

Précision de l'aléa mouvements de terrain et inondation pour le projet de construction de l'université à Dembéni

Rapport final

BRGM/ RP-61352-FR

Juin 2012

D. Tardy



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Ce document a été vérifié par : Jacques Deparis date : 12/07/2012

Approbateur :

Nom : Puvilland Pascal

Date : 16/07/2012

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Aléa, mouvements de terrain, inondation, géophysique, Dombéni, Mayotte.

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

Tardy D., 2012 – Précision de l'aléa mouvements de terrain et inondation pour le projet de construction de l'université de Dombéni. Rapport BRGM/RP-61352-FR, 38. p., 34 fig., 3 ann.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le Vice-rectorat de Mayotte, avec la collaboration technique des services compétents de la DEAL de Mayotte, a sollicité le BRGM pour une précision des aléas mouvements de terrain et inondation pour un projet de construction de l'université de Mayotte sur la commune de Dembéni. Le secteur d'étude est concerné par des aléas fort et moyen glissements de terrain accompagnés de chutes de blocs ainsi que d'un aléa fort inondation par débordement de cours d'eau ou ravines.

La végétation dense rencontrée sur le terrain rend difficile la prospection par la méthode naturaliste pour préciser l'aléa mouvements de terrain. La topographie a été utilisée dans un premier temps et ensuite complétée par une analyse des données de résistivité issues de la campagne hélicoptérée de 2010 ainsi que de l'étude géotechnique menée par SEGC en 2012 (n°1871). Le croisement de ces données permet une approche pluridisciplinaire pour la détermination des aléas naturels en caractérisant la nature des matériaux, leur épaisseur, leurs caractéristiques géotechniques ainsi que la morphologie du secteur. Ces informations indiquent que les formations de surface ont des propriétés géotechniques assez faibles pouvant être sujettes à des mouvements de terrain aux vues des fortes pentes. L'aléa fort mouvements de terrain a été prolongé pour tenir compte de ces conclusions.

Une campagne de levés GPS a permis de cartographier avec une précision minimale de 5 m l'axe d'écoulement des ravines permettant de préciser l'aléa inondation. Pour les secteurs inaccessibles, les courbes topographiques issues du MNT 2008 au pas de 1 m et des traitements SIG permettant de localiser le fond des talwegs ont permis d'interpréter l'emplacement des axes de ravinement. La superposition des levés GPS avec l'analyse du MNT de 2008 permet de confirmer le bon positionnement des fonds talwegs issus du traitement du MNT.

Sommaire

1. Contexte du projet.....	7
2. Situation du projet.....	7
2.1. LOCALISATION DU SITE	7
2.2. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DU SITE.....	8
2.2.1. Contexte morphologique	8
2.2.2. Contexte géologique	9
3. Précision des zonages d'après l'atlas des aléas	13
3.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN	13
3.2. INONDATIONS	14
4. Précision des zonages d'aléas.....	15
4.1. ALÉA MOUVEMENTS DE TERRAIN	15
4.1.1. Approche naturaliste	15
4.1.2. Études sismiques	17
4.1.3. Géophysique héliportée.....	18
4.1.4. Précision de l'aléa mouvements de terrain	22
4.2. ALÉA INONDATIONS	23
4.2.1. Flow accumulation.....	23
4.2.2. Secteur aval : plaine d'inondation.....	23
4.2.3. Localisation des ravines	24
4.2.4. Précision de l'aléa inondation	27
5. Conclusion.....	29
6. Bibliographie	31

Liste des figures

Figure 1 – Localisation de la zone d'étude (en rouge). Extrait du Scan 25 de l'IGN.	7
Figure 2 – Topographie (courbes de niveau 1 m) d'après traitement MNT 2008 © IGN et occupation du sol au droit de la zone d'étude. En jaune, tracé du profil topographique présenté à la Figure 3. Fond : Orthophotos 2008 © IGN.	8
Figure 3 – Profil topographique du tracé jaune de la Figure 2 obtenu à l'aide de l'outil Vertical Mapper.....	9
Figure 4 – Carte géologique extraite du rapport de SEGC n°1871 de 2012.	10
Figure 5 – Alluvions de plaine au Nord du terrain. Photos a de la Figure 10	10

Figure 6 – Différence de faciès pour la ravine 1. A gauche, amont de la ravine présentant des blocs décimétriques. A droite, aval de la ravine présentant une matrice dominante.	11
Figure 7 – Colluvions à blocs décimétriques de basalte compris dans une matrice brun-rougeâtre. Photo b de la Figure 10	11
Figure 8 – A gauche, affleurement de saprolite sous une formation d'alluvion grossière. A droite, saprolite présentant un état d'altération faible. Photo c et d de la Figure 10	12
Figure 9 – Affleurement d'allotérite à l'extrême Sud-Est du secteur d'étude. Photo e de la Figure 10	12
Figure 10 – Carte des points d'affleurements issus des visites de terrain et du rapport de SEGC. Les lettres de a à e correspondent aux photographies exposées précédemment.	13
Figure 11 – Extrait du zonage de l'aléa mouvements de terrain de l'atlas des aléas de Dembéni. En rouge, le secteur d'étude. Fond MNT IGN 2008 – Courbes de niveau 1 m.	14
Figure 12 – Extrait du zonage de l'aléa inondation de l'atlas des aléas de Dembéni. Le trait jaune correspond au profil topographique de la Figure 2. Fond MNT IGN 2008 – Courbes de niveau 1 m.....	15
Figure 13 - Carte des pentes d'après traitement du MNT de l'IGN sous ArcGIS	16
Figure 14 – Pentes moyennes du secteur et végétation observée sur le terrain.....	16
Figure 15 – Pentes fortes observées au droit du projet recouvertes de bananiers. A gauche, point A et à droite point B de la Figure 14.	17
Figure 16 - Colonnes de sol au sens des EC8 obtenues par des études sismiques. Vs : vitesse des ondes S, Vp : vitesse des ondes P., γ : masse volumique. BRGM/RP-61170-FR	17
Figure 17 - Données de résistivités en Ohm.m acquises sur le secteur d'étude	18
Figure 18 – Carte de résistivité en Ohm.m en surface du secteur d'étude. Extrapolation selon les données de la Figure 17	19
Figure 19 – Zones en subsurface (0 à 5 m de profondeur) du secteur d'étude ayant des résistivités inférieures à 20 Ohm.m et des pentes supérieures à 20°.	20
Figure 20 – Coupes en 3 dimensions représentant la résistivité en Ohm.m pour le secteur d'étude.	21
Figure 21 – En haut, extrait de l'atlas des aléas de la commune de Dembéni. En bas, cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'après le présent avis. Fond orthophotos IGN. Courbes de niveau 1 m.	22
Figure 22 – Localisation des fonds de talweg avec l'outil Flow Accumulation du SIG ArcGIS avec superposition (en bleu) de l'aléa inondation extrait de l'Atlas des aléas.	23
Figure 23 – Secteur aval du projet. La plaine d'inondation est gorgée d'eau suite à un évènement pluvial.	24
Figure 24 – Principe de l'ordre de Strahler	25
Figure 25 – Localisation des photographies illustrant les axes de ravinement principaux observés sur le terrain	25
Figure 26 – Photographies 1-2 et 3 de la ravine 1 (cf. Figure 25).	26
Figure 27 – Photographies 4-5 et 6 de la ravine 2 (cf. Figure 25).	26
Figure 28 – Photographies des ravines 3, 5 et 6, avec respectivement les photographies associées 8, 7 et 9 (cf. Figure 25).	27

Figure 29 – En haut, extrait de l'Atlas des aléas de la commune de Dembéni. En bas, cartographie de l'aléa inondation d'après le présent avis. Fond orthophotos IGN. Courbes de niveau 1 m.	28
Figure 30 – Superposition du fond des talwegs obtenus par l'analyse de fmx avec la cartographie de l'aléa inondation d'après le présent avis.....	29
Figure 31 – Loc synthétique des sondages SPs1, SPs3, SPs5 et SPs5 à la carrière issue de l'étude n°1871 de SEGC.....	33
Figure 32 - Loc synthétique du sondage SPs2 à la carrière issue de l'étude n°1871 de SEGC.....	34
Figure 33 - Classes de matériaux définies en concertation entre CETE/DEAL/BRGM en 2008, extrait des PPR	35
Figure 34 - Critères de distinction entre aléa moyen et fort de type mouvements de terrain d'après les PPR	36

Liste des annexes

Annexe 1 Localisation des sondages SEGC	32
Annexe 2 Lithologie d'après les sondages SEGC	33
Annexe 3 Méthodologie PPR de la classification de l'aléa mouvements de terrain	35

1. Contexte du projet

Dans le cadre d'un projet de construction de l'université de Mayotte sur la commune de Dembéni, le Vice-Rectorat de Mayotte, avec la collaboration technique des services compétents de la DEAL de Mayotte, a sollicité le BRGM pour préciser la carte de l'aléa mouvements de terrain et inondation au droit de la zone de projet.

Le secteur a fait l'objet, début 2012, d'une étude par le BRGM concernant l'évaluation de l'aléa sismique (BRGM/RP-61170-FR). Cette dernière a nécessité l'implantation de sondages qui ont été effectués par SEGC (Dossier n°1871, 2012). Les données issues de ce projet seront utilisées dans cette expertise. De plus, une campagne de géophysique hélicoptérée a été réalisée par le BRGM fin 2010 permettant d'avoir des données de résistivités à différentes profondeurs du sous-sol (modèle 3D). Compte tenu de l'accès difficile de la zone étudiée, ces données seront exploitées afin d'extrapoler la nature et l'épaisseur des matériaux.

Deux visites de terrain ont été effectuées en date du 11/04/2012 et 24/05/2012 par D. Tardy (BRGM de Mayotte).

2. Situation du projet

2.1. LOCALISATION DU SITE

Le secteur d'étude est localisé à l'Ouest de Dembéni sur le pied du flanc Nord du relief Kombéni. La commune de Dembéni se situe au Centre-Est de Mayotte (cf. Figure 1). La parcelle étudiée a une superficie de 0,2 km². Les altitudes minimales et maximales sont respectivement de 9 m et 73 m avec une pente moyenne de 15°.



Figure 1 – Localisation de la zone d'étude (en rouge). Extrait du Scan 25 de l'IGN.

2.2. SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE DU SITE

2.2.1. Contexte morphologique

La zone d'étude se situe au pied du versant Nord du relief Kombéni. De par sa morphologie, le secteur d'étude peut être séparé en trois zones principales (cf. Figure 3) :

- au Nord (zone A), une zone basse avec des pentes inférieures à 10° ;
- au centre (zone B), les altitudes intermédiaires comportent des pentes allant de 10 à 25° ;
- au Sud (zone C), les altitudes sont supérieures de avec des pentes supérieures à 25°.

La morphologie du site indique la présence de ravines avec des embranchements développés au Sud qui se réunissent pour donner en partie centrale trois ravines distinctes (cf. Figure 3). L'ensemble de ces ravines a une direction Nord-Sud avec une direction d'écoulement vers le Nord. Au Nord du terrain est identifiée une zone de replat qui correspond à la plaine d'inondation de la rivière Mro Oua Dembéni. Une seconde zone de replat est également localisée au niveau de l'aval de la ravine 1.

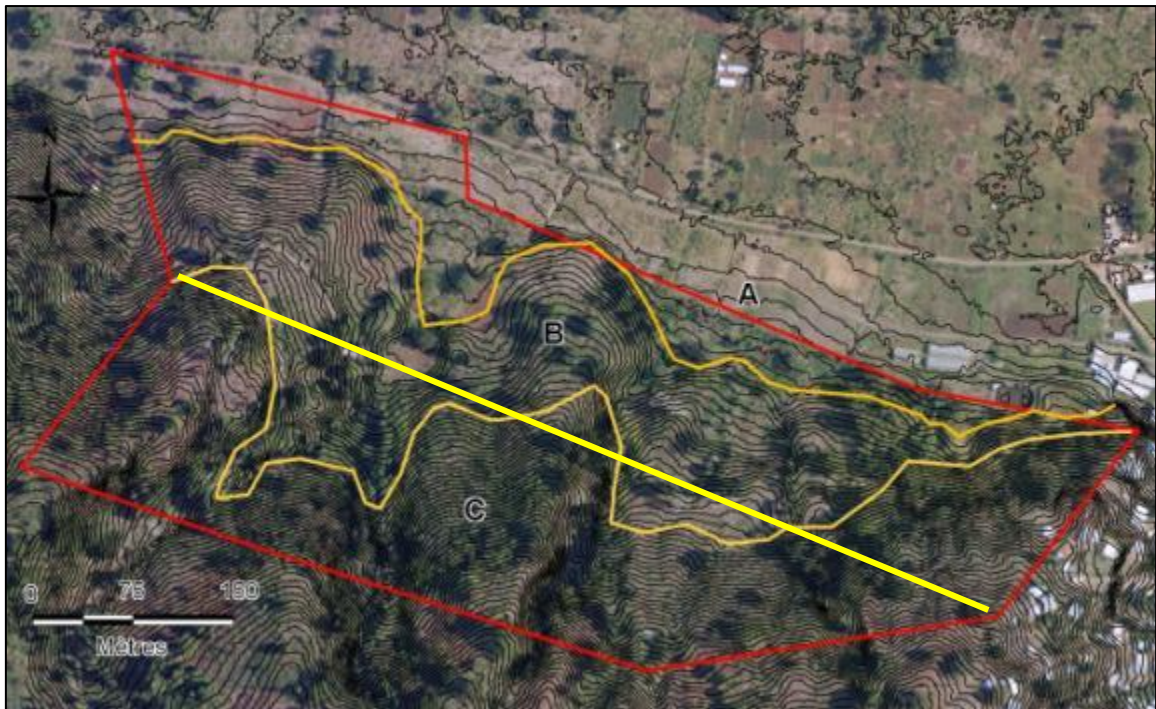


Figure 2 – Topographie (courbes de niveau 1 m) d'après traitement MNT 2008 © IGN et occupation du sol au droit de la zone d'étude. En jaune, tracé du profil topographique présenté à la Figure 3. Fond : Orthophotos 2008 © IGN.

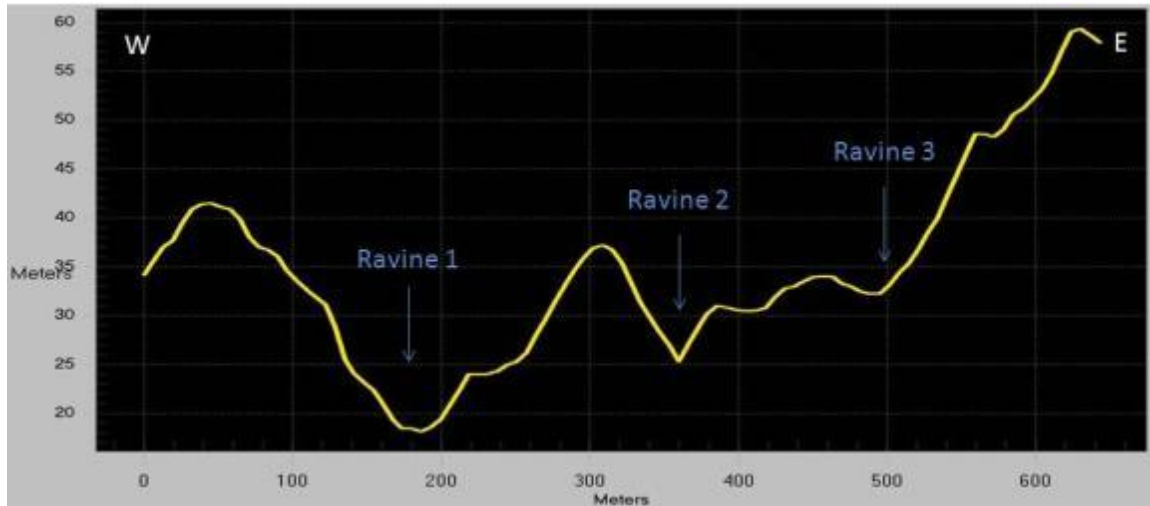


Figure 3 – Profil topographique du tracé jaune de la Figure 2 obtenu à l'aide de l'outil Vertical Mapper.

2.2.2. Contexte géologique

a) Carte géologique

D'après les cartes morpho-pédologique et géologique de Mayotte au 1/50 000^{ième}, la zone d'étude s'insère dans trois unités morpho-pédologique :

- **Zone amont (partie Sud)** : formation volcanique de basaltes ankaramitiques souvent altérés en boule, formant l'ossature du relief, coulée de fond de vallée en inversion de relief (Mio-Pléistocène).
On y retrouve ainsi la présence d'une couche de colluvions de surface (matrice limoneuse ferrallitique et blocs sains de taille variable). Des seuils rocheux peuvent localement apparaître. Sous ces matériaux, un matériau intermédiaire est observé, l'altérite, pouvant présenter des fortes épaisseurs avant d'atteindre la roche mère.
- **Zone centrale** : formations de rivière. On y retrouve des alluvions et petites accumulations de déjection (blocs, limons, argiles, accumulations détritiques, souvent ferrallitiques). Ces formations correspondent à des glaciais d'épandage selon la carte morphopédologique.
- **Zone aval (partie Nord)** : formation sédimentaire : plaine alluviale ou littorale (alluvions fines, généralement limoneuses, souvent ferrallitiques).

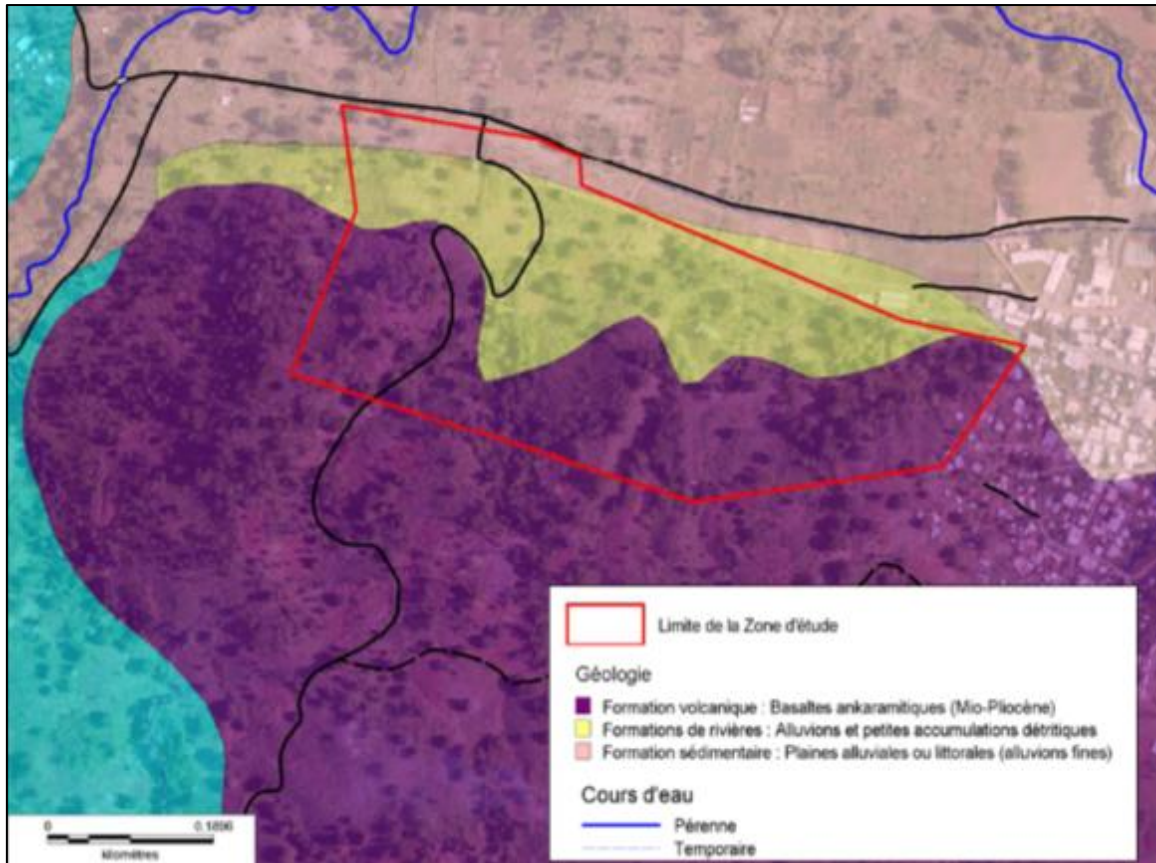


Figure 4 – Carte géologique extraite du rapport de SEGC n°1871 de 2012.

b) Formations géologiques observées

➤ Alluvions fines

Ces faciès alluvionnaires (cf. Figure 5) correspondent à des dépôts sédimentaires très fins de matériaux remaniés. Ils se composent de sables, d'argiles et de limons et comportent quelques éléments polygéniques altérés millimétriques à centimétriques. Ils présentent une couleur rougeâtre indiquant leur caractéristique ferralitique. Ces formations caractérisent un milieu de dépôts calme correspondant dans le contexte géographique de l'étude à une plaine d'inondation.

Ces faciès sont localisés au Nord du secteur avec une extension latérale importante et sur des faibles pentes.



Figure 5 – Alluvions de plaine au Nord du terrain. Photos a de la Figure 10

➤ Alluvions grossières

Les alluvions grossières correspondent à des dépôts sédimentaires de matériaux remaniés. Ces formations se localisent au sein des ravines et montrent une évolution

de faciès de l'amont vers l'aval (cf. Figure 6). Des blocs décimétriques à métriques sont observés en amont tandis qu'en aval la matrice limoneuse est dominante.



Figure 6 – Différence de faciès pour la ravine 1. A gauche, amont de la ravine présentant des blocs décimétriques. A droite, aval de la ravine présentant une matrice dominante.

➤ Colluvions

Il s'agit de dépôts de versant et de bas de pente issus du démantèlement, sous l'action de l'érosion et de la gravité, des parties hautes des versants. Les colluvions localisées au droit du projet présentent des blocs de taille décimétriques principalement compris dans une matrice rougeâtre à composante argileuse (cf. Figure 7).



Figure 7 – Colluvions à blocs décimétriques de basalte compris dans une matrice brun-rougeâtre. Photo b de la Figure 10

➤ Sapolite

Une sapolite (ou altérite) correspond au premier niveau d'altération de la roche volcanique. La structure et le volume de la roche mère est conservée (fentes,

fractures,...), en revanche l'altération crée une perte de matière et par conséquent de masse. Ces formations comportent une fraction argileuse qui leur confère généralement une couleur ocre à rouge.

D'après la carte géologique de Stilges, 1981, les altérites du terrain étudiées sont issues d'un basalte ankaramitique d'âge Mio-Pliocène. Les saprolites rencontrées montraient un état d'altération peu avancé au sud (cf. Figure 8) du secteur contrairement à celles observées en partie centrale. Ces altérites composent le substratum du secteur étudié, sur lesquelles les dépôts alluvionnaires et colluvionnaires se sont mis en place.



Figure 8 – A gauche, affleurement de saprolite sous une formation d'alluvion grossière. A droite, saprolite présentant un état d'altération faible. Photo c et d de la Figure 10

➤ Allotérite

Les allotérites correspondent au dernier stade d'altération des roches volcaniques. Ces formations ont été rencontrées à l'extrémité Sud-Est du secteur d'étude, dans les parties sommitales (cf. Figure 9). Ces matériaux sont très friables, leur caractéristiques géotechniques sont faibles avec, en l'occurrence, une faible cohésion.



Figure 9 – Affleurement d'allotérite à l'extrême Sud-Est du secteur d'étude. Photo e de la Figure 10

➤ Synthèse des données

Les affleurements décrits précédemment et les données géologiques issues du rapport de SEGC ont été combinés sur la Figure 10 afin de visualiser la localisation de l'ensemble des formations identifiées.

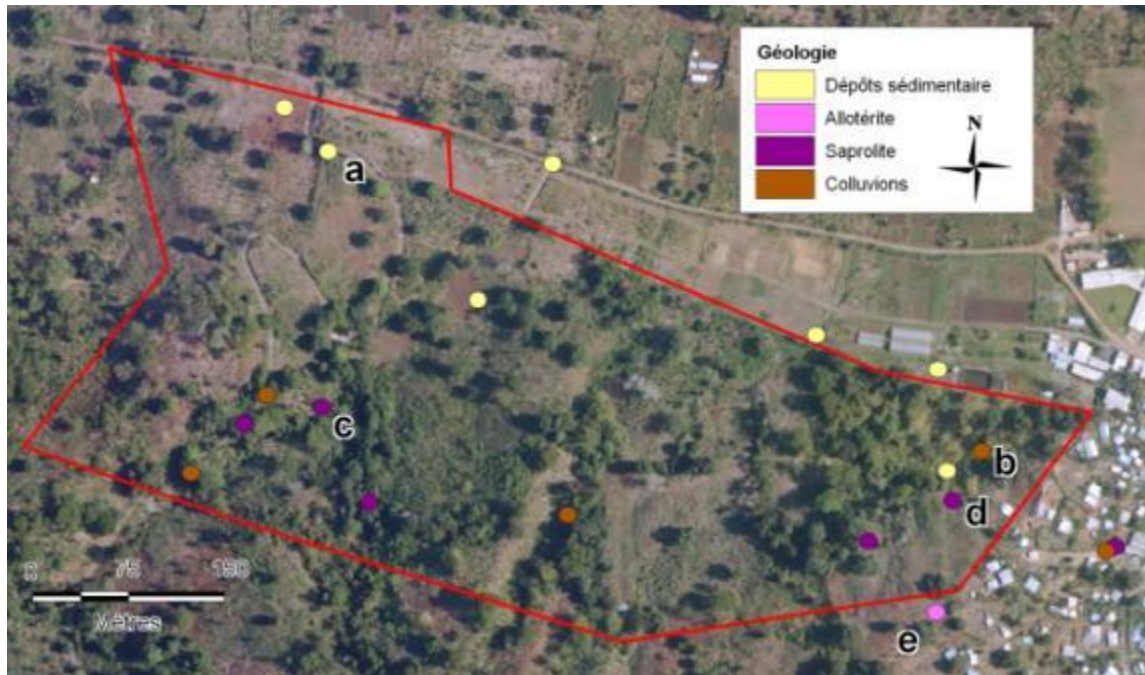


Figure 10 – Carte des points d'affleurements issus des visites de terrain et du rapport de SEGC.
Les lettres de a à e correspondent aux photographies exposées précédemment.

3. Précision des zonages d'après l'atlas des aléas

3.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN

La carte de l'aléa mouvements de terrain en vigueur sur le territoire de la commune de Dembéni est celle de l'Atlas des aléas, qui date de 2004.

La méthodologie utilisée dans la cartographie de l'aléa mouvements de terrain lors d'une expertise sur site correspond à celle employée dans le cadre de l'élaboration des Atlas des aléas et plus récemment pour l'élaboration des cartes d'aléas des premiers PPR de l'île de Mayotte. La démarche utilisée pour évaluer l'aléa mouvements de terrain, à l'échelle du 1/10 000 en zones à enjeux, consiste en une approche naturaliste de type expertise excluant le recours à des investigations lourdes (sondages, essais de laboratoire, etc.) ainsi qu'à des études spécifiques (modélisation trajectographique, etc.).

Ainsi le zonage de l'aléa mouvements de terrain établi à l'échelle du 1/10 000 dans le cadre de l'Atlas des aléas de la commune de Dembéni (cf. Figure 11) fait état pour la zone d'étude :

- d'un aléa fort mouvements de terrain dominants accompagnés de chutes de blocs pour deux zones au Sud et à l'extrême Est ;

- d'un aléa moyen mouvements de terrain dominants accompagnés de chutes de blocs pour la majeure partie de la zone d'étude.

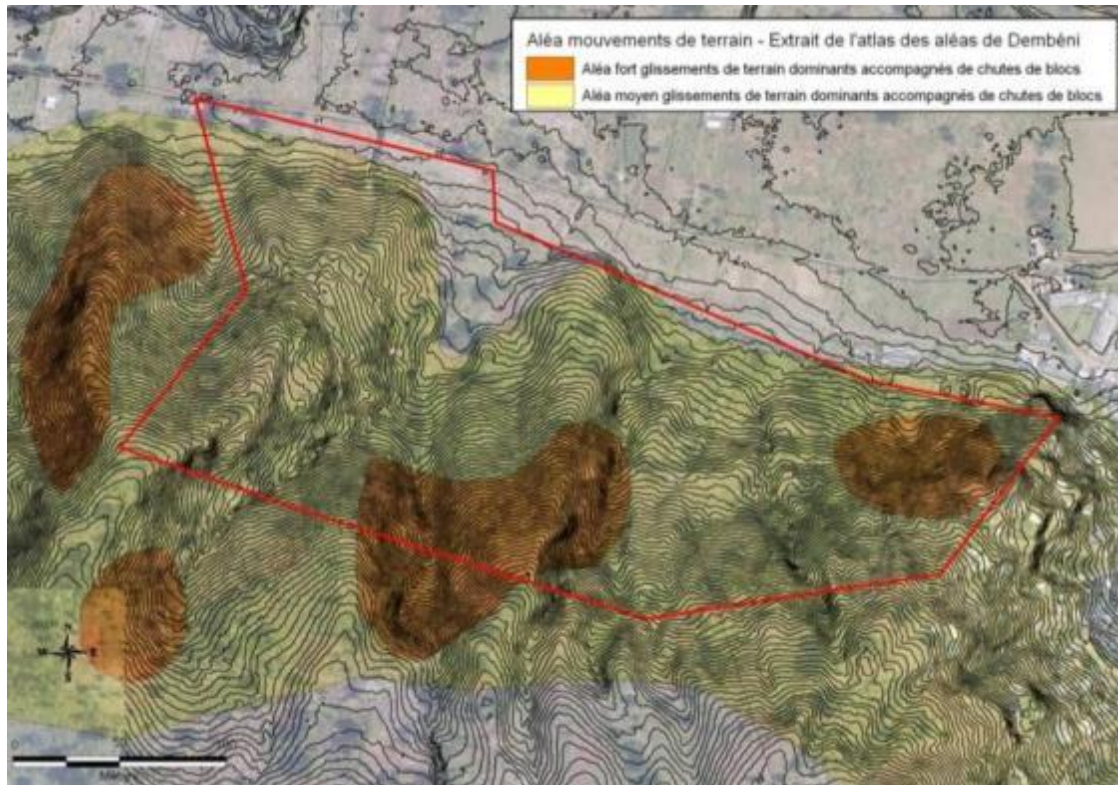


Figure 11 – Extrait du zonage de l'aléa mouvements de terrain de l'atlas des aléas de Dombéni. En rouge, le secteur d'étude. Fond MNT IGN 2008 – Courbes de niveau 1 m.

3.2. INONDATIONS

Le zonage de l'aléa inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine établi à l'échelle du 1/10 000 dans le cadre de l'Atlas des aléas de la commune de Dombéni fait état pour la zone d'étude (cf. Figure 12) :

- d'un aléa fort inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine ;
- d'un aléa faible inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine à la limite Nord du secteur d'étude.

La bande d'aléa fort de 20 m de large (10 m de part et d'autre de l'axe) correspond à une bande forfaitaire représentant le lit mineur du cours d'eau et les zones de débordement éventuelles.

La méthodologie utilisée lors d'une expertise sur site dans la cartographie de l'aléa inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine correspond à celle employée dans le cadre de l'Atlas des aléas. Il s'agit d'une approche naturaliste du type expertise excluant le recours à des modélisations hydrauliques. Les reconnaissances de terrain visent à préciser le positionnement effectif des axes d'écoulement et à déterminer (selon une approche hydrogéomorphologique) les zones d'écoulement et de débordement.

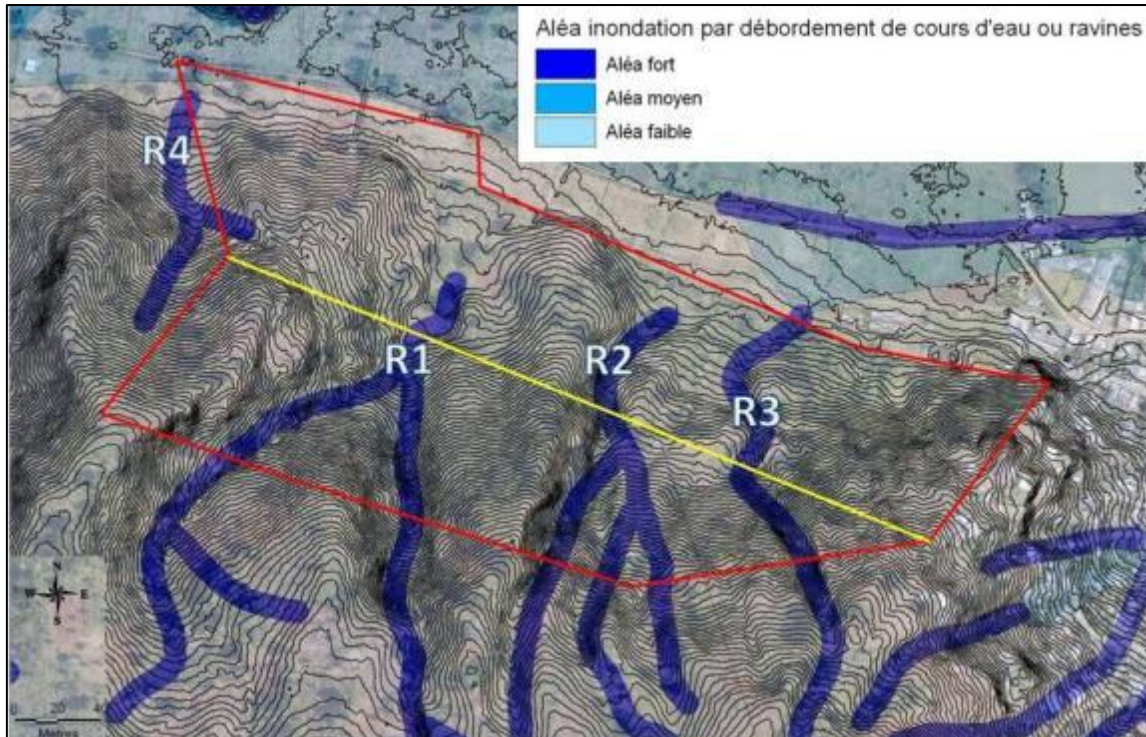


Figure 12 – Extrait du zonage de l'aléa inondation de l'atlas des aléas de Dembéni. Le trait jaune correspond au profil topographique de la Figure 2. Fond MNT IGN 2008 – Courbes de niveau 1 m.

4. Précision des zonages d'aléas

4.1. ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN

4.1.1. Approche naturaliste

L'analyse naturaliste de l'aléa mouvement de terrain a été limitée à cause de la forte densité de végétation du secteur.

Localement, des parcelles cultivées comportaient fréquemment des blocs décimétriques (cf. Figure 15). Ces blocs sont autochtones, ils proviennent de l'altération en place des roches volcaniques. Ils constituent un risque de chutes de blocs qu'il faudra considérer lors de la phase travaux.

Localement il a été observé des plantations de bananiers, ce qui est un facteur aggravant pour le risque mouvements de terrain puisque il participe au ruissellement de l'eau et à l'altération des formations de subsurface. Ces secteurs sont repérés sur la Figure 14.

Afin de localiser les secteurs potentiellement instables, des profils topographiques ont été établis à l'aide du logiciel Vertical Mapper. De nombreux secteurs comportent des pentes supérieures ou égales à 30° sur au minimum 5 m d'emprise, ils sont repérés sur la Figure 14 à partir du traitement du MNT (cf. Figure 13). Ces valeurs de référence proviennent de la méthodologie PPR de classification de l'aléa mouvements de terrain exposée en Annexe 3. Une analyse de la nature des terrains à l'aide d'essais

géotechniques couplée aux données géophysiques pour spatialiser les zones potentiellement instable, permettra de définir le degré d'aléa à appliquer selon la méthodologie PPR (cf. Annexe 3).

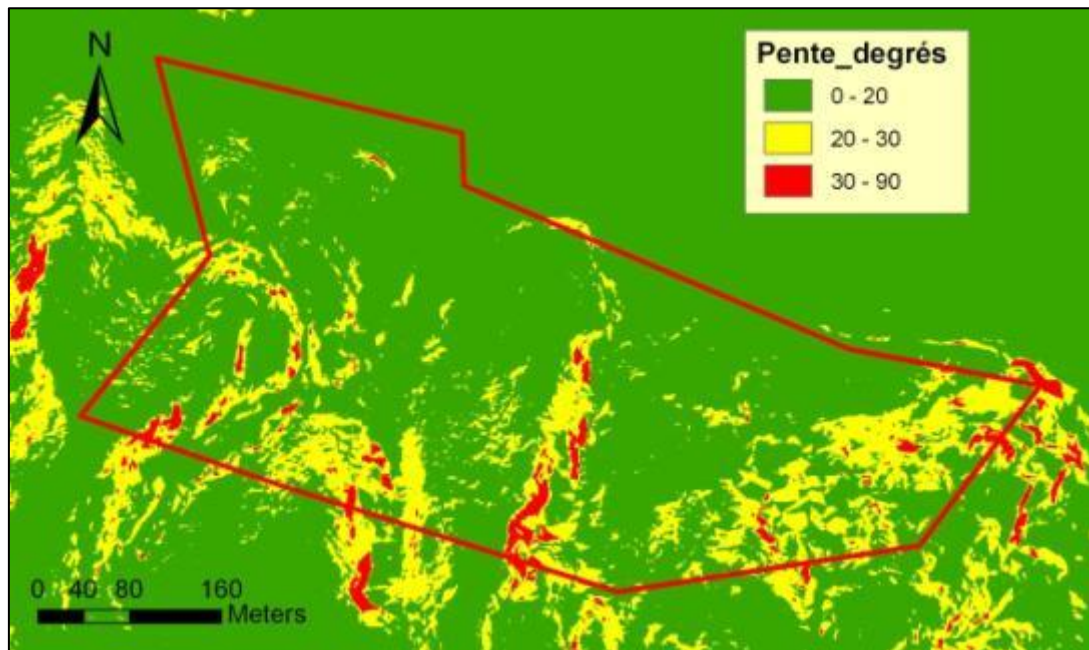


Figure 13 - Carte des pentes d'après traitement du MNT de l'IGN sous ArcGIS

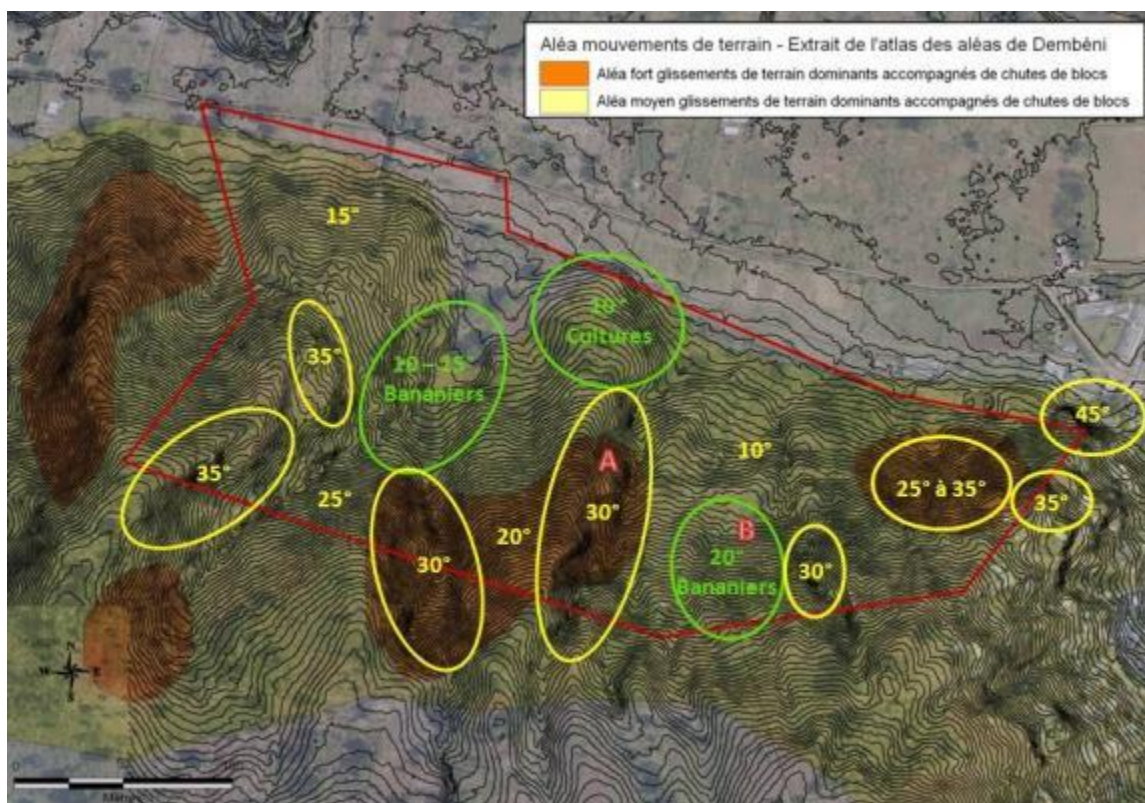


Figure 14 – Pentes moyennes du secteur et végétation observée sur le terrain



Figure 15 – Pentes fortes observées au droit du projet recouvertes de bananiers. A gauche, point A et à droite point B de la Figure 14.

4.1.2. Etudes sismiques

Des profils SASW et des mesures H/V ont été effectués en décembre 2011 par le BRGM (J. Rey, 2012. BRGM/RP-61170-FR) pour étudier l'aléa sismique au droit du secteur d'étude. Ces données ont permis d'établir des colonnes de sol (cf. Figure 16) à partir des données des sondages SEGC (cf. Annexe 1 et Annexe 2). Les vitesses des ondes sismiques (V_s pour les ondes de cisaillement et V_p pour les ondes de compression) permettent de caractériser des horizons de sols. Les masses volumiques ont été définies par l'étude sismique de façon théorique.

Zone amont				
Formation	Epaisseur colonne (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	γ (kN/m ³)
Colluvions	2	250	470	17
Altérites	10	250	470	18
Altérites	5	350	655	18
Altérites	10	420	785	18
Altérites	5	500	935	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Zone centrale et avale				
Formation	Epaisseur colonne (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	γ (kN/m ³)
Alluvions fines	4	280	470	18
Alluvions fines	3	220	415	18
Altérites	5	300	560	18
Altérites	10	520	985	19
Substratum	Infini	800	1500	22

Figure 16 - Colonnes de sol au sens des EC8 obtenues par des études sismiques. V_s : vitesse des ondes S, V_p : vitesse des ondes P., γ : masse volumique. BRGM/RP-61170-FR

D'après ces sondages géophysiques, la zone amont comporte un niveau colluvionnaire de 2 m d'épaisseur qui repose sur des altérites. Ces altérites ont des caractéristiques qui s'améliorent en fonction de la profondeur (selon les vitesses V_s et V_p). Cependant, le premier niveau d'altérites, en-dessous des colluvions, a des propriétés identiques à ces dernières sur une dizaine de mètre.

La zone centrale et aval présente sur 7 m d'épaisseur des alluvions fines ayant de faibles vitesses V_s et V_p .

Ainsi, les données sismiques indiquent que les matériaux de la zone amont et aval peuvent être considérés comme faible d'un point de vue géotechnique sur, respectivement, 12 m et 7 m depuis la surface.

Une étude antérieure (J. Rey, 2006. BRGM/RP-54960-FR) établie pour Dembéni concluait à la présence de matériaux altérés sur 10-15 m d'épaisseur ce qui se corrèle bien avec l'étude de 2012.

4.1.3. Géophysique héliportée

En 2010, une campagne de géophysique héliportée d'électromagnétisme a été entreprise par le BRGM et la DEAL permettant d'obtenir les variations de résistivité jusqu'à une profondeur pouvant atteindre 250 m. Ces valeurs de résistivité peuvent renseigner sur la nature de la roche et les épaisseurs des formations en croisant les données avec des observations de terrain ainsi que des logs géologiques issus de forages.

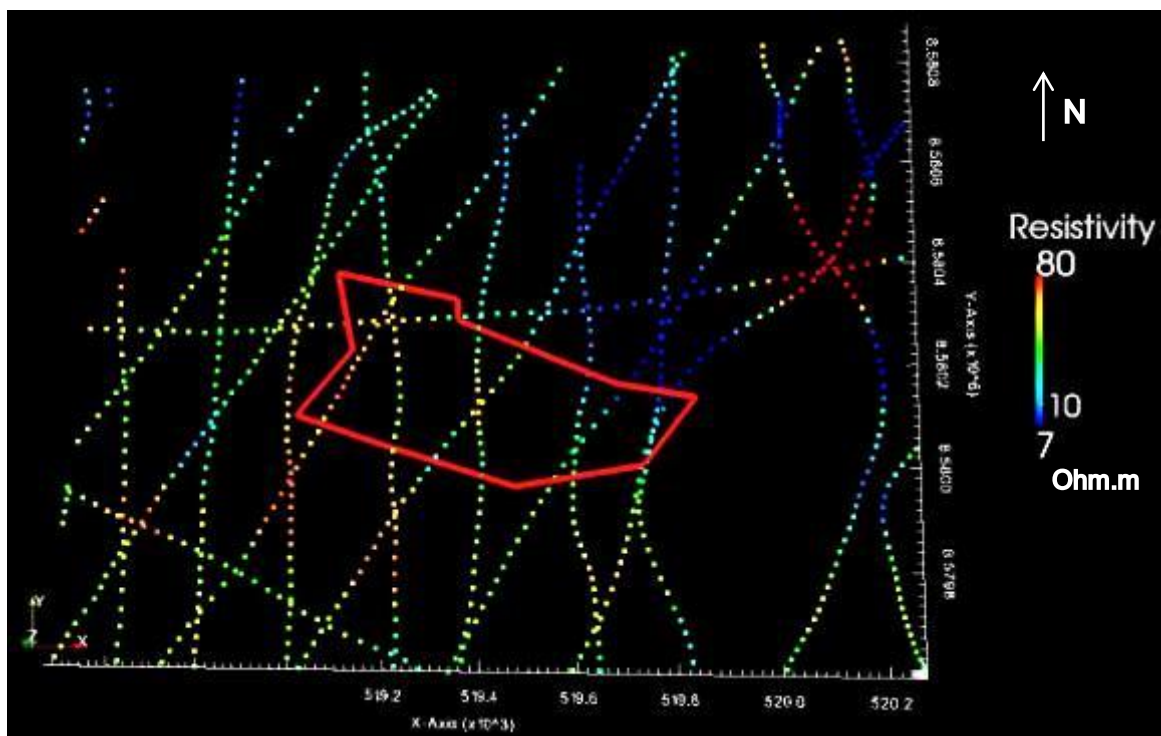


Figure 17 - Données de résistivités en Ohm.m acquises sur le secteur d'étude

Ces données sont utilisées dans le cadre de cette étude pour estimer l'épaisseur des colluvions reposant sur les altérites. Ces indications permettront *in fine* de préciser la cartographie de l'aléa mouvements de terrain au droit du projet.

Afin d'obtenir une visualisation optimale de la résistivité, l'échelle de couleur a été adaptée aux valeurs au droit du projet avec une échelle logarithmique.

Les points de mesures de résistivité sont localisées sur la Figure 17, une interpolation à l'aide d'un opérateur de type krigeage a été réalisée afin d'obtenir une carte en 3D des résistivités qui est exposée sur la Figure 18.

La comparaison de ces deux cartes permet de constater que la densité de point au droit du secteur est suffisante pour interpréter la carte extrapolée (cf. Figure 17 et Figure 18).

Il est observé de fortes résistivités dans le secteur Ouest du terrain (cf. Figure 18). Ces matériaux résistants correspondraient à des faciès très altérés approchant des allotérites. En revanche, le secteur Nord-Est a une gamme de résistivité inférieure. Les formations correspondantes seraient les alluvions de plaine. Le signal de faible résistivité s'étend selon un axe NW-SE s'assimilant à la rivière Mro Oua Dembéni.

Les zones cartées en aléa fort mouvements de terrain d'après l'Atlas des aléas de Dembéni se superposent à des secteurs ayant des gammes de résistivités intermédiaires à faibles. Les zones à fortes résistivités ne sont pas concernées par un aléa fort.

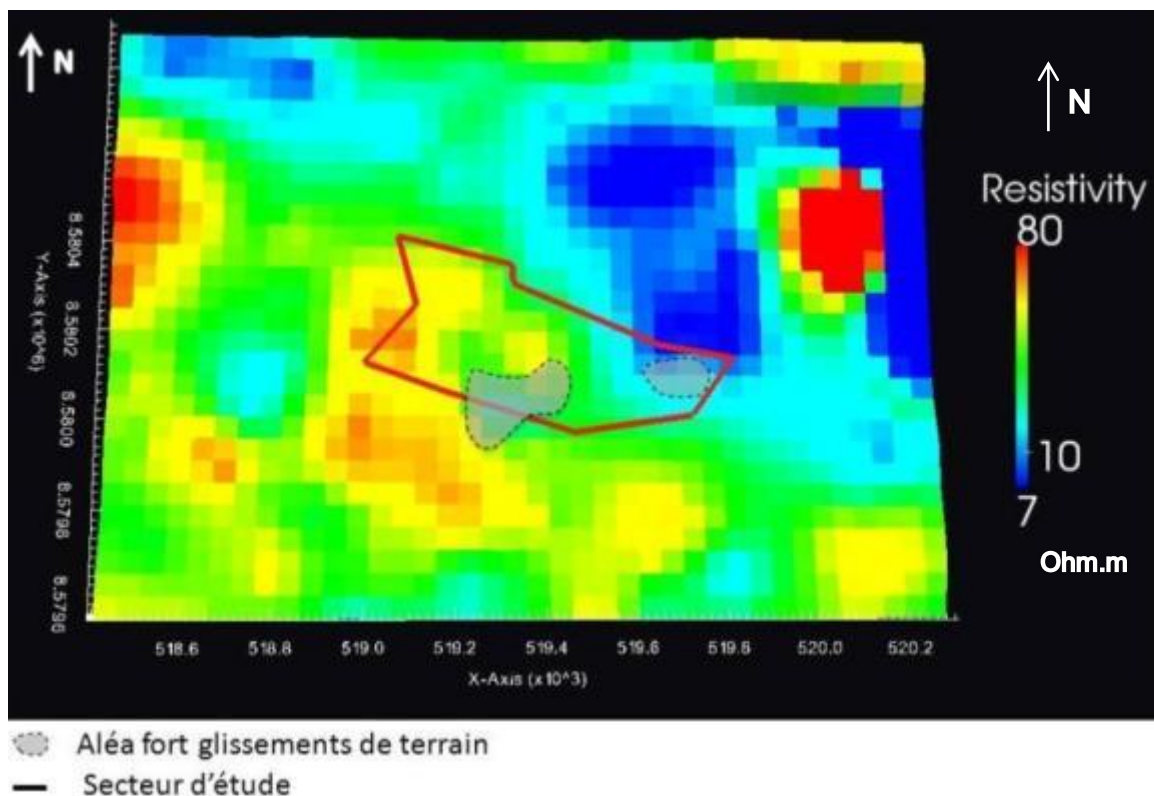


Figure 18 – Carte de résistivité en Ohm.m en surface du secteur d'étude. Extrapolation selon les données de la Figure 17

Afin de repérer les zones ayant des caractéristiques favorables aux instabilités, les données de résistivité ont été combinées avec les pentes moyennes (grille de 50mx50m) calculées à partir du MNT de l'IGN pour la tranche 0-5 m de profondeur (cf. Figure 19). Les seuils qui ont été appliqués dérivent du croisement des zones instable avec le MNT et les grilles de résistivités. Les valeurs retenues sont des résistivités

inférieures à 20 Ohm.m et des pentes supérieures à 20°. Il est constaté que les secteurs obtenus se superposent avec les zones cartographiées en aléa fort glissements de terrain accompagnés de chutes de blocs. En revanche, d'autres zones potentiellement instables sont repérées par cette méthode. Ces critères ont été de nouveaux appliqués pour les grilles de résistivités ayant des profondeurs allant jusqu'à 50 m dans le but de cartographier la profondeur des zones potentiellement instable. Il en résulte que l'ensemble des zones identifiées précédemment (cf. Figure 19) présentent des résistivités inférieures à 20 Ohm.m jusqu'à 15 m de profondeur au moins.

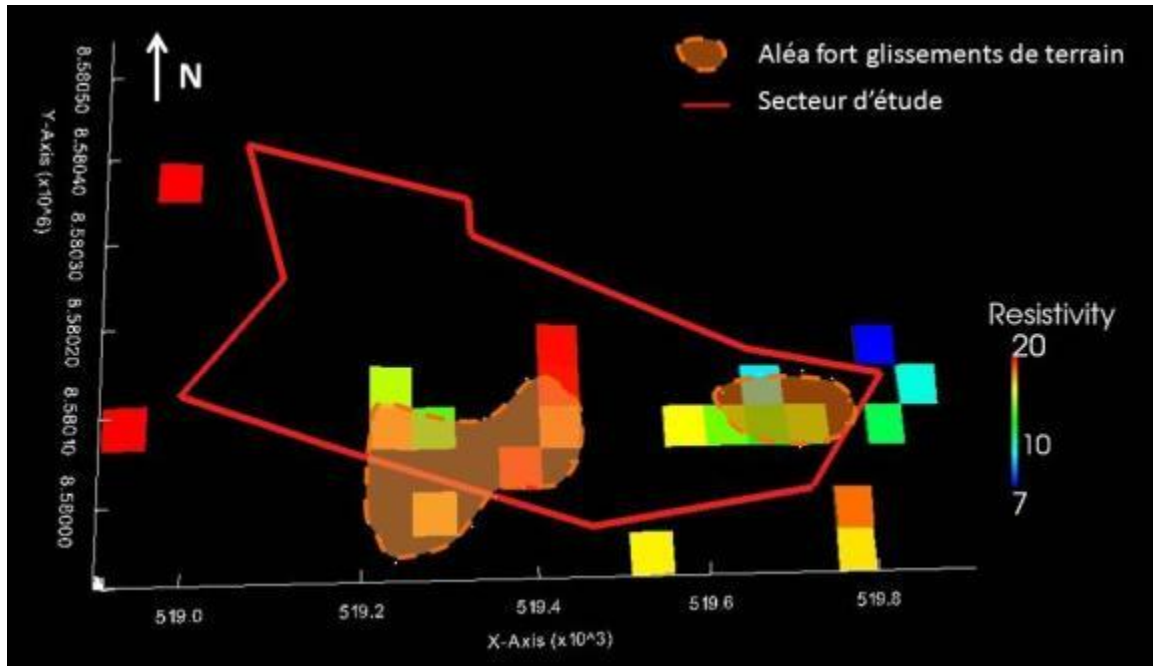


Figure 19 – Zones en subsurface (0 à 5 m de profondeur) du secteur d'étude ayant des résistivités inférieures à 20 Ohm.m et des pentes supérieures à 20°.

Ces premières observations indiqueraient que l'aléa fort mouvements de terrain devrait être étendu sur ces zones à faibles caractéristiques géotechniques. Afin de confirmer cette approche, des profils ont été réalisés en 3D, permettant d'apprécier la continuité latérale des formations composant les reliefs en termes de résistivité.

Cette vue en 3 dimensions met en avant trois niveaux de résistivités différentes pour les 50 premiers mètres. Les sondages SEGC indiquent que les altérites (allotérite et saprolite confondues) sont rencontrées à une profondeur moyenne de 1,3 m pour les sondages SPs2 et ST2 (zone amont) et à 7,5 m d'après les sondages SPs1, SPs3, SPs4, SPs5 et ST1 (zone en aval), altérites recouvertes respectivement de colluvions et d'alluvions de plaine. La localisation de ces sondages et les coupes synthétiques associées sont présentées en Annexe 1 et en Annexe 2.

On associe alors pour ces profondeurs :

En partie amont :

- 0 à 15 m : colluvions ou allotérite
- 15 à 30 m : saprolite II
- 30 à 50 m : début d'altération de la roche saine (saprolite I)
- > 50 m : roche saine

En partie aval :

- 0 à 10 m : dépôts de plaine
- 10 à 30 m : allotérite à saprolite II
- 30 à 50 m : début d'altération de la roche saine (saprolite I)
- > 50 m : roche saine

L'ensemble des formations de subsurface (0 à 15 m de profondeur) correspondrait à des faciès à faibles caractéristiques géotechniques (colluvions/allotérite) d'après les coupes de résistivité de la Figure 20. Ces informations couplées avec les résultats de la Figure 19 indiquent que 450 000 m³ (30 000 m² x 15 m) de matériaux au droit du secteur d'étude peuvent être considérés comme instables.

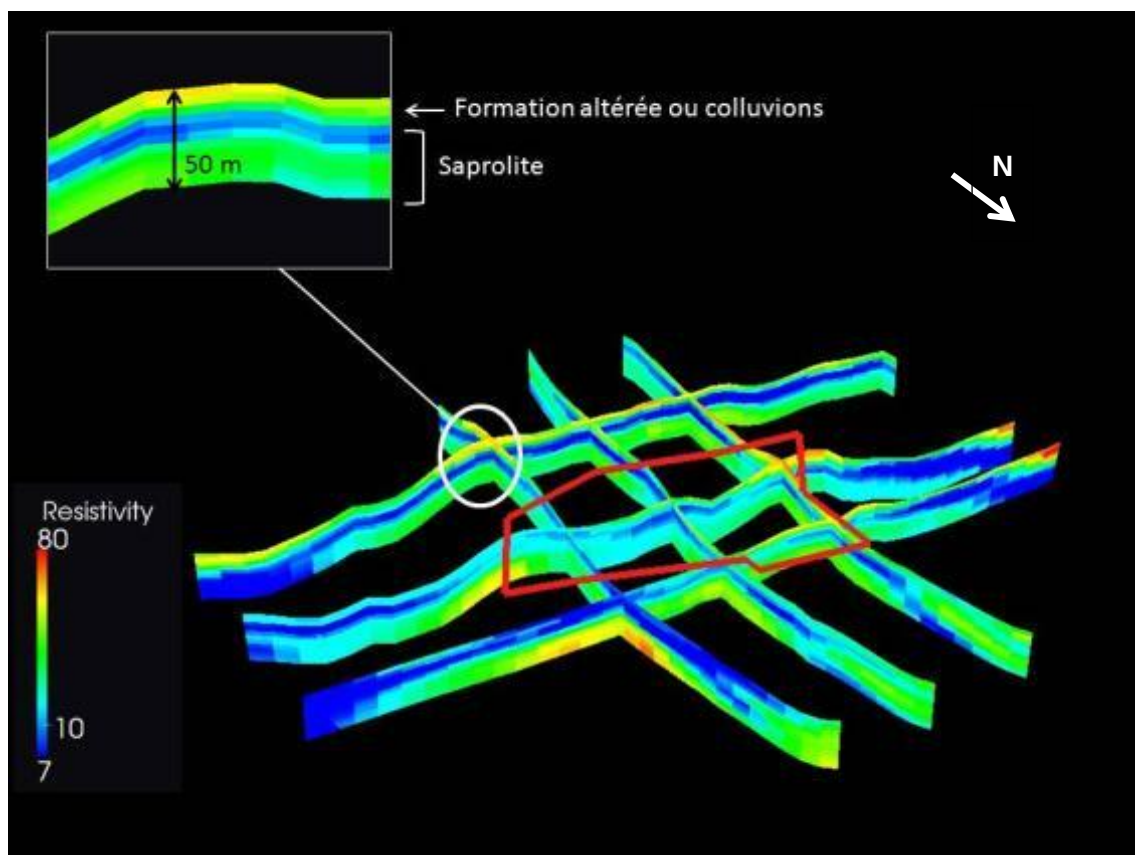


Figure 20 – Coupes en 3 dimensions représentant la résistivité en Ohm.m pour le secteur d'étude.

4.1.4. Précision de l'aléa mouvements de terrain

Le croisement des données de terrain, du MNT, de la géophysique sol et héliporté a permis d'améliorer la cartographie de l'aléa mouvements de terrain au droit de la zone d'étude (cf. Figure 21).



Figure 21 – En haut, extrait de l'atlas des aléas de la commune de Dembéné. En bas, cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'après le présent avis. Fond orthophotos IGN. Courbes de niveau 1 m.

4.2. ALEA INONDATIONS

4.2.1. Flow accumulation

L'outil « Flow Accumulation » sous ArcGIS permet de repérer les points bas où vont s'accumuler les eaux de ruissellement en utilisant la direction des flux obtenue avec l'outil « Flow Direction ». Ces points ne correspondent pas tout le temps au vrai fond des talwegs. En effet, dans le milieu naturel, les structures géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques.

Les observations brutes de terrain (localisation partielle des axes de ravinement par GPS) ont été comparées aux axes d'accumulation de flux. Les points des relevés GPS se corréle aux axes de flux ce qui valide l'approche de type Flow Accumulation pour ce secteur donné. Les axes d'écoulement des talwegs (dont les portions n'ont pu être identifiées sur le terrain) seront donc précisés grâce à cet outil.

Cette carte (cf. Figure 30) permet alors de faire une seconde vérification du tracé des ravines pour les tronçons inaccessibles et d'extrapoler les ramifications (cf. Figure 22). De plus la comparaison entre la carte d'aléa inondation de l'Atlas et la carte obtenue est mauvaise (cf. Figure 22).

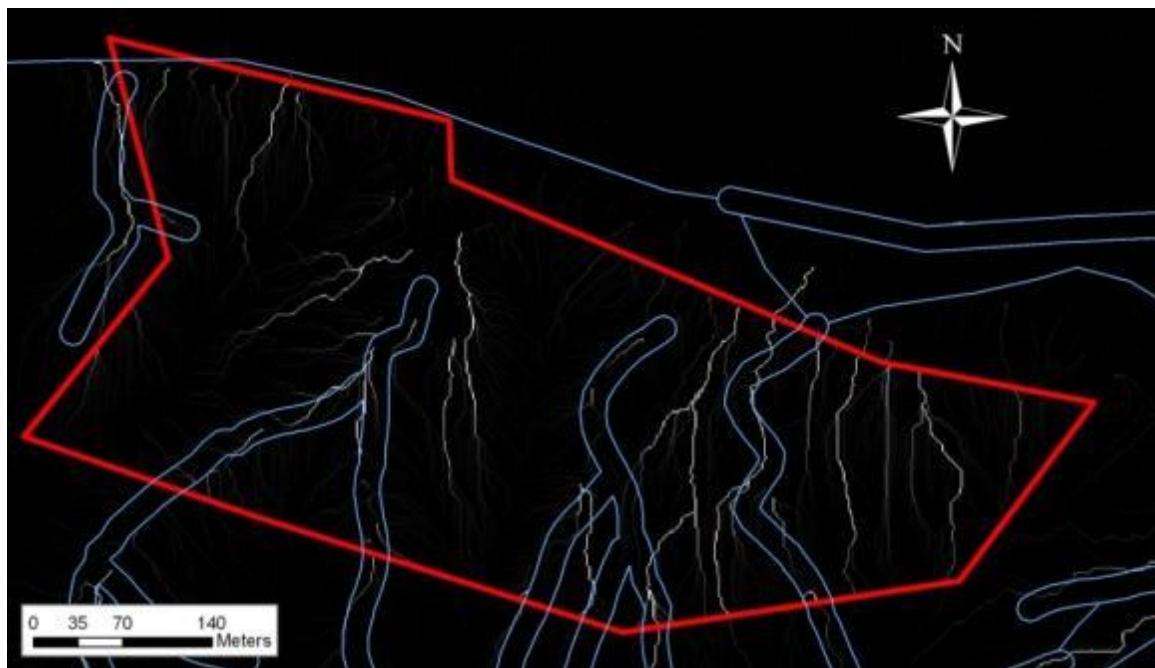


Figure 22 – Localisation des fonds de talweg avec l'outil Flow Accumulation du SIG ArcGIS avec superposition (en bleu) de l'aléa inondation extrait de l'Atlas des aléas.

4.2.2. Secteur aval : plaine d'inondation

La visite de terrain s'est effectuée lors d'un événement pluvial, ce qui a permis de mettre en évidence une zone d'accumulation d'eau dans le secteur aval. Ce secteur

est concerné par des arrivées d'eau en amont provenant des ravines traversant le secteur d'étude, mais également par des débordements éventuels de la rivière Mro Oua Dembéni située plus au Nord.

Les terrains en aval des exutoires des ravines présentent des pentes très faibles ($< 10^\circ$) composés de formations limoneuses imperméables. L'eau a alors tendance à s'accumuler. En effet, aucune trace de ravinement n'a été observée pour cette zone. Ainsi, tout le secteur comportant une faible topographie depuis les exutoires jusqu'à la rivière Mro Oua Dembéni correspond à une plaine d'inondation. Ces observations amènent à prolonger l'aléa faible inondation.



Figure 23 – Secteur aval du projet. La plaine d'inondation est gorgée d'eau suite à un évènement pluvial.

4.2.3. Localisation des ravines

a) Généralités

La localisation des ravines a été établie à partir de levés GPS en remontant les axes d'écoulement. Cette méthode, des plus précises, a permis de localiser les points de ramifications. Cependant, l'accès à certaines ravines n'a pas été possible, en particulier en amont où la végétation est dense et la pente très accentuée. Dans ces cas, les courbes de niveau au pas de 1 m extraites du MNT de l'IGN ont été utilisées pour préciser l'emplacement et la jonction de certains tronçons de ravine.

La méthodologie PPR (Plan de Prévention des Risques naturels) indique que pour les lits mineurs des cours d'eau dont l'ordre de Strahler est inférieur ou égal à 3, une zone tampon de 5 m de chaque côté de l'axe de d'écoulement est à appliquer pour l'aléa fort inondation par débordement de cours d'eau ou ravines. L'ensemble des ravines au droit du projet se situent dans cette configuration. Ainsi, la zone tampon qui était définie à 20 m de large selon l'atlas des aléas est modifiée à 10 m.

L'ordre de Strahler est donné par le principe suivant : tout cours d'eau qui n'a pas d'affluent se voit attribuer la valeur 1. Pour tous les autres, un cours d'eau d'ordre $n+1$ est issu de la confluence de deux cours d'eau d'ordre n .

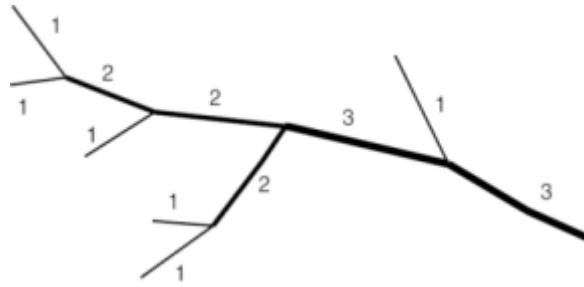


Figure 24 – Principe de l'ordre de Strahler

b) Description des ravines

Les ravines 1, 2 et 3 correspondent à des ravines clairement identifiées par l'IGN et dont les modifications dans ce présent avis sont faibles. Les photographies permettant d'illustrer les axes de ravinements sont localisées sur la Figure 25).



Figure 25 – Localisation des photographies illustrant les axes de ravinement principaux observés sur le terrain

➤ Ravines Ouest : ravine 1 (R1)

La position de l'axe d'écoulement du bras Est a été ajustée par des levés GPS. Le bras Ouest n'a pas pu être suivi dans sa partie aval par un manque d'accès sur le terrain. Son emplacement a été défini par l'utilisation des courbes de niveau qui précise son axe d'écoulement. Un nouvel embranchement raccordé au bras Ouest a été observé. Sa continuité en aval n'a pas pu être suivie, en revanche les courbes topographiques montrent que son extension est limitée. Le bras terminal, défini par la jonction des deux bras, a été également repéré sur le terrain ce qui a permis de le repositionner et de prolonger son extension vers l'aval. (cf. 1, 2 et 3 de la Figure 26).



Figure 26 – Photographies 1-2 et 3 de la ravine 1 (cf. Figure 25).

Les courbes topographiques issues du MNT mettent en évidence une zone de replat en forme de cône dans la partie aval de l'axe. Il s'agirait d'un cône de dépôts alluvionnaires, l'eau va avoir tendance à se répandre latéralement. La vitesse d'arrivée de ces eaux peut être importante aux vues de pentes amont. Ce contexte amène à considérer un aléa moyen inondation autour de l'aléa fort inondation modélisant l'axe d'écoulement.

➤ Ravine centrale : ravine 2 (R2)

Cette ravine a été suivie jusqu'à l'extrémité Sud du terrain (cf. 4, 5 et 6 de la Figure 27). Seulement deux embranchements ont été repérés tandis que l'Atlas des aléas en indique trois. Le positionnement de l'axe a été par conséquent précisé à partir des levés GPS. L'aléa fort inondation a été levé au droit du 3^{ème} axe.



Figure 27 – Photographies 4-5 et 6 de la ravine 2 (cf. Figure 25).

➤ Ravine Est : ravine 3 (R3)

Cette ravine était relativement bien localisée dans l'Atlas des aléas de Dembéni. La visite de terrain a permis de repositionner son axe d'écoulement. Seule la partie amont

n'a pas été levée au GPS à cause d'une végétation trop dense. En revanche, les courbes topographiques issues du MNT indiquent la présence d'un talweg. Cette ravine présente des blocs de taille décimétrique dans sa partie amont (cf. Figure 28).

➤ Ravine Extrême Ouest : ravine 4 (R4)

Cette ravine a été repositionnée à partir du MNT, la végétation dense n'ayant pas permis de suivre l'axe d'écoulement du bras principal de ravine dans sa totalité. Aucun bloc n'a été observé le jour de la visite de terrain. Par ailleurs, le bras Est de cette ravine n'est pas visualisée à partir des courbes topographiques. L'aléa fort inondation est par conséquent levé pour ce bras Est et précisé pour l'axe principal.

➤ Ravine centrale : ravine 5 (R5)

D'après le Scan 25 de l'IGN, cette ravine a un bras unique en amont qui rejoint dans la zone centrale du secteur d'étude la ravine 2. Les observations de terrain indiquent qu'il s'agit d'un axe unique d'écoulement. Il ne semble pas que cette ravine rejoigne la ravine 2. Dans sa partie amont, le lit de la ravine présente des blocs taille décimétrique à centimétrique (cf. photographie 7 de la Figure 28 et Figure 25).

➤ Ravine extrême Est : ravine 6 (R6)

La ravine 6 n'est pas identifiée par le Scan 25 de l'IGN. En revanche, elle a été suivie dans sa majeure partie lors de la visite de terrain. Cette ravine est très peu marquée topographiquement (non visible sur la Figure 3), mais elle se repère aisément par la présence de blocs de taille centimétrique à décimétrique jonchant dans une matrice fine à composante limoneuse (cf. Figure 28).



Figure 28 – Photographies des ravines 3, 5 et 6, avec respectivement les photographies associées 8, 7 et 9 (cf. Figure 25).

4.2.4. Précision de l'aléa inondation

L'ensemble de ces observations a permis de modifier la cartographie de l'aléa inondation de l'Atlas des aléas de la commune de Dembéni (cf. Figure 29).

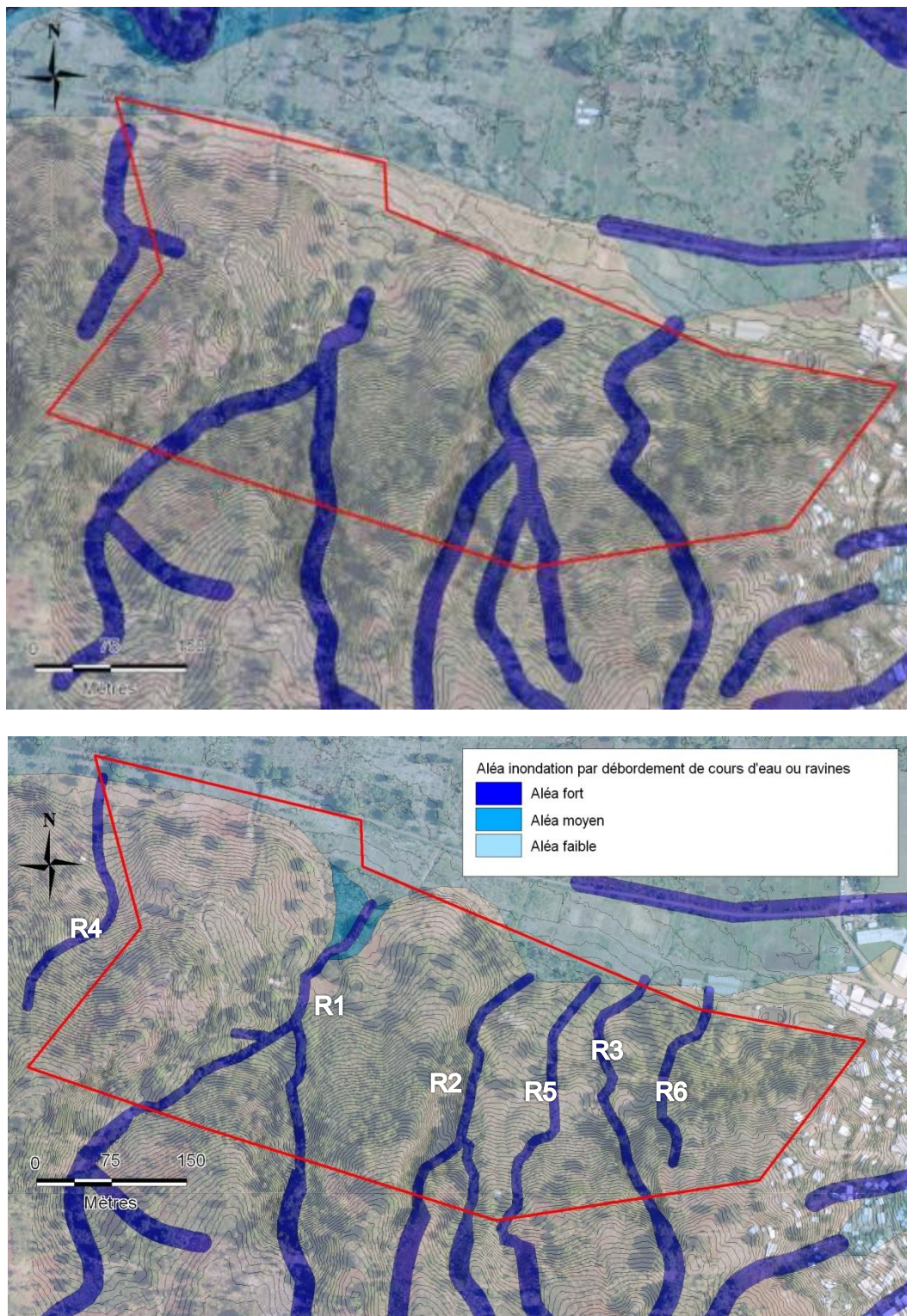


Figure 29 – En haut, extrait de l'Atlas des aléas de la commune de Dembény. En bas, cartographie de l'aléa inondation d'après le présent avis. Fond orthophotos IGN. Courbes de niveau 1 m.

L'aléa inondation a été modifié en prenant en compte la carte de Flux et la campagne de terrain (cf. Figure 30). Certains talwegs apparaissent dans la carte de la Figure 30 mais ne sont pas pris en compte dans la cartographie de l'Atlas des aléas puisqu'ils n'ont pas été identifiés sur le terrain. Ces axes correspondraient à des axes d'écoulement préférentiel (car points bas) en revanche, les eaux auraient tendance à se concentrer dans les autres talwegs repérés sur le terrain.

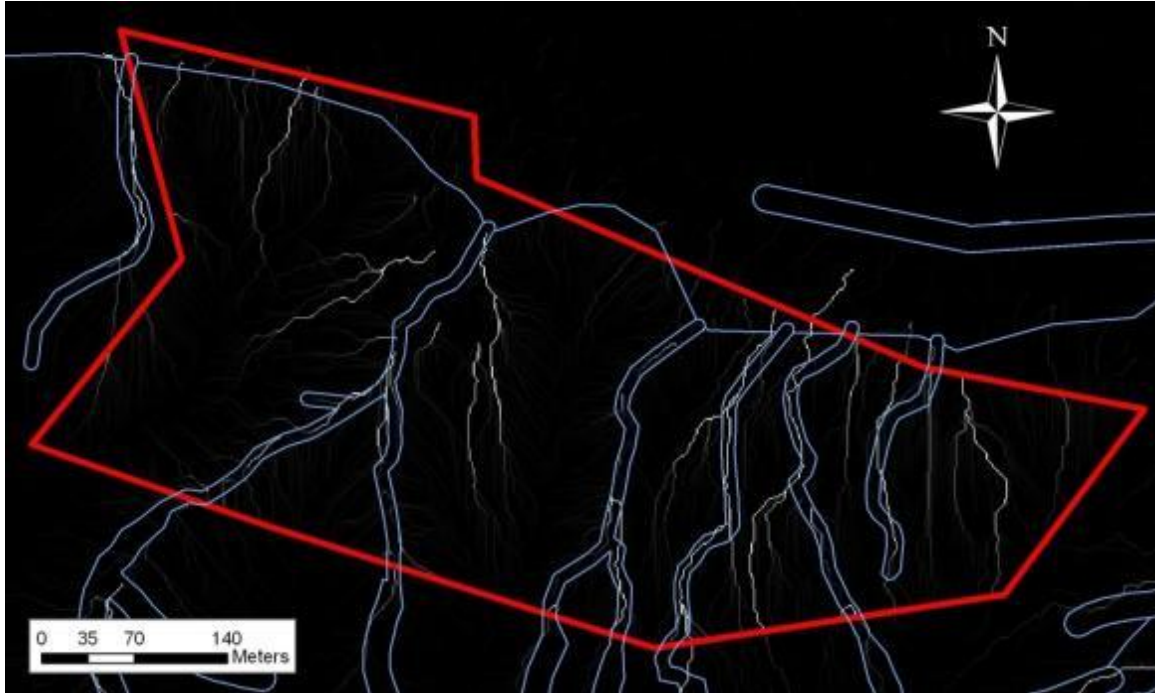


Figure 30 – Superposition du fond des talwegs obtenus par l'analyse de fmix avec la cartographie de l'aléa inondation d'après le présent avis.

5. Conclusion

Le diagnostic effectué par le BRGM au droit de la zone du projet de construction de l'université de Dembéni, a permis de réévaluer les aléas mouvements de terrain et inondation (cf. Figure 21 et Figure 29) suivant ces observations :

1. Les formations de surface ont des propriétés géotechniques faibles d'après les résultats de la prospection sismique sol et TDEM hélicopté pouvant s'assimiler à des sols de classe II selon la typologie issue des PPR. Les observations de terrain et l'analyse du MNT couplées avec ces données ont permis de préciser l'aléa mouvements de terrain, notamment pour les zones à accès difficile. L'aléa fort mouvements de terrain a été prolongé sur certains secteurs pour tenir compte des fortes pentes, de la végétation et de la lithologie.
2. L'aléa inondation a été modifié principalement à partir de levés GPS permettant de localiser précisément l'axe d'écoulement des ravines et par l'analyse du MNT de l'IGN lorsque la végétation ne permettait pas un accès

aux ravines. Une largeur zone tampon forfaitaire de 5 m de rayon autour des axes de ravinement a été appliquée pour l'aléa fort inondation puisque les cours d'eau ont un ordre de Strahler inférieur à 3 (méthodologie PPR).

3. L'aléa faible inondation correspondant aux plaines d'inondation a été précisé à l'aide des courbes topographiques.

Le BRGM recommande :

1. de limiter l'érosion des sols en conservant une végétation dense et en limitant les plantations de bananiers ou les cultures nécessitant un défrichement du sol ;
2. de purger les blocs présents dans le versant afin de limiter le risque de chutes de blocs ;
3. de prévoir des aménagements hydrauliques au niveau de la plaine d'inondation afin de limiter l'accumulation et la stagnation de l'eau ;
4. d'installer des aménagements hydrauliques au niveau du versant pour maîtriser le ruissellement des eaux pluviales. Aux vues des fortes pentes, ces aménagements devront comporter des « marches d'escalier » permettant de diminuer la vitesse d'écoulement. Il faudra également prévoir des travaux de correction active pour réduire le transport solide en provenance du lit et du bassin versant, la réalisation d'une plage de dépôt et enfin un entretien du lit et des berges des cours d'eau, fossés, drains...
5. de faire dimensionner les ouvrages de soutènements nécessaires par un bureau d'étude géotechnique spécialisé.

6. Bibliographie

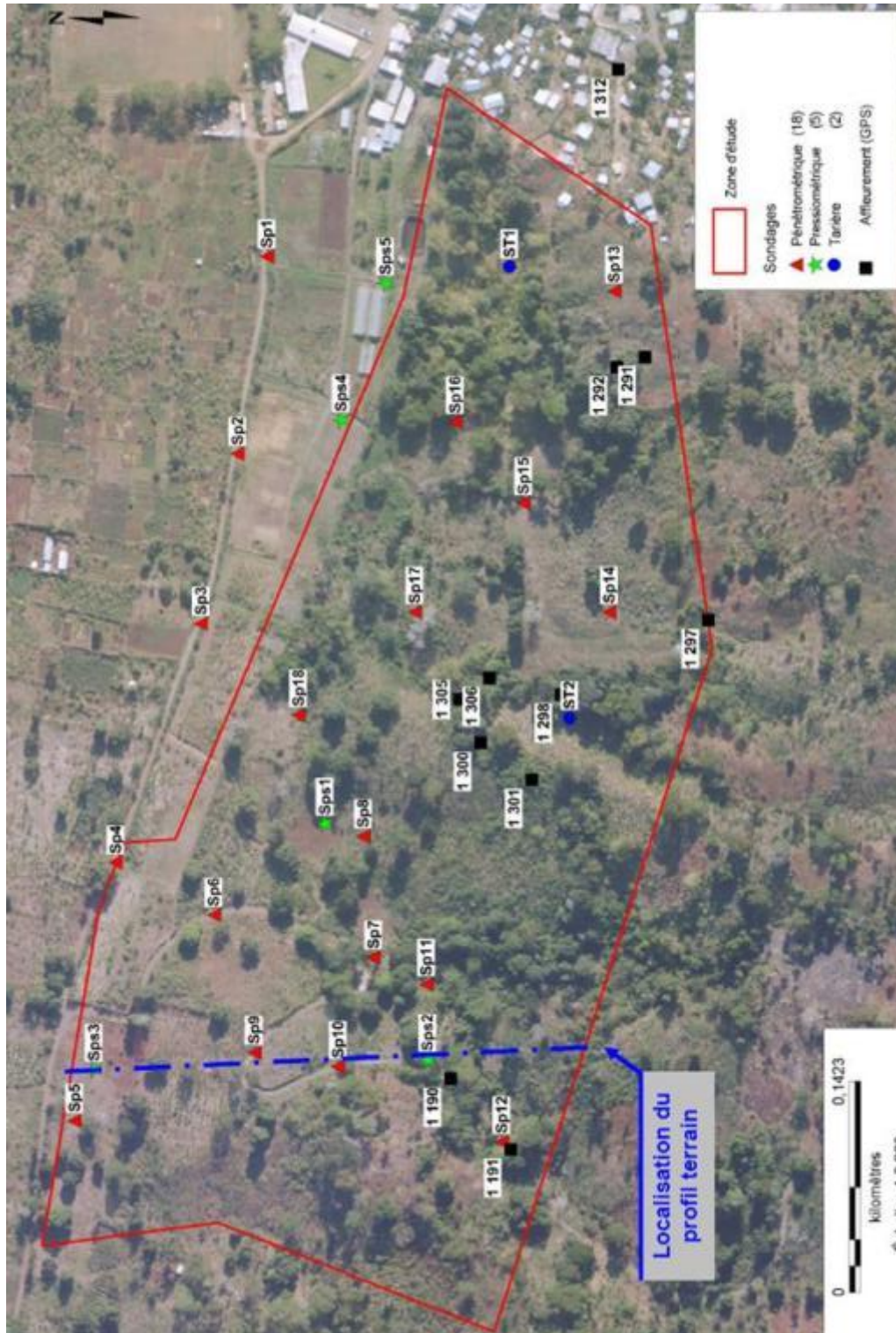
Ali A., Mars 2012 – Construction d'équipements scolaires du second degré. Site de l'université de Dembéni. Réalisation de sondages et d'essais et étude de faisabilité géotechnique missions de type G0 et G11 + G12. Dossier n°1871. SEGC. 40 p.

Rey J., Bastone V., Bitri A., Cochery R., François B., Roullé A., Tardy D. (2012) – Evaluation de l'aléa sismique pour 8 sites prévus pour la construction d'établissements scolaires à Mayotte. Rapport BRGM/RP-61170-FR. 176 p., 44 fig., 54 tabl., 1 annexe.

Rey J., Roullé A., Vanoudheusden E., Audru J.-C. (2006) – Etude de l'aléa sismique et détermination des mouvements sismiques sur le site de l'IFM de Dembéni (Mayotte). Rapport BRGM/RP-54960-FR, 31 p., 13 ill., 1 annexe.

Annexe 1

Localisation des sondages SEGC



Annexe 2

Lithologie d'après les sondages SEGC

Sondages SPs1, SPs3, SPs4 et SPs5 :

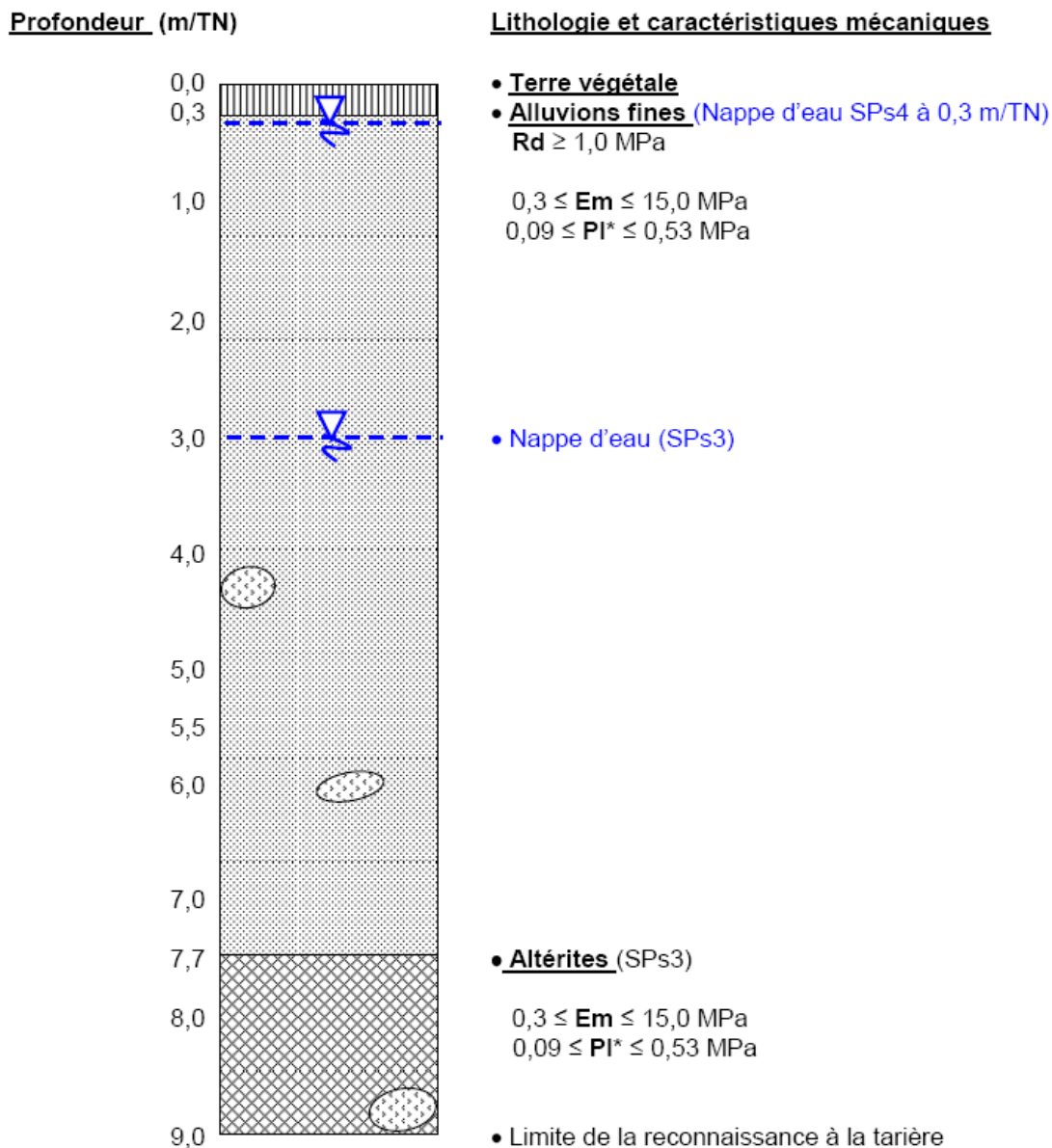
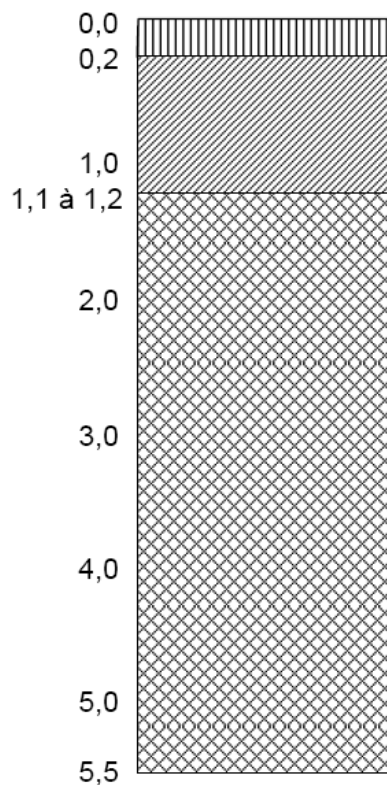


Figure 31 – Loc synthétique des sondages SPs1, SPs3, SPs5 et SPs5 à la tarière issue de l'étude n°1871 de SEGC

Sondage (SPs2) :

Profondeur (m/TN)



Lithologie et caractéristiques mécaniques

- **Terre végétale**
- **Colluvions**
 $R_d \geq 1,0 \text{ MPa}$
 $E_m = 19,2 \text{ MPa}$
 $PI^* = 0,95 \text{ MPa}$
- **Altérites**
 $R_d \geq 5,8 \text{ MPa}$
 $14,3 \leq E_m \leq 26,4 \text{ MPa}$
 $0,96 \leq PI^* \leq 1,24 \text{ MPa}$

- Limite de la reconnaissance à la tarière

Figure 32 - Loc synthétique du sondage SPs2 à la tarière issue de l'étude n°1871 de SEGC

Annexe 3

Méthodologie PPR de la classification de l'aléa mouvements de terrain

	Aspects	Types
Classe 1	Matériaux remaniés	Colluvions, alluvions, remblais, etc.
Classe 2	Matériaux meubles	Altérites évoluées (i.e. à matrice prépondérante) Cendres, pyroclastites et cinérites non indurées
Classe 3	Matériaux meubles	Argilites (kaolinites et autres argiles d'altération)
Classe 4	Matériaux raides	Altérites à roches majoritaires (évolution provenant le plus souvent de la classe 5), pyroclastites ou autres brèches indurées
Classe 5	Roche saine	Roche saine non altérée (basaltes, phonolites, téphrites, etc.)

Figure 33 - Classes de matériaux définies en concertation entre CETE/DEAL/BRGM en 2008, extrait des PPR

Classes de matériaux	Pente (°) Hauteur d'escarpement (m)	Hydrologie (venues d'eau, écoulements, etc.)	Indices (relatifs à des instabilités dont l'ampleur dépasse impérativement les moyens d'un particulier pour s'en prémunir)		Facteurs aggravants (Végétation, rejet d'eau, érosion, etc.)	Niveau d'aléa	Codification
			Glissements (Bourrelet, moutonnement, arrachement, etc.)	Eboulements, chutes de blocs (Niveau de fracturation, sous cavage, ouverture des fractures, présence de blocs dans le versant, etc.)			
1	< 20° et < 3 m	O/N	N		O/N	Moyen	G2 ou G2P2
		O/N	O		O/N	Fort	G3 ou G3P2
	> 20° ou > 3 m	O/N	O/N		O/N	Fort	G3 ou G3P2
	> 20° et > 3 m	O/N	O/N		O/N	Fort	G3 ou G3P2
2	< 30° et < 5 m	O/N	N		N	Moyen	G2 ou G2P2
		O	O		O	Fort	G3 ou G3P2
	< 30° et > 5 m	O/N	O/N		O/N	Fort	G3 ou G3P2
	> 30° et < 5 m	O/N	O/N		O	Fort	G3 ou G3P2
	> 30° et > 5 m	O/N	O/N		O/N	Fort	G3 ou G3P2
3	> 20°	O/N	O/N		O/N	Fort	G3 ou G3P2
4	< 35° et < 5 m	O/N		O/N	O/N	Moyen	P2 ou P2G2
	> 35° ou > 5 m	O/N		O/N	O/N	Fort	P3 ou P3G2
	> 35° et > 5 m	O/N	O (au moins un des 2 types d'indices)		O/N	Fort	P3 ou P3G2
5	< 5 m			Fracturation, volume > 0,5 m ³	O/N	Moyen (si purge suffisante)	P2
						Fort (si autre parade)	P3
	> 5 m			Fracturation, volume de 0,2 m ³ , présence de blocs dans le versant	O/N	Fort	P3
	> 5 m			Paroi très saine, absence d'indice d'éboulement	O	Moyen	P2

Figure 34 - Critères de distinction entre aléa moyen et fort de type mouvements de terrain d'après les PPR



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction Territoriale de Mayotte
9 centre Amatoula, Z.I. de Kawéni
BP 363
97600 - Mamoudzou - France
Tél. : 02 69 61 28 13