

Programme ARAI
Action 3.1. – Cartographie de l'aléa
mouvements de terrain
- Caractérisation géotechnique des
altérites volcaniques ("mamu")

Rapport final

BRGM/RP-54835-FR
août 2006

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2003RISH03

C. Mathon, J.L.Nédellec

Vérificateur :

Original signé par

L. Closset

Approbateur :

Original signé par

JM Mompelat

Mots clés : Polynésie Française, altérites, "mamu", géotechnique.

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

JL. Nédellec, C. Mathon – (2006) – "Programme ARAI - Action 3.1. – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Caractérisation géotechnique des altérites volcaniques ("mamu") - Rapport final" – BRGM/RP-54835-FR 108 p, 39 illustrations, 20 tableaux, 9 annexes hors texte.

Synthèse

Dans la cadre du projet d'étude des aléas naturels et d'élaboration de Plans de Prévention des Risques (Projet ARAI) réalisé par le BRGM pour le compte de la Polynésie Française, le programme 3.1. spécifique à la cartographie de l'aléa mouvement des terrain sur le territoire Polynésien prévoit dans la tâche "c" une analyse du comportement des altérites volcaniques Polynésiennes (Mamu) en termes de stabilité au glissement et à l'effondrement.

Cette étude a pour objectif d'améliorer la connaissance générale de ce type de formations éminemment variable par sa lithologie, sa texture et sa structuration dans l'espace. Il s'agit principalement d'étudier le comportement géomécanique des altérites afin de mieux appréhender leur conditions de stabilité en contexte naturel (versant non terrassé) ou anthropique (versant terrassé ou talus).

Le travail effectué repose principalement sur :

- l'exploitation de données d'archives essentiellement fournies par le LTPP (Laboratoire des Travaux Publics Polynésiens) ;
- et l'analyse d'un vaste programme d'investigations géotechniques spécifique réalisés sur 6 sites principaux (sites A, B, F & T sur Tahiti, site U sur Raïatea, et site AB sur Huahine).

Cette étude a permis de distinguer trois grands faciès géomécaniques :

- le mamu III-IV médiocre
- le mamu III-IV ferme
- le mamu I-II rocheux

On soulignera que dans les règlements des PPR de Polynésie Française :

- le mamu III-IV est désigné comme "mamu meuble" sans distinction, du fait de la difficulté de le différencier visuellement entre les deux sous classes mécaniques ;
- le mamu I-II est nommé "mamu" résistant ;
- la lave saine non altérée a la même dénomination.

Le mamu III-IV, correspondant aux niveaux les plus évoluées des altérites polynésiennes, est essentiellement composé de limons assez plastiques, présentant une cohésion et un angle de frottement interne non négligeables hérités de la roche mère. A ce titre, les essais en laboratoire et in situ ont mis en évidence des caractéristiques géotechniques sensiblement meilleures que celles usuellement retenues par le LTPP. Par ailleurs, on notera que le mamu, une fois remanié (naturellement ou par terrassement) perd l'essentiel ou la totalité de sa cohésion qui le caractérisait lorsqu'il était en place.

Les faciès médiocres et fermes du mamu III-IV se distinguent relativement bien par des moyens d'investigation classiques tel le pénétromètre dynamique ou le pressiomètre, mais également la sismique réfraction. A contrario, les méthodes géophysiques par panneau électrique se révèlent moins bien adaptées pour clairement distinguer les ensembles géomécaniques.

On remarquera que les altérites de Raiatea et de Huahine se révèlent plus argileuses que sur Tahiti du fait :

- d'une part de l'âge nettement plus marqué des édifices volcanique des îles occidentales conduisant au développement d'altérites plus évoluées ;
- d'autre part de la présence d'intrusions trachy-pholitiques à minéralogie différente des complexes basaltiques de Tahiti, associées à des remontées de fluides hydrothermaux.

Le mamu I-II, correspondant aux niveaux intermédiaires de l'altération des roches volcaniques, se révèle sensiblement plus hétérogène que le mamu III-IV et nettement plus résistant. Comme pour le mamu III-IV, ce matériau présente des caractéristiques mécaniques meilleures que celles usuellement retenues par le LTPP. Le mamu I-II, aisément reconnaissable à l'affleurement, a pour particularité d'être assez délicat à différencier du mamu III-IV ferme à l'aide de certaines méthodes d'investigation classique (pénétromètre dynamique au refus, géophysique pas assez sélective). L'examen des modules pressiométriques semble être la technique classique la mieux adaptée pour clairement identifier le mamu I-II en profondeur.

D'un point de vue hydrogéologique, le mamu se révèle de manière générale peu perméable ($k_{\text{moy}} = 10^{-7}$ m/s dans la matrice). Cependant, il existe dans la masse, des discontinuités héritées de la roche mère, plus ou moins altérées, constituant des réseaux relativement privilégiés pour la circulation des eaux souterraines. Ces réseaux sont souvent assimilables à de petits aquifères temporaires pouvant se mettre en charge.

En matière de tenue de versant et de talus, le mamu est assimilable à un matériau plutôt "stable", sous réserve que son drainage soit correct. La principale difficulté dans la réalisation de modèles de stabilité est de positionner une éventuelle nappe, cette dernière pouvant très sensiblement affecter les valeurs du coefficient de sécurité calculé. En conséquence, afin de mieux apprécier les conditions de développement de pressions interstitielles dans le mamu génératrices d'instabilités, il serait souhaitable de poursuivre cette analyse par une étude hydrogéologique complète.

Enfin, cette étude générale a permis d'affiner les règles de terrassement et de maîtrise des eaux afin de modéliser les versants mamutisés dans de bonnes conditions de gestion des risques d'instabilité. L'essentiel de ces règles a été reproduit dans le règlement des Plan de Prévention des Risques.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Données exploitées	15
3. Présentation générale de l'étude	17
3.1. OBJECTIFS ET MOYENS.....	17
3.1.1. Objectifs.....	17
3.1.2. Moyens	18
3.1.3. Approche retenue	18
3.2. PRESENTATION GENERALE DES DONNEES GEOTECHNIQUES DISPONIBLES	19
3.2.1. Nature et volume.....	19
3.2.2. Répartition géographique.....	21
3.2.3. Présentation des sites d'étude	23
3.2.4. Analyse critique.....	45
4. Généralités sur le mamu	47
4.1. NOTIONS GENERALES SUR LES ALTERITES VOLCANIQUES.....	47
4.2. CLASSIFICATION USUELLEMENT ADMISE	48
4.3. PROPOSITION DE REGROUPEMENT	51

5. Mamu III & IV	53
5.1. DESCRIPTION DE LA LITHOLOGIQUE ET DE LA STRUCTURE	53
5.1.1.Lithologie.....	53
5.1.2.Structure	54
5.2. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE	55
5.2.1.Examen visuel de la stabilité de talus.....	55
5.2.2.Évaluation de caractéristiques mécaniques moyennes par rétrocalage	55
a) Préambule :.....	55
b) Site A :	56
c) Site B :	59
d) Site F :	60
e) Site U :	61
5.2.3.Essais géotechniques	66
5.3. HYDROGEOLOGIE.....	83
6. Mamu I & II.....	85
6.1. DESCRIPTION DE LA LITHOLOGIQUE ET DE LA STRUCTURE	85
6.1.1.Lithologie.....	85
6.1.2.Structure	85
6.2. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE	86
6.2.1.Examen de la stabilité de talus.....	86
6.2.2.Évaluation de caractéristiques mécaniques moyennes par rétrocalage	87
6.2.3.Caractéristiques géotechniques	88
6.3. HYDROGEOLOGIE.....	92

7. Résultats synthétiques	93
7.1. FORMATIONS TYPES.....	93
7.1.1. Avant propos.....	93
7.1.2. Mamu III-IV	93
7.1.3. Mamu I-II.....	98
7.2. TABLEAU RECAPITULATIF	102
7.3. PRINCIPES GENERAUX EN MATIERE DE TERRASSEMENTS ET DE DRAINAGE	104
7.3.1. Principaux enseignements issus de l'étude de caractérisation du mamu	104
7.3.2. Recommandations	106
8. Conclusions	111

Liste des illustrations

Illustration 1 – Localisation des sites d'étude sur Tahiti (sites A, B, F & T ayant contribué à l'étude du mamu).....	21
Illustration 2 – Localisation du site d'études U sur Raiatea	22
Illustration 3 – Localisation du site d'études AB sur Huahine	22
Illustration 4 – Situation du site A.....	23
Illustration 5 – Site A - Faciès altérés en front de planèze (hauteur totale d'environ 45 m)	24
Illustration 6 – Site A – Mamu IV (localement III) en sommet de planèze	24
Illustration 7 – Site A - Accumulation colluviales en pied de versant.....	25
Illustration 8 – Site A – Zone affectée par un ancien glissement coulée	25
Illustration 9 – Situation du site B.....	29
Illustration 10 – Vue partielle du site B.....	29
Illustration 11 – Détail d'un talus mamutisé sur le site B.....	30
Illustration 12 – Situation du site F	33
Illustration 13 – Mamu III-IV sur le site F	34
Illustration 14 – Mamu I-II sur le site F	34

Illustration 15 – Localisation du site T	37
Illustration 16 – Localisation du site U	39
Illustration 17 – Localisation du site AB.....	43
Illustration 18 – Exemple d'évolution des faciès d'altération	50
Illustration 19 – Exemple de front d'altération différencié.....	51
Illustration 20 – Exemple de variations verticales et latérales de faciès mamutisés et de roche mère.....	54
Illustration 21 – Site A – Profil 3 – Sans nappe	57
Illustration 22 – Site A – Profil 3 – Avec nappe	58
Illustration 23 – Site A – Profil 1 – Avec nappe	59
Illustration 24 – Site B – Profil 1 – Avec nappe	60
Illustration 25 – Site F – Profil 3 – Avec nappe	61
Illustration 26 – Site U – Profil 2 – Sans nappe.....	62
Illustration 27 – Site U – Profil 2 – Avec nappe	63
Illustration 28 – Site U – Profil 4 – Avec nappe	64
Illustration 29 – Site U – Profil 4 – Sans nappe.....	65
Illustration 30 – Courbes granulométriques dans le mamu III-IV	67
Illustration 31 – Courbes sédimentométriques dans le mamu III-IV.....	67
Illustration 32 – Courbes sédimentométriques dans le mamu III-IV.....	68
Illustration 33 – Cohésion du mamu III-IV mesurée en laboratoire en fonction de la profondeur des échantillons	72
Illustration 34 – Angle de frottement interne du mamu III-IV mesuré en laboratoire en fonction de la profondeur des échantillons	74
Illustration 35 – Vue d'ensemble du dispositif d'essai de cisaillement en grand	76
Illustration 36 – Vue de détail du dispositif de sollicitation sous contrainte.....	76
Illustration 37 – Schéma de talutage usuel dans le Mamu I-II.....	86
Illustration 38 – Exemple de terrassements de grande hauteur dans le mamu I-II.....	87
Illustration 39 – Site F – Profil 2 - Exemple de calcul de stabilité au glissement dans des grands versants – Avec nappe	88

Liste des tableaux

Tableau 1- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site A	28
Tableau 2- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site B	32
Tableau 3- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site F	36
Tableau 4- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site T	38
Tableau 5- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site U	42
Tableau 6- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site AB	45
Tableau 7 – Classification lithologique du mamu usuellement admise en Polynésie.....	49
Tableau 8 - Caractéristiques granulométriques dans le mamu III-IV	66
Tableau 9 – Caractéristiques de plasticité dans le mamu III-IV.....	68
Tableau 10 – Caractéristiques de teneur en eau dans le mamu III-IV	69
Tableau 11 – Caractéristiques de valeurs au bleu dans le mamu III-IV	70
Tableau 12 – Caractéristiques de valeurs de poids volumique	70
Tableau 13 – Caractéristiques de valeurs de poids volumique des grains γ_s dans le mamu III-IV.....	71
Tableau 14 – Caractéristiques de perméabilité dans le mamu III-IV	83
Tableau 15 – Poids volumique dans le mamu I-II.....	89
Tableau 16 – Vitesses soniques dans le mamu I-II	89
Tableau 17 – Résistance à la compression uniaxiale dans le mamu I-II.....	90
Tableau 18 – Module de déformation dans le mamu I-II	91
Tableau 19 – Coefficient de Poisson dans le mamu I-II	91
Tableau 20 – Caractéristiques moyennes synthétiques	104

Liste des annexes

Annexe 1 – Implantation des investigations

Annexe 2 – Sondages carottés

Annexe 3 – Sondages pressiométriques

Annexe 4 – Sondages pénétrométriques

Annexe 5 – Sismique réfraction

Annexe 6 – Puits à la pelle mécanique

Annexe 7 – Essais en laboratoire

Annexe 8 – Essais de cisaillement in situ

Annexe 9 – Profils interprétatifs

1. Introduction

Dans la cadre du programme d'évaluation des aléas naturels et d'élaboration de Plans de Prévention des Risques (Programme ARAI) réalisé par le BRGM pour le compte de la Polynésie Française, l'action 3.1. spécifique à la cartographie de l'aléa mouvement des terrain sur le territoire polynésien prévoit dans la tâche "c" une analyse du comportement des altérites volcaniques polynésiennes ("mamu") en termes de stabilité au glissement et à l'effondrement.

Cette étude a pour objectif d'améliorer la connaissance générale de ce type de formation éminemment variable par sa lithologie, sa texture et sa structuration dans l'espace. Il s'agit principalement d'étudier le comportement géomécanique des altérites afin de mieux appréhender leurs conditions de stabilité en contexte naturel (versant non terrassé) ou non.

L'objectif est de préciser certains aspects liés à ces formations :

- classification des matériaux ;
- définition de valeurs moyennes géotechniques par formations et de fuseaux associés ;
- règles générales de terrassement et de maîtrise des eaux.

Toutefois, on retiendra que l'état des connaissances de ces altérites est voué à évoluer en permanence sur la base d'études ultérieures qui seront conduites, soit spécifiques à la caractérisation du mamu, soit dans le cadre de projets d'aménagement, soit de diagnostics d'instabilité. Cela signifie que les travaux menés aujourd'hui pourront être précisés dans quelques années, indépendamment du programme ARAI.

2. Données exploitées

a) Données spécifiques à l'étude :

- rapport LTPP n° RG 26/748 du 10 mai 2006 – "Programme Arai – Investigations géotechniques – Essais in situ et essais en laboratoire – Lots 1 et 2 – Îles de Tahiti, Raiatea et Huahine" ;
- rapport LTPP n° RG 26/776 du 16 mai 2006 – "Programme Arai – Investigations géotechniques – Essais in situ et essais en laboratoire – Lot 3 – Île de Raiatea " ;
- rapport CEBTP n° E812.5.093 de décembre 2005 – "Caractérisation du Mamu par méthode électrique à Huahine / Raiatea / Tahiti" ;
- base de données géotechniques BDgtc .

b) Données générales liées au projet ARAI :

- "Note méthodologique PPR – Utilisation de Talren en appui à la cartographie de l'aléa mouvements de terrain" – Rapport BRGM ;
- "Programme ARAI – Programme 3.1 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Étude de sites détaillés – Rapport final" – Rapport BRGM/RP-54834-FR- Août 2006 .

3. Présentation générale de l'étude

3.1. OBJECTIFS ET MOYENS

3.1.1. Objectifs

Le terme « mamu » est l'appellation polynésienne du terme « altérite » qui signifie : « formation superficielle résultant de l'altération et de la fragmentation sur place de roches antérieures sans transformations pédologiques notables ».

C'est donc le plus souvent, dans les zones de relief, le matériau auquel sont confrontés les aménageurs de Polynésie en termes de terrassement, de sols de fondation ou encore de terrain à stabiliser. Cette question est ainsi au cœur de leurs préoccupations d'autant plus que l'urbanisation se développe de plus en plus au sein des reliefs au dessus des plaines côtières (notamment dans les îles de la Société), et que le mamu :

- est souvent le siège d'instabilités,
- est paradoxalement mal connu en termes de caractéristiques géotechniques,
- présente des termes variés d'une île à l'autre en fonction de la nature du substratum, de son âge, des conditions morphologiques et climatiques.

C'est pourquoi, dans le cadre du programme ARAI (convention n°2.2513), au sein de l'action 3.1 « cartographie de l'aléa mouvements de terrain », la Polynésie a prévu d'étudier le mamu. Il s'agit d'une part de mettre en place une banque de données géotechniques (volet c1) et d'autre part d'analyser « le comportement du mamu » (volet c2). C'est ce dernier volet qui est l'objet du présent rapport.

Afin de mieux cerner l'objectif et les besoins locaux, les bureaux d'étude de sol ont été consultés et, en particulier, le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP), principal opérateur du secteur. Il ressort de ces consultations que :

1. si le mamu peut être étudié ponctuellement pour des besoins opérationnels, il y a effectivement des nécessités en terme de caractérisation globale et de préconisation en terme de gestion des terrassements ;
2. l'hétérogénéité intrinsèque du matériau est mal appréhendée, si bien que la caractérisation à petite échelle (« en grand ») est souvent difficile à partir de données ponctuelles ;
3. il existe des interrogations sur un éventuel comportement spécifique des altérites polynésiennes par rapport à des matériaux similaires dans d'autres régions du monde ;

4. l'évolution des caractéristiques du mamu dans le temps est mal connue. Une dégradation rapide dans le temps est redoutée si bien qu'un diagnostic de stabilité à un endroit donné pourrait ne plus être valable 15 à 20 ans plus tard.

L'objectif du programme ARAI vise les points 1 et 2 ci-dessus. En revanche, les points 3 et 4 ne rentrent pas dans les objectifs du programme.

3.1.2. Moyens

Trois actions principales ont été engagées dans le but de caractériser les altérites polynésiennes :

1. Dépouillement de données publiques d'archives (données du Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie – LTPP) et constitution d'une base de données géotechniques (BDgtc) référençant et structurant ces données ainsi que celles acquises ultérieurement ;
2. Exploitation des données géotechniques recueillies dans le cadre de la modélisation de certains sites détaillés (action *d* du programme 3.1) ;
3. Réalisation de programmes de reconnaissances géotechnique spécifiques à la caractérisation du mamu sur 6 sites parmi les 11 dédiés au programme ARAI (sites A,B, F et T sur Tahiti, site U sur Raïatea et site AB sur Huahine – cf. Illustration 1, Illustration 2 et Illustration 3) .

Plusieurs types de données on ainsi pu être exploitées, que celles-ci soient tirées d'archives ou acquises dans le cadre du projet ARAI :

- données géotechniques "pures" : forages, essais in situ ou en laboratoire ;
- données géophysiques : panneaux électriques et sismique réfraction ;
- examen visuels de fronts de terrassement ;
- analyse "à rebours" d'instabilités ou de talus stables.

3.1.3. Approche retenue

L'approche retenue pour caractériser les altérites est la suivante :

1. analyse critique des données acquises, permettant de préciser leur pertinence, leur fiabilité et leur représentativité.
2. élimination des données jugées trop imprécises ou semblant entachées d'erreurs ;

3. première analyse globale des données et définition des catégories (ou formations) de mamu. Caractérisation lithologique et morphologique (structuration des "horizons") ;
4. analyse critique des données géotechniques par formation et choix de valeurs moyennes et d'intervalles de confiance associés ;
5. validation des valeurs types au regard de la connaissance de talus stables ou instables. Ajustement de ces valeurs type ;
6. définition de principes généraux de terrassement et de drainage (en termes d'instabilités) confrontés aux règles empiriques actuellement en usage.

3.2. PRESENTATION GENERALE DES DONNEES GEOTECHNIQUES DISPONIBLES

3.2.1. Nature et volume

Le programme d'investigations géotechniques défini par le BRGM a été confié en sous-traitance au LTPP (Laboratoire des Travaux Publics Polynésiens), le CEBTP de Clermont Ferrand ayant réalisé les panneaux électriques pour le compte du LTPP.

L'exploitation des données d'archives et des données spécifiques acquises dans le cadre du projet ARAI ont permis de recenser les éléments suivants dans la base géotechnique :

1. Sondages et essais in situ en forage :
 - . carottages : 4 forages ,
 - . sondages pressiométriques : 12 forages – 93 essais,
 - . sondages pénétrométriques dynamique : 15 sondages ;
 - . puits à la pelle mécanique : 15 puits
2. Essais de cisaillement in situ :
 - . 7 essais de cisaillement rectiligne sur bloc de sol de 70 x 70 cm

3. Essais en laboratoire :

- . granulométries : 27 essais
- . sédimentométries : 24 essais
- . poids volumique humide (sur échantillon meuble) : 36 essais
- . poids volumique des grains solides : 17 essais
- . teneur en eau naturelle : 39 essais
- . limites d'Atterberg : 16 essais
- . valeurs au bleu : 19 essais
- . perméabilité au moule CBR : 8 essais
- . limites de retrait : 13 essais
- . poids volumique humide sur échantillons de mamu raide : 14 essais
- . compression uniaxiale : 14 essais
- . module de déformation : 9 essais
- . coefficient de Poisson : 4 essais
- . cisaillement rectiligne UU : 15 essais
- . cisaillement rectiligne CD : 7 essais
- . cisaillement triaxial UU : 4 essais
- . cisaillement vertical CU+u : 6 essais

4. Investigations géophysiques :

- . Panneaux électriques : 53 panneaux
- . Profils de sismique réfraction : 63 profils

3.2.2. Répartition géographique

Les données recueillies se répartissent géographiquement de la façon suivante :

1. *Données d'archives LTPP :*
 - 303 sites sur Tahiti
 - environ 400 sites répartis parmi les autres îles de Polynésie

2. *Données spécifiques à la caractérisation du mamu dans le cadre du programme ARAI :*
 - 4 sites sur Tahiti (cf. Illustration 1) – site A : Afaahiti / Site B : Taravao / Site F – Panaauia - Panaauia Hau / Site T – Paea – Toetoe) ;
 - 1 site sur Raïatea (cf. Illustration 2) - Site U – Taputapua – Faaroa ;
 - 1 site sur Huahine (cf. Illustration 3) - Site AB - Huahine – Paea.



Illustration 1 – Localisation des sites d'étude sur Tahiti (sites A, B, F & T ayant contribué à l'étude du mamu)

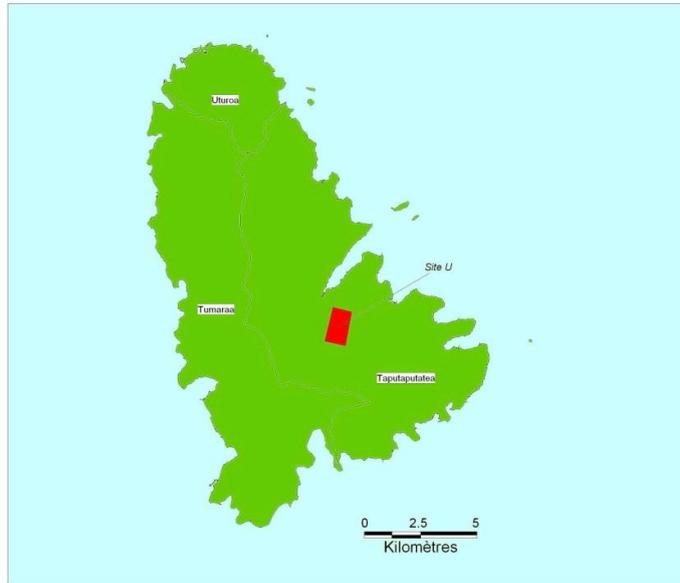


Illustration 2 – Localisation du site d'études U sur Raiatea

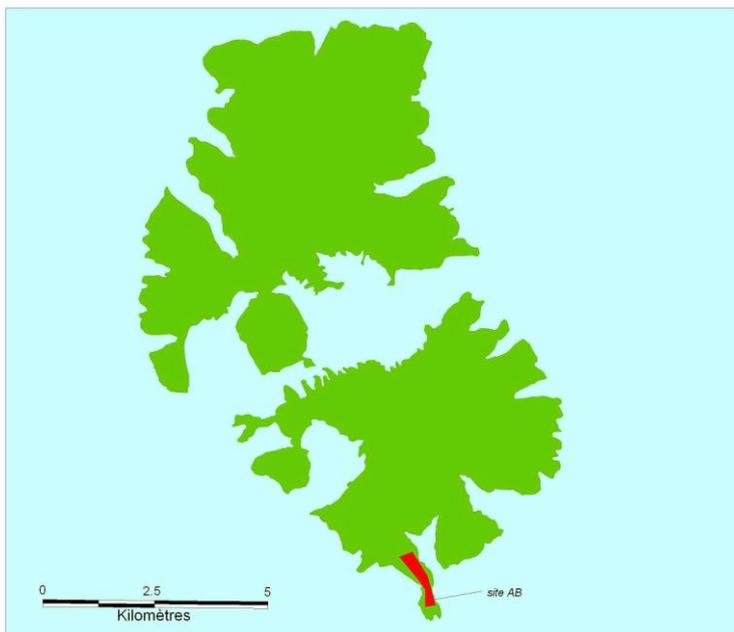


Illustration 3 – Localisation du site d'études AB sur Huahine

3.2.3. Présentation des sites d'étude

Les sites choisis pour la caractérisation du mamu ont été sélectionnés d'une part sur la base de leur représentativité en matière de faciès classiques de mamu sur Tahiti, et sur d'autres îles de la Société plus anciennes (en particulier la présence de nombreux affleurement est indispensable), et d'autre part en fonction de leur accessibilité pour des engins de foration. On notera également que ces sites ont servi de zones tests afin d'affiner le zonage d'aléa en vue de l'élaboration des PPR.

a) Site A – Afaahiti – PK 1,3 à PK 4,8

- *Situation*

Secteur d'environ 3,5 km de long bordant l'est de la Baie de TARAVAO, et s'étendant au-delà de l'hôpital. La plaine côtière y fait 250 m de largeur en moyenne. La zone étudiée mesure environ 105 hectares.

(A) AFAAHITI

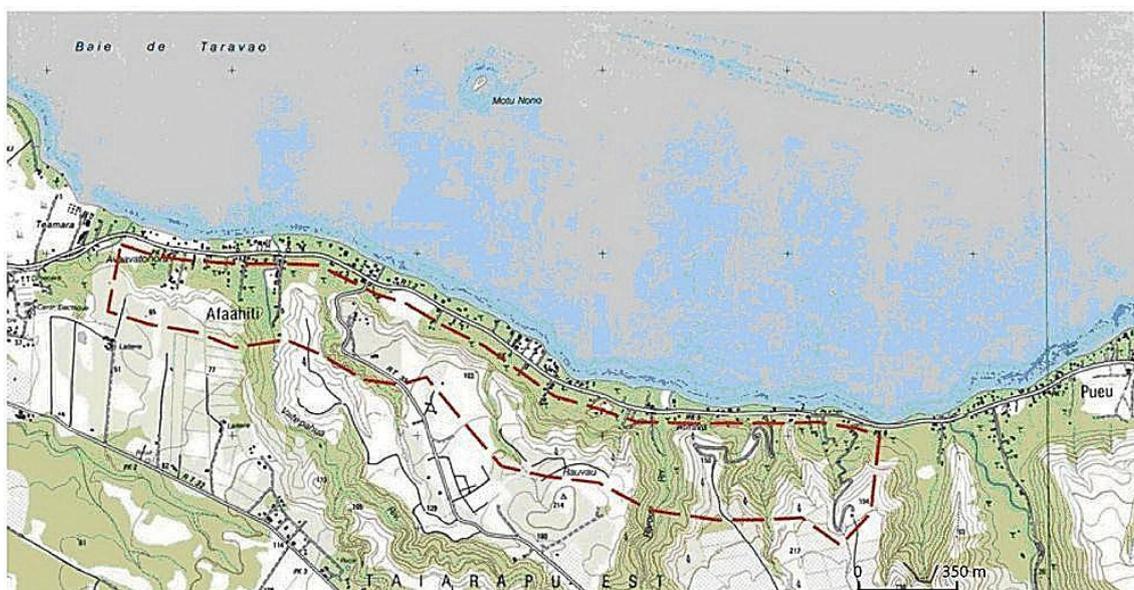


Illustration 4 – Situation du site A

- *Contexte géomorphologique*

Il s'agit d'un front de planèze mamutisé (cf. Illustration 5), peu à moyennement élevé jusqu'à la vallée de la Paha, plus élevé au-delà. On notera la présence locale de colluvions argileuses en pied (cf. Illustration 7) et Mamu IV (cf. Illustration 6) en bordures supérieures concaves (témoins d'anciens éboulements ?).



Illustration 5 – Site A - Faciès altérés en front de planèze (hauteur totale d'environ 45 m)



Illustration 6 – Site A – Mamu IV (localement III) en sommet de planèze

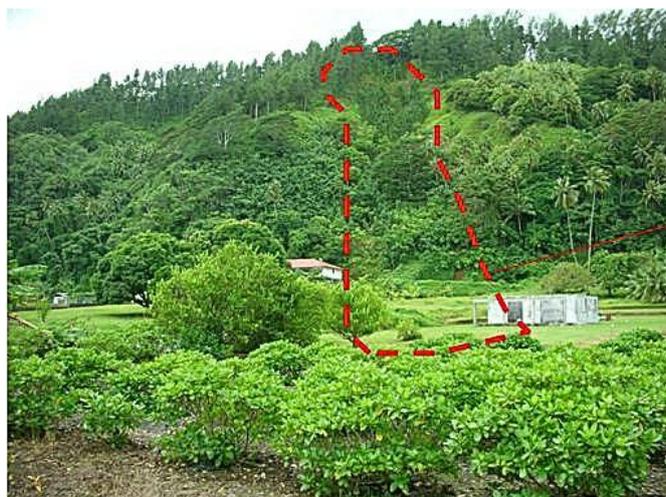


Illustration 7 – Site A - Accumulation colluviales en pied de versant

- *Nature des phénomènes visibles*

- ouest RT 30 : chutes de blocs / éboulement / glissement de talus sur toute la hauteur du front ;

- est RT 30 : glissement / coulée avérés en partie sommitale avec nombreuses « encoches » anciennes (cf. Illustration 8).



Cicatrice de
la zone
glissée

Illustration 8 – Site A – Zone affectée par un ancien glissement coulée

- *Programme d'investigations*

La localisation des investigations est présentée en annexe 1.

Le Tableau 1 présente le détail du programme de reconnaissance.

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Forages et essais en forage	Sondages carotté	SC1	L = 15,5 m	SC1 dans mamu meuble
		SC2	L = 3 m	SC2 dans mamu raide
	Sondage au pénétromètre dynamique	PL1	L = 20 m	
		PL2	L = 10 m	
PL3		L = 11 m		
PL4		L = 14,4 m		
Sondages pressiométriques	SP1	L = 10 m / 9 essais		
	SP2	L = 15 m / 14 essais		
	SP3	L = 15 m / 14 essais		
	SP4	L = 6 m / 5 essais		
Essais de cisaillement in situ	Essais de cisaillement rectiligne sur bloc de sol	CG1 CG2	2 essais au total	
Essais en laboratoire	Granulométrie		8 essais	dans SC1
			1 essai	dans PM2
	Sédimentométrie		4 essais	dans SC1
	Teneur en eau naturelle		17 essais	dans SC1
			3 essais	dans PM1 & PM2
	Poids volumique sur matériau meuble		5 essais	dans SC1
	Limites d'Atterbeg		3 essais	dans SC1
Valeurs au bleu		3 essais	dans SC1	
Perméabilité au moule CBR		3 essais	Dans PM1 & PM2	

Nature		Désignation	Quantité	Divers
	Limite de retrait		5 essais	
	Cisaillement rectiligne UU		5 essais	dans SC1
	Cisaillement rectiligne CD		2 essais	dans SC1
	Cisaillement triaxial UU		2 essais	dans SC1
	Cisaillement triaxial CU+u		4 essais	dans SC1
	Poids volumique sur matériau rocheux		6 essais	dans SC2
	Résistance à la compression simple		6 essais	dans SC2
	Mesures de coefficient de Poisson sur échantillon rocheux		2 essais	dans SC2
	Mesures de vitesse sonique sur échantillon rocheux		6 essais	dans SC2
Géophysique	Panneaux électriques	PE1a PE1b PE2 PE3a PE3b PE4 PE5	L = 62 m L = 62 m L = 126 m L = 62 m L = 62 m L = 126 m L = 126 m	
	Profils de sismique réfraction	PSR1A PSR1B	L = 60 m L = 60 m	

Nature		Désignation	Quantité	Divers
		PSR2A	L = 60 m	
		PSR2B	L = 60 m	
		PSR3A	L = 60 m	
		PSR3B	L = 60 m	
		PSR4A	L = 60 m	
		PSR4B	L = 60 m	
		PSR5A	L = 60 m	
		PSR5B	L = 60 m	

Tableau 1- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site A

Par ailleurs, une topographie détaillée a été dressée sur l'ensemble du site d'étude à l'aide de moyens de photogrammétrie aérienne et de levés sur site.

b) Site B – Afaahiti – Taravao

- *Situation*

Secteur d'environ 1,5 km de long et 1 km de large (environ 130 hectares), situé sur Tahiti Nui et dominant le nord de TARAVALO (cf. Illustration 9)

- *Contexte géomorphologique*

Extrémité de planèze en pente douce du premier volcan bouclier de Tahiti Nui. Seuls les versants des talwegs qui l'affectent, dont les directions varient autour de N-S, accentuent localement la pente.

Les quelques terrassements accessibles montrent une mamutisation très avancée (mamu III et mamu IV – cf. Illustration 10 et Illustration 11), au moins en surface, ce que ne contredit pas la présence des nombreux champs cultivés.

(B) TARAVAO

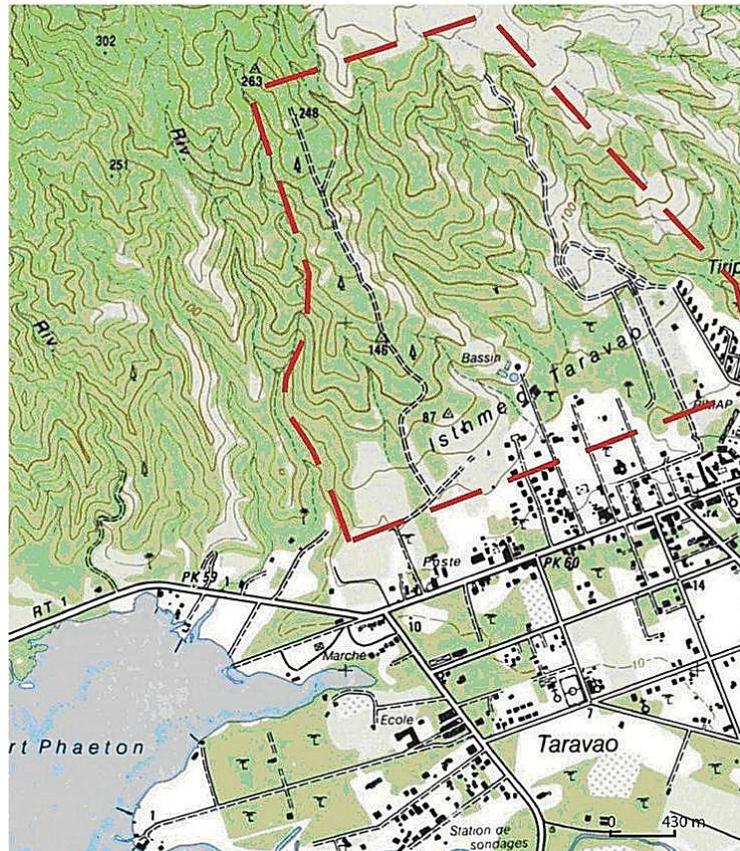


Illustration 9 – Situation du site B



Illustration 10 – Vue partielle du site B



Illustration 11 – Détail d'un talus mamutisé sur le site B

- *Nature des phénomènes visibles*

Aucun phénomène d'instabilité n'est observé, mais le contexte topographique ne permet d'exclure que des phénomènes de glissement localisés puissent se développer dans les versants principaux entaillant les planèzes.

- *Programme*

La localisation des investigations est présentée en annexe 1.

Le Tableau 2 expose le programme de reconnaissances géotechniques.

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Forages et essais en forage	Sondage au pénétromètre dynamique	PL1 PL2a PL2b PL3 PL4	L = 17,4 m L = 20 m L = 20 m L = 20 m L = 62 m	
	Puits à la pelle	PM1 PM2	2 puits au total	
Essais de cisaillement in situ	Essais de cisaillement rectiligne sur bloc de sol	CG1	1 essai	
Essais en laboratoire	Granulométrie		1 essai	Échantillon en puits
	Sédimentométrie		4 essais	Échantillon en puits
	Teneur en eau naturelle		5 essais	Échantillon en puits
	Limites d'Atterbeg		1 essai	Échantillon en puits
	Valeurs au bleu		4 essais	Échantillon en puits
	Perméabilité au moule CBR		1 essai	Échantillon en puits
	Limite de retrait		1 essai	Échantillon en puits

Nature		Désignation	Quantité	Divers	
Géophysique	Panneaux électriques	PE1a	L = 62 m		
		PE1b	L = 62 m		
		PE1c	L = 62 m		
		PE2a	L = 62 m		
		PE2c	L = 126 m		
		PE3a	L = 62 m		
		PE3b	L = 62 m		
		PE3c	L = 62 m		
		PE4a	L = 62 m		
		PE4b	L = 62 m		
		PE4c	L = 62 m		
		PE4d	L = 62 m		
		PE4e	L = 62 m		
		Profils de sismique réfraction	PSRAA	L = 60 m	
			PSR1B	L = 60 m	
			PSR1C	L = 60 m	
			PSR2C	L = 60 m	
			PSR3A	L = 60 m	
			PSR3B	L = 60 m	
			PSR3C	L = 60 m	
	PSR4A	L = 60 m			
	PSR4B	L = 60 m			
	PSR4C	L = 60 m			
	PSR4E	L = 60 m			
	PSR4F	L = 60 m			

Tableau 2- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site B

Par ailleurs, une topographie détaillée a été dressée sur l'ensemble du site d'étude à l'aide de moyens de photogrammétrie aérienne et de levés sur site.

c) Site F – Panaauia - Panaauia Hau

- *Situation*

Le secteur compris entre les crêtes des versants nord de la Punaruu et de la rivière qui longe le lotissement Punavai, soit environ 1,5 km². La zone étudiée mesure environ 240 hectares.

Ⓣ PUNAVAI PUNAAUIA

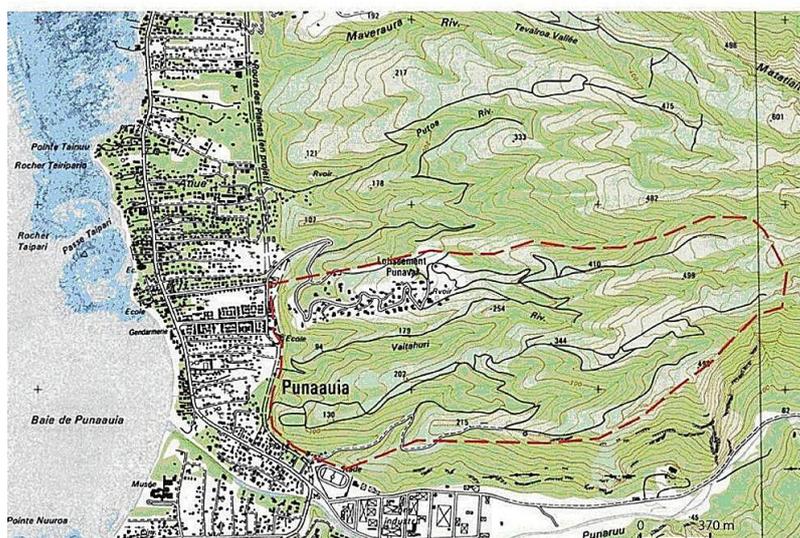


Illustration 12 – Situation du site F

- *Contexte géomorphologique*

Il s'agit de planèzes au relief perturbé par des talwegs rapprochés (versants principaux et secondaires), dont deux à écoulements pérennes. Tous les stades de mamu y sont représentés, les mamu III et IV étant plus présents en surface de planèze, et les mamu I et II étant plus fréquemment rencontrés à flancs de ravines.



Illustration 13 – Mamu III-IV sur le site F



Illustration 14 – Mamu I-II sur le site F

- *Nature des phénomènes visibles*

Des poches colluviales instables sont observables en altitude. Localement, on peut constater des chutes de pierres et de petits blocs, ainsi qu'un écaillage du Mamu (1,5 m³ localement).

- *Programme d'investigations*

La localisation des investigations est présentée en annexe 1.

Le Tableau 3 présente le détail du programme de reconnaissance.

Nature	Désignation	Quantité	Divers
--------	-------------	----------	--------

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Forages et essais en forage	Sondages carotté	SC1	L = 15 m	10 échantillons prélevés
		SC2	L = 3 m	SC2 dans le mamu raide pour essais de compression
	Sondages pressiométriques	SP1	L = 10 m / 9 essais L = 7 m / 6 essais L = 8 m / 7 essais L = 7 m / 6 essais	
Essais de cisaillement in situ	Essais de cisaillement rectiligne sur bloc de sol	CG1 CG2	2 essais au total	
Essais en laboratoire	Granulométrie		2 essais	Echantillon dans SC1
	Sédimentométrie		2 essais	Echantillon dans SC1
	Teneur en eau naturelle		5 essais	Echantillon dans SC1
	Poids volumique		5 essais	Echantillon dans SC1
	Limites d'Atterbeg		2 essais	Echantillon dans SC1
	Valeurs au bleu		2 essais	Echantillon dans SC1
	Limite de retrait		2 essais	
	Cisaillement rectiligne UU		4 essais	Echantillon dans SC1
	Cisaillement triaxial UU		2 essais	Echantillon dans SC1
	Cisaillement triaxial CU+u		2 essais	Échantillon dans SC1
	Poids volumique sur roche		8 essais	Échantillon dans SC2

Nature		Désignation	Quantité	Divers
	Vitesse sonique sur roche		8 essais	Échantillon dans SC2
	Résistance à la compression simple		8 essais	Échantillon dans SC2
	Module de déformation sur roche		4 essais	Échantillon dans SC2
	Coefficient de Poisson sur Roche		2 essais	Échantillon dans SC2
Géophysique	Panneaux électriques	PE1a	L = 62 m	
		PE1b	L = 62 m	
		PE2a	L = 62 m	
		PE2b	L = 62 m	
		PE3a	L = 62 m	
		PE3b	L = 62 m	
		PE4a	L = 62 m	
		PE4b	L = 62 m	
	Profils de sismique réfraction	PSR1A	L = 60 m	
		PSR1B	L = 60 m	
		PSR2A	L = 60 m	
		PSR2B	L = 60 m	
		PSR3A	L = 60 m	
		PSR3B	L = 60 m	
	PSR4A	L = 60 m		
	PSR4B	L = 60 m		

Tableau 3- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site F

Par ailleurs, une topographie détaillée a été dressée sur l'ensemble du site d'étude à l'aide de moyens de photogrammétrie aérienne et de levés sur site.

d) Site T – Paea – Toetoe

- *Situation*

Le site se situe le long d'un front de planèze d'environ 100 m de hauteur, parallèlement à la route de ceinture, entre les lotissements Badwin au nord et Vaitiare au sud, sur environ 2 km. La zone étudiée mesure environ 75 hectares.

T TOETOE

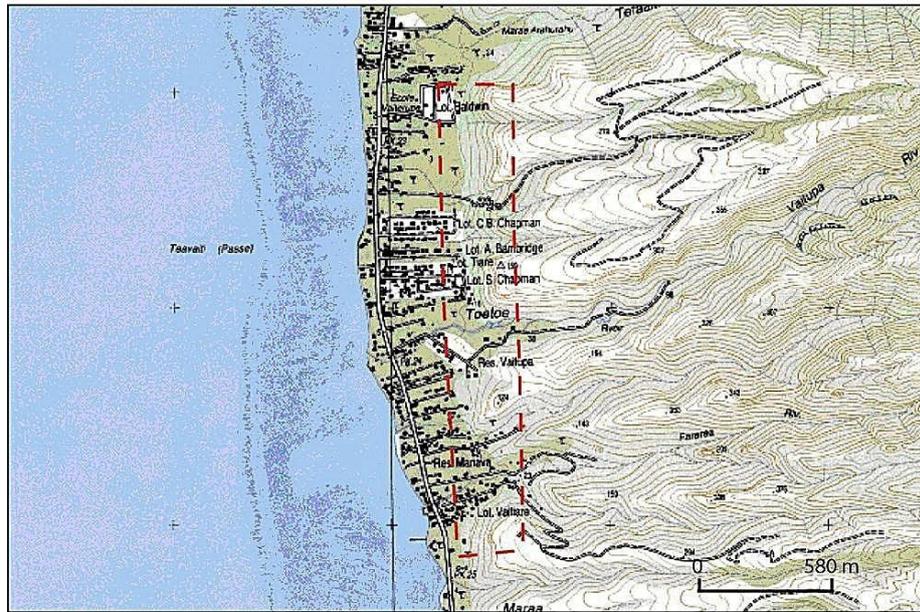


Illustration 15 – Localisation du site T

- *Contexte géomorphologique*

Le front de planèze, topographiquement relativement homogène, est constitué exclusivement de coulées assez massives et relativement peu altérées. Ce site a été sélectionné pour investiguer le mamu I-II en pied de versant.

- *Nature des phénomènes visibles*

Chutes de blocs potentielles et instabilités de colluvions en pied de versant.

- *Programme d'investigations*

La localisation des investigations est présentée en annexe 1.

Le Tableau 4 présente le détail du programme de reconnaissance.

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Forages et essais en forage	Sondages pressiométriques	SP1A	L = 12 m / 8 essais	
		SP1B	L = 10 m / 9 essais	
		SP2A	L = 5 m / 3 essais	
		SP2B	L = 6,5 m / 3 essais	
Géophysique	Profils de sismique réfraction	PSR1A	L = 60 m	
		PSR1B	L = 60 m	
		PSR2A	L = 60 m	
		PSR2B	L = 60 m	
		PSR3A	L = 60 m	
		PSR3B	L = 60 m	
		PSR3C	L = 60 m	

Tableau 4- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site T

Par ailleurs, une topographie détaillée a été dressée sur l'ensemble du site d'étude à l'aide de moyens de photogrammétrie aérienne et de levés sur site.

e) Site U – Taputapua – Faaroa

- *Situation*

La zone d'étude mesure environ 1,6 km de long par 1000 m de large, soit près de 150 hectares. Elle est située à l'Est de l'agglomération placée au fond de la baie de Faaroa.

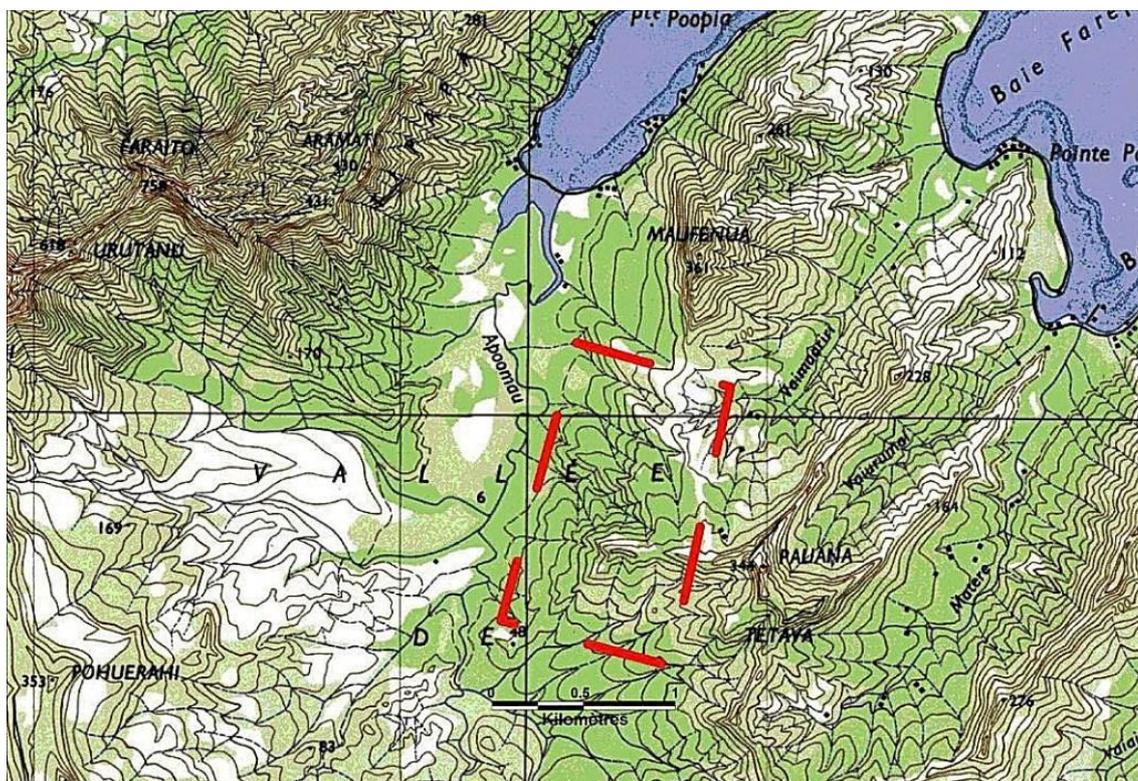


Illustration 16 – Localisation du site U

- *Contexte géomorphologique*

Il s'agit des 130 premiers mètres d'un versant à pente modérée (15° en moyenne avec des passées à plus de 30° en tête ou en pied). La géologie semble correspondre à des ensembles volcano-sédimentaires fortement altérés (mamutisés) – mamu III et IV - avec localement des couvertures colluviales. Il convient de souligner que le choix de ce site repose d'une part sur le fait que l'île de Raiatea est plus ancienne que celle de Tahiti et est composée de complexes volcaniques plus variés (basaltes, trachytes, phonolites), et d'autre part en raison de la présence d'un grand glissement sur un versant peu pentu.

- *Nature des phénomènes visibles*

La zone est affectée par plusieurs glissements importants (plusieurs dizaines de milliers de m³ chaque) semblant s'être propagés jusqu'à la route en contrebas. Il est intéressant de constater que ces glissements se sont développés et propagés dans un versant à pente limitée, phénomène constaté dans plusieurs sites de l'île.

- *Programme d'investigation*

La localisation des investigations est présentée en annexe 1.

Le Tableau 5 expose le programme de reconnaissances géotechniques (lots 2 et 3).

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Forages et essais en forage	Puits à la pelle mécanique	PM1	7 puits au total	
		PM2		
		PM10		
		PM11		
		PM12		
		PM13		
		PM14		
	Sondage au pénétromètre dynamique	PDL1	L = 7,4 m	
		PDL2	L = 13,8 m	
		PDL3	L = 8,6 m	
		PDL4	L = 8,2 m	
		PDL5	L = 6,8 m	
		PDL6	L = 8,5 m	
		PDL1	L = 7,4 m	
		PDL2	L = 13,8 m	
		PDL3	L = 8,6 m	
		PDL4	L = 8,2 m	
		PDL5	L = 6,8 m	
		PDL6	L = 8,5 m	

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Essais de cisaillement in situ	Essais de cisaillement rectiligne sur bloc de sol	CG1 CG2	2 essais au total	
Essais en laboratoire	Granulométrie		10 essais	Échantillons dans puits
	Sédimentométrie		7 essais	Échantillons dans puits
	Teneur en eau naturelle		10 essais	Échantillons dans puits
	Poids volumique		8 essais	Échantillons dans puits
	Limites d'Atterbeg		6 essais	Échantillons dans puits
	Valeurs au bleu		5 essais	Échantillons dans puits
	Perméabilité au moule CBR		2 essai	Échantillons dans puits
	Limite de retrait		2 essais	Échantillons dans puits
	Cisaillement rectiligne UU		4 essais	Échantillons dans puits
	Cisaillement rectiligne CD		3 essais	Échantillons dans puits
Géophysique	Panneaux électriques	PE1a PE1b PE2a PE2b PE3a PE3b PE4	L = 62 m L = 126 m	

Nature		Désignation	Quantité	Divers
	Profils de sismique réfraction	PSR1A	L = 60 m	
		PSR1B	L = 60 m	
		PSR2A	L = 60 m	
		PSR2B	L = 60 m	
		PSR3A	L = 60 m	
		PSR3B	L = 60 m	
		PSR4A	L = 60 m	
		PSR4B	L = 60 m	
		PSR10A	L = 60 m	
		PSR10B	L = 60 m	
		PSR11A	L = 60 m	
		PSR11B	L = 60 m	
		PSR12A	L = 60 m	
		PSR12B	L = 60 m	
		PSR13BISA	L = 60 m	
		PSR13BISB	L = 60 m	
PSR14A	L = 60 m			
PSR14B	L = 60 m			

Tableau 5- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site U

f) Site AB - Huahine – Parea – LOT 2

On soulignera que ce site n'est destiné qu'à la caractérisation du "mamu", et non à l'élaboration d'une carte d'aléa détaillée.

- *Situation*

La zone d'étude se situe au sud de l'île, le long de la pointe entre la baie d'Avea et le village de Parea (cf. Illustration 17)

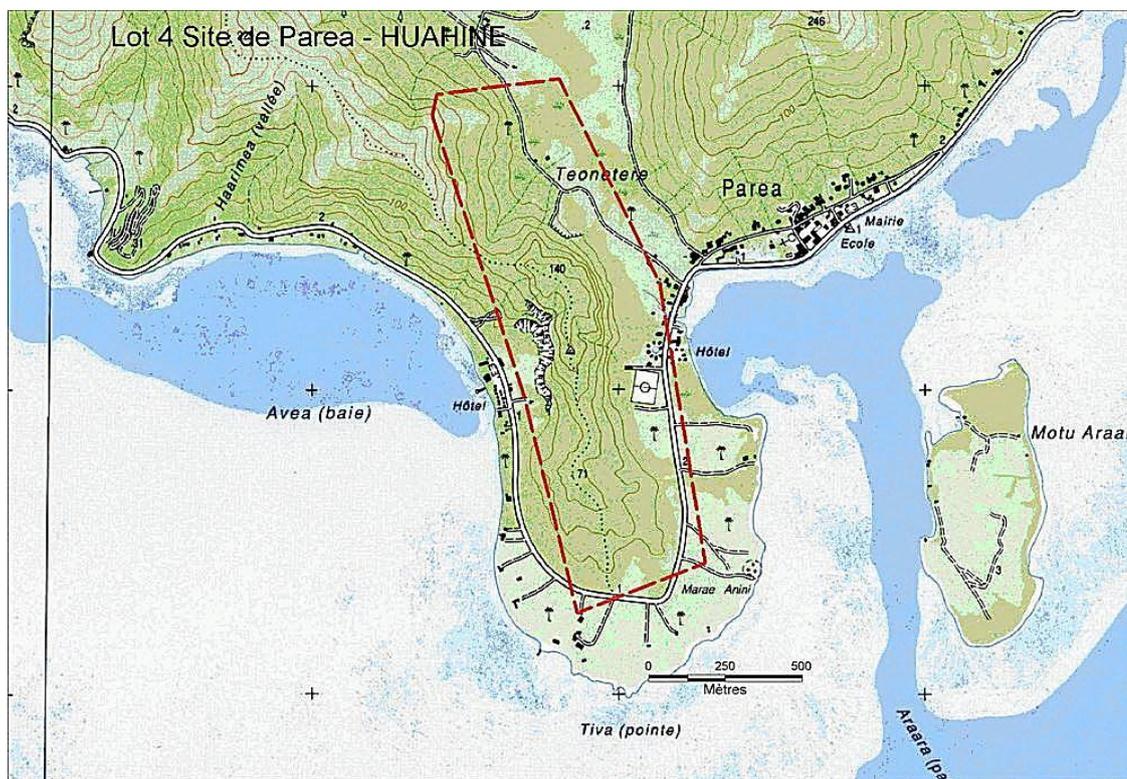


Illustration 17 – Localisation du site AB

- *Contexte géomorphologique*

Il s'agit d'un relief allongé haut de 150 au maximum, de pente modérée à forte. Cette zone est constituée de coulées mamutisées au contact d'une intrusion de trachyte, avec localement des plaquages colluviaux. Il s'agit donc d'un contexte géologique sensiblement différent de ceux analysés sur Tahiti.

- *Nature des phénomènes*

Un glissement de terrain de relativement grande ampleur (60 m de large environ) s'est produit en 1988 et a fait quelques victimes. Le glissement s'est vraisemblablement produit au contact de l'intrusion de trachyte.

- *Programme d'investigation*

La localisation des investigations est présentée en annexe 1.

Le Tableau 6 présente le détail du programme de reconnaissance.

Nature		Désignation	Quantité	Divers
Forages et essais en forage	Sondage au pénétromètre dynamique	PL 1a PL1b PL2 PL3	L = 8,8 m L = 13 m L = 14,2 m L = 20 m	
	Puits à la pelle mécanique	PM1 PM2	2 puits au total	
Essais en laboratoire	Granulométrie		4 essais	dans fouille
	Sédimentométrie		4 essais	dans fouille
	Teneur en eau naturelle		4 essais	dans fouille
	Poids volumique		4 essais	dans fouille
	Limites d'Atterbeg		4 essais	dans fouille
	Valeurs au bleu		4 essais	dans fouille
	Perméabilité au moule CBR		2 essais	dans fouille
	Limite de retrait		3 essais	dans fouille
	Cisaillement rectiligne UU		2 essais	dans fouille
	Cisaillement rectiligne CD		2 essais	dans fouille
Géophysique	Panneaux électriques	PE1a	L = 62 m	
		PE1b	L = 62 m	
		PE1c	L = 62 m	
		PE2a	L = 94 m	
		PE2b	L = 94 m	
		PE3	L = 126 m	

Nature		Désignation	Quantité	Divers
	Profils de sismique réfraction	PSR1A	L = 60 m	
		PSR1B	L = 60 m	
		PSR1C	L = 60 m	
		PSR2A	L = 60 m	
		PSR2B	L = 60 m	
		PSR2C	L = 60 m	
		PSR3A	L = 60 m	
		PSR3B	L = 60 m	

Tableau 6- Programme de reconnaissances géotechniques sur le site AB

3.2.4. Analyse critique

On constate un très fort déséquilibre dans la répartition des données géotechniques. Cela s'explique par les raisons suivantes :

- *Nature des essais* :
 - . les essais en laboratoire, hormis les identifications, sont onéreux et donc réservés à des projets majeurs par définition assez rares. De plus certains essais, comme les essais de cisaillement triaxiaux ne peuvent être pratiqués en Polynésie ;
 - . les carottages, entre autres adaptés pour prélever des échantillons intacts de sol, restent rares ;
 - . les essais en forage de type pressiomètre et surtout pénétromètre dynamique sont assez fréquents car adoptés sur de nombreux projets géotechniques (fondations, terrassements etc.) ;
 - . les essais géophysiques, en dehors de ceux réalisés spécifiquement pour le projet ARAI, sont rares car il n'existe pas de matériel permanent sur le territoire polynésien.

Bien que le programme Arai ait permis d'obtenir des données complémentaires substantielles, la population d'information reste trop limitée pour adopter des approches statistiques significatives. C'est entre autres pour cette raison que le calage des résultats sur des talus stables ou instables s'est révélé essentiel.

- *Répartition géographique :*

En raison de la concentration de l'urbanisation et des équipements sur l'île de Tahiti, la très grande majorité des données disponibles se situe en périphérie de l'île principale.

- *Exploitabilité des données d'archives :*

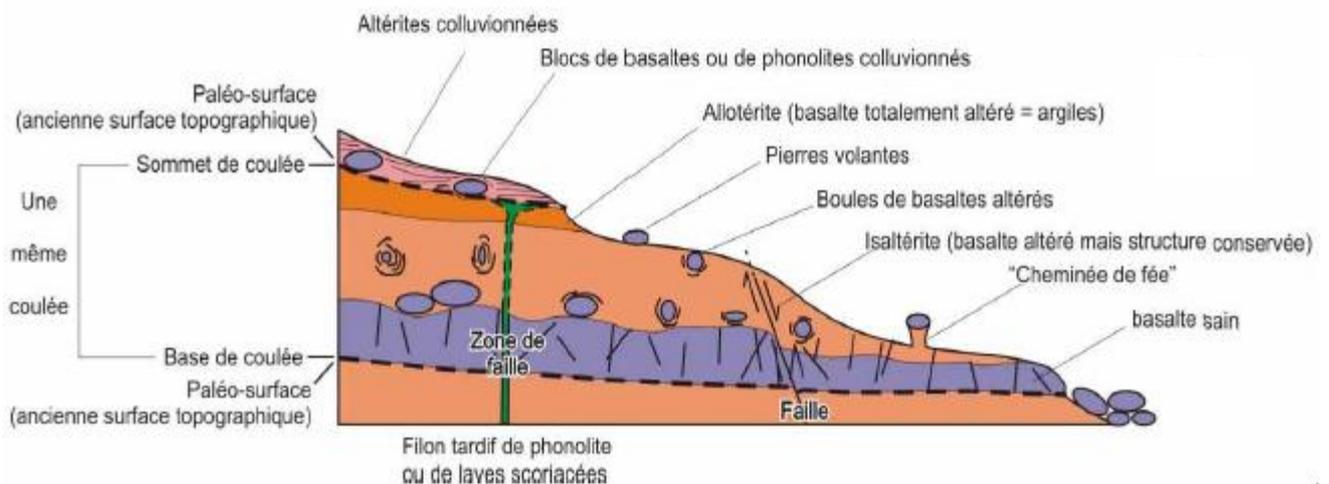
En ce qui concerne les données d'archives du LTPP, sur plus de 1600 dossiers transmis, et après sélection de 703 dossiers potentiellement intéressants (sur la base du type d'étude proposé, et de la nature du maître d'ouvrage), il s'avère que moins de 100 dossiers ont pu être exploités. Les études menées par le LTPP dans le cadre du projet « Te ara Nui » de liaison Punaauia/Taravao restent les plus intéressantes parmi celles recueillies lors de la phase de déstockage des archives.

On soulignera que les études spécifiques menées dans le cadre du programme Arai ont permis de significativement compléter les données déjà disponibles. Ces données se sont révélées fondamentales pour la caractérisation du mamu.

4. Généralités sur le mamu

4.1. NOTIONS GÉNÉRALES SUR LES ALTERITES VOLCANIQUES

Le mamu correspond aux faciès d'altération des riches volcaniques polynésiennes en milieu tropical humide. Cette altération est classiquement causée par des réactions eau-roche provoquant la déstabilisation des minéraux en fonction de leur propre résistance à l'altération (Goldich, 1938). Ainsi, les éléments chimiques les plus solubles (K, Na, Ca, et Si) sont extraits et mis en solution, puis exportés, tandis que éléments restants re-précipitent principalement en argiles, oxydes et hydroxydes.



Les mamu sont différents selon :

- la nature de la roche mère (basaltes, phonolites, trachytes) → variations dans la composition des minéraux rémanents et néoformés ;
- leur âge (3 Ma à 0,8 Ma) → altération plus poussée en épaisseur ;
- la structure originelle de la roche mère, en particulier la fracturation → approfondissement du front d'altération par circulation localisée de l'eau interstitielle.

Ceci conduit à observer des textures, des couleurs, et des épaisseurs différentes de faciès "mamutisés".

4.2. CLASSIFICATION USUELLEMENT ADMISE

D'une façon générale, il est conventionnellement admis de distinguer deux grandes familles d'altérites sur les roches volcaniques (plutonique et effusives) ;

- les isaltérites : Il s'agit du stade le moins évolué d'altération. Le matériau conserve le volume et la structure de la roche mère ;
- les allotérites : elles se caractérisent par un réduction de volume, et par une disparition de la texture par rapport à la roche-mère.

Actuellement, d'un point de vue lithologique, il est convenu en Polynésie Française de décliner le mamu selon 4 classes basées sur le stade d'altération plus ou moins prononcée de la « roche mère » :

Classe de Mamu	Description lithologique	Exemples
mamu stade I	Le plus souvent de couleur grise lorsqu'il provient de lave compacte ou vacuolaire, sa roche mère est bien discernable. Il ne se désagrège pratiquement pas sous la main et contient des boules peu ou pas altérées.	
mamu stade II	De couleur gris ou ocre, plus rarement rouge, la structure et la texture y sont bien visibles. Assez cohérent, il a la consistance de la craie. Il contient toujours des panneaux beaucoup moins altérés.	

Classe de Mamu	Description lithologique	Exemples
mamu stade III	Souvent bariolé, sa structure et sa texture sont encore visibles. Il contient déjà une proportion notable de « pâte » emballant les blocs, et les boules en voie d'altération. Il se désagrège à la main.	
mamu stade IV	De couleur le plus souvent ocre ou rouge, la structure ayant disparue. On peut y trouver parfois quelques boules moins altérées.	

Tableau 7 – Classification lithologique du mamu usuellement admise en Polynésie

Le stade 0 ne se distingue de la lave saine que par la présence dans cette dernière de phénocristaux en cours de transformation.

Avant achèvement du programme ARAI, il n'existait rien de formalisé faisant correspondre ces différents stades d'altération à des plages de variation de caractéristiques mécaniques, intrinsèques ou associées à des types d'essais *in situ*, ou à des paramètres d'identification. Dans un rapport préliminaire relatif au projet « Te ara Nui » de liaison Punaauia/Taravao, le LTPP a initié ce type de réflexion en proposant des caractéristiques de cisaillement à court et à long terme, ainsi qu'un poids volumique humide, pour le mamu IV et un regroupement des stades I à III. Ces caractéristiques sont nécessairement moyennes et indissociables de leurs techniques d'acquisition et du secteur étudié compte tenu de la finalité du projet. Elles servent à préconiser des pentes de terrassements de talus assorties de hauteurs limites, sous réserve de conditions de drainage satisfaisantes, ou d'absence d'eau.

On constate bien que le programme Arai, en poursuivant l'élaboration d'une "classification géotechnique" adaptée, répond à des besoins concrets. En effet, pour intégrer les risques liés à la nature du sol et à sa topographie, l'élaboration des schémas d'aménagements, comme des grands projets, doit aux stades préliminaires se baser sur des documents établis selon une procédure n'intégrant pas de travaux de reconnaissance spécifique du sous-sol, mais faisant appel à « l'expérience » et en particulier à une compilation des données disponibles, souvent limitées.

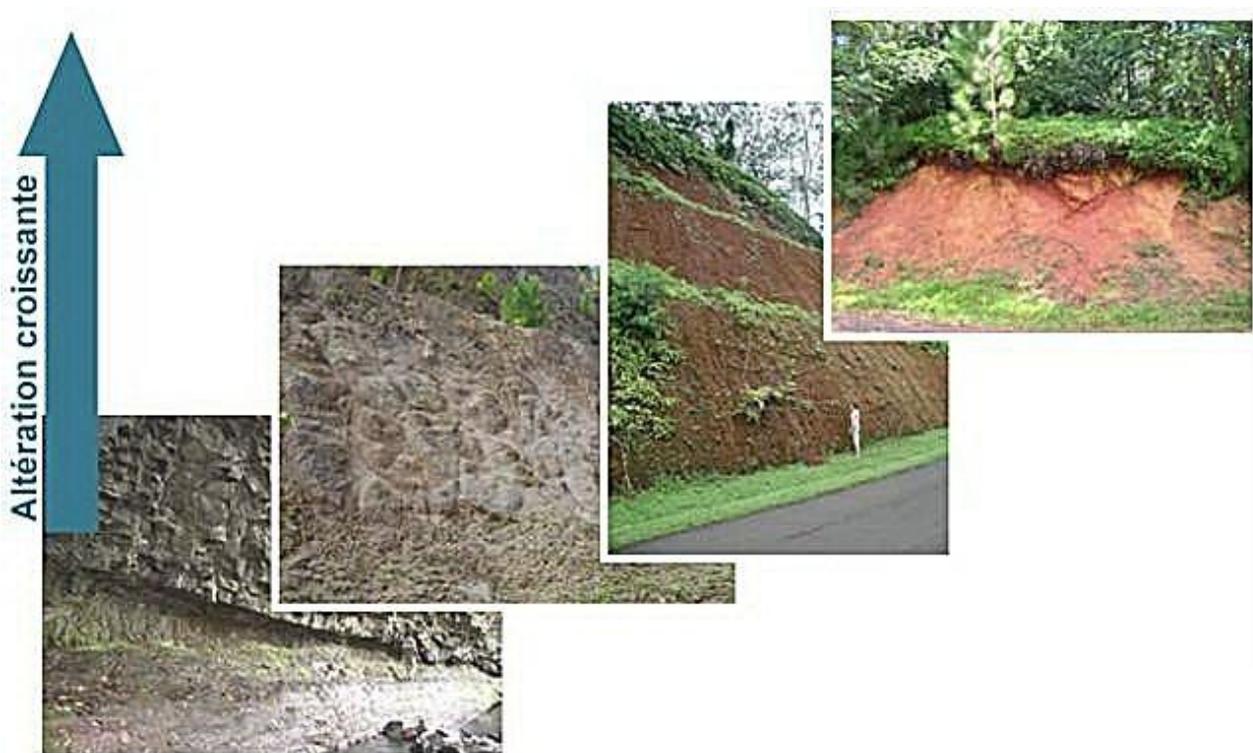


Illustration 18 – Exemple d'évolution des faciès d'altération

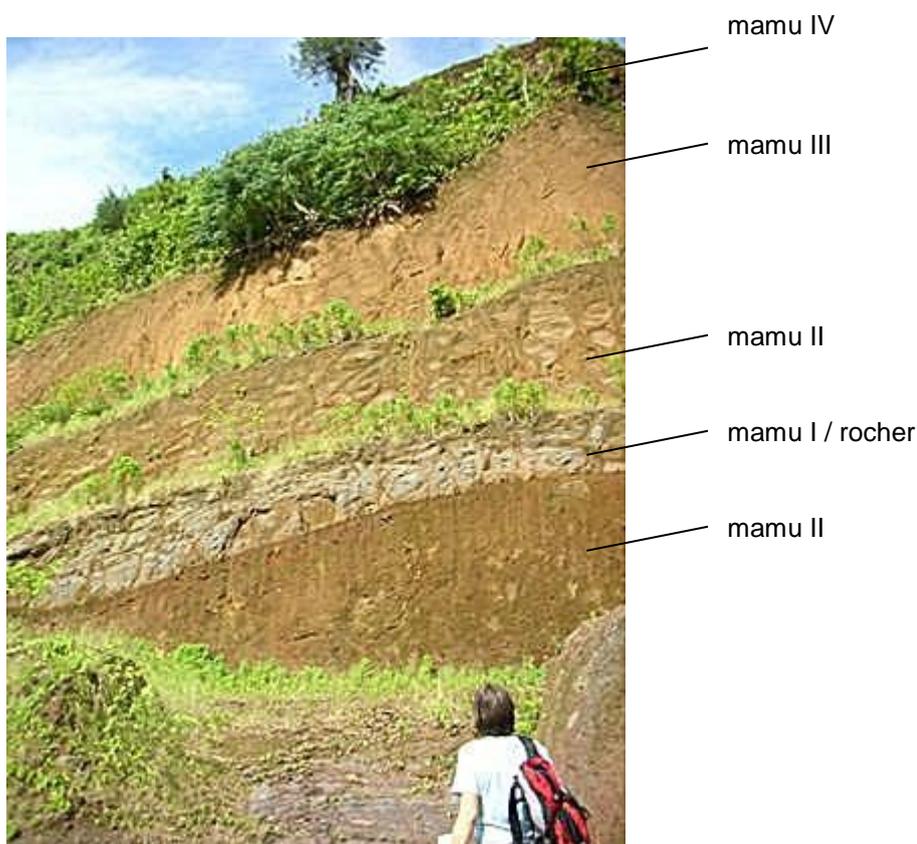


Illustration 19 – Exemple de front d'altération différencié

4.3. PROPOSITION DE REGROUPEMENT

Bien que les mamu III et IV puissent se distinguer visuellement à l'affleurement, essentiellement par la proportion de reliquats de roche mère, le plus souvent sous forme de boules, les investigations menées dans le cadre du programme ARAI ont démontré que sur un plan géotechnique cette différenciation est très délicate et surtout non pertinente. En effet, il convient plutôt de regrouper le mamu III et le Mamu IV dans une formation intitulée "mamu III & IV", au sein de laquelle seront distingués un faciès médiocre et un faciès ferme.

De même, après analyse préliminaire des données disponibles, il s'avère que la différenciation géomécanique entre le mamu I et le mamu II, se révèle délicate, et surtout non pertinente. En effet, outre que ces deux stades d'altération, le plus souvent étroitement mêlés, se distinguent principalement par la couleur, ces niveaux se caractérisent par un comportement pseudo rocheux, c'est-à-dire généralement par une très bonne tenue aux terrassements, sauf lorsque des boules de roche au sein de la gangue d'altération ou des dièdres subverticaux sont libérés en paroi. Pour cette raison, il ne nous a pas paru essentiel de différencier ces deux niveaux d'altération qui seront donc regroupés dans un horizon intitulé "mamu I & II".

5. Mamu III & IV

5.1. DESCRIPTION DE LA LITHOLOGIQUE ET DE LA STRUCTURE

5.1.1. Lithologie

a) *Mamu III*

Ce faciès d'altération présente plus de 50 % de volume initial décomposé ou désintégré en sol. La structure et la texture originelle de la roche restent localement apparentes. Même si ces niveaux présentent le plus souvent une couleur ocre – orangée, des niveaux gris, bruns voire rougeâtres peuvent localement apparaître. Du matériel rocheux grisâtre, brun ou légèrement décoloré est conservé sous forme de rognons à maille lâche.

Si l'on se réfère à la classification établie par l'ISRM (International Society for Rocks Mechanics)⁽¹⁾, le mamu III correspond au niveau d'altération IV (roche fortement altérée) – (échelle allant de I à VI). Pour l'AFTES (Association Française des Travaux En Souterrain), ce type de faciès est associé à la catégorie AM4 (roche très altérée) - (échelle allant de 1 à 6).

b) *Mamu IV :*

Ce faciès d'altération correspond à un matériau rocheux entièrement décomposé et/ou désintégré en sol, la structure et la texture originelle de la roche ayant disparu ou étant difficilement identifiables. Des petits blocs de roche résiduelle (blocs de dimension décimétrique) peuvent localement être présents dans la matrice, mais avec une maille très lâche.

Le mamu IV est généralement de couleur brune, ocre ou rougeâtre.

Selon la classification établie par l'ISRM (International Society for Rocks Mechanics)⁽²⁾, le mamu IV correspond au niveau d'altération V (roche complètement altérée) – (échelle allant de I à VI). Pour l'AFTES (Association Française des Travaux En Souterrain), ce type de faciès est associé à la catégorie AM5 (roche complètement altérée) - (échelle allant de 1 à 6).

¹ "Suggested methods for the quantitative description of rock masses" – ISRM – Oct. 77

5.1.2. Structure

Le mamu IV se trouve fréquemment en surface sous la couche de terre végétale ou sous les plaquages colluviaux. Le mamu III peut être très proche de la surface, ou directement en surface. On le retrouve fréquemment à l'affleurement au droit des fronts de planèze ou en découverte dans les terrassements.

Le contact mamu III – mamu IV est fréquemment irrégulier, des indentations successives à période plurimétriques étant visibles. Cette structure "en vagues" est probablement rattachée à des circulations d'eau privilégiées dans des fissures ouvertes de la roche originelle favorisant localement l'approfondissement du front d'altération.

Les épaisseurs de mamu III-IV sont éminemment variables, une puissance excédent 20 m n'étant pas rare.

On notera que du mamu III ancien peut se retrouver dans les séquences d'altérites recouvertes par des laves plus fraîches (le front de "cuisson" se distinguant nettement).

Latéralement, les transitions brutales avec de la roche mère (présence d'une intrusion, ou coulée de remplissage de paléo vallon), ou avec du mamu I-II, ne sont pas rares.



Illustration 20 – Exemple de variations verticales et latérales de faciès mamutisés et de roche mère

La fissuration dans le mamu III, héritée de la roche originelle, est très rarement visible. Dans le cas du mamu IV franc, les discontinuités, héritées de la roche originelle, ne sont plus du tout discernables.

5.2. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE

5.2.1. Examen visuel de la stabilité de talus

Les talus raides dans le mamu III-IV restent fréquents. Par exemple, une tranchée de 4,5 m de profondeur, creusée à Afaahiti sur Tahiti Iti au niveau du site détaillé A, ne montre aucun signe d'instabilité pour des pentes de talus variant entre 70° et 80°.

Cependant, pour des hauteurs plus importantes de talus ou de versant très redressés ($H > 6$ à 8 m, pente $> 50^\circ$), des traces d'arrachement, anciennes ou récentes, sont fréquemment visibles. On notera, toutefois, que pour l'essentiel ces instabilités sont relativement superficielles et n'intéressent que les premiers mètres du matériau. Les instabilités en masse restent assez rares dans les versants mamutisés et sont le plus souvent localisées en tête des grands versants ($H > 50$ m) très redressés. Pour ces cas, on notera que l'entaille laissée est de l'ordre de la dizaine de mètres.

L'île de Raiatea se singularise par la présence de glissements relativement importants (plusieurs milliers de m³) parfois situés dans les plaines à pente modérée (environ 10°) très humides. De même, sur l'île de Huahine, on constate la présence de plusieurs glissements importants dans le mamu au droit d'anciennes intrusions de trachytes. La nature minéralogique du mamu ainsi que l'action d'altération des complexes de fluides s'étend mis en place pendant l'intrusion trachytique sont probablement des facteurs importants de prédisposition au glissement.

D'une manière générale, le mamu III-IV se désagrège modérément à la main, et un coup ferme de marteau pointu laisse une empreinte profonde (plusieurs centimètres). Toutefois, localement, principalement en surface, du matériau totalement meuble peut apparaître. Dans ce cas, le terrain se désagrège à la main sans trop de difficulté et un coup de marteau pointu dans un talus entraîne un petit éboulement de quelques litres de sol.

Hormis ce dernier cas particulier, le mamu III-IV, lorsqu'il est en place conserve une cohésion significative liée à l'héritage de la roche mère, mais cette cimentation disparaît totalement lors de sa remobilisation en terrassement.

5.2.2. Évaluation de caractéristiques mécaniques moyennes par rétrocalage

a) Préambule :

Cette analyse repose d'une part sur l'exploitation détaillée des investigations pratiquées sur chaque site ayant permis de dresser une coupe géologique représentative (cf. rapport BRGM RP-54834-FR – Analyse des sites détaillés), et d'autre part sur l'utilisation des premiers résultats de la synthèse géotechnique (cf. chapitres suivants) permettant de définir une fourchette de valeurs cohérentes avec la réalité du matériau. On notera que dès ce stade de l'étude le mamu III-IV a été

différencié en 2 faciès géomécaniques distincts : le mamu "médiocre" et le mamu "ferme". Cette distinction est présentée dans le détail dans les chapitres qui suivent.

Nous avons examiné plusieurs sites où des instabilités connues ont été reproduites et d'autres où des versants de configuration classique ne présentent manifestement pas de trace de glissement.

La principale difficulté a été de positionner une éventuelle nappe souterraine en conditions "nappe haute" dans la mesure où les investigations réalisées en saison humide n'ont pas aisément permis de reconnaître de nappe en forage ou en versant. Pour cette raison, nous avons pour la plupart des cas délibérément choisi de placer une nappe à environ 10 m sous la surface de la planèze avec un drainage important au niveau des fronts très redressés. Pour d'autres cas, où plusieurs indices indiquaient une présence d'eau proche de la surface, cette hypothèse a été reconduite dans nos modèles.

Les calculs ont été menés à partir de profil 2D à l'aide du logiciel Talren 97, en prenant la méthode de Bishop.

Après avoir procédé à plusieurs ajustements, les caractéristiques suivantes ont été choisies, le détail de l'analyse étant présenté dans les paragraphes suivants :

- *mamu médiocre* :
 - $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 - $c' = 20 \text{ kPa}$; $\phi' = 35^\circ$
- *mamu ferme* :
 - $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 - $c' = 35 \text{ kPa}$; $\phi' = 35^\circ$

On soulignera que ces valeurs sont nettement supérieures à celles usuellement proposées par le LTPP pour le mamu III-IV ($c' = 3 \text{ kPa}$; $\phi' = 30^\circ$). Cependant, il convient de préciser que ces dernières valeurs ont été définies de façon très conservatrice en négligeant totalement l'existence d'une éventuelle nappe.

b) Site A :

Le profil 3 (cf. repérage en annexe 1) a pour intérêt d'être représentatif de nombreux fronts de planèze. Avec environ 50 m de hauteur, pour l'essentiel dans le mamu III-IV, ce versant est très redressé (environ 70°). Il présente des manifestations d'anciens glissements plutôt superficiels.

L'illustration 21 montre qu'en l'absence de nappe, et avec les hypothèses retenues, le front de planèze mamutisé ne présente pas une stabilité très importante ($F = 1,07$).

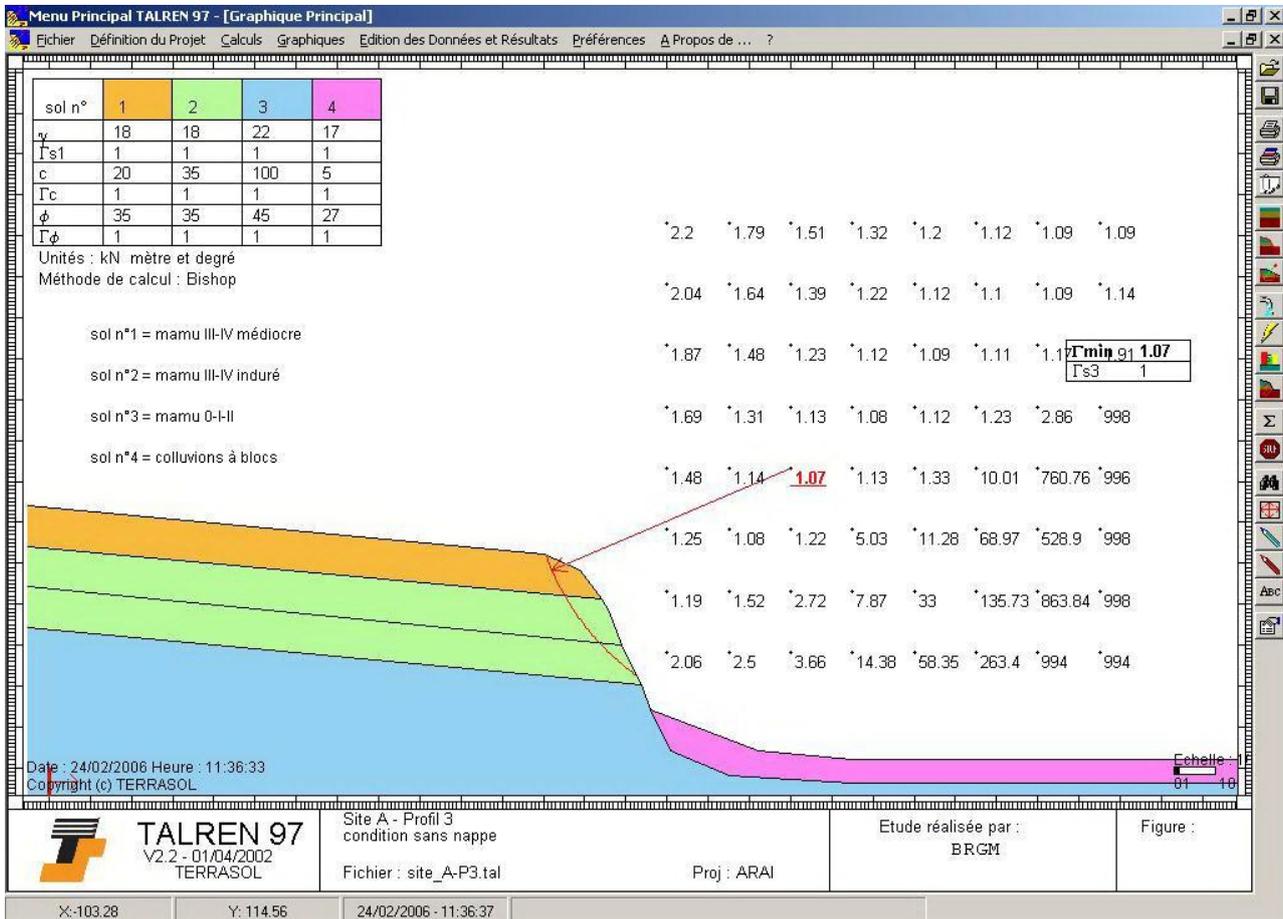


Illustration 21 – Site A – Profil 3 – Sans nappe

L'illustration 30 présente le même profil avec présence d'une nappe. On constate dans ce cas que le facteur de sécurité est légèrement inférieur à $F = 1$, sans pour autant qu'il y ait une baisse très importante de ce coefficient. Cela s'explique par le fait que les cercles potentiels de glissement n'interceptent que relativement peu la nappe. Le calcul met également en évidence le fait que les cercles de glissement restent positionnés en limite de front, les masses potentiellement instables n'entrant pas de plus de 10 ou 20 m dans le versant, ce qui est conforme aux observations faites sur d'autres sites affectés par des instabilités plus importantes que sur le site A.

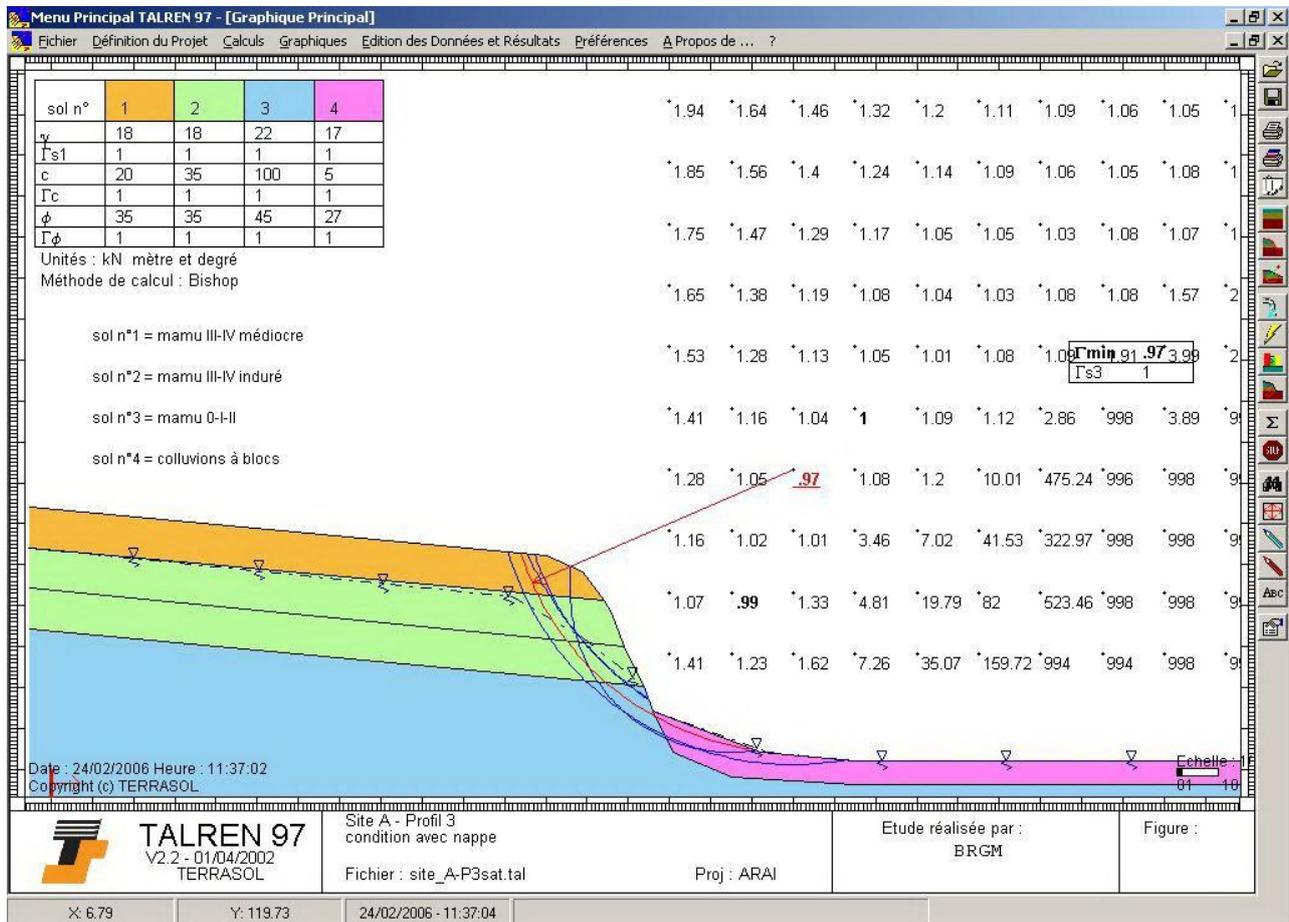


Illustration 22 – Site A – Profil 3 – Avec nappe

L'illustration 23 présente le cas d'une tranchée anthropique de 5 m de hauteur environ (pente ~ 70°) taillée dans le mamu III-IV ferme en limite du site A. On notera que la nappe a été positionnée en surface.

Ce calcul montre une stabilité tout à fait satisfaisante ($F > 1,5$) conforme aux observations sur site.

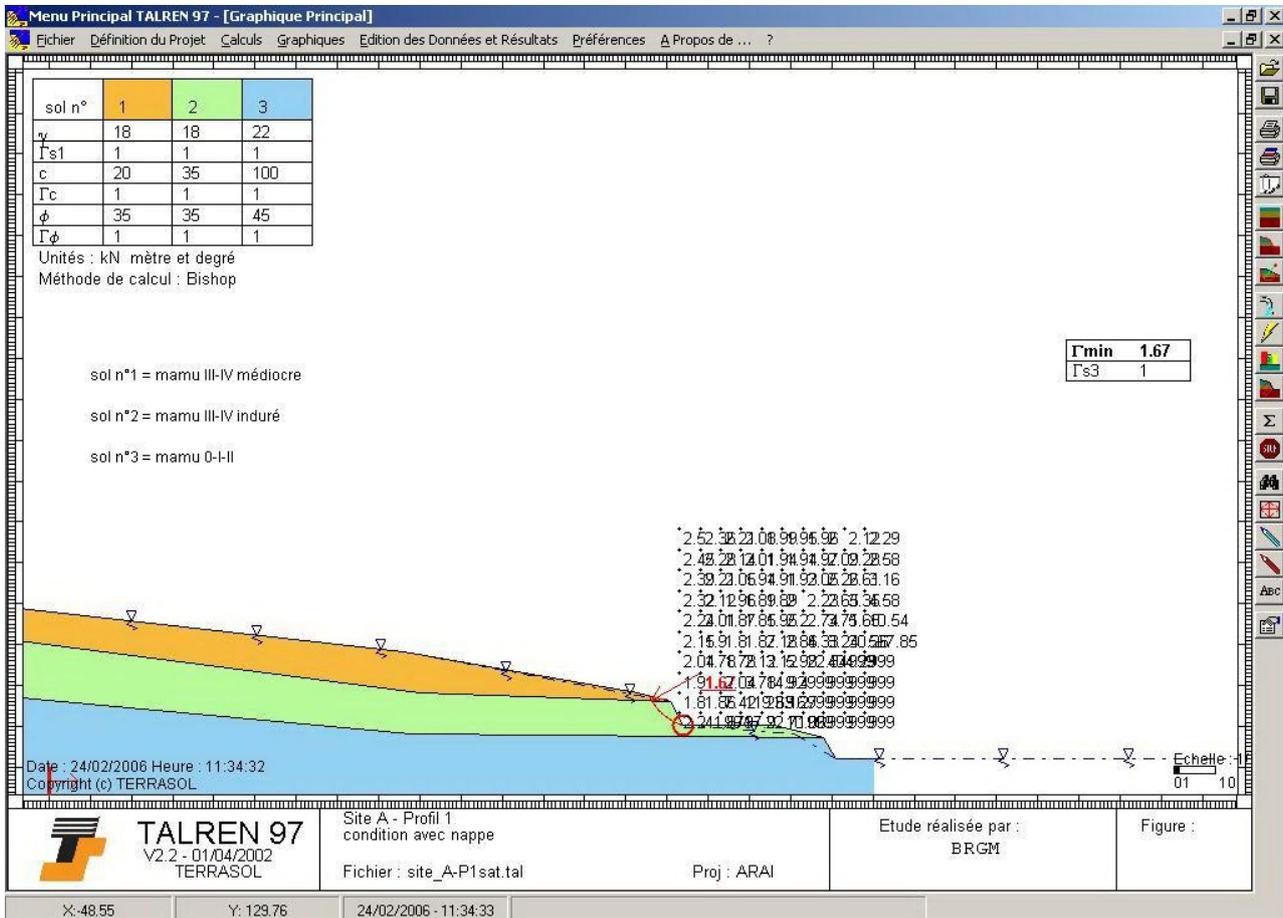


Illustration 23 – Site A – Profil 1 – Avec nappe

c) Site B :

Ce site se caractérise par une présence quasi généralisée de mamu IV médiocre en surface de planèze. Hormis au niveau des ravines secondaires, les pentes de la plazène restent modérées (~ 10°). Aucune trace manifeste d'instabilité n'est visible sur ce site au droit des plateaux.

L'illustration 24 montre que même avec une nappe superficielle (de nombreux indices de venues d'eau sont observables sur les zones de plateau), le facteur de sécurité reste tout à fait satisfaisant ($F > 1,5$) et conforme à l'absence constatée de glissement.

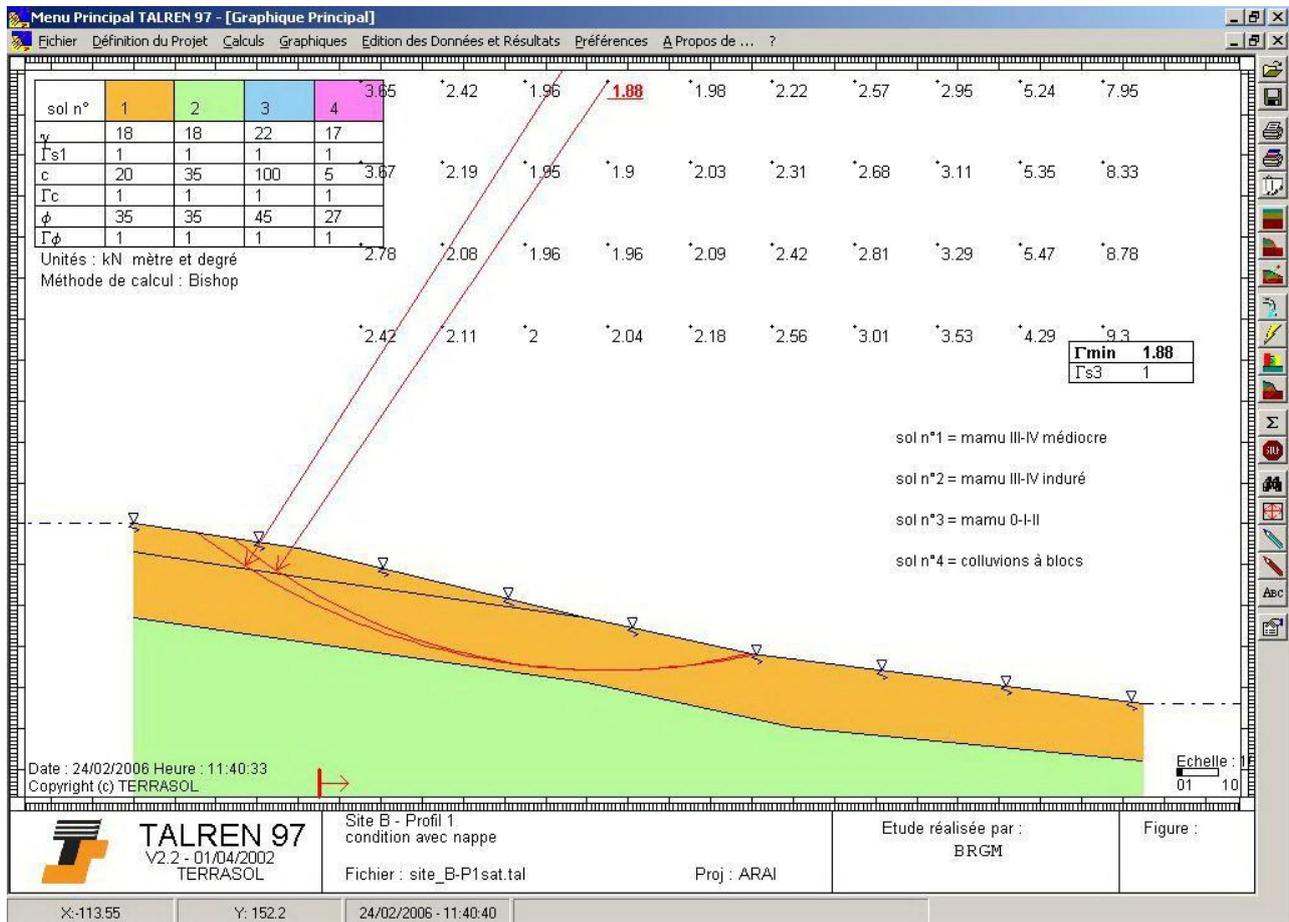


Illustration 24 – Site B – Profil 1 – Avec nappe

d) Site F :

Ce site ne présente que peu d'indices de glissement sur les grandes planètes qui le composent, hormis au droit des poches de colluvions que l'on retrouve au niveau des entailles du relief. Concernant le mamu, se sont d'abord de petits écaillages (quelques m³) qui sont observés au niveau des talus les plus raides.

L'illustration 25 met en évidence qu'avec une nappe relativement haute (à une dizaine de mètre de profondeur au niveau des bords de planète, et en surface en fond de talweg), le facteur de sécurité associé aux cercles recoupant le mamu III-IV est relativement important (F = 1,23). Cependant, avec les hypothèses géomécaniques retenues, on notera que pour des terrassements à 3H/2V (~ 35°) dans de grands talus (H > 10 m), il reste inférieur à la valeur minimale réglementaire admise (F = 1,5).

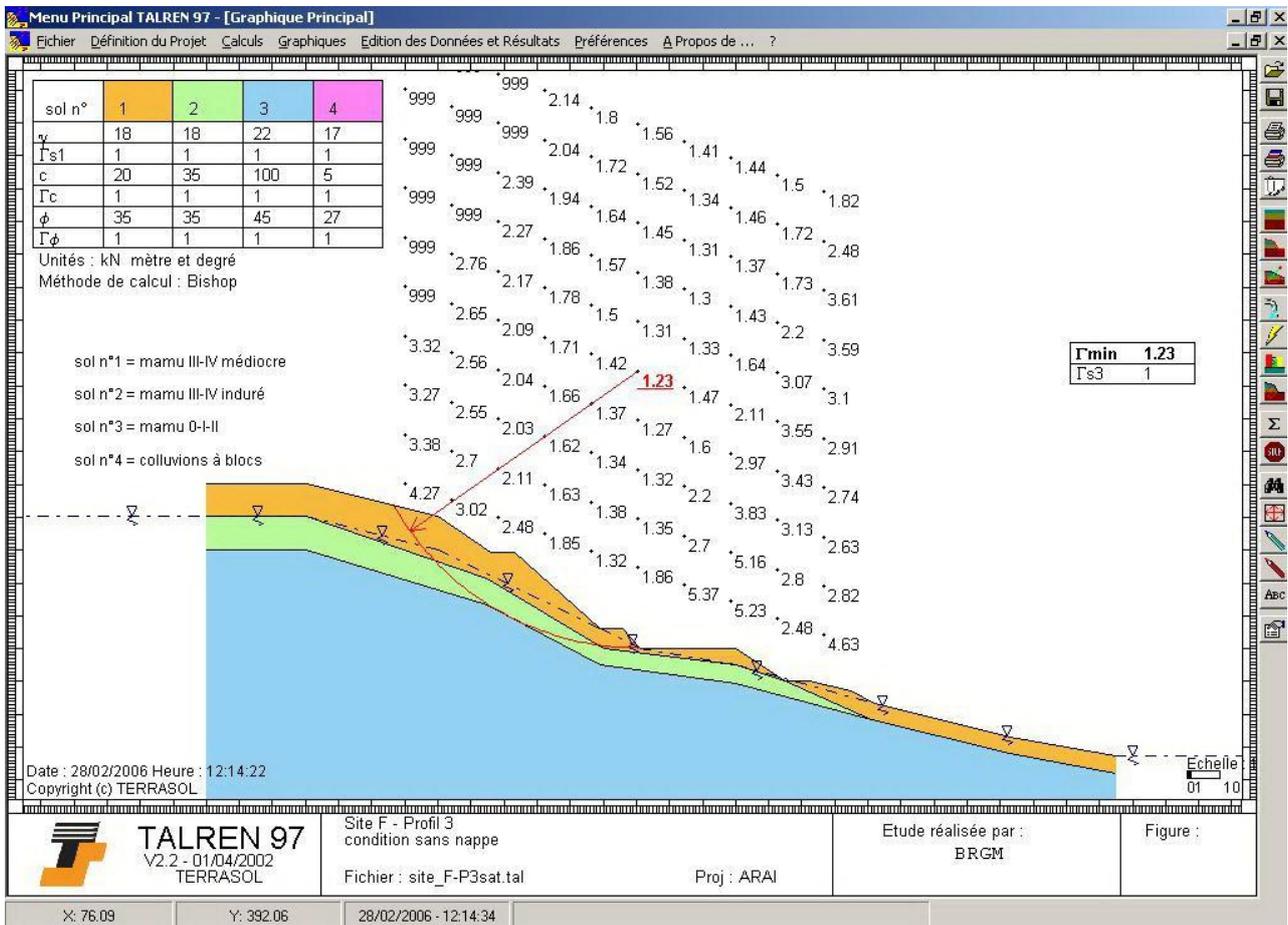


Illustration 25 – Site F – Profil 3 – Avec nappe

e) Site U :

Il convient d'abord de souligner que ce site est situé sur Raïatea, île haute de l'archipel de la Société plus ancienne que Tahiti (écart d'âge de plus de 1 Ma). Les régimes volcaniques y sont variés (basaltes, phonolites, trachytes). Le Site U est localisé dans une zone basaltique. Des altérations en masse très importantes y sont visibles. De plus, le site U se singularise par la présence d'un important glissement (plusieurs milliers de m³) dans une plaine humide à pente modérée.

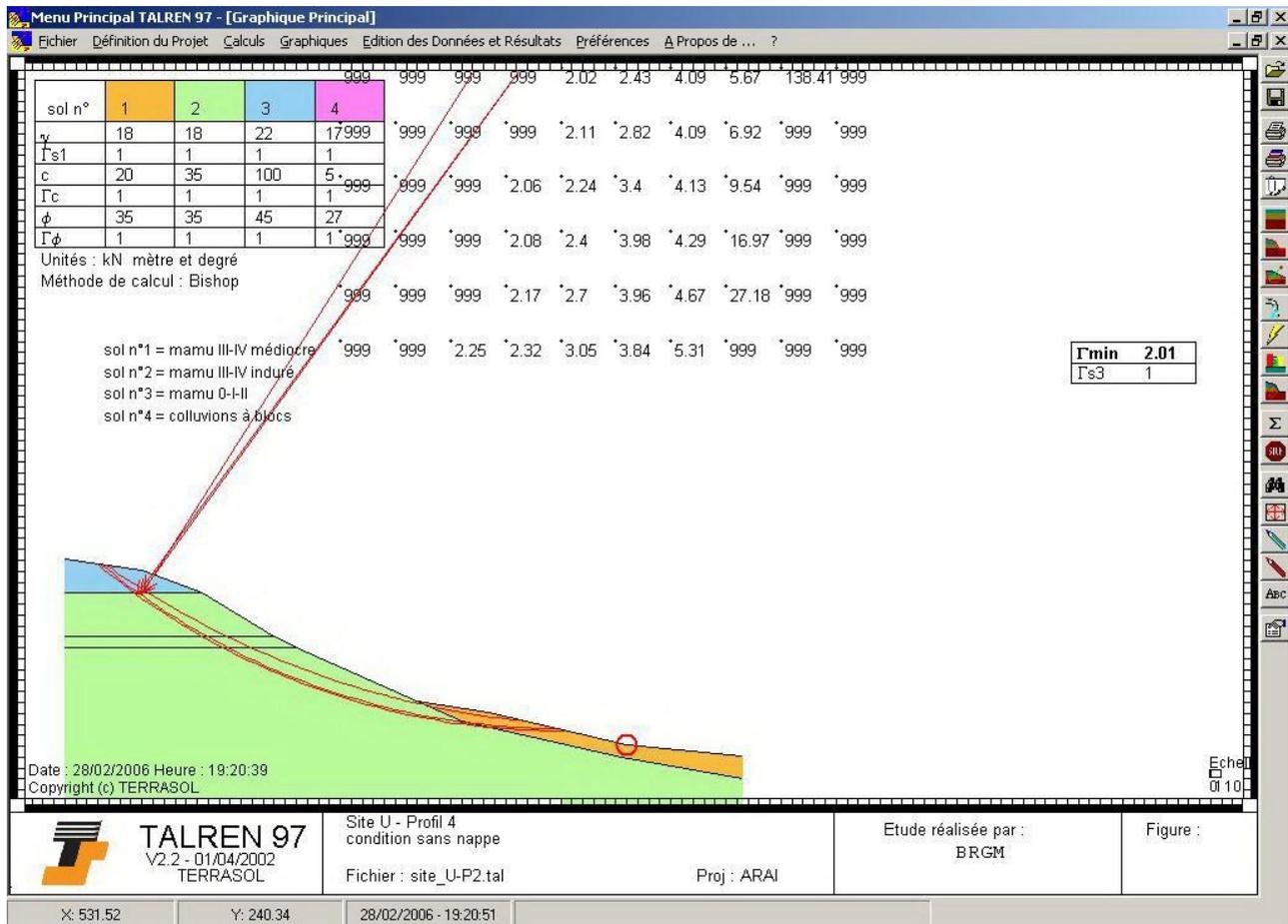


Illustration 26 – Site U – Profil 2 – Sans nappe

L'illustration 26 présente un profil de stabilité sans eau au droit d'une colline de 150 m d'altérites III-IV surmontée par des niveaux plus rocheux. Les pentes sont de l'ordre de 25° à 35°. Ce calcul montre qu'en l'absence d'eau le versant est très stable avec un facteur de sécurité $F \approx 2$.

L'illustration 27 montre qu'avec une nappe peu profonde (de nombreuses venues d'eau en versant sont visibles sur Raïatea) la stabilité devient très critique avec $F \approx 1$. Ceci est en accord avec les observations sur site mettant en évidence une morphologie témoignant de probables anciens glissements et fluages dans la pente.

Cet exemple illustre l'importante sensibilité du mamu III-IV au développement de pressions interstitielle liées à la remontée d'une nappe.

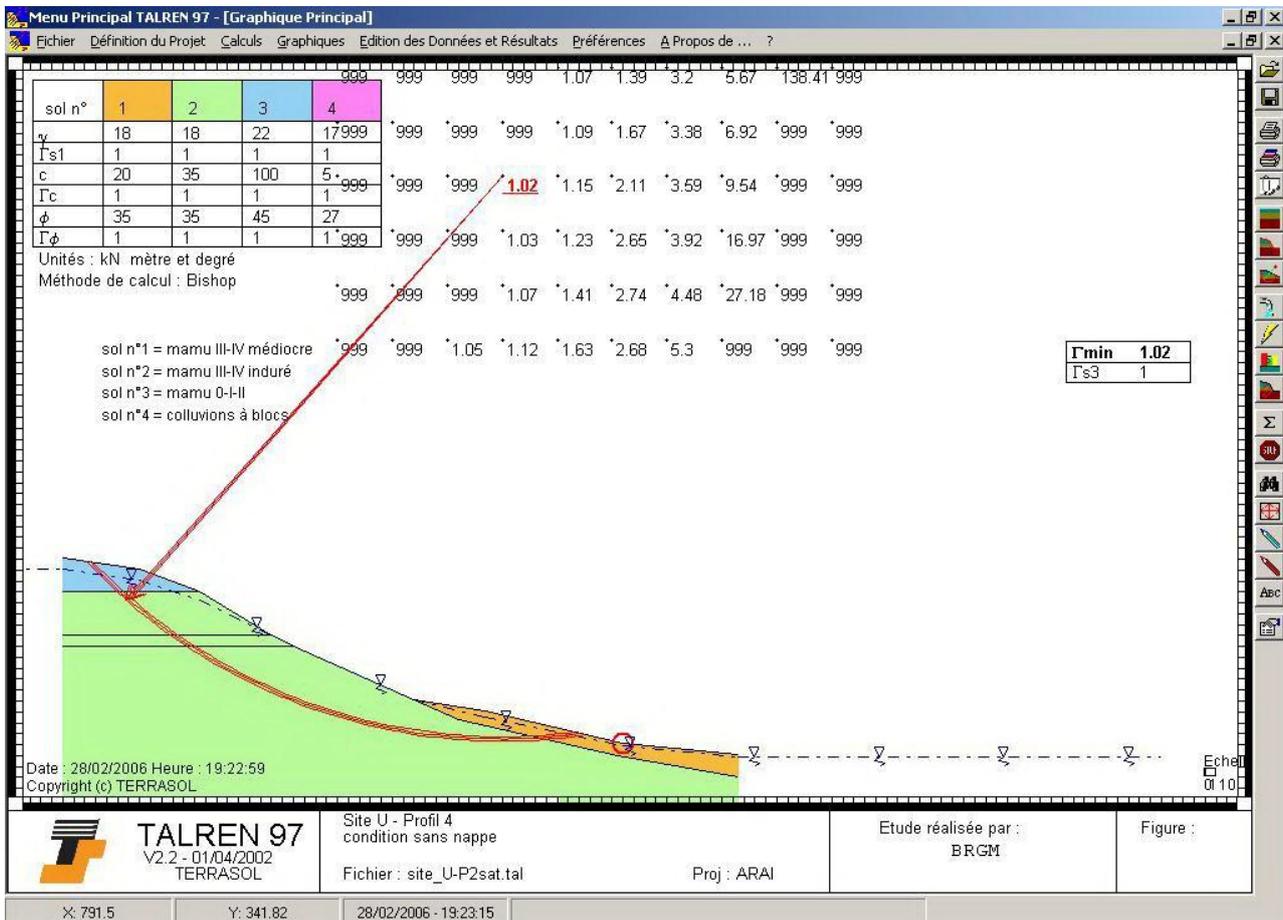


Illustration 27 – Site U – Profil 2 – Avec nappe

L'illustration 28 présente le rétrocalage réalisé sur le glissement majeur en plaine au niveau du site U. Ainsi, Pour obtenir une condition d'instabilité ($F < 1$), il a été nécessaire d'adopter des caractéristiques géomécaniques dans le mamu III-IV médiocre nettement plus mauvaise que dans les autres cas :

- $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
- $c' = 0 \text{ kPa}$; $\phi' = 23^\circ$

On retrouve là des valeurs plus proches de silts ou d'argiles sédimentaires peu consolidés.

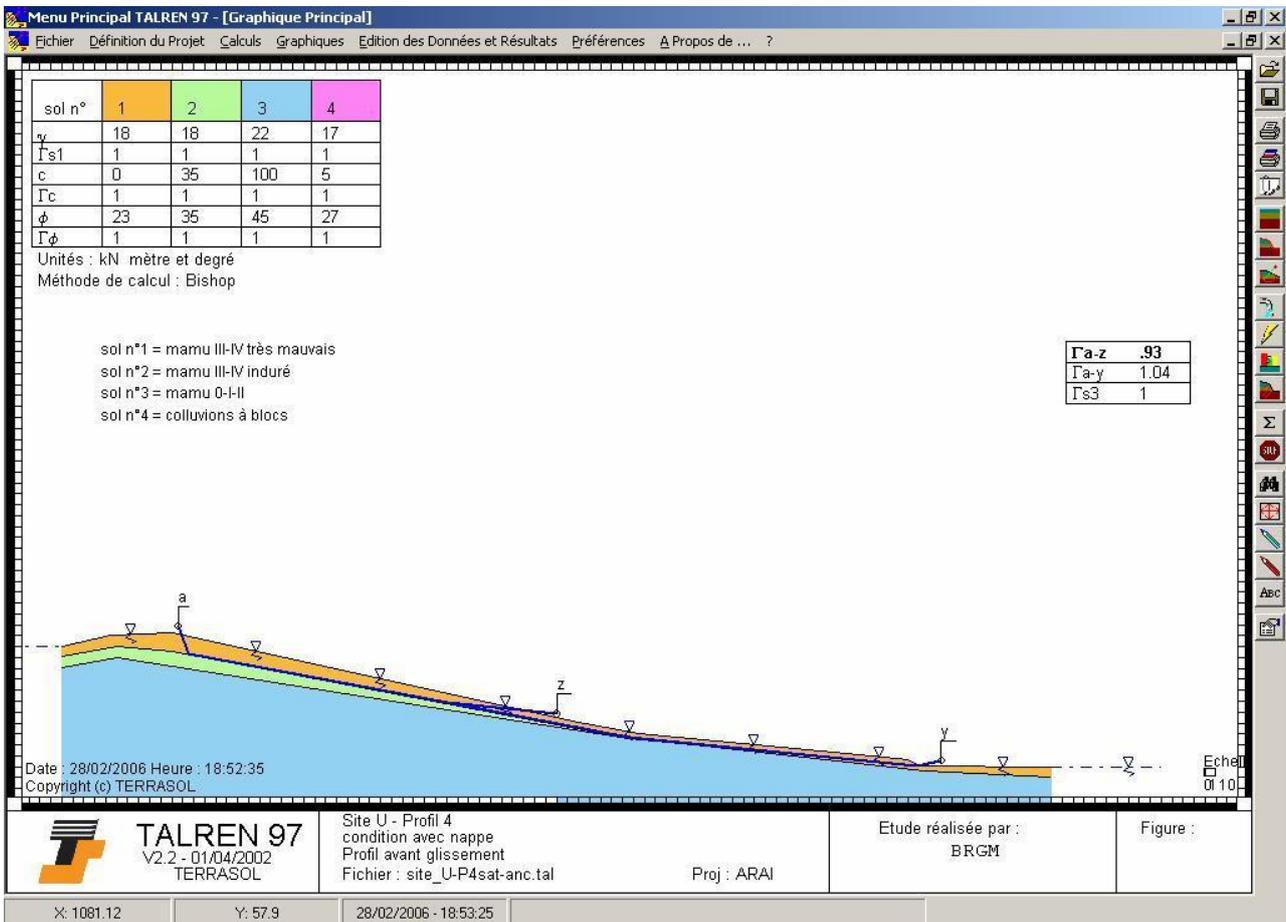


Illustration 28 – Site U – Profil 4 – Avec nappe

L'illustration 29 montre qu'en l'absence de nappe cette zone devient parfaitement stable ($F > 2$), ce qui s'explique du fait que pour ce matériau singulier des plaines humides de Raiatea seule la part de résistance au cisaillement par frottement est mobilisable.

Il est probable que ces zones très humides confèrent un contexte propice à une dégradation accélérée du mamu.

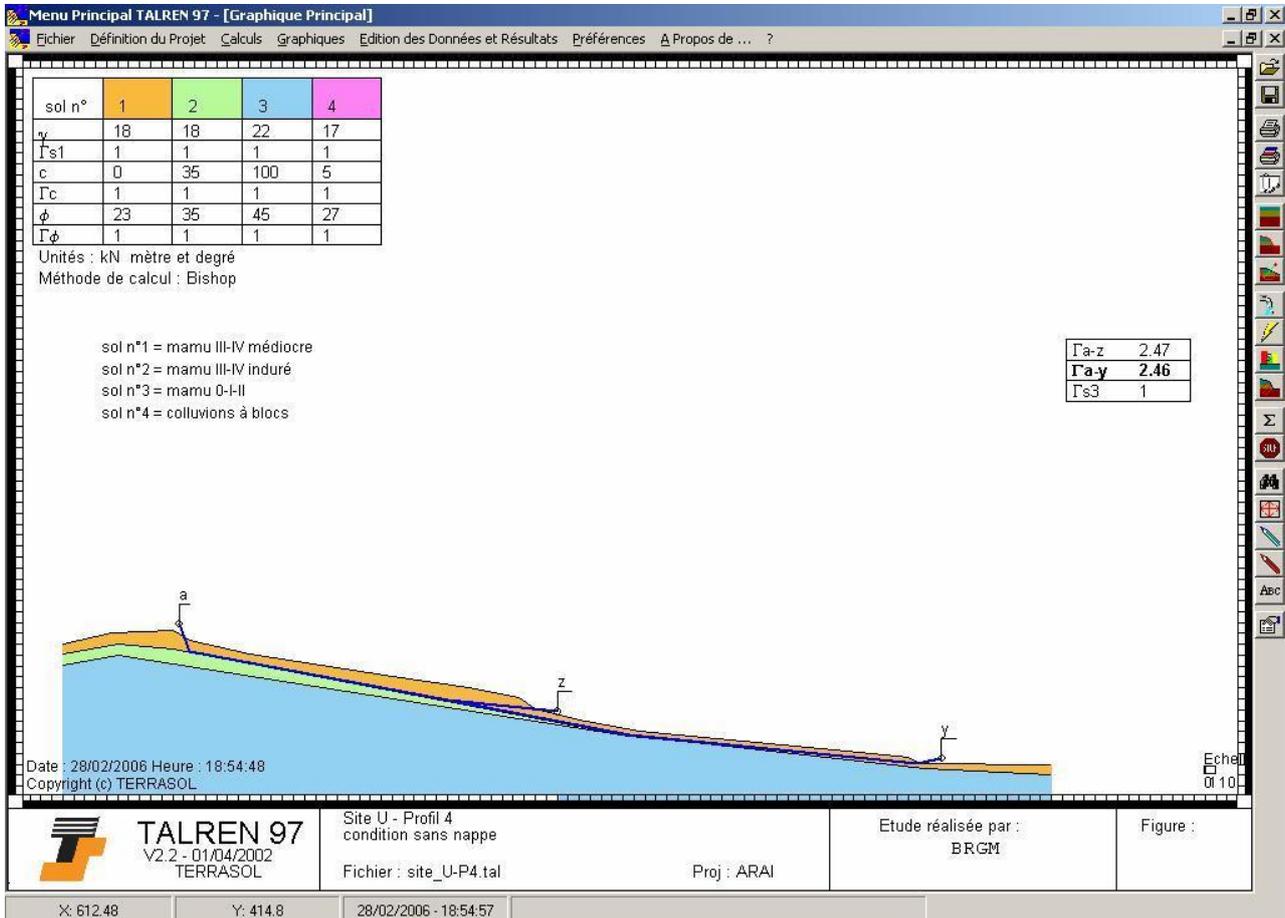


Illustration 29 – Site U – Profil 4 – Sans nappe

5.2.3. Essais géotechniques

a) Essais

On notera que sur le site AB de Huahine, les échantillons de sols sont été prélevés dans des colluvions. Ces résultats de laboratoire ne sont pas présentés ici.

Le détail des essais est présenté dans les annexes du présent rapport.

- Identification :

i) *Granulométries et sédimentométries*

Le Tableau 8, ainsi que l'illustration 30 et l'illustration 31 présentent les caractéristiques granulométriques mesurées sur divers échantillons. Si l'on fait abstraction des résultats obtenus à Raiatea (excepté dans la fouille pm2), le mamu est relativement homogène. Il s'agit d'un silt (appelé également "limon") contenant généralement entre 50 et 65 % de fines et entre 10 à 15 % de particules argileuses. On remarquera en forage, une tendance à présenter des matériaux plus fins à proximité de la surface.

Site détaillé	Passant à 80 µm			Passant à 1,9 µm		
	mini	maxi	moyenne	mini	maxi	moyenne
Site A	22%	80%	52%	4%	12%	9%
Site B			65%	7%	13%	10%
Site F	60%	67%	63%	11%	14%	13%
Site U (hors pm2)	81%	97%	90%	28%	49%	42%
Site U (pm2)	46%	65%	54%	16%	16%	16%

Tableau 8 - Caractéristiques granulométriques dans le mamu III-IV

On notera que sur le site de Raiatea (site détaillé U), on rencontre des matériaux plus fin avec environ 90 % de fines et en moyenne 40 % de fraction argileuse. Bien que d'après la carte géologique, la géologie du site U corresponde, comme sur les sites étudiés sur Tahiti, à des altérites issues du démantèlement de complexes basaltiques, il est probable que cette différence de granulométrie des altérites, soit essentiellement associée à l'âge des complexes basaltiques qui est plus ancien sur Raiatea (en moyenne 2,5 millions d'années) que sur Tahiti (bouclier primitif entre 0,87 et 1,37 Ma – bouclier secondaire vers 0,85 Ma) – la différence d'âge de formation étant de plus de 1 million d'année. En conséquence, les altérites de Raiatea seraient plus évoluées, et donc plus argileuses, que celles de Tahiti.

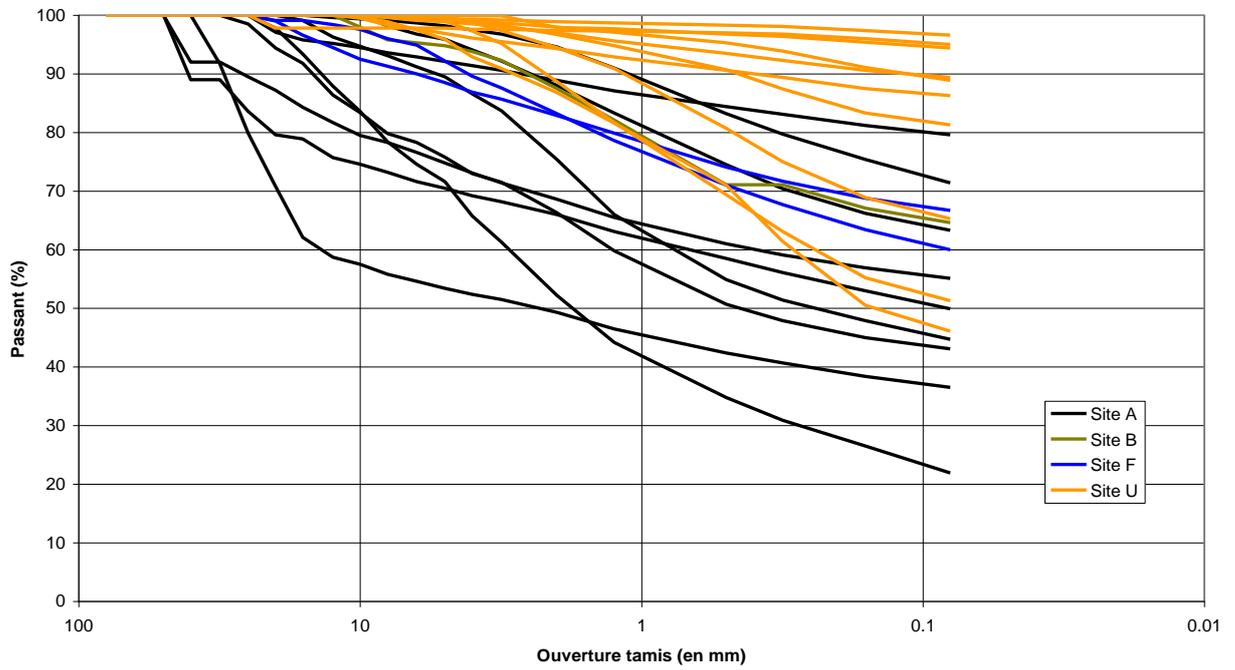


Illustration 30 – Courbes granulométriques dans le mamu III-IV

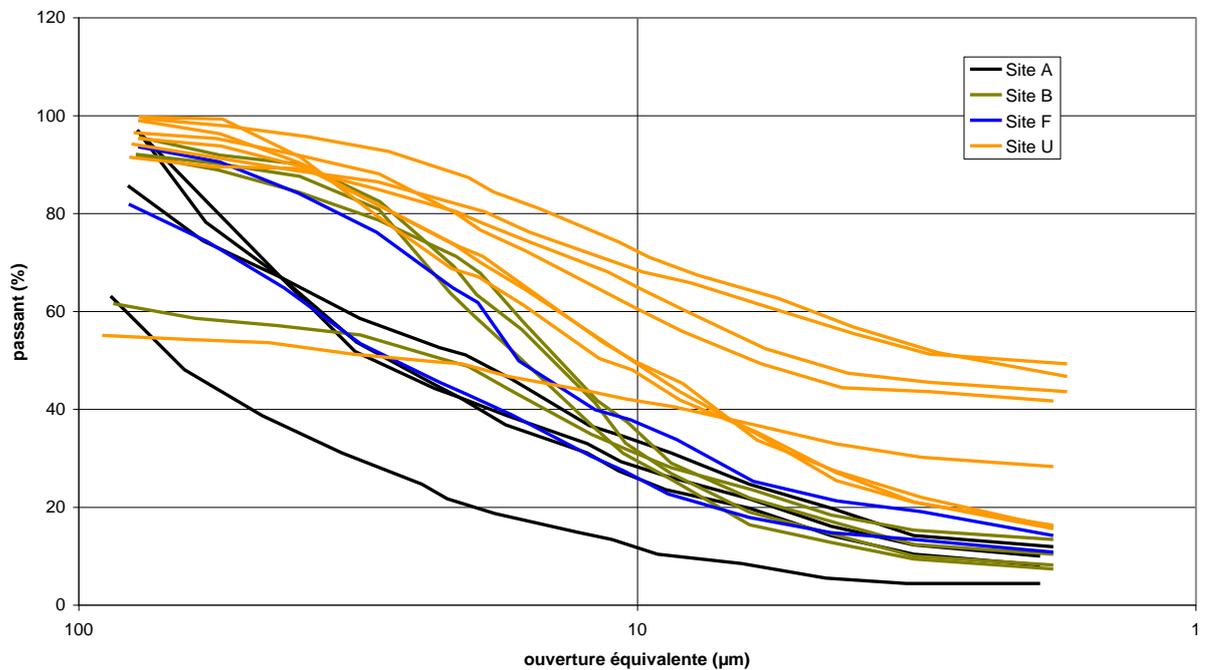


Illustration 31 – Courbes sédimentométriques dans le mamu III-IV

ii) *Limites d'Atterberg*

En termes de caractéristiques de plasticité, le Tableau 9 présente les résultats synthétiques des investigations. On remarque que les altérites du site A à Afaahiti se singularisent légèrement des matériaux des autres sites par une plasticité plus faible (limons faiblement plastiques sur un diagramme de Casagrande). Les autres matériaux sont assez homogènes (limon très plastiques sur un diagramme de Casagrande), les échantillons du site détaillé U étant les plus plastiques (ce qui est en plutôt accord avec les autres mesures faites sur les matériaux du site).

Site détaillé	Limite de liquidité - WL (%)			Indice de plasticité - IP (%)		
	mini	maxi	moyenne	mini	maxi	moyenne
Site A	35.9	48.2	40.9	3.5	8.4	6.2
Site B			62.1			18.8
Site F	49.5	70.8	60.2	12.0	13.2	12.6
Site U (hors pm2)	69.9	82.8	76.2	8.1	27.6	12.6
Site U (pm2)			71.0			12.6

Tableau 9 – Caractéristiques de plasticité dans le mamu III-IV

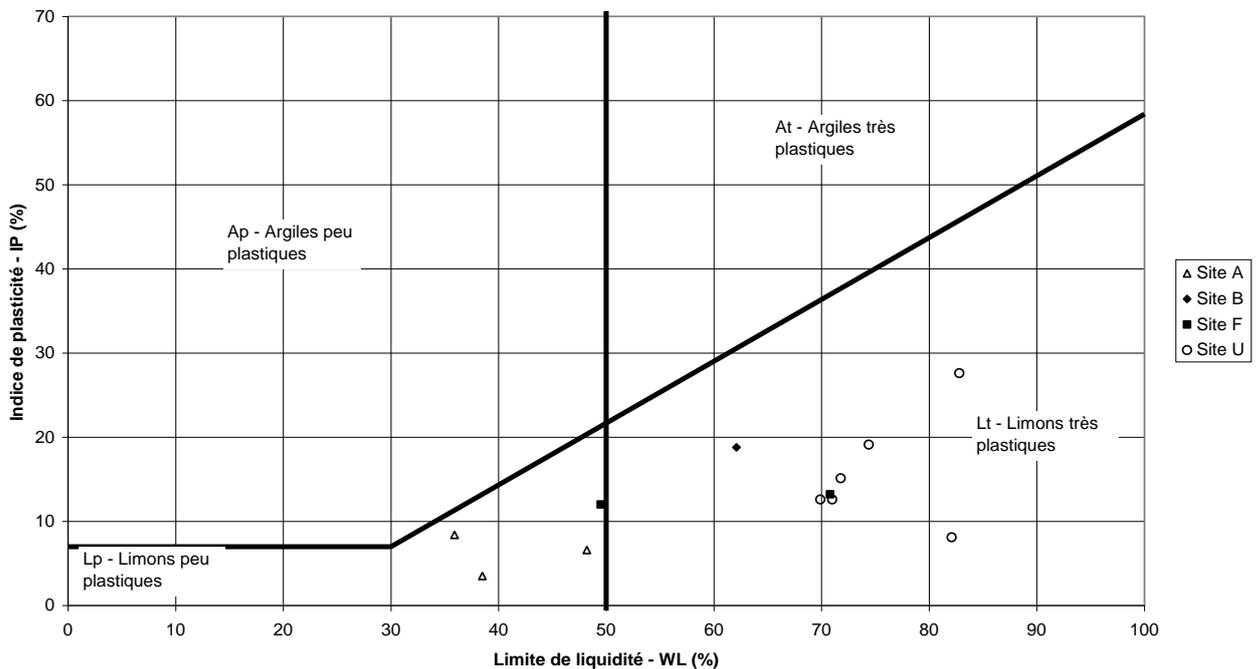


Illustration 32 – Courbes sédimentométriques dans le mamu III-IV

iii) *Teneur en eau*

Le Tableau 10 récapitule les mesures de teneurs en eau (nota : ces mesures ont été faites sur la base d'une campagne de reconnaissance pratiquée en saison des pluies). On observe des différences importantes d'un site à l'autre ou même au sein d'un même site. Il est intéressant de constater plusieurs points :

- les matériaux sont souvent assez proches de la saturation (sauf sur le site B) ;
- ils sont plus humides sur le site U, ce qui est en accord avec les nombreuses venues d'eau constatées sur le terrain ;
- les matériaux présentent des teneurs en eau fréquemment assez proches de la limite de liquidité (sans pour autant que l'on ait affaire à des matériaux mous) ;
- il n'est pas évident de dresser des tendances nettes d'évolution des profils hydriques en fonction de la profondeur (ex : saturation sur les 10 premiers mètres sur carottage du site A et zone non saturée en dessous – pas de tendance sur le carottage du site F, le matériau semblant légèrement sous saturé)

Site détaillé	Teneur en eau (%)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	21.5	55.7	40.5
Site B	27.3	40.7	31.8
Site F	26.6	72.8	52.6
Site U (hors pm2)	46.6	77.5	58.7
Site U (pm2)	58.4	69.6	63.0

Tableau 10 – Caractéristiques de teneur en eau dans le mamu III-IV

Si l'on confronte ces constats au fait que le mamu III-IV présente très généralement une bonne tenue au terrassements, cela conduit à associer la cohésion des altérites à un héritage de la cimentation initiale de la roche mère, et non à un comportement cohésif de matériaux sédimentaires fins de type argiles ou silts. Cela signifie que la cohésion du matériau n'est pas directement liée à sa teneur en eau, ni directement à sa compacité.

De plus, les matériaux, bien que proches de la saturation montrent assez rarement des indices de venues d'eau en talus (hormis sur les sites étudiés à Huahine – site AB, et Raiatea – site U). On est donc en présence d'un matériau relativement peu perméable à forte capacité de rétention d'eau lorsqu'il n'est pas remobilisé.

iv) Valeurs au bleu de méthylène

Le Tableau 11 rappelle les mesures de valeur au bleu obtenues. Elles se révèlent être généralement faibles, y compris sur le site de Raïatea, pourtant plus argileux. Toutefois, il n'existe pas de très forte hétérogénéité.

Site détaillé	Valeur au bleu		
	mini	maxi	moyenne
Site A	0.19	0.91	0.56
Site B	0.07	0.15	0.11
Site F	0.56	1.27	0.92
Site U (hors pm2)	0.26	1.51	0.57
Site U (pm2)			0.83

Tableau 11 – Caractéristiques de valeurs au bleu dans le mamu III-IV

v) Poids volumique

Les résultats de poids volumiques humides sont présentés dans le Tableau 12. Ces valeurs sont étonnamment faibles pour ce type de matériau issu de l'altération de roches volcaniques.

Site détaillé	γ_h (kN/m ³)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	17.4	18.3	17.9
Site F	16.2	17.5	16.8
Site U (hors pm2)	14.8	18.0	16.3
Site U (pm2)	16.5	17.4	17.0

Tableau 12 – Caractéristiques de valeurs de poids volumique humide γ_h dans le mamu III-IV

Par ailleurs, les valeurs calculées de poids volumique de solides sont élevées (cf. Tableau 13), principalement sur le site A où elles dépassent 30 kN/m³ (valeur maximale de 32,8 kN/m³ dans un échantillon du site A). Sur les autres sites, les valeurs moyennes de 28 à 29 kN/m³ sont plus conformes aux mesures usuellement faites sur des altérites basaltiques.

Site détaillé	γ_s (kN/m ³)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	30.3	32.8	31.5
Site F	28.8	30.5	29.6
Site U (hors pm2)			29.4
Site U (pm2)	27.3	29.6	28.1

Tableau 13 – Caractéristiques de valeurs de poids volumique des grains γ_s dans le mamu III-IV

vi) *Limites de retrait*

13 essais ont été pratiqués lors du projet dont 3 sur les colluvions du site AB à Huahine. Sur les 10 tests pratiqués sur le mamu aucun n'a mis en évidence de susceptibilité significative au phénomène de retrait gonflement des argiles. Ce point est important car il écarte certains problèmes liés à ce type de comportement (fissuration pénétrante en cas de sécheresse, hétérogénéité du matériau, fatigue dus aux cycles hydriques).

- Essais de cisaillement en laboratoire :

Les figures qui suivent présentent la répartition, en fonction de la profondeur, des mesures de résistance au cisaillement réalisées sur les échantillons prélevés en forage ou dans les puits à la pelle mécanique (valeurs d'essai au pic).

Ces graphiques mettent en évidence les points suivants :

- *Concernant la cohésion (cf. Illustration 33) :*
 - On observe une tendance assez nette à l'augmentation de la cohésion (drainée ou non drainée) en fonction de la profondeur. Pour une fourchette située généralement entre 0 et 30 kPa sur les 2 premiers mètres en surface, la cohésion atteint des valeurs moyennes entre 10 et 50 kPa vers 10 m de profondeur. Cette tendance est en cohérence avec une évolution progressive classique de la "mamutisation" vers la surface (la cimentation originelle étant plus présente en profondeur lorsque l'on se rapproche de la roche mère). Par ailleurs, les autres essais mécaniques (pénétromètre, pressiomètre, et géophysique) ont confirmé cette tendance.

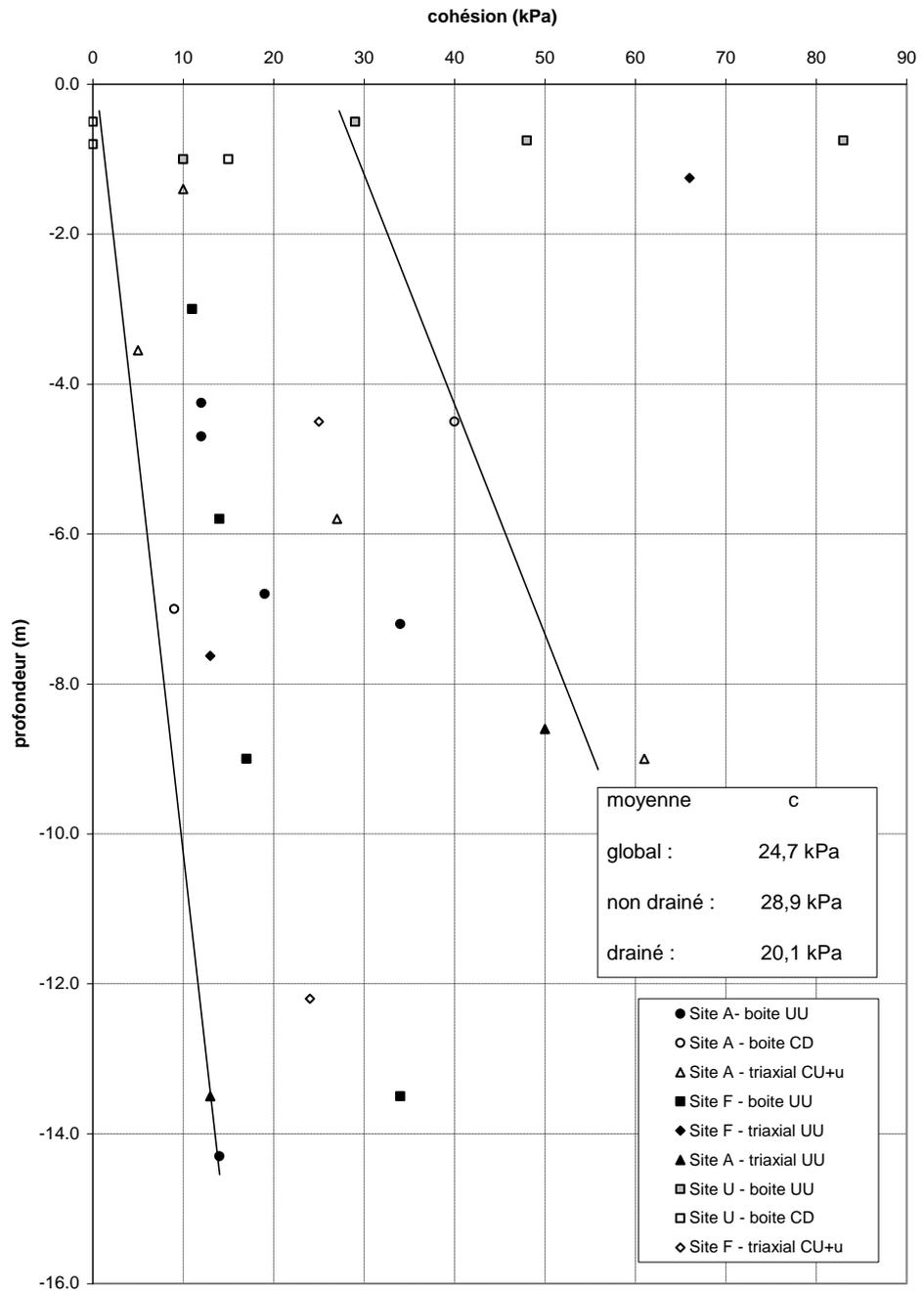


Illustration 33 – Cohésion du mamu III-IV mesurée en laboratoire en fonction de la profondeur des échantillons

- Si l'on distingue, les valeurs en situation non drainées de celles en contexte drainé :
 - c_u varie entre 10 et 83 kPa, la moyenne s'établissant vers 29 kPa ;
 - c' a été mesuré entre 0 et 61 kPa, avec une moyenne à 20 kPa. Toutefois, si l'on retire les valeurs importantes au-delà de 30 kPa, la moyenne chute rapidement à $c' = 13$ kPa.

On constate donc que valeurs non drainées et valeurs drainées restent globalement assez proches, malgré une légère tendance classique de chute de la cohésion en situation non drainée. Cela signifie que la cohésion du mamu III-IV correspond plus à de la cimentation héritée de la dégradation de la roche mère qu'à une résistance classique de sols fins sédimentaires meubles. Ce comportement est très classique dans des altérites.

- *Concernant l'angle de frottement interne (cf. Illustration 34) :*

- Les valeurs s'échelonnent sur un fuseau assez homogène, et l'on note une très légère tendance à la baisse des valeurs en profondeur, cette évolution n'étant toutefois pas significative.
- Si l'on distingue, les valeurs en situation non drainées de celles en contexte drainé :
 - ϕ_u varie entre 19 et 36°, avec une moyenne s'établissant à 25,6° ;
 - ϕ' a été mesuré entre 29 et 45° (la valeur de 9° obtenue sur un échantillon prélevée sur le site U étant considérée comme aberrante), avec une moyenne à 37,4°.

On constate donc un net accroissement des valeurs d'angle de frottement en situation drainée, ce qui est tout à fait classique pour des terrains fins de type limons ou argiles.

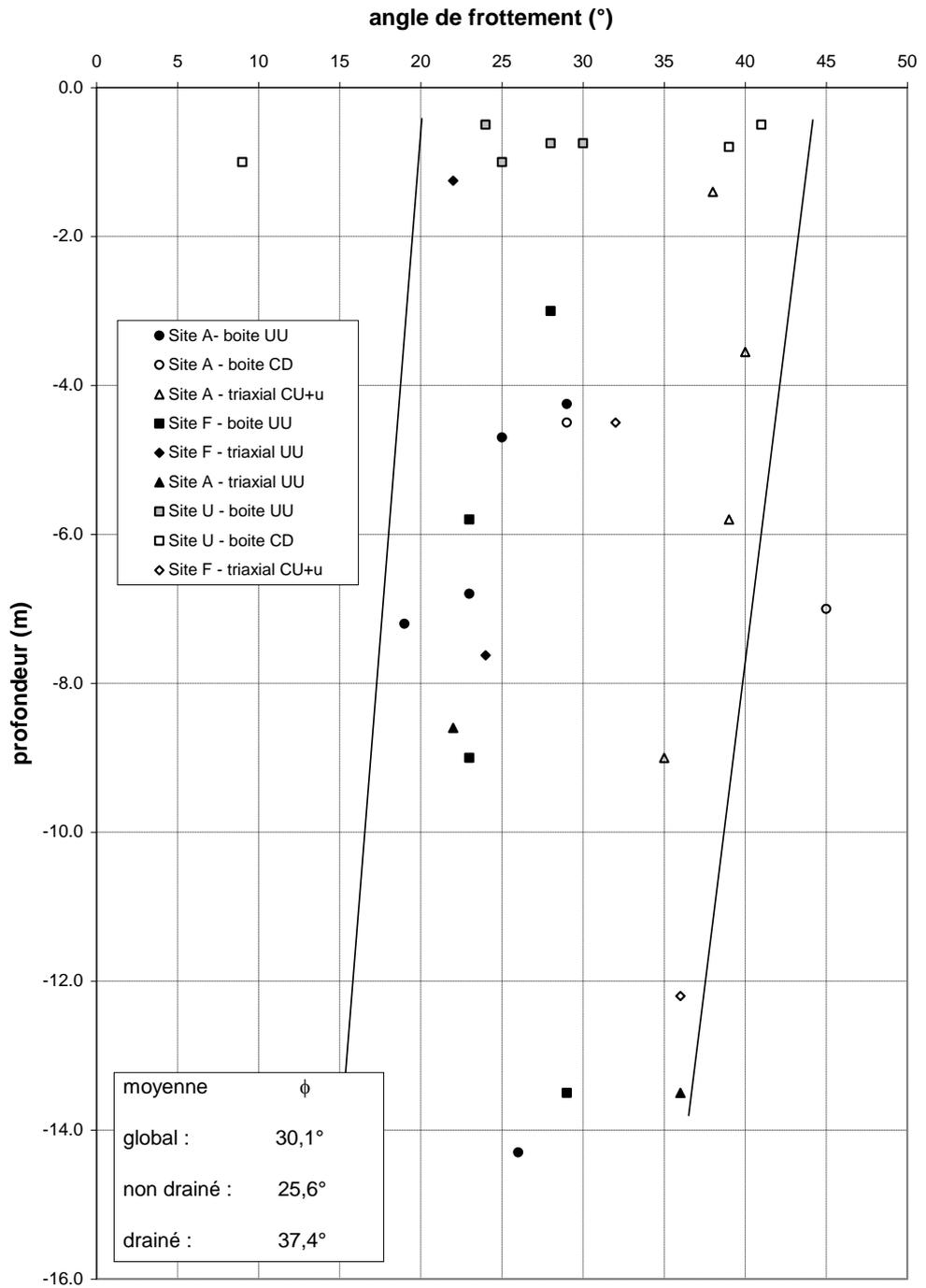


Illustration 34 – Angle de frottement interne du mamu III-IV mesuré en laboratoire en fonction de la profondeur des échantillons

- *Récapitulatifs sur les essais de cisaillement en laboratoire :*

Ces essais confirment que l'on est en présence de matériaux à matrice limoneuse plutôt frottant et légèrement cimentés. Toutefois, ces essais ont mis en évidence une cohésion, y compris en situation drainée, plus importante que celle initialement adoptée classiquement dans les études géotechniques polynésiennes. En effet, à titre d'exemple, le LTPP adopte généralement une valeur de cohésion drainée de l'ordre de 3 à 6 kPa dans le mamu III-IV. La présente étude tend à démontrer qu'une valeur moyenne supérieure à 15 kPa ne serait pas aberrante. De même, vis-à-vis de l'angle de frottement moyen drainé, la valeur de 38° est nettement supérieure aux valeurs de 30 ou 32° généralement adoptées par le LTPP.

En toute logique, ce constat devrait conduire à réviser à la hausse les critères en matière de terrassements et de stabilité des versants. Toutefois, il convient de préciser que les critères jusqu'alors retenus par le LTPP étaient exploités en faisant généralement abstraction des conditions de nappe, ce qui permettait de traiter l'ensemble des configurations avec une approche très sécuritaire. Le programme ARAI doit permettre d'affiner ces critères afin qu'ils deviennent plus représentatifs de la réalité, mais il conviendra d'y associer des conditions hydrogéologiques réalistes.

Par ailleurs, on notera que sur Raïatea, les études de retro-calage effectuées pour modéliser le glissement affectant la partie nord à faible pente du site U, ont conduit à retenir des caractéristiques de résistance au cisaillement en conditions drainées nettement plus faibles : $c' = 0$ et $\phi' = 23^\circ$. Ce qui correspond plus ou moins à des valeurs classiques d'argiles pures. Cependant, ces caractéristiques très médiocres, doivent être réservées à des situations exceptionnelles : altérites argileuses de Raïatea en zone très humide.

- *Essais de cisaillement in situ :*

Une des plus valeurs majeures du programme ARAI a été d'engager des essais de cisaillement in situ "en grand" dans le mamu afin de mieux évaluer le comportement mécanique de ces formation très hétérogènes. L'expérience montre que des altérites cimentées, pouvant contenir des éléments plus indurés, peuvent présenter un comportement "en masse" significativement différent de celui appréhendé par des essais en laboratoire sur de petits échantillons.

Le protocole d'essai et les résultats réinterprétés par nos soins sont présentés en annexe 8. Un essai a été mené par paliers successifs sur le même échantillon (essai A-CG1). En raison des difficultés rencontrées pour mener ce type d'essai en "grands déplacements" (plus de 10 mm) et des incertitudes sur la qualité du contact cisailé, ce type de protocole a été abandonné au profit d'essais menés grâce à des échantillons distincts testés respectivement à un seul palier.



Illustration 35 – Vue d'ensemble du dispositif d'essai de cisaillement en grand



Illustration 36 – Vue de détail du dispositif de sollicitation sous contrainte

En dépit de ce choix, de nombreuses difficultés ont été rencontrées par le prestataire en charge des essais (LTPP) : poids et déformabilité du massif de réaction, léger basculement des échantillons lors des montées en charge.

On soulignera que tous les essais ont été pratiqués dans des fouilles d'environ 1 m de profondeur, le mamu IV étant testé sur des cubes de terrain intact de 70 cm de coté.

Si l'on fait abstraction des essais ininterprétables, les résultats obtenus sont les suivants :

- en "petits" déplacements (quelques millimètres) :
 - essai A-CG1 : $c_u = 55$ kPa $\phi_u = 51^\circ$
 - essai A-CG2 : $c_u = 78$ kPa $\phi_u = 24^\circ$
 - essai B-CG1 : $c_u = 29$ kPa $\phi_u = 38^\circ$
 - essai F-CG2 : $c_u = 20$ kPa $\phi_u = 32^\circ$
 - essai U-CG1 : $c_u = 20$ kPa $\phi_u = 40^\circ$
 - essai U-CG2 : $c_u = 48$ kPa $\phi_u = 42^\circ$
- en "grands" déplacements (plus de 10 millimètres) :
 - essai A-CG2 : $c_u = 116$ kPa $\phi_u = 32^\circ$ ou
 - essai A-CG2 : $c_u = 72$ kPa $\phi_u = 57^\circ$
 - essai B-CG1 : $c_u = 82$ kPa $\phi_u = 32^\circ$
 - essai U-CG1 : $c_u = 68$ kPa $\phi_u = 29^\circ$
 - essai U-CG2 : $c_u = 70$ kPa $\phi_u = 38^\circ$

Si, l'on compare les valeurs obtenues à celles issues des essais en laboratoire (en contexte non drainé, et proches de la surface), on constate en matière de cohésion que les essais de cisaillement en grand ($c_u = 20$ à 116 kPa, avec une moyenne de 60 kPa) indiquent une résistance nettement plus importante (en labo les valeurs obtenues à moins de 10 m de profondeur variaient généralement entre 10 et 30 kPa, hormis quelques essais obtenus sur le site U).

Concernant les angles de frottement interne, les essais de cisaillement en grand ont permis de mesurer des valeurs entre 24° et 57° , la moyenne s'établissant à $37,7^\circ$, à comparer avec la valeur moyenne $\phi_u = 26^\circ$ mesurée en laboratoire. Pour ϕ , Les résultats des essais in situ s'approchent plus de ceux obtenus en laboratoire en conditions drainées ($\phi'_{moy} = 37,4^\circ$).

On constate donc que le mamu III-IV se révèle plus résistant que ne le laissent supposer les essais de laboratoire, et surtout les valeurs usuellement retenues pour les études géotechniques. Cela explique le bon comportement quasi-généralement constaté sur des talus très raides de plusieurs mètres de hauteur taillés dans le mamu III-IV.

- Essais au pénétromètre et au pressiomètre :

Les annexes 3 et 4 montrent le détail des pénétrogrammes et des pressiogrammes. L'annexe 9 livre des profils synthétiques interprétatifs au droit de coupes dressées sur les sites détaillés.

Les essais mécaniques in situ, confrontés aux résultats de la géophysique, ont permis de mettre en évidence 3 horizons que l'on retrouve généralement entre 0 et 15 m environ (il existe des variations parfois significatives entre sites ou au sein même d'un site) – depuis la surface vers la base :

o *Horizon 1 :*

- Épaisseur 0 à 3 m
- valeurs moyennes : $q_d = 0,5 \text{ à } 5 \text{ MPa}$

$$E_M = 2 \text{ à } 10 \text{ MPa} \quad - \quad p_l = 0,3 \text{ à } 1 \text{ MPa}$$

o *Horizon 2 :*

- Épaisseur 5 à 10 m environ
- valeurs faibles à moyennes :

$$q_d = 0 \text{ à } 5 \text{ MPa}$$

$$E_M = 2 \text{ à } 30 \text{ MPa} \quad - \quad p_l = 0,3 \text{ à } 2 \text{ MPa}$$

- *Horizon 3 :*
 - Épaisseur > 2 m
 - valeurs bonnes :

$q_d > 10 \text{ MPa}$ jusqu'au refus

$E_M = 20 \text{ à } 50 \text{ MPa}$ - $p_l > 1,7 \text{ MPa}$

D'après les observations sur affleurements, le premier horizon correspond le plus souvent à un mamu III assez ouvert en matière de porosité, probablement plus exposé aux variations météorologiques et climatiques, tandis que le second horizon semble plus fermé bien que très hétérogène. Nous avons pris le parti de regrouper ces deux horizons sous la dénomination de mamu III-IV "médiocre".

Le troisième horizon, se révèle plus délicat à qualifier. S'agit-il de mamu III-IV plus induré ou d'un mamu II. Au vu des carottages réalisés et de l'examen des grands fronts de terrassement au droit des sites investigués (en particulier sur le site A-2 où l'on retrouve du mamu III-IV sur environ 30 m depuis la surface), nous pensons qu'il s'agit plus de mamu III-IV "ferme". Cependant, nous n'excluons pas que des pointements de mamu II puissent être interceptés par nos investigations.

- *Panneaux électriques et sismique réfraction :*

En préalable à l'annonce des résultats obtenus, il convient de rappeler :

- d'une part que les résultats des panneaux électriques sont le reflet de la résistivité des sols mais sont largement conditionnés par la présence éventuelle d'une nappe ;
- d'autre part que la sismique réfraction présente certaines limites dans un contexte où il peut exister des niveaux très indurés au sein d'une masse plus meuble (présence d'un réflecteur limitant la pénétration des ondes), et dans la mesure où les variations brutales de faciès sont largement atténuées par la méthode de traitement.

En conséquence, ces 2 méthodes géophysiques ne sont pas forcément les mieux adaptées à l'étude des altérites volcaniques. Cependant dans la mesure où ces techniques sont classiques et relativement peu onéreuses pour procéder à des investigations préliminaires sur de vastes surfaces, il est rapidement apparu indispensable de les tester dans le cadre du programme Arai.

Dans tous les cas de figure, afin de limiter les erreurs d'interprétation, il a été procédé à un étalonnage et à une vérification des résultats grâce aux données issus des forages et essais mécaniques in situ réalisés à proximité des profils géophysiques.

L'annexe 9 reproduit les profils interprétatifs géophysiques sur lesquels ont été placés les résultats des essais en forage.

Après croisement des résultats obtenus, on retrouve par méthodes géophysiques les 3 horizons précédemment définis :

○ *Horizon 1 :*

- Épaisseur 0 à 3 m
- Résistivité très variable : $R = 50$ à $> 1000 \Omega.m$
- Vitesses sismiques assez faibles : $V_L = 90$ à 400 m/s

Les vitesses sismiques faibles illustrent bien le caractère "ouvert" du matériau.

○ *Horizon 2 :*

- Épaisseur 5 à 10 m
- Résistivité très variable : $R = 50$ à $> 1000 \Omega.m$
- Vitesses sismiques moyennes : $V_L = 300$ à 700 m/s

○ *Horizon 3 :*

- Épaisseur > 2 m
- Résistivité faible : $R < 300 \Omega.m$
- Vitesses assez fortes : $V_L = 600$ à 2000 m/s

A nouveau, nous avons regroupé les horizons 1 et 2 dans le mamu III-IV médiocre, et fait correspondre l'horizon 3 à du mamu III-IV "ferme". Cependant, la borne supérieure en termes de vitesse paraît forte pour ce type de terrain, et nous semble plutôt représentative d'un faciès de mamu moins évolué (mamu I-II).

On soulignera la tendance à la baisse de résistivité lorsque l'on s'approfondit (sauf sur certains panneaux électriques du site B, où des conduites métalliques enterrées ont

totallement perturbé les investigations). A première vue cela peut paraître surprenant sachant que l'on s'attend à rapprocher de niveaux rocheux francs en profondeur (un basalte franc présente une résistivité variant entre 800 et 10000 $\Omega.m$).

Nous avons interprété ce comportement par plusieurs causes :

- bien que le mamu soit souvent proche de la saturation jusqu'en surface, pour les séries 3 et 4 de panneaux faits sur le site U, on ne peut exclure que les très faibles résistivités mesurées à quelques mètres de profondeur soulignent la position de la nappe ;
- selon les stades de mamutisation, la minéralogie peut évoluer significativement sur un profil vertical. En particulier certains minéraux, favorisant la conductivité électrique, peuvent être libérés dans des stades assez précoces du processus d'altération, pour ensuite disparaître pour des stades plus évolués situés plus près de la surface ;
- enfin, l'horizon 3 correspond à un mamu III-IV plus compact, mais plus poreux donc pouvant contenir plus d'eau. Si le matériau se révélait plus rocheux, il devrait être plus résistant. C'est une des raisons principales pour lesquelles cet horizon III a été assimilé à du mamu III-IV "ferme" et non à du mamu I-II.

Par ailleurs, on remarquera que du fait de l'hétérogénéité des matériaux "mamutisés", et de la progressivité des fronts d'altération, les "signatures" géophysiques entre mamu "médiocre" et mamu "ferme" ne sont pas très tranchées. Il est parfois délicat de classer les matériaux exclusivement sur la base de reconnaissances géophysiques. Un étalonnage par moyen de sondages mécaniques reste nécessaire, ce qui est en conformité avec les règles de l'art en matière de reconnaissances géophysiques.

b) Relation entre essais mécaniques

Entre pénétromètre et pressiomètre, on retrouve les ordres de grandeur usuels pour les terrains fins à savoir $pl / qd = 2 \text{ à } 4$ (moyenne 3). Toutefois la valeur moyenne de 2 semble plutôt se dégager des reconnaissances faites sur les altérites volcaniques. il existe donc une certaine cohérence entre ces types d'essais.

Nous avons également examiné les corrélations entre valeurs pressiométriques et cohésion non drainée dans des terrains fins à la fois frottants et cohérents. A cet effet, nous avons exploité les travaux de F. Baguelin (ancien directeur du laboratoire de Mécanique des Sols du LCPC à Nantes, ancien directeur scientifique de Terrasol, directeur scientifique du groupe Fondasol) dans une note interne de TERRASOL. La formule proposée par F. Baguelin est la suivante :

$$c = [(p_l - p_0 (1 - \sin \phi) \times M) / (2.M - 1)] \times \operatorname{tg} \phi$$

avec $M = (1 / 4. \alpha_F)^{[(1 - K_a) / 2]}$

où ϕ = angle de frottement interne

$p_l - p_0$ = pression limite

α_F = déformation au pic de cisaillement

$$K_a = \text{coefficient de poussée} = \operatorname{tg}^2 (\pi/4 - \phi/2)$$

Si on adopte les hypothèses suivantes :

$$\phi = 35^\circ$$

$$p_l - p_0 = 0,3 \text{ MPa (valeur moyenne proche de la surface)}$$

$$\alpha_F = 0,5 \text{ à } 1 \%$$

$$K_a = 0,27$$

alors : $M = 4,17 \text{ à } 3,24$

et : $c = 50 \text{ kPa}$

Cette valeur est tout à fait conforme à la moyenne de 60 kPa mesurée par les essais de cisaillement "en grand".

Toutefois, il convient d'être très prudent avec cette approche, purement théorique, qui n'a jamais été vraiment confrontée aux données de terrain. Cependant, il est intéressant de constater qu'avec les valeurs pressiométriques les plus faibles mesurées dans le mamu sur les sites détaillés, on obtient un ordre de grandeur ($c_u = 50 \text{ kPa}$) tout à fait homogène avec la valeur moyenne obtenue par les essais de cisaillement en grand.

c) Comparaison avec les valeurs issues du rétro calage

Les valeurs issues des études de rétrocalage s'inscrivent tout à fait dans la fourchette des essais obtenus (hors cas des plaines humides de Raiatea), ce qui est tout à fait naturel dans la mesure où lors des modélisations de rétrocalage, les premières valeurs testées étaient proches de la moyenne des résultats des essais.

Il est toutefois intéressant de souligner que les valeurs adoptées dans le rétrocalage, et bien qu'ajustées par itérations successives pour satisfaire au mieux les observations sur site, sont demeurées proches des valeurs moyennes issues des essais. En particulier, concernant la cohésion drainée dans le mamu III-IV "médiocre" la valeur $c' = 20$ kPa est tout à fait conforme à la moyenne obtenue lors des essais en laboratoire.

5.3. HYDROGEOLOGIE

a) Perméabilité

Six essais de perméabilité sur échantillons placés en moule CBR ont été réalisés. Tous les échantillons ont été prélevés dans des fouilles à la pelle mécanique. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les résultats obtenus. Les valeurs mesurées (environ 1.10^{-8} à 1.10^{-6} m/s), reflétant des ordres de grandeur assez faibles, sont en accord avec les matériaux limoneux caractérisant le mamu.

Site détaillé	k (m/s)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	8.76E-09	8.90E-07	3.04E-07
Site B			1.33E-06
Site U (pm2)	6.29E-08	1.00E-07	8.15E-08

Tableau 14 – Caractéristiques de perméabilité dans le mamu III-IV

L'essai pratiqué sur l'échantillon prélevé sur le site U à Raiatea n'a pas mis en évidence de valeur nettement plus faible, bien que les altérites du site soient plus argileuses. Cependant, on remarquera que l'échantillon testé est issu de la fouille PM2 ayant montré (de façon isolée) un matériau altéritique proche de celui reconnu sur Tahiti.

b) Observations à Tahiti

A Tahiti, le mamu peu perméable ne montre pas de venues d'eau significatives, hormis localement quelques suintements. Toutefois, on remarquera que les reconnaissances pratiquées en saison des pluies ont mis en évidence un matériau souvent assez proche de la saturation.

Bien que la part la plus importante des précipitations soit évacuée par ruissellement, il existe une infiltration se faisant par la zone non saturée souvent épaisse d'une dizaine de mètres ou plus au niveau des planèzes.

Cependant, est probable que la mamu ne soit pas le siège d'aquifères importants, les aquifères productifs étant cantonnés plus bas dans les niveaux de roche fracturée plutôt saine. Néanmoins, au gré des hétérogénéités du matériau, de petites lentilles de limon peuvent se mettre temporairement en pression, principalement au droit des anciennes fractures de la roche mère assimilables à des zones de circulation relativement privilégiées. A ce titre, on notera l'expérience du LTPP nous ayant signalé avoir fréquemment constaté l'existence localisée de petites résurgences d'eau sous pression au droit de loupes de glissement, ces résurgences se tarissant rapidement après vidange du mini-aquifère en charge.

En conséquence, le mamu doit être assimilé à un matériau peu perméable présentant une perméabilité de fracture (ou assimilable).

c) Observations à Raïatea et Huahine

Ces îles, plus anciennes que Tahiti, semblent présenter un niveau d'altération plus prononcé se traduisant par une teneur en argiles plus marquée dans le mamu. De plus, des dômes phonolitiques sont présents sur le site AB à Huahine dont la mise en place a dû conduire à l'apparition d'altérites plus argileuses.

Malgré la présence de faciès plus argileux, les sites d'études U et AB, respectivement sur Raïatea et Huahine, présentent de très nombreuses venues d'eau en versant et en plaine. Les profils électriques pratiqués au Nord du site U semblent avoir montré la présence d'une nappe à quelques mètres de profondeur, élément non reconnu sur les sites investigués à Tahiti.

L'existence de faciès plus argileux doit favoriser le ruissellement en cas de pluie, toutefois l'ancienne fracturation ou les contacts intrusifs hérités de la roche mère (discontinuités plus marquées que sur Tahiti ?) doivent constituer des réseaux relativement privilégiés pour les circulations d'eau souterraine.

6. Mamu I & II

6.1. DESCRIPTION DE LA LITHOLOGIQUE ET DE LA STRUCTURE

6.1.1. Lithologie

Il s'agit des 2 stades les moins évolués de l'altération rocheuse. La texture de la roche mère est toujours nettement apparente (prismes et fissures subverticales de refroidissement, bases et sommets de coulées). Pour les faciès les plus évolués, la couleur ocre apparaît, mais le plus souvent moins de la moitié de la masse est décomposée ou désintégrée en sol. Du matériel rocheux grisâtre, brun ou légèrement décoloré est conservé sous formes de rognons ou en maille discontinue.

Si l'on se réfère à la classification établie par l'ISRM (International Society for Rocks Mechanics)⁽²⁾, le mamu I-II se situe entre les niveaux d'altération II (roche légèrement altérée) et III (roche modérément altérée) – (échelle allant de I à VI).

6.1.2. Structure

Ces niveaux se retrouvent à des profondeurs variables généralement excédant 15 à 20 m au sein des planèzes. On retrouve toutefois, du mamu I-II en front de planèze ou en découverte dans les grands terrassements.

Leur structure est directement héritée de leur mode de mise en place originel et de leur évolution dans le temps. On peut retrouver plusieurs configurations :

- passage progressif dans la masse en remontant vers le haut : roche mère – mamu I – mamu II. Dans ce type de configuration, le mamu I-II présente des épaisseurs très variables, variant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur ;
- intercalations de séquences mamu I – mamu II (la roche mère pouvant également apparaître), les coulées de laves s'étant mises en dépôt sur des horizons déjà altérés. Pour cette configuration, l'épaisseur d'altération peut être très importante et excéder 100 m, les versants restant toutefois bien "armés".

² "Suggested methods for the quantitative description of rock masses" – ISRM – Oct. 77

Latéralement, les transitions brutales avec de la roche mère (présence d'une intrusion, ou coulée de remplissage de paléo-vallon), voir avec du mamu III, ne sont pas rares.

Des fissures très redressées, correspondant essentiellement à des fissures de refroidissement des coulées de lave, sont localement visibles. Ces discontinuités sont le plus souvent fermées. La persistance de cette fracturation dans le massif est difficile à évaluer.

6.2. CARACTERISATION GEOTECHNIQUE

6.2.1. Examen de la stabilité de talus

Le mamu I-II présente une bonne stabilité aux terrassements. Des fronts de taille de plusieurs dizaines de mètres avec la géométrie présentée sur l'illustration 37 sont assez fréquents.

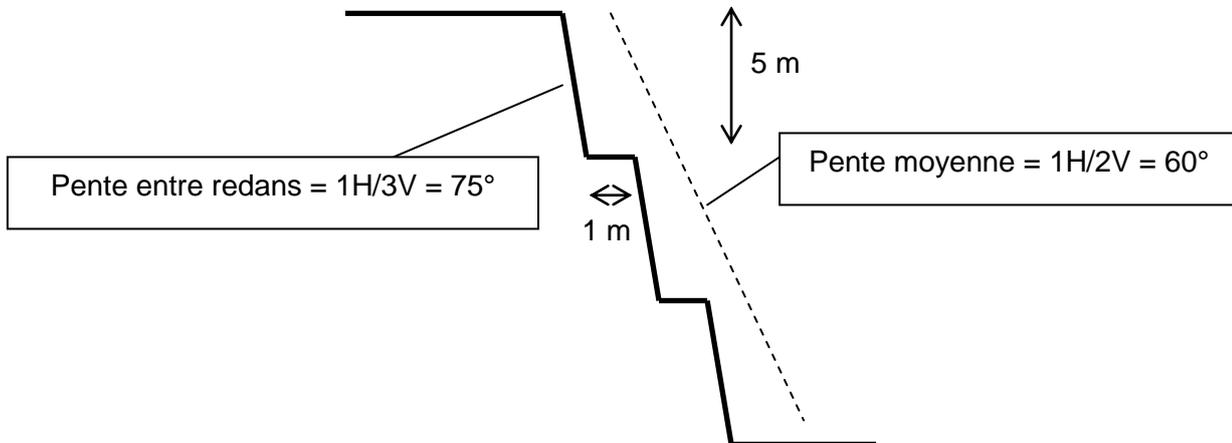


Illustration 37 – Schéma de talutage usuel dans le Mamu I-II



Illustration 38 – Exemple de terrassements de grande hauteur dans le mamu I-II

En règle générale, ces talus ne présentent pas d'indices d'instabilité au glissement. Seuls quelques dièdres ou boules rocheux peuvent se détacher au sein de la masse altérée.

Ceci signifie que la cohésion de ce matériau est importante.

Le terrassement à la main est quasi impossible sans outil. Le marteau laisse des indentations de profondeur modérée (quelques millimètres).

6.2.2. Évaluation de caractéristiques mécaniques moyennes par rétrocalage

Cette analyse n'a pas été très poussée dans la mesure où l'essentiel des instabilités reconnues en talus ou parois relèvent plus de chutes de dièdres ou de blocs que de glissements. Cependant, le mamu I-II se révèle trop hétérogène pour pouvoir procéder aisément à un rétrocalage par analyse des dièdres instables.

Toutefois, si l'on adopte une approche de type glissement, l'exemple exposé sur l'illustration 39, montre que dans la partie rocheuse (mamu 0-I-II en couleur bleu) médiane d'un versant de grande ravine incliné à 55° , une cohésion de 100 kPa associée à un angle de frottement de 45° suffit à conférer un coefficient minimal de sécurité de 0,93 (en extrémité droite de la grille des centres de cercles de calcul) relativement proche de la condition de stabilité $F = 1$. Ces valeurs suffisent à conférer la stabilité du profil décrit sur l'illustration 37 en prenant en compte l'existence d'une nappe drainée par le front de terrassement. Dans la mesure où, pour l'exemple de grand versant précédemment examiné, les conditions de nappe et l'intercalation de niveaux de mamu III-IV se révèlent pénalisantes, ces valeurs ne semblent pas trop aberrantes pour caractériser la résistance "en grand" de ces faciès.

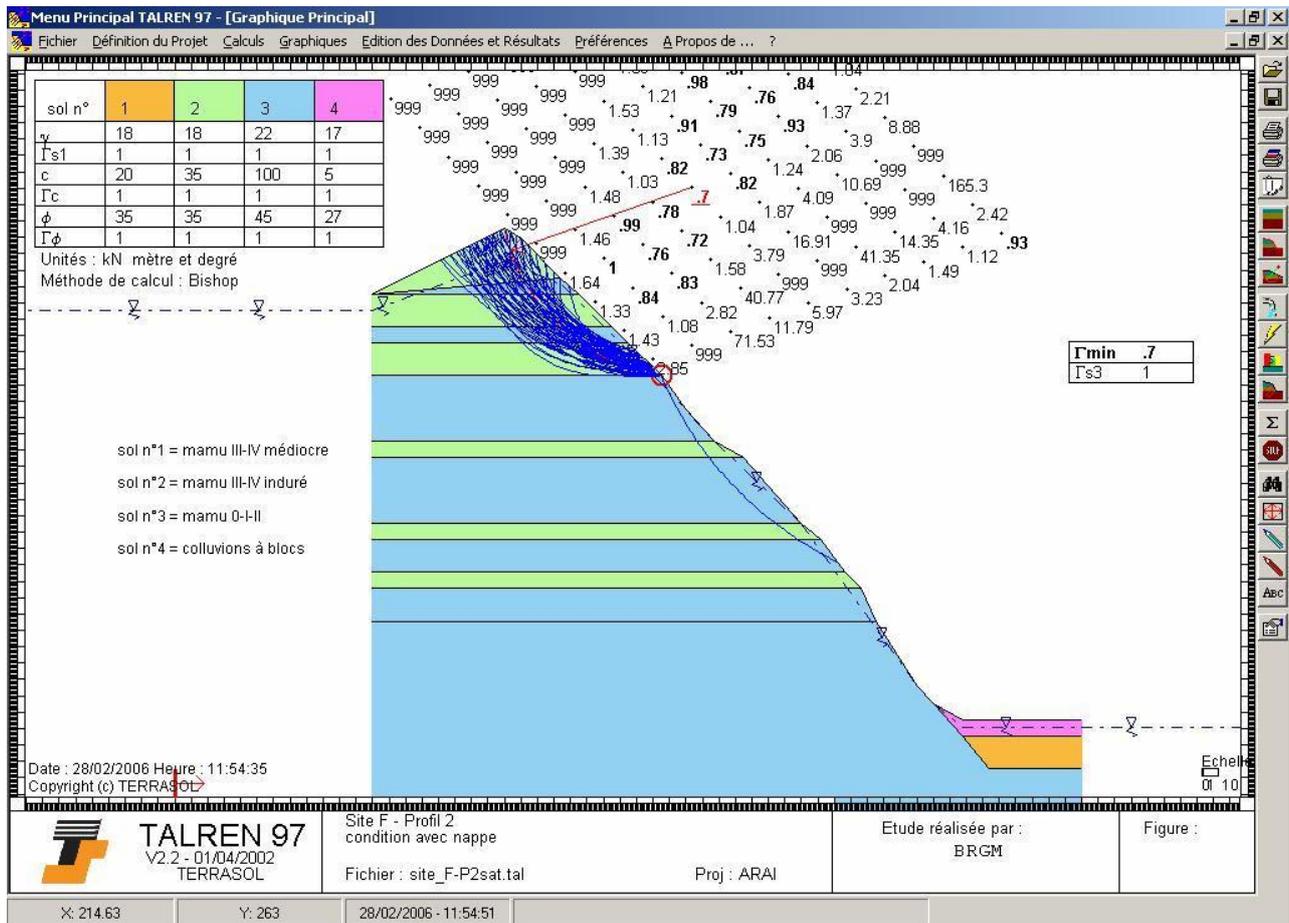


Illustration 39 – Site F – Profil 2 - Exemple de calcul de stabilité au glissement dans des grands versants – Avec nappe

6.2.3. Caractéristiques géotechniques

a) Difficultés rencontrées

Après dépouillement des résultats d'investigation, les sites choisis pour procéder à des reconnaissances ont montré d'une part des épaisseurs de mamu III-IV plus importantes que prévues, et d'autre part certaines difficultés à correctement différencier en sondage ou par géophysique du mamu III ferme d'un mamu II relativement tendre.

En conséquence, cela a conduit à réaliser des carottages spécifiques au droit d'affleurement de mamu I-II afin de prélever des échantillons à des fins d'essais en laboratoire. Deux sites ont été choisis : site A – faciès plutôt assimilable à du mamu II ; site B – faciès plutôt proches du mamu I.

b) Essais

- Identification :

i) Poids volumique

Site détaillé	γ_h (kN/m ³)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	17.2	20.1	18.8
Site F	12.4	24.4	18.9

Tableau 15 – Poids volumique dans le mamu I-II

Les résultats présentés sur le Tableau 15 se révèlent très variés (extrêmes entre 12 kN/m³ et 24 kN/m³). Ceci reflète bien la très importante hétérogénéité des matériaux altéritiques à un stade intermédiaire de formation. Ainsi, à quelques décimètres d'intervalle, les résultats peuvent être totalement contradictoires. Il convient de noter que la valeur moyenne de 19 kN/m³ est peut être trop faible pour être réellement représentative de ce type de faciès.

ii) Vitesse sonique

Site détaillé	Vp (m/s)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	1130	1672	1408
Site F	1320	1967	1707

Tableau 16 – Vitesses soniques dans le mamu I-II

Ces essais ont été pratiqués sur des échantillons non fracturés. Ils consistent à mesurer la vitesse de propagation d'ondes sismiques longitudinales (ou onde primaires Vp).

Les vitesses soniques, mesurées sur des échantillons prélevés dans les carottages courts effectués au droit de niveaux de mamu très raide, varient entre Vp = 1130 m/s et 1970 m/s. La moyenne sur le site F (mamu I) est légèrement plus forte que celle obtenue sur le site A (mamu II), ce qui est en accord avec les niveaux respectifs d'altération.

Il est intéressant de constater que si l'on compare cette valeur moyenne à celle usuellement mesurée sur un basalte sain ($V_p\text{-sain} = 6000 \text{ m/s}$), on obtient un ratio $V_p\text{-moy} / V_p\text{-sain} \approx 23 \text{ à } 28 \%$. Selon la classification de l'AFTES³, cette valeur correspond à une roche moyennement altérée, ce qui est en conformité avec la classification faite en matière de description lithologique.

Par ailleurs, on soulignera que sur le site A, les vitesses sismiques mesurées in situ sur le site A au-delà d'une dizaine de mètres de profondeur, n'excèdent pas 900 m/s. Le ratio de vitesse sismique entre mesure in situ et mesure sur échantillon n'excède donc pas 65 %, ce qui selon l'AFTES correspond à un Indice de Continuité du Massif rocheux modéré à faible. Ce constat met en évidence sur ce site la présence d'un effet d'échelle in situ (discontinuités, structure hétérogène ?) résultant en une dégradation "en grand" des caractéristiques moyennes du massif. A contrario, sur le site F, les profils de sismique réfraction ont montré en profondeur des vitesses allant jusqu'à 1700 m/s, c'est-à-dire dans la gamme de vitesse moyenne mesurée sur échantillon. Cependant, si l'on retient les vitesses moyennes reconnues dans l'horizon le plus sain, on retrouve un effet de discontinuité "en grand", comme sur le site A.

- Résistance à l'écrasement :

i) *Compression uniaxiale*

Site détaillé	Rc (MPa)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	0.6	4.0	1.5
Site F	1.5	7.6	3.2

Tableau 17 – Résistance à la compression uniaxiale dans le mamu I-II

Le Tableau 17 montre des valeurs hétérogènes (entre 0,6 et 7,6 MPa) typiques des altérites de niveau intermédiaire. On notera que la valeur minimale $R_c = 600 \text{ kPa}$, convertie en cohésion non drainée $c_u = R_c/2 = 300 \text{ kPa}$, est assez nettement supérieure aux plus hautes valeurs de cohésion mesurées dans le mamu III-IV et dépassant à peine 100 KPa. Le Mamu III-IV le plus ferme se rapproche donc du mamu I-II le plus tendre, avec toutefois une différenciation mécanique assez marquée.

Selon les critères de l'AFTES, les matériaux rencontrés se classent en moyenne dans la catégorie très faiblement résistante (RC6). Seuls deux échantillons peuvent être placés dans la classe faiblement résistante (RC5).

³ AFTES : Association Française des Travaux En Souterrain

On soulignera que logiquement la moyenne obtenue sur le site F (plutôt mamu I) est de l'ordre du double de celle constatée sur le site A (plutôt mamu II). Ce constat est en accord avec vitesses soniques relativement élevées mesurées sur le site F.

ii) *Module de déformation*

Site détaillé	E (MPa)		
	mini	maxi	moyenne
Site A	18	120	54
Site F	80	270	204

Tableau 18 – Module de déformation dans le mamu I-II

Les mesures varient entre $E = 18$ MPa et $E = 270$ MPa avec une valeur moyenne très différente entre les sites A et F. Pour le site A, il s'agit de matériaux qui se classent en moyenne dans la catégorie à très faible module de déformation (DE6). Pour le site F, les matériaux se classent dans la catégorie à faible module de déformation (DE5).

iii) *Coefficient de Poisson*

Site détaillé	ν		
	mini	maxi	moyenne
Site A	0.25	0.38	0.32
Site F	0.11	0.16	0.14

Tableau 19 – Coefficient de Poisson dans le mamu I-II

A nouveau, on retrouve une différence assez marquée entre le mamu II (site A) qui présente une valeur moyenne assez classique pour des terrains meubles ($\nu \approx 0,3$), et le mamu I (site F) qui se caractérise par un coefficient de roches très dures ($\nu \approx 0,15$).

- Essais au pénétromètre et au pressiomètre :

Tel qu'il a été indiqué en préalable à ce chapitre, il s'est révélé délicat d'investiguer les faciès de mamu I-II en profondeur.

Concernant les essais mécaniques in situ, le site T est probablement le seul où ces faciès semblent avoir été significativement reconnus. Cependant, on remarquera que pour ce site, il n'est pas totalement exclu que les niveaux identifiés comme du mamu I-II soient en réalité des colluvions à méga-blocs.

- pénétromètre : qd → refus (qd > 25 MPa)
- pressiomètre : $E_M = 30$ à 120 MPa - $p_l > 2$ MPa

- Panneaux électriques et sismique réfraction :

- Résistivité faible : $R < 300 \Omega.m$. Cela semble être la tendance, cependant il s'est révélé très délicat de distinguer en profondeur le mamu III "ferme" du mamu II "tendre".
- Vitesses assez fortes : $V_L = 900$ à 2000 m/s

c) **Corrélation entre essais mécaniques**

Il est intéressant de constater que même s'il est possible de distinguer le mamu I du site F du mamu II du site A par les valeurs moyennes des essais, dans le détail il s'est révélé très délicat d'établir des corrélations fiables. Par exemple, sur le site A, l'échantillon n°1 a donné une contrainte de rupture $R_c = 4$ MPa pour un module $E = 18$ MPa, tandis que sur l'échantillon n°4 on trouve $R_c = 0,8$ MPa pour un module de 120 MPa.

Concernant les essais pénétrométriques et pressiométriques, la nature très raide du matériau ne se prête pas à la recherche de corrélation entre essais (pénétromètre systématiquement au refus, et pression limite bornée à moins de 2 MPa).

6.3. HYDROGEOLOGIE

Les talus terrassés dans le mamu I-II, peu perméable, ne montrent généralement pas de venues d'eau significatives. Usuellement ces fronts sont plutôt secs, même en période des pluies, quelques suintements étant parfois visibles en pied de talus.

Cependant, on ne peut pas exclure que localement des fissures (dans les faciès les plus indurés) puissent se mettre en pression lorsque l'exutoire est colmaté, ce qu'à confirmé le LTPP. Mais, semble-t-il, ces aquifères de fissures sont généralement de faible capacité, ce qui permet une vidange en peu de temps. Les venues d'eau pérennes dans ces formations restent rares.

7. Résultats synthétiques

7.1. FORMATIONS TYPES

7.1.1. Avant propos

Les reconnaissances effectuées dans le cadre du projet Arai ont montré que la classification usuellement adoptée en Polynésie (mamu I à IV) ne se révèle pas très bien adaptée sur un plan géomécanique, certains faciès étant trop délicats à distinguer pour divers essais.

Pour cette raison, et de façon pratique, il est proposé de regrouper les faciès en 2 groupes : mamu III-IV et mamu I-II. On notera que vis-à-vis des règlements établis pour les Plans de Prévention des Risques (PPR) de Polynésie Française, ces deux regroupements correspondent respectivement au "mamu meuble" (= mamu III-IV) et au "mamu résistant" (mamu I-II). La "lave saine rocheuse ou bréchique" présentée dans les PPR n'est pas assimilée à du mamu du fait de l'absence d'altération dans ces faciès.

7.1.2. Mamu III-IV

a) Description

Le mamu III-IV correspond aux stades les plus évolués de l'altération en place des roches volcaniques polynésiennes (allotérites). Il se présente sous la forme d'une matrice limoneuse prépondérante, assez plastique, généralement légèrement argileuse, de couleur ocre, rouge-orangée, brune, ou grisâtre. Ce matériau emballé des reliquats gris ou ocres, non jointifs, de roche mère principalement sous la forme de boules. La texture initiale du rocher a le plus souvent totalement disparue, ou est très estompée. En particulier la fracturation originelle y est assez rarement discernable.

On soulignera que la genèse des altérites volcanique de Raiatea et de Huahine se distingue de celle de formations de Tahiti par deux caractéristiques majeures :

- l'âge de formation des îles occidentales est plus élevé de plus de 1 Ma, ce qui se traduit par la présence d'altérites plus évoluées ;

- les îles des Raïatea et de Huahine présentent des complexes volcaniques plus diversifiés en matière de pétrographie. En particulier des intrusions de trachytes et de phonolites y sont fréquentes, celles-ci étant associées à de l'hydrothermalisme lors de leur mise en place.

b) Identification en laboratoire

En termes d'identification, le mamu III-IV contient généralement entre 50 et 65 % de fines et entre 10 à 15 % de particules argileuses. Il se place plutôt vers les limons très plastiques sur le diagramme de Casagrande avec des IP d'environ 15 % et des limites de liquidité de l'ordre de 65 %. Toutefois, sur le site A de Tahiti-Iti, les limons se révèlent moins plastiques. Les valeurs au bleu restent généralement assez faibles ($< 1,5$). Les altérites ne sont pas affectées par des phénomènes de retrait-gonflement des argiles.

Les altérites de Raïatea (et probablement de Huahine) se distinguent par une teneur en fines et en argiles plus marquée (respectivement environ 90 % et 40 %), ces matériaux restant toutefois dans le domaine des limons très plastiques sur la construction de Casagrande.

On soulignera que les essais ont permis de mettre des valeurs de poids volumique humide étonnamment faibles $\gamma_h \approx 18 \text{ kN/m}^3$, et ceci bien que les échantillons soient le plus souvent proches de la saturation. A contrario, le poids volumique de la fraction solide s'est révélé très élevé $\gamma_h \approx 30 \text{ kN/m}^3$. Même si cette valeur n'est pas tout à fait étonnante pour des altérites issues de basaltes, certaines mesures pouvant approcher 33 kN/m^3 restent douteuses.

c) Résistance au cisaillement

Sur un plan géomécanique, si l'on examine l'ensemble des essais de cisaillement réalisés, pour l'essentiel pratiqués dans les 10 premiers mètres de terrain, on en déduit les éléments suivants :

- Pour les essais en laboratoire :
 - o $c_u = 10$ à 80 kPa environ, avec une valeur moyenne de 29 kPa . Une tendance à l'accroissement en profondeur est notable ;
 - o $c' = 0$ à 60 kPa , avec une valeur moyenne de l'ordre de 20 kPa ;
 - o $\phi_u = 19$ à 36° , avec une moyenne s'établissant vers 26° ;
 - o $\phi' = 29$ à 45° , avec une moyenne à 37° .

- Pour les essais de cisaillement in situ "en grand" proches de la surface :
 - o $c_u = 20$ à 116 kPa, avec une moyenne de 60 kPa ;
 - o $\phi_u = 24^\circ$ et 57° , la moyenne s'établissant à environ 38° ;

On est donc en présence d'un matériau à cimentation héritée assez marquée, ce qui conduit au maintien d'une cohésion significative, y compris en conditions drainées. A ce titre, on notera que les valeurs de cohésion obtenues excèdent très souvent largement les grandeurs généralement admises sur le mamu à Tahiti ($c' = 3$ à 6 kPa issues d'une étude du LTPP - projet « Te ara Nui » de liaison Punaauia/Taravao). De plus, les essais de cisaillement in situ "en grand" ont mis en évidence des valeurs de cohésion meilleures que celles obtenues en laboratoire. Ceci est lié à la texture des altérites qui présentent des passées ou des nodules plus résistants, leur conférant une résistance plus forte que sur un petit échantillon de sol. De même, les valeurs d'angle de frottement interne en conditions drainées (37°) sont plus importantes que celles jusqu'à présent admises dans le mamu (30 à 32°).

Il est intéressant de souligner que les valeurs issues des modèles de rétro-calage réalisés au droit de sites représentatifs ayant fait l'objet d'études particulières (valeurs c' et ϕ'), s'inscrivent parfaitement dans les gammes de valeur obtenues lors des essais de cisaillement. Elles se révèlent d'ailleurs être très proches des résultats moyens des essais en laboratoire.

d) Reconnaissances in situ (hors essais de cisaillement)

L'exploitation des essais pressiométriques, pénétrométriques et des investigations géophysiques ont permis d'identifier deux formations à comportement distinct au sein du mamu III-IV :

- Le mamu "médiocre" ;
- Le mamu "ferme".

On notera que la limite entre ces deux horizons n'est pas toujours très claire du fait d'une certaine "imbrication" entre les niveaux d'altération. Par ailleurs, les investigations in situ faites sur Raïatea n'ont pas mis en évidence de différence notable avec les résultats obtenus sur Tahiti.

i) Le mamu III-IV médiocre :

Souvent rencontré sur environ 10 m de puissance au niveau des limites de planèzes, il se caractérise par les paramètres géomécaniques in situ qui suivent (valeurs moyennes usuellement rencontrées) :

- Pénétrömètre dynamique : $q_d = 0,5 \text{ à } 5 \text{ MPa}$
- Pressiomètre : $E_M = 2 \text{ à } 10 \text{ MPa}$ - $p_l = 0,3 \text{ à } 2 \text{ MPa}$
- Sismique réfraction : $V_p = 90 \text{ à } 700 \text{ m/s}$
- Profils électriques : $R = 50 \text{ à } > 1000 \text{ } \Omega.m$ (très variable)

ii) Le mamu III-IV ferme :

Généralement rencontré au-delà de 10 m de profondeur sur les planèzes, il se caractérise par les paramètres géomécaniques in situ suivants (valeurs moyennes usuellement rencontrées) :

- Pénétrömètre dynamique : $q_d > 10 \text{ MPa}$ jusqu'au refus
- Pressiomètre : $E_M = 20 \text{ à } 50 \text{ MPa}$ - $p_l > 2 \text{ MPa}$
- Sismique réfraction : $V_p = 600 \text{ à } 1500 \text{ m/s}$ ⁽⁴⁾
- Profils électriques : $R < 300 \text{ } \Omega.m$

On remarquera donc que les faciès médiocres et fermes du mamu III-IV se distinguent relativement bien par des moyens d'investigation classiques tel le pénétrömètre dynamique ou le pressiomètre, mais également la sismique réfraction. A contrario, les méthodes géophysiques par panneau électrique se révèlent moins bien adaptées pour clairement distinguer les ensembles géomécaniques.

e) Hydrogéologie

Le mamu III-IV est un matériau essentiellement limoneux à faible perméabilité de pores ($k = 10^{-8}$ à 10^{-6} m/s). Cependant, le mamu est localement recoupé par un reliquat de discontinuités héritées de la structure de la roche mère, conduisant à l'existence d'un réseau relativement privilégié pour les circulations d'eau souterraine.

Hormis en plaine, où la nappe est proche de la surface, il semblerait que l'on ne retrouve pas sur les planèzes altérées d'aquifère en charge dans les dix premiers mètres de terrain (au minimum), ceci bien que les matériaux soient assez proches de

⁴ La valeur maximale de 2000 m/s semble plutôt représentative d'un mamu I-II. En conséquence, il nous a paru mieux adapté de limiter la borne supérieure du mamu III-IV ferme à 1500 m/s

la saturation en saison des pluies. Cela se traduit généralement par l'absence de venues d'eau significatives dans les versants ou dans les talus "mamutisés". Cependant, on notera que sur Raiatea et Huahine, où les altérites sont plus argileuses, les résurgences en versant sont nettement plus fréquentes (héritage structural plus marqué de la roche mère, d'où une perméabilité de fissure accentuée ? présence de filons hydrothermaux argilisés recoupant les aquifères ?).

Le réseau d'anciennes fissures parcourant le mamu, en favorisant les circulations in situ, en plus d'une infiltration classique et lente au sein de la matrice, doit probablement être essentiel vis-à-vis du comportement hydrogéologique, et par delà géomécanique, du mamu. A ce titre, le LTPP témoigne de plusieurs cas d'instabilités dans le mamu, caractérisés par l'existence de venues d'eau ponctuelles au niveau de la loupe d'arrachement, ces résurgences sous pression se tarissant rapidement en quelques heures. Cela semble démontrer l'existence de petits aquifères de fissure, temporairement en charge, au sein même des altérites.

f) *Caractéristiques moyennes proposées pour une modélisation géomécanique de stabilité de versant*

Au regard des résultats obtenus, et en les confrontant aux observations sur site, ainsi qu'à l'étude de rétro-calage nous proposons de retenir les caractéristiques qui suivent :

- i) *Mamu médiocre :*
 - $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 - $c' = 20 \text{ kPa}$ - $\phi' = 35^\circ$
 - $c_u = 40 \text{ kPa}$ - $\phi_u = 25^\circ$
 - $K = 10^{-7} \text{ m/s}$

- ii) *Mamu ferme :*
 - $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 - $c' = 35 \text{ kPa}$ - $\phi' = 35^\circ$
 - $c_u = 60 \text{ kPa}$ - $\phi_u = 25^\circ$
 - $K = 10^{-7} \text{ m/s}$

iii) *Mamu très médiocre de Raiātea et Huahine en plaine très humide (cf. étude de rétrocalage présentée au chapitre 5.2.2) :*

- $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
- $c' = 0 \text{ kPa}$ - $\phi' = 23^\circ$
- $c_u = 20 \text{ kPa}$ - $\phi_u = 10^\circ$
- $K = 10^{-7} \text{ m/s}$

On constatera que pour l'essentiel, bien qu'assez conservatrices, ces valeurs se révèlent nettement meilleures que le jeu de paramètres usuellement retenues par le LTPP. Toutefois, les valeurs proposées doivent être appliquées en adoptant la présence d'une nappe dans le massif (les valeurs du LTPP très conservatrices ayant pour intérêt de pouvoir faire abstraction des conditions de nappe). Faute de reconnaissances hydrogéologiques spécifiques, le choix d'envisager la présence et la position d'une nappe, peut se révéler très délicat. Il convient généralement de se baser sur des observations sur site (venues d'eau, terrains humides ...) et sur la morphologie des lieux pouvant favoriser ou non un bon drainage des terrains. Les modélisations de versant effectuées sur les sites détaillés du projet Araï (cf. rapport RP-54834-FR) ont parfaitement mis en évidence la sensibilité de ces paramètres à la position de la nappe (principalement en conditions drainées). Il convient donc d'apprécier cette composante au mieux.

7.1.3. Mamu I-II

a) *Description*

Le mamu I-II correspond aux stades les moins évolués de l'altération en place des roches volcaniques polynésiennes (isaltérites). Il se caractérise par la présence systématique et bien marquée de la texture de la roche mère (prismes et fissures subverticales de refroidissement, bases et sommets de coulées). En ce qui concerne les faciès les plus évolués (mamu II), moins de la moitié de la roche est fortement transformée sous la forme d'une matrice limoneuse grise ou ocre assez raide. Le reliquat de roche mère, de couleur grisâtre ou légèrement décoloré, est conservé en boules ou en maille discontinue.

En front de planèze, ces faciès ne se retrouvent généralement pas avant 10 à 15 m de profondeur.

b) Identification en laboratoire

Les valeurs de poids volumique humide mesurées sont relativement faibles avec $\gamma_h \approx 19 \text{ kN/m}^3$. Il est probable qu'une valeur de l'ordre de 20 kN/m^3 , voire plus, soit plus représentative de ces formations.

Concernant les vitesses soniques, les valeurs mesurées varient approximativement entre 1000 et 2000 m/s. Ces valeurs, très éloignées de celles obtenues dans un basalte sain (6000 m/s) témoignent de l'état d'altération assez avancé du mamu (altération moyenne selon l'AFTES).

c) Résistance à la compression simple

Ces essais ont permis de clairement distinguer le mamu I prélevé sur le site F du mamu II rencontré sur le site A.

- mamu I : $R_c = 1,5 \text{ à } 7,6 \text{ MPa} - R_{c_{\text{moy}}} = 3,2 \text{ MPa}$

$E = 80 \text{ à } 270 \text{ MPa} - E_{\text{moy}} \approx 200 \text{ MPa}$

$\nu \approx 0,15$

- mamu II : $R_c = 0,6 \text{ à } 4 \text{ MPa} - R_{c_{\text{moy}}} = 1,5 \text{ MPa}$

$E = 18 \text{ à } 120 \text{ MPa} - E_{\text{moy}} \approx 50 \text{ MPa}$

$\nu \approx 0,3$

On soulignera que même pour la valeur la plus faible de R_c , si l'on applique la corrélation usuelle $c_u = R_c / 2$, on obtient $c_u = 300 \text{ kPa}$, ce qui est nettement supérieur aux valeurs maximales de cohésion non drainée mesurées dans le mamu III-IV. Ces matériaux sont donc bien distincts en matière de résistance mécanique. Par ailleurs, ils présentent des caractéristiques intrinsèques nettement supérieures à celles retenues jusqu'à présent par le LTPP ($c' = 6 \text{ kPa}$; $\phi' = 32^\circ$), même si ces dernières ont pour objet de retranscrire les niveaux les plus faibles de la formation (ex : fissures altérées).

d) Reconnaissances in situ

- Pénétromètre dynamique : $q_d > 25 \text{ MPa}$ (refus)
- Pressiomètre : $E_M = 30 \text{ à } 120 \text{ MPa}$ - $p_l > 2 \text{ MPa}$
- Sismique réfraction : $V_p = 900 \text{ à } 2000 \text{ m/s}$
- Profils électriques : $R < 300 \Omega.m$

On constate que la mamu I-II a pour particularité d'être assez délicat à différencier du mamu III-IV "ferme" à l'aide de certaines méthodes d'investigation classique (pénétromètre dynamique au refus, géophysique pas assez sélective). L'examen des modules pressiométriques semble être la technique classique la mieux adaptée pour clairement identifier le mamu I-II en profondeur.

e) Hydrogéologie

Le mamu I-II doit se distinguer du mamu III-IV par une perméabilité de pores plus limitée, mais par une perméabilité de fissure plus marquée, les discontinuités issues de la roche mère étant nettement plus présentes et moins altérées. Cependant, les observations en versant sur Tahiti ne montrent pas fréquemment de venues d'eau significatives dans le mamu I-II.

Comme pour le mamu III-IV, lorsque cette formation est peu profonde, de petits aquifères de fissures peuvent temporairement se mettre en charge favorisant la déstabilisation en versant.

f) Caractéristiques moyennes proposées pour une modélisation géomécanique de stabilité de versant

Au regard des résultats obtenus, et en les confrontant aux observations sur site nous proposons de retenir les caractéristiques qui suivent :

- i) *sur la base d'un critère de Mohr-Coulomb (hypothèse sur le massif consolidé :*
 - $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$
 - $c = 100 \text{ kPa}$ - $\phi = 35^\circ$

Ces valeurs peuvent apparaître très conservatrices mais il convient de remarquer que le massif est recoupé par des discontinuités aux caractéristiques plus médiocres que celles de la matrice seule. On soulignera que ces valeurs pourront être corrigées à la hausse si l'on adopte le parti d'assimiler les niveaux de roche saine aux horizons mamu I-II (c'est ce qui a été fait pour les sites détaillés (cf. rapport n° RP-R4834-FR) pour lesquels nous avons pris $\phi = 45^\circ$).

ii) *sur la base d'un comportement rocheux (hypothèses sur la matrice rocheuse) :*

- $\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$
- $R_c = 2 \text{ MPa}$ - $E = 100 \text{ MPa}$
- $\nu = 0,2$

Enfin, vis-à-vis de la nappe, comme pour le mamu I-II, le choix de son existence et de sa position est déterminant pour le calcul de facteurs de sécurité au glissement.

7.2. TABLEAU RECAPITULATIF

	Mamu III-IV		Mamu I-II	
	médiocre	ferme	Mamu II	Mamu I
Description	<p><u>mamu IV</u> : De couleur le plus souvent ocre ou rouge, la structure ayant disparue. On peut y trouver parfois quelques boules moins altérées.</p>  <p><u>mamu III</u> : Souvent bariolé, sa structure et sa texture sont encore visibles. Il contient déjà une proportion notable de « pâte » emballant les blocs, et les boules en voie d'altération. Il se désagrège à la main.</p> 		<p><u>mamu II</u> : De couleur gris ou ocre, plus rarement rouge, la structure et la texture y sont bien visibles. Assez cohérent, il a la consistance de la craie. Il contient toujours des panneaux beaucoup moins altérés.</p>  <p><u>mamu I</u> : Le plus souvent de couleur grise lorsqu'il provient de lave compacte ou vacuolaire, sa roche mère est bien discernable. Il ne se désagrège pratiquement pas sous la main et contient des boules peu ou pas altérées.</p> 	
Classification ISRM (International Society for Rocks Mechanics)	<p>Mamu IV : correspond au niveau d'altération V - roche complètement altérée</p> <p>Mamu III : correspond au niveau d'altération IV - roche fortement altérée</p>		<p>Le mamu I-II se situe entre les niveaux d'altération II (roche légèrement altérée) et III (roche modérément altérée)</p>	

	Mamu III-IV		Mamu I-II	
	médiocre	ferme	Mamu II	Mamu I
Classification AFTES (Association Française des Travaux En Souterrain)	Mamu IV : associé à la catégorie AM5 - roche complètement altérée Mamu III : associé à la catégorie AM4 - roche très altérée		Le mamu I-II se situe entre les niveaux d'altération AM2 (roche légèrement altérée) et AM3 (roche moyennement altérée)	
Identification	$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ Teneur en fines = 50 à 65 % (~ 90 % à Raiatea) Teneur en argile = 10 à 15 % (~ 40 % à Raiatea) IP \approx 15 % WL \approx 65 % Valeurs au bleu < 1,5 Pas de susceptibilité au retrait-gonflement		$\gamma = 22 \text{ kN/m}^3$	
Résistance au cisaillement ou à la compression	<u>Tahiti :</u> $c' = 20 \text{ kPa}$ $\phi' = 35^\circ$ $c_u = 40 \text{ kPa}$ $\phi_u = 25^\circ$ <u>Raiatea, Huahine en plaine très humide :</u> $c' = 0 \text{ kPa}$ $\phi' = 23^\circ$ $c_u = 20 \text{ kPa}$ $\phi_u = 10^\circ$	$c' = 35 \text{ kPa}$ $\phi' = 35^\circ$ $c_u = 60 \text{ kPa}$ $\phi_u = 25^\circ$	$c = 100 \text{ kPa}$ $\phi = 35^\circ$ $R_c = 2 \text{ MPa}$ $E = 100 \text{ MPa}$ $\nu = 0,2$	
Coefficient de perméabilité	$K = 10^{-7} \text{ m/s}$	$K = 10^{-7} \text{ m/s}$		

	Mamu III-IV		Mamu I-II	
	médiocre	ferme	Mamu II	Mamu I
Essais mécaniques in situ	$q_d = 0,5 \text{ à } 5 \text{ MPa}$ $E_M = 2 \text{ à } 10 \text{ MPa}$ $p_l = 0,3 \text{ à } 2 \text{ MPa}$	$q_d > 10 \text{ MPa}$ jusqu'au refus $E_M = 20 \text{ à } 50 \text{ MPa}$ $p_l > 2 \text{ MPa}$	$q_d > 25 \text{ MPa}$ (refus) $E_M = 30 \text{ à } 120 \text{ MPa}$ $p_l > 2 \text{ MPa}$	
Géophysique	$V_p = 90 \text{ à } 700 \text{ m/s}$ $R = 50 \text{ à } > 1000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (très variable)	$V_p = 600 \text{ à } 1500 \text{ m/s}$ $R < 300 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$	$V_p = 900 \text{ à } 2000 \text{ m/s}$ $R < 300 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$	

Tableau 20 – Caractéristiques moyennes synthétiques

7.3. PRINCIPES GENERAUX EN MATIERE DE TERRASSEMENTS ET DE DRAINAGE

7.3.1. Principaux enseignements issus de l'étude de caractérisation du mamu

Les reconnaissances réalisées sur le mamu dans le cadre du programme Arai ont permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- les altérites volcaniques polynésiennes se révèlent être un matériau d'assez bonne qualité. Géotechniquement, on distingue 3 ensembles principaux :
 - o le mamu III-IV "médiocre"
 - o le mamu III-IV "ferme"
 - o le mamu I-II "rocheux"

On soulignera que dans les règlements des PPR de Polynésie Française :

- o le mamu III-IV est désigné comme "mamu meuble" sans distinction, du fait de la difficulté de le différencier visuellement entre les deux sous classes mécaniques ;
- o le mamu I-II est nommé "mamu" résistant ;
- o la lave saine non altérée a la même dénomination.

- le mamu présente une cohésion en place non négligeable (en moyenne 20 à 100 kPa). La cohésion a tendance à augmenter en profondeur et lorsque le niveau d'altération est moins important ;
- le remaniement du mamu (naturel par érosion mécanique et formation de colluvions, ou artificiel par terrassement d'emprunts) conduit à faire disparaître cette cohésion en place héritée de la roche mère. Il convient donc de ne pas confondre des remblais constitués d'altérites avec le mamu en place ;
- les angles de frottement interne sont assez importants ($\phi' = 35^\circ$) ce qui signifie que le terme de résistance au cisaillement induit par frottement est non négligeable, principalement pour des surfaces de rupture profondes. A contrario, cela conduit également à considérer que l'établissement d'une nappe en charge est extrêmement pénalisant car cela entraîne une chute significative du terme de résistance au cisaillement par mobilisation du frottement, en particulier pour les versants de grande hauteur. Un drainage efficace des versants et de leurs abords est donc essentiel à la bonne stabilité des talus ;
- le mamu dans ses stades les plus évolués est essentiellement limoneux. Malgré une cohésion marquée, ce type de matériau est sensible au ravinement superficiel (érosion capillaire). Il convient donc de protéger les talus meubles mis à nu pour en limiter la dégradation liée au ruissellement ;
- le mamu est un matériau relativement peu perméable. Son drainage dans la masse est complexe et peut se révéler très onéreux (drains forés, éperons, tranchées drainantes, etc...). Il est donc recommandé de maîtriser l'eau à l'origine, c'est-à-dire en limitant les infiltrations, mais également en captant et en évacuant les eaux superficielles ;
- il existe une pseudo "perméabilité de fissures" dans le mamu au droit des discontinuités héritées de la roche mère. Ces fissures, bien que nettement moins perméables que dans la roche mère fracturée, favorisent les circulations d'eau souterraines dans le massif et peuvent constituer de petits aquifères en charge. Il convient donc de ne pas colmater ses fissures en versant ou en talus, mais plutôt d'en favoriser la vidange ;
- le mamu peut être très hétérogène (présence de boules rocheuses, passage rapide latéral ou vertical de faciès), principalement dans les niveaux d'altération intermédiaires. Cela peut conduire à des difficultés de terrassement : emploi localisé de brise roche hydraulique, difficulté de confectionner des surfaces planes uniformes, sous-cavage de talus par extraction de méga-blocs, reliquats de blocs instables dans les parois. Il convient donc d'adapter les profils de terrassement à la réalité du terrain et d'adopter des moyens de terrassement aisément modulables en fonction de la nature du terrain rencontré.

7.3.2. Recommandations

Sur la base des enseignements issus de l'étude précédente, nous avons dressé une liste de recommandations en matière de terrassements du mamu (en déblais) et de maîtrise des eaux. Ces recommandations se retrouvent pour l'essentiel dans les règlements des plans de prévention des risques (PPR) élaborés dans le cadre du programme Araï.

1) Recommandations générales :

- Des études géotechniques de dimensionnement des talus et de définition des modalités de terrassement, ainsi que de maîtrise des eaux sont préconisées, en particulier pour les talus de grande hauteur (> 10 m) ;
- Il convient d'adapter les profils de terrassement à la réalité du terrain (examen des fronts de terrassement en cours de chantier (nature du terrain, venues d'eau, indices d'instabilité) afin, si nécessaire, de modifier les pentes de talus, de mettre en place des moyens de stabilisation, ou de renforcer le drainage ;
- L'entreprise doit adopter des moyens de terrassement aisément modulables en fonction de la nature du terrain rencontré (Brise roche, pelle rétro, ripper, chargeur ou trax, ...) ;
- Le mamu une fois prélevé en terrassement perd l'essentiel de sa cohésion. Il est donc nécessaire de ne pas adopter les mêmes critères de stabilité pour des profils en déblais (mamu en place) et des talus en remblais (mamu remanié).
- Le chargement des crêtes de talus doit être proscrit, sauf si le projet le prévoit explicitement, les profils de terrassements étant alors établis en connaissance de cause ;
- Il est recommandé de protéger les talus de l'érosion par de la végétation couvrante lorsqu'ils sont relativement peu pentus (< 35°), et par d'autres dispositifs adaptés, lorsqu'ils sont raides (géogrille favorisant la végétation, pose de fascines, parement en béton projeté, etc.).

2) Terrassements dans la lave saine rocheuse ou bréchique :

- La pente peut être supérieure à 50° (2,5—3) – à adapter au-delà de 50° en fonction de l'hétérogénéité du matériau - sous réserve que la hauteur du talus soit inférieure ou égale à 6 m.
- Au-delà de 6 m de hauteur, des gradins devront être confectionnés. Ces gradins auront une largeur minimale d'au moins 1/2 de la hauteur de la paroi immédiatement au dessus du redan.
- Pour des terrassements de plus de 20 m de hauteur, une étude géotechnique est très fortement recommandée.
- En cas de risque de chute de blocs généré par l'ouverture du talus, les mesures appropriées doivent être prises : purge, bridage, gunitage, clouage, pose de grillages, de filets, ...

3) Terrassements dans le mamu rocheux (mamu I-II) – ou mamu résistant :

- les talus peuvent atteindre une pente maximale de 50° (2,5—3) sous réserve que leur hauteur soit inférieure ou égale à 6 mètres. Si le versant se révèle très humide (résurgences, suintements, écoulements, etc.), il est recommandé de limiter la pente à 35° (3—2).
- Au-delà de 6 m de hauteur, des gradins doivent être confectionnés. Ces gradins auront une largeur minimale d'au moins la hauteur de la paroi immédiatement au dessus du redan.
- Pour des terrassements de plus de 15 m de hauteur, une étude géotechnique est très fortement recommandée.
- En cas de risque de chute de blocs, d'éboulement ou de glissement généré par l'ouverture du talus, les mesures appropriées doivent être prises : purge, bridage, gunitage, clouage, pose de grillages, de filets, masque poids ou drainant, soutènement, drainage dans la pente...

- 4) Terrassements dans le mamu meuble "ferme" (mamu III-IV ferme) – sous réserve d'avoir procédé à des reconnaissances spécifiques permettant de distinguer le mamu "ferme" du mamu "médiocre". A défaut, pour le mamu III-IV, on adoptera les recommandations du paragraphe suivant :
- les talus peuvent atteindre une pente maximale de 50° (2,5┘3) sous réserve que leur hauteur soit inférieure ou égale à 5 mètres. Si le versant se révèle très humide (résurgences, suintements, écoulements, etc.), il est recommandé de limiter la pente à 35° (3┘2).
 - Au-delà de 5 m de hauteur, des gradins doivent être confectionnés. Ces gradins auront une largeur minimale d'au moins la hauteur de la paroi immédiatement au dessus du redan.
 - Pour des terrassements de plus de 10 m de hauteur, une étude géotechnique est très fortement recommandée.
 - En cas de risque de chute de blocs, d'éboulement ou de glissement généré par l'ouverture du talus, les mesures appropriées doivent être prises : purge, bridage, gunitage, clouage, pose de grillages, de filets, masque poids ou drainant, soutènement, drainage dans la pente...
- 5) Terrassements dans le mamu meuble "médiocre" (mamu III-IV médiocre) – ou dans le "mamu meuble" en général (cf. règlement PPR) à défaut de ne pouvoir distinguer les niveaux "fermes" des niveaux "médiocres" par des reconnaissances spécifiques :
- les talus peuvent atteindre une pente maximale de 45° (1┘1) sous réserve que leur hauteur soit inférieure ou égale à 5 mètres. Si le versant se révèle très humide (résurgences, suintements, écoulements, etc.), il est recommandé de limiter la pente à 25° (2┘1).
 - Au-delà de 5 m de hauteur, des gradins devront être confectionnés. Ces gradins auront une largeur minimale d'au moins deux fois la hauteur de la paroi immédiatement au dessus du redan. A défaut d'études particulières, une largeur forfaitaire de gradin de 10 m est conseillée.
 - Pour des terrassements de plus de 10 m de hauteur, une étude géotechnique est très fortement recommandée.
 - En cas de risque de glissement généré par l'ouverture du talus, les mesures appropriées doivent être prises : purge, masque poids ou drainant, soutènements, drainage dans la pente...
 - Dans les plaines humides, en particulier à Raiatea et Huahine, il est nécessaire de procéder à un drainage important de la zone à terrasser. Les pentes de talus devront être impérativement limitées à 18° (3┘1). Des études géotechniques préliminaires à tout projet de construction sont très fortement conseillées.

6) Terrassements routiers :

- Concernant les terrassements routiers, il est recommandé de terrasser « raide » et prévoir les mesures de soutènement idoines qui par leur seule présence protégeront les talus de l'érosion, plutôt que de taluter plus mollement sans pouvoir drainer et protéger efficacement contre l'érosion les grandes surfaces mises à nu, du fait de la difficulté de les remettre en végétation en particulier. Cependant, au droit des zones manifestement affectées par des instabilités actives, il est impératif d'engager des études géotechniques préalables pour ne pas déstabiliser un peu plus le versant.

7) Maîtrise des eaux :

- Il est indispensable de systématiser les mesures d'accompagnement destinées à maîtriser les écoulements d'eaux pluviales :
 - Création d'une pente minimale de 5 % dans les zones planes afin de favoriser l'évacuation des eaux et limiter l'infiltration ;
 - Mise en place de réseaux de caniveaux ou de fossés drainants pour la collecte et l'évacuation des eaux vers un exutoire neutre ;
 - Lors de travaux en période pluvieuse, prendre des mesures pour prévenir la détérioration des talus (pose de membranes imperméables en parement par exemple) ;
 - Nécessité de ne pas colmater les fissures en versant dans le mamu, en remblayant par-dessus.

8. Conclusions

L'étude de caractérisation des altérites volcanique de Polynésie Française ("mamu") menée dans le cadre du programme Arai repose sur :

- l'exploitation de données d'archives essentiellement fournies par le LTPP ;
- et l'analyse d'un vaste programme d'investigations géotechniques spécifique réalisés sur 6 sites principaux (sites A, B, F & T sur Tahiti, site U sur Raïatea, et site AB sur Huahine).

Cette étude a permis de distinguer trois grands faciès géomécaniques :

- le mamu III-IV médiocre
- le mamu III-IV ferme
- le mamu I-II rocheux

On soulignera que dans les règlements des PPR de Polynésie Française :

- le mamu III-IV est désigné comme "mamu meuble" sans distinction, du fait de la difficulté de le différencier visuellement entre les deux sous classes mécaniques ;
- le mamu I-II est nommé "mamu" résistant ;
- la lave saine non altérée a la même dénomination.

Le mamu III-IV, correspondant aux niveaux les plus évoluées des altérites polynésiennes, est essentiellement composé de limons assez plastiques, présentant une cohésion et un angle de frottement interne non négligeables hérités de la roche mère. A ce titre, les essais en laboratoire et in situ ont mis en évidence des caractéristiques géotechniques sensiblement meilleures que celles usuellement retenues par le LTPP. Par ailleurs, on notera que le mamu, une fois remanié (naturellement ou par terrassement) perd l'essentiel ou la totalité de sa cohésion qui le caractérisait lorsqu'il était en place.

Les faciès médiocres et fermes du mamu III-IV se distinguent relativement bien par des moyens d'investigation classiques tel le pénétromètre dynamique ou le pressiomètre, mais également la sismique réfraction. A contrario, les méthodes géophysiques par panneau électrique se révèlent moins bien adaptées pour clairement distinguer les ensembles géomécaniques.

On remarquera que les altérites de Raiatea et de Huahine se révèlent plus argileuses que sur Tahiti du fait :

- d'une part de l'âge nettement plus marqué des édifices volcanique des îles occidentales conduisant au développement d'altérites plus évoluées ;
- d'autre part de la présence d'intrusions trachy-pholitiques à minéralogie différente des complexes basaltiques de Tahiti, associées à des remontées de fluides hydrothermaux.

Le mamu I-II, correspondant aux niveaux intermédiaires de l'altération des roches volcaniques, se révèle sensiblement plus hétérogène que le mamu III-IV et nettement plus résistant. Comme pour le mamu III-IV, ce matériau présente des caractéristiques mécaniques meilleures que celles usuellement retenues par le LTPP. Le mamu I-II, aisément reconnaissable à l'affleurement, a pour particularité d'être assez délicat à différencier du mamu III-IV ferme à l'aide de certaines méthodes d'investigation classique (pénétrömètre dynamique au refus, géophysique pas assez sélective). L'examen des modules pressiométriques semble être la technique classique la mieux adaptée pour clairement identifier le mamu I-II en profondeur.

D'un point de vue hydrogéologique, le mamu se révèle de manière générale peu perméable ($k_{\text{moy}} = 10^{-7}$ m/s dans la matrice). Cependant, il existe dans la masse, des discontinuités héritées de la roche mère, plus ou moins altérées, constituant des réseaux relativement privilégiés pour la circulation des eaux souterraines. Ces réseaux sont souvent assimilables à de petits aquifères temporaires pouvant se mettre en charge.

En matière de tenue de versant et de talus, le mamu est assimilable à un matériau plutôt "stable", sous réserve que son drainage soit correct. La principale difficulté dans la réalisation de modèles de stabilité est de positionner une éventuelle nappe, cette dernière pouvant très sensiblement affecter les valeurs du coefficient de sécurité calculé. En conséquence, afin de mieux apprécier les conditions de développement de pressions interstitielles dans le mamu génératrices d'instabilités, il serait souhaitable de poursuivre cette analyse par une étude hydrogéologique complète.

Enfin, cette étude générale a permis d'affiner les règles de terrassement et de maîtrise des eaux afin de modéliser les versants mamutisés dans de bonnes conditions de gestion des risques d'instabilité. L'essentiel de ces règles a été reproduite dans le règlement des Plan de Prévention des Risques.



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

Antenne Polynésie
Hauts de Pamatai
BP 60066
98703 FAA'A – POLYNESIE FRANCAISE
Tél. : +689 80.07.45