

52873

52873

Document public

DOCUP 2002-2006  
Cadre d'intervention C5-03

Projet de recherche : Les mouvements de terrain  
de grande ampleur dans les cirques et les  
grandes ravines de La Réunion

Module 1  
Sous module 1.3  
Programme 2003

# Evolution paléoclimatologique de l'île de la Réunion

## Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques

## Etude de faisabilité de datations par luminescence



BRGM/RP-52873-FR  
décembre 2003



3 5000 00109417 5

Projet de recherche : Les mouvements de terrain  
de grande ampleur dans les cirques et les  
grandes ravines de La Réunion

Module 1  
Sous module 1.3  
Programme 2003

## Evolution paléoclimatologique de l'île de la Réunion

### Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques

### Etude de faisabilité de datations par luminescence

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Recherche du BRGM 02 RISR10

**M. GARCIN, B. POISSON**  
Avec la collaboration de  
**M. CRUCHET**



*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*

Mots clés : Ile de la Réunion, paléoclimatologie, morphogenèse, érosion, Quaternaire, paléoclimatologie, alluvions, lacustre, datation, radiochronologie

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

Garcin M., Poisson B., Cruchet M. (2003) – Evolution paléoclimatologique de l'île de la Réunion - Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques - Etude faisabilité de datations par luminescence. Rapport BRGM/RP-52873-FR, 56 p, 54 fig., 1 ann.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

**D**ans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé dans la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion.

Le module 1 de ce programme qui en comprend 3, est consacré à la reconstitution de l'histoire géologique récente du massif du Piton des Neiges, et notamment celle des paléoclimats de l'île de La Réunion (sous-module 1-3).

A la suite de la synthèse paléoclimatique à l'échelle de l'océan Indien occidental qui a permis d'affirmer que les modifications climatiques du Quaternaire ont affecté l'île de la Réunion, il est apparu nécessaire d'acquérir de nouvelles données climatiques spécifiques à La Réunion et cela sur des enregistrements continentaux. L'étude de la carotte récifale de la Saline est la seule source d'information existante sur la paléoclimatologie de la Réunion. Les données issues de cette carotte sont précieuses mais n'informent que sur les variations eustatiques des derniers 9 000 ans et sur les variations de température de l'océan.

Le programme 2003 de l'étude de l'évolution paléoclimatologique de l'île de La Réunion a porté sur le repérage de séquences sédimentaires remarquables dans les cirques et à leur débouché.

Plusieurs séquences ont été observées. Elles sont localisées dans les gorges du Bras de Cilaos, depuis les Aloès jusqu'au Pavillon, dans les gorges de la rivière du Mât et le cirque de Salazie, dans les gorges de la rivière des Galets et dans les Hauts de Mafate.

Les coupes observées montrent l'existence de niveaux plus fins voir très fins (sables, limons, argiles) intercalés dans des séquences plus grossières (à galets et blocs). D'autres coupes montrent des alternances cycliques de dépôts fins et de dépôts grossiers. Ces dépôts fins ont des caractéristiques très différentes des sédiments alluvionnaires présents actuellement dans les rivières (grossiers à très grossiers) ce qui tend à indiquer qu'ils se sont sédimentés dans des conditions environnementales différentes.

La pauvreté des sédiments en bois n'a pas permis de dater toutes ces séquences par la méthode radiocarbone et de les corréliser entre elles. Une seule séquence a été datée (âge compris entre 1 450 et 1 300  $\pm$  60 BP).

La poursuite du programme devra permettre d'étudier plus finement ces séquences sédimentaires remarquables reconnues dans les trois cirques. L'accent sera mis sur la datation de séquences sédimentaires, avec la mise en oeuvre éventuelle de datations par luminescence (une étude faisabilité est présentée en annexe de ce rapport). Cet effort s'appuiera sur des analyses de détermination pétrographique des sables.

Sur les sites reconnus en 2003, de nouvelles observations seront faites à des fins d'analyse. Enfin d'autres cibles sédimentaires signalées au cours la campagne 2003 seront reconnues.

## Sommaire

<b>SYNTHÈSE</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>2. LES SURFACES MORPHOLOGIQUES DANS LES CIRQUES</b>	<b>6</b>
<b>3. SÉQUENCES SÉDIMENTAIRES REMARQUABLES</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Les coupes de références</b>	<b>11</b>
3.1.1. Cirque de Cilaos	11
3.1.1.1. Haut du Village de la Rivière	11
3.1.1.2. Les aloès	12
3.1.1.3. Ilet Rond (long de route)	16
3.1.1.4. Ilet Longue	17
3.1.1.5. Le Petit Serré	17
3.1.1.6. Ilet Augustin (virage)	25
3.1.1.7. Ilet Ti Sel	27
3.1.1.8. Ilet Palmiste	27
3.1.1.9. Le Pavillon	32
3.1.1.10. Ilet à Cordes amont / Ilet Totor	32
3.1.2. Cirque de Salazie et la Rivière du Mât	34
3.1.2.1. Les gorges de la Rivière du Mât	34
3.1.2.1.1. Pont de l'escalier	34
3.1.2.1.2. Plateau Wickers	35
3.1.2.1.3. Environs de Salazie	35
3.1.2.2. Mare à Citron	35
3.1.2.2.1. Mare à Citron - Est	35
3.1.2.2.2. Mare à Citron Nord – Direction Ravine Grosse Roche	38
3.1.3. Cirque de Mafate	39
3.1.3.1. La Plaine aux Sables	39
3.1.3.1.1. Coupe de la bergerie	40
3.1.3.1.2. Coupe de la Plaine au Sable – Haut	45
3.1.3.2. Bras de Ste Suzanne	47
3.1.3.3. Coupe Bras de Ste Suzanne Bras des Merles	48
3.1.3.4. Coupe du Bras de Ste Suzanne-Prise d'eau	50
<b>4. CONCLUSION</b>	<b>52</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Exemple de replats morphologiques (1 à 4) emboîtés et séparés par des discontinuités (cirque de Cilaos)	8
Figure 2 : Lambeaux résiduels d'une ancienne surface morphologique incisée par les ravines (Cilaos)	9
Figure 3 : Proposition d'un modèle d'évolution géomorphologique des cirques de la Réunion en fonction des conditions climatiques du Quaternaire	10
Figure 4 : Extrait de la carte géologique – Environ des Aloès, Bras de Cilaos	11
Figure 5 : Les Aloès, alternance de niveaux silto-limoneux bruns et de niveaux sableux à stratifications obliques	12
Figure 6 : Les Aloès – MG03REU1 – Analyse granulométrique du niveau silto-limoneux	13
Figure 7 : Les Aloès (MG03REU1) Classes granulométriques des niveaux silto-limoneux	13
Figure 8 : Courbe granulométrique des silts et par classe de silt (MG03REU1)	14
Figure 9 : Schéma de l'étagement des terrasses au niveau des Aloès (Riv. Saint-Etienne)	14 15
Figure 10 : Extrait de la carte – Secteur de l'Ilet Rond	16
Figure 11 : Contact coulée boueuse et alluvions – Ilet Rond	17
Figure 12 : Extrait de la carte – Secteur du Petit-Serré	17
Figure 13 : Coupe du Petit Serré, niveau 7	19
Figure 14 : Coupe du Petit Serré, niveaux 7 et 8	19
Figure 15 : Courbe granulométrique MG03REU2 (Petit- Serré, Niveau 8a)	20
Figure 16 : Classes granulométriques des niveaux silto-limoneux (MG03REU2, Petit-Serré, Niveau 8a)	20
Figure 17 : Analyse granulométrique des silts (MG03REU2, Petit-Serré, Niveau 8a)	21
Figure 18 : Coupe du Petit Serré, niveaux 10 à 13	22
Figure 19 : Coupe du Petit Serré, niveaux 11 et 12	22
Figure 20 : Coupe du Petit Serré, niveau 13 (détail)	23
Figure 21 : Coupe du Petit Serré, niveau 14	23
Figure 22 : Log synthétique de la coupe du Petit Serré (Rivière Saint-Etienne)	24
Figure 23 : Extrait de la carte – Ilet Augustin et Ilet Ti-Sel	25
Figure 24 : Vue d'ensemble de la coupe de l'Ilet Augustin (Cilaos21)	26
Figure 25 : Détail des horizons argileux beiges – Ilet Augustin	26
Figure 26 : Extrait de la carte - Ilet Palmiste, Le Pavillon	27
Figure 27 : Coupe d'ensemble (Ilet Palmiste, coupe au niveau de la route)	29
Figure 28 : Alternance de niveaux fins et plus grossiers (Ilet Palmiste, coupe au niveau de la route) Photo Cilaos32	30
Figure 29 : Détail d'un ravinement intra-alluvion et remplissage chenalisé par des sables fins dans l'unité 2 (Ilet Palmiste, coupe le long de la route)	30
Figure 30 : Logs des coupes de l'Ilet Palmiste (Cilaos)	31
Figure 31 : Affleurement de brèche à galets alluviaux remaniés – Ilet à Corde	33
Figure 32 : Galets bien roulés, très altérés pris dans la brèche – Ilet à Corde	33
Figure 33 : Gorge de la Rivière du Mat aval – Extrait de la carte	34
Figure 34 : Gorge de la Rivière du Mât amont – Extrait de la carte	35
Figure 35 : Mare à Citron - Extrait de la carte	36
Figure 36 : Analyse granulométrique des sable de Mare à Citrons (MG03REU3)	36
Figure 37 : Caractérisation granulométrique des sables de Mare à Citron (MG03REU3)	37
Figure 38 : Courbe granulométrique de la fraction silteuse des sables de Mare à Citron (MG03REU3)	37
Figure 39 : Coupe dans les alluvions - Mare à Citron Nord	38
Figure 40 : Extrait de la carte de la Plaine aux Sables (sédiments fins alluviaux de la Plaine aux Sables)	39
Figure 41 : Vue d'ensemble de la partie basse de la Plaine aux Sables	39
Figure 42 : Coupe de la Plaine aux Sables - Niveau 1	41
Figure 43 : Coupe de la Plaine aux Sables – Niveau 2	41

Figure 44 : Coupe de la Plaine aux Sables - Niveau 3	41
Figure 45 : coupe de la Plaine aux Sables – Niveau 4 et 5	41
Figure 46 : Coupe de la Plaine aux Sables (coupe de la Bergerie)	42
Figure 47 : Analyses granulométriques du niveau 1 (MG03REU4) de la coupe de la Plaine aux sables	43
Figure 48 : Analyses granulométriques du niveau 2 (MG03REU5) de la coupe de la Plaine aux Sables	44
Figure 49 : Analyses granulométriques des sables du Haut de la Plaine aux Sables (MG03REU8)	46
Figure 50 : Localisation du dépôt de lac de barrage dans le Bras Sainte-Suzanne / Bras des Merles	47
Figure 51 : Vue générale de l'affleurement des dépôts lacustres du Bras de Ste Suzanne- Bras des Merles	49
Figure 52 : Coupe dans les dépôts lacustres de Ste Suzanne-Bras des Merles	49
Figure 53 : Coupe partielle de détail des niveaux argilo-silteux du Bras de Sainte Suzanne Bras des Merles	50
Figure 54 : Vue générale de l'affleurement des dépôts lacustres du Bras de Ste Suzanne- Prise d'eau (Amont)	51

## **Annexe**

Etude de faisabilité de datation des séquences sédimentaires par luminescence

## **1. Introduction**

**D**ans le cadre d'intervention C5.03 du DOCUP (soutenir la recherche et le développement sur les phénomènes de risques naturels), le BRGM s'est engagé dans la réalisation d'un programme de recherche sur les mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques et les grandes ravines à La Réunion.

Le module 1 de ce programme qui en comprend 3 est consacré à la reconstitution de l'histoire géologique récente du massif du Piton des Neiges, et notamment celle des paléoclimats de l'île de La Réunion (sous-module 1-3).

La présente étude correspond au programme 2003 du sous-module 1.3 du projet de recherche.

En 2002, la synthèse paléoclimatique à l'échelle de l'océan Indien occidental a permis d'affirmer que les modifications climatiques du Quaternaire ont affecté l'île de la Réunion (cf rapport BRGM RP 52074-FR). Les données concernent essentiellement le dernier cycle climatique (les 120 derniers mille ans) et très peu la période antérieure à la glaciation du Riss (Saalien). Celles concernant l'île de La Réunion sont rares. L'étude de la carotte récifale de la Saline qui est la seule source d'information existante sur la paléoclimatologie de la Réunion est précieuse mais n'informe que sur les variations eustatiques des derniers 9 000 ans et sur les variations de température de l'océan. Il est donc apparu primordial d'acquérir de nouvelles données climatiques spécifiques à La Réunion et cela sur des enregistrements continentaux.

Une analyse morphologique préliminaire des replats des cirques est proposée, l'objectif étant de comprendre l'origine de ces surfaces et de cibler les prospections de séquences sédimentaires.

Les reconnaissances de terrain ont porté sur des ensembles de dépôts sédimentaires présents dans ces cirques et à leur débouché.

Ces sédiments sont la plupart du temps dépourvus de matières organiques (quasi-absence de végétaux fossiles et d'organismes). Cela a rendu impossible la datation de ces dépôts par la méthode radiocarbone. Il a donc été décidé d'examiner la possibilité d'utiliser d'autres méthodes de datation en cours de programme, notamment la technique OSL. Cette étude de faisabilité est présentée en annexe.

## **2. Les surfaces morphologiques dans les cirques**

L'observation de la morphologie dans les cirques permet de mettre en évidence la présence de « replats » à relativement faible pente (les llets) sur lesquels sont installés les villages.

L'observation de ces replats, qui apparaissent nettement comme des morphologies reliques, montre qu'ils présentent plusieurs niveaux altitudinaux s'étageant graduellement, chaque étage étant séparé par une discontinuité marquée par une pente plus forte (figure 1). Les replats résiduels d'altitude proche à l'état de lambeaux ont été observés (figure 2), ils peuvent aisément être raccordés les uns aux autres nous permettant de reconstituer en partie la morphologie à relief émoussé et moutonné qui existait avant leur incision. Ces familles de replats nous conduisent à émettre l'hypothèse que chaque ensemble correspond à une phase de calme morphogénétique responsable de la stabilisation du relief des cirques et de la création de morphologies plus douces que celles qui prévalent actuellement.

Chaque phase de stabilité est suivie d'une phase d'active et intense morphogénèse aboutissant à l'incision de la surface morphologique par les cours d'eau et les ravines. L'activité « érosionnelle » aboutit à la fragmentation de la surface préexistante, à sa dégradation et à son érosion partielle. Les produits de cette dégradation sont évacués en partie par les ravines et rivières vers l'aval, dont une partie se dépose sous forme d'alluvions dans le réseau hydrographique avant d'être remobilisé puis transporté jusqu'à l'embouchure des principales rivières. Les sédiments s'y accumulent pour former les cônes alluviaux des rivières des Galets, du Mât et de Saint-Etienne. Une très faible part des alluvions déposées durant la phase de sédimentation des rivières est encore présente sur leurs bordures actuelles notamment dans les gorges. Ils y constituent des lambeaux de terrasses qui ont été localement observés lors des missions de terrain (Cf Chapitre suivant).

A la suite de chaque phase érosive, une nouvelle phase de stabilité morphogénétique s'instaure et conduit à la création d'une nouvelle morphologie à faible pente dans les cirques, mais, suite aux transferts de matériaux opérés précédemment et à la vidange progressive des matériaux des cirques, la nouvelle surface se situe en contrebas de la précédente.

La rythmicité de ces processus nous amène à nous demander quel est le moteur de ces cycles. La synthèse réalisée en 2002 sur la « Paléoclimatologie de l'île de La Réunion et des régions environnantes » (Garcin et Cruchet 2002) nous conduit très logiquement à suspecter un rôle fondamental du climat. En effet, nous étions arrivés, dans cette étude, à émettre l'hypothèse évolutive suivante :

- Durant les périodes glaciaires, les températures de l'air et des océans (SST=Sea Surface Temperature) baissent provoquant un amoindrissement voir l'arrêt du système de mousson. Les cyclones sont soit fortement réduits en nombre et en amplitude soit inexistant. En effet, pour avoir déclenchement d'un cyclone, il est nécessaire d'avoir une température de surface des eaux océaniques (SST) supérieure à 26°C. La baisse des eaux de surface constatée n'a, à certaines périodes, probablement plus permis de les déclencher.
- Durant les transitions des périodes glaciaires aux interglaciaires, le climat est caractérisé par des épisodes de forte instabilité. Ceux-ci sont caractérisés par

des cycles à très forte mousson et à cyclones intenses alternant avec des cycles à mousson et cyclones faibles voir inexistantes.

- Durant les périodes interglaciaires bien établies comme actuellement, le climat est marqué par un système de mousson d'été et un régime cyclonique. L'intensité de ces phénomènes est liée à la variabilité climatique intra-période.

Nous en déduisons que les phases de stabilité morphogénétique pourraient être corrélées avec des périodes glaciaires ou tout au moins des stades froids durant lesquels, la baisse des températures mais surtout des précipitations favoriserait un « calme » morphogénétique. A *contrario*, les phases transitoires des périodes glaciaires vers les interglaciaires se caractériseraient par une forte instabilité climatique durant laquelle, des époques à forte activité de mousson et cyclonique se produiraient. Ces périodes correspondraient en quelque sorte à des crises morphogénétiques au cours desquelles les processus érosifs et l'activité torrentielle seraient à leur maxima concourant ainsi à la dégradation de la surface morphologique créée lors de la phase de stabilité précédente. Au cours de ces périodes, les mouvements de terrain de grande ampleur verraient leur activité paroxysmale à cause notamment de la déstabilisation des reliefs par les processus d'érosion mais aussi à cause de l'intensité des précipitations. Enfin, les périodes interglaciaires établies c'est à dire à relative stabilité climatique (avec des variations interannuelles à interséculaires modérées) seraient des époques à activité morphogénétique forte mais sans caractère paroxysmal.

Ce modèle d'ensemble (figure 3) est bien sûr schématique, notamment à cause de la variabilité climatique intra cycle. Certains épisodes de relativement courte durée ont pu avoir des répercussions morphogénétiques notables (Optimum climatique, Petit Age glaciaire pour la période historique etc.)

Il faut noter par ailleurs que nous n'avons pour le moment pas pris en compte le rôle éventuel des réajustements/mouvements verticaux qui ont pu se produire dans le massif du Piton des Neiges au cours du Quaternaire récent. Ceux ci en effet, s'ils existent ont du jouer un rôle notamment si ces mouvements verticaux ont été rapides et d'une ampleur significative ( effondrement partiel, mouvement de « yoyo thermique » ou autres).

Enfin, il faut rappeler que ces replats sont entaillés par les rivières et les ravines actuelles. Certains de leurs flancs subissent une érosion intense conduisant à l'installation de « *bad lands* » non végétalisés. L'absence de végétaux sur ces pentes indique une érosion actuelle forte et continue, cette dernière se produit très fréquemment dans les zones affectées (ou en relation avec) de mouvement de terrain (quelque soit leur nature).

Dans chaque cirque, des mares existent. Ces systèmes sont susceptibles d'offrir des séquences de remplissages sédimentaires intéressantes en terme d'épaisseur et de qualité de sédiment. Il s'agissait en effet d'identifier d'éventuels remplissages fins pouvant contenir par exemple des éléments de matières organiques permettant de dater leurs sédiments ainsi que des séquences assez longues pour effectuer des analyses paléoclimatologiques.

Sur la base de cette analyse des surfaces géomorphologiques des cirques, la prospection des séquences sédimentaires remarquables à été lancée.

*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*



Figure 1 : Exemple de replats morphologiques (1 à 4) emboîtés et séparés par des discontinuités (cirque de Cilaos)

*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*



Figure 2 : Lambeaux résiduels d'une ancienne surface morphologique incisée par les ravines (Cilaos)

*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*

	<b>Cirques</b>	<b>Gorges</b>	<b>Grands cônes alluviaux</b>
<b>Période glaciaire / stade</b>	Morphogenèse peu active, morphologie de replat, Mouvements de terrain peu ou pas actifs	Alluvions fines et/ou tendance à l'encaissement : fourniture par le cirque d'une charge solide faible, remobilisation de la charge solide du fond de lit	Apports modérés à faibles,
<b>Transition glaciaire-interglaciaire</b>	Erosion et dégradation des surfaces morphologiques, incisions intenses des ravines et des rivières, mvts de terrain très actifs, vidange des cirques, formation de dépôts alluviaux dans les parties aval des rivières des cirques (engorgement)	Dépôts d'alluvions grossières dues aux forts apports sédimentaires, tendance au dépôts (engorgements), éventuellement transferts rapides de la charge sédimentaire	Apports pouvant être importants dans le cas où les événements sont suffisamment forts pour assurer le transit direct du cirque à l'océan.
<b>Interglaciaire</b>	Erosion et dégradation des surfaces morphologiques, incisions des ravines et des rivières, mouvements de terrain actifs	Incision dans les dépôts alluviaux antérieurs, éventuellement incision du substratum, remobilisation de dépôts grossiers	Forts apports, tendance à l'engraissement des cônes

Figure 3 : Proposition d'un modèle d'évolution géomorphologique des cirques de la Réunion en fonction des conditions climatiques du Quaternaire

### 3. Séquences sédimentaires remarquables

L'objectif de notre travail a donc consisté à **identifier** de telles formations, à les **cartographier** et à en **décrire** les coupes les plus significatives. Par ailleurs, nous avons systématiquement cherché, au sein de ces coupes des éléments permettant d'une part de **dater** ces sédiments et d'autre part de noter tout élément susceptible de fournir directement ou indirectement des informations climatiques.

#### 3.1. LES COUPES DE REFERENCES

##### 3.1.1. Cirque de Cilaos

###### *Gorge de la rivière St Etienne*

##### 3.1.1.1. Haut du Village de la Rivière

Le long du chemin des Remparts à proximité du lieu dit La Ferme (figure 4), présence d'une haute terrasse alluviale marquée dans la topographie. Aucun affleurement n'y est visible, toutefois, la présence dans les champs de nombreux blocs alluviaux roulés ne laissent aucun doute sur son origine. Ce niveau de terrasse se situe à environ 120 m au dessus du lit actuel (T3).

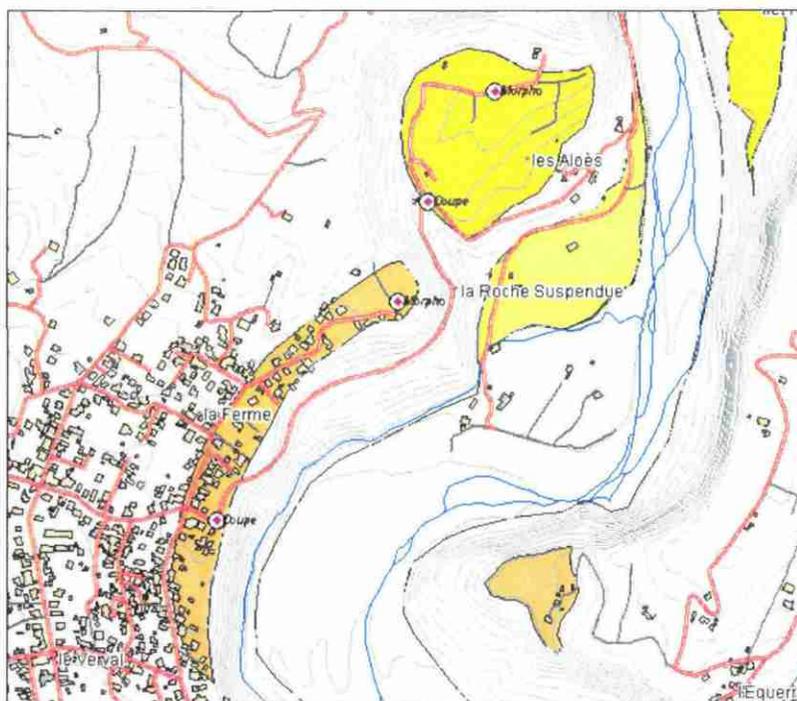


Figure 4 : Extrait de la carte géologique – Environ des Aloès, Bras de Cilaos

### **3.1.1.2. Les aloès**

Dans le virage des Aloès affleurent 8 à 10 m d'alluvions sablo-silteuses de couleur brun-chocolat à passées décimétriques et centimétriques de graviers (figure 5). Ce niveau affleure sur une quarantaine de mètres de large. Les niveaux les plus fins sont constitués à 80% de silts, 9% de sable et 8 % d'argile (échantillon MG03REU1, figures 6, 7). L'analyse de la courbe granulométrique de la fraction silteuse montre que les silts grossiers sont dominants (figure 8). Dans ces niveaux, des stratifications horizontales sont visibles ainsi que des horizons beiges à blanchâtres millimétriques plus indurés.

Les niveaux les plus grossiers sont d'une couleur d'ensemble grisâtre ; ils contiennent des graviers rouge-brique de scorie. Les niveaux les plus sableux présentent localement des stratifications obliques (figure 5).

Ces alluvions fines passent latéralement à des alluvions grossières « classiques » à blocs pluri-décimétriques bien roulés. Le sommet de la plate-forme des Aloès est constitué par des alluvions grossières à blocs et galets ; certains de ces galets sont très altérés.

Nous n'avons pas identifié de débris organique dans ces alluvions.

Les alluvions grossières apparaissent de 42 à 55 m au-dessus du lit actuel, la base des niveaux alluviaux fins est autour de +55 m. L'organisation et l'étagement des terrasses du village La Rivière et des Aloès par rapport au lit actuel de la rivière St Etienne sont schématisés dans la figure 9. Trois niveaux de terrasses successifs ont été individualisés.

Le niveau de replat morphologique du plateau des Aloès (T2) est à environ 80 m au-dessus du lit vif actuel ; une morphologie de boucle de paléochenal y est observable



Figure 5 : Les Aloès, alternance de niveaux silto-limoneux bruns et de niveaux sableux à stratifications obliques

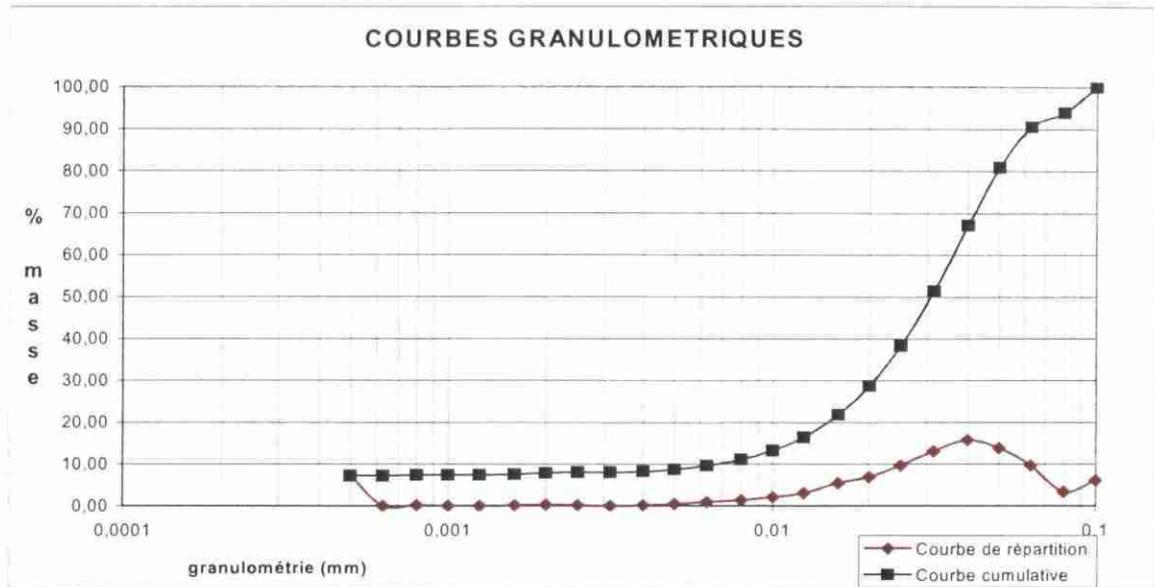


Figure 6 : Les Aloès – MG03REU1 – Analyse granulométrique du niveau silto-limoneux

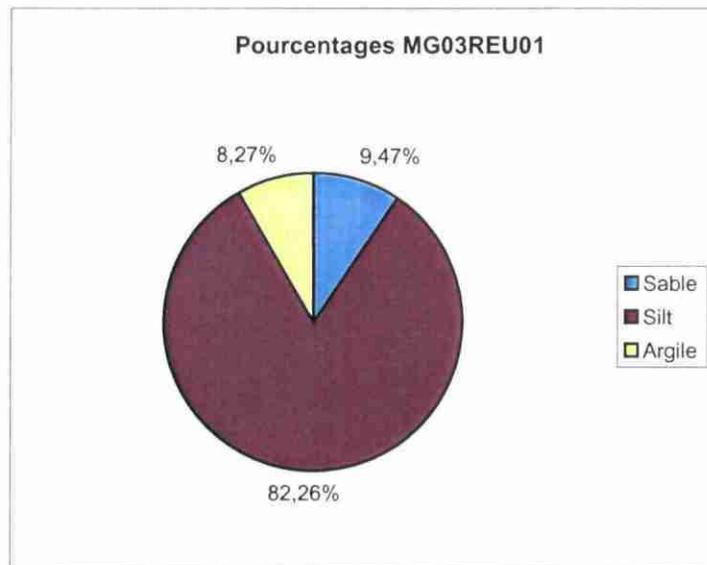


Figure 7 : Les Aloès (MG03REU1) Classes granulométriques des niveaux silto-limoneux

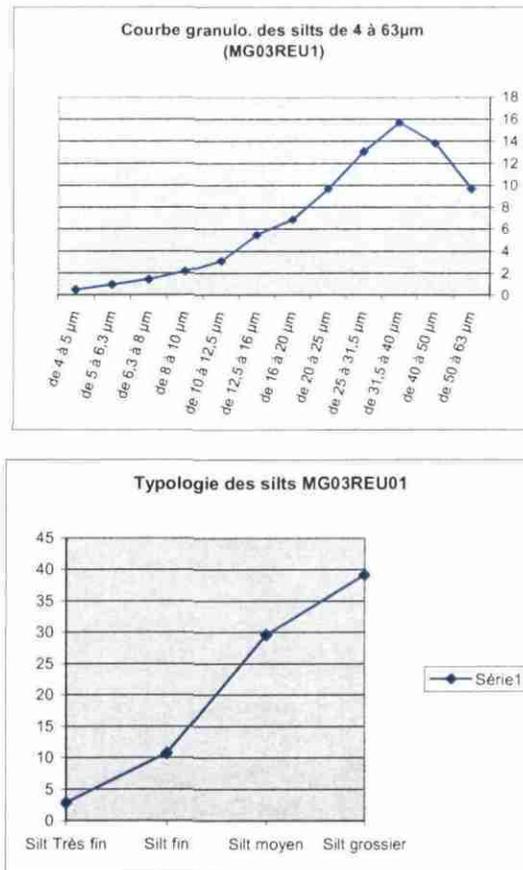


Figure 8 : Courbe granulométrique des silts et par classe de silt (MG03REU1)

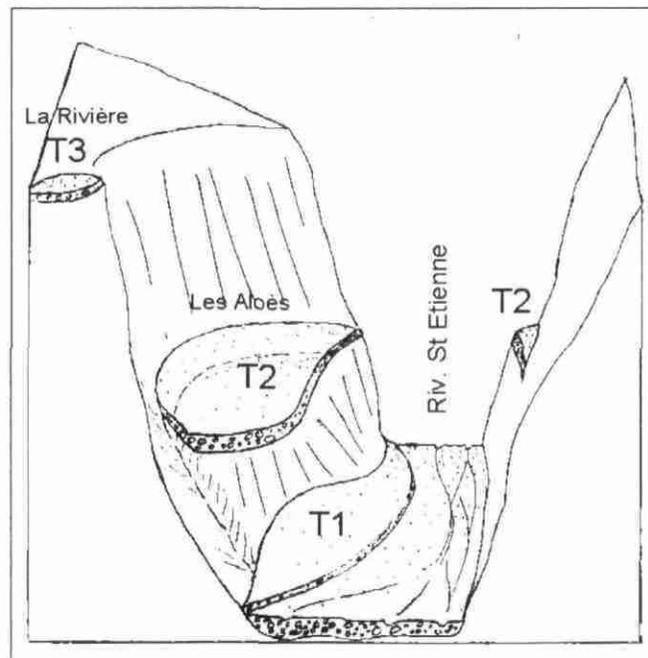


Figure 9 : Schéma de l'étagement des terrasses au niveau des Aloès

*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*

(Riv. Saint-Etienne)

### 3.1.1.3. Ilet Rond (long de route)

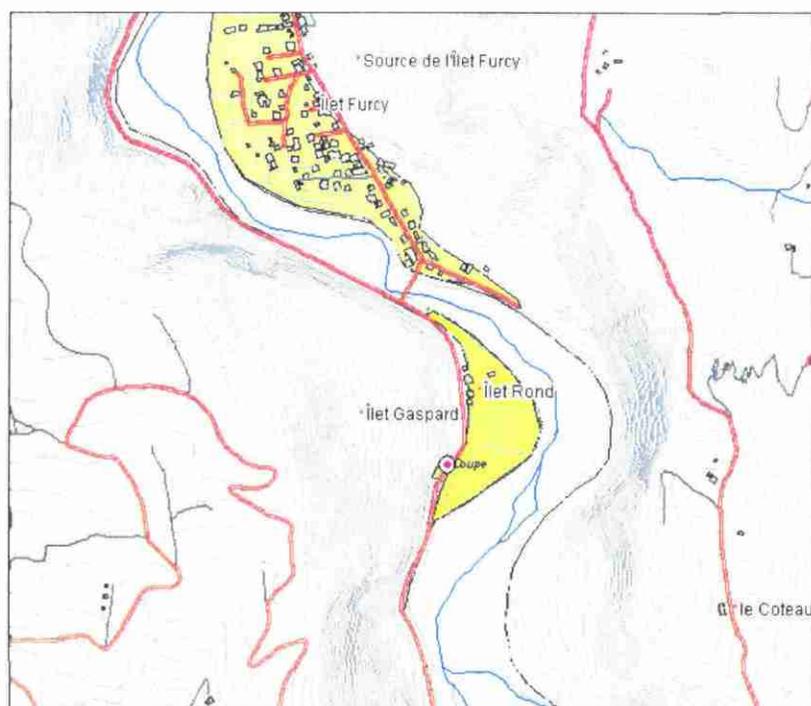


Figure 10 : Extrait de la carte – Secteur de l'Ilet Rond

Le long de la route au Sud de l'Ilet Rond (figure 10), un placage d'alluvions apparemment assez épais (de l'ordre d'une vingtaine de mètres) a été observé. Ce niveau se situe à environ 20 m au-dessus du lit actuel. Les alluvions y contiennent des gros galets et des blocs pluri-décimétriques bien roulés. Latéralement, des dépôts de coulée de boue indurés apparemment postérieurs aux alluvions s'appuient contre le paléorelief formé par celles-ci (figure 11). Les éléments présents dans la coulée boueuse ne sont pas roulés, la densité des blocs par rapport à la matrice est nettement plus faible que celle des alluvions. La coulée de boue est surmontée par des alluvions à éléments figurés de plus petite taille scellant le dispositif (figure 11).

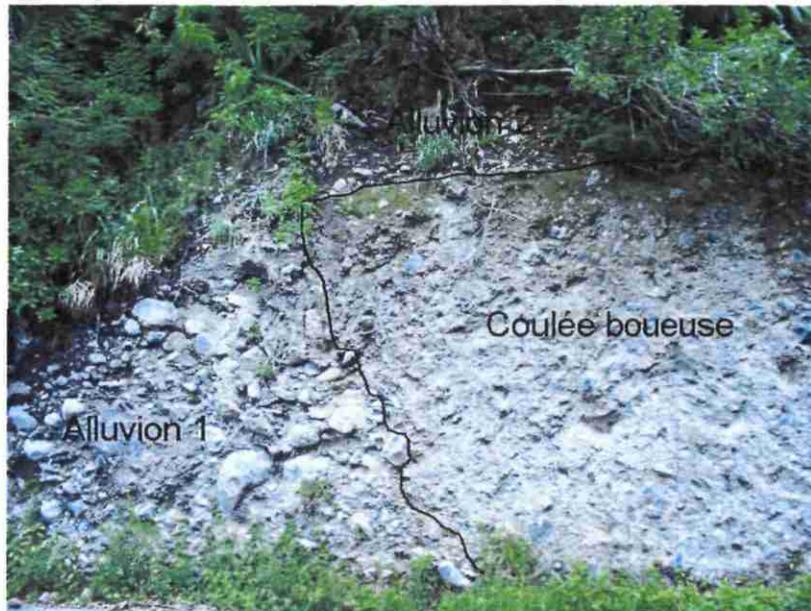


Figure 11 : Contact coulée boueuse et alluvions – Ilet Rond

D'autres lambeaux d'alluvions correspondant au même niveau sont observables localement le long de cette même route, ils sont intercalés dans des faciès de coulées de boue et d'éboulis.

#### 3.1.1.4. Ilet Longue

Deux niveaux étagés de terrasses constitue cet Ilet (aménagé en aire de pique nique). Cette terrasse située à une altitude de l'ordre de + 8 m par rapport à la rivière Saint Etienne correspond à une terrasse plus récente que celle de l'Ilet Rond. La rivière actuelle est dans ce secteur en incision.

#### 3.1.1.5. Le Petit Serré

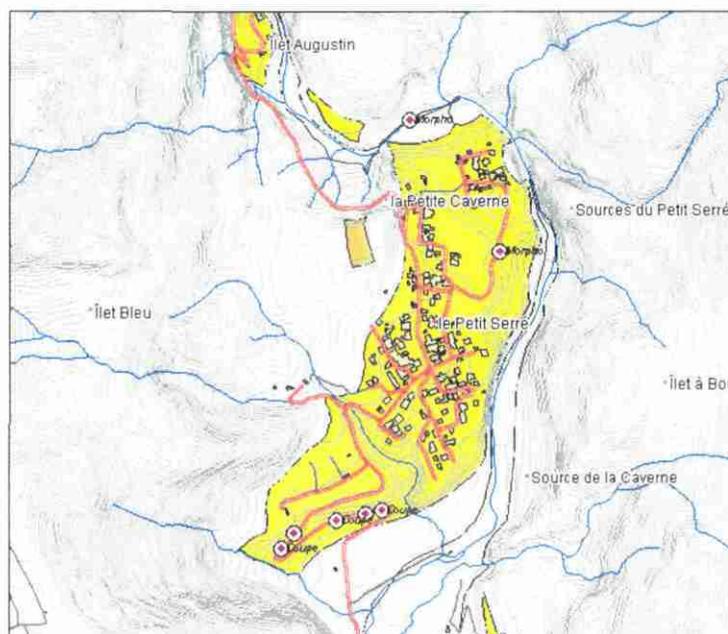


Figure 12 : Extrait de la carte – Secteur du Petit-Serré

Le fossé de bord de route montant au Petit Serré offre une coupe très intéressante (bien que discontinue) dans des alluvions (figure 12). La coupe composite suivante (figure 22) a été reconstituée à partir de sous-coupes isolées et superposées les unes aux autres et numérotées de la base au sommet. Ces coupes sont séparées par des zones sans affleurements. Chaque niveau identifié a été numéroté de la base au sommet.

1. Le premier segment du Petit Serré est constitué par les alluvions à galets et blocs, son épaisseur exacte n'est pas connue, les conditions d'affleurement sont mauvaises.
2. Sable fins avec intercalation lenticulaire de niveaux à graviers (épaisseur indéterminée).
3. 1 m d'alluvions à graviers et galets bien roulés. La taille maximum des galets est de l'ordre de 20 cm. La matrice est sablo-graveleuse, la partie supérieure de cette unité montre un affinement de la granulométrie des éléments figurés et de la matrice qui devient plus sableuse.
4. 0,2 m de sables fins à microchenaux dont le remplissage est constitué de sables très fins. Les structures chenalisées ne sont que de quelques centimètres d'épaisseur à leur maximum, leur remplissage est argileux et de couleur beige.
5. 0,3 m de sables et graviers centimétriques, la transition avec le niveau sous-jacent est progressive.
6. 0,3 m de sables fins présentant des horizons légèrement plus fins identique à l'unité 2.

Discontinuité avec la coupe précédente (séparé par environ 2 m) sans affleurement.

7. Alluvions sableuses avec des chenaux lenticulaires dont l'épaisseur est de l'ordre de 0,8 m. Les systèmes chenalisés présentent un remplissage grossier à galets et graviers dont la taille est centimétrique à pluridécimétrique. La matrice est sablo graveleuse. Les dépôts correspondant à des milieux à forte énergie sont localisés dans les systèmes chenalisés (figures 13, 14). Certains galets de basalte à olivine y sont très altérés.
8. 1,1 m de niveaux alluviaux silto-sableux composés par 3 sous ensembles (figure 14):
  - (a) Les premiers 10 cm sont plus argileux et de couleur beige (MG03REU2, figures 15,16, 17). Les analyses granulométriques montrent une très nette dominance des silts 82% qui contiennent 13% d'argile et 4% de sable. Dans la granulométrie des silts, ce sont les silts moyens qui apparaissent comme largement dominants. Les analyses aux RX montrent que les argiles présentes dans l'échantillon sont composées à 100% de smectites.
  - (b) Horizons à graviers centimétriques d'épaisseur centimétrique à pluricentimétrique s'individualisant dans un ensemble silto-sableux de couleur brun chocolat à stratifications horizontales
  - (c) Niveau sableux à graviers et petits galets
9. Alternances de niveaux sableux chocolat et de niveaux grossiers à galets. Les niveaux fins et grossiers ont une épaisseur comprise entre 20 et 60 cm.



Figure 13 : Coupe du Petit Serré, niveau 7

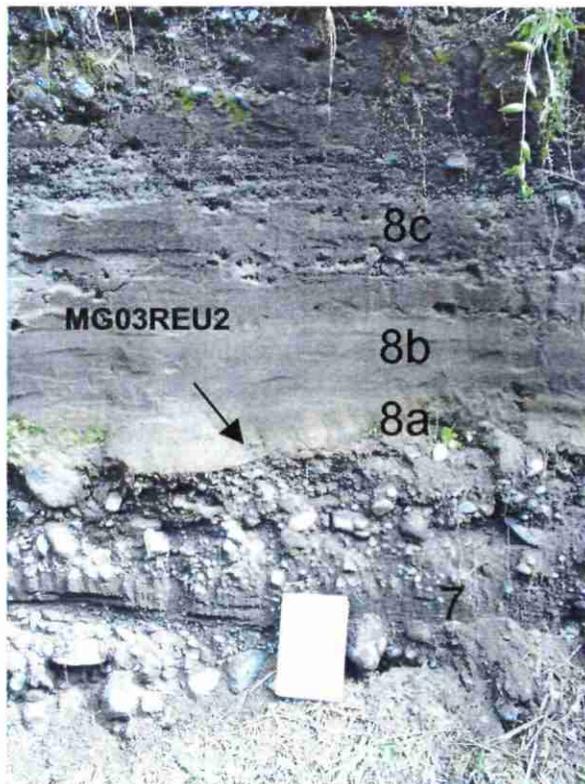


Figure 14 : Coupe du Petit Serré, niveaux 7 et 8

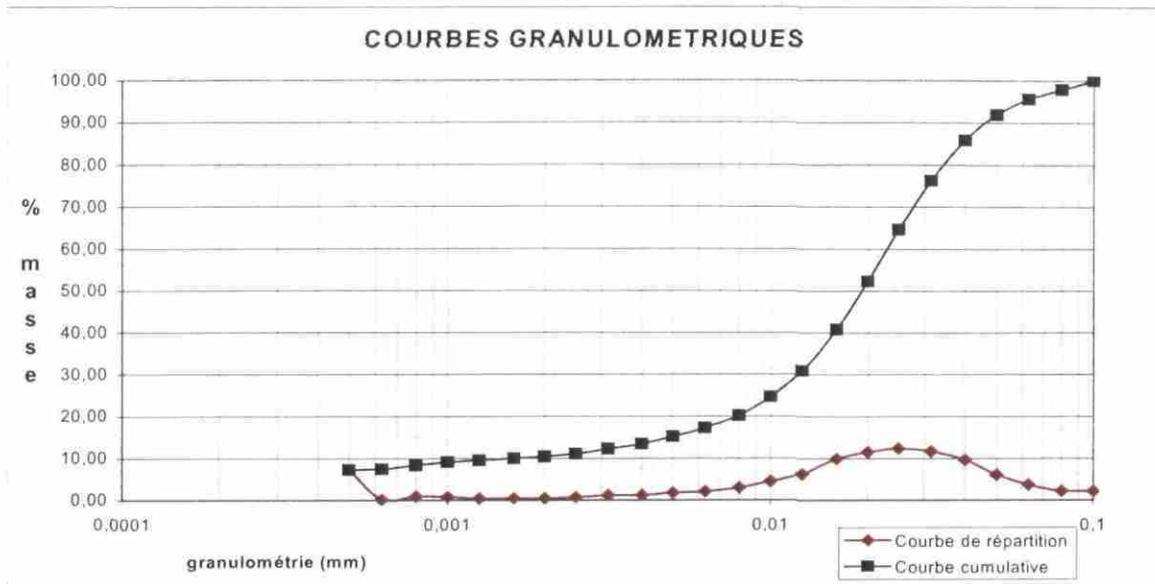


Figure 15 : Courbe granulométrique MG03REU2 (Petit- Serré, Niveau 8a)

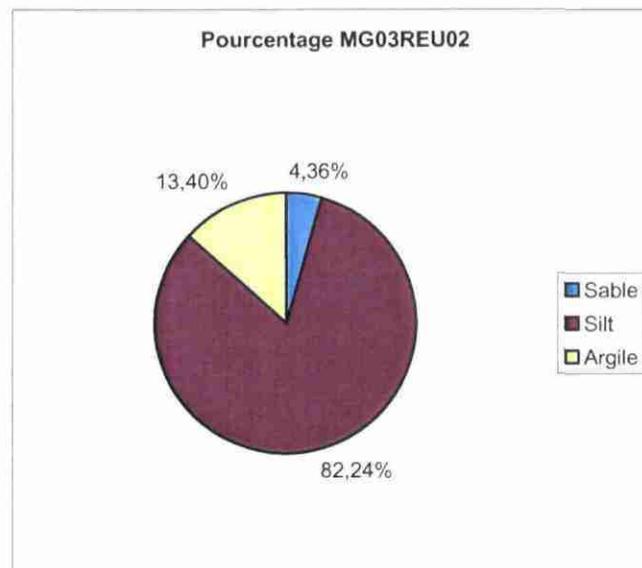


Figure 16 : Classes granulométriques des niveaux silto-limoneux (MG03REU2, Petit-Serré, Niveau 8a)

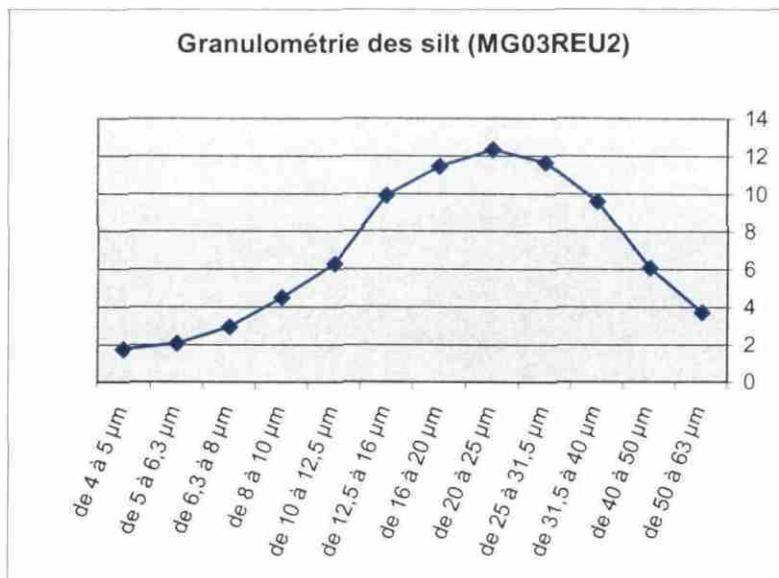


Figure 17 : Analyse granulométrique des silts (MG03REU2, Petit-Serré, Niveau 8a)

Discontinuité avec la coupe précédente, la base de cet affleurement est probablement située à au moins 2 m au-dessus du sommet de la coupe 4 (figure 18).

10. 1,5 m de sables fins de couleur chocolat, le sommet de ce niveau est irrégulier.
11. 1,2 m de silt limoneux de couleur chocolat avec des horizons plus grossiers sableux montrant une organisation en microchenaux ou petits chenaux, des stratifications obliques sont à noter (figure 19).
12. 0,8 m de sable lité à stratifications obliques et horizontales, des niveaux d'épaisseur centimétrique à graviers sont présents (figure 19).
13. Ensemble argilo sableux à horizons fins centimétriques d'argiles beiges et à lit argilo sableux à galets (figure 20).



Figure 18 : Coupe du Petit Serré, niveaux 10 à 13

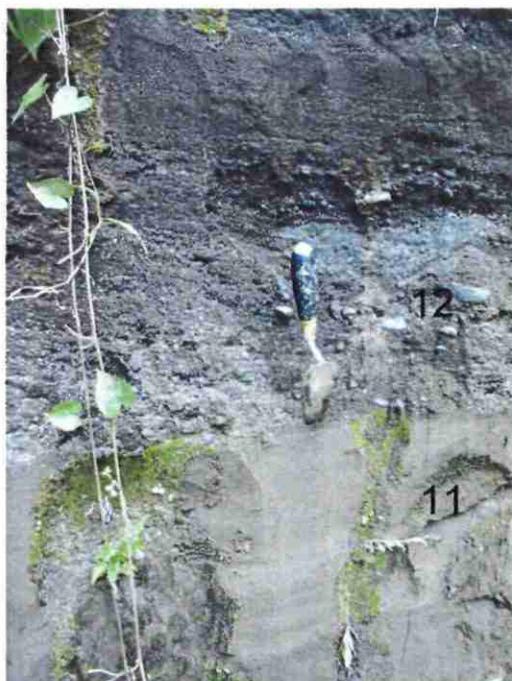


Figure 19 : Coupe du Petit Serré, niveaux 11 et 12



Figure 20 : Coupe du Petit Serré, niveau 13 (détail)

14. Affleurement d'environ 8 m d'alluvion grossière à galets et petits blocs roulés reposant sur les unités fines à sables chocolat (figure 21). La matrice de cette alluvion est constituée par une matrice sableuse. On note une alternance de niveaux essentiellement constitués par la matrice avec des niveaux à galets et blocs conférant à cette unité un litage bien visible. Cet ensemble constitue l'armature du plateau sous le village du Petit Serré, l'épaisseur réelle de cette unité est donc bien supérieure aux 8 m affleurants.

15.



Figure 21 : Coupe du Petit Serré, niveau 14

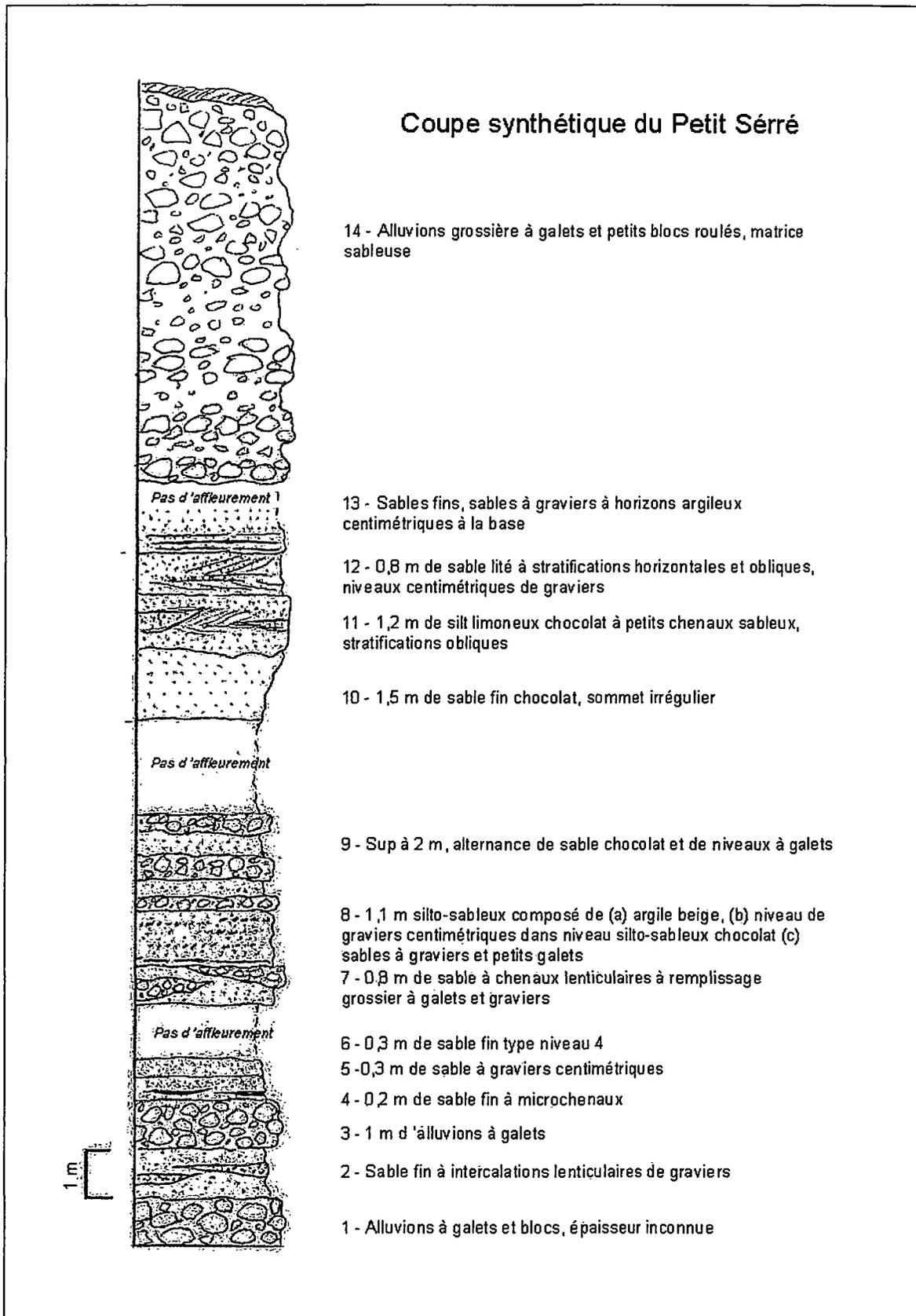


Figure 22 : Log synthétique de la coupe du Petit Serré (Rivière Saint-Etienne)

### 3.1.1.6. Ilet Augustin (virage)

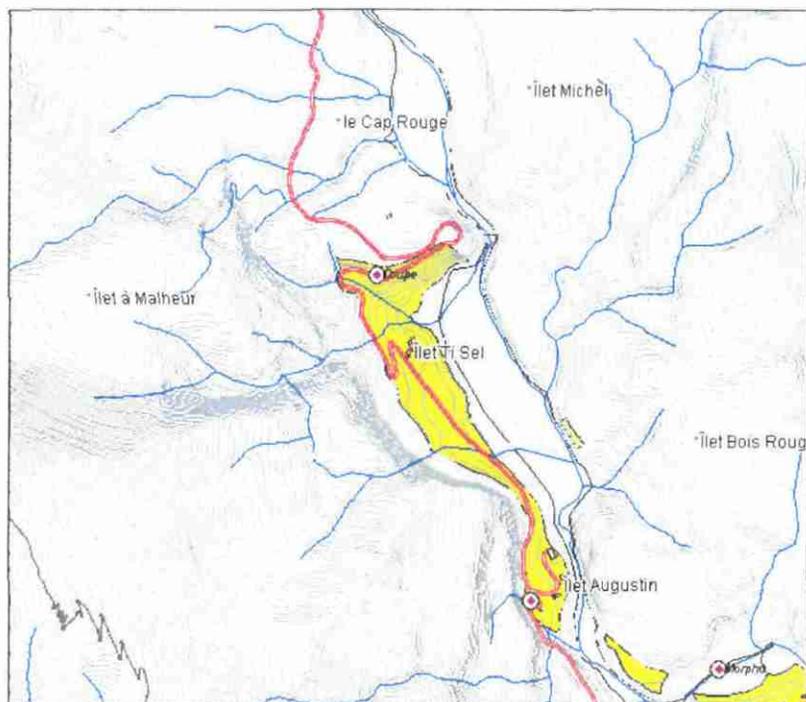


Figure 23 : Extrait de la carte – Ilet Augustin et Ilet Ti-Sel

Le long de la route au niveau de l'Ilet Augustin un niveau limoneux très compact affleure sur 2 m d'épaisseur. Il est surmonté par des niveaux d'alluvions grossières à galets et graviers. Latéralement ces horizons limoneux passent à des alluvions grossières (figure 23, 24).

1. 0,6 m de limon compact brun chocolat
2. 0,4 m de limon argileux compact chocolat alternant avec des niveaux beige clair plus argileux (figure 25). L'épaisseur de ces horizons est très variable et oscille entre quelques centimètres et 15 cm. Les niveaux clairs sont déformés par des figures de charges indiquant que les unités chocolat se sont sédimentées très rapidement sur un sédiment non induré et encore gorgé d'eau. Ces niveaux argileux clairs pourraient correspondre à des niveaux de cendre argilisés.



Figure 24 : Vue d'ensemble de la coupe de l'Ilet Augustin (Cilaos21)



Figure 25 : Détail des horizons argileux beiges – Ilet Augustin

### 3.1.1.7. Illet Ti Sel

Une importante série alluviale affleure le long de la route dans la boucle au nord de l'Illet Ti Sel. Cette série puissante est constituée par des alluvions grossières à galets et à blocs bien roulés enveloppés par une matrice sableuse. L'épaisseur apparente des alluvions est supérieure à 20 m. Ce lambeau d'alluvion est plaqué contre des dépôts de type coulée de boue qui affleure sur le flanc Nord de la crête sur laquelle est construite la route. Aucun niveau d'alluvion fine n'y a été observé.

### 3.1.1.8. Illet Palmiste

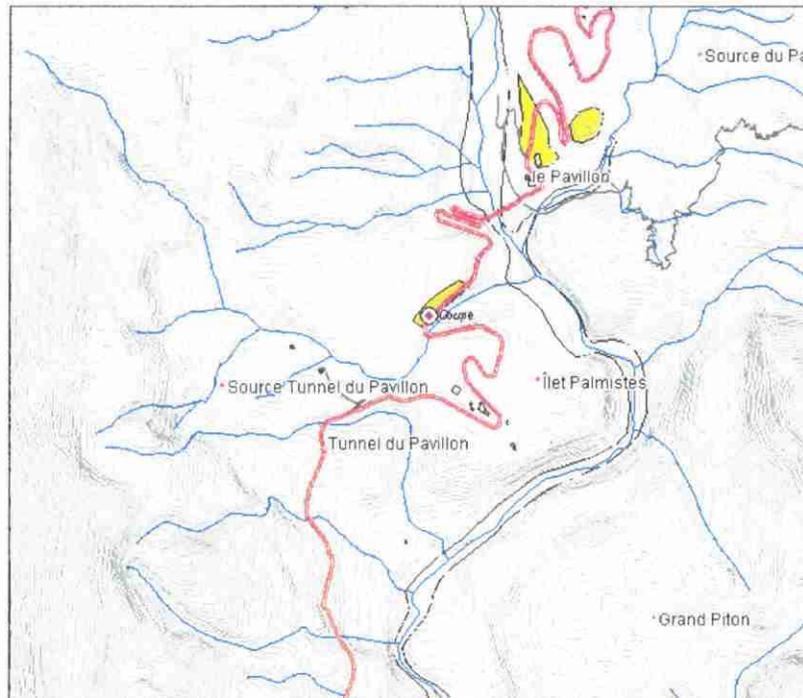


Figure 26 : Extrait de la carte - Illet Palmiste, Le Pavillon

Entre l'Illet Palmiste et le Pavillon, une importante série alluviale affleure le long de la route (figure 26). Ces alluvions litées sont globalement constituées par une alternance de niveaux à galets décimétrique à pluridécimétriques bien roulés emballés dans une matrice sableuse et de niveaux plus fins sablo-graveleux d'épaisseur métrique.

Localement, des niveaux de brèches apparaissent en intercalation au milieu des alluvions. Latéralement, les alluvions passent à des ensembles à lithologies plus fines.

La coupe suivante (figure 27) peut y être observée :

1. 6 m d'alluvions à galets et blocs pluridécimétriques bien roulés dans une matrice sablo-graveleuse. Certains galets présents sont très altérés dans une proportion évaluée à 40%. S'agit-il d'alluvions « cannibales » c'est à dire ayant remanié des ensembles alluviaux plus anciens dont les éléments figurés ont tous été altérés ou s'agit-il simplement de l'influence de la lithologie des galets sur la vitesse d'altération ?
2. 2 m de niveau silto-limoneux.
3. 0,6 m d'alluvions à galets décimétriques dans une matrice sableuse.
4. 1 m d'alluvion sableuse fine.
5. 0,3 m d'alluvions grossières à galets.
6. 0,6 à 0,8 m d'alluvion sableuse fine.
7. Plusieurs mètres de niveaux sableux à gravier.
8. Le haut de la coupe qui n'est pas accessible et peu visible n'a pu être décrit.

En se déplaçant latéralement, les alluvions du niveau 1 de la coupe précédente passent latéralement à des dépôts de milieu de plus faible énergie. La coupe suivante illustre ce type de dépôt (figure 28) :

1. 0,8 m de niveau à galets.
2. 0,6 m de silt limoneux brun présentant des figures de chenalisations, ravinement etc.(figure 29).
3. Sables et graviers dont l'épaisseur apparaît comme variable. Des horizons hétérogènes avec quelques stratifications obliques y sont marqués par des niveaux millimétriques silteux.
4. Niveau à graviers roulés et rares galets avec un pourcentage de matrice faible.
5. 0,4 m de silt limoneux brun.
6. Alluvions « classique » grossière à galets emballés dans une matrice silteuse.

Cette coupe se situe environ à 70 m au-dessus du lit actuel de la rivière.

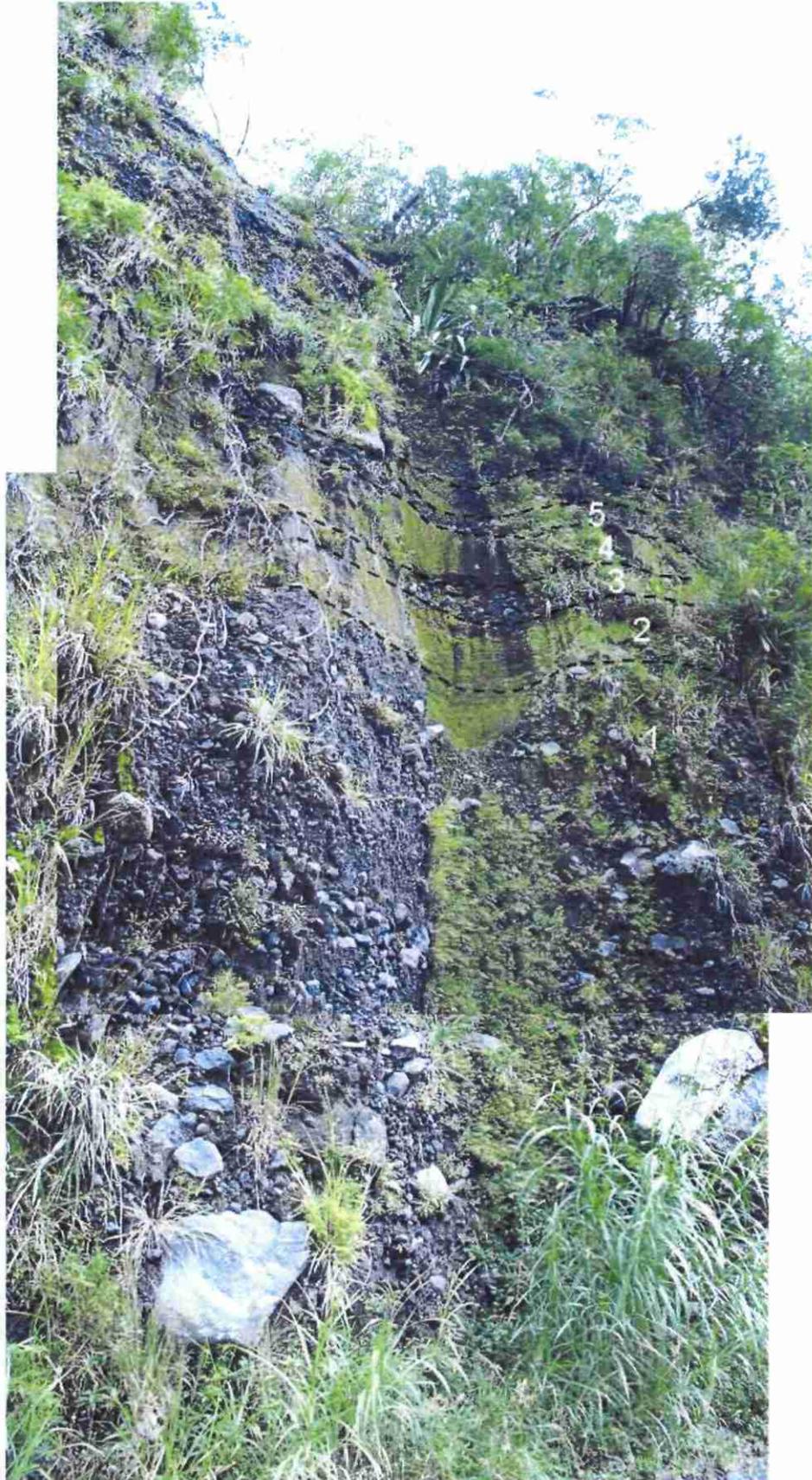


Figure 27 : Coupe d'ensemble (Ilet Palmiste, coupe au niveau de la route)



Figure 28 : Alternance de niveaux fins et plus grossiers (Ilet Palmiste, coupe au niveau de la route) Photo Cilaos32



Figure 29 : Détail d'un ravinement intra-alluvion et remplissage chenalisé par des sables fins dans l'unité 2 (Ilet Palmiste, coupe le long de la route)

Les logs des deux coupes précédentes sont schématisés dans la figure 30 ci-dessous.

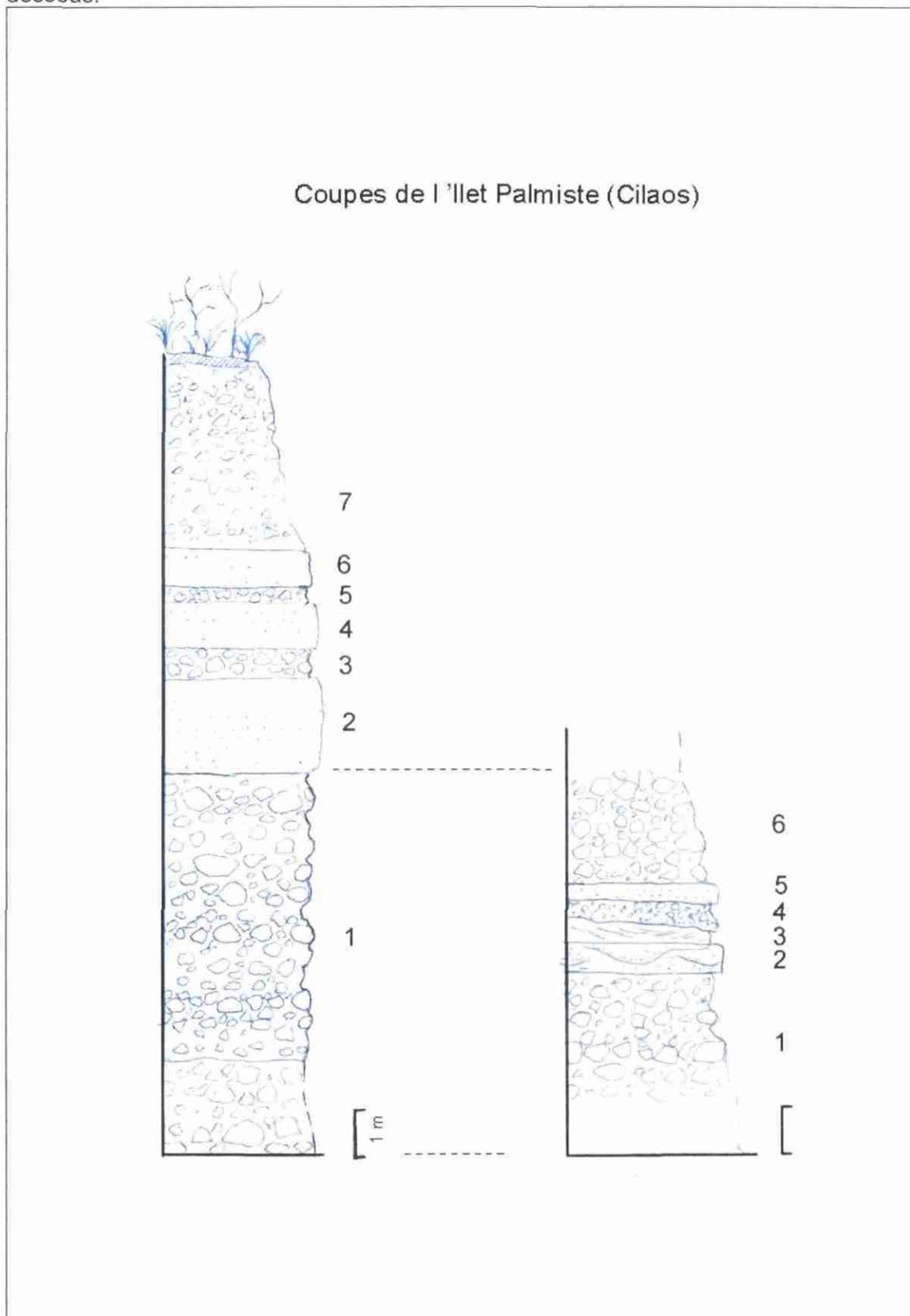


Figure 30 : Logs des coupes de l'Îlet Palmiste (Cilaos)

### **3.1.1.9. Le Pavillon**

Au niveau du Pavillon, deux ensembles alluviaux superposés affleurent. Le premier occupe une petite surface sous les habitations notamment. Ces alluvions constituées de sables de graviers et galets sont à attribuer au Grand Bras de Cilaos (rive gauche).

En remontant la route à environ une dizaine de mètres, on peut observer des alluvions « classiques » à graviers et galets sur une paléo-morphologie de plancher alluvial. Cette paléo-morphologie est bien visible par le rafraîchissement du talus le long de la route. Bien qu'altimétriquement proche des alluvions du Pavillon *sensu stricto*, ces alluvions sont des reliques d'alluvions du Petit Bras de Cilaos et correspondent à la rive droite de ce même bras.

### **3.1.1.10. Ilet à Cordes amont / Ilet Totor**

Le long de la route menant à Ilet à Cordes à proximité de l'Ilet Totor (1130 m), un affleurement a permis d'observer une série de brèche à blocs et galets hétérométriques et pluri-décimétriques dans une matrice graveleuse à cailloutis (figure 31). Cette brèche renferme des galets bien roulés très altérés (figure 32) évoquant des éléments issus d'alluvions très anciennes remaniés dans des brèches d'éboulis. Il s'agirait donc de témoins d'alluvions très anciennes (?) dont on ne connaît pas, pour le moment d'éléments, en place dans cette zone de fond de cirque.



Figure 31: Affleurement de brèche à galets alluviaux remaniés – Ilet à Corde



Figure 32 : Galets bien roulés, très altérés pris dans la brèche – Ilet à Corde

### 3.1.2. Cirque de Salazie et la Rivière du Mât

#### 3.1.2.1. Les gorges de la Rivière du Mât

##### 3.1.2.1.1. Pont de l'escalier

Les travaux de terrain 2003 ont permis de mettre en évidence au moins 3 niveaux de terrasses anciennes dans les gorges de la Rivière du Mât. Ces niveaux de terrasses ont été cartographiés et libellés selon leur altitudes et donc leurs chronologies relatives en partant du lit vif actuel (T0 a, b) en T1, T2, T3 et T indéterminée (figure 33). La cartographie, à l'aval du pont de l'ancienne route nationale, n'a pas été réalisée.

Les terrasses T1 sont très largement développées entre le pont de l'ancienne route nationale et le pont de l'Escalier, notamment les Ilets Petit Trou et Payet qui en sont les expressions. Ces alluvions ont une épaisseur de l'ordre de 20 m au maximum observés, leur base est juste au-dessus du niveau des alluvions actuelles dans ce secteur.

De part et d'autre du Pont de l'Escalier, des niveaux de terrasses sont observables et sont attribués au niveau T2 à 30 m au-dessus du lit actuel. En amont de ce point, de nombreux lambeaux résiduels de cette même terrasse sont observables. Le hameau de l'Escalier est lui-même installé sur la T2. 30 à 40 m au-dessus, des témoins de terrasses alluviales plus anciennes sont observables, ils ont été attribués T3 (90 m au dessus du lit actuel).

Un arrachement en RG à proximité immédiate du Pont de l'Escalier semble montrer la présence d'horizons fins dans le niveau de terrasse T3. Toutefois, les conditions météorologiques ne nous ont pas permis d'accéder à l'affleurement.

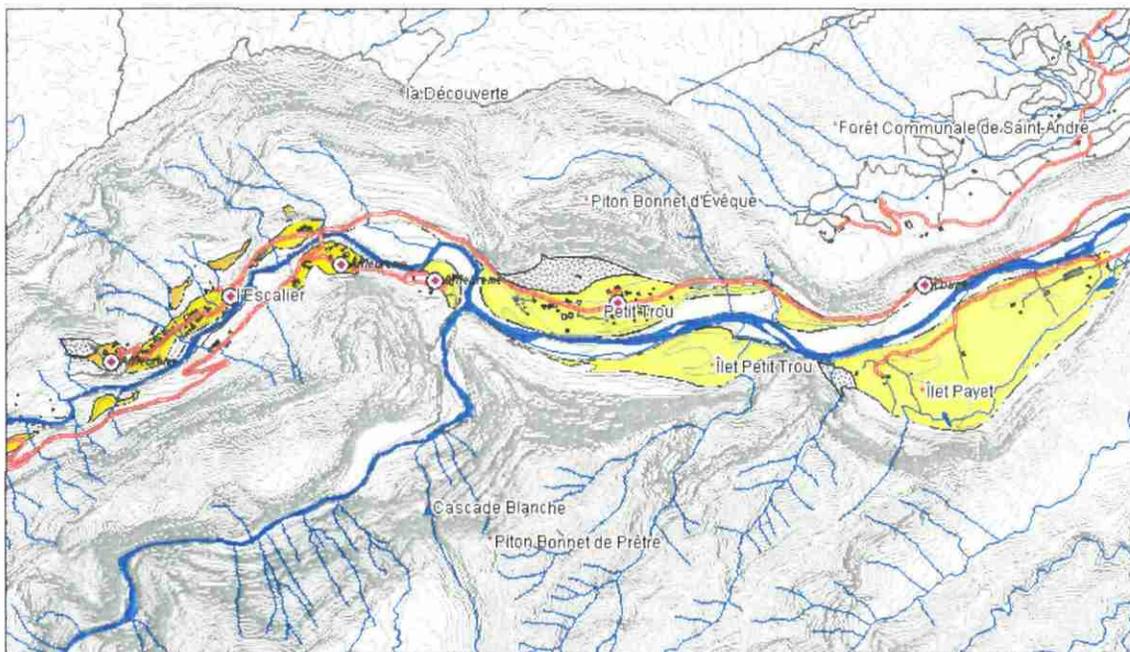


Figure 33 : Gorge de la Rivière du Mat aval – Extrait de la carte

### 3.1.2.1.2. Plateau Wickers

La zone amont des gorges aux alentours du Plateau Wickers et de La Cayenne permet d'observer des terrasses morphologiques à caractères alluviaux attribués à T3, à 90 m au-dessus du lit actuel (figure 34).

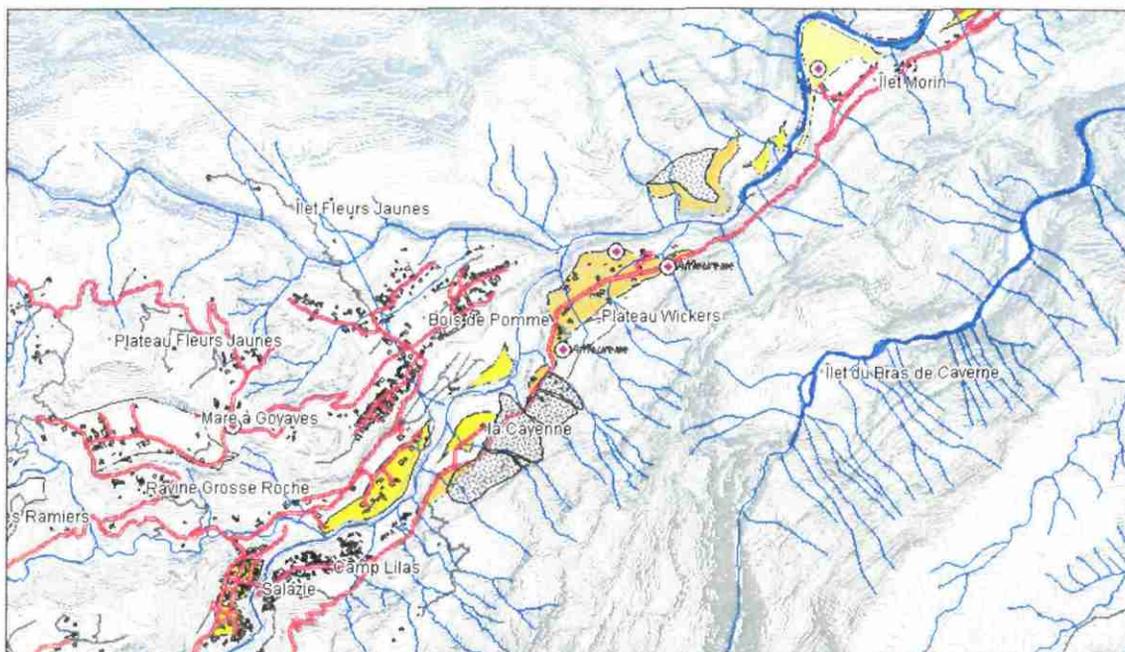


Figure 34 : Gorge de la Rivière du Mât amont – Extrait de la carte

### 3.1.2.1.3. Environs de Salazie

#### 3.1.2.2. Mare à Citron

##### 3.1.2.2.1. Mare à Citron - Est

Le long de la route du Pont de la Savane-Mare à Citron (arrêt de bus Manguier) dans des sables bruns affleurent, à la faveur d'un talus, sur une épaisseur visible de 80 cm (figure 35). Aucune structure sédimentaire n'y est visible, le sable apparaît comme très homogène. L'analyse granulométrique réalisée sur ces sables (Echantillon MG03REU3, figures 36, 37, 38) montre qu'il s'agit d'un sédiment composé de 45 % de sable, 44 % de silt, les 11% restant étant de la classe des argiles. Ces sables silteux dont la géométrie de dépôt n'est pas connue avec précision, correspondent vraisemblablement à des dépôts de faible énergie de milieu soit alluvial voir palustre.

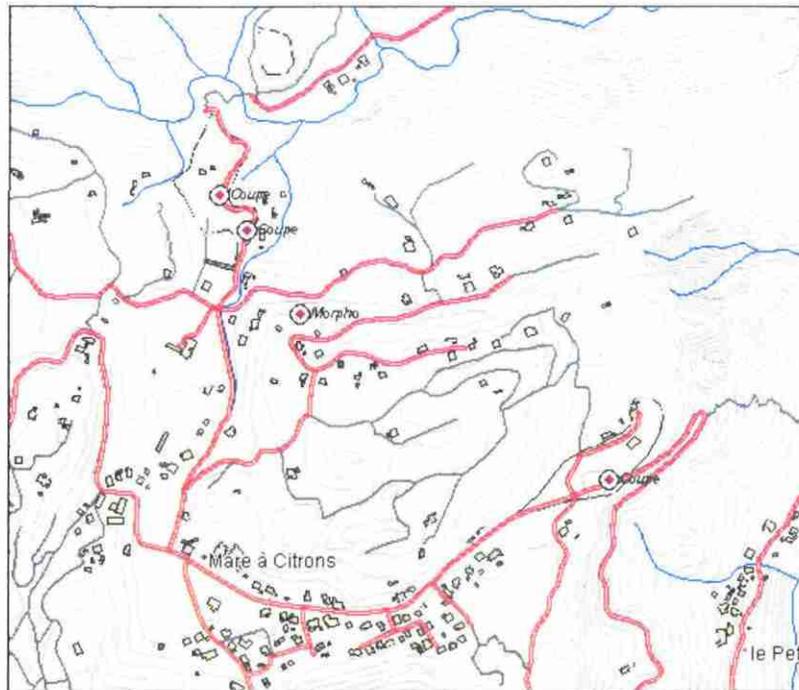


Figure 35 : Mare à Citron - Extrait de la carte

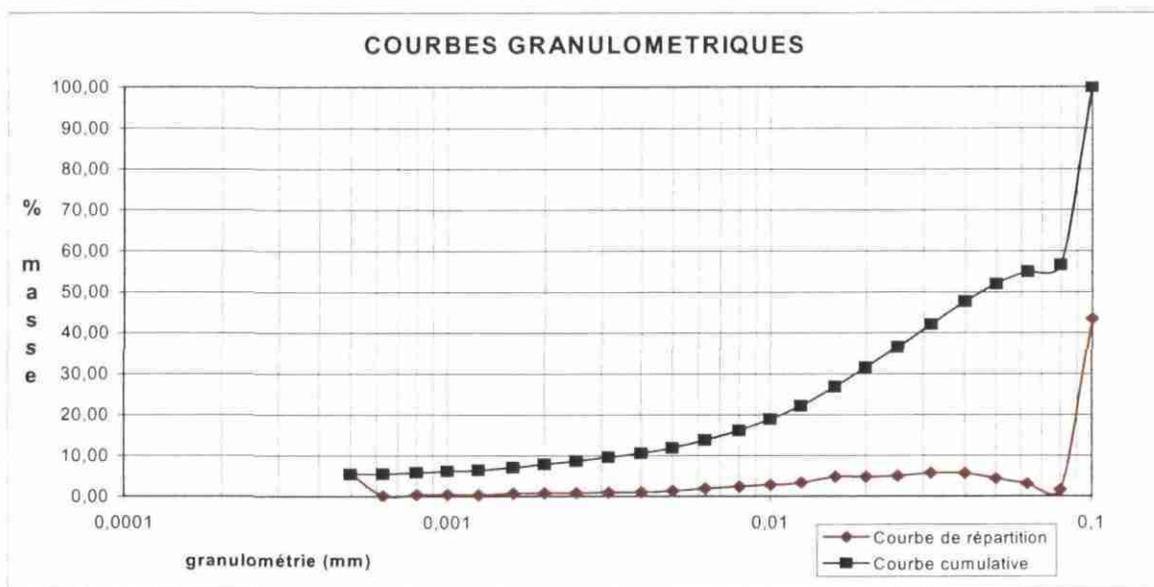


Figure 36 : Analyse granulométrique des sable de Mare à Citrons (MG03REU3)

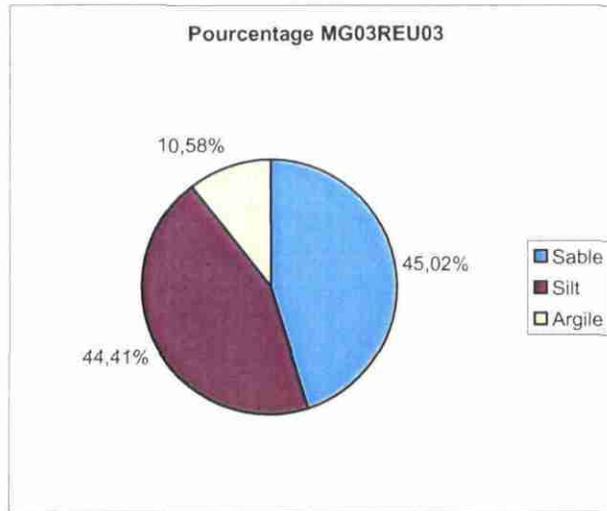


Figure 37 : Caractérisation granulométrique des sables de Mare à Citron (MG03REU3)

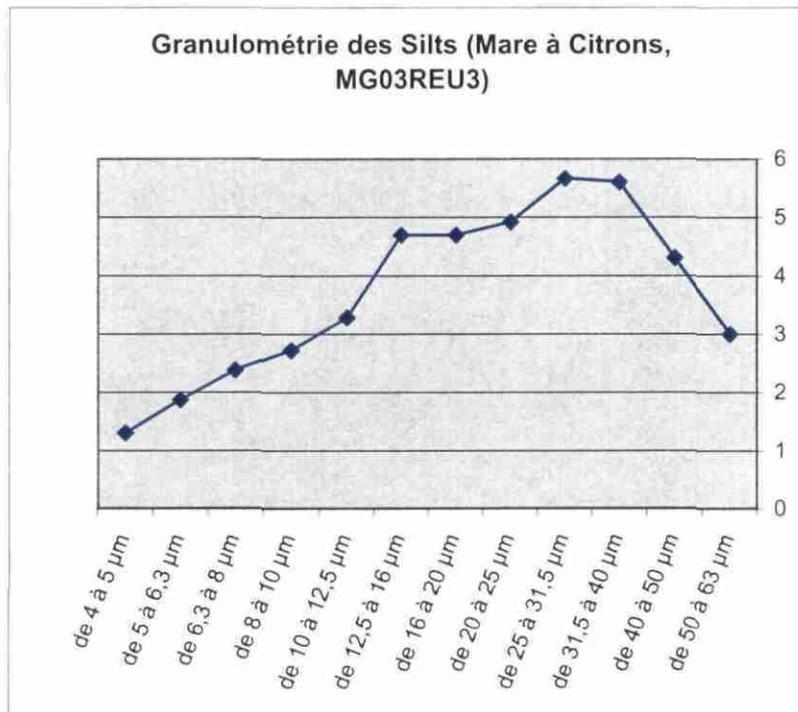


Figure 38 : Courbe granulométrique de la fraction silteuse des sables de Mare à Citron (MG03REU3)

### **3.1.2.2. Mare à Citron Nord – Direction Ravine Grosse Roche**

Le long du chemin menant à Ravine Grosse Roche, affleure un ensemble alluvial qui constitue le substrat d'un replat morphologique (figure 35, carte).

La coupe (figure 39) permet d'observer les niveaux suivants :

- 1) 2 m minimum de galets et graviers dans une matrice sableuse.
- 2) Environ 40 cm de sable fin à moyen de couleur brun sombre.
- 3) 60 cm de graviers et galets polygéniques pluridécimétriques emballés dans une matrice sableuse.
- 4) 40 cm de petits graviers de taille centimétrique à quelques centimètres.
- 5) 1,5 m de galets et blocs pluri-décimétrique formant l'armature du replat morphologique.

Cette coupe permet de caractériser des dépôts de type alluviaux situés à environ 40m au-dessus du lit actuel de la Ravine Grosse Roche. Ils sont les témoins d'une ancienne terrasse alluviale dont on retrouve cartographiquement et de proche en proche la géométrie et s'étend jusqu'au replat de Mare à Goyave. Ceci démontre le caractère à l'origine alluvial de ces replats qui se situent à des altitudes de l'ordre de 590 à 600 m. Ces replats sont parfois occupés par des petites mares, et présentent donc un caractère secondaire.

Les dépôts de Mare à Citron Est se situent altimétriquement 30 m au-dessus du sommet de la coupe Ravine Grosse Roche. L'absence pour le moment de critère fiable ne permet pas à priori de définir leur appartenance à ce même système alluvial mais la question reste posée.



Figure 39 : Coupe dans les alluvions - Mare à Citron Nord

### 3.1.3. Cirque de Mafate

Haut de Mafate

#### 3.1.3.1. La Plaine aux Sables

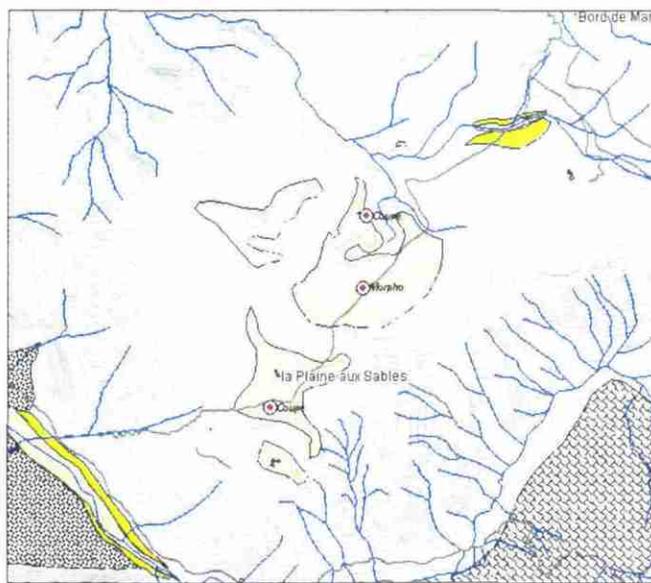


Figure 40 : Extrait de la carte de la Plaine aux Sables (sédiments fins alluviaux de la Plaine aux Sables)

Le secteur de la Plaine aux Sables montre plusieurs morphologies plates ou faiblement inclinées, superposées (figures 40, 41). Certains affleurements facilement accessibles ont permis d'observer deux coupes partielles des sédiments présents sur ces morphologies.

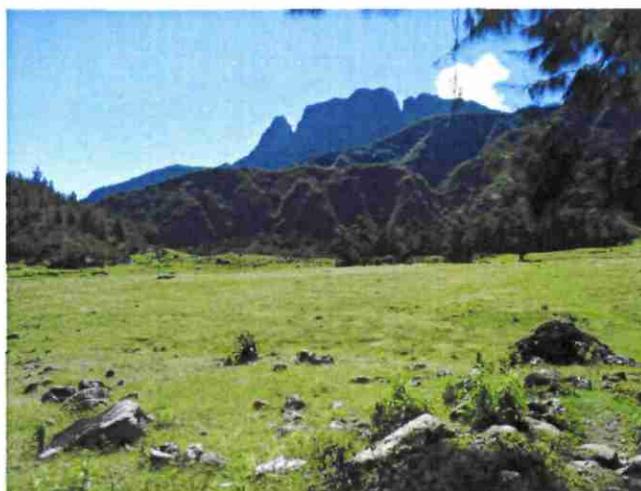


Figure 41 : Vue d'ensemble de la partie basse de la Plaine aux Sables

### **3.1.3.1.1. Coupe de la bergerie**

Cette coupe située au Nord de la zone de la Plaine aux Sables (partie basse) a montré 6 horizons sédimentaires représentant environ 3 m de puissance totale. Latéralement, des affleurements non accessibles en bordure de la Plaine aux Sables, semblent montrer que l'épaisseur totale de ces dépôts est plus importante.

La coupe est décrite de bas en haut :

1. **Sable fin marron à zones oxydées rougeâtres plus grossières sans structure sédimentaire visible (figure 42).** L'épaisseur apparente de cet horizon est de 1 m. La granulométrie s'affine progressivement vers le haut, le sédiment devient silto-limoneux (MG03REU4). L'analyse granulométrique réalisée sur l'échantillon a montré qu'il était composé à 72 % par des sables, 19 % par des silts, les 9% restant étant de la classe granulométrique des argiles. Le traitement dans le détails des classes des silts montre une légère dominance des silts fins et moyen, les silts très fins et grossier étant moins développés (figure 47).
2. **60 cm de silt limoneux brun à ocre à flammèches rousses (MG03REU5, figure 43).** L'analyse granulométrique du sédiment montre qu'il est composé à 63 % de silt, 32 % d'argile et 5 % de sable. L'analyse dans le détail des fractions silteuses montre la prédominance des silts fins et moyens sur les silts très fins tandis que les silts grossiers sont franchement sous représentés (figure 48).
3. **Environ 50 cm de niveau argileux brun avec quelques horizons centimétriques argileux de couleur beige (figure 44).** Des lamines millimétriques sont visibles dans cet ensemble. Localement, on constate des invaginations des niveaux argileux beiges dans les niveaux brun ocre (MG03REU6 niveaux ocres ; MG03REU7 niveaux beige, P1010039). Des analyses de détermination des argiles par RX montrent que la phase argileuse ces deux niveaux est constituée à 100% par des smectites.
4. **15 cm de sable et gravier dont certains sont anguleux, la partie supérieure contient des galets anguleux pluricentimétriques « cailloutis » (figure 45).**
5. **20 cm d'argile brune avec de fins lits d'argile beige, ce niveau est similaire au niveau 3 (figure45).**
6. **50 cm de sables, graviers et cailloutis centimétriques anguleux.**

Ces niveaux ne semblent subsister que dans les zones en dépression de Plaine aux sables. Un log synthétique est présenté dans la figure 46.



Figure 42 : Coupe de la Plaine aux Sables - Niveau 1



Figure 43 : Coupe de la Plaine aux Sables – Niveau 2



Figure 44 : Coupe de la Plaine aux Sables - Niveau 3



Figure 45 : coupe de la Plaine aux Sables – Niveau 4 et 5

*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*

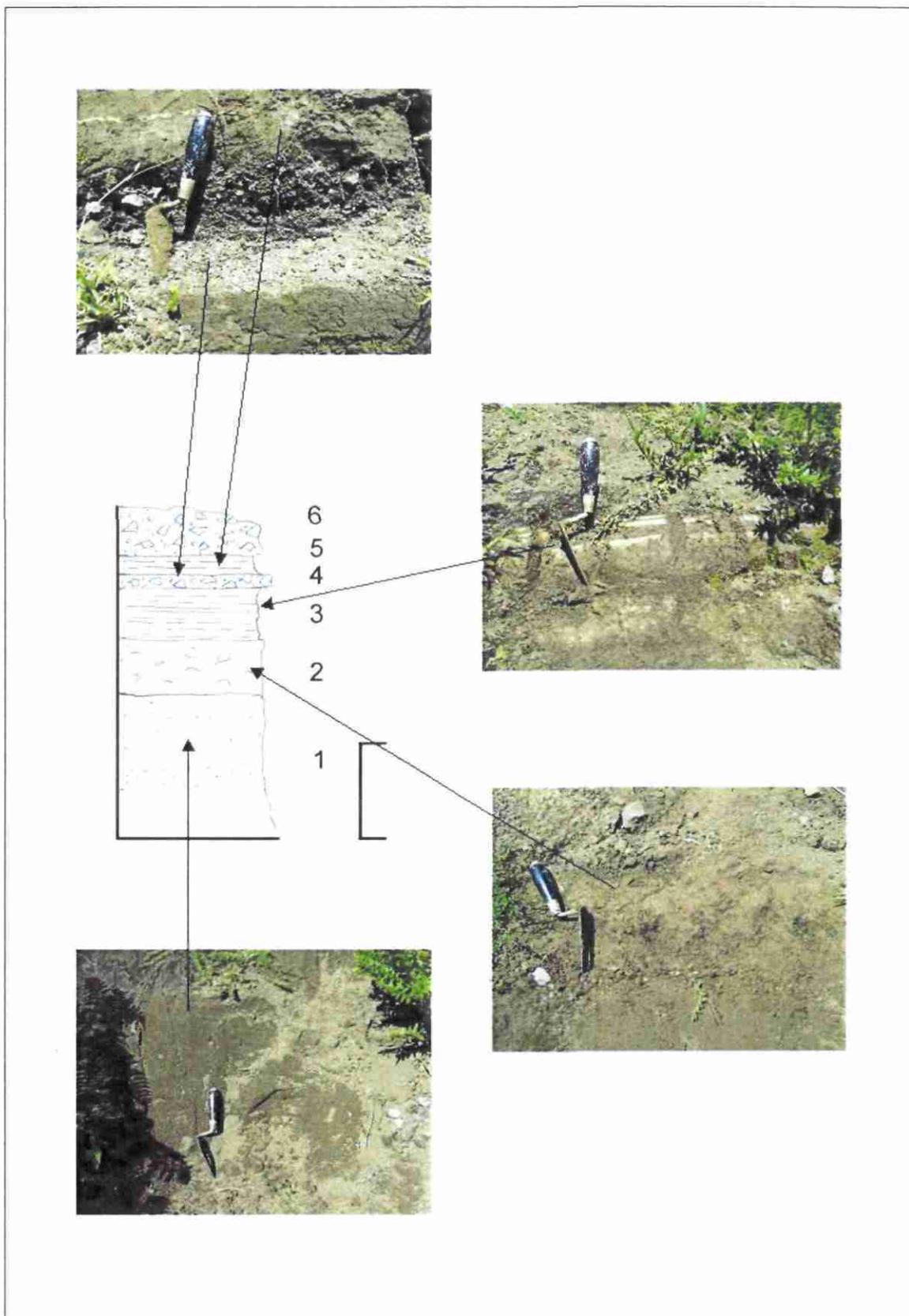


Figure 46 : Coupe de la Plaine aux Sables (coupe de la Bergerie)

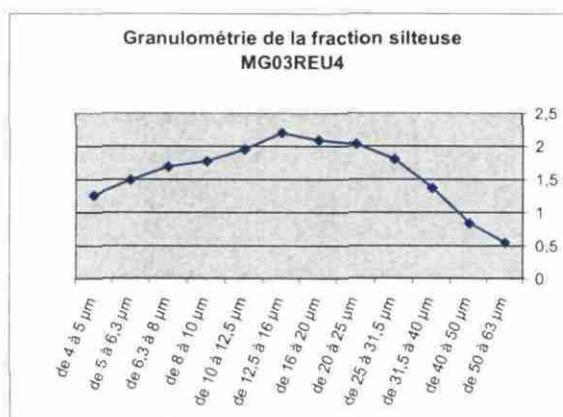
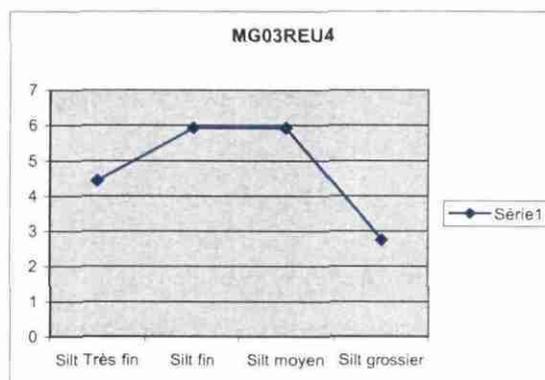
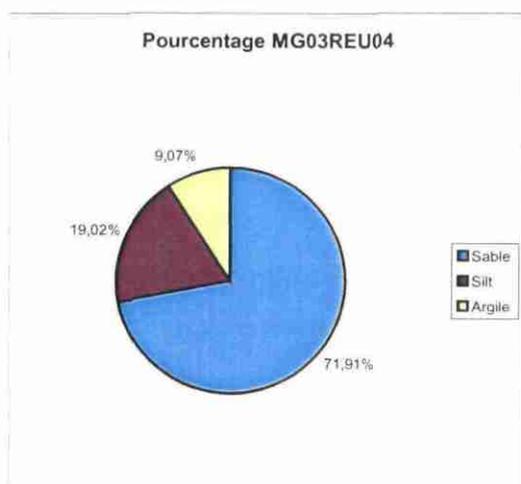
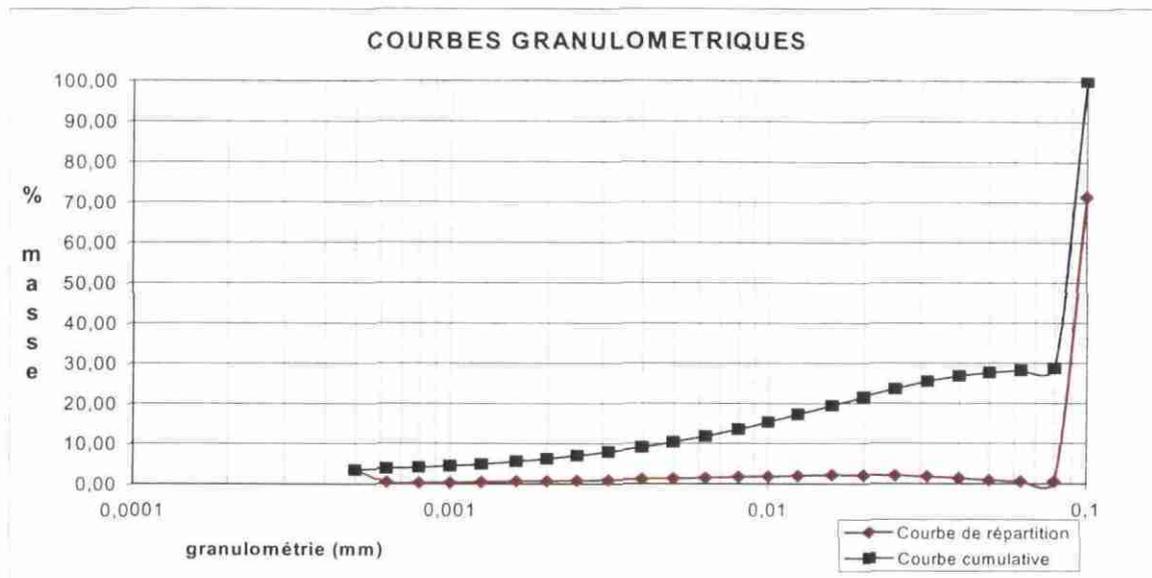


Figure 47 : Analyses granulométriques du niveau 1 (MG03REU4) de la coupe de la Plaine aux sables

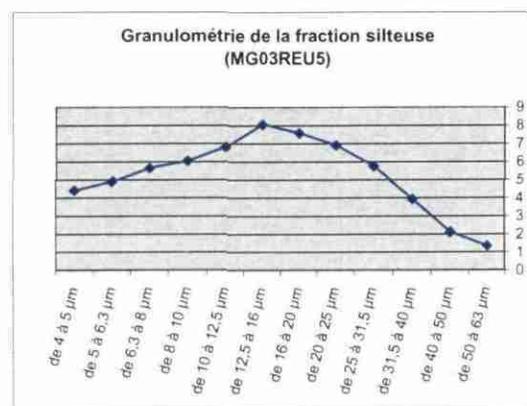
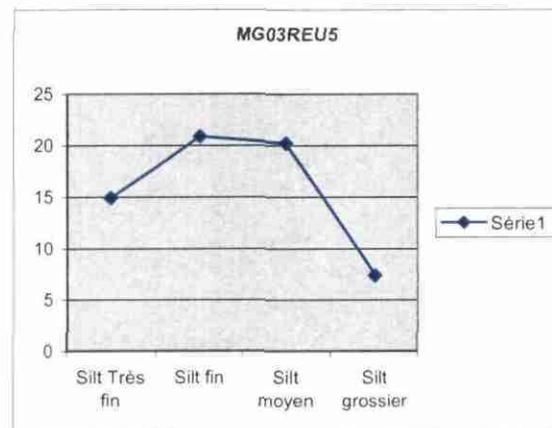
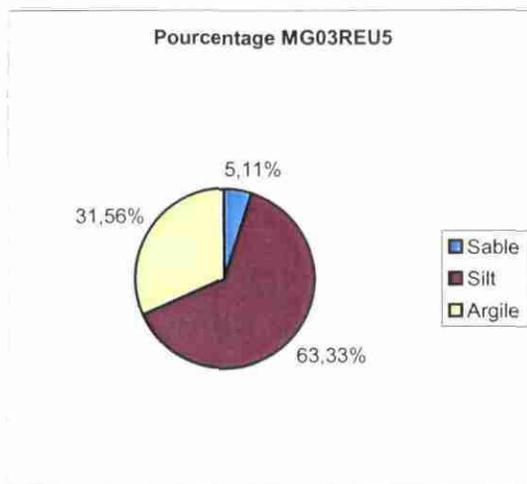
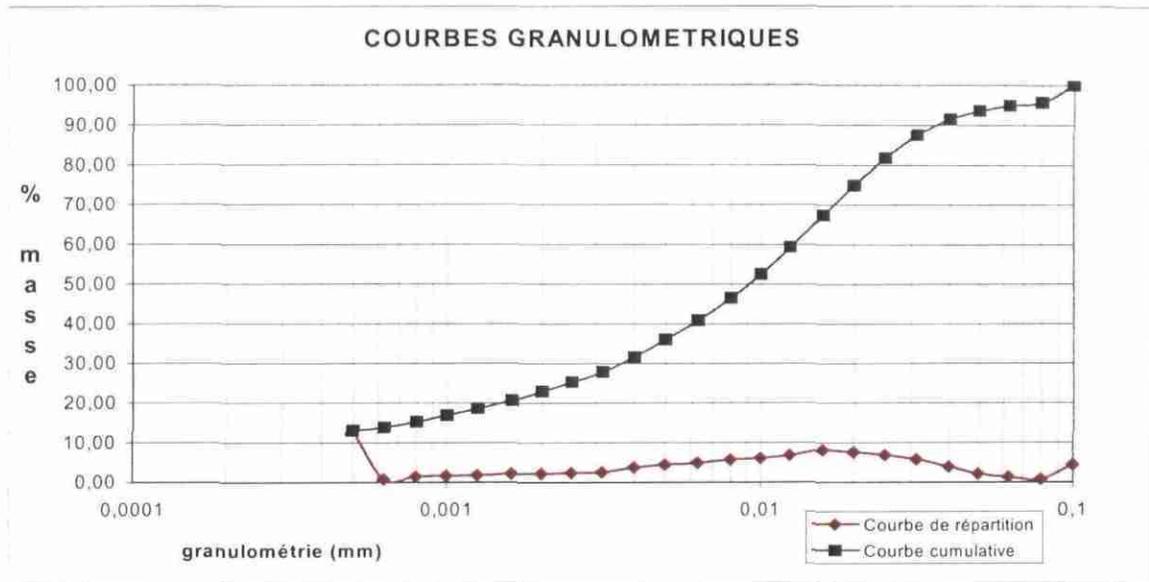


Figure 48 : Analyses granulométriques du niveau 2 (MG03REU5) de la coupe de la Plaine aux sables

La majorité des dépôts observés sont de granulométrie fine : sables, silt et limon et argiles. Ces dépôts semblent correspondre à des alluvions déposées dans un milieu de faible énergie, les niveaux argileux correspondent plus à des dépôts de décantation dans un système palustre voir lacustre. En effet, la lamination observée semble plaider en cette faveur, elle marquerait par ailleurs une cyclicité dans les conditions environnementales. Les invaginations des niveaux d'argiles beiges dans les argiles pourraient correspondre à l'emplacement de racines de végétaux. La présence d'horizons argileux clairs (de couleur beige) n'a pour le moment pas été attribué à un processus particulier, il pourrait s'agir soit d'anciens niveaux de cendres volcaniques argilisés soit de niveaux de paléosols. Cette sédimentation globalement de faible énergie (surtout pour La Réunion) est entrecoupée par un événement à plus haute énergie hydrodynamique (niveau 4) ayant abouti aux dépôts de sables. Des apports de cailloutis non ou peu roulés indiquent, par ailleurs, l'arrivée de matériaux plus grossiers mais ayant subi un faible transport. Enfin la coupe se termine par le dépôt de sables, gravier et cailloutis anguleux (niveau 6) dans un contexte proche de celui du niveau 4.

#### **3.1.3.1.2. Coupe de la Plaine au Sable – Haut**

La partie haute de la Plaine aux Sables (voir carte de localisation, figure 40) se situe autour de 1460 m. Elle permet d'observer des petites buttes de niveaux de sables assez fins. Latéralement, ces sables présentent des horizons à graviers et galets bien roulés de taille pluricentimétriques à décimétriques. L'épaisseur totale de ce niveau recouvrant la partie haute de la Plaine aux Sables semble être de l'ordre de 8 m. Toutefois, les conditions d'affleurement ne permettent pas d'observer une coupe continue. Ces sédiments présentent des caractéristiques alluviales.

Un échantillon (MG03REU8) a permis d'effectuer une analyse granulométrique de ces sables. La courbe granulométrique est présentée dans la figure 49. La répartition par classe granulométrique montre clairement la dominance des sables qui atteignent 79%, les silts correspondent à 16% tandis que les 4% restant sont de la classe granulométrique des argiles. La courbe granulométrique de la fraction silteuse montre la dominance de silt moyen dans cette catégorie.

*Etude paléoclimatologique de l'île de La Réunion*  
*Repérage des séquences sédimentaires remarquables dans les cirques*

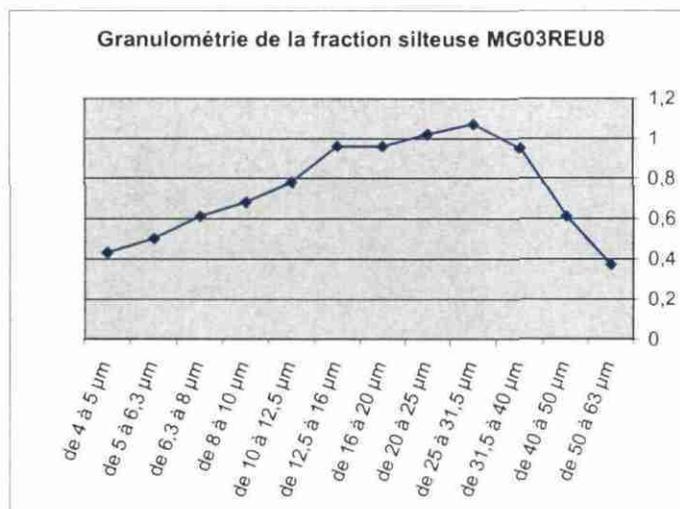
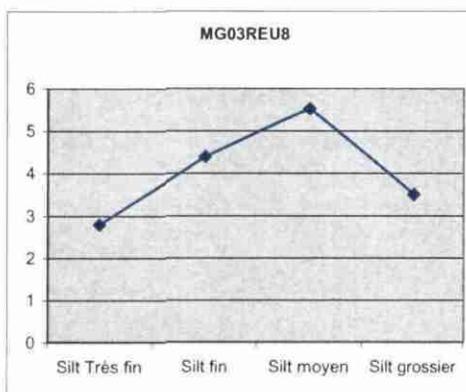
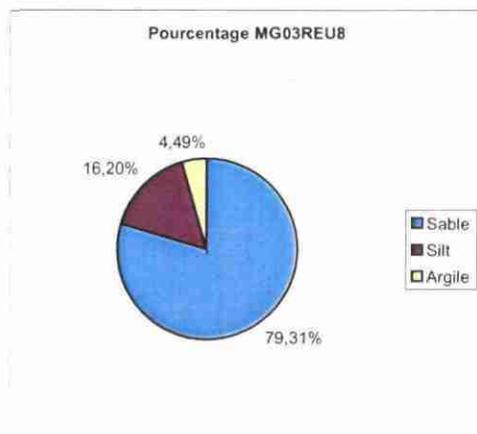
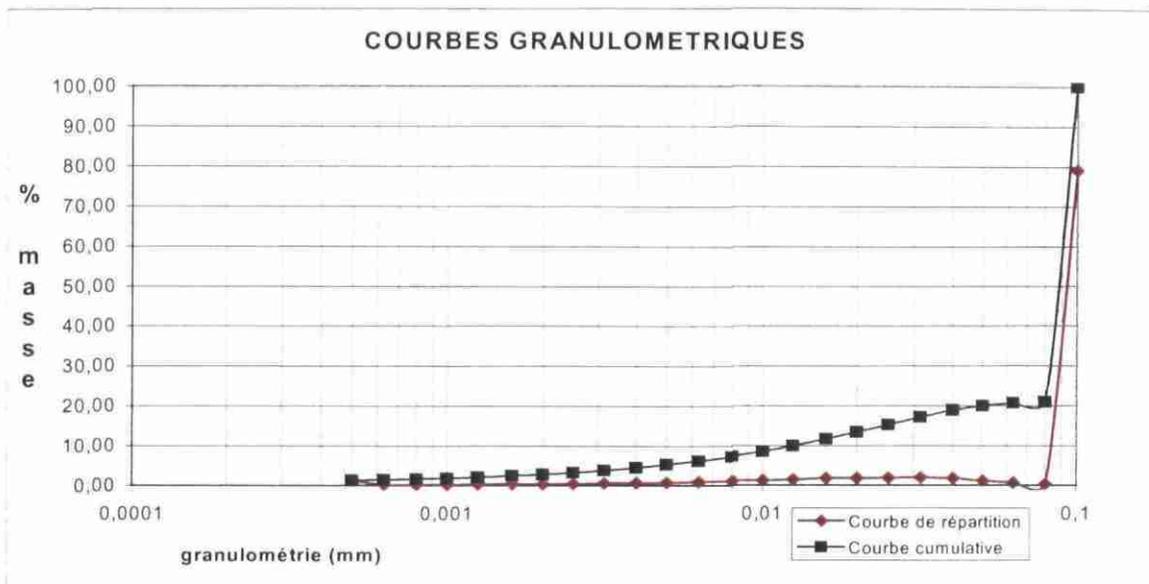


Figure 49 : Analyses granulométriques des sables du Haut de la Plaine aux Sables (MG03REU8)

### 3.1.3.2. Bras de Ste Suzanne

Dans les cirques, le long des bras majeurs des rivières, des lacs de barrage ont pu s'installer suite à des éboulements de remparts ou d'importants dépôts suite à l'atterrissement de coulées de boue. Ces lacs de barrage occasionnés par l'obstruction de la rivière permettent pendant un certain temps l'installation d'un piège sédimentaire favorable à notre recherche. De tels systèmes fossiles ont déjà été identifiés dans la rivière des Remparts par exemple (Garcin et Cruchet 2000).

La reconnaissance de terrain réalisée à l'automne 2002 dans la partie aval du cirque de Mafate a permis d'identifier au moins une structure comparable (figure 50). Cette structure dont la coupe détaillée reste à relever a toutefois fournis des échantillons de bois à plusieurs niveaux permettant la datation du système. L'analyse et la compréhension de la géométrie des dépôts et des incisions liés, permettront de contraindre dans le temps l'évolution remparts-rivière-terrasses et par ailleurs de fournir un cadre chronologique à une approche paléoenvironnementales et paléoclimatique.

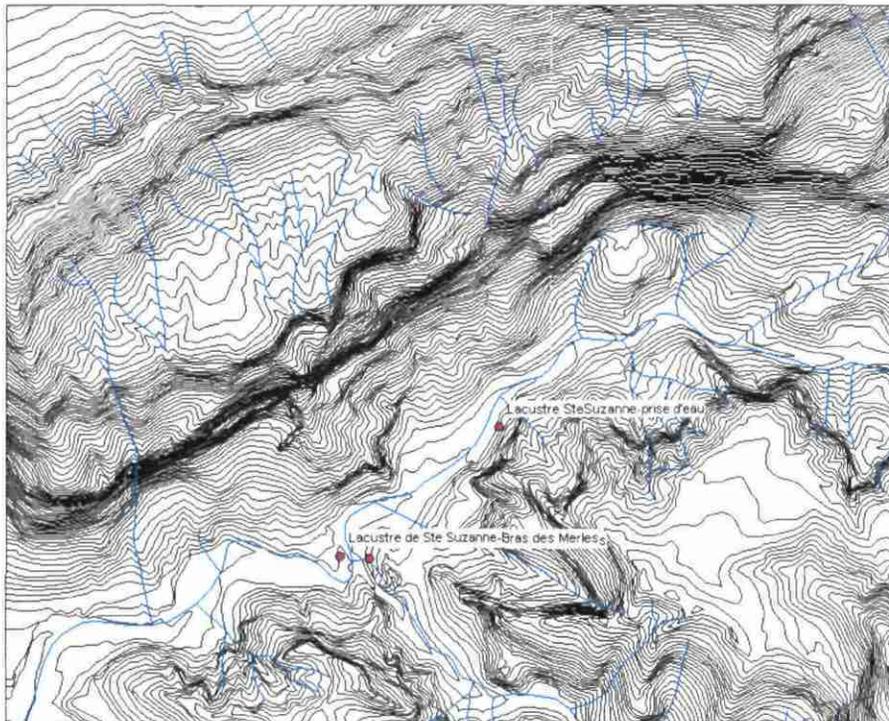


Figure 50 : Localisation du dépôt de lac de barrage dans le Bras Sainte-Suzanne / Bras des Merles

### **3.1.3.3. Coupe Bras de Ste Suzanne Bras des Merles**

La coupe la plus exposée est située en rive droite du Bras de Sainte-Suzanne en face de la confluence avec le Bras des Merles (figure 51). Elle permet d'observer des dépôts fins qui sont interprétés comme des sédiments lacustres. Ce lac résulterait du blocage de la vallée à la suite d'un éboulement de remparts. Des investigations ultérieures seront réalisées afin d'essayer de valider cette hypothèse génétique et de déterminer la localisation de cet éboulement et de définir l'emprise géographique du paléo-lac.

Cette coupe permet d'observer (figures 52, 53):

- 1) à la base, des limons silteux (argileux?) gris brun contenant des débris de bois. L'épaisseur exacte de cet horizon n'est pas connue. Ces mêmes niveaux affleurent partiellement en rive gauche, une coupe plus détaillée en est fournie plus bas.
- 2) Une coulée boueuse d'épaisseur variable plurimétrique ravinant l'unité inférieure. Cette coulée boueuse contient des fragments de bois parfois bien conservés, dans certains cas, ne subsistent que leurs fantomes.
- 3) Des argiles très silteuses à stratifications bien visibles. Un niveau d'une vingtaine de cm d'épaisseur maximum constitué d'une multitude de débris de bois (branches cassées) est présent à environ 9 m au dessus de la base de la coupe. Ce lit se biseaute latéralement. Il est interprété comme le piégeage dans un milieu de basse énergie de débris ligneux transportés jusqu'au paléo-lac par le torrent. Ces débris aurait été générés par un événement météorologique intense (cyclone) puis transporté par la rivière lors de la crue consécutive pour être enfin piégés dans le lac.
- 4) Un dépôt de terrasse alluviale à gros galets et blocs d'épaisseur plurimétrique surmonte les dépôts lacustres. Ces alluvions indiquent l'arrêt du fonctionnement du lac et la reprise des processus torrentiels soit par disparition du verrou (rupture) soit parce que les sédiments lacustres ont complètement comblé la dépression située en arrière du barrage et permis ainsi la restauration d'un écoulement torrentiel continu.

Le lit actuel du Bras de Ste Suzanne a réincisé ensuite l'ensemble de ces dépôts sur plusieurs dizaines de mètres.

Parmi les échantillons de bois prélevés, deux ont été soumis à une datation radiocarbone. Le premier échantillon a été prélevé dans la première unité argilo-silteuse, à environ 1,3 m de la base de la coupe, soit à 0,5 m sous la base de la coulée boueuse. L'âge obtenu est de **1450 +/- 60 BP** (âge calibré : 440-460 Cal AD (0.01) , 460-520 Cal AD (0.08), 520-680 Cal AD (0.91)). Le second échantillon a été prélevé dans l'horizon très riche en débris ligneux, il a donné un âge de **1440 +/-40 BP** soit 550-660 Cal AD.

Les âges obtenus sont donc très cohérents et indiquent que le dépôt de ces niveaux lacustres s'est effectué autour de **1440-1450 BP**, soit **440-660 ApJC** (fourchette large).



Figure 51 : Vue générale de l'affleurement des dépôts lacustres du Bras de Ste Suzanne-Bras des Merles



Figure 52 : Coupe dans les dépôts lacustres de Ste Suzanne-Bras des Merles



Coupe détail des dépôts lacustres RG, confluence Bras des Merle, bras de Ste Suzanne (Mafate)

Coordonnées: E 55,399; S 20.997

- 9 - Non accessible
- 8 - Niveau argilo limoneux chocolat
- 7 - 0,2 m Sable jaune ôcre à fines stratifications
- 6 - 0,05 cm argile limon chocolat
- 5 - 0,4 m alternance d'argile limoneuse et de sable, séquence plurimillimétrique à centimétrique
- 4 - 0,2 m Argile limoneuse brun chocolat, présence d'un lit plus sableux ôcre au 2/3
- 3 - 0,25 m sable fins à passées plus grossières gris beige, niveaux roux
- 2 - 0,3 m argile limoneuse brun chocolat
- 1 - Sable fin à fines stratifications sub horizontales

Figure 53 : Coupe partielle de détail des niveaux argilo-silteux du Bras de Sainte Suzanne Bras des Merles

#### 3.1.3.4. Coupe du Bras de Ste Suzanne-Prise d'eau

A 500 m environ en amont de la coupe précédente, des dépôts semblables affleurent en rive gauche du Bras de Ste Suzanne (figure 54). La coupe permet d'observer les niveaux suivants:

- 1) Le lit actuel du torrent creusé dans un dépôt de coulée boueuse.
- 2) 2 m environ d'alluvions à gros galets, graviers et sables s'affinant vers le haut pour devenir uniquement sableux.
- 3) 4 m d'argile noirâtre finement stratifiée à passées sableuses plus grossières. Ce niveau est biseauté vers l'aval. Il contient à la base un horizon assez riche en débris de bois (branches).
- 4) 10 à 20 m de dépôts alluviaux à galets et blocs correspondant à un dépôt résiduel de terrasse.

L'ensemble de cette coupe est géométriquement en continuité avec les dépôts signalés précédemment et semble correspondre à leur partie supérieure.

Un échantillon de bois prélevé à la base du niveau 3 a été soumis à une datation radiocarbone et a donné un âge de **1300 +/-60 BP soit 640-880 Cal Ap JC**. Cet âge, plus jeune que les précédents, confirme donc notre hypothèse selon laquelle cette coupe complète vers le haut la précédente, elle rallongerait par ailleurs la durée d'existence et de fonctionnement du lac qui serait de l'ordre de 400 ans (fourchette large).

Ces datations et la rapide analyse géométrique du système indiquent que le lit du Bras de Ste Suzanne était déjà incisé au moins jusqu'au niveau actuel avant 1450 BP. Un événement a abouti au blocage de la vallée et induit l'installation d'un lac en arrière de ce barrage. Le système lacustre aurait fonctionné durant environ 400 ans. Au cours de cette période au moins un événement météorologique important se serait produit (vers

1440 BP), il aurait occasionné des dégâts importants dans la végétation, les débris de bois arrachés à la végétation ont été ensuite transportés par le torrent avant de se faire piéger en partie dans le lac. Le lac aurait cessé de fonctionner après 1300 BP soit à la suite de la rupture du verrou soit par colmatage sédimentaire. L'activité torrentielle ultérieure aurait ensuite aboutit au dépôt d'une épaisse série. La granulométrie grossière des sédiments indique que ces sédiments se sont mis en place dans un contexte hydrodynamique vigoureux où la charge solide disponible excédait la capacité de transport. Ensuite, le torrent a incisé les dépôts antérieurs y compris les sédiments lacustres pour atteindre son niveau topographique actuel.

Ces observations impliquent que la morphogenèse liée à l'activité torrentielle dans ce secteur de Mafate peut être extrêmement active et vigoureuse, que les vitesses de sédimentation comme celles de l'incision peuvent être très élevées.

- 4 - 10 à 20 m d'alluvions formant terrasse
- 3 - 4 m d'argile noirâtre finement stratifiées à passées plus grossières sableuses. Epaisseur variables, biseautées vers l'aval
- 2 - 2 m environ d'alluvions à gros galets, graviers et sables s'affinant vers le haut pour devenir uniquement sableux au sommet.
- 1 - coulées boueuses (laar) - Le lit actuel est creusé dans ce laar



Niveau à bois fossiles

Echantillon bois 14C, 1 échantillon sédiment  
**MG02REU6** Bois (envoyé 14C: 1300 +/-60 BP; 640-880 Cal AD Après JC)  
MG02REU7 Sédiment

Figure 54 : Vue générale de l'affleurement des dépôts lacustres du Bras de Ste Suzanne-Prise d'eau (Amont)

## **4. Conclusion**

### **▪ Les séquences sédimentaires remarquables**

Plusieurs séquences sédimentaires fines remarquables ont été identifiées dans les cirques et à leur débouché. Elles sont localisées dans :

- les gorges du Bras de Cilaos, depuis les Aloès jusqu'au Pavillon ;
- les gorges de la rivière du Mât, exutoire du cirque de Salazie ;
- le cirque de Salazie ;
- les gorges de la rivière des Galets ;
- dans les Hauts de Mafate.

Les observations conduites sur ces dépôts alluviaux et les terrasses alluviales permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les alluvions et témoins de terrasses alluviales sont fréquents dans les gorges au débouché des cirques, plusieurs niveaux altimétriques y ont été distingués (au moins trois). Ils sont beaucoup plus rares dans les cirques et ont probablement été érodés ou ne sont pas déposés. Localement dans les secteurs à l'aval des cirques et dans les gorges, des morphologies caractéristiques de terrasses anciennes ont été observées. Toutefois, elles ne présentent pas toujours de dépôts résiduels associés, seule la morphologie du plancher de la terrasse y est alors conservée ; soit il n'y a pas eu de dépôt alluviaux d'épaisseur significative sur ces terrasses soit les alluvions ont été ultérieurement érodées et re-transportées.
- Certaines coupes observées montrent l'existence de niveaux plus fins voir très fins (sables, limons, argiles) intercalés dans des séquences plus grossières (à galets et blocs). D'autres coupes montrent des alternances cycliques de dépôts fins et de dépôt grossiers, malheureusement, les conditions d'affleurement n'ont pas toujours permis une observation détaillée de ces niveaux.
- Les niveaux fins ne sont pas présents que sur une coupe mais se retrouvent de place en place tendant à prouver qu'il ne s'agit pas de dépôts fins uniquement dus à un facteur hydrodynamique local mais plutôt à des modifications du régime hydrologique.
- Ces dépôts fins ont des caractéristiques très différentes des sédiments alluvionnaires présents actuellement dans les rivières (grossiers à très grossiers) ce qui tend à indiquer qu'ils se sont sédimentés dans des conditions environnementales différentes.
- Malgré l'effort de recherche d'éléments qui permettraient de dater les sédiments seul un site s'est avéré positif et à fourni des débris de bois dans plusieurs horizons nous permettant de dater les sédiments (coupe du Bras des Merles - Bras de Ste Suzanne dans Mafate).

La poursuite du programme devra permettre d'étudier plus finement ces séquences sédimentaires remarquables suivantes reconnues dans les trois cirques.

▪ **Datation de séquences sédimentaires**

Une seule séquence sédimentaire a pu être datée à ce jour, par la méthode radiocarbone. Or, pour reconstituer l'histoire paléoclimatologie des cirques, il est nécessaire de pouvoir établir des corrélations entre les diverses séquences sédimentaires.

Un objectif du programme de recherche est de mettre au point une méthode permettant de dater l'âge des dépôts sédimentaires. A cet effet, en 2003, une réflexion a été menée sur les possibilités de réaliser des datations par luminescence. Une étude faisabilité est présentée en annexe et met en avant les difficultés de mise en oeuvre de cette technique.

▪ **Programme de reconnaissance 2004-2005**

Les reconnaissances de terrain devront être complétées dans les cirques, certains secteurs n'ayant pas été prospectés en 2003. Des dépôts sédimentaires y ont été signalés par les géologues du BRGM ou par les personnes fréquentants ces secteurs, agents ONF notamment. Ce sont notamment les zones suivantes :

- Cayenne - Grand Place (Mafate ;
- Plateau de Kerval (Mafate);
- Plaine des Tamarins (Mafate) ;
- Plaine des Merles (Salazie) ;
- Plateau de Bois de Pommes (Salazie).

Sur les sites reconnus en 2003, de nouvelles observations seront effectuées et des prélèvements y seront effectués à des fins d'analyse pétrographique. En effet, la détermination de la nature des sables devient primordiale pour engager des datations par luminescence. Ces observations seront effectuées en laboratoire.

Enfin, à plusieurs reprises, il est fait mention de présences éventuelles de cendres ou de projections volcaniques au sein des séquences sédimentaires. Des observations sur lame mince ou par diffraction X devront être conduites sur ces horizons pour déterminer leur origine.

DOCUP 2002-2006  
Cadre d'intervention C5-03

Projet de recherche : Les mouvements de terrain  
de grande ampleur dans les cirques et les grandes  
ravines de La Réunion

Module 1  
Sous module 1.3  
Programme 2003

## **ANNEXE**

# **Etude de faisabilité de datations par luminescence**

**par B. Poisson**

*décembre 2003*

# **Sommaire**

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>3</b>
<b>2. LA TECHNIQUE DE DATATION PAR OSL</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Généralités</b>	<b>4</b>
2.1.1. Principe physique	4
2.1.2. Matériaux idoines, et domaines d'applications	6
2.1.3. Gamme chronologique	6
<b>2.2. Intérêts de l'OSL</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Problèmes éventuels, et choix conséquents</b>	<b>7</b>
2.3.1. Minéraux : le problème des feldspaths	7
2.3.2. Granulométrie : le problème des sables	8
<b>2.4. Procédure expérimentale</b>	<b>9</b>
2.4.1. Sur le terrain	9
2.4.2. Préparation des échantillons	9
2.4.3. Tri quartz/feldspaths	10
2.4.4. Mesure	11
<b>2.5. Conversion en âge d'enfouissement</b>	<b>13</b>
<b>3. APPLICATION À LA RÉUNION</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Aspect minéralogique</b>	<b>14</b>
<b>3.2. Aspect granulométrique</b>	<b>14</b>
<b>3.3. Opération de prélèvement</b>	<b>15</b>
3.3.1. Matériel nécessaire	15
3.3.2. Démarche	15
<b>4. CONCLUSION</b>	<b>16</b>

## **1. Introduction**

La technique OSL (Optically Stimulated L.), très récente (années 80), est une alternative à la TL (Thermoluminescence), technique de datation plus ancienne et plus connue. L'énergie de stimulation est la chaleur, les électrons libérés étant ceux piégés par les rayonnements radioactifs.

L'OSL est très bien adaptée à la datation des sédiments éoliens, tels que les loess, les sables fins. Par contre, elle est inopérante si les matériaux n'ont jamais été exposés à la lumière (sédiments marins, glaciaires, par exemple). Les matériaux les plus appropriés sont les restes archéologiques, mais aussi les sédiments par l'intermédiaire des quartz et feldspaths.

La gamme d'âges explorés va classiquement de 500 000 ans jusqu'à l'actuel. L'incertitude typique sur les âges est de l'ordre de 10 % environ.

IRSL est une technique alternative, comparable en tous points à l'OSL. La source d'énergie n'est plus dans le visible, mais dans l'Infra-Rouge. Il faut garder à l'esprit que ces techniques, très prometteuses, très récentes, sont encore en plein développement.

En première analyse, la méthode apparaît adaptée à la datation de séquences sableuses récentes (entre 100 000 ans et l'actuel).

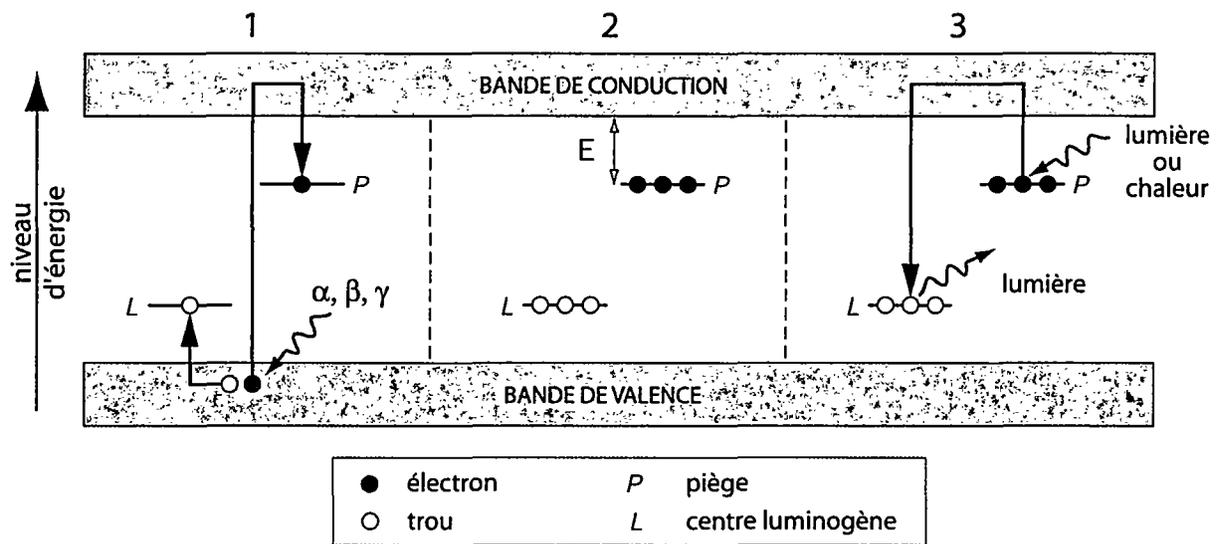
Une description technique de la méthode est présentée dans cette annexe. Ont également été examinés les moyens à mettre en œuvre pour lancer un programme de datations par luminescence.

## 2. La technique de datation par OSL

### 2.1. GENERALITES

#### 2.1.1. Principe physique

La luminescence est le phénomène physique d'émission de lumière par des atomes ou des molécules excités par un apport d'énergie thermique ou lumineuse, s'ils ont au préalable été soumis à une irradiation, naturelle ou artificielle (Figure 1).



**Figure 1 – Représentation schématique du modèle de bandes (Aitken, 1998) :**  
(1) lors de l'ionisation due à l'irradiation, un électron et un trou sont piégés dans des défauts cristallins ; (2) l'énergie s'accumule pendant la durée de stockage ; celle-ci doit être beaucoup moins importante que la durée durant laquelle l'électron reste piégé, qui dépend de la profondeur d'énergie E sous la bande de conduction (pour que le piège soit efficace, il faut compter 1 million d'années, à moduler selon l'âge mesuré) ; (3) en éclairant l'échantillon avec une lumière de longueur d'onde appropriée, on libère l'électron de son piège ; il peut alors se recombiner avec un centre luminogène, d'où émission d'un signal lumineux (principe de l'OSL ; si on libère les pièges en chauffant l'échantillon, il s'agit de TL).

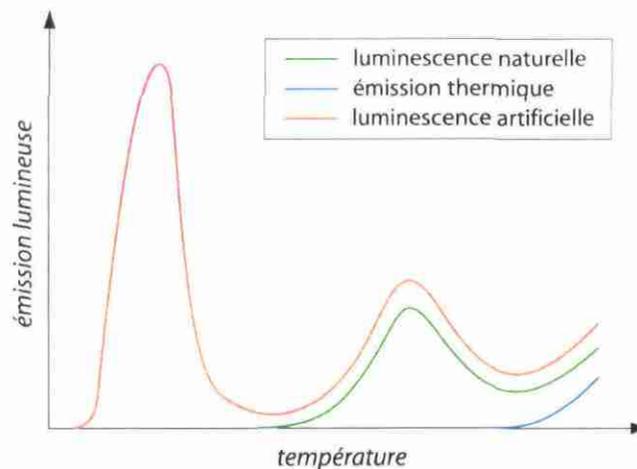
Le phénomène que l'on cherche à exploiter est le suivant :

1. Dans la nature, les minéraux subissent l'irradiation naturelle émanant de leur environnement, c'est-à-dire les radiations de particules  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  produites lors des désintégrations d'éléments radioactifs, principalement (dans un environnement naturel banal) les descendants de l'uranium  $^{238}\text{U}$ , du thorium  $^{232}\text{Th}$  et du potassium  $^{40}\text{K}$ . A la radioactivité naturelle terrestre s'ajoute l'irradiation par le rayonnement cosmique.
2. Les particules  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  qui rayonnent dans les cristaux ionisent une partie des atomes sur leur passage, libérant des électrons qui se retrouvent dans des états métastables, piégés

dans les défauts cristallins. Ces défauts, hétérogénéités de nature intrinsèque (ions interstitiels, vacances) ou extrinsèque (dislocations, impuretés), résultent en déficits de charges locaux, par conséquent prêts à recevoir les électrons libérés. En milieu naturel, une charge peut rester piégée pendant une durée dépendant des caractéristiques du centre-piège et de la température d'enfouissement, soit entre quelques secondes et quelques millions d'années, voire plus.

3. En laboratoire, on peut stimuler les minéraux en les chauffant (thermoluminescence – TL) ou en les éclairant (luminescence optiquement stimulée – OSL), ce qui permet de vider les pièges : les électrons libérés diffusent dans le réseau cristallin, jusqu'à être capturés par d'autres sites (recombinaison avec des "trous", ions positifs), centres luminogènes qui perdent leur énergie excédentaire en émettant des photons (luminescence induite).

La quantité de lumière émise est alors proportionnelle à la quantité de charges piégées lors de l'irradiation initiale, et donc directement liée à la dose reçue. En mesurant une première fois cette luminescence naturelle due à l'irradiation de l'environnement pendant la durée d'enfouissement, puis en mesurant le signal luminescent induit par des doses d'irradiations connues, on peut extrapoler la **paléodose** d'un échantillon (aussi appelée dose naturelle ; Figure 2).

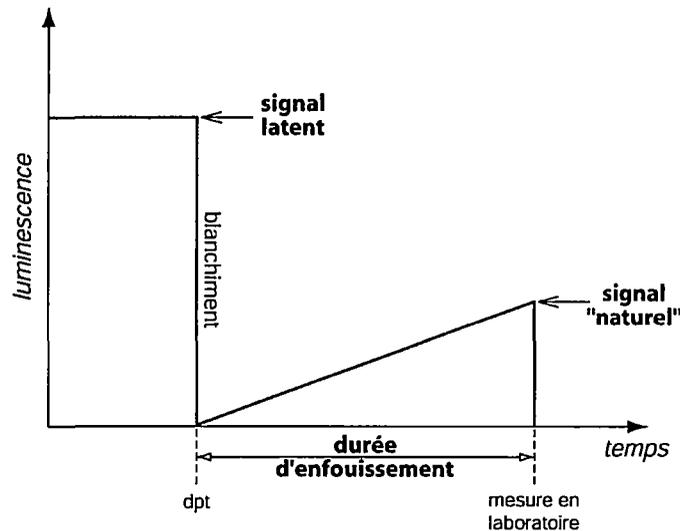


**Figure 2 – Schéma décrivant l'évolution qualitative du signal lumineux émis par l'échantillon soumis à un chauffage : (1) lorsqu'on l'éclaire ou qu'on le chauffe, c'est le signal naturel, qui dépend de l'irradiation qu'il a subie ; (2) lorsqu'on le stimule une deuxième fois, alors que tous les électrons piégés ont déjà été libérés, il y a seulement émission thermique ; (3) lorsqu'on le stimule après l'avoir irradié à nouveau en laboratoire, c'est un signal artificiel (induit).**

En supposant le taux d'irradiation naturelle constant, on peut déduire de cette paléodose la date de dernière remise à zéro du minéral :

$$\text{âge} = \frac{\text{paléodose}}{\text{débit de dose}}$$

Cet instant "initial" que l'on date correspond au dernier effacement de toutes les irradiations, soit lors d'un chauffage, soit lors d'une exposition à la lumière (solaire), soit lors de la genèse du cristal (Figure 3).



**Figure 3 – Evolution du signal luminescent au cours du temps : le signal géologique latent, accumulé depuis la formation du cristal, est remis à zéro lorsque l'échantillon est blanchi (éclairé ou chauffé) ; lorsque l'on "date" l'échantillon, on mesure le signal accumulé depuis la dernière remise à zéro, c'est-à-dire la date de son dernier dépôt.**

### 2.1.2. Matériaux idoines, et domaines d'applications

Les minéraux dotés de la propriété de luminescence sont principalement :

- le quartz,
- les feldspaths,
- la calcite,
- les zircons.

En pratique, seuls les quartz et les feldspaths sont utilisés, parce qu'ils sont les plus luminescents et présents à peu près partout en milieu naturel.

Les domaines privilégiés d'application de la datation par luminescence sont, historiquement, l'archéologie et la géologie quaternaire.

En archéologie, on utilise surtout la thermoluminescence pour dater les objets en terre cuite, les fours, les pierres brûlées des foyers et les outils ou éclats de silex ayant été chauffés. La méthode, qui constitue un bon moyen d'expertise de certaines œuvres d'art (céramiques...), est développée dans ce but au Laboratoire de Recherche des Musées de France. Elle constitue en outre un outil très utile en préhistoire (e.g., Mercier et al., 1995).

En géologie, on date les matériaux volcaniques, les concrétions de calcite des spéléothèmes, les cratères de météorites, et enfin les sédiments fins de type loess et sables (éoliens, fluviaux, lacustres...).

### 2.1.3. Gamme chronologique

Les méthodes de luminescence permettent de dater des objets depuis l'actuel jusqu'à 300 ka environ (voire plus), c'est-à-dire tant que les pièges à électrons des cristaux ne sont pas saturés en énergie.

Elles recouvrent ainsi notamment la période comprise entre la limite supérieure de la datation au radiocarbone et la limite inférieure de la méthode K-Ar, soit entre 40 000 et 200 000 ans. En géologie comme en archéologie, elles se révèlent très précieuses lorsque l'absence de matière organique interdit d'avoir recours au classique emploi du  $^{14}\text{C}$ .

L'erreur commise lors d'une datation par TL ou OSL est généralement inférieure à 10%. La précision est très dépendante de l'information concernant la dose environnementale (débit de dose) du site d'échantillonnage : la méconnaissance de cette grandeur peut conduire à une grosse incertitude, de l'ordre de l'âge mesuré !

## **2.2. INTERETS DE L'OSL**

Historiquement, la thermoluminescence est apparue avant la luminescence stimulée optiquement (Huntley et al., 1985).

L'atout majeur de l'OSL est de ne mesurer que le signal provenant des pièges les plus sensibles à la lumière. Le zéro initial d'un échantillon peut donc être valable pour une mesure d'OSL, mais pas pour une mesure de TL.

Contrairement à la TL qui exige d'appliquer un fort chauffage à l'échantillon, l'OSL se mesure à température ambiante, ce qui évite d'altérer (ou de détruire) l'échantillon.

Du point de vue technique, l'OSL est en outre plus maniable car nécessite des stimulations plus courtes, et des quantités de matière également réduites, jusqu'au mono-grain.

Cet aspect a une grande importance au moment de l'interprétation des résultats, surtout si l'on date des sédiments : si le sédiment est mal blanchi, l'âge obtenu risque d'être très surestimé par rapport à l'âge réel de dépôt. Même si une faible fraction de l'échantillon n'a pas été remise à zéro avant l'enfouissement, elle suffit à fausser complètement le résultat global. Cette erreur peut être évitée si l'on peut mesurer successivement le signal de très petits nombres de grains du même échantillon, car il est alors possible de représenter la mesure par une distribution de paléodoses sur la population de grains mesurés : les paléodoses les plus fortes pourront être repérées et éliminées du calcul final, dans lequel on ne prendra en compte que les grains ayant été manifestement correctement blanchis (paléodoses les plus faibles).

Un des exemples les plus célèbres illustrant ce problème est celui de l'abri sous roche de Jinmium, en Australie. Les sédiments englobant des dalles gravées avaient d'abord été datés par TL à 50000 ans, voire jusqu'à 120000 ans, faisant remonter l'arrivée de l'homme sur le continent beaucoup plus tôt qu'on avait cru jusqu'alors. Par la suite, des analyses OSL mono-grain des mêmes sédiments ont montré que ceux-ci avaient subi un blanchiment homogène avant d'être déposés, mais que certains grains provenant de la désagrégation des parois de l'abri n'avaient pratiquement pas été exposés à la lumière. L'exclusion des grains mal blanchis a alors permis d'obtenir un âge de dépôt beaucoup plus rigoureux, à moins de 10000 ans (Roberts & al., 1998).

## **2.3. PROBLEMES EVENTUELS, ET CHOIX CONSEQUENTS**

### **2.3.1. Minéraux : le problème des feldspaths**

Les sédiments d'origine éolienne ou fluviale comportent principalement deux sortes de minéraux luminescents : d'une part du **quartz**, d'autre part des **feldspaths** divers et variés – les deux familles provenant des roches érodées alentour, des massifs magmatiques de la chaîne aux accumulations détritiques des avants-pays.

La stimulation par lumière infrarouge permet de libérer les charges piégées dans les défauts cristallins des feldspaths, mais laisse le quartz imperturbable. Par contre, une lumière verte (ou bleu-vert) vise les centres luminogènes du quartz et des feldspaths à la fois. Théoriquement, un drainage optique effectué en infrarouge réduit suffisamment le signal des feldspaths pour qu'on ne sente plus leur présence en lumière verte. Néanmoins, cette réduction est relative, et si l'échantillon contient une trop grande proportion de grains de feldspaths par

rapport aux quartz, le signal OSL est biaisé : on ne sait pas pour combien les quartz y contribuent, la "pollution" des feldspaths étant très difficile à mesurer.

On pourrait alors penser exploiter uniquement le signal émis par les feldspaths lors de la stimulation infrarouge. Cette démarche se heurte à un problème posé par les feldspaths, qui présentent un phénomène dit de "fading anomal"<sup>1</sup> : une partie du signal naturel "s'évanouit anormalement", les électrons piégés ne le restant pas tous aussi longtemps qu'ils le devraient, compte tenu de leur niveau d'énergie. De ce fait, un âge mesuré par IRSL (luminescence stimulée par infrarouge) sur des feldspaths peut apparaître "trop jeune", sans pour autant qu'on s'en rende compte, si l'on ne dispose d'aucun autre moyen de calage.

Le fading anomal est difficile à estimer, car tous les feldspaths ne réagissent pas de la même manière. Il faut donc théoriquement le mesurer pour chaque échantillon spécifique que l'on date. En outre, cette mesure est très longue : il faut construire une courbe signal-temps en irradiant chaque fois l'échantillon à une dose connue, puis en mesurant son signal induit au bout d'un temps que l'on fait varier logarithmiquement, par exemple au bout d'1 seconde, puis 1 minute, 1 heure, 60 heures, etc.

Pour éviter d'avoir à affronter ce fastidieux problème des feldspaths, on préfère choisir d'analyser le signal OSL de grains de quartz, qui ne présentent jamais de fading anomal (la durée de stabilité des pièges du pic à 325°C étant estimée à environ 10 millions d'années).

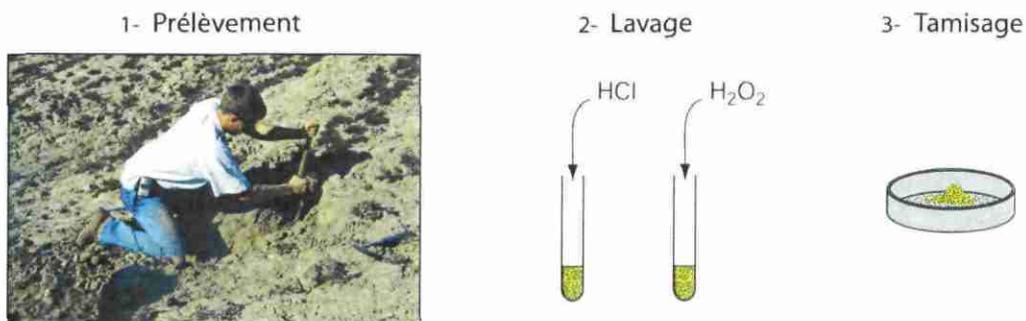
### 2.3.2. Granulométrie : le problème des sables

On a vu que l'initialisation du signal luminescent était une hypothèse fondamentale dans le principe de datation par luminescence. Dans les cas naturels, on rencontre fréquemment des problèmes de mauvaise remise à zéro de l'horloge luminescente, quand les sédiments à dater ont été mal blanchis (§2.2).

Le problème se pose rarement dans le cas de sédiments éoliens. Ils ont généralement l'occasion d'être longuement exposés à la lumière du jour pendant leur transport ; de plus, ce sont souvent des sédiments fins, qui sont transportés d'autant plus facilement, tout en nécessitant une exposition d'autant plus brève pour être blanchis.

Au contraire, les sédiments transportés par l'eau risquent de n'avoir pas été remis à zéro pendant leur transport. En particulier, les matériaux les plus grossiers (sables, et a fortiori graviers...) sont souvent mal exposés à la lumière durant leur transport, pour peu qu'ils soient noyés dans une eau trop troublée par sa charge.

De ce fait, on privilégie sur le terrain l'échantillonnage de loess, sédiments fins et éoliens. Pour dater des terrasses fluviales, si celles-ci n'ont pas la chance d'être couverte d'un dépôt de loess, on prélève du sable, aussi fin que possible. Quant aux sédiments lacustres, ils peuvent se prêter à la datation par OSL si l'on dispose, comme dans le cas du lac Ebi, de dépôts de plage comportant des niveaux de type limoneux.



**Figure 4 – Diagramme schématisant les principales étapes de la procédure expérimentale : (1) prélèvement de l'échantillon sur le terrain ; (2) lavage à l'acide chlorhydrique et à l'eau oxygénée, rinçage ; (3) tamisage et séparation en fractions granulométriques précises.**

<sup>1</sup> En anglais : anomalous fading.

## **2.4. PROCEDURE EXPERIMENTALE**

La démarche décrite ici, ainsi que le matériel utilisé, se rapportent à un travail de datation effectué au sein de l'équipe de Géochronologie du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) de Gif-sur-Yvette, sur des sédiments éoliens et fluviatiles du Tian Shan (Poisson, 2002). Cette façon de faire n'a pas de valeur absolument générale mais permet néanmoins de respecter de bonnes conditions d'analyse.

Les principales étapes de la procédure expérimentale sont schématisées sur la Figure 4.

### **2.4.1. Sur le terrain**

Avant de prélever quoique ce soit, il convient d'avoir à l'esprit que l'on va mesurer un signal de luminescence qui a pour origine l'irradiation de l'échantillon par son environnement. Par conséquent, il faut non seulement caractériser l'échantillon, mais également son environnement immédiat. Les distances d'influence des rayons  $\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$  sont respectivement de l'ordre de 30  $\mu\text{m}$ , 3 mm et 30 cm.

On va donc prélever de préférence au centre d'une sphère de sédiment de rayon 30 cm au moins, en se plaçant à une profondeur suffisante sous la surface, et en rafraîchissant l'affleurement de manière à dégager horizontalement une distance équivalente.

Après quoi, on procède pour un échantillon à deux types de prélèvements.

1. Une carotte est extraite du centre de la sphère visée, en enfonçant horizontalement dans le sédiment un tube d'acier de 10 à 20 cm de long, de diamètre 1 à 4 cm selon l'épaisseur du niveau ciblé. Comme les extrémités de la carotte sont forcément un peu exposées à la lumière au moment où on la retire, on n'utilisera pour la datation proprement dite que la partie centrale du contenu du tube. Celui-ci est bouché des deux côtés, d'une part pour stabiliser le sédiment à l'intérieur et le protéger de la lumière, d'autre part pour empêcher l'évaporation de l'eau qu'il contient, et pouvoir ensuite mesurer cette teneur qui interviendra dans le calcul d'âge.
2. Plusieurs échantillons sont prélevés dans les sédiments environnants (jusqu'à une distance de 30 cm de la carotte). Ces prélèvements seront par la suite dosés afin de reconstituer la dose d'irradiation naturelle reçue par l'échantillon depuis son enfouissement. Ils doivent être suffisamment importants pour rendre compte de l'environnement, sans omettre d'éventuels graviers, galets, etc. La présence d'un seul galet de granite peut par exemple notablement modifier la radioactivité locale. On conserve également l'eau de ces prélèvements, en les transportant dans des sachets hermétiques (mais sans souci de les protéger de la lumière).

### **2.4.2. Préparation des échantillons**

Une fois rapatriés au laboratoire, les sédiments doivent être préparés pour la mesure OSL proprement dite. Cette préparation, dès l'ouverture des carottes, a lieu en lumière inactinique (typiquement, des lampes au néon recouvertes de film plastique rouge servant de filtre passe-haut), afin de ne pas affecter le signal luminescent des grains de quartz, très sensible aux courtes longueurs d'onde.

1. Les échantillons sont successivement lavés à l'acide chlorhydrique (concentration  $\sim 1\text{M}$ ), pour dissoudre d'éventuels carbonates, et à l'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$  à 30%), pour supprimer toute matière organique, avant d'être soigneusement rincés à l'eau.
2. Une fois séchés à l'étuve, ils sont tamisés et séparés en fractions granulométriques distinctes. Généralement, on mesure tout simplement les grains de la fraction la plus abondante, avec une préférence pour les plus petits. Il est important de connaître assez précisément la granulométrie de ce qu'on mesure, car la taille des grains intervient dans le

calcul final de l'âge, par l'intermédiaire de coefficients d'atténuation des différents rayonnements.

Certains sédiments particulièrement fins peuvent poser un problème de granulométrie, si les grains forment des agrégats assez cohérents pour ne pas disparaître lors du tamisage ; la méconnaissance de leur vraie granulométrie peut induire une erreur dans le calcul final, s'ils ont été irradiés en tant que grains petits alors qu'on mesure leur signal de grains moyens.

### **2.4.3. Tri quartz/feldspaths**

D'après les remarques précédentes, on cherche à mesurer le signal OSL des grains de quartz, le plus exclusivement possible. En pratique, il s'avère que pour des échantillons contenant une forte proportion de feldspaths, ceux-ci apparaissent clairement sur les courbes de TL, et contribuent très probablement au signal OSL mesuré.

Pour éviter d'avoir trop de difficulté à interpréter les résultats finaux à cause de ces feldspaths, on tentera donc de préférence de les éliminer avant la mesure.

Classiquement, on sépare le quartz des feldspaths par fractionnement gravitaire en liqueurs denses (typiquement du polytungstate de sodium (PTNa), ou du bromoforme). Une solution de densité finement calibrée peut en effet permettre de sélectionner les feldspaths, plus légers. Malheureusement, cette méthode ne peut s'appliquer que si l'on trie des grains de taille suffisante pour qu'il n'y ait pas d'interactions entre eux. En outre, la séparation par liqueurs denses est lourde à mettre en œuvre, les inconvénients principaux étant : (a) pour préserver les quartz, il faut procéder en lumière rouge ; (b) le PTNa est trop visqueux pour permettre de trier un sédiment non grossier ; (c) le bromoforme peut être dilué à l'alcool, mais c'est un produit très dangereux à manipuler.

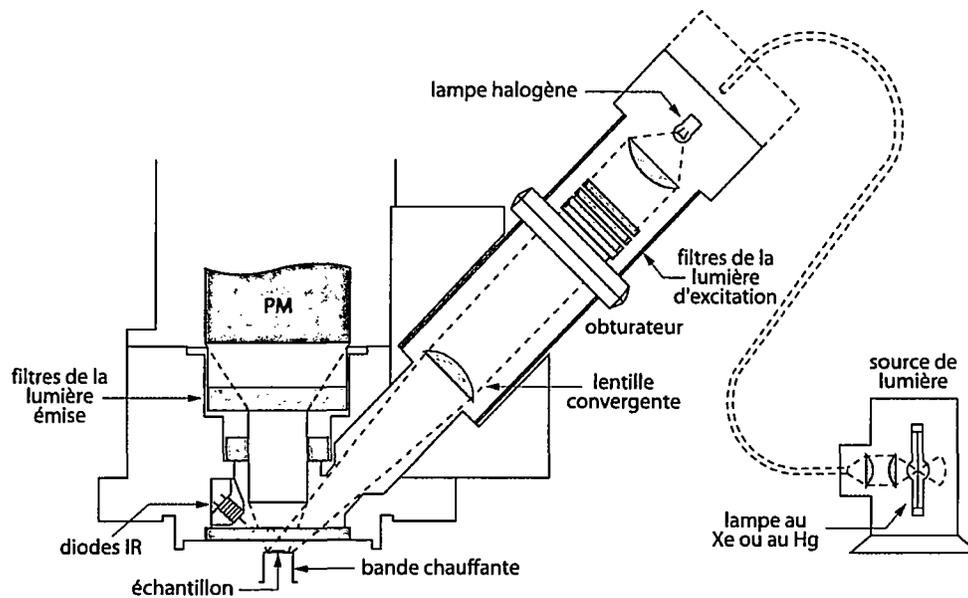
Deux autres méthodes peuvent être tentées pour réduire la proportion de feldspaths :

1. par attaque à l'acide fluorhydrique (HF, 40%) : cet acide attaque plus vite les feldspaths que le quartz. Les principaux inconvénients de cette méthode sont d'une part le danger de manipuler l'HF, d'autre part la nécessité de minuter le temps de la réaction, sous réserve que tous les grains ne se dissolvent, y compris les quartz. En pratique, il s'avère que l'attaque n'est souvent pas assez sélective pour diminuer suffisamment la fraction de feldspaths des échantillons.
2. par attaque à l'acide hexafluorosilicique ( $H_2SiF_6$ , 30%) : le principe est un peu le même qu'avec l'HF, sauf qu'on peut éviter carrément que l'acide ne s'attaque aux quartz, en le saturant au préalable de silice (pendant plusieurs jours au réfrigérateur). L'attaque à l'acide se fait ensuite sans précaution particulière, à température ambiante, pendant trois jours à une ou deux reprises (Berger et al., 1980).

Après attaque à l'un ou l'autre acide, il va de soi que les échantillons sont rincés à l'eau, séchés puis retamisés, leur distribution granulométrique ayant en général souffert lors de la manipulation.

A l'usage, la deuxième technique se montre plus performante. Le rinçage à l' $H_2SiF_6$  permet de réduire le taux de feldspaths des échantillons de manière inégale, allant jusqu'à dissoudre presque intégralement certains tandis que d'autres restent intacts.

Le tamisage final a donc toute son importance, les grains se redistribuant généralement dans les fractions granulométriques les plus faibles.



**Figure 5 – Schéma du dispositif de mesure de luminescence optiquement stimulée. La source ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ) n'apparaît pas sur le schéma, elle se trouve en fait derrière cette partie du dispositif, et peut se mettre en place juste au-dessus de l'échantillon au moment de l'irradiation.**

#### **2.4.4. Mesure**

##### **a) Dispositif**

Le système utilisé pour stimuler et mesurer l'OSL est un système automatique standard développé au Risø National Laboratory, au Danemark (Bøtter-Jensen & Duller, 1992; Markey et al., 1997). Le dispositif est schématisé sur la Figure 5.

L'échantillon est préchauffé par une résistance contrôlée par un thermo-couple.

La lumière bleu-vert (470 nm) stimulant le quartz est générée par une lampe halogène et filtrée à l'aide de filtres adéquats, ou encore des diodes laser. La stimulation infra-rouge est effectuée à l'aide d'une diode laser (830 nm).

Le signal lumineux émis par l'échantillon stimulé est détecté par un photomultiplicateur (PM), qui convertit les photons reçus en signal électrique amplifié.

Les irradiations artificielles de l'échantillon sont réalisées à l'aide d'une source à  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , protégée par une gaine de plomb épais, et dont le débit de dose est d'environ 9 Gy/min.

##### **b) Préchauffe**

La préchauffe de l'échantillon permet de vider certains pièges qualifiés d'instables, c'est-à-dire dont la durée de vie risque d'être courte devant la durée attendue d'enfouissement du sédiment.

Le principe est de faire en sorte qu'une irradiation artificielle égale à l'irradiation naturelle (que l'on cherche) suscite le même signal OSL, d'où la nécessité de ne pas mesurer ce qui émane de pièges fragiles.

En pratique, on procède à une préchauffe progressive d'une dizaine de secondes jusqu'à 250°C. Pendant cette préchauffe, le signal luminescent (TL dans ce cas) est mesuré, la forme de la courbe obtenue pouvant servir d'indicateur de la prédominance des quartz ou des feldspaths.

### **c) Séquence de mesures**

Les grains de sédiments à dater sont montés sur des disques en acier de 10 mm de diamètre. Chacun de ces disques subit une succession de mesures réparties en cycles, dont la séquence de base est la suivante :

1. irradiation naturelle ou artificielle ;
2. préchauffe à haute température (250°C, 10 s) ;
3. excitation IR (100 s) ;
4. excitation et mesure du signal OSL  $L_x$  ( $L_n$  si irradiation naturelle,  $L_a$  si irradiation artificielle ; 100 s) ;
5. irradiation par une dose-test (dose  $\beta$ , pendant une durée fixe par échantillon) ;
6. excitation IR (100 s) ;
7. préchauffe à basse température (160°C, suivie d'un refroidissement immédiat) ;
8. excitation et mesure du signal  $T_d$  (induit par la dose-test).

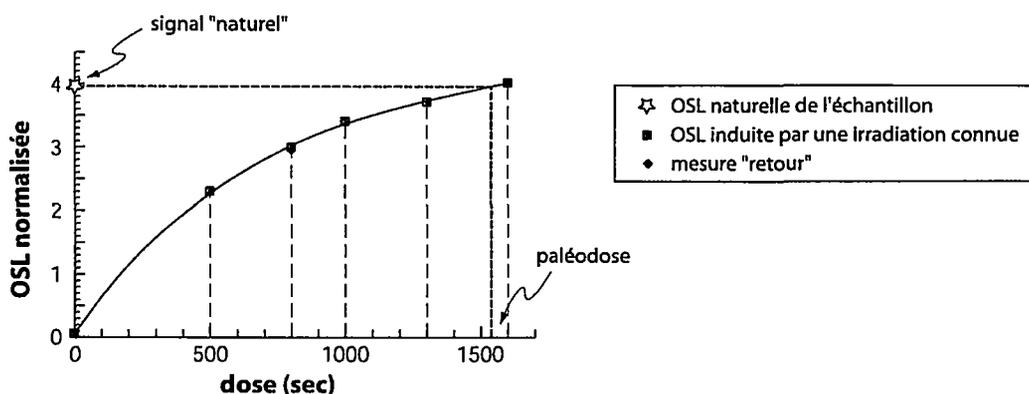
Quelques remarques :

- Le premier cycle de chaque disque consiste bien sûr à mesurer le signal naturel (qui est par la suite effacé), l'irradiation a donc déjà eu lieu dans le milieu naturel. Les autres cycles sont complets, et on en fait autant que de points voulus (dose artificielle, OSL induite).
- Comme nous l'avons vu précédemment (2.3.1), l'excitation à l'IR sert essentiellement à vider le plus possible les pièges des feldspaths. La préchauffe, en éliminant la contribution OSL des pièges instables, s'accompagne d'un changement de sensibilité de l'échantillon. C'est-à-dire que si l'on procède à deux séquences identiques [irradiation, mesure OSL] séparées par une préchauffe, on n'obtient pas deux fois le même signal. Pour remédier à ce problème, on ajoute dans la séquence une mesure du signal après irradiation à une dose dite "dose-test". Cette dose est faible devant la dose naturelle, et s'accompagne d'une préchauffe à température relativement basse, pour éliminer les charges les plus instables sans pour autant trop modifier à nouveau la sensibilité des grains.
- La durée d'excitation est assez arbitraire. Comme les pièges qui sont les plus stables sont ceux qui se vident en premier, on utilise en réalité la composante rapide du signal OSL, la première impulsion ( $L_x$ ). Mais il faut également préparer l'irradiation du cycle suivant, donc on excite assez longtemps pour que tous les pièges soient bien vidés.

### **d) Calcul**

L'estimation de la paléodose (dose naturelle) se fait en interpolant une courbe OSL = f(dose) à partir des mesures d'OSL faites après irradiations déterminées.

On situe alors sur la courbe interpolée le signal naturel mesuré, et on en déduit la dose radioactive reçue par l'échantillon depuis son enfouissement (Figure 6).



**Figure 6 – Exemple de courbe dose-OSL obtenue. On commence par mesurer le signal naturel, qui résulte de l'irradiation subie par l'échantillon depuis son enfouissement ; après remise à zéro, on mesure ensuite le signal OSL induit par des doses d'irradiation déterminées, ici mesurées en durée de temps d'exposition à la source (connaissant le débit de dose de celle-ci, la conversion en Gray se fait facilement). Au terme de cette série de mesures, on procède à une mesure "retour", en appliquant à nouveau une irradiation modérée (ici 800 s, après avoir irradié de 0 à 1600 s) ou nulle, afin de vérifier que la sensibilité de l'échantillon ne s'est pas trop altérée au cours de l'expérience. La paléodose est enfin déduite du signal naturel et de la courbe dose-OSL reconstruite.**

## 2.5. CONVERSION EN AGE D'ENFOUISSEMENT

La paléodose est convertie en âge d'enfouissement d'un échantillon par une formule tenant compte des paramètres suivants :

- sa **granulométrie**, dont dépendent les coefficients d'absorption des rayons alpha et beta permettant de corriger le signal des grains ;
- son **taux d'humidité** ;
- le **débit de dose radioactive** à laquelle il a été soumis de la part de son environnement depuis son enfouissement ;
- sa **profondeur *in situ***, à partir de laquelle on calcule l'influence des rayons cosmiques subie par le matériau en plus de la radioactivité locale ; il faut faire attention à tenir compte de la profondeur à laquelle l'échantillon a dû se trouver depuis son dépôt (i.e., attention à d'éventuels volumes érodés).

La granulométrie est connue de par l'opération de tamisage préliminaire aux mesures d'OSL. Le taux d'humidité est mesuré par pesée avant et après séchage d'une partie du contenu de la carotte ou des prélèvements de son environnement.

La radioactivité ambiante est mesurée sur les prélèvements prévus à cet effet, de sédiments environnant l'échantillon *in situ*. Une analyse par spectrométrie gamma fournit les teneurs en  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ , qui permettent de calculer le débit de dose radioactive de l'environnement.

Il est important de relever la profondeur de l'échantillon sur le terrain, afin de disposer du contexte qui permet de juger s'il a toujours été enfoui sous la même couche de sédiments depuis son dépôt.

## **3. Application à la Réunion**

### **3.1. ASPECT MINERALOGIQUE**

Comme on l'a vu dans la première partie, le minéral qui se prête le mieux à l'OSL est le quartz. Or, la majorité des roches présentes sur l'île de la Réunion sont des roches volcaniques plutôt basiques et donc pauvres en quartz. Les sables qui en dérivent ont une composition probablement similaire et risquent de se prêter difficilement à la datation par OSL.

On peut cependant espérer que les coulées andésitiques ou trachytiques présentes ici et là sur l'île donnent par altération des sables contenant quelques grains de quartz. La rareté de ces grains exigera sans doute de bien choisir les lieux de prélèvement, et de soumettre les sédiments à une analyse de composition (diffraction aux rayons X) en préalable à toute tentative de datation. De plus, l'opération de tri entre quartz et autres minéraux apparaîtra comme une étape cruciale de la préparation des échantillons.

Les trachytes (sous forme de coulées mais aussi de filons) et les andésites, ainsi que les basaltes dits « pintade », contiennent par ailleurs des proportions non négligeables de feldspaths (plagioclases). Le fait que les datations par luminescence sur feldspaths ne soient pas encore tout-à-fait au point empêche de fonder sur ces minéraux de réels espoirs de datations absolues.

**Cependant, on pourrait tenter d'exploiter la présence des feldspaths à titre expérimental, en particulier s'il s'avère que le quartz est vraiment trop rare dans les sédiments à dater. Il serait intéressant de procéder à des datations IRSL sur feldspaths dans des formations où l'on peut parallèlement dater les sédiments par radiocarbonate. Dans la mesure où la datation au <sup>14</sup>C apparaîtrait fiable, la comparaison entre les résultats permettrait ainsi de valider ou non la méthode IRSL sur feldspaths.**

### **3.2. ASPECT GRANULOMETRIQUE**

L'analyse granulométriques des séquences sédimentaires remarquables montre que l'on dispose là de toutes les tailles de grains susceptibles de convenir à des datations par luminescence (particulièrement la gamme : 40 à 120 µm).

### **3.3. OPERATION DE PRELEVEMENT**

D'un point de vue pratique, la démarche la plus simple consistera à suivre le procédé décrit dans la première partie (2.4.1).

#### **3.3.1. Matériel nécessaire**

- des tubes d'acier ou de PVC, de longueur 15 à 20 cm, de diamètre 1 à 3 cm, dont on aura aiguisé les bords de manière à perturber le moins possible les sédiments lors du prélèvement (on pratiquera les analyses sur les quelques cm<sup>3</sup> du milieu du tube) ;
- du papier d'aluminium pour rembourrer les tubes (souvent, le sédiment se tasse dans le tube lors du prélèvement et des vides se créent aux extrémités) de manière à ce que le sédiment reste « en place » à l'intérieur ;
- un rouleau de parafilm pour boucher hermétiquement les extrémités des tubes ;
- du ruban adhésif, de préférence épais et toilé, le plus opaque sera le mieux – pour boucher définitivement les tubes ;
- des sachets hermétiques (type congélation) ou des boîtes plastiques à fermeture étanche, pour conserver les prélèvements des sédiments environnant les échantillons à luminescence, qui serviront à la mesure de radioactivité ambiante ;
- *ou* (si possible) un dosimètre portatif, grâce auquel on mesurera la dose ambiante in situ, exactement à l'emplacement de l'échantillon dans la pile sédimentaire (dans l'espace laissé vacant par le tube après extraction).

#### **3.3.2. Démarche**

- rafraîchir la coupe, dans l'idée de prélever au centre d'une sphère de sédiment de rayon 30 cm au moins, en se plaçant à une profondeur suffisante sous la surface, et en déblayant horizontalement sur une distance équivalente ;
- extraire une carotte de sédiments du niveau voulu (en général horizontalement parce que les sédiments se rassemblent plutôt sur des couches horizontales...) ; en identifiant l'échantillon, penser à orienter la carotte (par précaution, on analysera plutôt le sédiment qui se trouvait le plus éloigné de l'air libre) ;
- mesurer la radioactivité ambiante à l'aide d'un dosimètre ou prélever les sédiments environnants, en nombre suffisant pour rendre compte de toute l'irradiation naturelle qu'a pu subir l'échantillon à dater (à droite, à gauche, au-dessus, en-dessous... en conservant soigneusement les graviers et blocs éventuels).

## **4. Conclusion**

La datation de sédiments fluviaux par luminescence risque de ne pas s'appliquer facilement aux sédiments de la Réunion.

Bien que des niveaux présentant la granulométrie adéquate existent dans de nombreuses coupes, le quartz, minéral le plus propre à être analysé par OSL, sera probablement absent ou quasi-absent sur ce terrain de roches volcaniques basiques et peu différenciées.

Par contre, on trouvera certainement des proportions importantes de feldspaths susceptibles d'être analysés par **IRSL**. Bien que cette technique ne soit pas encore très au point du fait du phénomène de fading encore mal connu, on pourra tenter de la tester dans des niveaux datables par une autre méthode (par exemple par le radiocarbone). Une telle expérience permettra au moins de savoir à quoi s'en tenir quant à l'application à la Réunion de datations par IRSL sur feldspaths parfois pratiquées en géochronologie.

En pratique, on pourra certainement pratiquer l'échantillonnage facilement (le matériel est tout simple ainsi que la démarche, dans la mesure où l'on respecte certaines précautions). Il faudra ensuite sous-traiter à un laboratoire spécialisé les datations proprement dites, ainsi que les analyses de dosimétrie.

