Document public

Rapport d'expertise :

Expertise d'études hydraulique et géotechnique pour une requalification des aléas mouvements de terrain et inondation au droit du projet Djaylane à Tsingoni

BRGM/RP-61528-FR

Septembre, 2012

Cadre de l'expertise :

Appuis aux administrations ☑ Appuis à la police de l'eau ❑

Date de réalisation de l'expertise : Septembre 2012

Localisation géographique du sujet de l'expertise : Tsingoni (Mayotte)

Auteurs BRGM : D. Tardy

Demandeur : DEAL de Mayotte

Géosciences pour une Terre durable
brgm

L'original du rapport muni des signatures des Vérificateurs et Approbateurs est disponible aux Archives du BRGM.

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

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Approbateur :	
Nom : P. PUVILLAND	Date : 08/10/2012
Vérificateur :	
Nom : A. REY	Date : 05/10/2012

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

Mots clés : expertise – appuis aux administrations – aléas – mouvements de terrain – géotechnique – inondation – Tsingoni – Mayotte

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

D. Tardy (2012) – Expertise d'études hydraulique et géotechnique pour une requalification des aléas mouvements de terrain et inondation au droit du projet Djaylane à Tsingoni, Rapport final. Rapport BRGM/RP-61528-FR. 30 p., 26 fig..

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

Synthèse

Contexte :

Date de la formulation de la demande d'expertise au BRGM : Août 2012

Demandeur : DEAL de Mayotte

Nature de l'expertise : Précision de l'aléa inondation et mouvements de terrain au droit du projet. Expertise d'une étude géotechnique et hydraulique.

Situation du sujet : Lotissement Djaylane, Tsingoni

Nature de l'intervention du BRGM : visite de terrain par D. Tardy le 04/09/2012.

Dossier examiné :

Dans le cadre du projet du lotissement Djaylane sur la commune de Tsingoni, la DEAL de Mayotte a sollicité le BRGM afin de préciser les aléas mouvements de terrain et inondation à partir d'études hydraulique et géotechnique réalisées au droit du secteur :

- Etude géotechnique : Sécurisation de l'aménagement du lotissement Djaylane. Village de Tsingogni. Juillet 2012. Dossier n°1948. SEGC.
- Etude hydraulique : Réalisation d'une opération d'aménagement sur le titre 1570 Taoukif – Djailane à Tsingoni. Etude de risque lotissement Djailane – Phase I Partie Hydraulique. Août 2012. TEMA.

Le secteur d'étude est concerné d'après l'atlas des aléas de la commune de Tsingoni par un aléa moyen glissements de terrain dominants accompagnés de chutes de blocs pour la quasi-totalité de la zone et d'un aléa fort pour l'extrémité Est. Il comporte également un aléa fort inondation par débordements de cours d'eau ou ravines selon trois axes d'écoulement ainsi que d'un aléa moyen et fort inondation au droit du secteur Nord au niveau du lit majeur de la rivière Mrowalé.

Diagnostic du BRGM :

En complément de l'analyse des études techniques fournies, une visite de terrain a été effectuée par le BRGM en date du 04/09/2012.

- Aléa mouvements de terrain

Les formations géologiques rencontrées sont de nature favorable aux mouvements de terrain, elles correspondent à des cendres volcaniques reposant sur des altérites. Ces premières ont une épaisseur variant entre 5,4 m et 7,5 m et les secondes ont une puissance minimale de 8 m, d'après les sondages réalisés par SEGC.

Des facteurs aggravants ont été identifiés, tels que la présence d'eaux souterraines (identifiées lors des reconnaissances de SEGC), un défrichage de la végétation et une urbanisation non contrôlée. Les pentes moyennes sont de 20° avec des passages compris entre 20 et 30°. L'ensemble de ces observations amènent à conserver un aléa moyen glissements de terrain dominants accompagnés de chutes de blocs au droit du talus.

Le bureau d'étude SEGC a établi des profils de stabilité qui indiquent une stabilité du talus face aux glissements de terrain en intégrant un niveau de nappe issu de leur sondage du mois de juin

(soit en saison sèche). L'amplitude de la nappe peut varier jusqu'à 2 m en moyenne dans ce secteur en fonction de la saison sèche ou humide d'après un piézomètre localisé à proximité du secteur d'étude. Il aurait été nécessaire d'établir des profils de stabilité dans cette configuration, ce qui amène à conserver ce niveau d'aléa pour l'ensemble du talus.

Les limites de l'aléa moyen mouvements de terrain sont repositionnées notamment en fonction de la topographie du site issue du traitement du MNT de l'IGN et de nos observations. Une grande partie du secteur Sud se retrouve déclassée en aléa nul mouvements de terrain.

En revanche, un aléa fort mouvements de terrain est positionné sur la partie du talus comportant de plus fortes pentes selon ces éléments :

- un cours d'eau est localisé en son pied (risque de déstabilisation du pied, sapement),
- des pentes fortes entre 20 et 30° en moyenne pouvant atteindre 35° en tête de talus,
- des formations lithologiques altérées,
- des incertitudes persistent sur les vérifications de la stabilité du talus (non prise en compte de situations accidentelles modélisant les fortes pluies, non prise en compte du niveau haut de la nappe).

➢ Aléa inondation par débordement de cours d'eau ou ravines

Le lit mineur de la rivière Mrowalé représenté par un aléa fort inondation a été repositionné à partir des levés GPS et à partir des données cadastrales qui montrent une bonne superposition avec les données GPS. Le lit majeur, représenté par un aléa moyen et faible inondation a été étendu à l'ensemble de la plaine d'inondation identifiée par les courbes de niveau issues du MNT (zone de replat) et par les observations de terrain (présence d'une source indiquant une nappe sub-affleurante + végétation spécifique aux zones humides). Les modélisations établies par le bureau d'études TEMA confirment les risques de débordement en crues centennales.

Les ravines traversant le secteur d'étude ont été repositionnées à l'aide du MNT ainsi que les observations de terrain. Une nouvelle ravine a été identifiée à l'Est du secteur à partir du MNT, elle est cartographiée en aléa fort et en aléa moyen pour sa partie aval.

Pour chacune de ces ravines, une zone tampon de 5 m de part et d'autre de l'axe d'écoulement a été appliquée tel que défini dans la méthodologie PPR (Plan de Prévention des Risques naturels). Pour la rivière Mrowalé, une zone tampon de 20 m de large a été définie *a minima* puisqu'il s'agit d'un cours d'eau majeur. Cette zone tampon a été adaptée en fonction de la topographie et de nos observations.

Recommandations du BRGM :

Le BRGM recommande :

- De conserver une végétation dense afin de limiter l'érosion ;
- De mettre en place un système de gestion des eaux pluviales ;
- De faire dimensionner les ouvrages hydrauliques par un bureau d'études spécialisé et pour des crues d'occurrence centennale tel que prescrit dans les PPR ;
- De mettre en œuvre des ouvrages de confortement dimensionnés par un bureau d'études géotechnique spécialisé afin d'assurer la stabilité du talus sur le long terme.

Sommaire

1. Contexte de l'étude 6

2. Documents à disposition 6

3. Situation du site 6

3.1 LOCALISATION DU SITE 6

3.2 MORPHOLOGIE 7

3.3 GEOLOGIE 9

4. Zonage actuel des aléas 11

4.1 MOUVEMENTS DE TERRAIN 11

4.2 INONDATION 12

5. Précision des cartographies des aléas d'après le présent avis 13

5.1 METHODOLOGIE 13

5.2 ALEAS MOUVEMENTS DE TERRAIN 14

5.2.1 Reconnaissance de terrain BRGM 14

5.2.2 Etude géotechnique de SEGC 15

5.2.3 Proposition de zonage de l'aléa mouvements de terrain 16

5.3 ALEAS INONDATION 17

5.3.1 Reconnaissance de terrain 17

5.3.2 Etude hydraulique de TEMA 20

5.3.3 Proposition de zonage de l'aléa inondation 20

6. Conclusion et recommandations 21

7. Annexes 1 : Sondages SEGC 23

8. Annexes 2 : Profil Talren 28

1. Contexte de l'étude

La DEAL de Mayotte a sollicité le BRGM pour un avis concernant deux études distinctes : une étude hydraulique et une étude géotechnique réalisées respectivement par TEMA et SEGC MAYOTTE, ainsi que pour une précision des aléas mouvements de terrain et inondation, dans le cadre d'un projet d'aménagement du lotissement Djaylane à l'entrée du village de Tsingoni.

2. Documents à disposition

- Etudes antérieures du BRGM sur le secteur :

La partie extrême Ouest du secteur a fait l'objet d'une expertise en 2009 par le BRGM (Note 2009-04) concernant la précision de l'aléa mouvements de terrain et inondation pour un lotissement de Tsingoni. Une visite de terrain a été effectuée par le BRGM le 27/01/2009. L'aléa fort glissements de terrain a été déclassé en aléa moyen aux vues des pentes (de l'ordre de 20°), de la présence d'un replat au sommet du relief et puisqu'aucun indice d'instabilité n'a été relevé le jour de la visite de terrain.

Concernant l'aléa inondation, une seule modification a été apportée au zonage : un nouvel axe d'écoulement a été cartographié en aléa fort. Cet axe n'est pas compris dans le secteur d'étude de la présente expertise.

- Etude géotechnique : *Sécurisation de l'aménagement du lotissement Djaylane. Village de Tsingogni. Juillet 2012. Dossier n°1948. SEGC.*

SEGC MAYOTTE a réalisé un diagnostic géotechnique du site afin de déterminer les aménagements nécessaires pour sécuriser le site vis-à-vis des risques naturels affectant la zone du projet (Mission de type G11 et G5). Dans ce cadre, une campagne de reconnaissance a été effectuée en mai 2011 par SEGC avec la réalisation de 4 sondages à la tarière, 15 sondages au pénétromètre dynamique et 2 prélèvements d'échantillons. Ces données ont permis la réalisation de calculs de stabilité à l'aide du logiciel TALREN.

- Etude hydraulique : *Réalisation d'une opération d'aménagement sur le titre 1570 Taoukif – Djailane à Tsingoni. Etude de risque lotissement Djailane – Phase I Partie Hydraulique. Août 2012. TEMA.*

L'étude réalisée par TEMA porte sur la rivière Mrowalé s'écoulant au Nord du village de Tsingoni dans le but de déterminer la zone d'inondabilité, la viabilité du projet ainsi que les éventuels aménagements nécessaires pour limiter l'aléa inondation.

3. Situation du site

3.1 LOCALISATION DU SITE

Le secteur d'étude, correspondant au projet de lotissement, se situe sur la côte Centre-Ouest de Mayotte, à l'Est de la commune de Tsingoni (cf. Figure 1). Sa superficie est de 1,4 km². La pente moyenne est de 20° avec des altitudes minimales et maximales de 50 et 80 m NGM.

Figure 1 – Localisation du secteur d'étude. Extrait du Scan 25 de l'IGN.

3.2 MORPHOLOGIE

Le site peut se diviser en trois zones en fonction de sa morphologie (cf. Figure 4) :

- Secteur Nord : zone basse de replat correspondant au lit mineur de la rivière, avec une altitude minimale de 50 m ;
- Zone centrale : versant incisé par des vallées comportant une pente moyenne de 20° pouvant atteindre plus de 30° localement ;
- Secteur Sud : sommet du relief comportant des pentes faibles avec une altitude maximale de 80 m.

Quatre axes d'écoulement préférentiels ont été identifiés à l'aide du MNT (cf. Figure 3 et Figure 4). La ravine R3 présente une forte sinuosité ce qui pourrait traduire une dynamique importante des écoulements. La ravine 2 semble peu marquée topographiquement (courbes de niveau peu resserrées, pas de forme en « V » significative) ce qui signifie que l'on n'a pas d'axe d'écoulement préférentiel, les écoulements seraient plutôt diffus. La visite de terrain sera nécessaire au droit de cette ravine pour confirmer son existence.

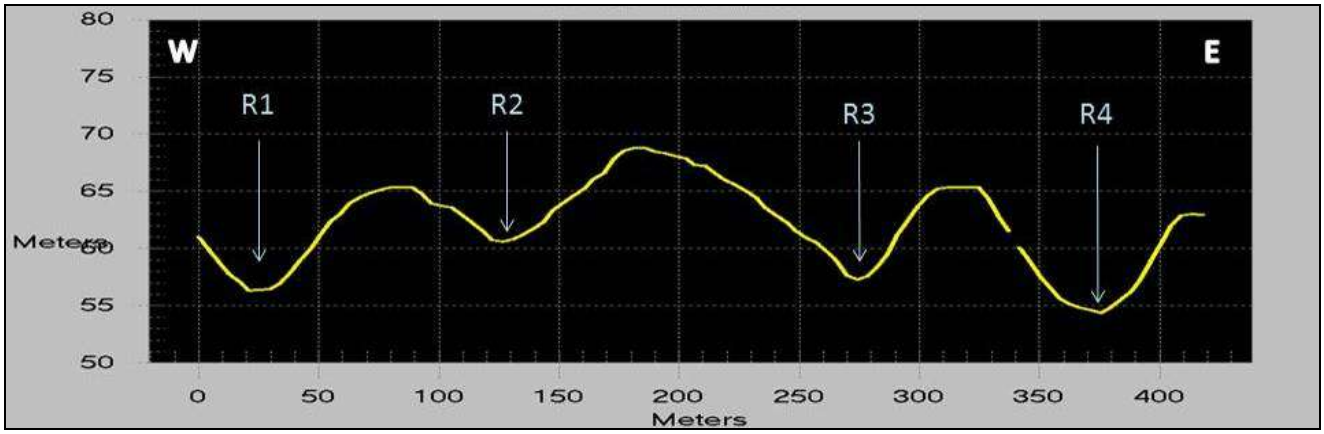


Figure 2 - Profil topographique localisé en Figure 3 permettant de visualiser les talwegs au droit du secteur d'étude.

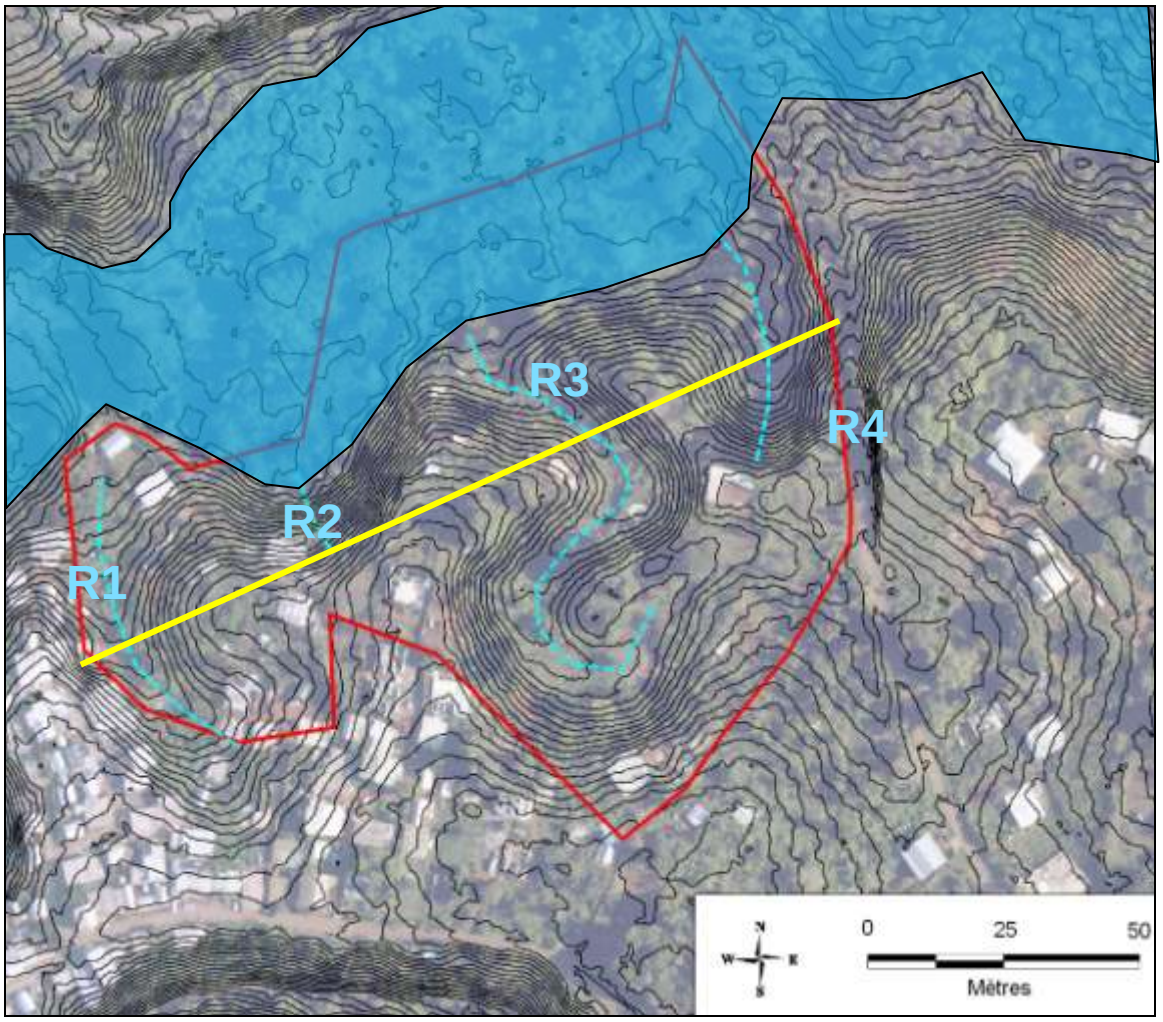


Figure 3 – Morphologie du site avec représentation des axes d'écoulement potentiels d'après traitement MNT et représentation du lit mineur de la Mrowalé. Courbes de niveau 1 m. Fond orthophotos de l'IGN.

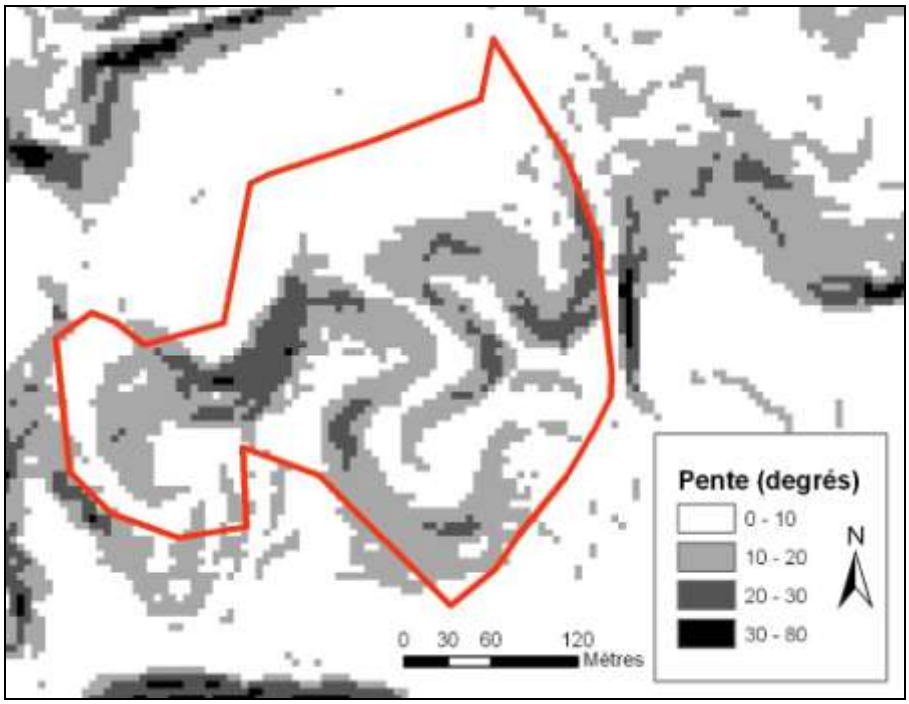


Figure 4 – Carte des pentes du secteur d'étude.

3.3 GEOLOGIE

Trois formations lithologiques ont été identifiées d'après la visite de terrain et l'analyse des données d'études à disposition (note BRGM et rapport SEGC) :

- Des formations alluviales au nord du terrain. Deux faciès sont distingués : au niveau des cours d'eau des alluvions présentant des blocs de taille centimétrique arrondis de lave, et dans la plaine d'inondation des formations fines limoneuses.
- Un niveau de cendres volcaniques ferrallitisées comportant des éléments millimétriques à centimétrique et à blocs décimétriques (cf. Figure 6). D'après les sondages effectués par SEGC, ce niveau a une épaisseur comprise entre 5,4 et 7,5 m (cf. Figure 23, Figure 24 et Figure 25). Ces formations se sont mises en place suite à un évènement explosif et seraient venues draper les altérites sous-jacentes.
- Sous ces formations sont observées des altérites, issues de l'altération de roches volcaniques. Leur épaisseur est d'au moins 8 m d'après les sondages SEGC.

Localement, des niveaux de roches dures mais fracturées ont été observées (cf. Figure 5). Ce niveau pourrait constituer une dalle rocheuse rencontrée à une cote d'environ 50 m NGM (d'après localisation topographique et sondages SEGC).

La localisation des différentes formations observées sur site est présentée en Figure 7.

Figure 5 – Roche dure fracturée observée au point A de la Figure 7.

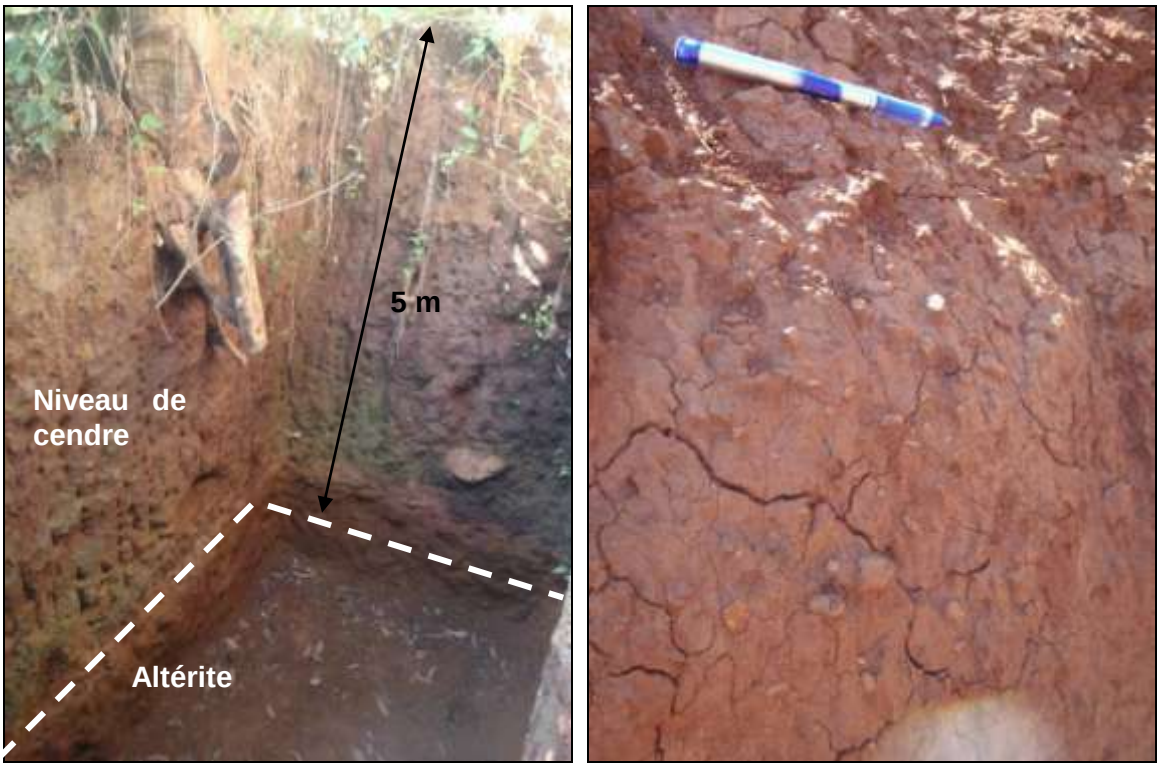


Figure 6 – Formations de cendres volcaniques à éléments polygéniques reposant sur des altérites. A gauche, point B de la Figure 7, à droite, point C de la Figure 7.

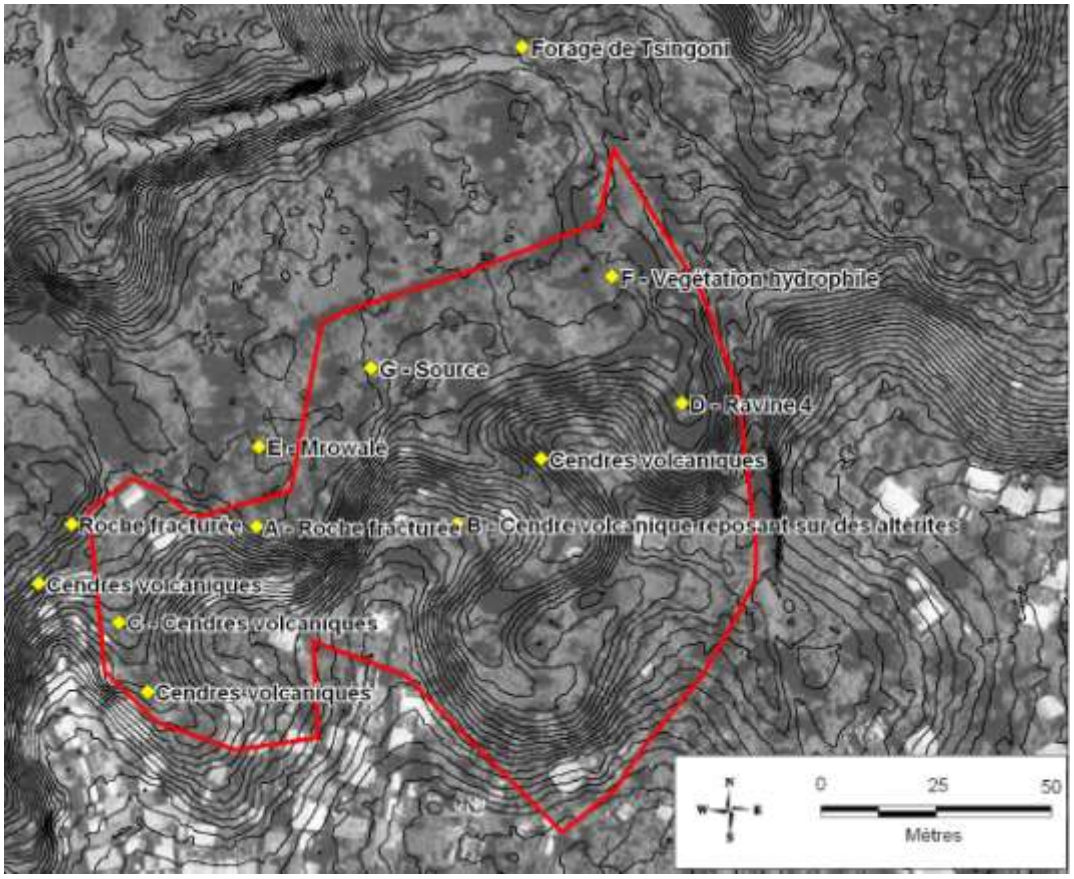


Figure 7 – Localisation des affleurements et des points d'observation. Les lettres font références aux photographies du présent avis.

4. Zonage actuel des aléas

4.1 MOUVEMENTS DE TERRAIN

La carte de l'aléa mouvements de terrain en vigueur sur le territoire de la commune de Tsingoni est celle de l'Atlas des aléas (cf. Figure 9), qui date de 2004, et qui fait état pour la zone d'étude :

- d'un aléa moyen glissements de terrain dominants accompagnés de chutes de blocs pour la quasi-totalité de la zone d'étude ;
- d'un aléa fort glissements de terrain dominants accompagnés de chutes de blocs à la limite Est du secteur au droit d'un talus subvertical le long de la voirie ;
- d'un aléa nul mouvements de terrain pour les extrémités Nord et Sud au niveau de la zone de replat en partie sommitale.

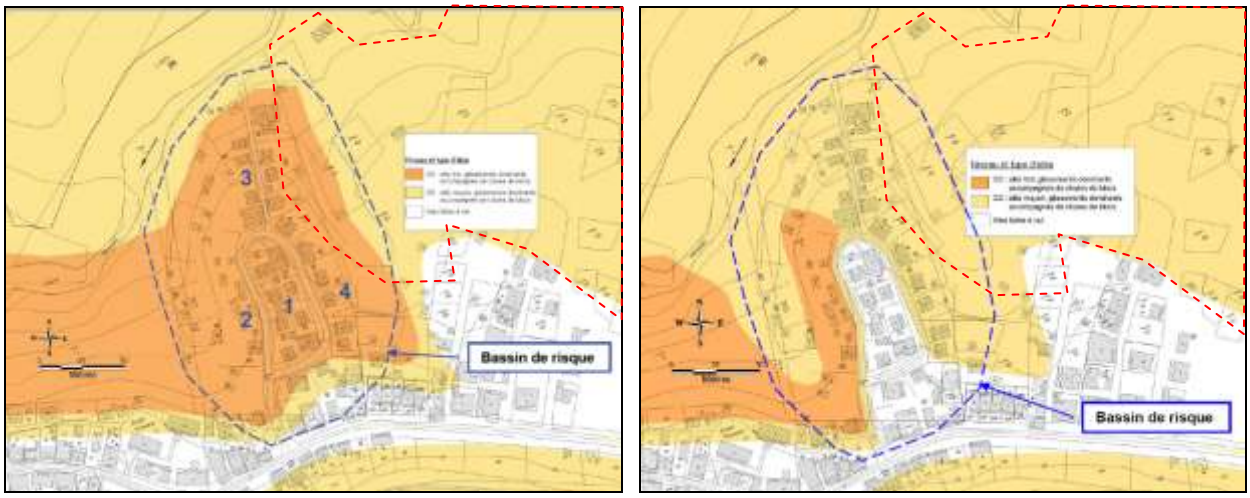


Figure 8 – Extrait de la note BRGM 2009 04. A gauche cartographie de l'aléa mouvements de terrain initial. A droite, cartographie de l'aléa mouvements de terrain suite à l'expertise de 2009. En pointillé rouge, le secteur de la présente expertise.

Au droit du secteur d'étude, l'expertise BRGM de 2009 a conduit à modifier le zonage des aléas mouvements de terrain (cf. Figure 8). Les principaux éléments justifiant une modification de l'aléa fort en aléa moyen voire faible à nul dans la note BRGM de 2009 sont les suivants :

- Le sommet de la butte est relativement plat → zone d'aléa faible à nul ;
- Les valeurs de pente sont de l'ordre de 20° en moyenne sur les versants Nord et Est ;
- Aucun indice d'instabilité n'a été relevé dans ces secteurs.
- Le collecteur des eaux pluviales semble bien fonctionner et l'évacuation se fait le long du versant Nord pour atteindre le cours d'eau en aval.
- Le bas de versant Ouest montre des pentes douces et représente morphologiquement un fond de ravine avec écoulement temporaire → zone d'aléa moyen.
- La rivière Mrowalé s'écoulant au Nord du bassin de risque ne semble pas contribuer à la déstabilisation du versant.

Concernant la conservation de l'aléa fort :

- Valeur de pente proche voire supérieure à 30° localement et/ou hauteur d'escarpement supérieure à 5 mètres.
- Matériaux constitués d'altérites évoluées et ayant une sensibilité élevée à l'occurrence de glissements de terrain d'ampleur potentiellement assez importante dénudées de végétation.
- Facteurs d'aggravation augmentant l'exposition des sols à l'érosion (cultures sur versant).
- Indice d'instabilité (fissure) constaté sur une des habitations surplombant le versant.

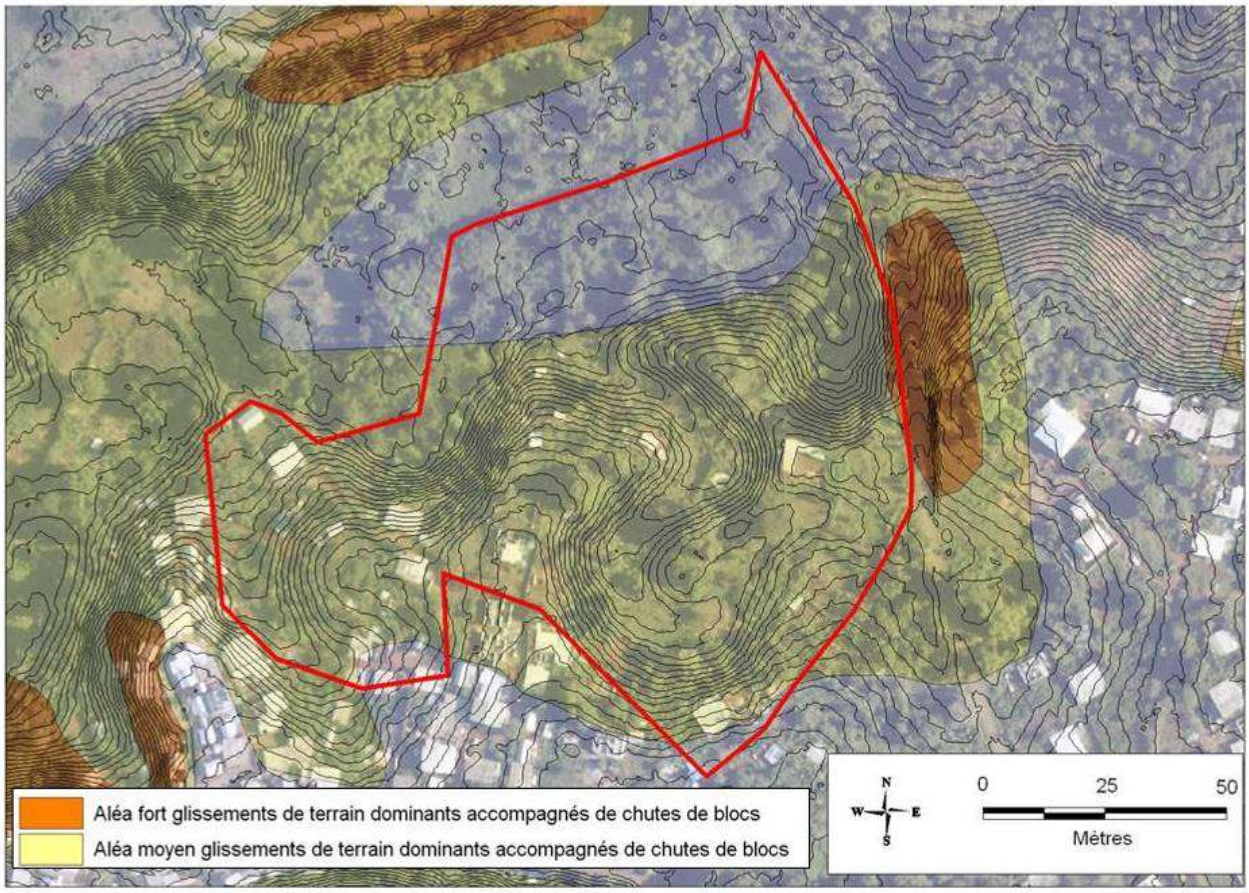


Figure 9 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'après l'atlas des aléas de la commune de Tsingoni. Fond orthophotos de l'IGN, courbes de niveau 1 m.

4.2 INONDATION

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 Tsingoni fait état pour la zone d'étude (cf. Figure 10) :

- d'un aléa fort inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine au droit de la rivière Mrowalé bordant la partie nord du secteur étudié ainsi qu'au droit des axes de ravines traversant le secteur d'étude et rejoignant la rivière à l'aval (bandeau de 10m de large pour les ravines affluentes);
- d'un aléa moyen inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine représentent les zones de débordement potentielles du cours d'eau Mrowalé au Nord du terrain.

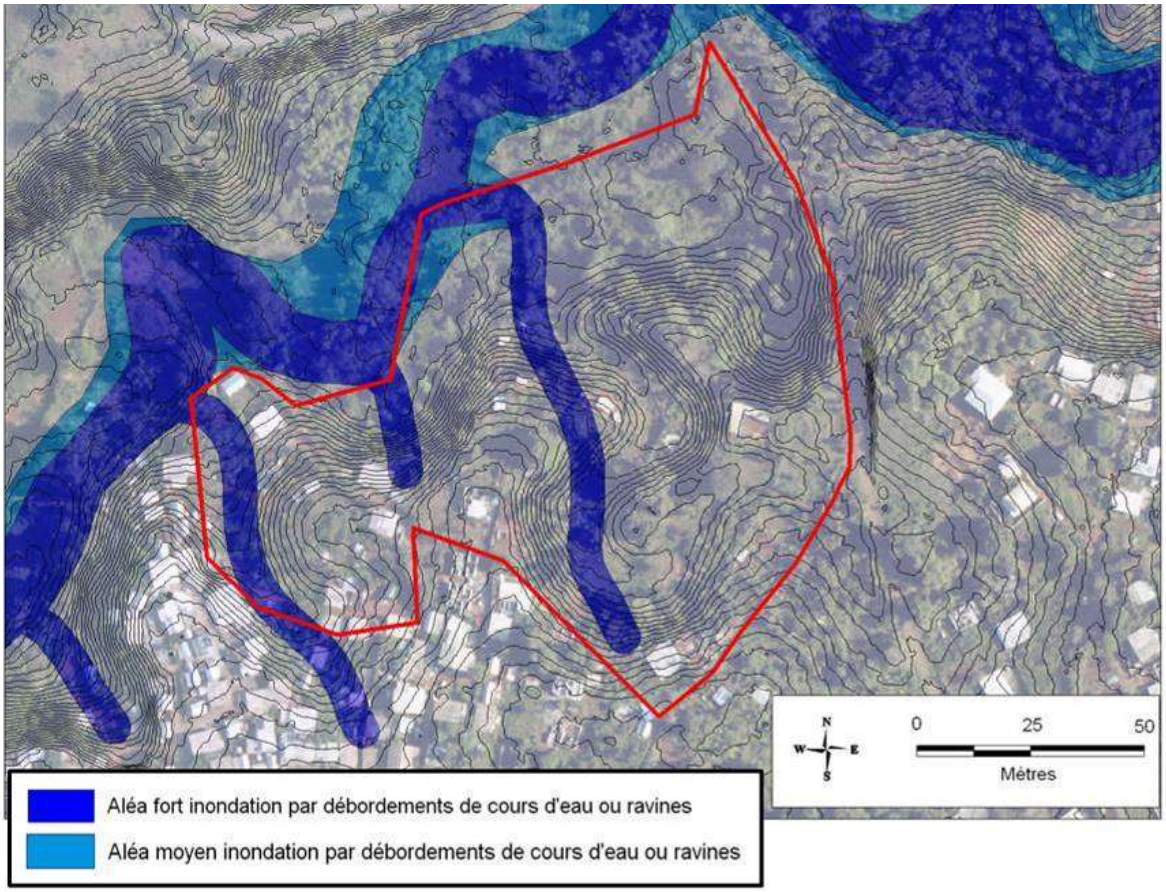


Figure 10 – Extrait de la cartographie de l'aléa inondation par débordements de cours d'eau ou ravines d'après l'atlas des aléas de la commune de Tsingoni. Fond orthophotos de l'IGN, courbes de niveau 1 m.

5. Précision des cartographies des aléas d'après le présent avis

5.1 METHODOLOGIE

La méthodologie utilisée dans la cartographie des aléas (mouvements de terrain et inondation par débordement de cours d'eau ou de ravine) 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 employée pour évaluer les aléas, à l'échelle du 1/5 000 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 modélisations spécifiques (trajectographique, hydraulique, etc.).

Les reconnaissances de terrain permettent à partir d'une approche hydrogéomorphologique, d'identifier les indices relatifs aux aléas (indices favorables ou non à leur déclenchement) et d'apporter une précision dans le positionnement des limites du zonage des aléas (notamment le positionnement effectif des axes d'écoulement et des zones potentielles de débordement).

La période de référence retenue dans la qualification de l'aléa inondation est le **siècle**.

En complément de cette approche « à dire d'expert », le zonage des aléas est précisé en intégrant les éléments d'appréciation pertinents issus des études techniques réalisées et analysées par le

BRGM. Les informations issues des reconnaissances ainsi que les résultats des éventuelles modélisations constituent des éléments supplémentaires qui sont intégrés dans la réflexion.

5.2 ALEAS MOUVEMENTS DE TERRAIN

5.2.1 Reconnaissance de terrain BRGM

Le secteur pouvant comporter un risque de glissements de terrain correspond aux zones de fortes pente qui sur la zone d'étude sont modélisées par une bande de 50 m de large environ qui sépare la zone basse (plaine d'inondation) et la zone de replat en partie sommitale.

Aucune trace de glissements de terrain anciens ou actifs ou d'instabilité n'a été relevée le jour de la visite de terrain, ni de trace d'érosion au droit des axes d'écoulement des ravines.

Ce talus comporte des pentes comprises entre 10 et 20° principalement et entre 20 et 30° ponctuellement au niveau de la ravine R2, dont la tête de talus peut atteindre 35°. L'ensemble des formations géologiques constituant ce talus sont favorables aux glissements de terrain (matrice peu compacte altérée comportant des éléments). Bien que les pentes ne soient pas très importantes pour l'ensemble du talus, des facteurs aggravants aux mouvements de terrain ont été observés tels qu'une anthropisation non contrôlée, un défrichage de la végétation ou encore la mise en place de culture qui accentuent l'érosion des sols. Ces observations amènent à conserver *a minima* un aléa moyen glissements de terrain au droit du talus.

En revanche, la partie du talus traversée par la ravine R2 comporte des pentes importantes et un cours d'eau (se ralliant à la Mrowalé) a été localisé en son pied pouvant entraîner de l'érosion régressive lors des crues ce qui constitue un facteur aggravant. Ces éléments amènent à classer ce secteur en aléa fort glissements de terrain dominants.

Figure 11 – Photographie du talus au centre du secteur expertisé (vue depuis le point A de la Figure 7) présentant à gauche, des plantations de bananier, au centre un défrichage de la végétation et à droite des plantations de manioc.

Par contre, les zones ayant une pente inférieure à 15° sont déclassées en aléa nul mouvements de terrain, en appliquant une marge de sécurité au moins de 5 m en pied et en haut du talus pour tenir compte des propagations éventuelles des phénomènes et de l'incertitude sur leur ampleur notamment.

5.2.2 Etude géotechnique de SEGC

Sécurisation de l'aménagement du lotissement Djaylane. Village de Tsingogni. Juillet 2012. Dossier n°1948. SEGC

Des essais de cisaillement à la boite de Casagrande ont été réalisés par SEGC (cf. Figure 12) pour deux échantillons (localisation des essais C1 et C2 sur la Figure 22).

Matériau	Cendres volcaniques ferrallitisées	Cendres volcaniques ferrallitisées
Localisation	C1	C2
Profondeur de prélèvement	0,5 m/TN	0,5 m/TN
Cisaillement CD : Cohésion Angle de frottement interne	 C' : 12 kPa φ' : 36°	 C' : 13 kPa φ' : 33°

Figure 12 – Résultats des essais de cisaillement à la boite de Casagrande. Données SEGC.

Des profils de stabilité ont été réalisés au droit du secteur de plus grande pente (au droit de la ravine R2), soit dans le contexte morphologique le plus défavorable du site, à l'aide du logiciel Talren, à partir des observations issues des reconnaissances de sol effectuées par le bureau d'études (cf. Figure 13). Un de ces profils est exposé en Figure 26 .

Deux formations ont été prises en compte dans le profil :

Type de formation	Cendres volcaniques ferrallitisées (SOL 1)	Altérites (SOL 2)
Masse volumique (kN/m3)	16	18
Cohésion effective C' (kPa)	12	20
Angle de frottement interne φ'	34	35

Figure 13 – Données d'entrées pour le profil de stabilité exposé en Annexe. Données SEGC.

Il a été considéré dans ce profil la présence d'une nappe d'eau dont les cotes appliquées sont issues des observations des sondages, ainsi que les conditions sismiques.

Les simulations par le logiciel Talren indiquent que le talus est stable vis-à-vis des glissements de terrain. SEGC conclu à la conservation de l'aléa moyen mouvements de terrain.

Avis BRGM sur l'étude SEGC :

Les valeurs des paramètres C' et φ' retenues par le bureau d'étude sont cohérentes avec les formations géologiques rencontrées.

Les données d'entrées et le modèle géologique sont cohérents avec les observations de terrain. En revanche, il aurait été pertinent d'établir des profils de stabilité en considérant une nappe à plus faible profondeur puisque le piézomètre situé au niveau du captage de la Mrowalé (au Nord-Est du secteur d'étude au niveau du pont) indique que l'amplitude de la nappe entre la saison sèche et la saison humide varie en moyenne de 2 m à 3 m(cf. Figure 14). Les sondages localisant la nappe ont été réalisés en saison sèche et intégrés au profil de stabilité, soit dans un cas de figure plus favorable qu'en saison humide.

Par ailleurs, les calculs menés n'intègrent pas de situation accidentelle modélisant la stabilité des terrains suite à de fortes pluies. Etant donné le contexte tropical de l'île de Mayotte, une telle situation peut survenir à court, moyen ou long terme et constitue généralement un cadre propice aux déclenchements d'instabilités dans des terrains altérés comme ceux identifiés sur le secteur d'étude. On regrettera donc que, dans le cadre d'une étude de précision des aléas mouvements, les calculs de stabilité n'intègrent pas cette situation propice aux instabilités.

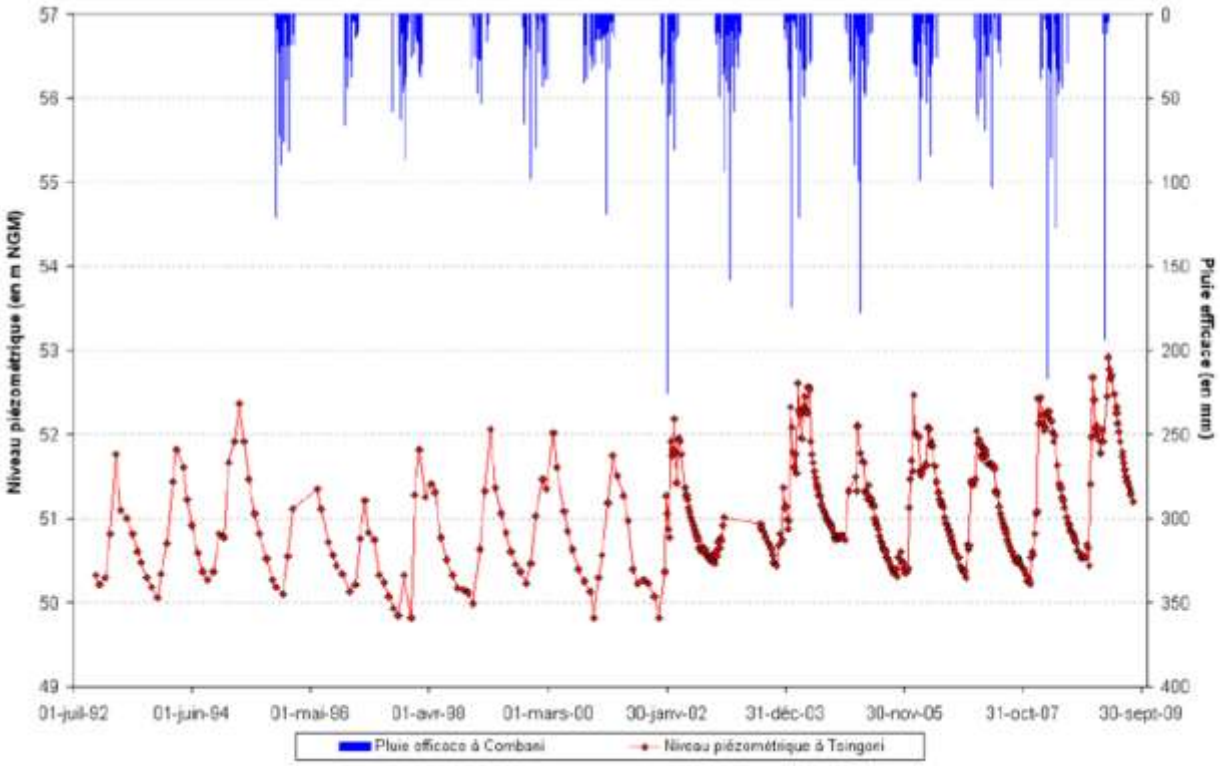


Figure 14 – Chroniques piézométriques du forage de Tsingoni (localisé en Figure 7) et des pluies efficaces (BRGM/RP-57626-FR)

5.2.3 Proposition de zonage de l'aléa mouvements de terrain

A partir des observations de terrains et suite à l'analyse de l'étude SEGC (dossier n°1948) au droit du site de Djaylane, les principales modifications de zonage de l'aléa mouvements de terrain retenues sont les suivantes :

- Surclassement du secteur proche de la ravine R2 en aléa fort du fait des fortes pentes (supérieures à 20 voire 35° en tête de talus), des formations lithologiques altérées en place et des risques de développement d'instabilités à long terme, associées notamment aux écoulements potentiels dans ce secteur et aux risques d'érosion en pied de talus dus aux écoulements d'un bras de la rivière Mrowalé. Bien que SEGC montre par ses calculs de stabilité un coefficient de sécurité supérieur à 1, les situations accidentelles mais potentielles ne sont pas modélisées et une incertitude persiste donc sur la stabilité à long terme du talus.
- Précision de la limite entre l'aléa nul et l'aléa moyen mouvements de terrain, notamment au nord du secteur, au niveau de la plaine alluviale de la rivière Mrowalé (rive gauche) afin de tenir compte d'une éventuelle propagation de mouvements de terrain en aval.

Le talus couvrant la majorité du secteur d'étude est par ailleurs maintenu en aléa moyen mouvements de terrain du fait des pentes moyennes, de la nature des terrains et des facteurs aggravants identifiés.

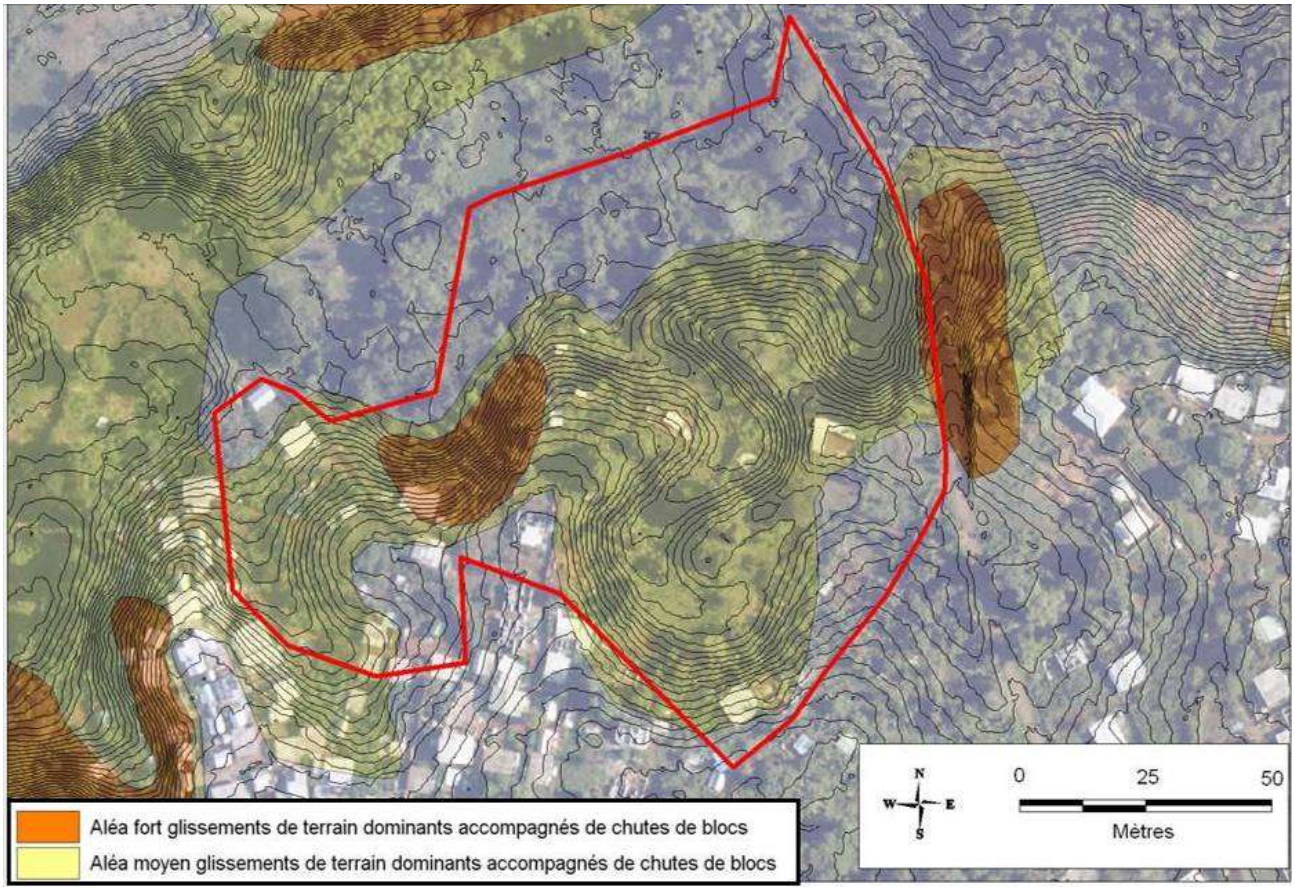


Figure 15 – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain d'après le présent avis. Fond orthophotos de l'IGN. Courbes de niveau 1 m.

5.3 ALEAS INONDATION

5.3.1 Reconnaissance de terrain

Toutes les ravines traversant le secteur d'étude ne sont pas pérennes. Aucun écoulement n'a été observé le jour de la visite de terrain pour ces ravines. Les axes de ces dernières rejoignent la rivière Mrowalé, il s'agit d'un cours d'eau pérenne majeur.

- Ravine 1

Cette ravine avait été repositionnée lors de l'expertise BRGM de 2009. Un aménagement sommaire a été entrepris afin de canaliser les eaux de la ravine, correspondant à l'établissement d'un fossé localisé en aval de la ravine (pas de continuité en amont) (cf. Figure 16). Celle-ci doit par conséquent poser des problèmes de ruissellement lors d'évènements pluvieux de forte intensité.

Figure 16 – Aménagements sommaires de la ravine 1 pour sa partie aval (point C de la Figure 7).

- Ravine 2

Aucune trace de ravinement n'a été observée le jour de la visite de terrain. Par ailleurs, les courbes issues du traitement du MNT de l'IGN n'indiquent pas d'axe de ravinement préférentiel (cf. Figure 3), même si le secteur proche présente une configuration favorable à la concentration des eaux pluviales lors de forts épisodes. L'aléa fort inondation est par conséquent modifié en aléa moyen inondation. Lors d'aménagements, il sera indispensable de prévoir des aménagements hydrauliques afin de prendre en compte l'imperméabilisation des sols qui pourraient cette fois entrainer la concentration des eaux et donc des vitesses importantes d'écoulement au niveau de ce talus.

- Ravine 3

Des traces de ruissellement ont été observées au droit de la ravine. L'aléa fort inondation a été repositionné à partir des courbes de niveau issues du MNT.

- Ravine 4

Cet axe de ravinement observé par le MNT n'a pas été identifié sur le terrain. Aucune trace de ravinement ou de ruissellement n'a été relevée le jour de la visite de terrain. Cependant, les courbes de niveau dessinant clairement le talweg, un aléa fort inondation sera retenu le long de cette ravine en prévision des vitesses que pourrait acquérir l'eau en se concentrant au centre de la ravine. La transition entre cette ravine et la plaine d'inondation est cartographié en aléa moyen.

Figure 17 – Vue sur la ravine 4 depuis le point D de la Figure 7.

- Rivière Mrowalé

Cette rivière a un bassin versant de 488 ha en localisant l'exutoire au niveau du projet. Cette rivière est pérenne avec un lit d'une largeur de 2 m en moyenne, l'acquisition de points GPS lors de la visite de terrain ont permis de préciser son parcours. L'aléa fort inondation a été recalé en fonction de ces données, mais aussi en utilisant les données cadastrales qui localisent son lit mineur.

Les courbes de niveau issues du MNT et les observations de terrain mettent en évidence une plaine d'inondation importante. En effet, la zone de replat atteint une largeur de 160 m. Celle-ci présente ponctuellement une végétation spécifique aux zones humides (cf. Figure 19). Celle-ci est cartographiée en aléa moyen et faible inondation en fonction de la distance au cours d'eau et de la topographie.

Une résurgence de nappe a été localisée au point G de la Figure 7 (cf. Figure 19), indiquant que la nappe est sub-affleurante, ainsi lors d'évènement pluviales, l'eau aurait tendance à s'accumuler rapidement et à entraîner une augmentation conséquente de la hauteur d'eau. A partir de ce point bas, on identifie un axe secondaire d'écoulement qui rejoint le lit mineur de la rivière à l'aval.

Figure 18 – A gauche, vue sur la plaine d'inondation de la rivière Mrowalé qui se situe au niveau du liseré de végétation en arrière-plan. A droite, rivière Mrowalé, point E de la Figure 7.

Figure 19 – A gauche, végétation observée localement au niveau de la plaine d'inondation témoignant d'une zone humide (point F de la Figure 7). A droite, résurgence de la nappe sur la partie Sud de la plaine d'inondation (point G de la Figure 7).

Toutes les ravines présentent un ordre de Strahler égal à 1 (correspondant au nombre de ramification). Par conséquent, une zone tampon de 5 m de part et d'autre de l'axe d'écoulement a été appliquée selon la méthodologie PPR appliquée à Mayotte. La Mrowalé est une rivière pérenne majeure, de ce fait, une zone tampon de 10 m de part d'autre de l'axe a été cartographiée, d'après la méthodologie PPR appliquée à Mayotte et en l'absence de modélisation hydraulique. Nos observations de terrains ont toutefois permis, ponctuellement, de préciser la largeur de cette zone tampon..

5.3.2 Etude hydraulique de TEMA

Réalisation d'une opération d'aménagement sur le titre 1570 Taoukif – Djailane à Tsingoni. Etude de risque lotissement Djailane – Phase I Partie Hydraulique. Août 2012. TEMA

Les débits de crue d'occurrence centennale ont été estimés pour les bassins versant des ravines R1, R2 et R3 ainsi que pour la Mrowalé en s'appuyant sur la méthodologie BRGM de 2008 (BRGM/RP-56881-FR). La méthode rationnelle a été employée. En revanche, l'axe d'écoulement de la ravine R3 utilisé pour les calculs ne correspond pas à la réalité. Il est par conséquent nécessaire d'estimer de nouveau les débits pour ce bassin versant, mais également pour la ravine Est (R4) identifiée sur le MNT.

	Mrowalé	R1	R2	R3
Aire (m²)	4 884 000	18 000	3 500	22 000
Temps de concentration moyen (min)	59,57	6,19	2,81	8,70
Q10 (m^3/s)	49,12	0,43	0,08	0,53
Q100 (m^3/s)	96,60	1,28	0,25	1,56

Figure 20 – Caractéristiques principales des bassins-versants selon l'étude hydraulique de TEMA.

L'étude hydraulique réalisée par TEMA ne présente pas d'observations de terrain ayant été réalisées au droit des 3 ravines du secteur.

En conclusion, le rapport d'étude indique que le lit de la rivière Mrowalé n'est pas suffisant pour reprendre des débits décennaux et centennaux ce qui justifie les risques de débordement. En l'occurrence, en l'état actuel, sans aménagements hydrauliques, un risque inondation perdure pour le secteur Nord.

Avis BRGM sur l'étude TEMA :

La méthodologie employée par TEMA est adaptée au secteur d'étude. Il faudrait compléter l'étude hydraulique en intégrant la ravine 4 identifiée dans la présente note. Par ailleurs, aucune proposition d'aménagements n'a été développée dans cette étude hydraulique, le BRGM recommande de dimensionner les ouvrages pour des débits centennaux comme prescrit par le PPR.

5.3.3 Proposition de zonage de l'aléa inondation

A partir des observations de terrains et suite à l'analyse de l'étude TEMA au droit du site de Djaylane, les principales modifications de zonage de l'aléa inondation par débordements de cours d'eau ou ravines retenues sont les suivantes :

- Repositionnement de l'aléa fort inondation concernant la Mrowalé en fonction de son parcours repérés à l'aide de levés GPS et du cadastre. Application d'une zone tampon

minimale de 20 m de large, élargie localement en fonction de la topographie ou de la résurgence de nappe observée.

- Application d'un aléa moyen et faible inondation au niveau de la plaine d'inondation de la Mrowalé aux vues de ses forts débits en cas de crue décennale et centennale (Q10 : 50 m^3/s et Q100 : 97 m^3/s) et de la topographie du site (zone de replat) pouvant entrainer de fortes hauteurs d'eau avec la présence d'une nappe sub-affleurante.
- Cartographie d'un aléa fort inondation au niveau d'une résurgence de nappe observée sur le terrain constituant un cours d'eau à priori pérenne.
- Localisation d'une nouvelle ravine à l'Est du secteur cartée en aléa fort inondation et en aléa moyen pour sa partie aval.
- Application d'une zone tampon de 5 m de part et d'autres des axes d'écoulement des ravines.

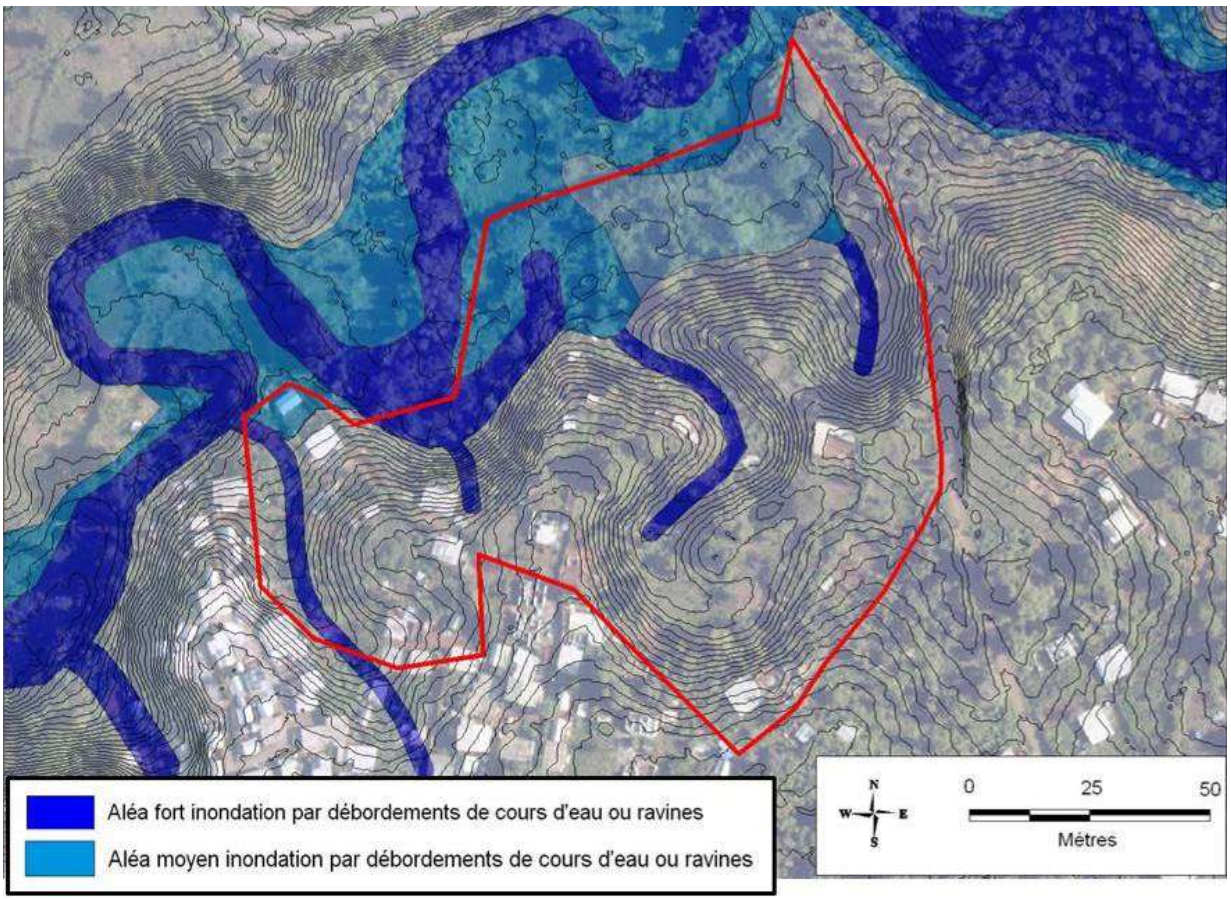


Figure 21 – Cartographie de l'aléa inondation par débordements de cours d'eau ou ravines d'après le présent avis. Fond orthophotos de l'IGN. Courbes de niveau 1 m.

6. Conclusion et recommandations

L'analyse des études hydraulique et géotechnique ainsi que le diagnostic de terrain effectué par le BRGM au droit du projet de lotissement Djaylane sur la commune de Tsingoni a permis de réévaluer la cartographie de l'aléa inondation et mouvements de terrain. Les principales modifications de zonage retenues sont les suivantes :

- Aléa inondation

1. Application d'une zone tampon de 5 m et *a minima* de 10 m de part et d'autres de l'axe d'écoulement respectivement pour les ravines et pour la rivière Mrowalé ;
2. Repositionnement de l'aléa inondation de la ravines Est R3 en fonction des courbes de niveau ;
3. Identification d'une nouvelle ravine à l'Est (R4), cartographiée en aléa fort dans son ensemble et en aléa moyen pour la transition à la plaine d'inondation ;
4. Cartographie d'un aléa fort inondation au droit d'un axe secondaire de la Mrowalé identifié au Sud de la plaine d'inondation ;
5. Modification de l'aléa moyen inondation concernant la rivière Mrowalé et cartographie d'un aléa faible en fonction de la topographie du site (zone basse correspondant à la plaine d'inondation), aux observations de terrain (localisation d'une résurgence de nappe indiquant une nappe sub-affleurante) et de forts débits décennaux et centennaux. Par ailleurs, l'étude hydraulique de TEMA indique que le lit de la rivière ne permet pas de reprendre des débits décennaux impliquant un risque inondation résiduel.

- Aléa mouvements de terrain

L'aléa moyen est conservé mais ses limites sont repositionnées à l'aide des courbes de niveaux issues du MNT puisque :

1. Formations lithologiques peu favorables correspondant à des cendres volcaniques ferrallitisées reposant sur un substratum altéritique ;
2. Pente moyenne de 20° ;
3. Présence de facteurs aggravants : anthropisation non contrôlée, défrichage de la végétation, mise en place de cultures ;
4. Présence d'une nappe d'eau au niveau du talus d'après les sondages de SEGC pouvant favoriser les glissements de terrain ;
5. Stabilité du talus assurée à long terme (selon données SEGC) mais non prise en compte d'une hauteur de nappe pouvant survenir en saison humide.

Modification de l'aléa moyen glissements de terrain en aléa fort au niveau du talus de la ravine R2 :

1. Risque de déstabilisation du talus à l'extrados d'un méandre de la rivière Mrowalé (érosion régressive, glissement de terrain) ;
2. Pentes fortes comprise entre 20 et 30° pouvant atteindre 35° en tête de talus ;
3. Formations lithologiques altérées ;
4. Stabilité du talus selon données SEGC mais non prise en compte d'une hauteur de nappe pouvant survenir en saison humide.

Le BRGM recommande :

1. De conserver une végétation dense afin de limiter l'érosion ;

2. De mettre en place un système de gestion des eaux pluviales au niveau du talus afin de limiter le ruissellement ;

3. De dimensionner les ouvrages hydrauliques par un bureau d'étude spécialisé et pour des crues d'occurrence centennale tel que prescrit dans les PPR ;

4. De mettre en œuvre des ouvrages de confortement dimensionnés par un bureau d'étude géotechnique spécialisé afin d'assurer la stabilité du talus sur le long terme.

7. Annexes 1 : Sondages SEGC

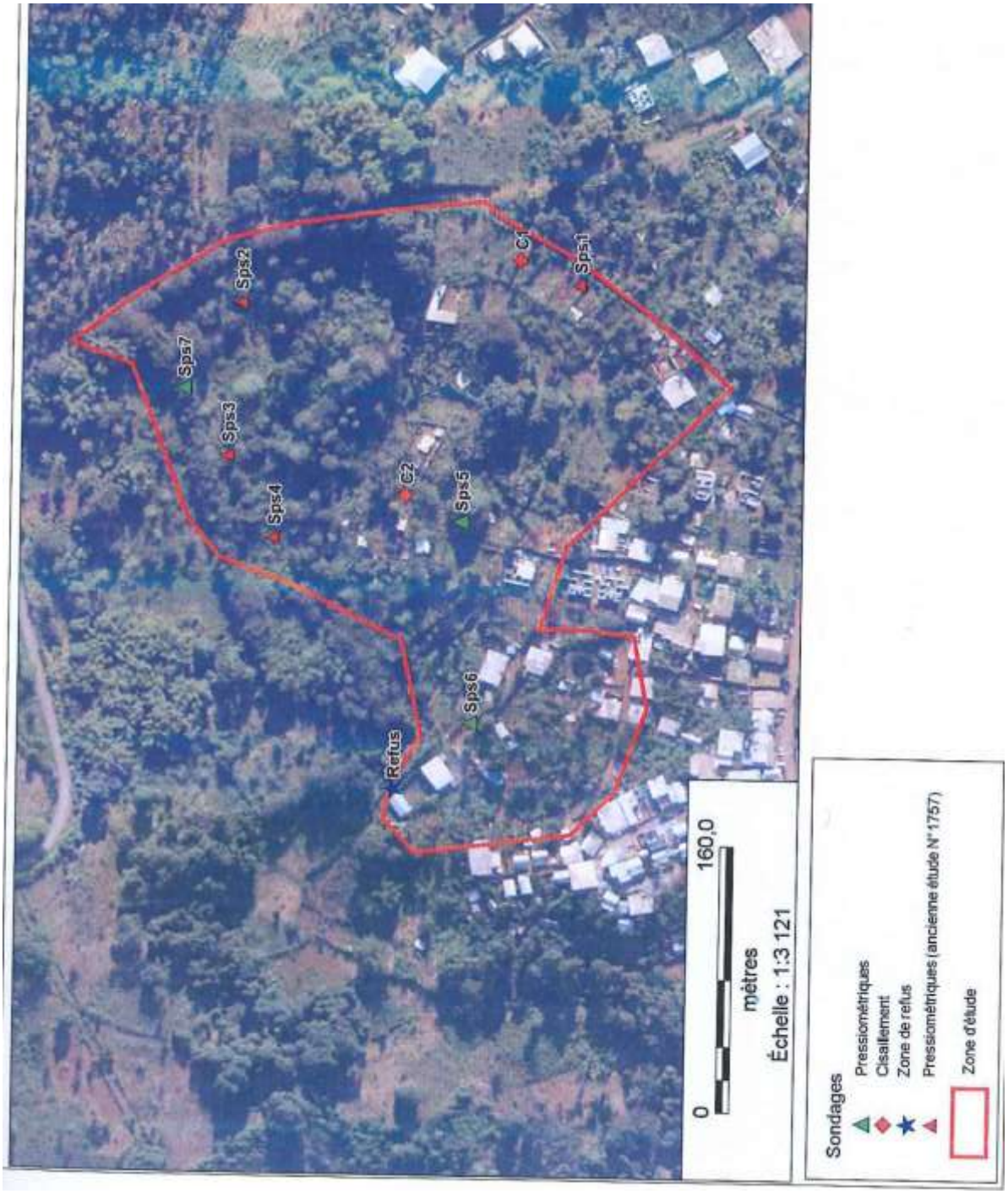


Figure 22 – Localisation des sondages de l'étude géotechnique de SEGC.

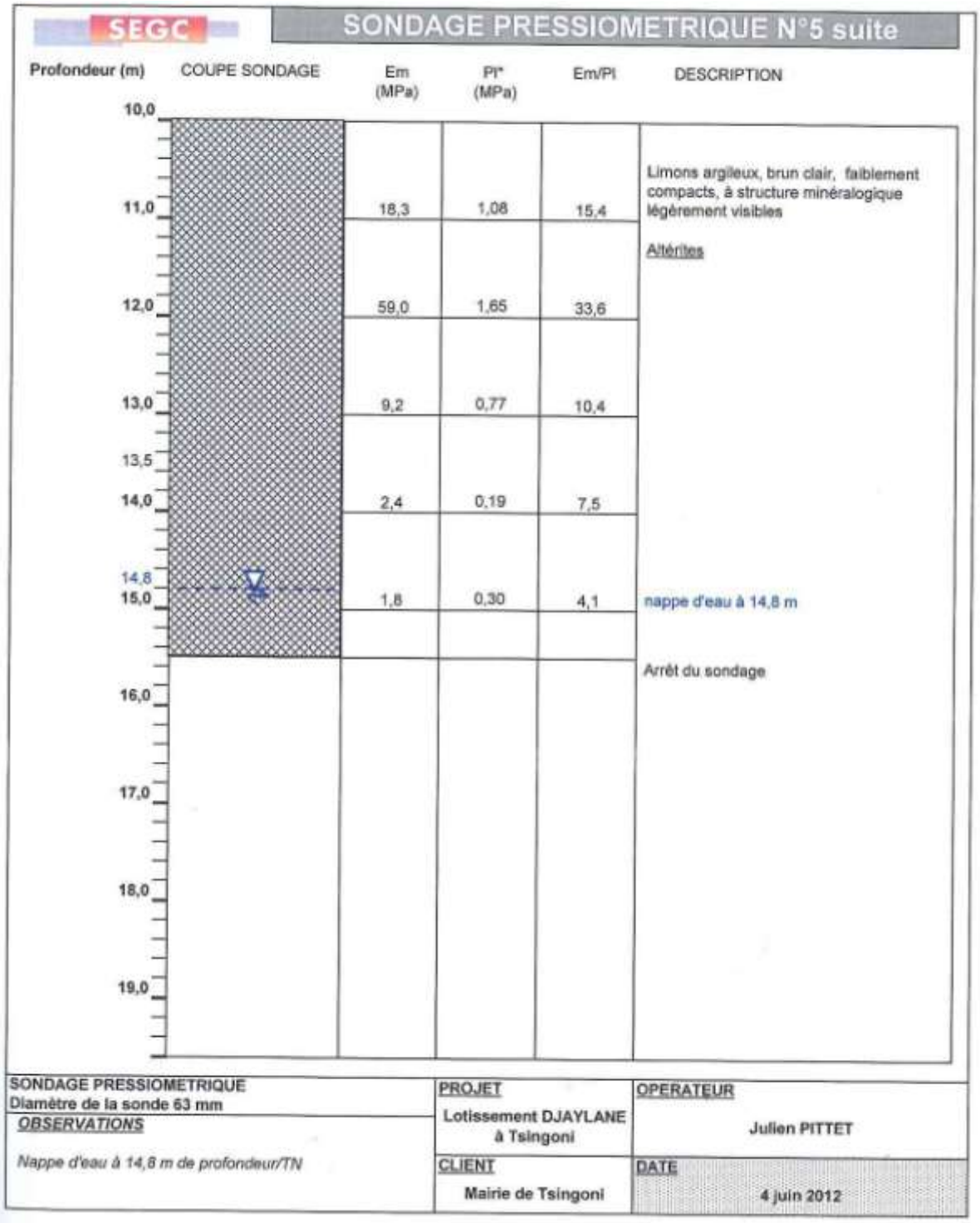
SEGC

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE N°5

Coordonnées X: _45,109449 Y: _-12,787418 Z: + 68,7 m NGM

Profondeur (m)	COUPE SONDAGE	Em (MPa)	Pl* (MPa)	Em/Pl	DESCRIPTION
TN 0					
0,1					Terre végétale
1,0		21,2	0,82	25,6	
2,0		39,4	1,97	19,8	
3,0		21,0	1,90	10,9	Limons fins, brun rougeâtre, moyennement à fortement compacts, à éléments volcaniques altérées et sains de taille infra-millimétrique à pluri- millimétrique.
4,0		9,9	0,92	10,4	Cendres volcaniques
5,0		10,4	0,86	11,5	
6,0		15,1	0,74	19,1	
7,0		11,2	1,00	10,5	
7,5					
8,0		17,5	1,25	13,2	Altérites
9,0		27,8	1,13	23,0	
10,0		19,8	1,92	9,8	

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE Diamètre de la sonde 63 mm	PROJET	OPERATEUR
OBSERVATIONS *Nappe d'eau à 14,8 m de profondeur/TN*	Lotissement DJAYLANE à Tsingoni	Julien PITTET
	CLIENT Mairie de Tsingoni	DATE 4 juin 2012



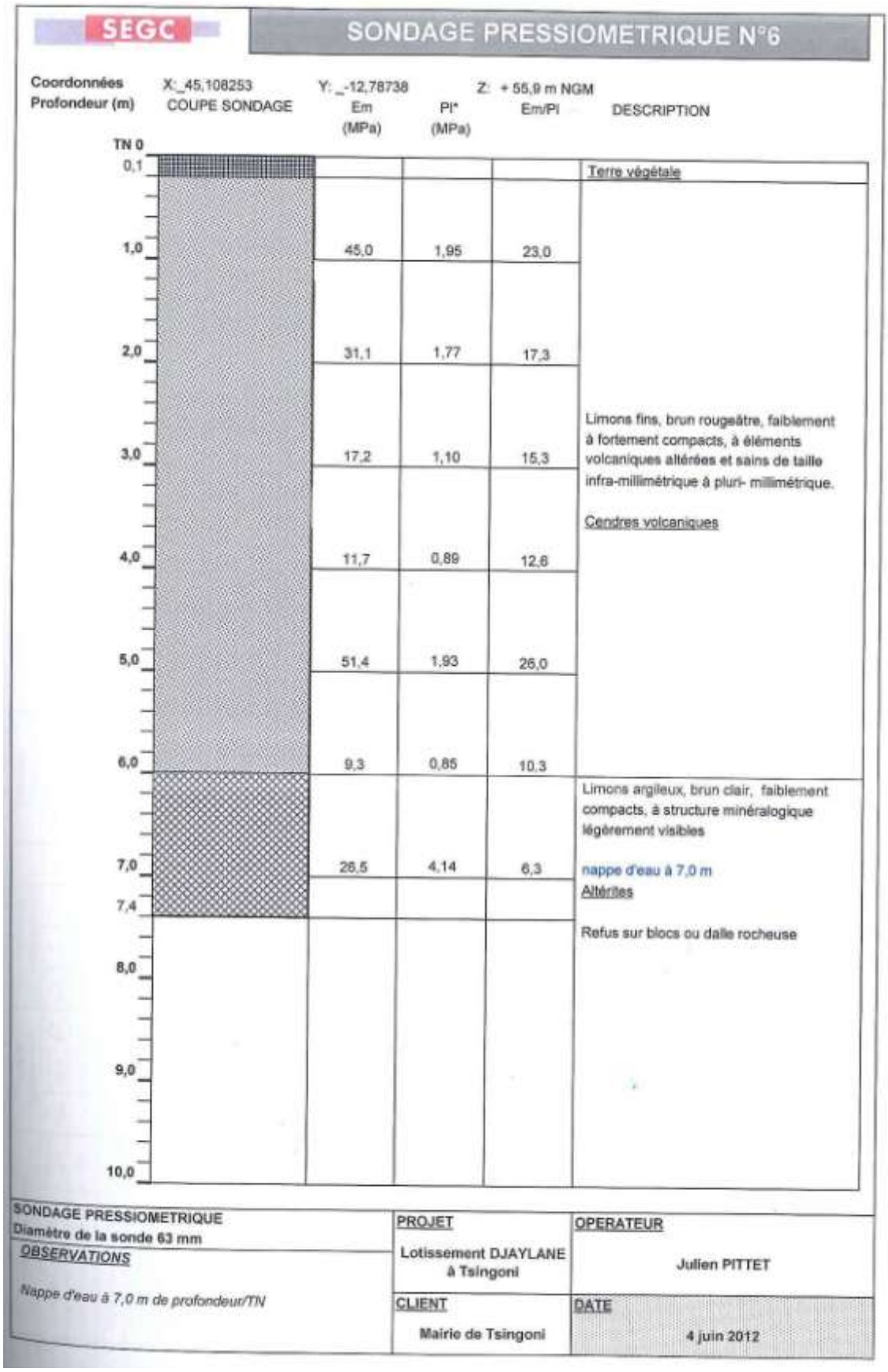
SEGC

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE N°5 suite

Profondeur (m)	Em (MPa)	Pl* (MPa)	Em/Pl	DESCRIPTION
10,0				
11,0	18,3	1,08	15,4	Limons argileux, brun clair, faiblement compacts, à structure minéralogique légèrement visibles
				Altérites
12,0	59,0	1,65	33,6	
13,0	9,2	0,77	10,4	
13,5				
14,0	2,4	0,19	7,5	
14,8				
15,0	1,8	0,30	4,1	nappe d'eau à 14,8 m
				Arrêt du sondage
16,0				
17,0				
18,0				
19,0				

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE Diamètre de la sonde 63 mm	PROJET Lotissement DJAYLANE à Tsingoni	OPERATEUR Julien PITTET
OBSERVATIONS *Nappe d'eau à 14,8 m de profondeur/TN*	CLIENT Mairie de Tsingoni	DATE 4 juin 2012

Figure 23 – Sondage pressiométrique n°5



SEGC

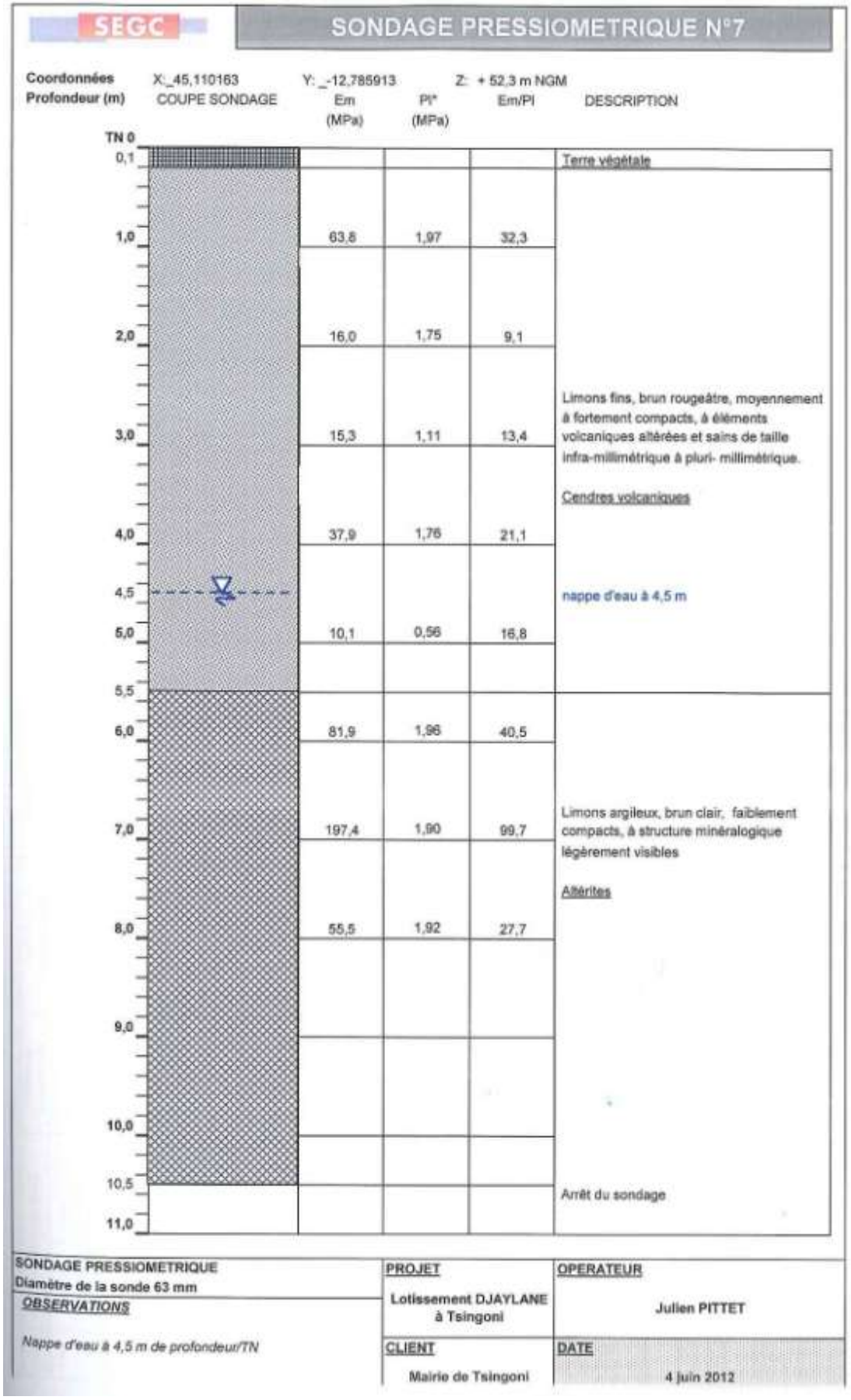
SONDAGE PRESSIOMETRIQUE N°6

Coordonnées X: _45,108253 Y: _-12,78738 Z: + 55,9 m NGM

Profondeur (m)	COUPE SONDAGE	Em (MPa)	Pl* (MPa)	Em/Pl	DESCRIPTION
TN 0 – 0,1					Terre végétale
1,0		45,0	1,95	23,0	
2,0		31,1	1,77	17,3	
3,0		17,2	1,10	15,3	Limons fins, brun rougeâtre, faiblement à fortement compacts, à éléments volcaniques altérées et sains de taille infra-millimétrique à pluri- millimétrique.
4,0		11,7	0,89	12,6	Cendres volcaniques
5,0		51,4	1,93	26,0	
6,0		9,3	0,85	10,3	
7,0		26,5	4,14	6,3	Limons argileux, brun clair, faiblement compacts, à structure minéralogique légèrement visibles nappe d'eau à 7,0 m
7,4					Altérites Refus sur blocs ou dalle rocheuse
8,0					
9,0					
10,0					

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE Diamètre de la sonde 63 mm	PROJET	OPERATEUR
OBSERVATIONS Nappe d'eau à 7,0 m de profondeur/TN	Lotissement DJAYLANE à Tsingoni	Julien PITTET
	CLIENT Mairie de Tsingoni	DATE 4 juin 2012

Figure 24 –Sondage pressiométrique n°6.



SEGC

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE N°7

Coordonnées X: 45,110163 Y: -12,785913 Z: + 52,3 m NGM

Profondeur (m)	COUPE SONDAGE	Em (MPa)	Pl* (MPa)	Em/Pl	DESCRIPTION
TN 0					
0,1					Terre végétale
1,0		63,8	1,97	32,3	
2,0		16,0	1,75	9,1	
3,0		15,3	1,11	13,4	Limons fins, brun rougeâtre, moyennement à fortement compacts, à éléments volcaniques altérées et sains de taille infra-millimétrique à pluri- millimétrique.
4,0		37,9	1,76	21,1	Cendres volcaniques
4,5					nappe d'eau à 4,5 m
5,0		10,1	0,56	16,8	
5,5					
6,0		81,9	1,96	40,5	
7,0		197,4	1,90	99,7	Limons argileux, brun clair, faiblement compacts, à structure minéralogique légèrement visibles
8,0		55,5	1,92	27,7	Altérites
9,0					
10,0					
10,5					Arrêt du sondage
11,0					

SONDAGE PRESSIOMETRIQUE
Diamètre de la sonde 63 mm

OBSERVATIONS

Nappe d'eau à 4,5 m de profondeur/TN

PROJET: Lotissement DJAYLANE à Tsingoni

OPERATEUR: Julien PITTET

CLIENT: Mairie de Tsingoni

DATE: 4 juin 2012

Figure 25 –Sondage pressiométrique n°7.

8. Annexes 2 : Profil Talren

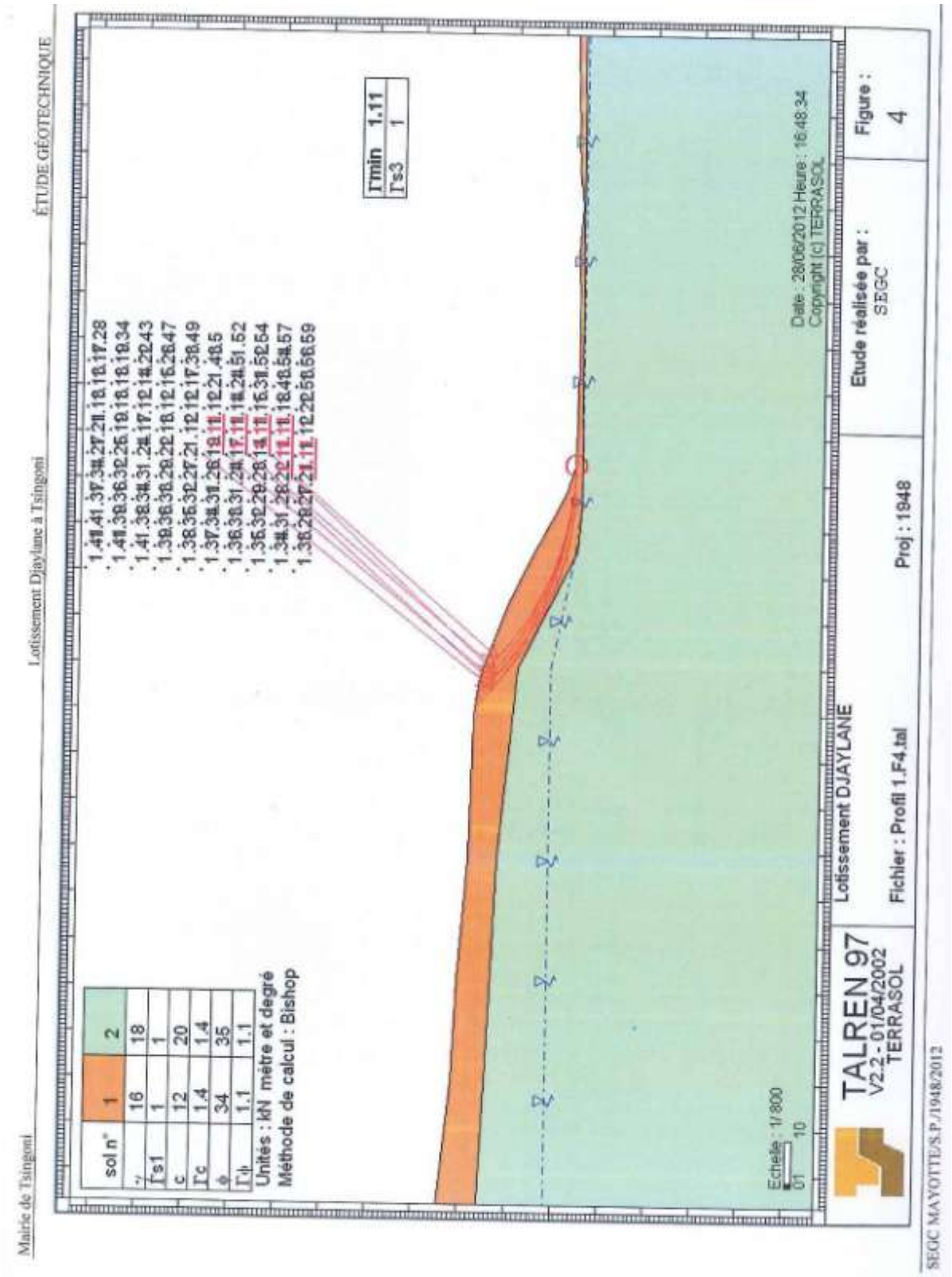


Figure 26 – Profil de stabilité élaboré par SEGC à l'aide du logiciel Talren.

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France
Tel. 02 38 64 34 34

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