marines
 - Alluvions récentes
 - Cône de déjection de Grand Sable
 - Dépôts lacustres de l'Entre-Deux
 - Dépôts lacustres de la cuvette de Grand-Etang
 - Eboulis
 - Récifs coralliens
 - Sable dunaires basaltiques
 - Sable et galets de plage

2.2.5. Evaluation des débits

La rivière du Mât se caractérise par un débit d'étiage très faible. Celui-ci mesuré à l'aval du pont de la route nationale au lieu-dit Rivière du Mat-Les Hauts (station installée en 1959) a été évalué 4 m³/s (étiage médian interannuel). Ce débit d'étiage représente un débit spécifique de 27,5 l/s/km².

Les débits de crues évalués (en m³/s) pour la rivière du Mât (SOGREAH/LCHF 1988) sont présentés dans le tableau 2.1.

<i>Période de retour</i>	<i>Débit moyen journalier</i>	<i>Débit de pointe</i>
5	830	1000
10	1200	1500
50	2745	3400
100	3700	4600

Tableau 2.1: Evaluation des débits de crue de la rivière du Mât

Certaines crues historique qui n'ont pas fait l'objet de mesures directes ont été évaluées à l'aide de la formule de Manning-Strickler.

Ainsi, la crue du 18/02/1952 a été évaluée à partir des délaissées sous la passerelle suspendue au quatrième km de la route d'Hell-Bourg où une hauteur moyenne de 6,5 m à permis d'évaluer le débit de pointe à 1700 m³/s. La surface du bassin versant en ce point étant de 125 km², le débit spécifique correspondant serait de 13,5 m³/s/km². La crue du 5/03/1959 a occasionné une hauteur d'eau de 3,5m permettant d'évaluer le débit de pointe à 520 m³/s et un débit spécifique à 4,15 m³/s/km².

Une hypothèse sur le transport solide dans la rivière du Mat a donnée un volume de 180 000 m³/an dont 60 000 m³/an par charriage (SOGREAH).

2.3. LA RIVIERE ST ETIENNE: LE BRAS DE LA PLAINE

2.3.1. Généralités

Le Bras de la Plaine est formé par trois bras principaux qui sont respectivement le Bras des Roches Noires, le Bras Ste Suzanne et le Bras Sec. Ces trois bras sont alimentés par des sources; après la confluence, le bras de la Plaine coule dans une vallée étroite et encaissée de 600 à 700 m.

Dans le Bras Ste Suzanne, le basalte affleure sur pratiquement tout le tracé, quelques cascades sont à noter. Le fond du lit du Bras de la Plaine est constitué par des alluvions (sables, galets et blocs). Au droit de l'Ilet César, vers 420 m d'altitude et entre 330 et 220 m d'altitude (à l'aval du Pont d'Yves), le lit se rétrécit. Entre 330 m et 260 m le lit occupe une gorge étroite de 10 à 15 m de large, il s'est creusé d'une trentaine de mètres à la passerelle de Crête au dépend d'un basalte compact. Après la passerelle de l'Entre-Deux, le lit s'élargit.

Au Pont de l'Entre-Deux, la surface du bassin versant du Bras de la Plaine est de 105 km².

2.3.2. Profil en long

Le profil en long réalisé par l'IGN en 1958 (nivellement) montre 4 secteurs à pente homogène.

- du confluent du Bras des Roches Noires (587m au km 23,3) jusqu'au confluent de la Ravine Creuse la pente moyenne est de 4,25% environ,
- du confluent de la ravine Creuse jusqu'au bras de Pontho (239 m, km 12) la pente moyenne est de 3%,
- du Bras de Pontho jusqu'au pont de l'Entre Deux (108 m, km 6,25) la pente moyenne est de 1,9%,
- ensuite, jusqu'à la mer la pente moyenne est de 1,7%.

2.3.3. Hypsométrie

La répartition des surfaces du bassin versant par tranche d'altitude est la suivante:

- 5,5% des altitudes sont supérieures à 2000 m,
- 27,5% des altitudes sont comprises entre 1500 et 2000 m,
- 32,5% des altitudes sont comprises entre 1000 et 1500 m,
- 23% des altitudes sont comprises entre 1000 et 500 m,
- 11,5% des altitudes sont inférieures à 500 m.

2.3.4. Evaluation des débits

Le régime hydrologique du Bras de la Plaine se caractérise par des apports superficiels par ruissellement qui sont soutenus de Mai à Décembre par des écoulements souterrains réguliers.

Les débits d'étiage à la passerelle de l'Entre-Deux ont été évalués à 5 m³/s ce qui correspond, compte tenu de la surface du bassin versant à ce niveau (83 km²), à un débit spécifique de 60l/s/km².

Les débits de pointe observés sont de 145 m³ le 24 Février 1959 ; 200 m³/s le 5 Mars 1959 et 180 m³/s le 19 Janvier 1960.

Les débits de crues évalués sont supérieurs 200 m³/s pour la crue du 18 Mars 1952; d'environ 850 m³/s pour les crues de Janvier 1948.

2.4. LA RIVIERE ST ETIENNE: LE BRAS DE CILAOS

2.4.1. Généralités

Ce bras draine l'ensemble du cirque de Cilaos; il est formé par les bras St Paul, Bras Rouge, Bras de Benjoin, le Petit Bras. Les trois premiers forment après leur confluence le Grand Bras.

Petit et Grand Bras se rejoignent au Pavillon pour ensuite quitter le cirque et s'engager dans une vallée étroite et profonde.

A la sortie du canyon, la confluence du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine forme la rivière St Etienne qui atteint le rivage après un parcours de 6 km.

Les lits des bras de Cilaos, Bras de Benjoin, Bras rouge et Bras de St Paul sont recouverts d'alluvions torrentielles, les berges y sont instables et sujettes à éboulement.

La superficie du bassin versant du Bras de Cilaos en amont de la prise d'eau du canal des Aloès (175 m) est de 95,5 km².

2.4.2. Profil en long

La pente entre Trois Bras et Pavillon est de l'ordre de 3% en moyenne, de 1,5% à proximité du confluent du Bras de la Plaine. De Trois Bras à la Pointe de l'Entre-Deux, la pente est de 2,2% en moyenne.

2.4.3. Hypsométrie

La répartition des surfaces du bassin versant en fonction de l'altitude sont :

- 13,5% des altitudes sont supérieures à 2000 m,
- 16,5% des altitudes sont comprises entre 1500 à 2000 m,
- 34,5 % des altitudes sont comprises entre 1000 à 1500 m,
- 28,5% des altitudes sont comprises entre 500 à 1000 m
- 7% des altitudes sont inférieures à 500 m.

La sortie du cirque de Cilaos se faisait à l'origine par la plaine des Makes. A la suite du comblement de celui-ci, et probablement d'une capture, la sortie s'est faite par le Bras de Cilaos.

2.4.4. Pluviométrie

Les précipitations efficaces sur le Cirque de Cilaos sont présentées dans la figure 2.7 Les pluies efficaces dans le bassin de Cilaos apparaissent avec la même séquence que dans les autres stations citées précédemment avec des valeurs comparables à celles présentées pour le Cirque de Mafate. Ceci n'est pas étonnant compte tenu de la position "sous le vent" de ces deux cirques. De ce fait, les régimes de précipitations, et dans notre cas les pluies efficaces, dans les bassins versants de la rivière des Galets et la rivière St Etienne apparaissent comme relativement comparables.

Les maxima enregistrés à Cilaos sont de 1870 mm/24 h le 16/03/1952 (non homologué), 1041 mm/24 h le 10 Avril 1958

2.4.5. Evaluation des débits

Les débits moyens annuels sont de l'ordre de 3,67 m³/s à 5,67 m³/s. L'étiage moyen du Bras de Cilaos à l'Illet Farcy est d'environ 1,15 m³/s ce qui représente un débit spécifique de 12,2 l/s/km².

Crues

Les vitesses en période de crue atteignent 5 m/s; ces vitesses ont été mesurées pour un débit de 110m³/s (crue du 5 Mars 1959 à l'Illet Farcy).

Des évaluations de crue ont été réalisées avec la formule de Manning-Stricker. Elles donnent les débits de point suivants:

24 Février 1959 : 160 m³/s

5 Mars 1959: 250 m³/s

18 Mars 1952: 220 m³/s

La crue du 27-28 Janvier 1948 a occasionnée un éboulement considérable durant le cyclone. La route allant à Cilaos a été coupée en amont de Petit Serré pendant plus de 6 mois; 4 ponts emportés, pas d'évaluation.

2.5. RIVIERE ST ETIENNE

Le bassin versant de la rivière St Etienne est constitué des deux sous bassins distincts présentés précédemment dont la géomorphologie et de comportement sont différents: le Bras de Cilaos et le Bras de la Plaine (figure 2.6).

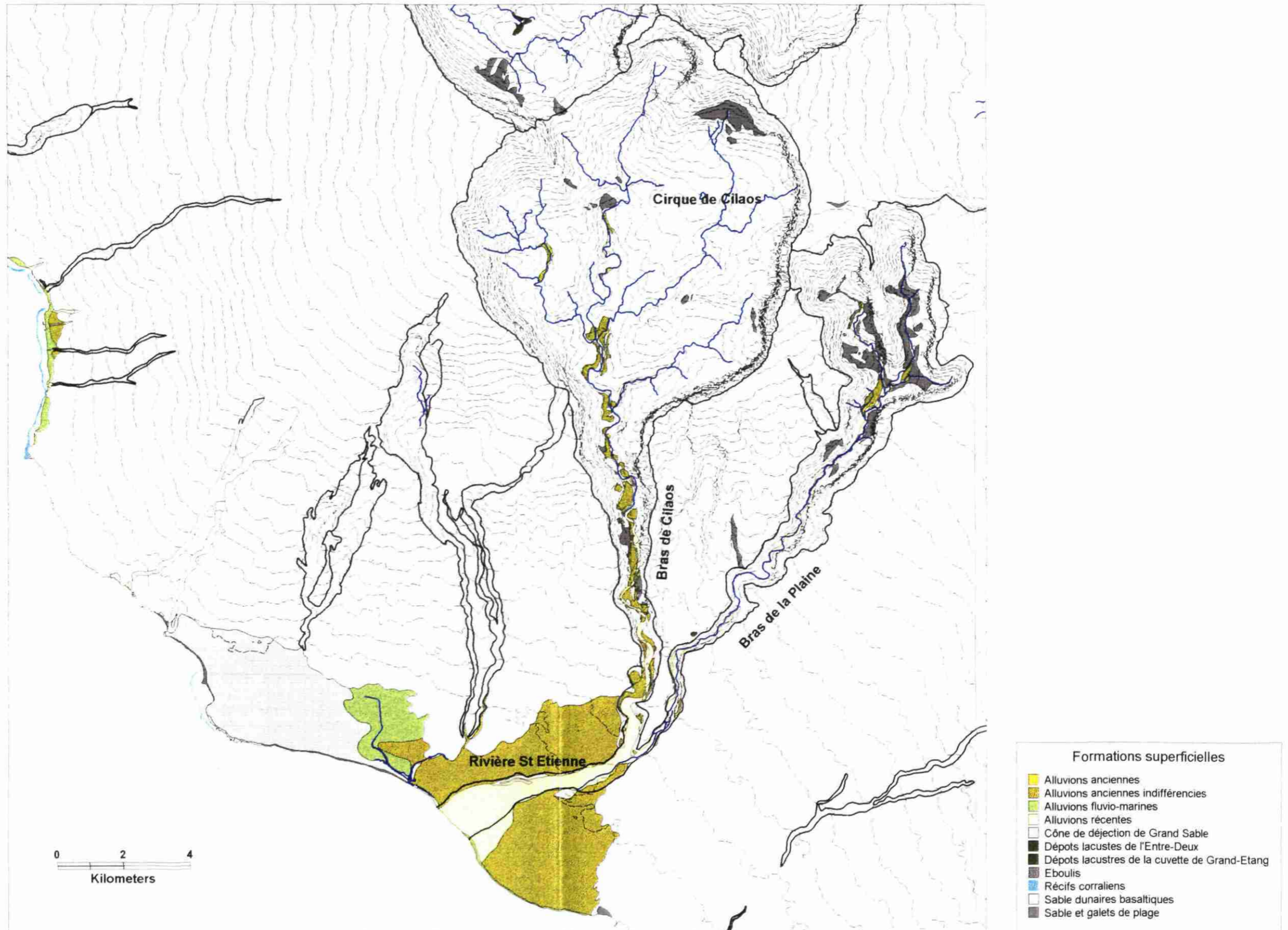
Le lit de la rivière St Etienne, après la confluence de l'Entre-Deux, est constitué par des alluvions torrentielles. Des infiltrations s'opèrent dans le lit alluvial. Ces infiltrations ont été évaluées à 0,93 m³/s par mesure des débits entrants (8,51 m³/s) et sortant (7,58 m³/s).

Les débits de crues moyens journaliers (m³/s) évalués sont présentés dans le tableau 2.2 (SOGREAH/LCHF 1988) pour des périodes de retour de 5 ans à 2450 m³/s, de 10 ans à 3045 m³/s, de 100 ans de 5076 m³/s.

<i>Période de retour</i>	<i>Débit moyen journalier</i>	<i>Débit de pointe</i>
<i>5</i>	2450	-
<i>10</i>	3045	-
<i>50</i>	-	-
<i>100</i>	5076	-

Tableau 2.2 : Evaluation des débits de crues de la Rivière St Etienne

Figure 2.6 : La Rivière St Etienne et son bassin versant



2.6. SYNTHÈSE DU MILIEU PHYSIQUE

De par la diversité des bassins versants et la complexité des phénomènes et processus qui régissent leurs évolutions, il nous paraît nécessaire de traiter chaque ravine indépendamment. Les bassins versants des trois ravines étudiées, en apparence très semblables, présentent en réalité des caractéristiques propres bien différentes.

Enfin, toute transposition de mesures, de résultats de modélisations et toute forme de généralisation d'observation d'une ravine aux autres nous paraît illusoire.

Ainsi, bien que prenant naissance chacune dans l'un des trois cirques de l'île, la comparaison de la surface de leur bassin versant est loin d'être identique (105 km² pour la rivière des Galets, 145 km² pour la rivière du Mât et 200 km² pour la rivière St Etienne).

De plus, la rivière St Etienne possède deux sous bassins distincts (Bras de la Plaine et bras de Cilaos) qui répondent à des dynamiques différentes tant sur les plans morphologique et géologique que météorologique. L'exposition de ces bassins aux précipitations est, elle aussi, variable. Le cirque de Cilaos est affecté de précipitations relativement faibles tandis que le Bras de la Plaine est, dans sa partie amont, le siège de précipitations beaucoup plus importantes (figure 2.8).

Le cirque de Salazie (rivière du Mât) est exposé à des pluies plus importantes que le cirque de Mafate (rivière des Galets).

Les pluies intenses en période cyclonique contrôlent d'une part les débits liquides des ravines et donc l'un des paramètres fondamentaux de leur comportement et d'autre part l'occurrence des glissements de terrain et des éboulements dans les cirques des bassins versants.

De ce fait, les précipitations ont ici un double rôle. Elles génèrent les débits liquides et déclenchent les crues mais aussi, elles apportent des matériaux à la partie amont des ravines.

Il en résulte que certains cyclones seront capables de générer un grand nombre de glissements de terrain à l'amont et donc, de mettre à la disposition du cours d'eau un certain volume de matière solide.

Dans certains cas, le même cyclone occasionnera des crues suffisantes et assez puissantes pour assurer le transport de ces matériaux jusqu'à l'aval.

Dans d'autres cas, seule une partie de ces matériaux sera mobilisée et éventuellement déposée dans une zone de stockage temporaire. Il faudra alors attendre d'autres événements pour avoir une reprise du transport et une migration des matériaux vers l'aval.

Dans certains cas (Mahavel par exemple), le volume de matériaux mis à la disposition du torrent est si important que le fond de celui-ci est le siège de dépôts épais qui ne sont que progressivement remobilisés et transportés. Cela nécessitera plusieurs années, voire décennies, avant que les matériaux atteignent le cône.

La complexité et le caractère polyphasé du transport solide dans les ravines de la Réunion est renforcé par les modalités de ce transport. En effet, des écoulements de type coulées boueuses et laves torrentielles peuvent se produire en plus du charriage classique. La particularité de ce type de phénomène est un fonctionnement en pulsations ou "bouffées" qui se succèdent dans le temps. Dans les zones à pentes fortes où elles ne font que transiter, ces bouffées ont tendance à avoir un comportement érosif, destructif et à agir comme des purges sédimentaires.

Par contre, dès qu'une perte de compétence se produit, une masse importante de sédiments peut se déposer et aboutir à un rehaussement significatif du lit de la rivière. Celui-ci peut être très localisé au débouché d'un canyon, dans un secteur à pente plus faible, sur un obstacle ou dans une zone d'élargissement du lit.

Ce mode de fonctionnement permet de comprendre que certaines zones des ravines sont dans des phases érosives alors que d'autres, au contraire, montrent un engraissement marqué du lit. De ce fait, caractériser la tendance de comportement d'une ravine et le transport solide doit se faire en prenant en compte le secteur d'étude mais aussi les secteurs amont et aval; ceci afin d'inscrire le point d'intérêt dans une logique de fonctionnement de l'ensemble.

La caractérisation mais surtout la quantification du transport solide en terme de volume interannuel transporté apparaît donc comme très délicat compte tenu de l'importance de la succession des événements passés (cyclones, éboulements, matériaux disponibles, granulométrie des matériaux etc.) dans le comportement actuel.

Evolution

La jeunesse des reliefs, la vigueur du climat ainsi que la nature des roches, conduisent à une géodynamique et une morphogénèse très actives.

Les rivières de la Réunion s'inscrivent dans cette logique et apparaissent comme des cours d'eau peu évolués dont les profils d'équilibres sont très pentés et qui incisent vigoureusement le substratum.

La tendance générale et naturelle de ces cours d'eau est clairement incisive. Ces incisions sont entrecoupées de phases de dépôts plus ou moins longues qui se corrélaient avec des événements générateurs de grandes quantités de matériaux.

3. CHRONIQUES DES EXTRACTIONS

Les extractions de matériaux sont réalisées au moyen de fosses dans le segment aval des cônes.

Les exploitations sont encore actives sur la rivière St Etienne et sur la rivière du Mât. En revanche, les extractions sur la rivière des Galets sont arrêtées depuis 1991 et remplacées par des extractions sur les "buttes du Port".

Dans cette étude, nous nous sommes proposés de comparer l'évolution spatio-temporelle du comportement des ravines avec l'évolution des paramètres naturels et anthropiques. Ceci afin de déterminer dans quelle mesure ces extractions sont compatibles avec les apports naturels générés par le transport solide, quelles sont les modalités de ce transport solide et quels ont été les événements naturels qui pourraient expliquer des éventuelles modifications des rivières, et enfin, quels sont les impacts réels des extractions.

Malheureusement, les données concernant les volumes extraits pour les années passées sont rares et imprécises. Elles ne permettent pas de reconstituer de façon fiable les historiques des volumes extraits de chacune des ravines.

Nous avons toutefois tenté de retracer quelques évolutions temporelles et signalé les volumes plausibles extraits actuellement. Le tableau suivant (tableau 3.1) présente les volumes déclarés et évalués de matériaux extraits sur 6 rivières pour les années 1995. Une évaluation des volumes extraits dans la rivière du Mât est de plus fournie pour les années 1993-1994. Les volumes extraits dans le cône de la rivière St Etienne ont été estimés par la DDE de 1992 à 1994 à partir des profils topographiques réalisés. Cette évaluation donne un ordre de grandeur de 500 000 m³ extraits par an durant ces trois années.

Dans ce tableau, il apparaît clairement que les volumes déclarés sont, pour la rivière du Mât et surtout pour la rivière St Etienne, largement inférieurs à la réalité.

<i>Rivière</i>	<i>Déclaration 1995 (m3)</i>	<i>Estimation DDE 1995 (m3)</i>	<i>Evaluation DDE 1993 et 1994 (m3/an)</i>
<i>Riv. du Mât</i>	306 832	350 000	350 000
<i>Riv. St Etienne</i>	281 591	500 000	500 000
<i>Riv des Pluies</i>	96 345	96 345	
<i>Chaudron</i>	46 397	46 397	
<i>Patate à Durand</i>	2 223	+150 000 (cyclone)	
<i>Buttes du Port</i>	494 000		

Tableau 3.1: Volume des extractions déclarées, évalué et estimé de 1993 à 1995

Les figures 3.1 et 3.2 présentent une tentative de reconstitution des historiques des volumes extraits des rivières du Mât et de St Etienne à partir des volumes déclarés. Ces figures ne peuvent donc représenter que des **tendances évolutives** que l'on peut supposer relativement représentatives de la réalité. Ces courbes montrent une très forte augmentation des volumes extraits entre les années 1980-1986 et 1995. Si cette augmentation est représentative des volumes réellement extraits, elle indique que l'on a fait subir aux rivières une pression anthropique très forte pouvant engendrer en retour des réadaptations des cours d'eau et donc des modifications des lits. Compte tenu de l'intensité de la perturbation ainsi engendrée, celle-ci pourrait se poursuivre pendant plusieurs années même si l'on arrêtait les extractions à ce jour. Cette hypothèse semble confirmée par les observations réalisées sur la rivière des Galets, où, bien que les extractions aient été arrêtées en 1991, les impacts y sont encore nettement visibles.

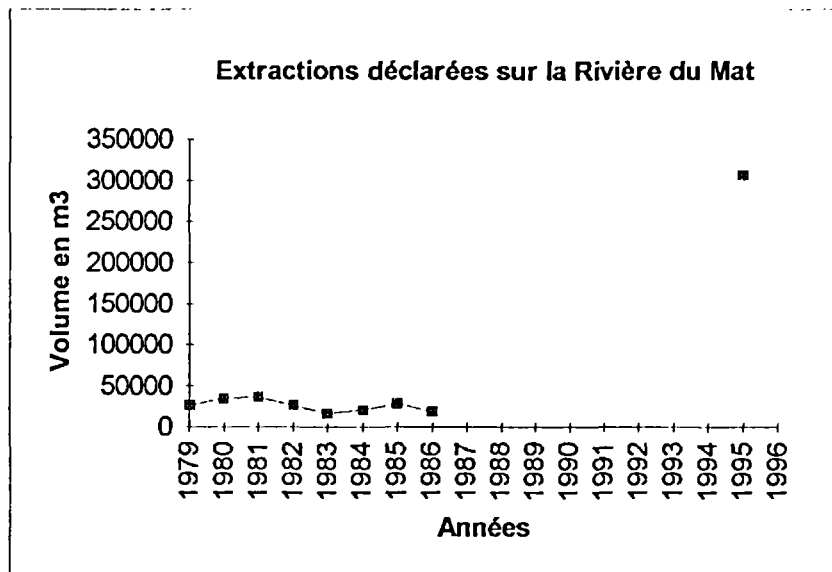


Figure 3.1 : Volume des extractions déclarées sur la rivière du Mât

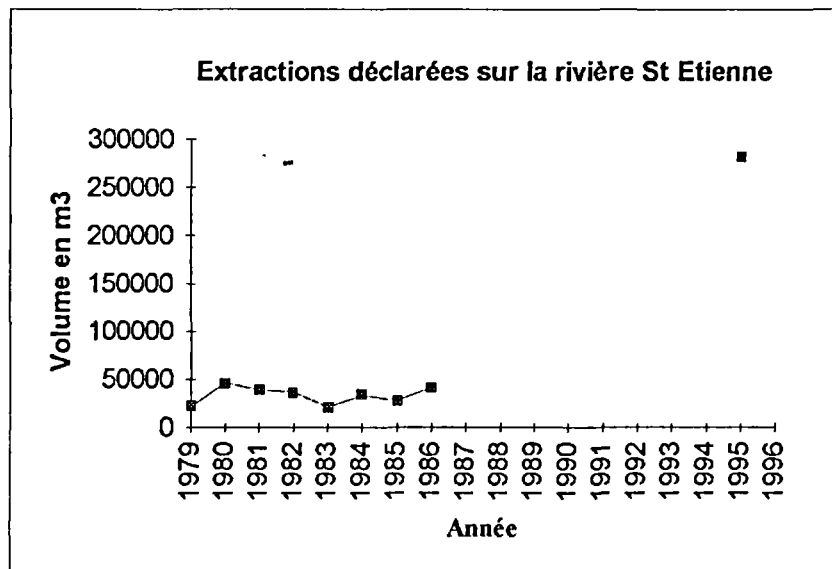


Figure 3.2 : Volume des extractions déclarées sur la rivière St Etienne

4. EVOLUTION GEOMORPHOLOGIQUE DES ZONES ALLUVIALES ET IMPACT DES EXTRACTIONS

Nous allons aborder, dans ce chapitre, l'évolution géomorphologique des zones alluviales de chacune des ravines. Trois approches sont utilisées: reconnaissance de terrain, analyse des photographies aériennes et évolution topométrique au pied des ouvrages.

4.1. RECONNAISSANCE DE TERRAIN

4.1.1. Rivière des Galets

Une reconnaissance de terrain dans le lit de la rivière des Galets a été effectuée de l'amont de l'endiguement jusqu'à l'aval des Deux Bras à la sortie du cirque de Mafate (planche 4.1).

Au niveau du village de la Rivière de Galets, dans le segment amont du cône, on peut observer le lit bordé rive droite par des alluvions anciennes correspondant aux dépôts plus anciens du cône entaillées de 6 à 8 m.

Le lit montre une succession de chenaux encaissés de 2 à 3 m par rapport à la surface des plus basses terrasses. Les chenaux s'incisent dans des dépôts alluviaux antérieurs en remobilisant ces sédiments lors des crues.

Cette remobilisation laisse sur place les plus gros "galets" (1m et plus), les crues n'ayant pas la compétence suffisante pour les transporter. Ceci aboutit à l'augmentation de la concentration de ces gros galets dans les fonds de chenaux ce qui confère à ces derniers un aspect chaotique caractéristique (planche 4.1).

Ce phénomène est à rapprocher du processus de pavage par tri granulométrique observé par ailleurs, si ce n'est qu'ici la taille des éléments est nettement plus importante.

Les terrasses sont constituées par un sédiment à éléments fins, sableux qui emballe des galets dont la taille est principalement pluridécimétrique. L'aspect et la granulométrie de ces sédiments sont très différents du fond des chenaux actifs ce qui confirme le changement de comportement de ces derniers par rapport aux conditions de dépôts antérieurs.

Plus à l'amont, au débouché des gorges, au moins 4 niveaux de terrasses sont observables. Le lit n'est plus constitué que par un chenal principal et quelques chenaux secondaires.

Le chenal principal, siège des écoulements en saison sèche, incise fortement les dépôts alluviaux sous-jacents (de l'ordre de 2 à 3 m, localement 6 m, planche 4.1). La limite de cette incision se situerait à 200 m environ à l'aval du Cap le Bot (planche 4.1). En effet, à l'aval de ce point, on note une augmentation de la pente du lit marquée par une succession de marches constituées par des gros galets résiduels.

L'encaissement du lit augmente ensuite progressivement vers l'aval; cet encaissement peut atteindre localement 4 m par rapport à la basse terrasse. Cette incision est de plus probablement exacerbée par des rétrécissements et des coudes dans le tracé de la rivière. Par contre, à l'amont de ce point, le lit de la Rivière des Galets semble beaucoup moins perturbé, moins chaotique et plus homogène.

4.1.2. Rivière St Etienne

Des observations de terrain ont été effectuées sur la rivière St Etienne du littoral jusqu'à l'amont de l'Entre-Deux (planche 4.2).

Au niveau du littoral, en aval des zones d'extraction, des chenaux assurant le transit du cône vers l'Océan sont nettement marqués; on y notera l'absence de gros galets.

De façon identique à la Rivière des Galets, des incisions de chenaux dans le lit alluvial sont visibles dès la zone immédiatement à l'amont des extractions . Ces incisions sont observables jusqu'à l'Îlet Roland dans le Bras de Cilaos.

La présence d'un bed-rock en basalte massif affleurant sous le pont de l'Entre-Deux, dans le bras de la Plaine, joue un rôle de point dur et freine la propagation de l'incision à l'amont de ce point.

En amont de la zone d'extraction aval, les culées de l'ancien pont de la Rivière St Etienne sont affectées par un affouillement très net (planche 4.2).

On remarque la présence d'un chenal nettement individualisé qui incise fortement les alluvions présentes au fond du lit.

L'érosion de ces alluvions, ici constituées par une ancienne coulée boueuse cimentée, est clairement mise en évidence par la présence d'une "cheminée de fée" armé par un gros "galet" qui repose 4 m au dessus du fond du chenal (planche 4.2).

La résistance à l'érosion fluviale de ces dépôts largement supérieure à celle d'alluvions non consolidées, a permis la création de telles structures et à probablement freinée l'incision mise en évidence.

A l'amont, entre le pont de la RN et le Cap Assiette, des chenaux biens individualisés dans le lit alluvial ont été observés. Ils présentent un aspect chaotique comparable à celui noté dans la rivière des Galets.

Cet aspect chaotique résulte d'une incision pouvant atteindre 4 à 5 m, remobilisant les alluvions antérieures et laissant sur place les plus gros blocs et galets.

Cette érosion régressive se poursuit jusqu'au niveau de l'Îlet Roland dans le Bras de Cilaos (Planche 4.2), c'est à dire bien en amont des zones d'extraction.

En amont de l'Îlet Roland, la morphologie du lit de la rivière ne semble plus être affectée (planche 4.2) par l'érosion.

Dans le Bras de la Plaine, la présence de basalte massif en place sous le pont de l'Entre Deux bloque, au moins partiellement, la propagation de l'incision dans ce bras.

A terme, si l'érosion se poursuit durablement, ces basaltes pourraient former un seuil naturel.

4.1.3. Rivière du Mât

Des reconnaissances de terrain ont été effectuées sur la rivière du Mât de la zone des extractions dans le cône jusqu'aux gorges à la sortie du Cirque de Salazie.

La rivière du Mât montre un comportement différent de celui de la rivière St Etienne et de la rivière des Galcts. En effet, des zones d'accumulation de matériaux ont été observées en plusieurs points à l'amont immédiat et probablement dans la zone d'extraction et à l'aval du pont de la RN (planche 4.3).

Ces zones d'accumulation se caractérisent par des dépôts épais comportant des galets et blocs hétérométriques. Les plus gros peuvent atteindre une taille supérieure au mètre, ils sont emballés dans des sables et graviers. Ces dépôts sont localisés dans l'espace et résultent probablement d'une accumulation brutale dans des zones où la vitesse du courant diminuait lors de crues importantes ou de laves torrentielles.

Le plancher du lit alluvial a subi, dans ces zones, un rehaussement important (quelques mètres). Il conduit à l'engorgement des chenaux préexistants et à un ennoyage des zones inter-bancs. De ce fait, nous avons pu constater une migration latérale des écoulements vers les points les plus bas, cette migration a par ailleurs probablement conduit à des inondations dans des zones qui n'en n'avaient pas subies depuis de nombreuses années. Cette migration latérale a par ailleurs été responsable d'une érosion des berges et des bancs qui existaient préalablement.

On constate que, dans ces aires recouvertes de dépôts épais, les chenaux actuels ont tendance à se recreuser afin de trouver un nouveau profil d'équilibre.

Ces zones d'accumulation sont séparées par des aires où le cours d'eau a essentiellement une fonction de transport. Dans celles-ci (planche 4.3), les tracés sont généralement assez rectilignes, des érosions de berges s'y produisent.

Du pont "Chane Hime" à l'amont, jusqu'au pont de la RN vers l'aval, le lit de la rivière du Mât repose soit sur du basalte massif, soit sur des d'alluvions peu épaisses qui laissent entrevoir par endroit la roche en place. Ceci implique que toute cette zone joue le rôle d'un point dur résistant à l'érosion.

Planche 4.1 : Morphologie du lit de la Rivière des Galets d'aval en amont

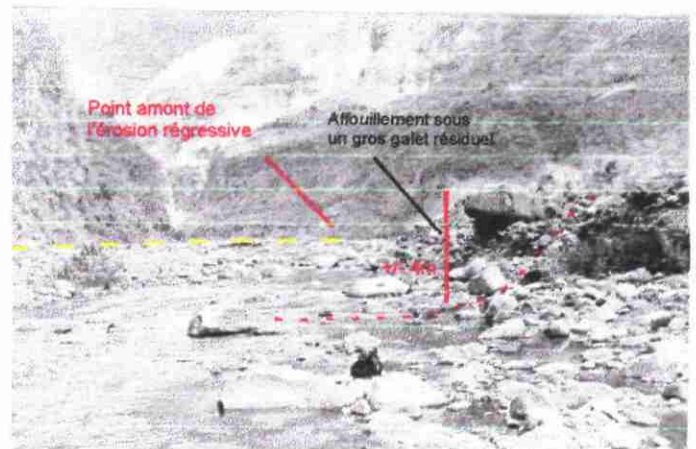
Incision de 2 à 3 m du chenal dans ses alluvions (prox.village de la rivière des Galets). Galets résiduels, aspect chaotique, regard amont



Incision du chenal dans les alluvions à la sortie des gorges, pavage en gros galets en cours de formation (regard amont)



Zone amont de l'incision régressive (prox. Cap le Bot) dans les gorges de la Rivière des Galets (regard amont)



Aspect du lit en amont à proximité de la sortie du cirque de Mafate, peu d'incision et absence de gros galets résiduels (regard amont).

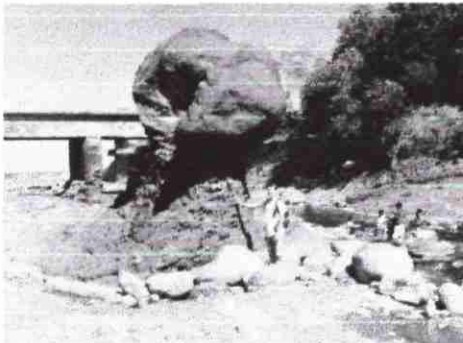


Planche 4.2 : Morphologie du lit de la Rivière St Etienne d'aval en amont



Le cône de la rivière St Etienne au niveau du littoral, on notera l'absence de très gros galets ainsi que la présence d'un chenal

Erosion du lit de la rivière St Etienne constitué par une ancienne coulée boueuse et "gale" résiduel en cours d'affouillement (proximité pont de la RN)



Affouillement et érosion d'une culée du pont de la rivière St Etienne

Erosion du lit de la rivière St Etienne dans le bras de Cilaos en amont de l'Entre Deux et ancienne terrasse (points violets) Aspect chaotique



Incision du lit de la rivière St Etienne de l'ordre de 5 m en aval du Cap Assiette galets résiduels



Lit peu à non perturbé au niveau de l'Ilet Roland (bras de Cilaos)



Lit peu perturbé dans le Bras de la Plaine en Amont de l'Entre Deux. Présence de sable dans les sédiments

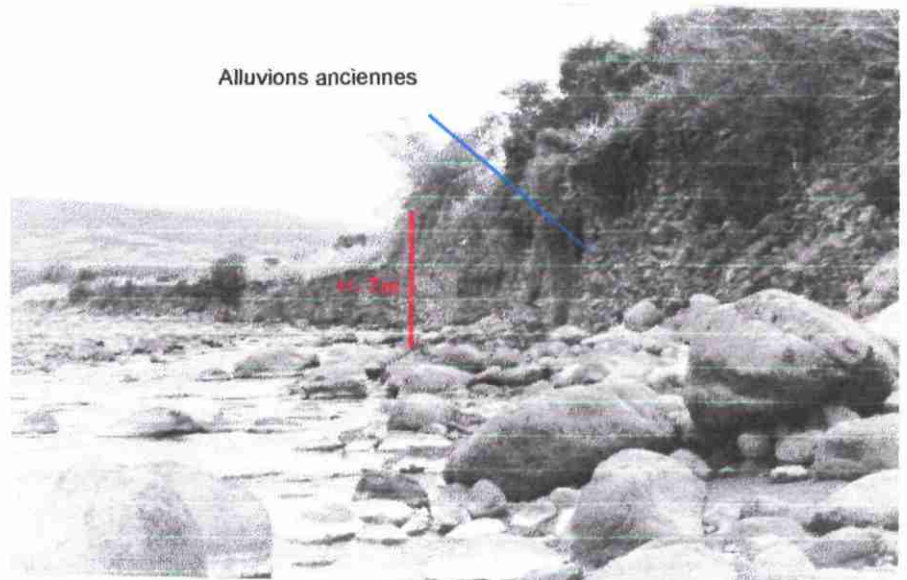


Planche 4.3 : Morphologie de la rivière du Mât en aval du pont de la RN

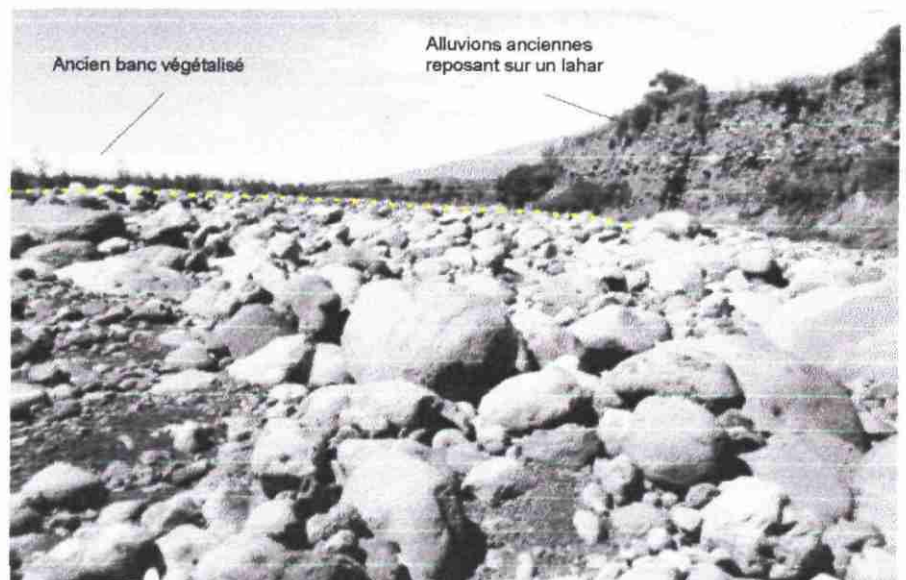
Zone d'accumulation en amont immédiat des extractions. Les dépôts ont envoyé le réseau de la gauche vers la droite (tirets jaunes) et forcé la rivière à s'installer sur la rive droite (regard amont). Il en résulte une érosion de la berge rive droite.



Zone de transport sans accumulation avec érosion de la berge rive gauche formée par des alluvions anciennes.



Zone d'accumulation amont (aval du pont de la RN) les dépôts ont envoyé le réseau obligeant la rivière à s'écouler en partie le long de la berge rive droite ce qui provoque une érosion de cette même rive. Aval du pont de la RN, regard aval.



4.2. ANALYSE DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

L'observation en stéréoscopie des photographies aériennes des missions IGN (1961-78-84-89), permet de dégager quelques évolutions dans la morphologie des trois ravines (rivières des Galets, du Mât et St Etienne). Quelques illustrations de ces évolutions sont présentées ici et, bien que non exhaustives, elles permettent d'appréhender les dimensions spatiales et temporelles des observations réalisées sur le terrain.

4.2.1. Rivière des Galets

La planche 4.4 illustre l'évolution de la rivière de l'amont du pont de la RN jusqu'au débouché des gorges à l'amont du village de la Rivière des Galets.

La photographie de 1961 montre une plaine alluviale à chenaux anastomosés (en tresse) peu encaissés dans le lit. Le cône ancien, partiellement visible, n'est ni urbanisé ni mis en culture.

En 1978, des chenaux multiples en tresses sont présents, ils semblent plus marqués que ceux de 1961. La berge rive droite a été érodée, 3 chenaux majeurs apparaissent; l'urbanisation du village s'est très fortement développée.

En 1984, on constate que l'érosion de la rive droite s'est poursuivie (Hyacinthe?), 2 chenaux majeurs subsistent, la zone centrale semble s'être remblayée suite à des dépôts.

En 1989, les 2 chenaux persistent et s'encaissent de plus en plus par rapport au fond "moyen" de la plaine alluviale. Le chenal rive droite n'a quasiment pas évolué et longe toujours la berge; celui présent en rive gauche a modifié légèrement son trajet et "méandrise". L'urbanisation gagne les "hauts". Un troisième chenal semble tenter de se réinstaller dans la partie centrale.

4.2.2. Rivière St Etienne

L'analyse des photographies sur le cône de la rivière St Etienne à trois dates (1961-78-89) permet d'observer son évolution (planche 4.5). En 1961, un réseau superficiel en tresse et divaguant à noter. Il n'y a pas, mis à part l'ancien pont, d'implantation humaine dans le lit.

En 1978, un chenal apparaît rive droite tandis qu'un chenal secondaire est présent dans l'axe de la vallée alluviale. Ces chenaux sont plus encaissés que ceux de 1961. On note la présence d'extraction à l'**aval immédiat** du pont de la RN tandis que la ville de St Louis s'est développée. Le nouveau pont est présent.

En 1989, le chenal rive droite est toujours présent et bien visible à l'amont du pont; à l'aval, les perturbations engendrées par les extractions ne permettent plus d'observations fiables. La largeur du cône actif a été fortement réduite par rapport à celle de 1961 par stabilisation des sédiments (rive gauche) à l'amont et à l'aval du pont. Il est possible que le pont ait joué un rôle compte tenu du fait qu'il ne permet pas les écoulements de la rivière en rive gauche. La réduction de largeur du cône varie de 25 à 40% environ dans cette zone.

La planche 4.6 montre l'évolution d'un secteur plus amont de la rivière St Etienne, centré autour du Cap Assiette. En 1961, la plaine alluviale est, comme plus en aval, représentative d'un système anastomosé. Le Cap Assiette est individualisé quasiment au milieu de la plaine alluviale.

En 1978, les chenaux sont plus nombreux, le secteur rive gauche de la plaine alluviale ainsi qu'une basse terrasse rive droite sont en cours de végétalisation.

En 1989, les chenaux sont bien marqués, une partie du secteur rive gauche ainsi que la basse terrasse rive droite sont mis en culture, le Cap Assiette se retrouve en bordure de la plaine alluviale dont la largeur a été fortement réduite.

4.2.3. Rivière du Mât

L'évolution du cône de la rivière du Mât est présentée dans la planche 4.7.

En 1961, les écoulements s'effectuent essentiellement en rive gauche. Toutefois, lors des crues, des écoulements se produisent en rive droite comme l'indique la présence d'un important chenal. Les bancs et les chenaux y sont bien visibles quoique ces premiers soient en cours de végétalisation.

En 1978, on note une modification des tracés des chenaux principaux qui restent essentiellement cantonnés sur le secteur rive gauche du cône. L'ancien chenal signalé en 1961 est délaissé et s'estompe; la végétalisation des bancs ainsi que celle du secteur rive droite se poursuit.

Quelques cultures de cannes apparaissent en rive droite du cône. Une érosion de la berge en rive gauche est à noter.

En 1984, la culture de la canne gagne sur le secteur rive droite. En rive gauche, des érosions de la berge se sont produites. Les bancs sont fortement végétalisés et le secteur amont rive droite est, lui aussi, en cours de végétalisation.

En 1989 tout le secteur droit du cône a été mis en culture ou est occupé par les installations des extracteurs. La berge rive gauche a été localement érodée. La surface occupée par les bancs végétalisés a diminuée suite probablement à une phase d'accumulation de dépôt.

On constate donc, de 1961 à 1989, une diminution significative de l'espace concédé au cône de la Rivière St Etienne. Celle-ci est due à la réduction de sa largeur au profit des cultures en rive droite.

Par ailleurs, on note une tendance à sa pérennisation des écoulements sur le coté gauche du cône et une tendance à l'érosion de sa berge rive gauche.

La planche 4.8 permet d'observer les modifications de comportement de la rivière du Mât à l'aval de l'actuel pont de la route nationale.

On constate de 1978 à 1989, une évolution du tracé de la rivière avec notamment un changement de cours. Celui-ci passait en 1978 entre deux bancs et dès 1984, il longe la rive droite et commence à éroder cette même berge.

A l'aval, la rivière a fortement érodé des basses terrasses en rive gauche. Cette tendance s'est poursuivie jusqu'en 1989, où l'on observe que les basses terrasses ont encore subi une érosion active responsable d'une réduction importante de leur surface.

4.3. ENREGISTREMENT DES VARIATIONS DU LIT SUR LES OUVRAGES D'ART

Les ouvrages d'art, notamment les ponts de la route nationale sur la rivière des Galets et sur la Rivière St Etienne, ont fait l'objet d'un suivi topométrique sur plusieurs années. Des données plus anciennes ont, de plus, été intégrées.

4.3.1. Evolution du lit au niveau du pont de la Rivière des Galets

Les courbes présentées dans la figure 4.1 représentent la topographie du lit de la rivière des Galets de 1983 à 1993. Elles montrent en rive gauche l'individualisation et l'enfoncement de plus en plus marqués d'un chenal dont la cote évolue de 68 m à 63,5 m soit un enfoncement de 4,5 m en 10 ans. Par ailleurs, la rive droite qui représentait le point le plus haut du lit en 1983 s'affirme. Certains chenaux restent stables au cours de cette décennie tandis que d'autres apparaissent puis disparaissent.

Ce type de fonctionnement est caractéristique des vallées fluviales à réseaux anastomosés (en tresse).

En revanche, pour les trois périodes considérées, les valeurs maximales et minimales de l'altitude du lit diminuent ce qui indique l'enfoncement général du lit. La différence entre les côtes topographiques maximales et minimales du fond du lit pour chaque année augmentent fortement. Elles passent de presque 9 m en 1983 à environ 11 m en 1993; ce qui indique un encaissement de plus en plus fort des chenaux dans la plaine alluviale qui conduit à la réduction de la surface active du lit et à la concentration des écoulements. Celle-ci renforce la poursuite de l'érosion du chenal principal.

4.3.2. Evolution du lit au niveau du pont de la Rivière St Etienne

Les courbes de la figure 4.2 représentent l'évolution de la topographie du lit de la rivière au niveau du pont de la rivière St Etienne (ouvrage amont) de 1935 à 1994.

L'intervalle de temps plus grand permet d'observer les mêmes phénomènes que précédemment et d'en confirmer les tendances et l'interprétation.

En effet, de 1935 à 1994, le lit de la rivière St Etienne se caractérise par une individualisation de plus en plus marquée des chenaux et notamment du chenal situé en rive droite qui demeure pérenne sur toute la durée considéré.

D'une façon générale, on constate que la moyenne des altitudes de l'ensemble du lit semble augmenter faiblement de 1935 jusqu'à 1972 (pas de valeurs intermédiaires) puis baisse légèrement jusqu'en 1990 et enfin diminue brutalement jusqu'en 1994.

Les valeurs *maxima* des lits augmentent relativement régulièrement jusqu'en 1990 puis brutalement entre 1990-1992. Les valeurs *minima* des altitudes du lit s'inscrivent par contre dans une tendance à une faible baisse de 1935 à 1972 puis une quasi stabilité jusqu'en 1990. Ensuite, elles baissent fortement jusqu'en 1993.

Enfin, la différence entre les *maxima* et les *minima* des cotes du lit montre une évolution nette entre 1935 et 1972; une stabilisation entre 1972-1990 puis une très forte augmentation entre 1990 et 1993/1994.

Ceci permet, comme pour la rivière des Galets, de mettre en évidence la tendance générale à l'individualisation d'un chenal. L'incision du substratum augmente. Sa position devient pérenne alors que le domaine occupé par la plaine alluviale active se rétrécit.

Une autre approche de l'analyse des profils a été réalisée. Elle a consisté à calculer l'écart type de chacun des profils afin de mettre en évidence la "rugosité" du lit.

Le calcul de l'écart type pour chacune des séries de cotes topographiques de chaque année montre une augmentation de 1,179 en 1935 jusqu'à 2,391 en 1994 le maximum étant de 2,49 en 1993 (profil amont). Les écarts types pour l'ouvrage aval, toujours au pont St Etienne, évoluent de 1,745 en 1880 jusqu'à 2,597 en 1994.

Ces chiffres indiquent une augmentation très nette de l'écart type qui peut être interprété comme une augmentation de la "rugosité" du lit.

L'individualisation de chenaux et leur incision dans la plaine alluviale et dans le cône caractérisent un changement de comportement de la rivière qui passe d'un régime anastomosé où les chenaux sont nombreux, divaguants et peu marqués à un système chenalisé, plus étroit et encaissé.

Il semblerait que le pont de la RN ait joué un rôle dans cette évolution. En effet, une partie de l'ouvrage a été implanté sur un remblai occupant l'ancienne plaine alluviale.

Il a donc constitué un obstacle aux écoulements et au balayage de la plaine alluviale par les chenaux divaguants.

De ce fait, la section d'écoulement a été réduite, augmentant ainsi les vitesses et par la même l'érosion et l'incision du chenal.

Figure 4.1 : Evolution du lit de la rivière des Galets (1983 -1993)
 au niveau du pont de la RN

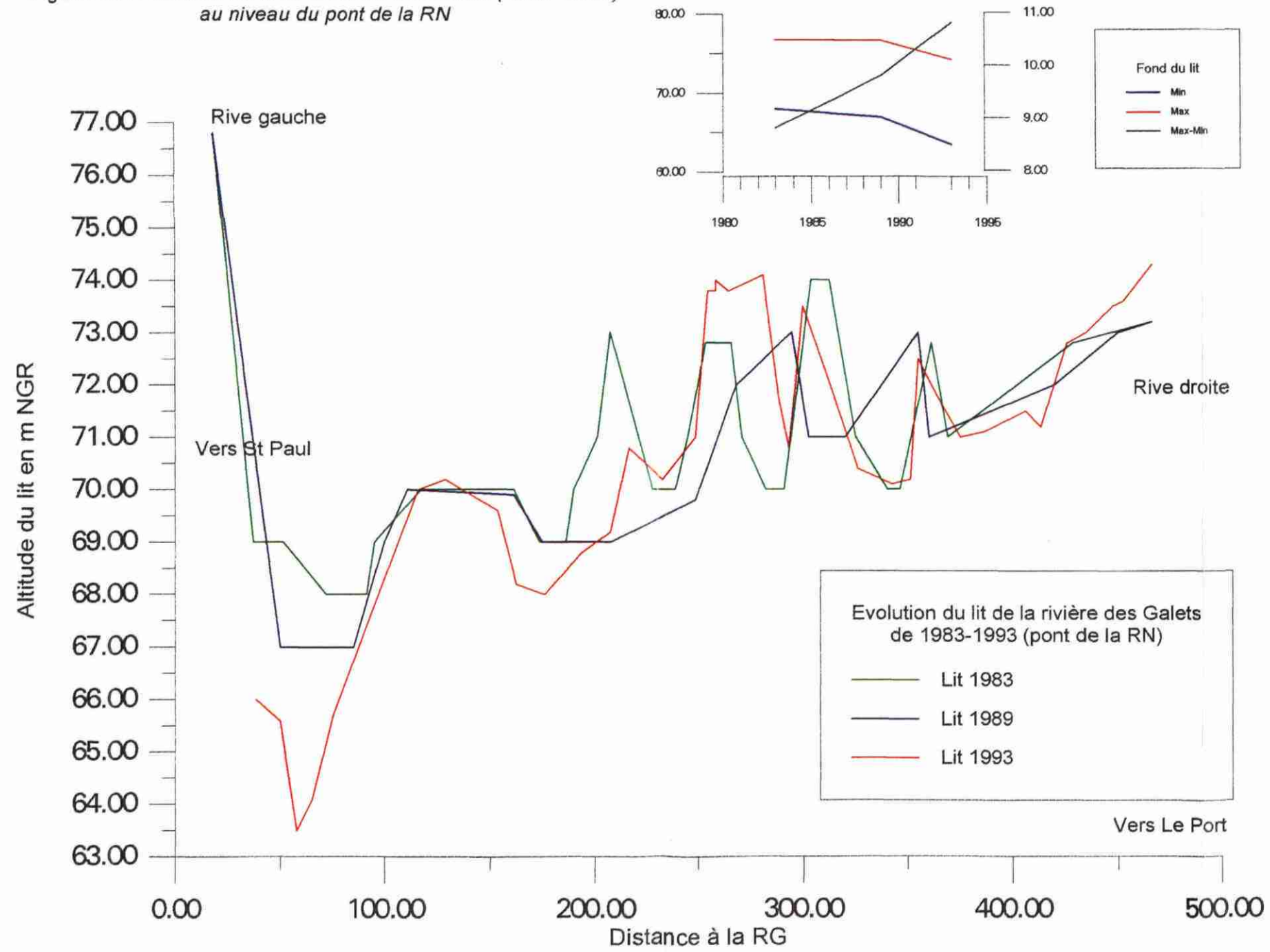
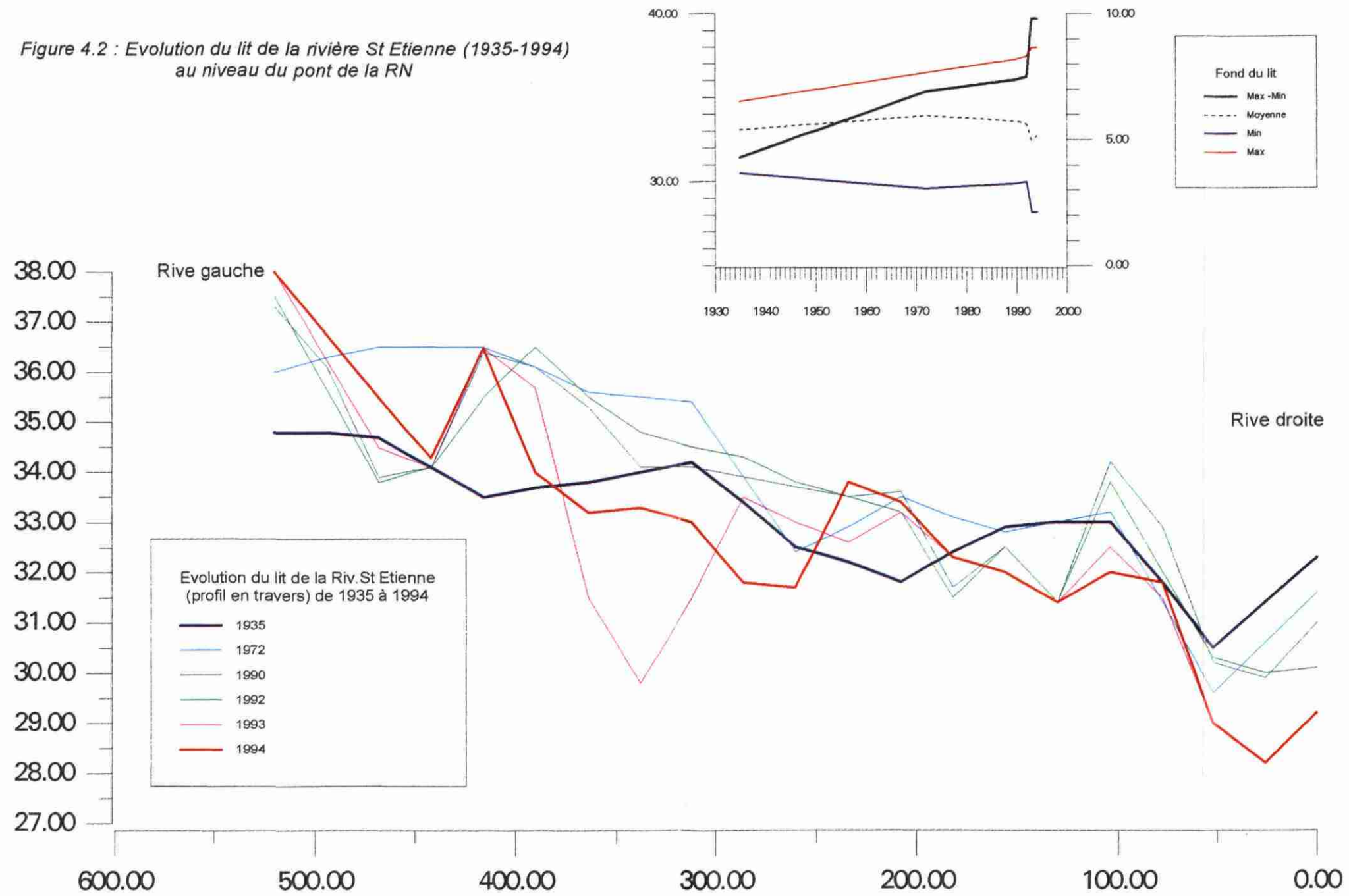


Figure 4.2 : Evolution du lit de la rivière St Etienne (1935-1994)
au niveau du pont de la RN



4.4. EVOLUTION DES RAVINES: RECHERCHE DES CAUSES POSSIBLES

4.4.1. Rivière des Galets (planche 4.4)

La rivière des Galets est très nettement, dans le cône et son segment alluvionnaire, dans une phase érosive. Celle-ci se manifeste par une reprise de ses alluvions antérieures laissant sur place les plus gros blocs (>1 m) non remobilisables lors des dernières crues.

On observe une modification au niveau des chenaux qui s'individualisent de plus en plus, s'encaissent et incisent les niveaux plus anciens présents dans son lit. Cette individualisation a tendance à concentrer les écoulements.

Cette érosion linéaire remonte loin en amont et est très nette jusqu'à environ 2 km à l'aval des Deux Bras après la sortie du Cirque de Mafate.

L'observation des photographies aériennes montre nettement à la sortie des gorges l'érosion de la rive droite au niveau du village de la rivière des Galets.

D'une façon générale, on note la diminution de la surface (largeur) du cône actif de 1961 à 1989.

La tendance à l'enfoncement des chenaux et du lit est déjà très nette avant 1989 c'est à dire à une date antérieure à l'endiguement. On notera de plus que bien que les extractions aient été arrêtées depuis 1991, le système présente encore des traces de perturbations non négligeables à l'amont. Ceci met en évidence l'inertie de la réponse de la rivière face à ce type de perturbation.

La décision prise d'arrêter les extractions dans le lit de la rivière des Galets semble, de ce fait, tout à fait justifiée.

4.4.2. Rivière St Etienne (planches 4.5 et 4.6)

L'ensemble des observations réalisées (observations de terrain, le suivi des profils topographiques au pied des ouvrages d'art, les photographies aériennes etc.) montre clairement une érosion linéaire du segment aval de la Rivière St Etienne. Cette érosion peut atteindre localement 5 m bien au delà des extractions et entre les fosses aval et la zone d'extraction amont.

Cette érosion se manifeste par entaille des chenaux (de l'ordre de 4 à 5 m) dans les alluvions antérieures, de façon identique à ce qui a été observé dans la rivière des Galets. Lors des crues, la rivière remobilise la grande majorité des sédiments présents (galets) dans son lit. Mais ces crues n'ayant pas la compétence de transporter les plus gros blocs (> 1 m), ceux-ci restent sur place et, d'une certaine manière, sont concentrés sur place. Ceci donne au lit un aspect chaotique caractéristique.

L'érosion linéaire remonte actuellement jusqu'au niveau de l'Îlet Roland dans le Bras de Cilaos. L'existence d'affleurement de basalte massif sous le pont de l'Entre Deux, sur le Bras de la Plaine, constitue à l'heure actuelle un point dur pouvant à terme devenir un seuil bloquant la propagation de l'érosion régressive.

L'encaissement des chenaux dans la rivière St Etienne est très net, il s'accompagne d'une réduction de la largeur du lit vif dans le cône, au niveau du pont de la route nationale et jusqu'à l'Entre-Deux.

Il semblerait que le pont de la route nationale, dont un segment en rive gauche est construit en remblai, ait largement contribué à se resserrer et à l'encaissement du lit (en plus des autres facteurs) en diminuant la section d'écoulement et, de ce fait, en concentrant et pérennisant les écoulements sous le pont *sensu stricto*.

Par ailleurs, ce remblai a occasionné une stabilisation et une fixation des alluvions situées rive gauche à son amont immédiat. La présence dans le lit de la rivière d'alluvions cimentées, probablement déposée par une coulée boueuse, a toutefois opposé une résistance plus grande à l'érosion que les dépôts alluviaux non cimentés et moins cohérents présents ailleurs.

Ce rétrécissement du lit est accompagné par une mise en culture progressive ou parfois brutale des basses terrasses. Cette appropriation du domaine fluvial naturel par l'homme est nettement mise en évidence au niveau du Cap Assiette, par exemple, entre 1961 et 1989.

4.4.3. Rivière du Mât (planche 4.7 et 4.8)

Le lit de la rivière du Mât présente des zones où le lit est localement rehaussé suite à des dépôts de type "bouffées", c'est à dire des dépôts effectués en une phase d'accumulation lors d'une crue et limitées dans l'espace.

Dans ces zones, les apports ont obligés la rivière à divaguer sur un lit rehaussé occasionnant des inondations des terres. Les chenaux sont actuellement en phase érosive dans ces zones de rehaussement, la rivière cherchant à retrouver un nouveau profil d'équilibre.

Par ailleurs, la rivière attaque localement ses berges rive droite puis rive gauche qui sont constituées d'alluvions anciennes. Cette évolution des berges s'observe sur les différentes missions de photographies aériennes, l'instabilité actuelle des berges est mise en évidence par des sapements de base, des arbres tombant dans le cours d'eau etc.

Le rehaussement du lit de la rivière du Mât est attribué, par les exploitants et la DDE, à la saison cyclonique de 1993. Durant cette saison, les pluies dans le bassin versant de la rivière du Mât ont été significatives sur l'ensemble de l'année et répartis sur trois mois (Janvier, Février et Mars) avec des valeurs de pluies efficaces comparables pour chaque mois et relativement faibles par rapport à des événements de type Hyacinthe.

Par ailleurs, la comparaison des photographies aériennes de 1984-1989 montre qu'entre ces deux prises de vues, un engraissement significatif s'était déjà produit dans le cône. L'observation des précipitations durant cette période montre que les années 1984-85-86 ont subi des pluies significatives réparties sur plusieurs mois avec une nette prédominance des précipitations durant le mois de Février sans atteindre toutefois une concentration extrême.

Ceci semble confirmer notre hypothèse concernant les phases d'érosion, transport et dépôts attribuées à deux types d'événements ou saisons cycloniques :

- **type I** :(événements majeurs) : déclenchement de glissements de terrain et d'éboulement dans le bassin versant amont (cirque) et action de purge dans le lit des rivières. Le transfert des "matériaux glissés des versants" vers la rivière n'est pas total. La capacité de transport (voir 1.2.2) est supérieure à la disponibilité en matériaux présents effectivement dans l'écoulement (débit solide). Les écoulements se chargent en matériaux du lit.
- **type II** : déclenchement de transport solide et constitution de dépôts. La capacité de transport est plus faible que la disponibilité en matériaux présents dans l'écoulement (mis à disposition à l'amont, reliquat des précédents éboulements). Les écoulements se déchargent progressivement en matériaux et les dépôts s'organisent dans le lit.

Les cyclones majeurs permettent la mobilisation et la mise à disposition de la rivière de matériaux dans les bassins versants amont.

Les crues et les coulées de boue qu'ils génèrent sont de première importance et se caractérisent essentiellement par un rôle érosif et purgatif. En revanche, les événements plus modérés se succédant sur plusieurs mois dans l'année, semblent assurer le transport solide des matériaux mis à disposition lors des grands cyclones de l'amont vers l'aval et assurent ainsi le transit puis le dépôt des matériaux.

On notera la présence de "verrou" en basalte massif dès le pont de la route nationale pouvant à terme devenir des seuils et empêcher ainsi à l'érosion du lit de se propager en amont.

A la différence des deux autres rivières, on constate l'existence d'un stock de matériaux. Il faut toutefois signaler que les fosses d'extractions ont été localisées à des positions fixes qui ne correspondent pas nécessairement aux zones de dépôt, le lit évoluant et se déplaçant latéralement.

De ce fait, l'extraction des matériaux ne s'effectue pas dans les zones où elle pourrait se justifier par un dragage préventif contre les inondations.

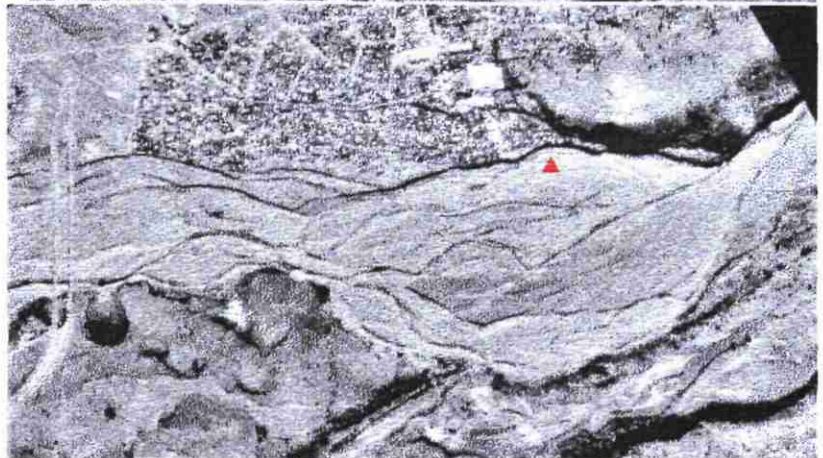
1961

Réseau en tresse à chenaux peu encaissés.
Un chenal dominant est visible rive gauche
(au Sud)



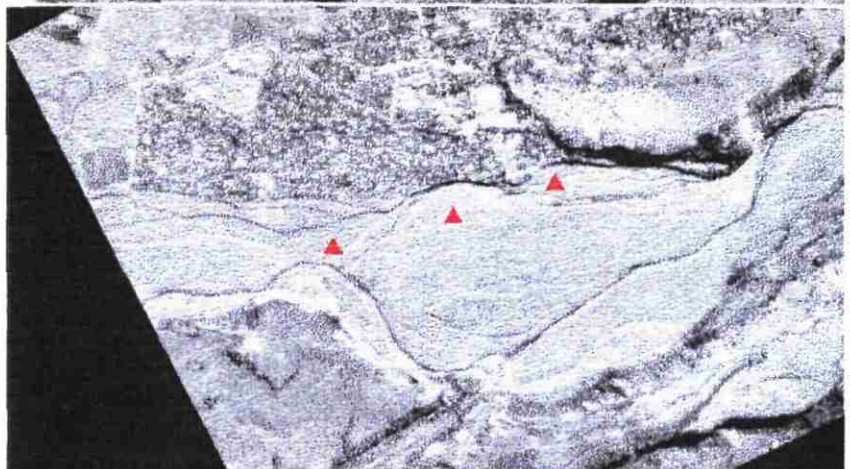
1978

Des chenaux multiples s'individualisent.
La berge rive droite a été érodée au sud
du village (triangle rouge).
3 chenaux majeurs sont observables:
rive droite, rive gauche et au milieu de la
plaine.
Le développement du village est très
marqué.



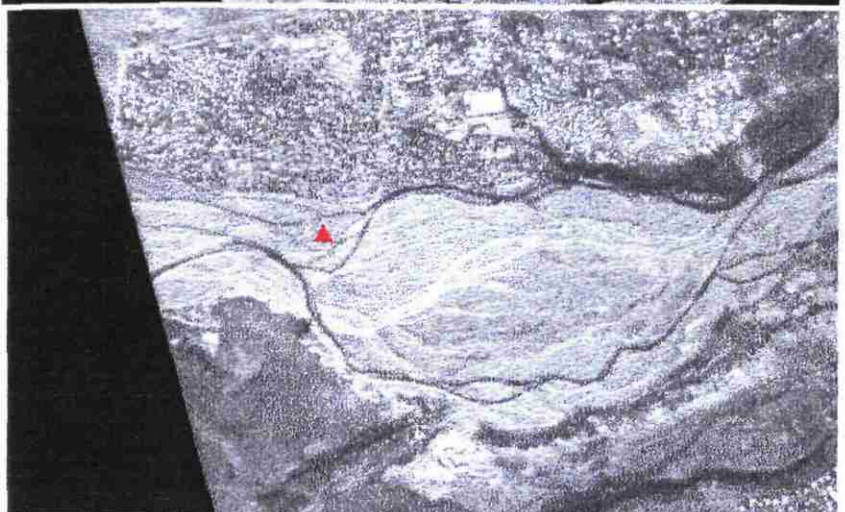
1984

Deux chenaux bien marqués (rive droite et gauche),
poursuite de l'érosion en cupule de la berge rive
droite au niveau du village (triangles rouges)



1989

Les deux chenaux perdurent et s'encaissent.
Le chenal rive droite longe toujours la berge
le long du village. Le chenal rive gauche a
modifié son cours (méandres). Un chenal
central semble se réinstaller.
Erosion d'une basse terrasse rive droite
(triangle rouge)



Echelle approximative

1000 m

Planche 4.5 : Evolution du cône de la rivière St Etienne de 1961 à 1989

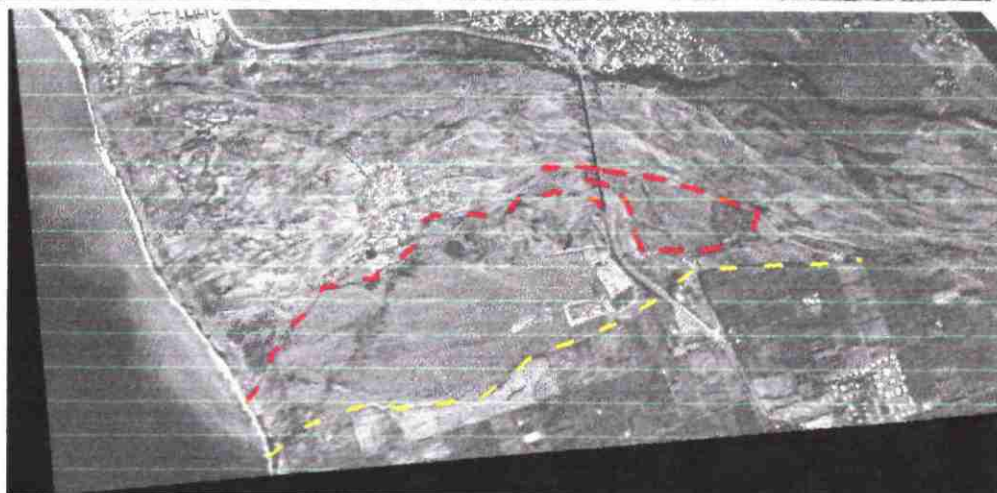
1961
 Le chenal en tresse à chenaux superficiels
 agants



1978
 Le chenal est bien individualisé en
 rive droite. Un chenal secondaire est
 présent dans l'axe de la vallée. Ces deux
 chenaux sont plus encaissés que dans
 le cône de 1961.
 Présence du nouveau pont de la RN.
 Développement de l'agglomération
 de St Louis



1989
 Le chenal en rive droite est toujours
 présent et bien observable à l'amont du pont.
 La zone aval apparaît comme fortement perturbée.
 On notera la réduction de largeur du cône
 aval par rapport à 1961/1978 (tirets jaunes)
 et la stabilisation des sédiments à l'amont
 du pont (tirets rouges). Cette
 réduction de la largeur est de l'ordre de
 40%.



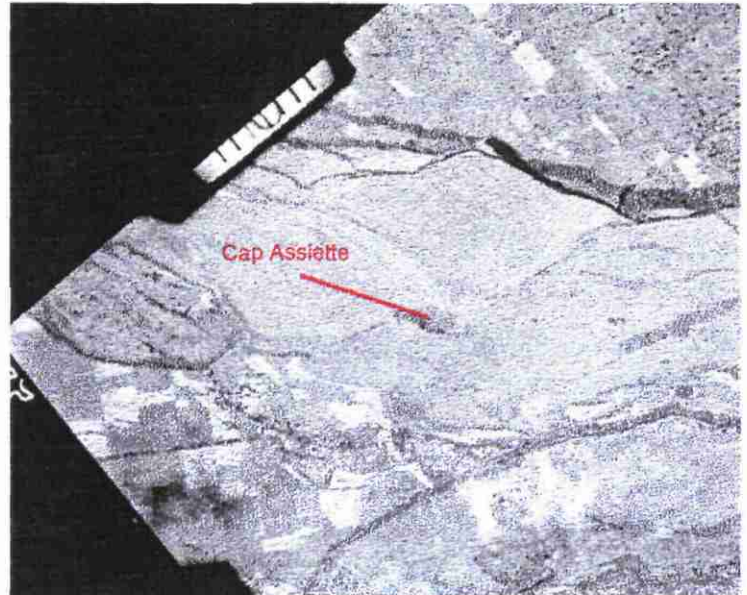
Echelle approximative

500 m



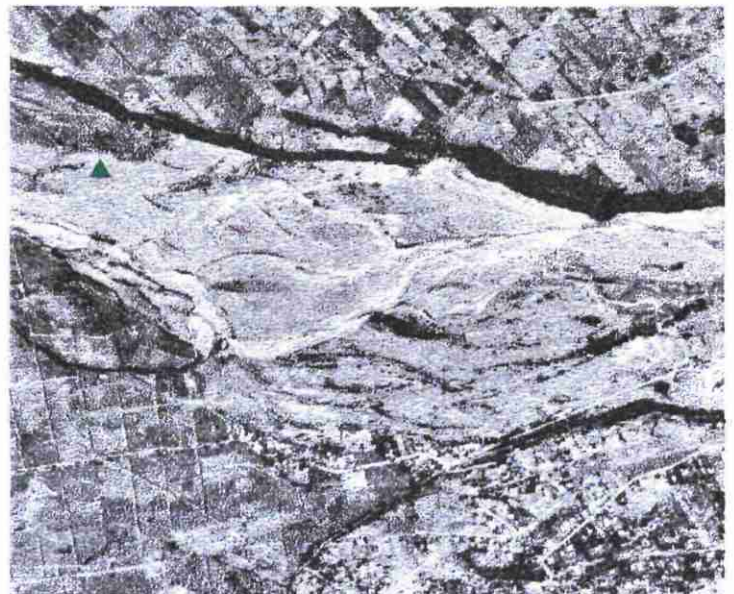
1961

La plaine alluviale présente un réseau en tresse, un chenal à écoulement pérenne est présent le long de la rive droite. Le Cap Assiette est individualisé au milieu de la plaine alluviale.



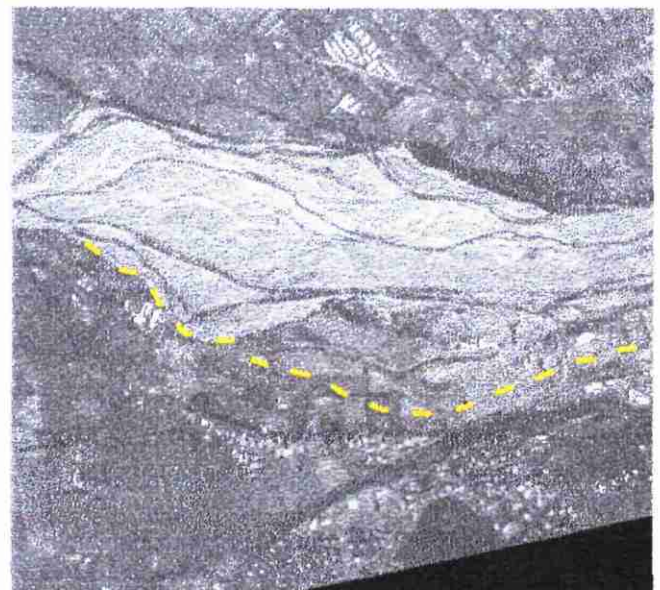
1978

Les chenaux sont plus nombreux, Le secteur rive gauche de la plaine alluviale est en cours de végétalisation ainsi qu'une basse terrasse en rive droite (triangle vert)



1989

Quatre chenaux s'individualisent. Une partie du secteur rive gauche ainsi que la basse terrasse rive droite ont été mis en culture, le Cap Assiette se retrouve en bordure du domaine alluvial. La surface de la plaine alluviale a fortement réduite par rapport à 1961 (tirets jaunes)

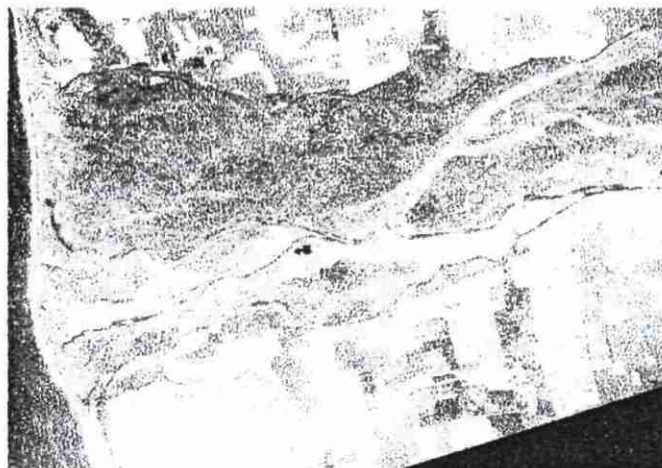


Echelle approximative



1961

Les écoulements d'étage sont situés en rive gauche. Rive droite on notera un chenal majeur actif durant les crues (trets bleus). Secteur rive droite, les bancs et les chenaux sont nets, la végétalisation est en cours



1978

On note la modification des écoulements avec des nouveaux chenaux. L'ancien chenal de crue rive droite est délaissé, certains bancs sont végétalisés. Apparition de quelques cultures de canne en rive droite du cône (losanges verts)



1984

La culture de canne gagne sur le secteur rive droite du cône (losanges verts). Des fortes érosions de la berge rive gauche partie amont se sont produites (triangles rouges). Les bancs sont fortement végétalisés et le secteur amont rive droite est en cours de végétalisation



1989

L'ensemble du secteur rive droite du cône a été mis en culture (losange vert) ou est occupé par les installations des extracteurs. La berge rive gauche a été localement érodée. La surface occupée par les bancs végétalisés a diminué suite probablement à une phase d'apport de matériaux et d'envoyage partiel de ces bancs. Des modifications du trait de côtes apparaissent nettement de 1961 à 1989.



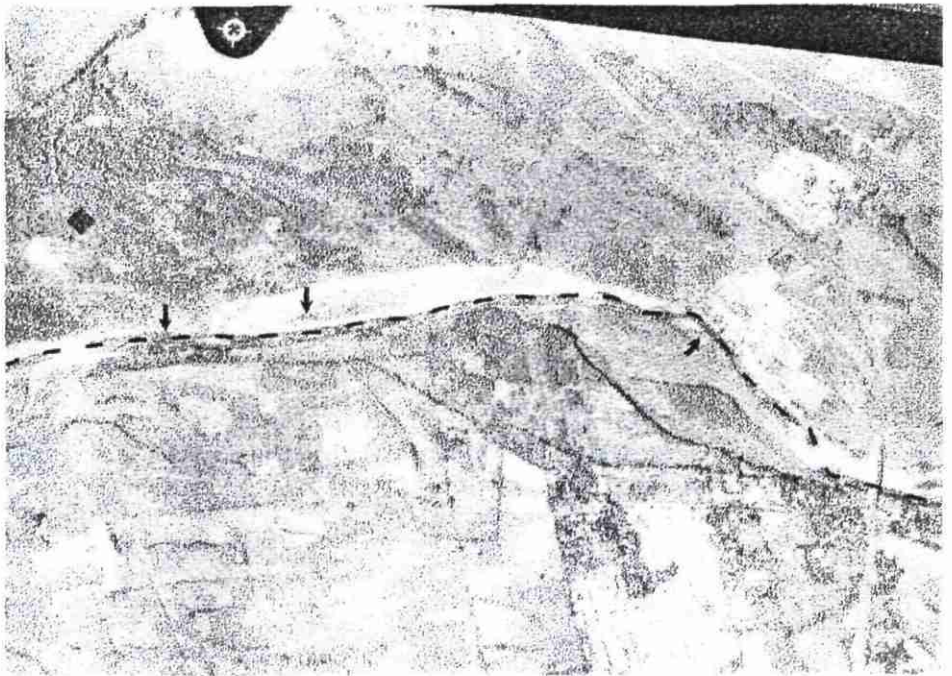
Echelle approximative

250 m

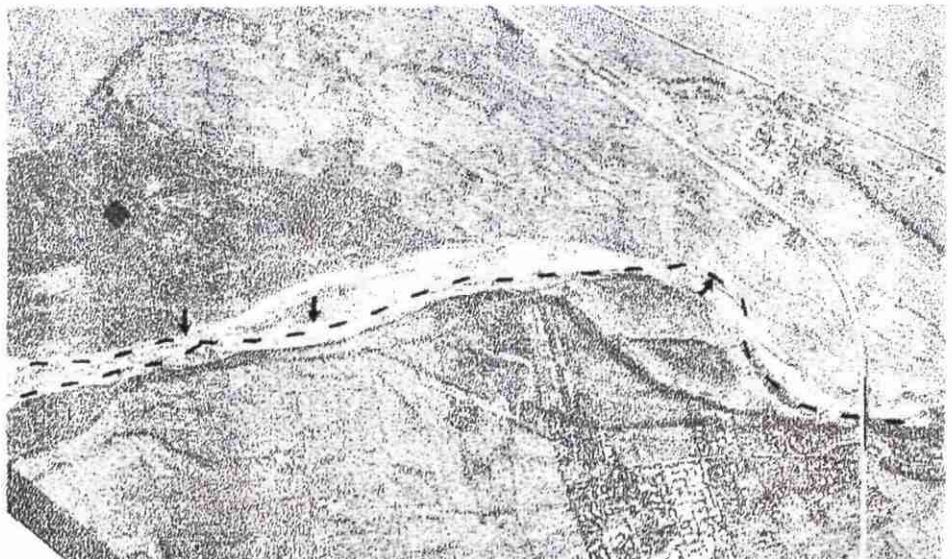
1978



1984
Le tracé en amont est modifié, la rivière longe la rive droite et abandonne le passage entre les deux bancs. Apparition du nouveau pont. Plus en aval, la végétation colonise l'ancienne zone alluviale (losange vert), la rivière érode ses berges rive droite et rive gauche (flèches rouges)



1989
La rivière reste sur la rive droite du cours à l'amont et amorce un méandre. Les deux bancs se stabilisent. A l'aval l'érosion de la rive gauche se poursuit tandis que rive droite, la végétation gagne l'ancienne plaine alluviale.



Echelle approximative

500 m

5. CONCLUSIONS

5.1. RECOMMANDATIONS SUR LES EXTRACTIONS

Il existait une volonté de réduire les volumes des extractions avant la nouvelle législation. Les problèmes sont anciens. Ils avaient déjà été constatés avec des affouillements et un enfoncement du lit. Ceci avait conduit à des demandes d'études soumises à SOGREAH. Les problèmes existaient avant même que les extractions n'atteignent les valeurs actuelles ⁽⁶⁾.

Il faut toutefois rappeler que le comportement actuel n'est pas irréversible et toujours dans le même sens mais qu'il dépend des phénomènes climatiques et processus se produisant dans les bassins versants.

Si des phénomènes de grande ampleur se produisent dans le bassin versant, ils pourraient fournir, avec un délai de transmission variable (cf. l'éboulement du Bras Rouge et Mahavel), une charge solide susceptible de provoquer des engraisements localisés et/ou généralisés des rivières. De ce fait, la tendance actuelle à l'encaissement pourrait s'inverser ce qui occasionnerait une remontée du lit pouvant être préjudiciable à l'occasion de crues : inondations et dommages aux ouvrages d'art. Dans ce cas des curages pourraient s'avérer nécessaires.

Il faut rappeler que pour être significatif, les rivières doivent montrer un engraissement fort dans l'ensemble ou une grande partie de leur lit. Un engraissement localisé ne saurait le justifier du fait de son rôle d'accumulateur temporaire de charge solide remobilisable dès le prochain événement météorologique significatif. Il peut y avoir un engraissement à l'aval simplement lié à une érosion du lit en amont remobilisant le stock déjà en place.

Les extractions, compte tenu du contexte naturel et de la tendance d'évolution actuelle des ravines devraient se limiter à des dragages dans les zones où le rehaussement du lit induit un risque d'inondation. Ces zones d'extractions sont donc délimitées en fonction de l'évolution des rivières, le suivi des méthodes d'extraction et des volumes extraits devront être maîtrisés.

Autres impacts possibles :

L'importance des extractions réalisées au cours des dernières années a dû jouer un rôle non négligeable dans l'évolution du trait de côte (érosions). Cette évolution est perceptible qualitativement à travers l'observation rapide des photographies aériennes de 1961 à 1989. Ce volet nécessiterait une étude spécifique.

Quand bien même les extractions ne seraient réalisées que sur les secteurs présentant un rehaussement significatif du lit (prévention des risques d'inondation), il conviendrait de s'assurer par une étude spécifique que ces pratiques occasionnelles ne portent pas préjudice aux écosystèmes.

Cet aspect mérite d'autant plus d'être examiné qu'il est probable que ces extractions de nature préventive soient autorisées sur des secteurs différents (mitage généralisé par migration des zones de rehaussements).

⁶ nota: cela pourrait confirmer que le comportement actuel n'est pas uniquement du aux extractions et qu'il serait sous contrôle initial des phénomènes naturels, les extractions n'ayant fait qu'exacerber celui-ci.

5.2. RECOMMANDATIONS POUR UN SUIVI

A travers cette étude, nous avons pu constater le nombre et la diversité des difficultés rencontrées dès lors que des données précises faisaient défaut :

- exhaustivité des volumes extraits (sous-estimation, contrôles possibles?),
- organisation des extractions (lieu, date, volumes, techniques). On assiste généralement à une exploitation de type "cueillette", au gré des possibilités d'accès d'un secteur et des épaisseurs disponibles. Le paysage alluvial apparaît alors chaotique. L'extraction en fosse, bien localisée et circonscrite, n'est très généralement pas de mise. Toute tentative de prendre en compte l'historique (lieu, date et volumes) des extractions est impossible,
- cartes et profils en long et en travers des rivières, à une échelle adaptée et régulièrement levés. A défaut, nous avons dû travailler sur les données existantes (photographies aériennes, profils au droit de certains ouvrages). Ces données, dont l'acquisition initiale avait d'autres finalités, ne sont pas toujours à l'échelle des phénomènes qui mériteraient d'être observés (échelle des photos, intervalle de temps entre deux prises de vue) ou ne sont pas représentatifs (profils en travers sous un pont, qui apporte lui-même des perturbations dans les écoulements et donc influence le fond du lit).

Pour pallier à toutes ces insuffisances et afin de disposer d'éléments tangibles et indiscutables pour une gestion raisonnée et éclairée des extractions, il apparaît nécessaire de disposer des éléments suivants :

- les évolutions des lits des rivières (cartographie 3D) et l'appréciation quantitative de l'impact des événements cycloniques (dynamique naturelle d'évolution des lits, stockages et déstockages) et des extractions qui continueraient d'être autorisées (notamment les curages préventifs),
- la localisation exacte des sites exploités (extraction de granulats),
- l'estimation des volumes extraits (volumétrie des fosses).

Des recommandations sont apportées :

- Nécessité d'effectuer un suivi de chaque ravine après chaque saison cyclonique afin de déterminer qualitativement (tracé) et quantitativement (volume) l'évolution du lit. Ce suivi pourrait être effectué par la réalisation de photogrammétries à haute résolution sur les cônes et segments avals des ravines. Cette photogrammétrie pourrait être associée à des reconnaissances de terrain (géomorphologie) afin de repérer et de caractériser le comportement des segments plus à l'amont. Ceci afin de déterminer l'évolution des zones de stockage temporaire et les zones à comportement érosif.
- Nécessité de définir une méthode de planification des curages. Ceci implique une surveillance régulière (après chaque saison cyclonique par exemple) des zones de stockage temporaires potentielles. Sachant qu'il existe un délai entre le dépôt dans un "réservoir" et l'arrivée de cette charge solide dans les zones aval (cônes), ces délais devront être estimés, l'évolution des stocks dans les réservoirs suivie. Cette approche passe par l'analyse des évolutions observées (point précédent) afin d'aborder une démarche prospective.

5.3. PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE SUIVI

Les techniques pour un suivi exhaustif (cartographie de grandes superficies) relèvent du domaine des techniques de levés par photographie aérienne.

A l'aval, un travail d'interprétation et de confrontation carte/terrain doit compléter le dispositif (géologue/géomorphologue).

Nous présenterons ci-après les techniques amont offertes aujourd'hui en matière de cartographie par photographie aérienne qui répondraient au mieux à l'objet étudié (grandes superficies à couvrir, accès difficiles, problèmes de cheminement pour des géomètres au sol, ...).

5.3.1. L'orthophotographie numérique

5.3.1.1. Avantages

Ce produit est proposé par l'IGN et quelques grosses entreprises privées spécialisées dans la photogrammétrie.

Aujourd'hui, le recours à l'orthophotographie numérique se développe pour les raisons suivantes :

- (i) très bonne précision lors du calage en coordonnées géographiques (corrections des déformations géométriques liées à l'objectif de la caméra et au relief)
- (ii) coût abordable, inférieur à un levé photogramétrique (carte)
- (iii) l'orthophoto est un document qui représente tout ce qui est visible (exhaustivité de l'information géographique), à l'opposé du levé photogramétrique qui ne représente que ce qui a été levé (routes, parcelles, maisons, ...). C'est la différence qu'il y a, par exemple, entre une photo aérienne IGN au 1/25000 et une carte IGN au 1/25000 : une même orthophoto peut faire l'objet d'interprétations thématiques variées, selon les besoins; le levé photogramétrique est figé une fois pour toutes.
- (iv) l'orthophoto est un document numérique, il s'intègre aisément dans tout SIG, il peut être retravaillé (zoom, découpages, contrastes N/B ou couleurs).
- (v) l'obtention d'une photo-mosaïque (recollage de plusieurs orthophotos) est immédiate.
- (vi) un Modèle Numérique de Terrain (MNT) peut être obtenu (généralement, prestation fournie en option), là où le levé photogramétrique ne représente que les lignes d'égale altitude.

Pour les vallées et cônes alluviaux, ces avantages peuvent être mis à profit pour obtenir une couverture totale d'une bande alluviale, une représentation fidèle de celle-ci (géoréférencement, MNT, qualité et taille du pixel photo), une interprétation des traits géomorphologiques, une localisation exacte des ouvrages et des zones d'extraction, et un état de référence de l'état du lit des rivières (herges, topographie du lit, végétation, ...)

5.3.1.2. Coûts

Les coûts sont variables en fonction de l'échelle de prise de vue (nombre de couples photos) et de la sinuosité du lit de la rivière (plan de vol : plusieurs passages de l'avion).

5.3.1.3. Spécifications techniques générales

La précision obtenue est fonction de l'échelle de prise de vue (quelques exemples) :

échelle de prise de vue	format d'une image utile	résolution du terrain	pas du MNT	écart type - planimétrie	écart type - altimétrie	échelle des sorties graphiques
1:40000	7.3 x 7.3 km	1 m	5 m	0.80 m	0.9 m	
1:30000	5.47 x 5.47			0.60 m	0.65 m	1:10000 à 1:5000
1:15000	2.74 x 2.74	0.40 m	0.40 m	0.30 m	0.32 m	1:5000 à 1:2000
1:4000	0.73 x 0.73			0.08 m	0.09 m	1:2000 à 1:500

nota : ce tableau présente des cases vides (diverses sources d'information)

La précision annoncée dans le tableau correspond à un levé régulier. Si la stéréo-préparation (détermination de points d'appui x y z) n'est pas réalisée sur le terrain (par exemple on repique d'anciennes prises de vue aériennes), l'écart-type est à multiplier par 1.5.

Les prises de vue peuvent être en noir & blanc (émulsion panchromatique) ou en couleur.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Le Gourières (1961) Hydrologie superficielle de la Réunion
- SOGREAH/LCHF (1988) Schéma d'extraction de la rivière St Etienne Rapport
- SOGREAH/LCHF (1988) Schéma d'extraction de la rivière du Mat
- BCEOM SOGREAH (1992) Guide d'estimation des débits de crue à la Réunion.
- SOGREAH (1990) Rivière des Pluies, Schéma technique de protection contre les crues
- SOGREAH (1992) Schéma technique de protection contre les crues. Rivière des Remparts. Modèle physique au 1/90ème de la Rivière des Remparts au droit du Dépôt Goyaves, St Joseph Réunion
- BRGM (1985) Les systèmes érosifs des grandes ravines au "vent" à l'île de la Réunion, leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des Hauts (rapport 85 SGN 121 GEG)
- BRGM (1986) Les systèmes érosifs des grandes ravines au "vent" à l'île de la Réunion, leurs conséquences sur l'aménagement du littoral et des Hauts. Volume II (rapport 86 SGN 132 GEG)
- LCHF-SOGREAH (1988) Schéma d'extraction de la Rivière des Pluies. Dossier 84001 Août 1988 - LCHF - SOGREAH
- BCEOM (1996) Boulevard Sud, raccordement Est Gillot, étude de tracé routier. Etude préliminaire. B. Etude hydraulique

ANNEXES

ANNEXE 1 - ANALYSE PRELIMINAIRE DES CONDITIONS DE TRANSPORTS SOLIDES ET EXPLOITATION DES MATERIAUX DANS LA RIVIERE DES REMPARTS

1- PRESENTATION GENERALE DU CONTEXTE

Orientée Nord Sud, la Rivière des Remparts prend naissance à la base de la Plaine des Remparts et rejoint l'Océan à Saint Joseph.

Elle est l'une des plus longues rivières de l'île et représente une entité particulière, commandée essentiellement par la mise en place de l'édifice volcanique de la Fournaise (Fig. 1).

En mai 1965, elle a été le témoin d'un vaste écoulement d'extension catastrophique avec formation d'un barrage susceptible de retenir 20 000 000 de mètre cube d'eau. Ce barrage (embâcle) a menacé la ville de Saint Joseph pendant plusieurs semaines (Fig. 2).

Cet apport massif de matériaux, le démantèlement progressif du barrage et les éboulements fréquents du rempart de Mahavel, très nombreux, en particulier en janvier 1996, (Fig. 3), contribuent à un apport important du flux de matériaux qui ont engraisé la vallée et rehaussé le lit de la rivière.

Ces matériaux s'évacuent mal vers l'aval compte tenu de la faible pente de la rivière et de la présence de plusieurs verrous rocheux qui ralentissent le courant en période de crue (Fig. 1).

Ainsi le cône alluvial, au niveau de Saint Joseph est très peu développé. Par ailleurs une coulée volcanique tardive a "figé" le lit de la rivière et freine notablement l'érosion régressive.

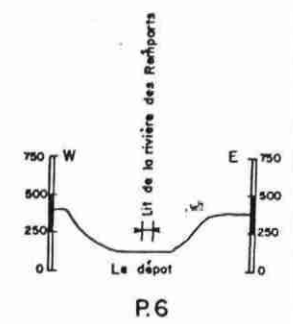
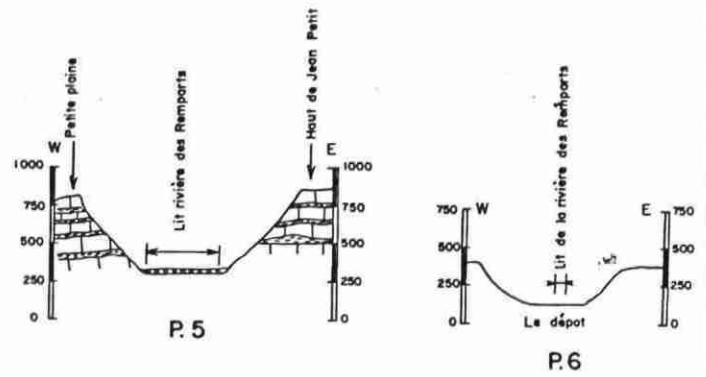
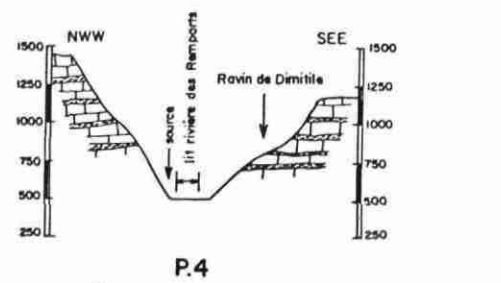
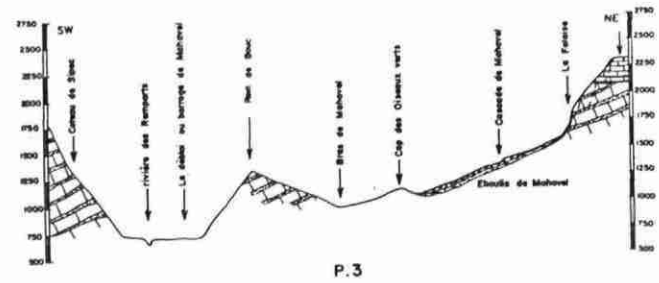
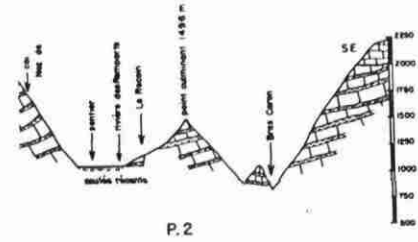
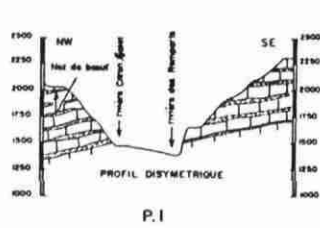
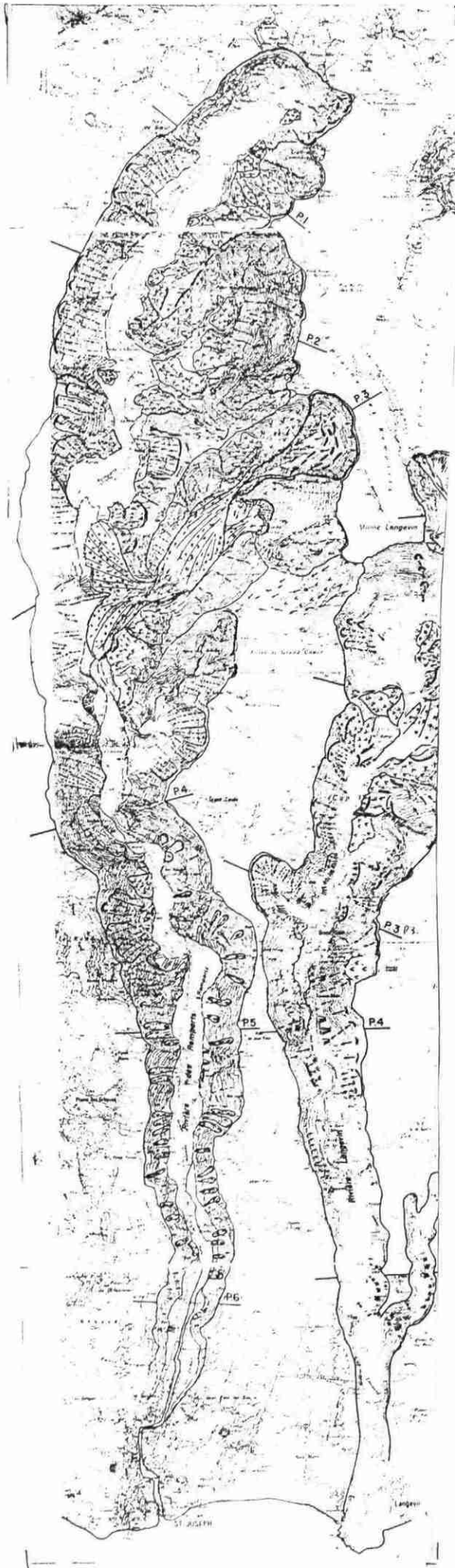
La figure 1 et le tableau qui suivent présentent les caractéristiques de l'érosion de la Rivière.

Plusieurs exploitants de matériaux se sont installés dans le cours moyen inférieur (Fig. 5).

Les sites d'extraction actuels résultent d'un compromis entre :

- le volume et donc l'épaisseur des matériaux exploitables, qui est limité par la coulée basaltique sous-jacente,
- les problèmes de transport liés aux distances et surtout aux problèmes d'entretien des pistes et d'accessibilité en hautes eaux. En effet le seul accès possible passe par le lit de la rivière.

Fig. 1 - Morphologie et profils de la Rivière des Remparts



- LEGENDE
- Rempart de rempart de falaise ou de rempart limitant l'écoulement de la rivière
 - Rempart de plateau ou de rempart (Grand Canal) 1
 - Lit interne des remparts
 - Lit de crête ou autre rempart deux versants
 - Lit de crête avec détachement
 - Ancrage au lit ou ligne d'attachement ou d'attachement au rempart active, au bordure de rempart
 - Echelle au rempart tout ou moins bien visible
 - Lit d'attachement et d'attachement active (Mafaret)
 - Petit attachement ou attachement réduit
 - Chute de bloc
 - Écoulement linéaire, en muraille
 - Attachement superficiel dans les remparts et "débouché" dans la végétation
 - Rampe concave, bédaine
 - Rampe convexe, ancrage superficielle
 - Petit cône d'éboulis
 - Grand cône d'éboulis du Brian de Mahavel avec barrage à l'est
 - Source

CARACTÉRISTIQUES DES ZONES

UNITES - ZONES	LOCALISATION GEOGRAPHIQUE	CARACTERISTIQUES DE L'ÉROSION	CONSEQUENCES SUR LA STABILITE DES REMPARTS ET L'AMENAGEMENT DES VALLEES
B - LA RIVIERE DES REMPARTS			
<p>B1 - Cours supérieur</p>	<p style="text-align: center;">Du Rond des Remparts et du Nez de Boeuf au barrage du Bras de Mahavel</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Très nette dissymétrie entre l'encaissement rive gauche, avec des versants disséqués, désorganisés en nombreux panneaux tassés, d'aval-pendage, sensibles à l'érosion - et celui rive droite avec des remparts, quasi-verticaux, d'environ 1000 mètres de haut, de structure en amont-pendage et stable. - En rive droite, érosion limitée à un ravinement diffus ou localement concentré, quelques petits arrachements superficiels ou écroulements de bancs rocheux. Eau très rare dans les parois, en dehors du ruissellement. - En rive gauche, succession de niches d'érosion anciennes ou récentes, plus ou moins grandes (Ravine Creuse..., Bras Caron, Bras de Mahavel) et d'arêtes obliques à la vallée constituées d'écaillés et de panneaux tassés. Erosion active par ravinement superficiel et concentré, chutes de blocs et écroulements... mais aussi par de grands éboulements majeurs d'extension catastrophique (Mahavel, 6 mai 1965). 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité d'ensemble bien assurée pour les remparts rive droite mais chutes de pierres, de blocs et de petits écroulements toujours probables - Stabilité mal assurée en rive gauche, notamment au fond des grandes niches d'érosion (Bras Caron...). - Poursuite d'une érosion active et continue (par ravinement, glissement, écroulement...) dans le fond du Bras de Mahavel, avec risque d'un événement majeur comparable à celui de 1965. - En conséquence, la formation probable d'un nouveau barrage dans la rivière des Remparts exclut tout aménagement permanent de son cours supérieur. - L'existence de fissures inquiétantes, au sommet de la falaise de Mahavel commande une grande prudence dans l'entretien d'un sentier qui s'approche parfois dangereusement du bord du rempart.
<p>B2 - Cours moyen</p>	<p style="text-align: center;">Du barrage de Mahavel au lieu dit "Le Dépôt" (en amont de St Joseph)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Remparts symétriques de part et d'autre d'un lit majeur de 200 à 300 mètres de large, pouvant atteindre 500 mètres par endroit. - Erosion peu active et superficielle, liée à des ravinements diffus ou linéaires, des chutes de pierres et de blocs issues de barres rocheuses, et à quelques arrachements au sommet des remparts ("déboulés" dans la végétation) dans la zone altérée de basaltes. - Faible mobilisation des matériaux du lit majeur sauf en période de crues exceptionnelles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité en grand des remparts assurée mais éviter tout aménagement (ou équipement) à l'extrémité sommitale des falaises, siège d'éventuels désordres de surface (arrachements, petits écroulements...). - Risques de chutes de blocs ou de pierres au droit de certaines barres rocheuses, dominant parfois le chemin C56 de Rocheplate (mais tracé très changeant, au gré des crues qui remanient le lit majeur). - Régime hydraulique éventuellement perturbé par un écroulement de grande ampleur dans le cours supérieur (Bras de Mahavel) mais sans grandes conséquences pour St-Joseph situé à 13 km à l'aval.
<p>B3 - Cours inférieur</p>	<p style="text-align: center;">Du lieu-dit "Le Dépôt" au littoral (quartier Le Goyave et agglomération de St-Joseph)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rétrécissement très prononcé du lit de la rivière qui s'encaisse dans la traversée de St-Joseph, sur une dizaine de mètres, entre des berges quasi-verticales constituées de coulées basaltiques massives (à débit prismatique) reposant sur des niveaux scoriacés caverneux, présentant de fréquents vides - En conséquence, petits écroulements dans les berges localement sous-cavées, pouvant induire des désordres au sommet des talus, mais également, risques d'affouillement par les eaux des alluvions anciennes et petits éboulements locaux 	<ul style="list-style-type: none"> - En raison des risques d'écroulement en bordure immédiate des berges encaissées de la rivière des Remparts, dans la traversée de St-Joseph, éviter toute construction ne respectant pas un certain recul de quelques mètres à une dizaine de mètres, en fonction de l'état des talus

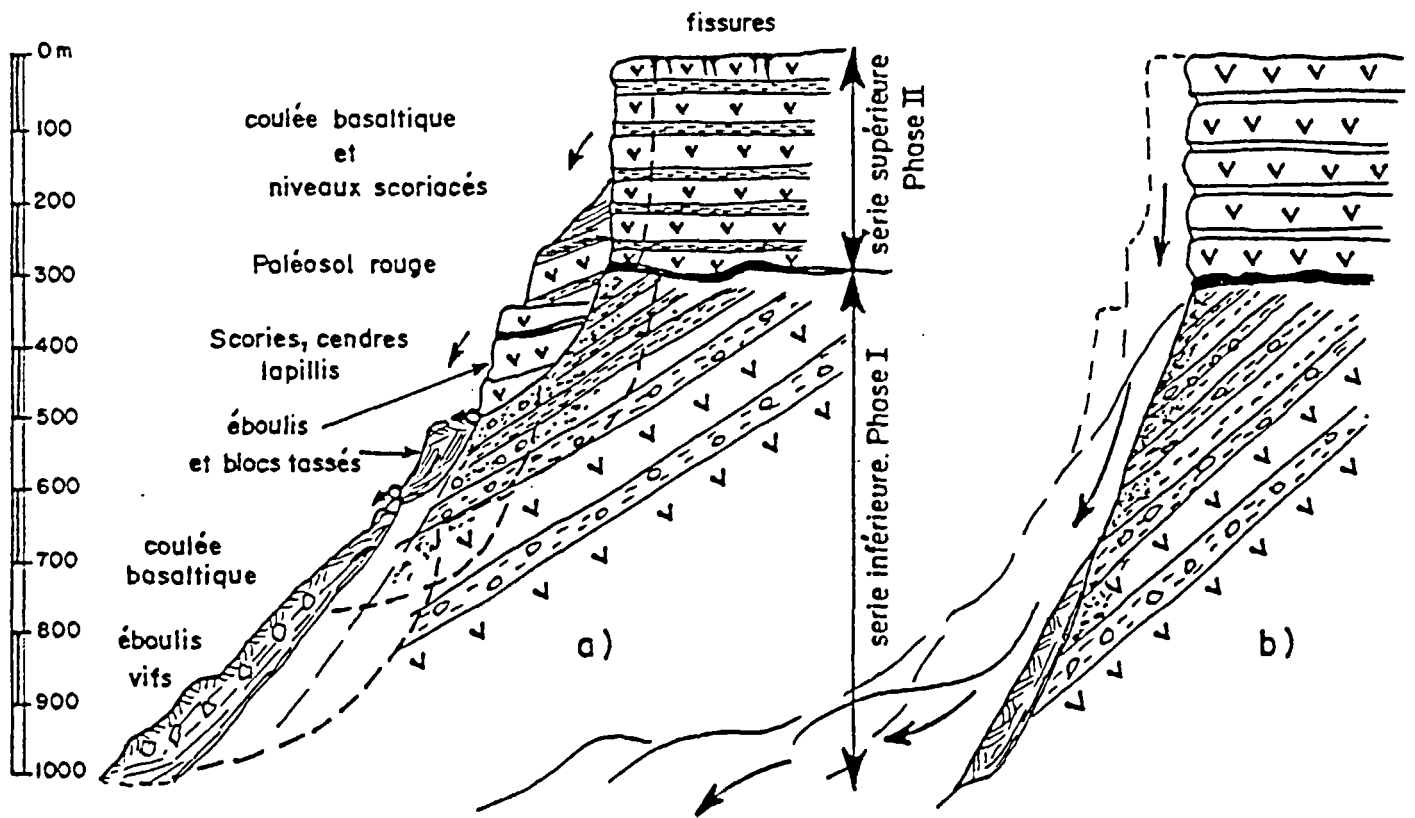


Fig. 2 - Coupe schématique de l'éroulement de Mahavel, 6 mai 1965

- a) avant
- b) après

Big. 3

VALLEE de MAHAVEL

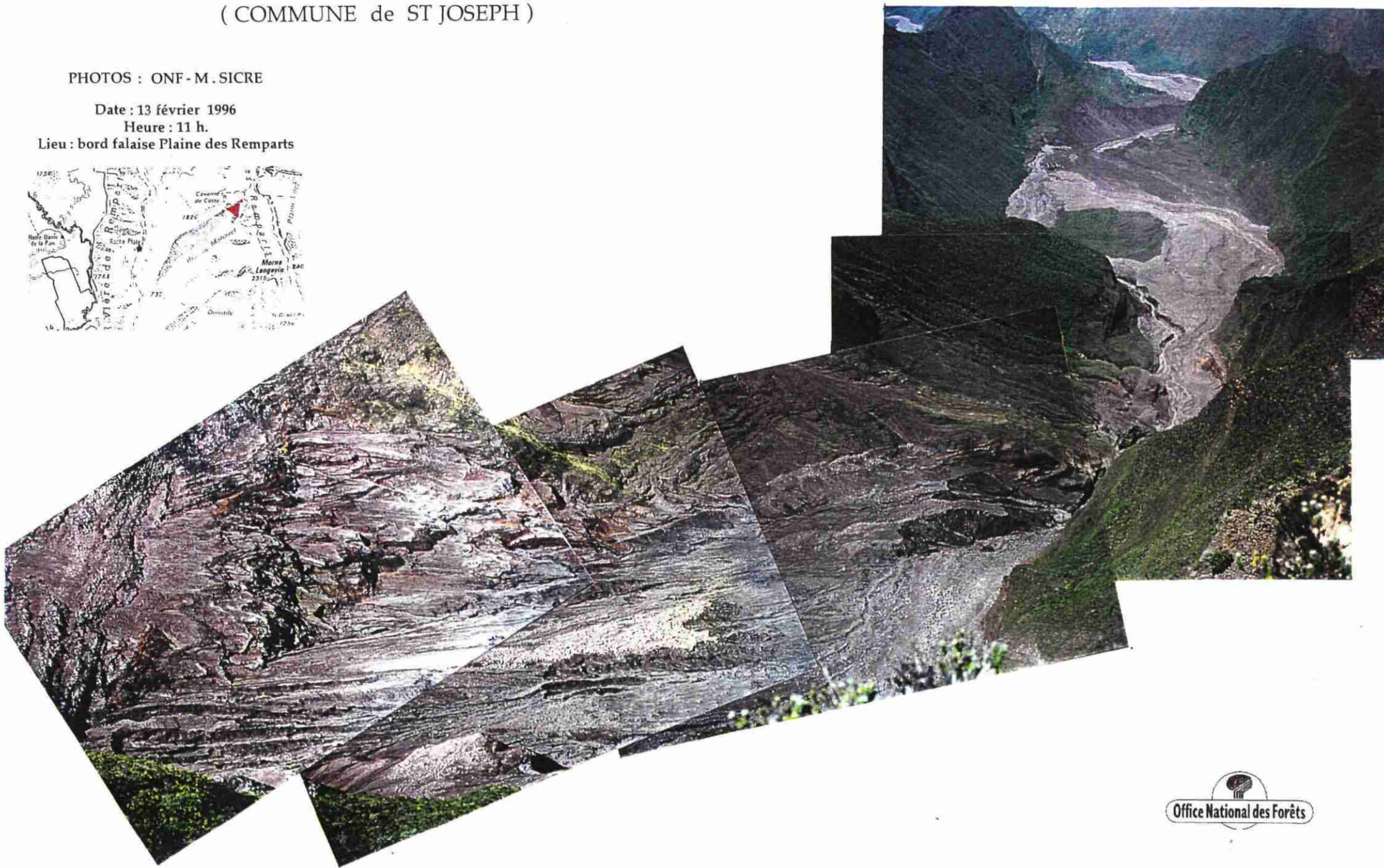
(COMMUNE de ST JOSEPH)

PHOTOS : ONF - M. SICRE

Date : 13 février 1996

Heure : 11 h.

Lieu : bord falaise Plaine des Remparts



2- PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DE LA RIVIERE DES REMPARTS ET EVALUATION THEORIQUE DES TRANSPORTS SOLIDES

2.1. Caractéristiques hydrauliques (Fig. 4)

Longueur : 25 km

Superficie du bassin versant : 60 km²

		Pentes	Longueur affectée
	de l'aval	4 %	9,25 km soit 37 %
		6 %	5,5 km soit 22 %
Profil en long	vers l'amont	1,5 %	2,5 km soit 10 %
		6 %	1,5 km soit 6 %
		20 %	1 km soit 4 %
		12 %	1,25 km soit 5 %
		23 %	3 km soit 12 %
		45 %	1 km soit 4 %

On note sur les profils :

- une pente très faible au droit du confluent du Bras de Mahavel, liée à la persistance des dépôts de l'éroulement,
- des pentes très faibles sur le cours aval, 6 et 4 % sur 59 % du tracé, liées à l'engraissement exceptionnel du lit de la rivière.

Débits à Saint Joseph :

- débit d'étiage 0,53 m³/s
- débit médian interannuel 0,75 m³/s
- débit de crue 100 - 200 m³/s
- crue exceptionnelle 1 300 m³/s

2.2. Evaluation préliminaire des transports solides

Débits de crues et débits solides au droit du Dépôt Goyaves (d'après modèle physique SOGREAH, 1992).

VOLUME DE MATERIAUX CHARRIES (10 ⁷ m ³)				
Temps de retour (ans)	Débit de pointe liquide (m ³ /s)	Volume d'eau écoulé (10 ⁷ m ³)	Volume de matériaux (10 ⁷ m ³)	Rapport solide/liquide (%)
2	350	4 300	50	1,17
10	720	8 850	129	1,46
30	980	12 100	185	1,53
100	1 300	16 000	253	1,58

"Donc, en année moyenne, avec les écoulements les plus courants à faibles débits qui représentent la plus grande part du volume écoulé, le rapport des volumes solide/liquide doit être de l'ordre de 1,10 à 1,30 %."

REMARQUES SUR MAHAVEL

L'effondrement de Mahavel en amont, en 1965, constitue une réserve de matériaux dont une partie de très fins qui, petit à petit, sont transportés vers l'aval.

On peut donc s'attendre à des apports potentiels plus forts que le simple charriage des matériaux de fond du lit, avec risque de dépôts et d'exhaussement au droit du site du dépôt Goyaves.

Le volume de matériaux de l'effondrement serait de 30 millions de m³ environ.

Le tracé comparatif des profils en long de la rivière à partir des cartes IGN de 1956 (1/50 000) et 1980 (1/25 000) montre que les dépôts restent localisés en amont de l'Îlet Dimitile sur environ 4 000 m de long. Les exhaussements des fonds y atteignent jusqu'à 25 à 35 m.

L'ancien lit qui s'était surcreusé a ainsi été comblé jusqu'au niveau de ses anciennes terrasses.

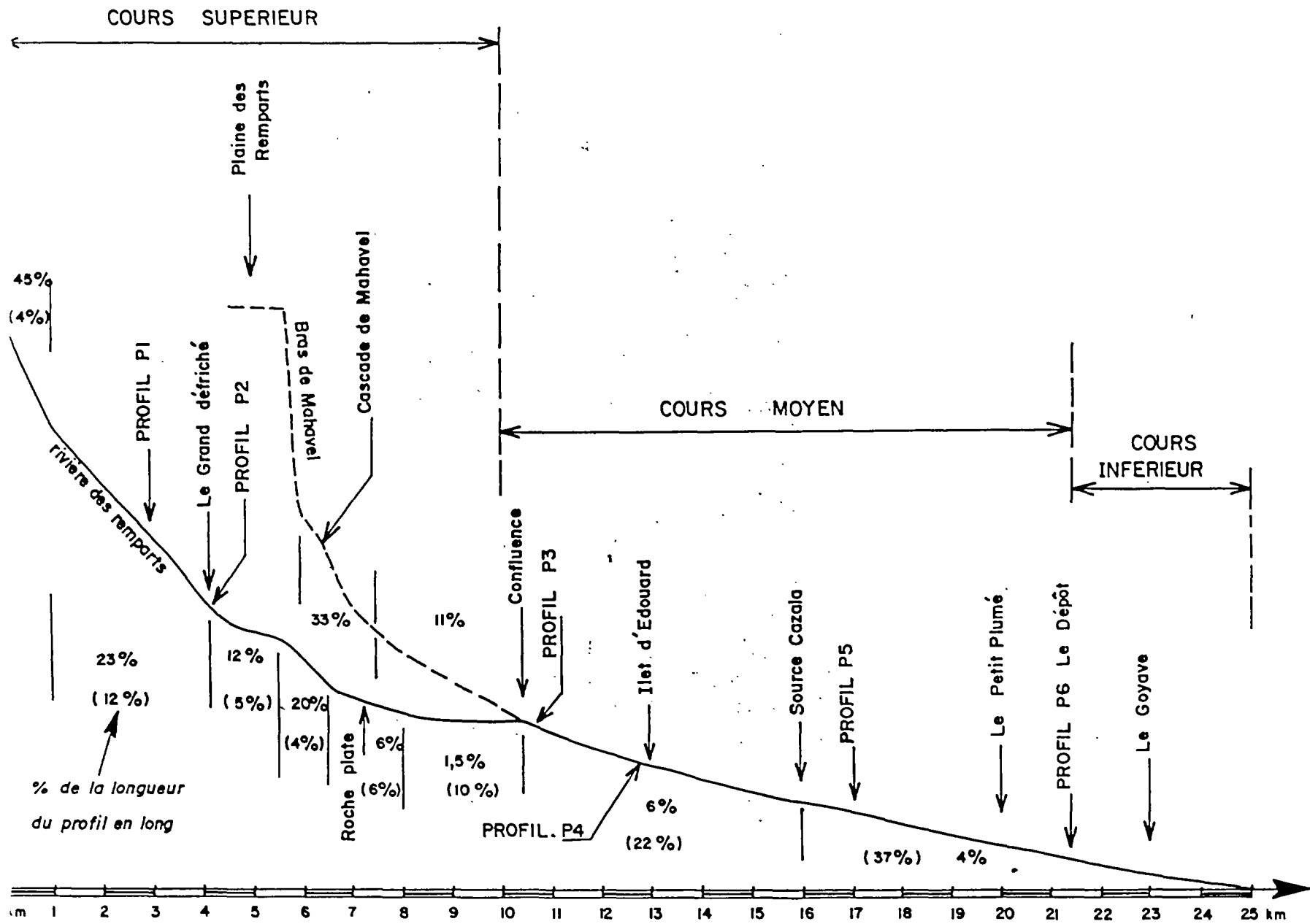


Fig. 4 - Profil en long de la Rivière des Remparts

3- L'EXPLOITATION DES MATERIAUX

3.1. Etat des connaissances (Fig. 5)

Deux sites d'extraction de matériaux alluvionnaires ont été répertoriés dans le cours aval de la rivière (cf. "fichier carrière") :

- le site répertorié 12296 X 8001, qui se situe dans la partie haute du cours aval de la ravine (entre les hauts de Jean Petit et Jean Petit). Ce site est le plus important de la zone, les matériaux sont concassés sur place,
- le site répertorié 12296 x 8006, qui se situe à l'aval de Saint Joseph. L'extraction était occasionnelle et destinée, à l'origine, à recalibrer le lit de la ravine avant la saison des pluies.

Les principales caractéristiques de ces deux sites d'extraction sont les suivants :

	12296 X 8001	12296 X 8006
Date d'ouverture	1992	1994
Hauteur exploitée	4 m	
Volume autorisé/an	300 000 m ³	
Production/an	800 000 m ³	
Régime de la carrière	déclarée, droit acquis	déclarée, droit acquis

3.2. Remarques quant à l'extraction des matériaux

Les flux de matériaux liés aux crues de la Rivière des Remparts sont importants du fait :

- du potentiel de transport intrinsèque de la Rivière qui a été estimé à 1,1 - 1,30 % par SOGREAH, soit de l'ordre de 50 000 m³/an en année "moyenne",
- du potentiel supplémentaire très important lié aux écroulements anciens (1965) et actuel de la falaise de Mahavel.

Ces matériaux, dont l'évacuation vers l'océan est freinée du fait de la morphologie de la Rivière, tendent à colmater le lit de la Rivière, ce qui peut poser problème pour l'évacuation des crues au niveau de Saint Joseph. Tout curage et donc exploitation à l'aval et surtout à l'amont de Saint Joseph est donc favorable à l'écoulement des eaux et protection contre les crues.

En contre partie ces exploitations sont limitées :

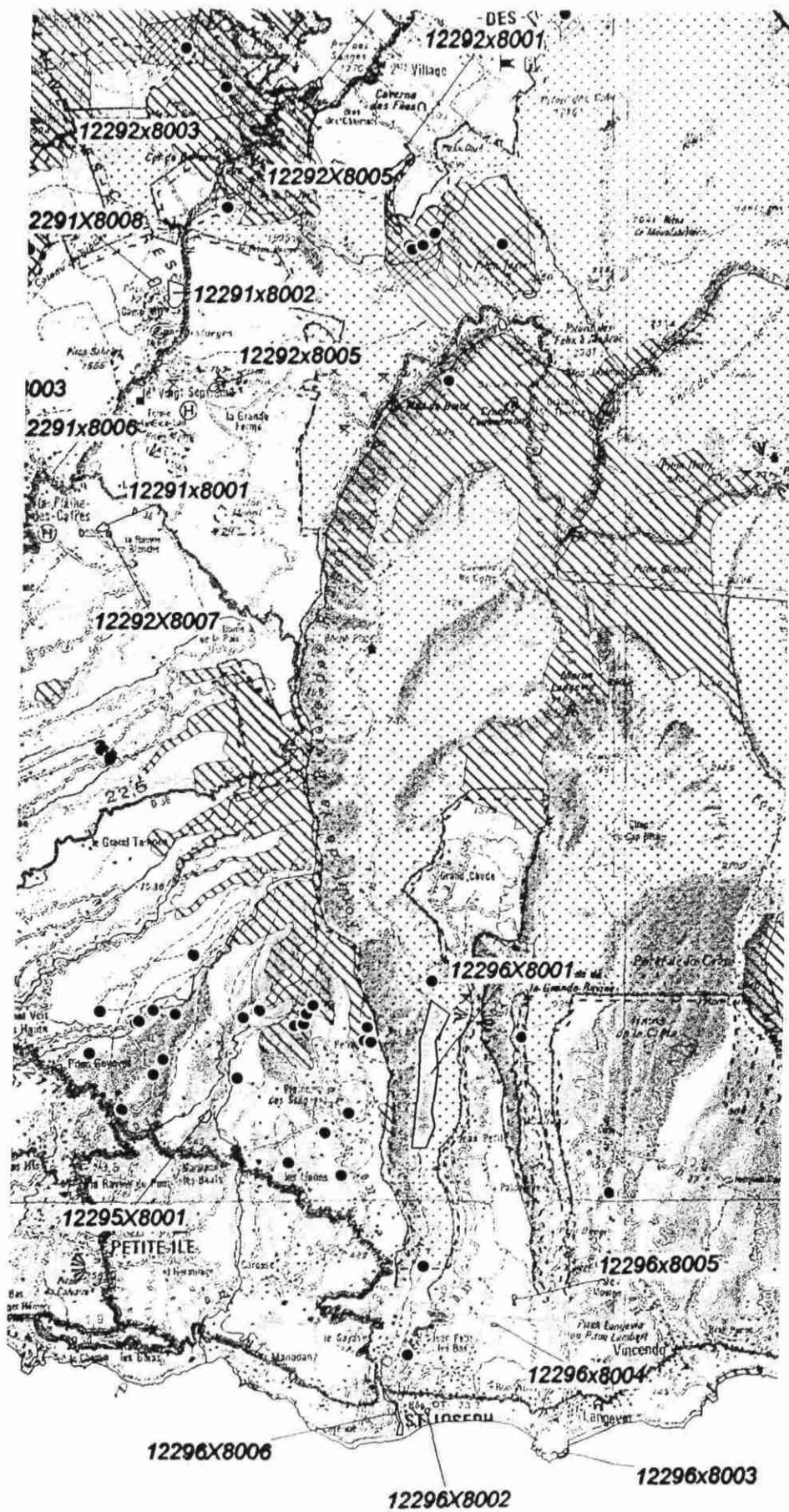
- à l'aval de Saint Joseph, par le faible volume des apports, pour les raisons évoquées ci-avant,
- à l'amont de Saint Joseph, par la faible épaisseur des alluvions sur la coulée basaltique qui constitue le substratum du lit majeur. Ainsi que par les difficultés d'accès des engins aux sites d'extraction.

En outre la qualité des matériaux est limitée par les apports de fines liées à l'hétérogénéité géologique du rempart de Mahavel, ainsi que la composition du "barrage de Mahavel" en cours de démantèlement.

Fig. 5 - Localisation de l'exploitation des matériaux alluvionnaires dans la Rivière des Remparts.

12296 X 8001 indice fichier des carrières

12296 X 8006



ANNEXE 2 - ANALYSE PRELIMINAIRE DES CONDITIONS DE TRANSPORTS SOLIDES ET EXPLOITATION DES MATERIAUX DANS LA RIVIERE DES PLUIES

1- PRESENTATION GENERALE DU CONTEXTE

Situé à l'Est de l'agglomération de Saint Denis, la Rivière des Pluies s'organise en trois parties distinctes nettement différenciées (Fig. 1 et 2) :

- à l'amont, elle draine un vaste amphithéâtre (mini cirque) et prend naissance au pied de la Caverne Soldats (2 000 m) pour descendre par une série de cascades jusqu'à Grand Eboulis (4 km) ;
- dans sa partie intermédiaire, d'une longueur de 6 km, elle reçoit deux longues ravines, la Ravine Montauban à l'Ouest et la Ravine Kiwi à l'Est ;
- la partie aval, jusqu'à l'océan, comporte un lit quasi rectiligne qui débouche très vite sur un lit très large, en partie endigué.

Dans un cours inférieur, la rivière coule à l'extrémité occidentale de son ancien cône de déjection dans la plaine de Gillot.

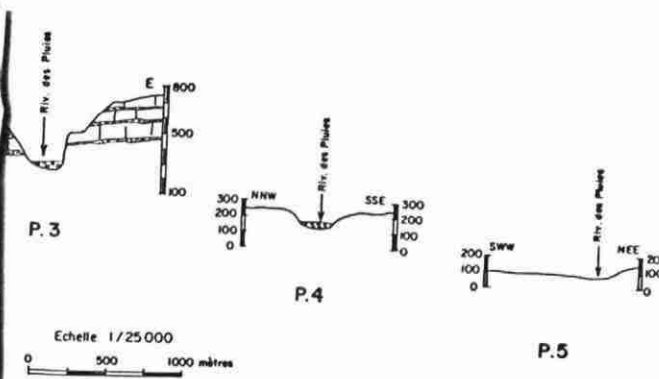
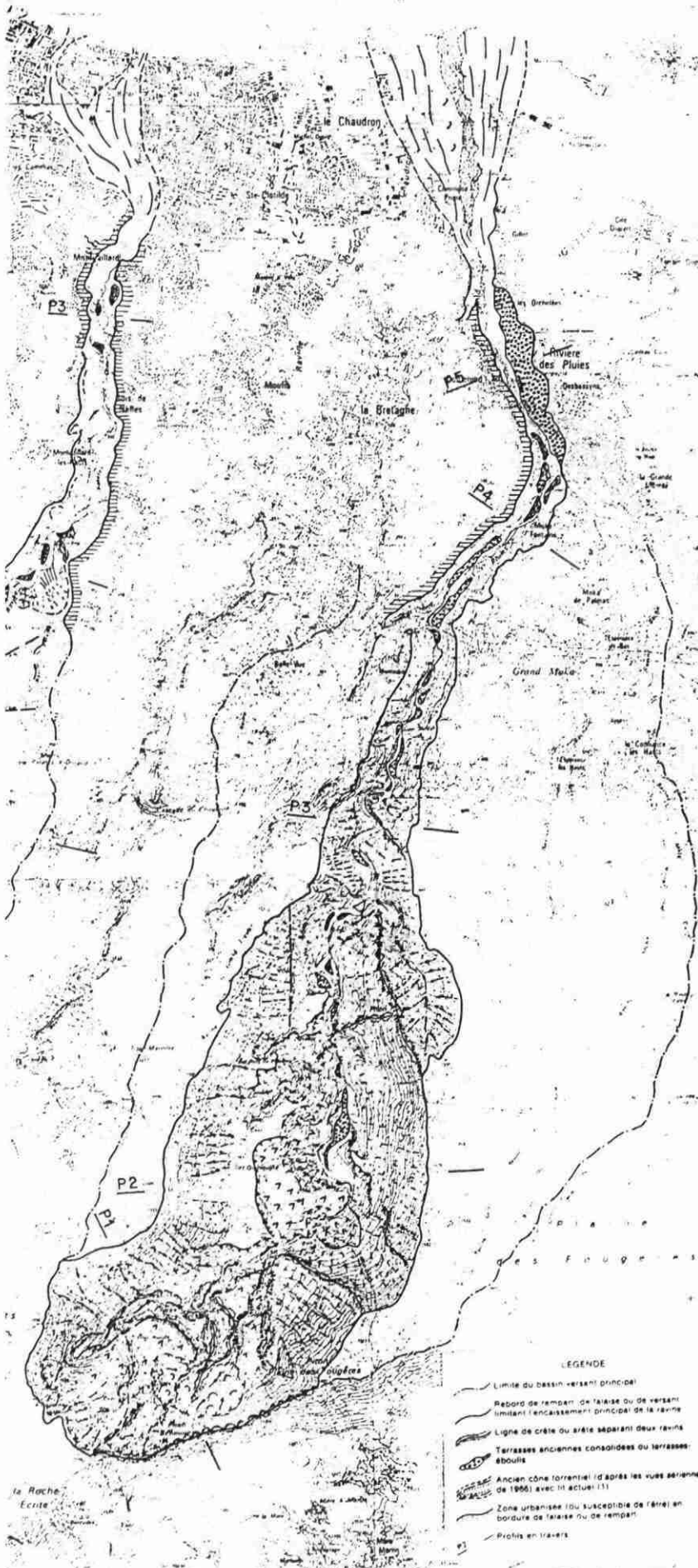
Cette rivière a fait l'objet de nombreux aménagements ; on peut citer de l'amont vers l'aval (source DDE/SOGREAH/BCEOM) :

- épi déflecteur du chemin Moka (1983-84)
- protection longitudinale du village de la Rivière des Pluies
- pont Domenjod
- pont RN 102
- radiers de Gillot supprimés en 89-90
- franchissement (RN2) Pont Gillot, terminé fin 1987
- 9 épis avec digues de fermeture
- décharge de la Jamaïque
- digue longitudinale de protection de l'aéroport

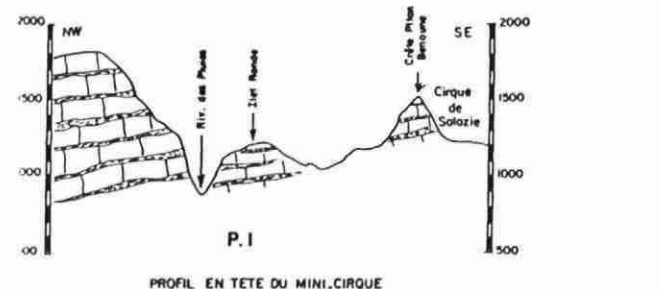
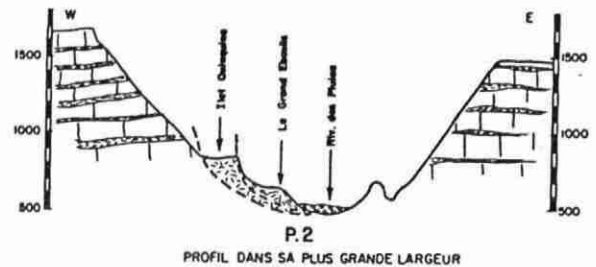
D'autres aménagements sont prévus à court terme : franchissement du Boulevard Sud, endiguement de la zone de la Jamaïque.

Fig. 1 - Morphologie et profils de la Rivière des Pluies

T-DENIS



Echelle 1/25 000
0 500 1000 mètres



- LEGENDE
- Limite du bassin versant principal
 - Rebord de rempart de falaise ou de versant limitant l'encastement principal de la rivière
 - Ligne de crête ou arête séparant deux ravins
 - Terrasses anciennes consolidées ou terrasses éboulis
 - Ancien cône torrentiel (d'après les vues aériennes de 1956) avec lit actuel (1)
 - Zone urbanisée (ou susceptible de l'être) en bordure de falaise ou de rempart
 - Profils en travers

- RIVIÈRE DES PLUIES

<p>C1 - Cours supérieur (ou Cirque de Grand Eboulis)</p>	<p>De l'encaissement de la Roche Ecrite au Cap Frumence</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Vaste mini-cirque largement ouvert dans les versants de la Roche Ecrite et évoluant par ravinement, arrachement, glissement et écoulement à chaque averse, orage ou dépression cyclonique - Existence de quelques parneaux tassés en masse, dont "Grand Eboulis" qui est sans cesse ravivé par des arrachements et des glissements. - Zone d'érosion active. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ce bassin supérieur est le principal pourvoyeur de matériaux alimentant le cours moyen et inférieur de la Rivière des Pluies, lors des fortes précipitations cycloniques - Des écoulements d'une certaine importance sont possibles mais situés à l'amont du bassin de réception, ils ne devraient pas produire de retenues d'eau considérables, donc de gros dangers en cas de rupture.
<p>C2 - Cours moyen (ou canal d'écoulement)</p>	<p>Du Cap Frumence au confluent avec la Ravine Bachelier</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Encaissement du cours d'eau entre des falaises et des versants de 500 à 100 mètres de hauteur, de l'amont vers l'aval, avec ravinements parallèles et petits écoulements dans les barres rocheuses. - Lit mineur et majeur, plus ou moins développé dans les méandres (près de 100 mètres de large) et fortement mobilisé en période de crues, avec affouillement des terrasses bordières. - Existence de quelques "serrés". - Erosion active dans le lit de la Rivière. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'action érosive des eaux de crues remanie fortement les matériaux alluvionnaires et les redépose plus à l'aval, au gré de leur granulométrie et de la morphologie du lit majeur. - Affouillement des terrasses avec destruction progressive de certaines d'entre-elles, par éboulements de leurs bordures. - En période de crues, isolement des habitants de ces terrasses et destruction des chemins et sentiers d'accès - Ecoulements toujours possibles au pied des remparts.
<p>C3 - Cours Intérieur</p>	<p>De la Ravine Bachelier à l'embouchure</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A l'amont du Pont Neuf, la rivière coule entre un niveau de terrasses anciennes (+ 4 ou 5 mètres) s'appuyant sur les falaises basaltiques. Durant Hyacinthe, le débit des eaux a atteint le sommet des terrasses. - A l'aval du Pont Neuf, vaste cône d'alluvionnement ancien où s'inscrit la rivière actuelle dans un lit majeur de près de 380 mètres de large entre les digues latérales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pour éviter le débordement du cours d'eau sur le village Rivière des Pluies, construction d'une digue et renforcement de la protection des berges. - Maîtrise du chenal d'écoulement naturel par un endiguement large sur lequel s'appuient des "épis marteaux". - Nécessité de tenir en état les ouvrages de protection.

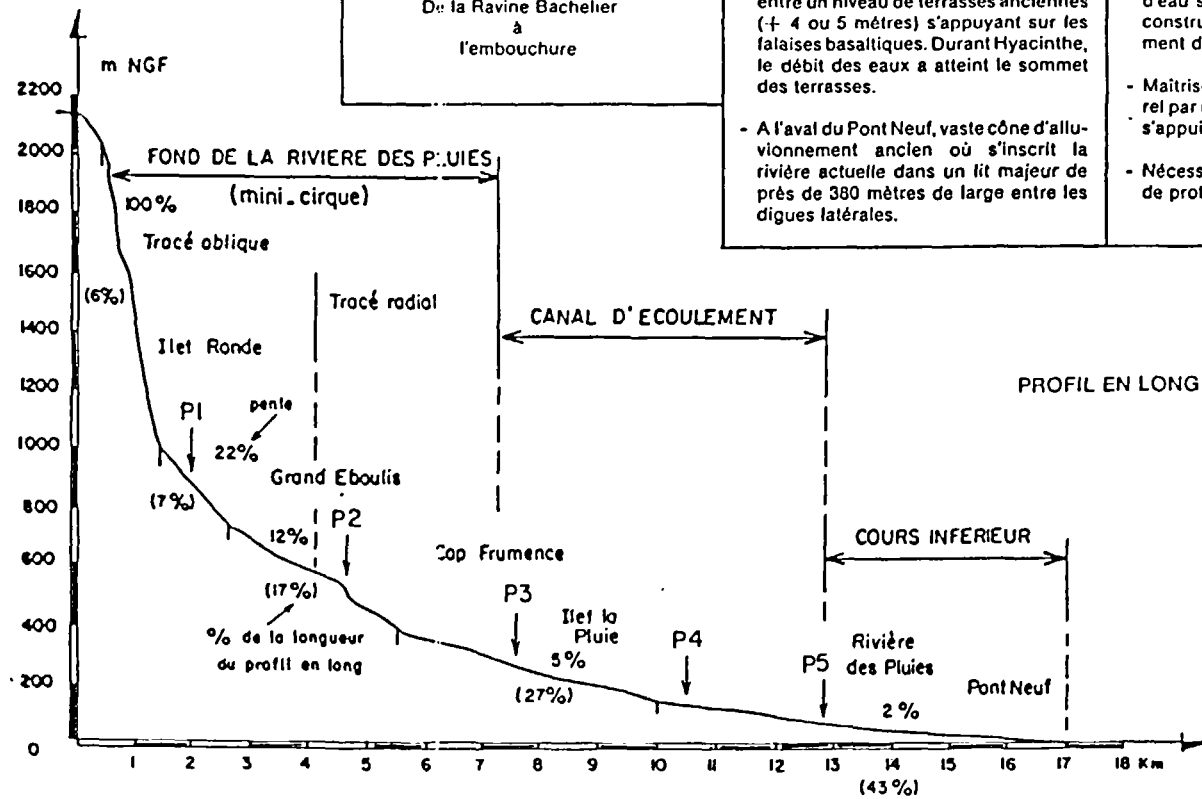


Fig. 2 - Caractéristiques des pentes de la Rivière des Pluies

2- PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DE LA RIVIERE DES PLUIES ET EVALUATION THEORIQUE DES TRANSPORTS SOLIDES

2.1. Caractéristiques hydrauliques

		RIVIERE DES PLUIES	
Longueur		17 km	
Superficie du bassin-versant } principal dont encaissant		# 50 km ² # 25 km ²	
Profil en long	Pentes (en ‰)		
	de l'aval	2 ‰	7 km soit 43 ‰
		5 à 6 ‰	4,5 km soit 27 ‰
		12 à 15 ‰	3 km soit 17 ‰
	vers	[6 ‰]	-
		[68 ‰]	-
l'amont	22 ‰	1 km soit 7 ‰	
quasi-vertical		- 1,5 km soit 6 ‰	
Débits (*) de fréquence	décennaux cinquantennaires centennaux	570 m ³ /s - 1 000 m ³ /s	
(*) Estimations récentes de la S.H.S.			
Temps de réponse ou de concentration des bassins-versants		3 heures 30' à 4 heures	
Altitude supérieure	du bassin-versant principal	2 150 m	
	de l'encaissant	2 150 m	
	du fond de l'encaissant	1 050 m	

Estimation des débits sur les cyclones les plus récents :

Station Domenjod (source DAF)

Clotilda 1987 : 460 m³/s

Firinga 1989 : 225

Radier Gillot (source DAF et SOGREAH)

Fifi 1977 : 625 m³/s

Hyacinthe 1980 : 650

Clotilda 1987 : 500

2.2. Evaluation théorique des transports solides (source LCHF citée par BCEOM 1996)

Une analyse hydrologique et morphologique du LCHF aboutit aux quantifications suivantes :

- transport solide total (par excès) 43 000 m³/an
- apport pour une pointe de débit à 200 m³/s pendant 10 h (Hyacinthe) 60 000 m³
- apport pour une crue décennale 15 000 m³

SOGREAH (1990) a estimé le débit minimal de charriage à 200 m³/s.

Les études sur modèles à fond mobile ont permis d'évaluer les transports solides de sédiments grossiers à 16 000 m³/an.

3- EXPLOITATION DES MATERIAUX (d'après DDE/BCEOM)

Le rapport BCEOM (juillet 96 - cf. bibliographie) établit un historique des extractions. En 1988, il existait trois points principaux d'extraction :

- aval du Pont Domenjod
- aval du cône, exploitations artisanales
- aval du pont RN 102, initialement prévu pour reprofiler le lit et protéger la rive droite endommagée par Clotilda en 1987.

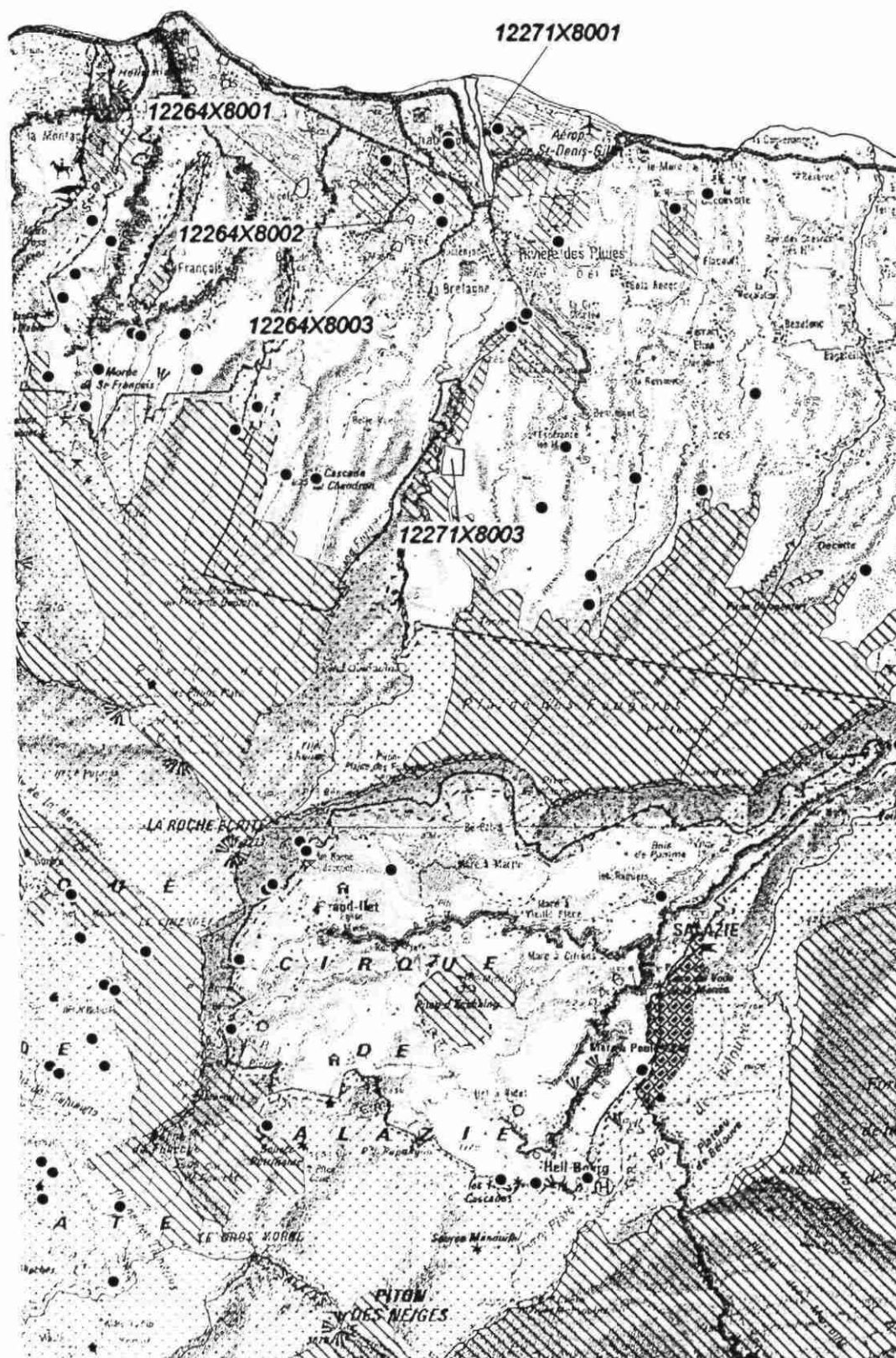
Actuellement, cette dernière est toujours présente (indice national du fichier des carrières 12271 X 8001. Fig. 3).

D'après les données DDE, le BCEOM a évalué les volumes dragués :

- 1965 à 1990 estimation 750 000 m³
- 1991 150 000
- 1992 et 1993 400 000
- 1994 et 1995 200 000
- Soit en 30 ans : 1 500 000 m³

Si l'on rapproche ce volume aux apports estimés de la rivière : 16 000 m³/an x 30 ans, soit environ 500 000 m³ le volume déficitaire serait donc de 1 000 000 de m³, ce qui explique les abaissements du fond observés.

Fig. 3 - Situation des extractions de matériaux dans la Rivière des Pluies



4- CONSEQUENCE DE L'EROSION NATURELLE ET DES EXPLOITATIONS

La figure 4 représente l'évolution des fonds de la Rivière des Pluies entre 1965 et 1996 (d'après BCEOM-DDE 1996).

On note un très net surcreusement du lit entre 1981 et 1996, en particulier au niveau de l'ancien radier et du Pont Gillot.

L'étude signale par ailleurs :

- au niveau du pont Gillot : la création d'un chenal de 12 à 15 m, profond de 5 m au niveau de la travée 3, qui a mis à découvert une partie de la semelle aval, sur une hauteur de 1,5 m ;
- les risques d'érosion régressive pouvant atteindre le pont métallique.

On recommande enfin :

- d'effectuer des levés topographiques réguliers,
- de localiser et évaluer les volumes dragués,
- de mesurer les débits de la Rivière des Pluies.

Figure 4

Evolution des points bas de la Rivière des pluies sur la période 1965-1996

