

# Programme Arai 3 Précision de l'aléa glissement de terrain sur l'île de Tahaa par une approche probabiliste (ALICE)

Rapport final

BRGM/RP-60772-FR  
Mars 2013



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Programme Arai 3 Précision de l'aléa glissement de terrain sur l'île de Tahaa par une approche probabiliste (ALICE)

Rapport final

BRGM/RP-60772-FR  
Mars 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2010 10RISH23

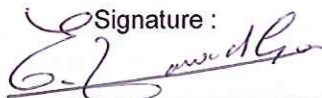
O. Sedan, C. Mathon, A. Nachbaur, E. Nowak

**Vérificateur :**

Nom : E. Vanoudheusden

Date : 14/03/13

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Evelyne Foerster

Date : 19/03/13

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

**Mots clés** : Risques naturels, Plan Prévention Risque, Glissement de terrain, aléas, ALICE, BORA, Tahaa, Polynésie française.

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

Sedan, O., Mathon M., Nachbaur A., Nowak E. (2013). Programme ARAI 3. Précision de l'aléa glissement de terrain sur l'île de Tahaa par une approche probabiliste (ALICE). Rapport final. BRGM/RP- 60772-FR. p 115, 50 figures,, 2 tableaux, 4 annexes

## Synthèse

L'île de Tahaa est principalement composée de formations géologiques très altérées. L'histoire (notamment les événements cycloniques de 1998) nous a montré qu'elle pouvait être le siège de nombreux glissements de terrains, dont certains pouvaient être de très grande ampleur et dommageables (plusieurs morts).

Dans le cadre du programme Risques naturels, ARAI, la commune de Tahaa a fait l'objet en 2006 d'un zonage à 1/10 000 de l'aléa aux phénomènes naturels auxquels elle était susceptible d'être exposée, à savoir : inondation, houle cyclonique, tsunami, mouvements de terrain (projet de PPR 2006). En 2010, dans le cadre du programme ARAI3, il a été demandé au BRGM d'apporter des moyens de conforter la cartographie d'aléa mouvements de terrain de la commune.

Cette étude vise donc à proposer une approche déterministe d'évaluation de l'aléa glissement de terrain sur l'île de Tahaa, de manière à conforter ou affiner le zonage d'aléa existant du PPR, réalisé par expertise pendant le programme ARAI. Cette étude se focalise sur les glissements et n'évalue pas les événements rocheux de type chute de blocs. Cette approche fait intervenir deux logiciels récemment développés par le BRGM, un modèle de stabilité de pente (ALICE) couplé à un module de propagation (BORA).

Le logiciel ALICE permet d'aboutir à une évaluation quantitative de l'aléa à partir d'une approche probabiliste permettant de prendre en compte les incertitudes en assignant des distributions probabilistes aux paramètres du modèle. Le principe est la mise en œuvre d'un modèle de stabilité de pente, avec une géométrie de rupture définie ici comme plane. Le modèle considéré est monocouche, on suppose que la couche affleurante repose sur un horizon considéré comme stable (substratum).

Vis-à-vis des glissements de terrain, trois types de formations lithologiques ont été distinguées : le rocher, les colluvions et le Mamu. Les identifier sur le terrain a été l'un des principaux objectifs des investigations de terrain. Une étape importante a donc été de sectoriser l'île de Tahaa, en zones homogènes en termes de géologie et de caractéristique géotechnique. Chaque couche est caractérisée par son poids volumique, son épaisseur et des caractères géomécaniques avec leur variabilité (cohésion et angle de frottement interne). Les caractéristiques mécaniques de chacune de ces lithologies ont été déterminées à partir des valeurs connues dans la littérature (notamment issues des investigations in situ menées lors du programme ARAI) et de rétro-calage sur deux événements particuliers.

*In fine*, la carte d'aléa « ALICE » élaborée dans le cadre de cette étude, donne accès en tout point, à la probabilité qu'un glissement affecte cet endroit. Cette valeur intègre les incertitudes et la variabilité naturelle des paramètres d'entrées les plus discriminants en termes de stabilité.

En termes de résultats cartographiques, les décideurs disposent donc de la carte d'aléa mouvement de terrain issu du projet de PPR de 2006 à laquelle est surimposée la probabilité de glissement évaluée par Alice/Bora. Il est important de rappeler les différences entre ces deux cartes :

- il n'y a pas de différence de qualité de données d'entrée topographique ;
- la carte naturaliste du PPR de 2006 est principalement issue d'expertise. L'investigation de terrain est pratiquement systématique et à ce titre, a pu prendre en compte des spécificités locales ;
- la carte déterministe « ALICE » de 2012 repose sur des calculs de stabilité et à ce titre, apporte une quantification de l'aléa robuste, si tant est qu'il n'y ait pas une spécificité locale, ayant une signification physique.

Cette étude donne un nouvel éclairage à la carte d'aléa du PPR, en précisant d'une part, le sens du niveau d'aléa initial et d'autre part les possibilités quant à la révision du zonage. Cette information est donc précieuse puisqu'elle apporte des outils pour estimer la confiance à accorder au zonage existant.

Cette nouvelle modélisation permet de confirmer que globalement, les cartes d'aléas établies lors du premier programme ARAI apparaissent correctes et sécuritaires. L'emprise de la zone d'aléa fort du PPR couvre la majorité des zones à aléa élevé « ALICE ». Cependant, il existe des secteurs en contradiction apparente, permettant en réalité, d'affiner la connaissance de l'aléa.

Ces outils d'aide à la décision mis en place, le Service de l'Urbanisme peut désormais s'appuyer sur cette étude, pour envisager un affinage du zonage réaliste, ciblé sur les quelques secteurs à enjeux éligibles à ce déclassement :

- Une révision de l'aléa est envisageable pour les zones d'aléa fort du PPR actuel où l'aléa ALICE est élevé, sous condition d'acquisition de nouvelles données d'entrées. Il peut s'agir notamment de préciser les caractéristiques mécaniques mais surtout de préciser l'épaisseur des altérites ou la présence et l'emprise des colluvions par des investigations géotechniques ;
- Un contrôle de terrain apparaît nécessaire pour les zones d'aléa ALICE élevé situées en zone d'aléa moyen du PPR actuel.

A l'inverse, sur une grande partie du territoire communale, le niveau d'aléa fort est a priori confirmé : il ne sert à rien d'y lancer une étude de réévaluation de l'aléa.

La carte d'aléa ALICE a l'avantage de représenter une valeur de probabilité quantitative ayant une signification physique (la probabilité d'avoir un facteur de sécurité  $< 1$ ), qui permet d'envisager a terme, pouvoir aboutir à une véritable carte d'aléa, ce qui serait novateur en termes de mouvement de terrain. Il resterait à intégrer la notion d'intensité du phénomène d'une part et celle de période de retour. Celle-ci pourrait être appréciée avec l'intégration des mesures pluviométriques, facteur déclenchant principal, pour lequel il est possible d'estimer une probabilité de retour. Pour cela, il reste nécessaire d'obtenir les données pluviométriques (pluviomètre,

données radar, ..) et/ou piézométrique et d'évaluer ensuite une fonction de transfert avec le taux de remplissage de la nappe, par exemple.





## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Contexte et objectifs de l'étude.....</b>	<b>15</b>
2.1. PRESENTATION DE L'ILE DE TAHAA.....	15
2.1.1. Contexte morphologique .....	15
2.1.2. Contexte géologique .....	15
2.2. L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN SUR L'ILE DE TAHAA.....	16
2.2.1. Phénomènes étudiés.....	16
2.2.2. Cartographie de l'aléa déjà existante .....	16
2.2.3. Objectif de l'étude : mise en place d'une méthodologie complémentaire	17
<b>3. Production des données d'entrée nécessaires.....</b>	<b>19</b>
3.1. INFORMATION TOPOGRAPHIQUE .....	19
3.1.1. MNT .....	19
Ce MNT a été rééchantillonné au pas de 25 m, pour plusieurs raisons : .....	19
3.2. CARTES DERIVEES DU MNT .....	20
3.2.1. Cartes topographiques et photographies aériennes .....	22
3.3. INFORMATION GEOLOGIQUE .....	23
3.3.1. Carte géologique.....	23
3.3.2. Investigation de terrain .....	23
3.4. INFORMATION SUR LES INSTABILITES.....	27
3.4.1. Inventaire des mouvements de terrain (BD MVT, PPR..).....	27
3.4.2. L'exemple de deux glissements de terrain particulier .....	29
3.4.3. La carte d'aléa mouvement de terrain du PPR .....	32
3.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES PRESENTANT DES COLONNES DE SOL HOMOGENES (ZONAGE GEOTECHNIQUE).....	32
3.6. CARACTERISTIQUES MECANQUES DES COLONNES DE SOL .....	34
3.6.1. Caractéristiques mécaniques nécessaires .....	34
3.6.2. Ajustement par rétro-calage sur deux événements spécifiques.....	34
3.6.3. Valeurs obtenues .....	35
3.7. SATURATION DES TERRAINS : PIEZOMETRIE/PLUVIOMETRIE .....	36

3.7.1. Piézométrie .....	36
3.7.2. Pluviométrie.....	37
<b>4. Mise en œuvre du programme ALICE® .....</b>	<b>40</b>
4.1. PRESENTATION DU LOGICIEL ALICE .....	40
4.2. PRINCIPE CONSIDERE .....	41
4.2.1. Découpage par zone .....	41
4.2.2. Type de glissement .....	41
4.2.3. Caractéristiques mécaniques .....	42
4.2.4. Caractéristiques hydrogéologiques.....	42
4.3. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE RUPTURE : MODULE ALICE .....	43
4.3.1. Génération des profils .....	43
4.3.2. Paramétrage Alice .....	43
4.3.3. Calcul des facteurs de sécurité par profils – analyse de stabilité .....	45
4.3.4. Calcul de la probabilité de déclenchement d'un glissement.....	46
4.4. PRISE EN COMPTE DE LA PROPAGATION : POST TRAITEMENT BORA ..	46
4.4.1. Conception du modèle.....	46
4.4.2. Le paramétrage .....	47
4.4.3. Résultat du module de propagation .....	49
4.5. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE GLISSEMENT : COMBINAISON DE LA RUPTURE ET DE LA PROPAGATION .....	49
4.5.1. Combinaison de la probabilité de rupture et de propagation .....	49
4.5.2. Analyse de sensibilité .....	50
4.5.3. Choix de la configuration de référence .....	52
<b>5. Analyse des résultats dans la logique PPR – enseignements .....</b>	<b>53</b>
5.1. PRESENTATION DES RESULTATS : UN NOUVEL ECLAIRAGE DE LA CARTE D'ALEA.....	53
5.2. EXPLOITATION DES RESULTATS .....	54
5.3. LIMITES ET PERSPECTIVES.....	58
<b>6. Conclusions.....</b>	<b>59</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>61</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 – Extrait de la carte d'aléa mouvement de terrain, issu du projet de zonage PPR de la commune de Tahaa. Echelle : 1/10 000 .....	17
Figure 2 - Modèle numérique de terrain de Tahaa au pas de 5 m. Source : Service de l'Urbanisme .....	19
Figure 3 - Carte des pentes au pas de 25 m .....	20
Figure 4 - Carte des directions des lignes de plus forte pente .....	21
Figure 5 - Accumulation - Modèle de drainage .....	21
Figure 6 - extrait de la carte topographique à 1/20 000 .....	22
Figure 7 – Orthophotographie de Tahaa.....	22
Figure 8 : Carte géologique au 1/100 000 (Blais et al., 2004) .....	23
Figure 9 - Localisation des stations d'observation terrain – Mission 02/2011 .....	24
Figure 10 : Rocher et blocs .....	25
Figure 11 : Colluvions épaisses .....	25
Figure 12 : Colluvions minces sur substratum rocheux .....	26
Figure 13 : Mamu .....	26
Figure 14 : Mouvements de terrain recensés en 1998 (Source BD MVT) et localisation des deux événements évoqués par la suite.....	28
Figure 15 - Exemple de carte informative du projet PPR .....	29
Figure 16 : Photo de la coulée du PK 5.7. Source : LTPP.....	30
Figure 17 : Photo de la coulée du PK 5.7. Source : LTPP.....	30
Figure 18 : Glissement de terrain de Haamene. Source : Inventaire des mouvements de terrain à Raiatea et Tahaa – Polynésie française .....	31
Figure 19 - Zonage géotechnique initiale à partir des investigations de terrain .....	33
Figure 20 - Zonage géotechnique modulé par les épaisseurs.....	33
Figure 21 : Choix d'une distribution triangulaire pour les valeurs possibles des caractéristiques mécaniques.....	35
Figure 22 : Définition du « taux de remplissage », donnée d'entrée du logiciel ALICE.....	36
Figure 23 : Chronique pluviométrique disponible sur les deux pluviomètres (données Météo France).....	38
Figure 24 : Comparaison des cumuls annuels de pluies sur les deux pluviomètres .....	38
Figure 25 : Comparaison des cumuls journalier de pluies sur les deux pluviomètres.....	39
Figure 26 : Colonne de sol monocouche considérée .....	41
Figure 27 : Type de glissement considéré .....	42
Figure 28 : Exemple des profils 2D générés automatiquement par ALICE .....	43
Figure 29 : Exemple de fenêtre utilisateur Alice .....	44

Figure 30 : fenêtre Profil ALICE® - calcul le long du profil. L'axe vertical est gradué de manière non linéaire. En partant du bas, les lignes horizontales correspondent respectivement à FS=0, FS=1, FS=2, FS= 10 et FS=100. ....	45
Figure 31 : Règles de propagation de BORA. Source : Terrier et Sedan (2009).....	47
Figure 32 : Paramètres du modèle de propagation.....	48
Figure 33 : Combinaison des simulations et probabilités obtenues en chaque pixel.....	49
Figure 34 : Résultat ALICE pour un glissement de 75 m .....	51
Figure 35 : Extrait de la carte résultat : Double éclairage du niveau d'aléa.....	54
Figure 36 : Proposition de lecture des deux informations complémentaires .....	56
Figure 37 : Zoom des cartes en Annexe 4 pour illustrer la situation d) et e).....	57
Figure 38 : Zoom des cartes en Annexe 4 pour illustrer la situation b) et c).....	57
figure 39 : formulaire de saisie des données générales du modèle .....	69
figure 40 : carte ALICE®.....	70
figure 41 : bloc de boutons SIG .....	70
figure 42 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant. ....	79
figure 43 : schéma de principe du logiciel GARDÉNIA .....	80
figure 44 : schéma des réservoirs GARDÉNIA .....	81
figure 45 : fenêtre GARDÉNIA LT d'ALICE® .....	82
figure 46 : choix d'un profil pour des calculs de stabilité .....	85
figure 47 : fenêtre Profil ALICE® - calcul en un point.....	86
figure 48 : fenêtre Profil ALICE® - calcul le long du profil .....	87
figure 49 : Carte ALICE® des facteurs de sécurité .....	88
figure 50 : Carte ALICE® de l'aléa (probabilité FS<1) .....	89

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres physiques du sol sur le coefficient de stabilité. Source : Rapport de présentation du PPR de Tahaa .....	34
Tableau 2 : Synthèse des valeurs retenues comme données d'entrées du Logiciel ALICE.....	36

## Liste des annexes

Annexe 1 Alice : Guide utilisateur.....	65
---	----

Annexe 2 Résultat ALICE, Sans propagation .....	91
Annexe 3 Résultat ALICE, Avec propagation .....	97
Annexe 4 Résultat de la modélisation ALICE et comparaison avec le projet de zonage PPR .....	103



# 1. Introduction

L'île de Tahaa est composée principalement de formations géologiques très altérées. L'histoire (notamment les événements cycloniques de 1998) nous a montré qu'elle pouvait être le siège de nombreux glissements de terrains, dont certains pouvaient être de très grande ampleur et dommageables (plusieurs morts).

Dans le cadre du programme Risques naturels, ARAI, la commune de Tahaa a fait l'objet en 2006 d'un zonage à 1/10 000 de l'aléa aux phénomènes naturels auxquels elle était susceptible d'être exposée, à savoir : inondation, houle cyclonique, tsunami, mouvements de terrain.

En 2010, dans le cadre du programme ARAI3, il a été demandé au BRGM d'apporter des moyens de conforter la cartographie d'aléa mouvements de terrain de la commune.

En effet, le BRGM a développé depuis, de nouveaux outils d'évaluation de l'aléa glissement de terrain, dont le logiciel ALICE qui permet d'aboutir à une évaluation quantitative de l'aléa.

Cette action vise donc à proposer une approche déterministe pour évaluer l'aléa mouvement de terrain sur l'île de Tahaa, de manière à conforter ou affiner le zonage existant mettant en œuvre uniquement l'expertise.





## 2. Contexte et objectifs de l'étude

### 2.1. PRESENTATION DE L'ILE DE TAHAA

L'île de Tahaa s'étend sur 90 km<sup>2</sup>, elle présente une topographie montagneuse, dont le point culminant s'élève à 585 m d'altitude au Mont Ohiri.

Tahaa partage le même récif-barrière que Raiatea. Ce récif comporte des motu séparés de passes au droit des estuaires des rivières principales et des baies.

La commune de Tahaa compte 8 communes associées qui sont, d'est en ouest, Faaaha, Hipu, Iripau, Tapuamu, Ruutia, Niua, Vaitoare et Haamene, pour un total d'environ 4 845 habitants.

#### 2.1.1. Contexte morphologique

Le relief modéré de l'île se caractérise par des versants peu élevés (moins de 300 m) et de nombreuses baies qui incisent profondément le littoral (Hurepiti, Apu, Haamene et Faaaha).

Le point culminant de l'île s'élève à 585 m au Mont Ohiri. Les principaux sommets de la commune sont le mont Fareura (458 m) au sud-est, le mont Haporauta (305 m) au sud-ouest, le mont Haaritaa (518 m) au nord-ouest, et le mont Roua Roa (418 m) au nord-est.

#### 2.1.2. Contexte géologique

La carte géologique à 1/100 000 de Tahaa (Blais et al., 2004) indique que Tahaa est constituée d'un volcan bouclier basaltique, qui s'est édifié de 3,39 à 1,1 millions d'années, donc antérieurement au volcan de Raiatea.

Sa géologie correspond à un ancien volcan bouclier basaltique, affecté par un effondrement caldéirique au niveau des baies de Haamene-Faaaha. L'extrême altération des basaltes dans les zones basses de l'île lui confère un relief doux à pentes peu abruptes.

L'île de Tahaa s'est donc édifiée en plusieurs phases (Blais et al., 2004) :

- la première correspond à l'édification du volcan bouclier qui forme le soubassement de l'île par accumulation de coulées de laves basaltiques ;
- la deuxième phase est marquée par l'effondrement de la caldeira des baies de Haamene et Faaaha ;
- la troisième phase correspond à l'injection et à l'épanchement de cônes stromboliens tardifs (Pahure et Oohai) sur les flancs du volcan principal.

## 2.2. L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN SUR L'ILE DE TAHAA

### 2.2.1. Phénomènes étudiés

La présente étude se concentre sur les **glissements de terrain**.

Les retours d'expérience ont révélé un risque particulièrement fort de glissement de terrain dans les pieds de versant où s'accumulent les colluvions. Géographiquement, ces colluvions sont essentiellement localisées dans les grandes baies du sud et de l'est de l'île (Urepiti, Apu, Haamene, Faaaha, etc.), en particulier lorsque les versants présentent une forme concave, ou dans les thalwegs. À l'inverse, les reliefs saillants (pointes, caps...) en sont généralement dépourvus. Ces colluvions ne sont pas présentes de manière systématique et apparaissent souvent en alternance avec des niveaux plus sains (mamu ou rocher).

À Tahaa, les versants en pente modérée où l'altération du « Mamu argileux » est très avancée peuvent également être le siège de glissements évoluant en coulées. Il a été montré que les processus d'altération des basaltes sont beaucoup plus avancés que sur certaines autres îles de la Société (Tahiti ou Moorea). Cela se traduit par des épaisseurs de mamu plus importantes et une nature des altérites plus argileuse (Nedellec et Mathon, 2006). Des épaisseurs de mamu très altéré (mamu III-IV) supérieures à 10 m ont été repérées dans certains secteurs de Tahaa. Ce mamu, particulièrement argileux, nourrit des colluvions très argileuses également.

Par ailleurs, les glissements de terrain sur certains versants très argileux génèrent des **coulées de boue ou de débris**. Lors de pluies intenses, des sources non permanentes peuvent être réactivées. Leur débit peut devenir très important et mobiliser les formations de couverture, notamment colluvionnaires. La consistance des coulées générées leur permet d'emprunter le plus souvent les ravines, emportant avec elle les arbres à faible enracinement tels que les falcatas. La cinétique de ces coulées peut être remarquable. Des propagations de plus de 200 m en terrain plat ont été relevées.

Les autres phénomènes redoutés sur la commune, comme les **chutes de blocs** ou les **éboulements**, ne sont pas traités ici.

### 2.2.2. Cartographie de l'aléa déjà existante

La commune de Tahaa bénéficie d'un projet de PPR depuis 2006 et est couverte, à ce titre, par une cartographie d'aléa mouvement de terrain, à l'échelle du 1/10 000 (extrait en Figure 1).

Cette carte a été réalisée par le BRGM en 2000 puis mise à jour en 2004 dans le cadre de l'élaboration du PPR de la commune. Elle différencie quatre niveaux d'aléa (fort, moyen à fort, faible à moyen, nul à faible) mais ne distingue pas le type de mouvement de terrain.

Cette carte a été réalisée selon une approche naturaliste, « par expertise ». Après la mise en œuvre systématique d'une phase analytique, l'expert, à partir de l'analyse en retour de mouvements de terrain et à partir de son expertise, détermine les facteurs de causalité susceptibles d'expliquer au mieux les instabilités observées. A partir de ces règles et en appliquant le principe de causalité (les mêmes règles produisent les mêmes effets), des zones d'aléa homogène sont identifiées.

Dans une moindre mesure, l'outil TALREN a été mis en œuvre au sommet des planèzes, marqués par une altération importante, afin d'aider à la définition de la largeur de la zone d'aléa fort à afficher en crête de versant.

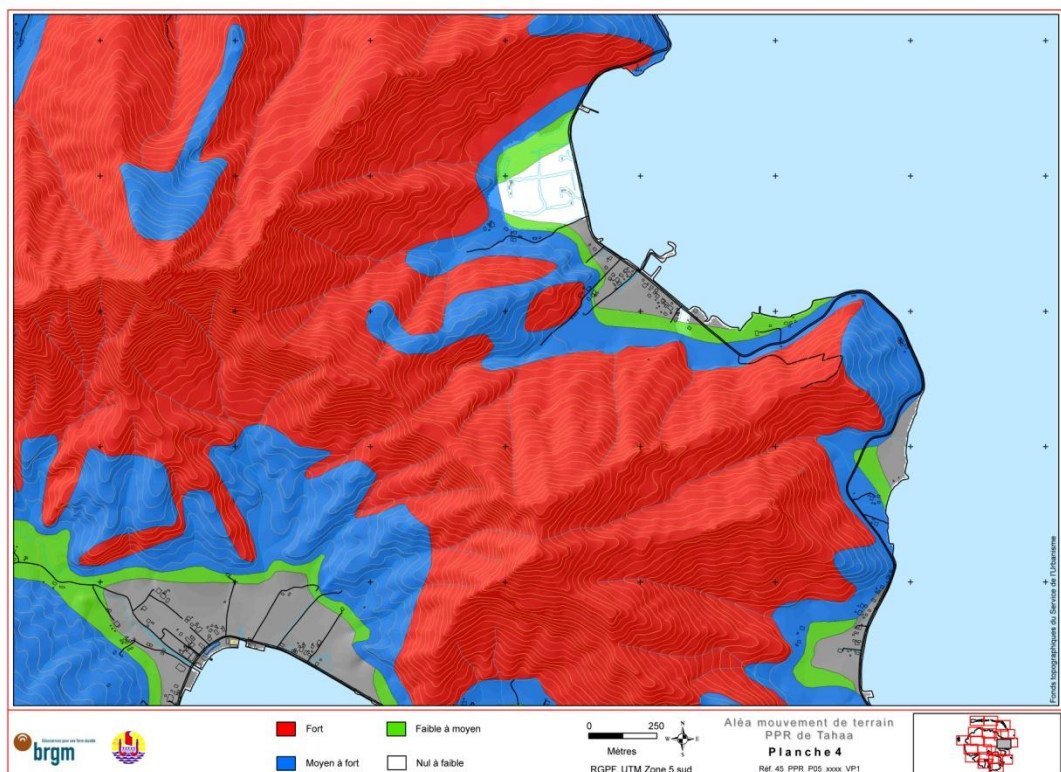


Figure 1 – Extrait de la carte d'aléa mouvement de terrain, issu du projet de zonage PPR de la commune de Tahaa. Echelle : 1/10 000

### 2.2.3. Objectif de l'étude : mise en place d'une méthodologie complémentaire

Parmi les méthodes mises en œuvre dans la phase d'évaluation des aléas, on distingue les méthodes empiriques (naturalistes) des méthodes déterministes.

**Les méthodes empiriques** comme l'approche par expertise, mise en place ici et couramment pour la réalisation de PPR en France, conduit à une expression qualitative de l'aléa. Pour autant qualitative qu'elle soit, cette approche n'est pas moins

rigoureuse et performante que les méthodes déterministes. Elle est intégratrice et peut s'accommoder d'un faible volume de données de base.

**Les méthodes déterministes**, au contraire, reposent sur la mise en œuvre de modèles physiques et mathématiques reproduisant plus ou moins fidèlement la réalité. Les résultats sont théoriquement plus rigoureux que l'approche naturaliste, à condition que les données de base du modèle aient un niveau de précision compatible avec celui du modèle. L'approche déterministe est donc très contrainte par la qualité des données d'entrée, dont la variabilité naturelle est grande en géomécanique. L'aléa est exprimé de façon quantitative, ce qui n'empêche pas une traduction sous forme qualitative plus facilement compréhensible.

Cette étude vise donc à proposer une approche déterministe d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain sur l'île de Tahaa, de manière à conforter ou affiner le zonage existant, réalisé par expertise pendant le programme ARAI. Cette approche fait intervenir un logiciel de stabilité de pente (Alice) couplé à un module de propagation (Bora).

### 3. Production des données d'entrée nécessaires

Ce chapitre décrit l'ensemble des données utilisées pour l'évaluation déterministe de l'aléa glissement de terrain à Tahaa, qui sera décrit dans le chapitre suivant. Certaines sont des données brutes, comme le modèle numérique de terrain ou les orthophotographies, d'autres résultent de traitement numérique (carte des pentes, modèle de drainage) ou d'expertise de terrain (zonage « géotechnique »).

#### 3.1. INFORMATION TOPOGRAPHIQUE

##### 3.1.1. MNT

Un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 5 mètres a été fourni pour les besoins de l'étude par le service de l'Urbanisme (Figure 2).

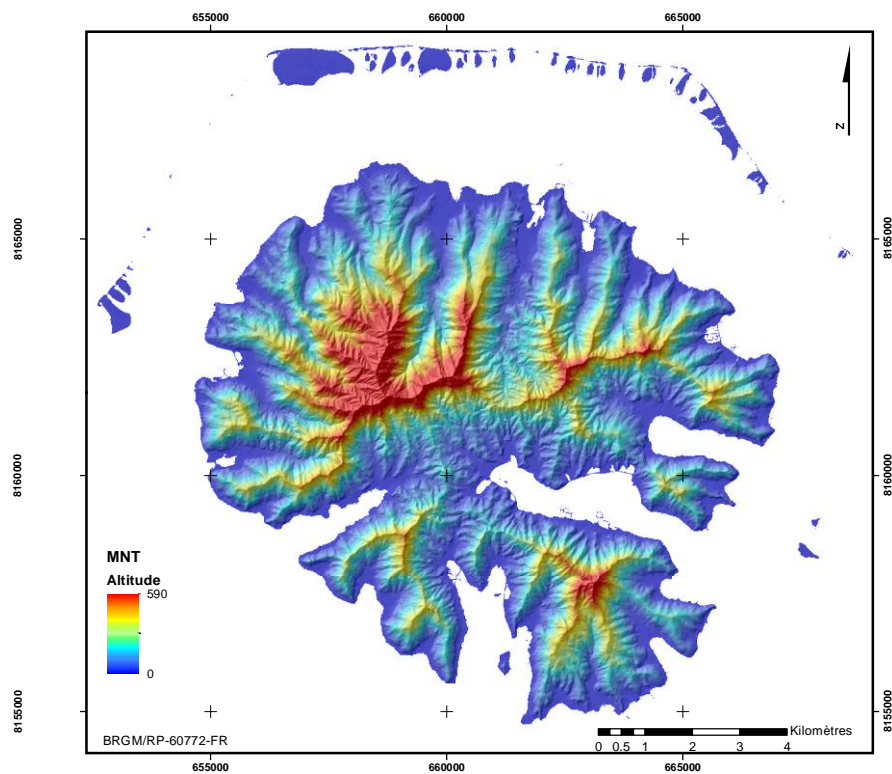


Figure 2 - Modèle numérique de terrain de Tahaa au pas de 5 m.  
Source : Service de l'Urbanisme

Ce MNT a été rééchantillonné au pas de 25 m, pour plusieurs raisons :

- Cette résolution correspond à celle du semi de points initial (1/25 000) ;

- Elle respecte la précision de l'échelle de l'étude (échelle communale pour les PPR) et notamment celle de la détermination spatiale des caractéristiques géotechniques ;
- Techniquement, le module de propagation BORA (décrit au § 4.4) est optimal quand la taille de maille est du même ordre de grandeur que les mouvements de terrain incriminés ;
- Il se trouve que ce rééchantillonnage permet de restreindre le temps de calcul du logiciel ALICE, à un temps raisonnable, qui reste néanmoins important (24h de calcul environ pour une simulation).

### 3.2. CARTES DERIVEES DU MNT

Après que celui-ci ait été ré-échantillonné au pas de 25 m, plusieurs cartes ont été dérivées de ce MNT :

- Une carte des pentes, en degrés (Figure 3) ;
- Une carte des directions de pente (exposition), indiquant par un code l'octant de la ligne de plus grande pente, parmi les 8 directions possibles (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) (Figure 4) ;
- Une carte des accumulations, issue d'un calcul de modèle de drainage (Figure 5). La valeur de chaque maille est la surface drainée (i.e. surface du bassin versant) exprimée en nombre de mailles.

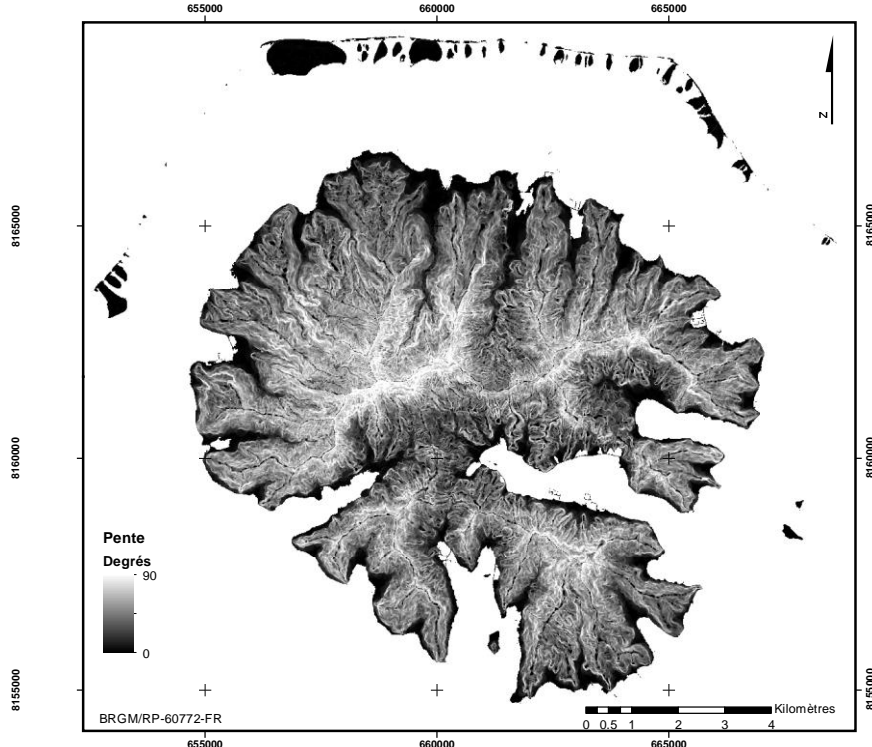


Figure 3 - Carte des pentes au pas de 25 m

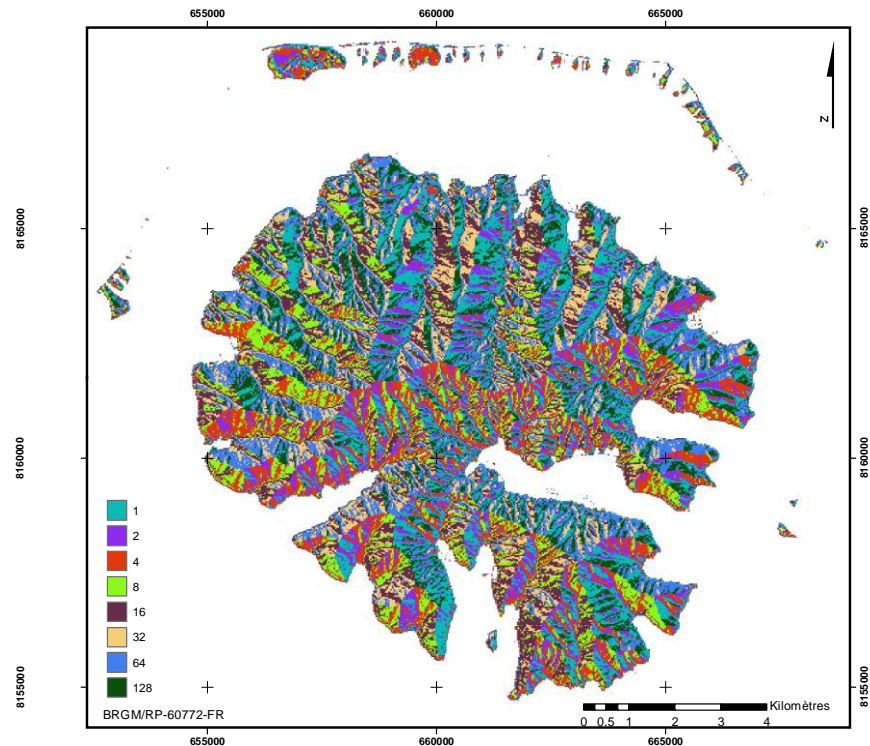


Figure 4 - Carte des directions des lignes de plus forte pente

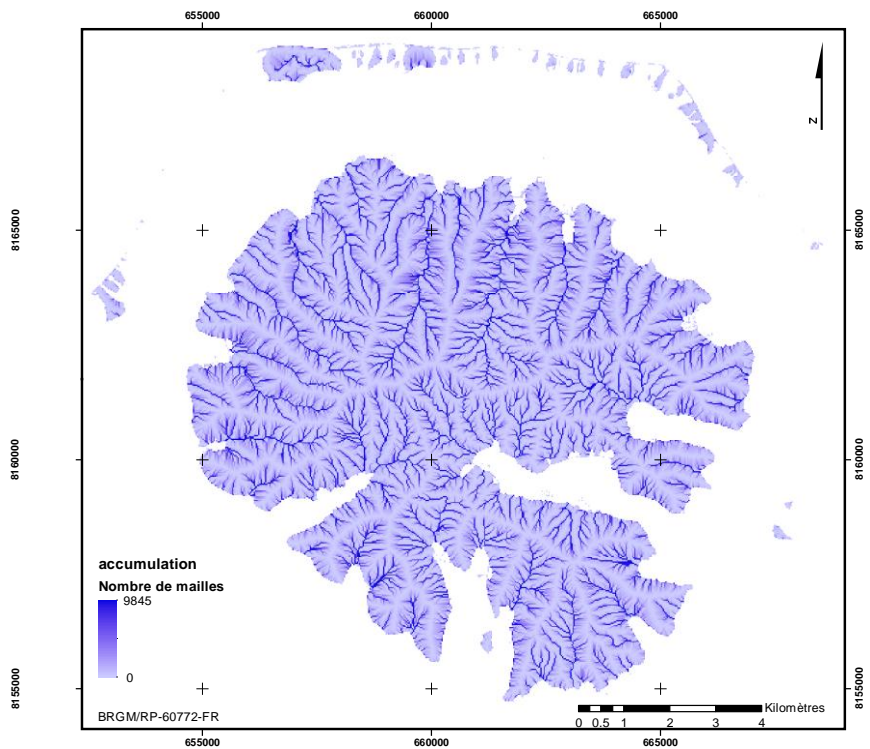


Figure 5 - Accumulation - Modèle de drainage

Ces cartes et notamment la carte d'accumulation (modèle de drainage) permettent de générer les profils de pentes (cf § 4.3.1), nécessaires dans les logiciels Alice et dans le module de propagation Bora.

### 3.2.1. Cartes topographiques et photographies aériennes

Afin de se repérer sur le terrain, reporter les observations et appuyer l'interprétation, ont été utilisées :

- La carte topographique IGN à 1/100 000, ainsi que l'ancienne (1993) carte à 1/20 000 (Figure 6),
- Des ortho-photographies mises à disposition par le Service de l'urbanisme (Figure 7), ainsi qu'une série complète de couples stéréo-photographiques.

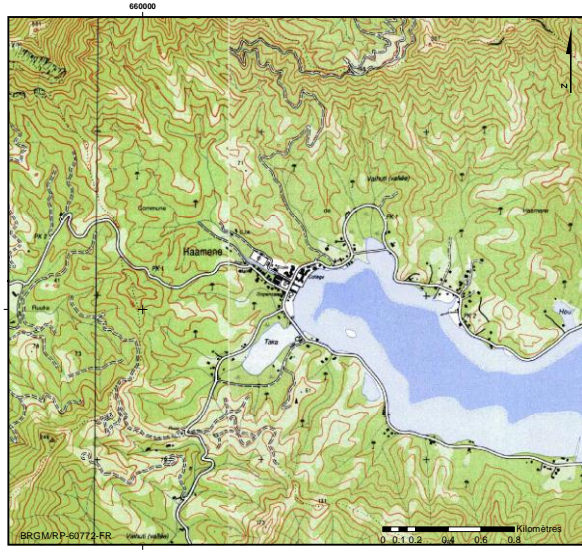


Figure 6 - extrait de la carte topographique à 1/20 000

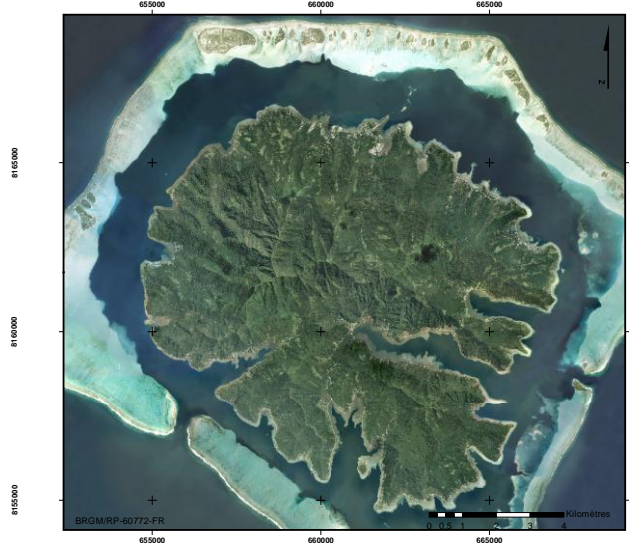


Figure 7 – Orthophotographie de Tahaa



### 3.3. INFORMATION GEOLOGIQUE

#### 3.3.1. Carte géologique

La carte géologique de 2004 à 1/100 000 de Raiatea-Tahaa (Figure 8) a surtout été utilisée pour l'établissement du zonage géotechnique décrit ci-dessous.

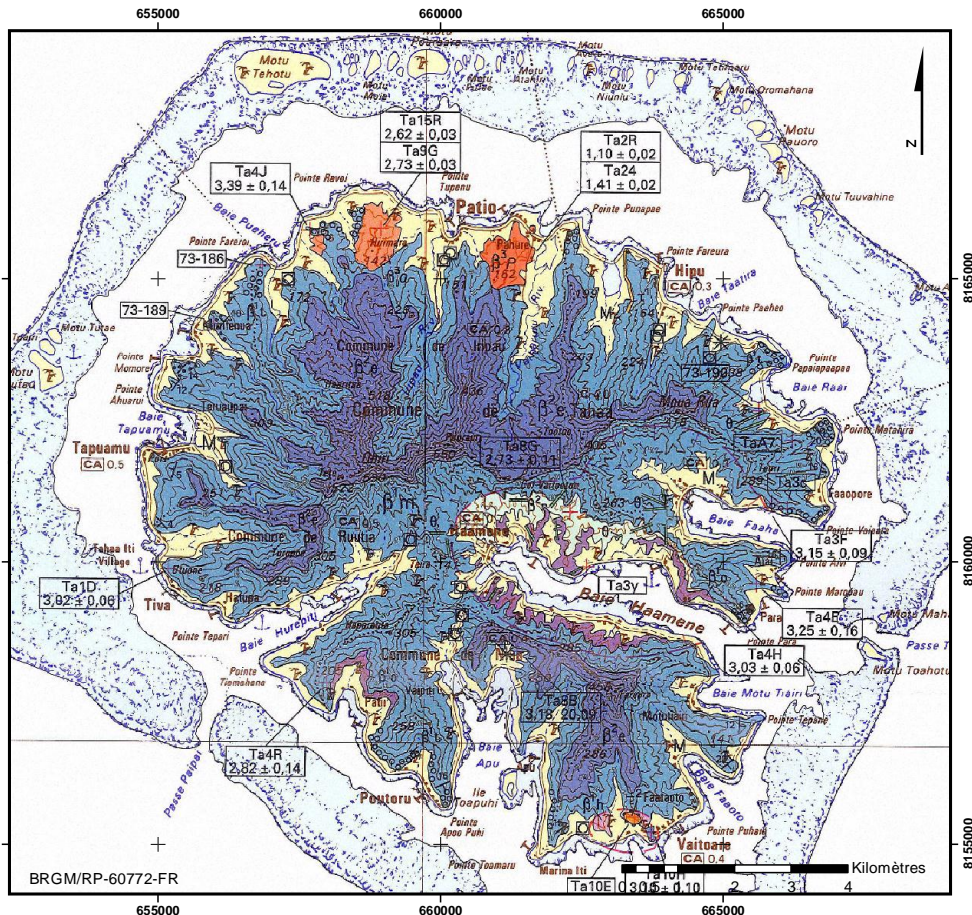


Figure 8 : Carte géologique au 1/100 000 (Blais et al., 2004)

#### 3.3.2. Investigation de terrain

Deux missions de terrain successives (février 2011 BRGM / SAU et mars 2012 BRGM) ont permis de constituer une base de données d'affleurement associée à des photos (Figure 9).

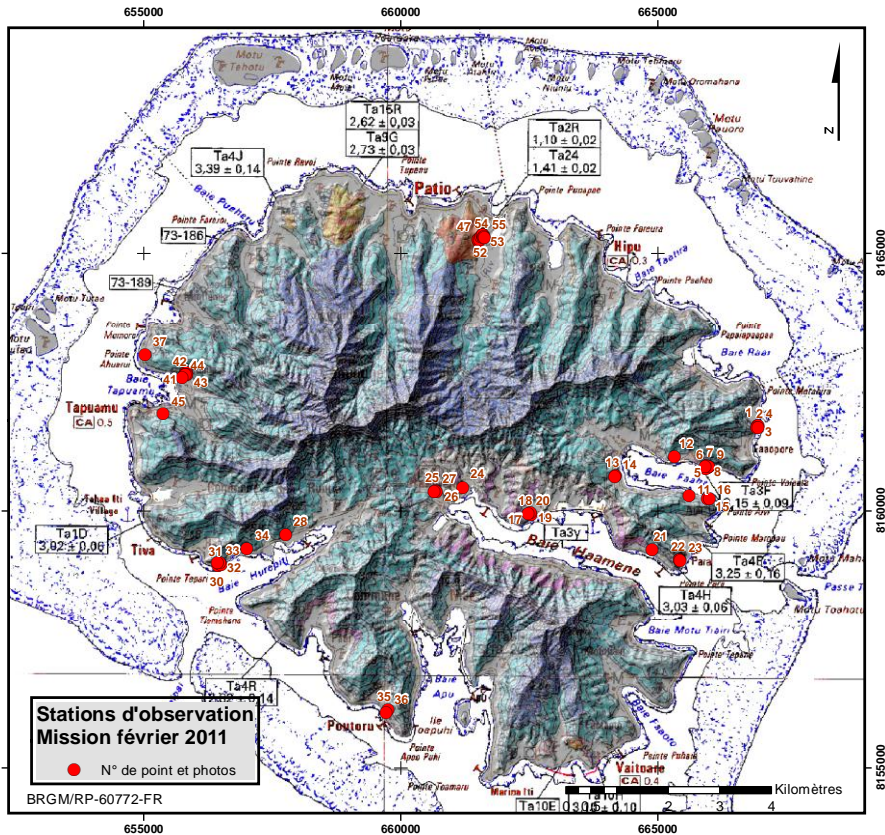


Figure 9 - Localisation des stations d'observation terrain – Mission 02/2011

Vis-à-vis des glissements de terrain, trois types de formations lithologiques doivent être distingués : le rocher, les colluvions et le Mamu. Les identifier sur le terrain a été l'un des principaux objectifs des investigations de terrain :

- Le rocher affleure essentiellement sur les fortes pentes (cf. Figure 10). Ils constituent les formations volcaniques saines, considérées comme non sujet au glissement de terrain. A l'inverse, ces formations sont sujettes à des éboulements de terrain, qui peuvent être dommageables mais qui ne constituent pas l'objet de cette étude spécifique ;
- Les colluvions (cf. Figure 11 et Figure 12) sont essentiellement localisées dans les grandes baies du sud et de l'est de l'île (Urepiti, Apu, Haamene, Faaaha, etc.), en particulier lorsque les versants présentent une forme concave, ou dans les thalwegs. À l'inverse, les reliefs saillants (pointes, caps...) en sont généralement dépourvus. Ces colluvions ne sont pas présentes de manière systématique et apparaissent souvent en alternance avec des niveaux plus sains (mamu ou rocher) ;
- Les altérites Polynésiennes que l'on appelle « Mamu » constituent la partie altérée des formations volcaniques (cf. Figure 13). Ces horizons sont particulièrement sujets aux glissements de terrain, surtout quand ils sont épais. S'ils se révèlent être un matériau d'assez bonne qualité mécanique, passée un

certain niveau de saturation, non seulement leurs caractéristiques mécaniques se réduisent mais on observe fréquemment un changement de phase lorsqu'ils sont déstabilisés, c'est à dire dégradation des glissements en coulées de boues ou de débris, avec des propagations souvent importantes pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres (Chassagneux, 1999).



*Figure 10 : Rocher et blocs*



*Figure 11 : Colluvions épaisses*



*Figure 12 : Colluvions minces sur substratum rocheux*



*Figure 13 : Mamu*

### **3.4. INFORMATION SUR LES INSTABILITES**

#### **3.4.1. Inventaire des mouvements de terrain (BD MVT, PPR..)**

De nombreux mouvements de terrain ont été recensés sur Tahaa, en particulier à la suite du passage des dépressions tropicales Wes et Allan en 1998. Ainsi, les fortes précipitations associées au cyclone Alan de 1998 ont provoqué de nombreux glissements d'ampleurs décamétriques à hectométriques, qui ont provoqués plus d'une dizaine de décès et de gros dégâts matériels (Mompelat et al. 2003).

La notice du PPR présente les phénomènes les plus marquants :

Suite au passage de la dépression tropicale Wes, le 6 février 1998 :

- le glissement de Tepani (Tiva) sur le versant nord et à l'entrée de la baie de Hurepiti a été déclenché suite au passage de la dépression tropicale Wes, le 6 février 1998. Il s'agit du glissement brutal d'un versant haut de soixante-dix mètres et large d'au moins cinquante mètres. Deux maisons ont été emportées et le glissement s'est propagé jusqu'au lagon sur une distance de plus de 100 m. Cet événement a entraîné la mort de huit personnes.

Après le passage de la dépression Allan en avril 1998 :

- Le glissement de Poutoru a affecté un versant haut d'environ 200 m à l'ouest du village. Il s'est propagé sur une centaine de mètres dans la plaine, détruisant une maison située à 50 m du pied de versant. Trois victimes sont à déplorer suite à cet événement.
- Le glissement de Tapuamu (Quartier Papau) a affecté un versant haut d'environ 200 m sur une soixantaine de mètres de large. Son volume est estimé à 30 000 m<sup>3</sup>. Seule la partie inférieure du glissement a été déstabilisée et s'est propagée sur environ 50 m en terrain plat, détruisant une maison et causant la mort d'une personne. La partie supérieure du glissement reste aujourd'hui active et menaçante.
- Sur le versant sud de la baie de Faaaha, à Teoro, un pied de versant a brutalement lâché et emporté une maison située à cinquante mètres dans la plaine côtière, entraînant la mort d'une personne.
- Sur le versant Nord de la baie de Haamene, au-dessus de la pension « Daniel et Patricia » (à Vaipoe), la partie inférieure d'un versant a glissé sur quelques dizaines de mètres de large, détruisant un bungalow et endommageant deux autres bâtiments. La propagation du glissement dans la plaine est de l'ordre de 50 m. Ce glissement n'a miraculeusement pas fait de victimes.
- Sur le versant est de la baie de Apu, un glissement-coulée s'est déclaré dans un versant haut de 40 m. Au moins une maison située à près de 70 m du pied de versant a été emportée, et un mort est à déplorer.

En décembre 2004 :

- suite à une période de fortes pluies, plusieurs phénomènes de glissements évoluant en coulées boueuses se sont manifestés, notamment dans la baie de Faaaha (au fond de la baie et au nord). Un éboulement de près de 80 m<sup>3</sup> a également été signalé sur le site de Faaopare ;

Au début de l'année 2005,

- des phénomènes similaires se sont produits sur la commune, endommageant plusieurs sites et habitations.

Ces données historiques sont pour la plus part, thésaurisées dans la base de données nationale des mouvements de terrain (bdmvt.net). D'après cette base de données, on recense 25 glissement lors de la saison cyclonique de 1998, dont 7 ont évolués en coulées de boues (cf. Figure 14). La phase informative du PPR a également synthétisé l'ensemble des événements importants dans une carte, dite informative, dont la Figure 15 présente un extrait.

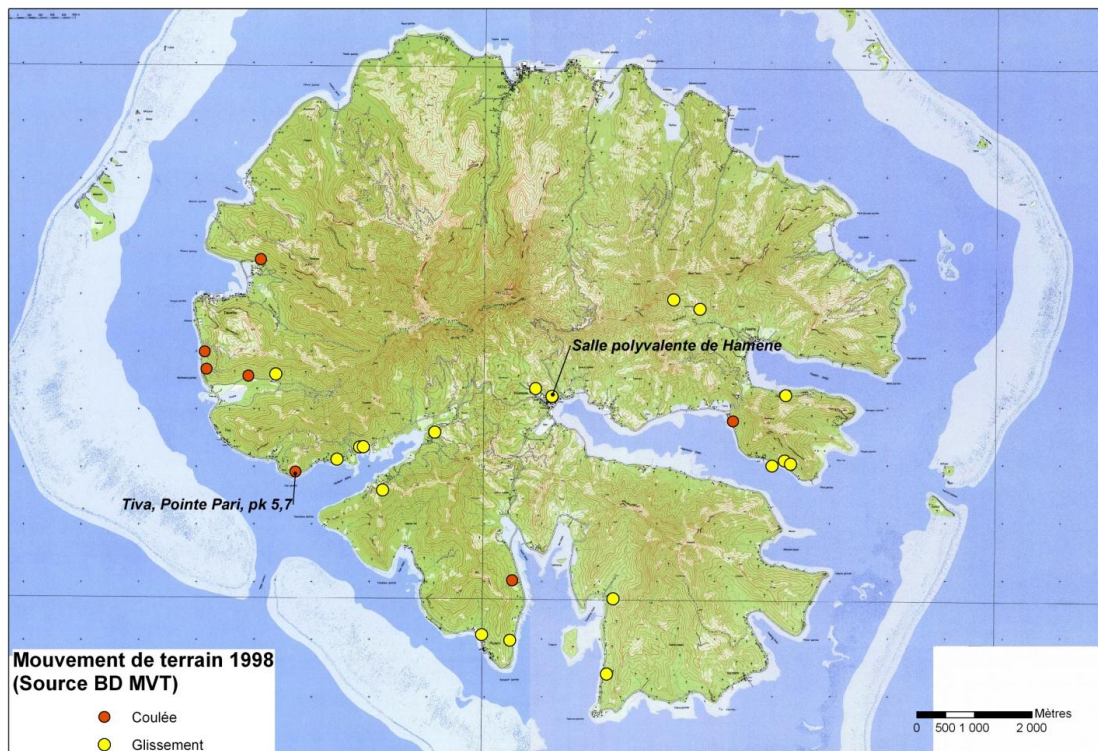


Figure 14 : Mouvements de terrain recensés en 1998 (Source BD MVT) et localisation des deux événements évoqués par la suite

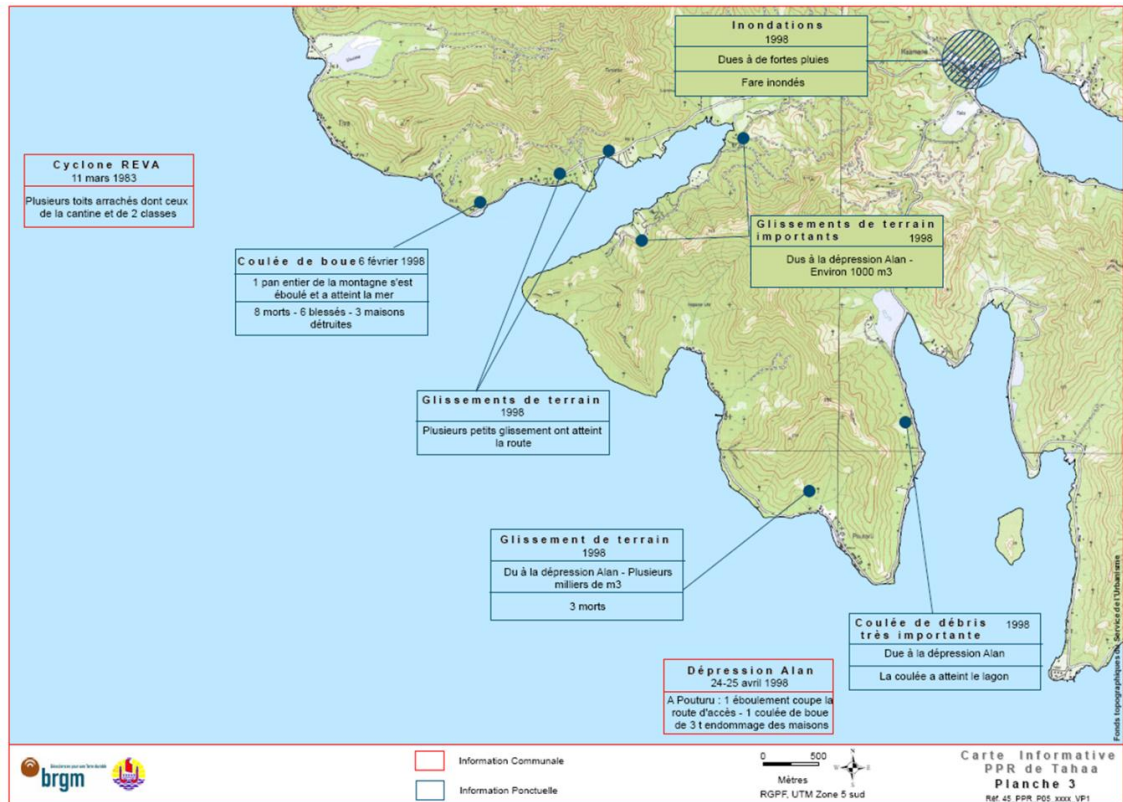


Figure 15 - Exemple de carte informative du projet PPR

### 3.4.2. L'exemple de deux glissements de terrain particulier

Parmi les événements recensés, deux d'entre eux ont servi à caler les paramètres d'entrées du logiciel.

#### ***Coulée de boues, pk 5.7***

Le 6 février 1998, un pan entier de montagne s'est éboulé à la pointe Pari jusqu'à atteindre la mer, entraînant la mort de 8 personnes, 6 blessés et 3 maisons détruites (cf. Figure 16 et Figure 17). Le Laboratoire des Travaux Publics (LTPP) a investigué le site. Il s'agirait d'un glissement plan de colluvions de mamu ou de mamu remanié, ayant évolué en coulée liée à la forte pente notamment.



Figure 16 : Photo de la coulée du PK 5.7. Source : LTPP



Figure 17 : Photo de la coulée du PK 5.7. Source : LTPP



### ***Glissement de terrain de Haamene***

Ce glissement de terrain de grande ampleur, provoqué par la dépression Alan, a enseveli la salle polyvalente (omnisport) de Haamene (cf. Figure 18). Des circulations d'eau en profondeur ont été évoquées comme un facteur déclenchant probable de ce glissement au sein du mamu altéré.

Les dimensions sont de 20 m de largeur, 50 m de longueur pour une profondeur de 45 m environ. Le glissement s'est produit au niveau du contact avec un horizon dur à profondeur importante, lui donnant une allure de rupture circulaire dans les formations superficielles (mamu altéré) alors que la rupture est plane en profondeur.



*Figure 18 : Glissement de terrain de Haamene. Source : Inventaire des mouvements de terrain à Raiatea et Tahaa – Polynésie française*

### 3.4.3. La carte d'aléa mouvement de terrain du PPR

La carte d'aléa mouvements de terrain du projet de PPR (cf. Figure 1) est utilisée dans le cadre de cette étude à deux niveaux. En amont, elle traduit l'expertise du spécialiste qui l'a levé, et donc est – indirectement – une source d'information sur les contextes géologiques, géotechniques, morphologiques locaux. En aval, elle sera comparée avec les résultats des modélisations Alice, ce qui permettra de dégager des pistes d'évolution possible, voire de révision du projet de zonage PPR.

### 3.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES PRESENTANT DES COLONNES DE SOL HOMOGENES (ZONAGE GEOTECHNIQUE)

Le déclenchement d'un glissement de terrain dépend essentiellement de la nature et de l'épaisseur des terrains susceptibles d'être mobilisés.

Ainsi, une étape importante a été de découper l'île de Tahaa, en zones homogènes en termes de géologie et de caractéristiques géotechniques. Chaque zone est associée à une coupe de sol type, homogène en termes de nature, épaisseur et caractéristiques mécaniques des couches lithologiques.

Ainsi, il a fallu à tout endroit identifier la nature de la formation affleurante et estimer son épaisseur. Les principales étapes ayant permis de réaliser cette carte ont été :

- la compilation des informations existantes (carte géologique, PPR, carte morphologique, études BRGM issu du programme ARAI) ;
- une investigation de terrain à l'occasion de deux missions successives ;
- à partir de cela, la délimitation des différentes zones présentant des colonnes de sol homogènes, aidée également par une analyse morphologique basée sur les photos-aériennes (Figure 19) ;
- la subdivision de certaines zones en fonction de l'épaisseur, en exploitant la carte des pentes (Figure 20). En effet, la topographie renseigne sur l'épaisseur des terrains superficiels, par le biais de l'angle de frottement interne caractéristique de chaque formation.

Les zones de très fortes pentes (> 40-50°) ont été distinguées cartographiquement et n'ont pas fait l'objet de modélisation. En effet, elles ne sont pas soumises à un phénomène de glissement de terrain, mais peuvent être sujet à des éboulements rocheux voire des coulées de débris.

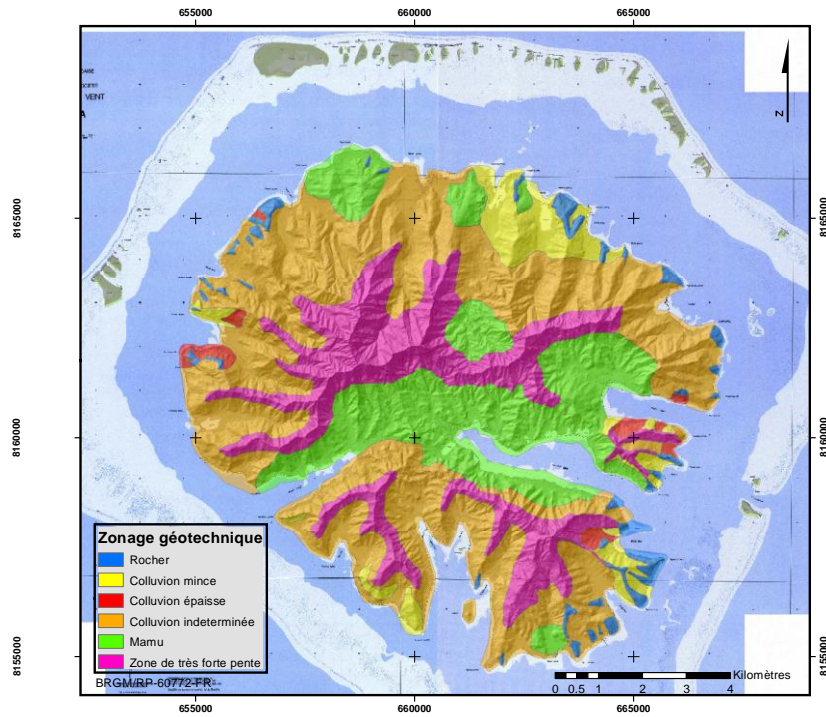


Figure 19 - Zonage géotechnique initiale à partir des investigations de terrain

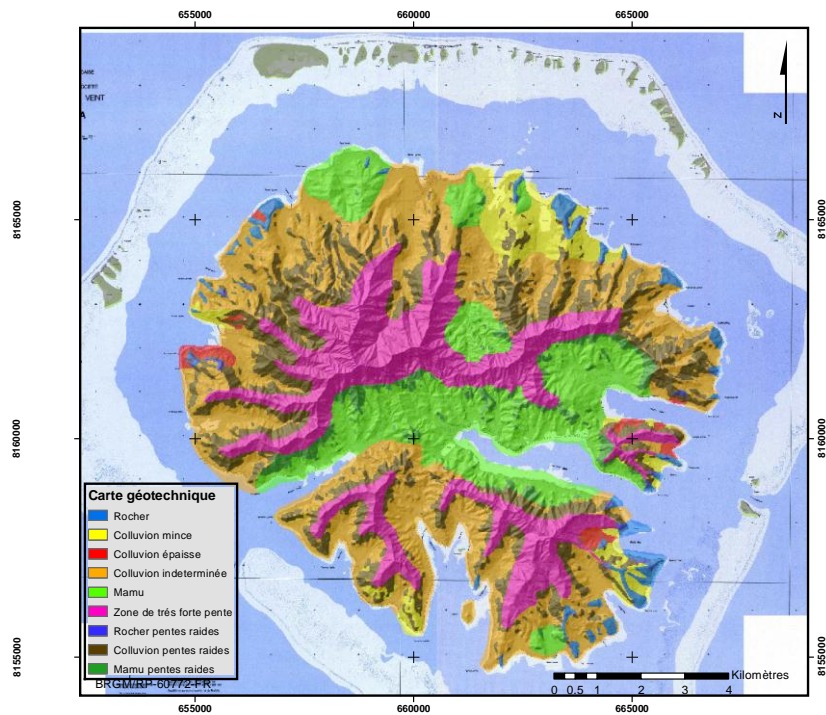


Figure 20 - Zonage géotechnique modulé par les épaisseurs

### 3.6. CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES COLONNES DE SOL

#### 3.6.1. Caractéristiques mécaniques nécessaires

Des tests de sensibilité réalisés dans le cadre du programme ARAI ont mis en évidence l'influence des caractéristiques du sol sur la stabilité des terrain : la cohésion  $C$ , le poids volumique (conditions naturelles)  $\gamma_h$  et l'angle de frottement interne  $\varphi$ .

Paramètres physiques	Type de sol		
	$\gamma_h$	$C$	$\varphi$
Influence sur le coefficient de stabilité	-	+	+++

Tableau 1 : Tableau récapitulatif de l'influence des paramètres physiques du sol sur le coefficient de stabilité. Source : Rapport de présentation du PPR de Tahaa

La forte influence de l'angle de frottement interne du sol d'abord puis de la cohésion justifie de prendre en compte l'incertitude sur le choix de la valeur considérée. La valeur de la densité des terrains reste moins discriminante pour le calcul de stabilité ; elle sera donc fixée à la valeur la plus probable.

#### 3.6.2. Ajustement par rétro-calage sur deux événements spécifiques

Les calculs de stabilité par profil permettent de retro-analyser des glissements anciens sur des profils réels et ainsi d'ajuster les caractéristiques mécaniques des couches, et affiner ainsi les valeurs existantes dans la littérature ou issues de l'expertise.

La rétro-analyse s'est concentrée sur les deux événements particuliers décrits au § 3.4.2, volontairement choisie car ils se distinguent par des caractéristiques pas forcément pénalisantes (pente relativement faible, ..), leur conférant un caractère d'événement spécifiques. Ceux-ci nous permettent d'estimer l'ordre de grandeur de caractéristiques mécaniques « mauvaises », qui justifierait le déclenchement de ces événements dans ces contextes peu exceptionnels. Il s'agit donc de caler la borne inférieure des valeurs plausibles (cf. Figure 21). Cette valeur, inférieure, reste la plus importante à fixer car la plus défavorable dans le calcul de stabilité.

En multipliant les simulations, cette analyse nous a ainsi permis de caler les valeurs mécaniques des différentes formations et notamment la plage de variations possibles

des valeurs probables. La distribution probabiliste des valeurs probables est choisie triangulaire.

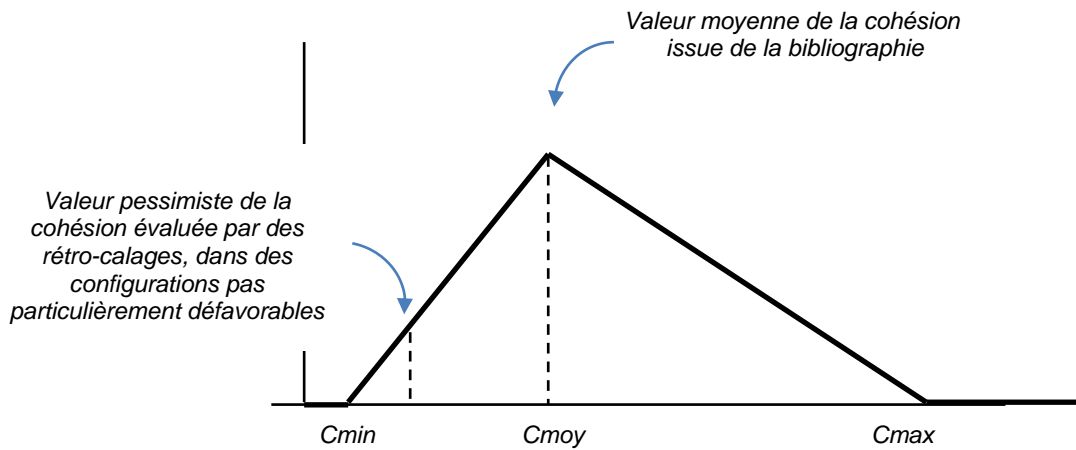


Figure 21 : Choix d'une distribution triangulaire pour les valeurs possibles des caractéristiques mécaniques

### 3.6.3. Valeurs obtenues

Les valeurs optimales ainsi que les plages de valeurs plausibles considérées sont synthétisées dans le Tableau 2.

Pour le Mamu :  $c'=15$  [5, 25],  $\phi' = 25^\circ$  [20,27],  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

Ces valeurs sont intermédiaires entre les caractéristiques d'un « Mamu très médiocre » ( $c'=0$ ,  $\phi' = 23^\circ$ ) et « Mamu médiocre » ( $c'=20$ ,  $\phi' = 35^\circ$ ), déterminées par les essais in situ réalisés en 2006 dans le cadre du programme ARAI (Nédellec et Mathon, 2006). Cette étude avait mis en évidence le caractère plus médiocre des altérites de Huahine et de Raïatea (et l'on peut supposer de Tahaa).

Pour les colluvions :  $c'=10$  [2, 20],  $\phi' = 35^\circ$  [25,40],  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

Les colluvions ont des caractéristiques frottantes meilleures que le Mamu mais une cohésion moins forte. Les investigations géotechniques menées dans le cadre du programme ARAI ont confirmé le caractère très médiocre des colluvions en terme de stabilité (Nédellec et Mathon, 2006).

Pour le rocher, des caractéristiques mécaniques arbitraires fortes ont été choisies, pour signifier sa stabilité, constatée sur le terrain.

Num	nom	e	c_min	c_apex	c_max	phi_min	phi_apex	phi_max
1	rocher	0	-	100	-	-	50	-
2	colluvion mince	1.5	2	10	20	25	35	40
3	colluvion epaisse	3	2	10	20	25	35	40
4	colluvion indetermine	2	2	10	20	25	35	40
5	mamu	5	5	15	25	20	25	27
6	pente raide cretes	1	5	15	25	20	25	27
7	rocher sur pente raide	0	-	100	-	-	50	-
8	coll sur pente raide	1.5	2	10	20	25	35	40
9	mamu sur pente raide	1.75	5	15	25	20	25	27

Tableau 2 : Synthèse des valeurs retenues comme données d'entrées du Logiciel ALICE

### 3.7. SATURATION DES TERRAINS : PIEZOMETRIE/PLUVIOMETRIE

La saturation en eau a une grande influence sur la stabilité des terrains. Elle est fixée, dans le logiciel ALICE, par l'intermédiaire d'un « taux de remplissage », s'apparentant à un niveau piézométrique défini par rapport à deux surfaces topographiques.

#### 3.7.1. Piézométrie

Le niveau piézométrique dans une couche de sol donne l'épaisseur des terrains saturés en eau.

Ici, la tranche de sol est comprise entre la topographie de la surface (donnée par le MNT) et la cote de l'interface. Pour rendre réaliste ce niveau piézométrique construite sous SIG, le logiciel impose un raccord artificiel au niveau de la mer (cf. Figure 22). Ensuite, l'utilisateur peut faire varier le remplissage de cet horizon perméable entre 0 % (pas d'eau) et 100% (nappe au niveau du terrain naturel).

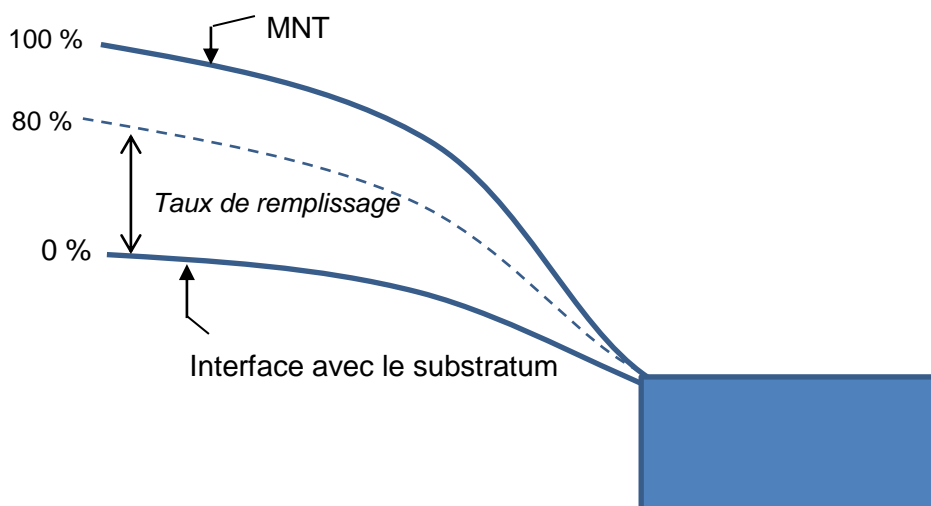


Figure 22 : Définition du « taux de remplissage », donnée d'entrée du logiciel ALICE

### 3.7.2. Pluviométrie

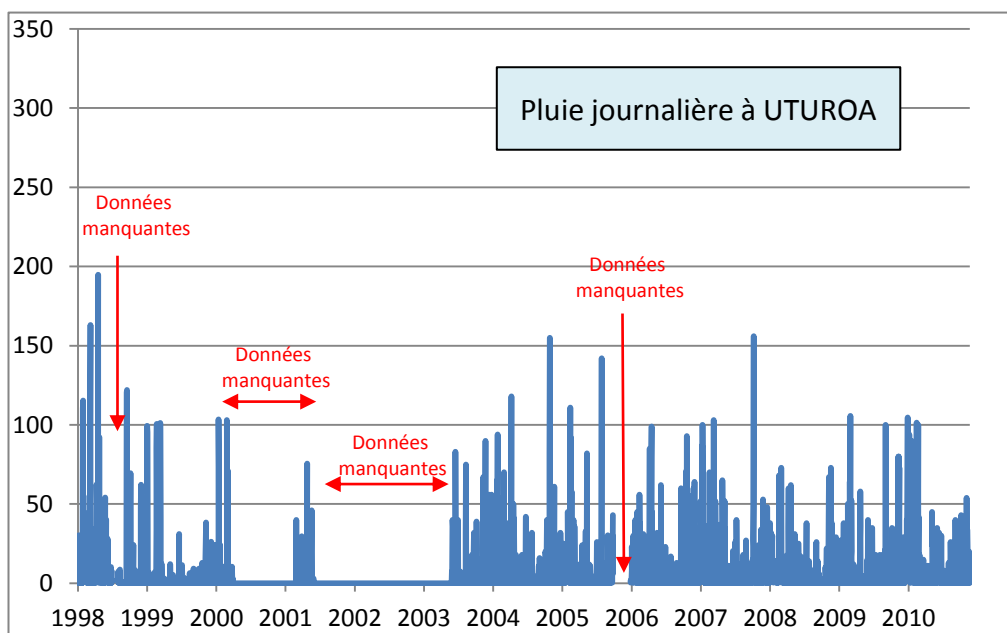
Le niveau piézométrique dans les sols peut être estimé à partir de la pluviométrie, grâce à une modélisation hydrodynamique. Ce type de modèle simule le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au niveau aquifère en tout point.

Cette relation entre la pluviométrie et la piézométrie dépend des caractéristiques des sols (perméabilité, occupation des sols..) et doit être calée sur des observations réelles. Le calage consiste à ajuster les paramètres d'entrée de telle sorte qu'ils reproduisent des chroniques de niveaux piézométriques aussi proches que possible de celles qui ont été effectivement observées.

Les pluviomètres les plus proches de Tahaa sont situés à Raiatea, dans le sud de la côte est de Raiatea : à Uturoa et à Opoa. Cependant, il n'y a pas d'enregistrement sur l'île de Tahaa même.

Les données, récupérées auprès de Météo France, sont disponibles au pas journaliers entre janvier 1998 et 2010, soit plus de 12 ans de données quotidiennes (cf. Figure 23). Mais peut-on extrapoler les données pluviométriques disponibles sur Raiatea à Tahaa ?

Les cumuls annuels à Uturoa et Opoa, les deux pluviomètres de Raiatea, présentent des différences importantes (cf. Figure 24). L'absence de corrélation apparaît encore plus nettement au pas de temps journalier, avec une grande représentativité statistique des observations (Figure 25). Devant ce constat, faute de données, il est apparu impossible de transposer ces valeurs de pluie à l'île voisine de Tahaa et de travailler sur la réalité pluviométrique de l'île. L'intégration du forçage pluviométrique a dû être abandonnée en attendant l'acquisition de données in situ.



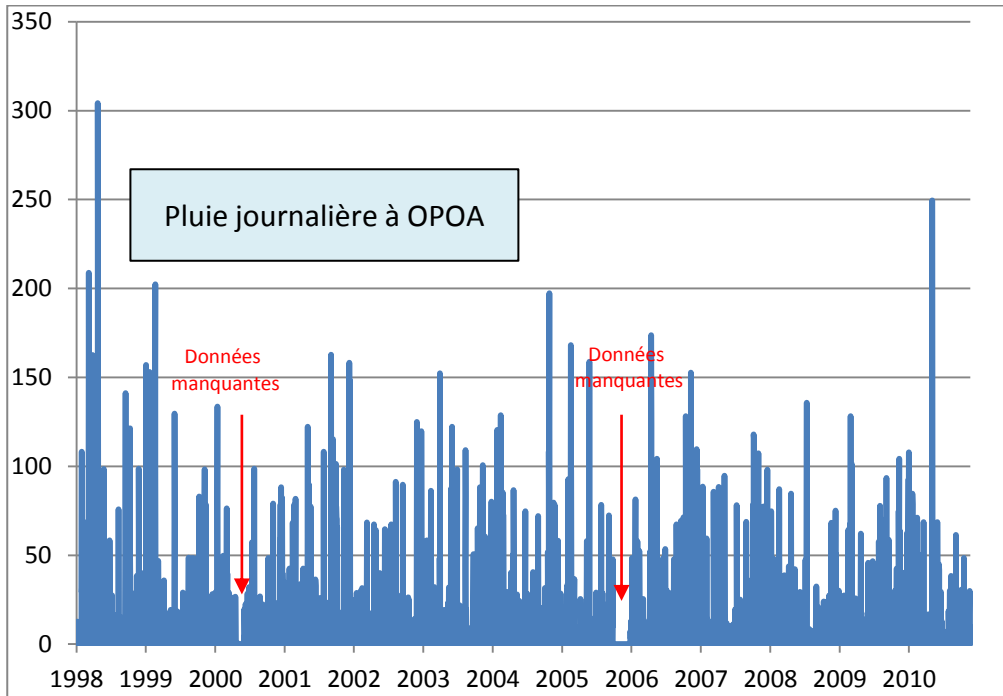


Figure 23 : Chronique pluviométrique disponible sur les deux pluviomètres (données Météo France)

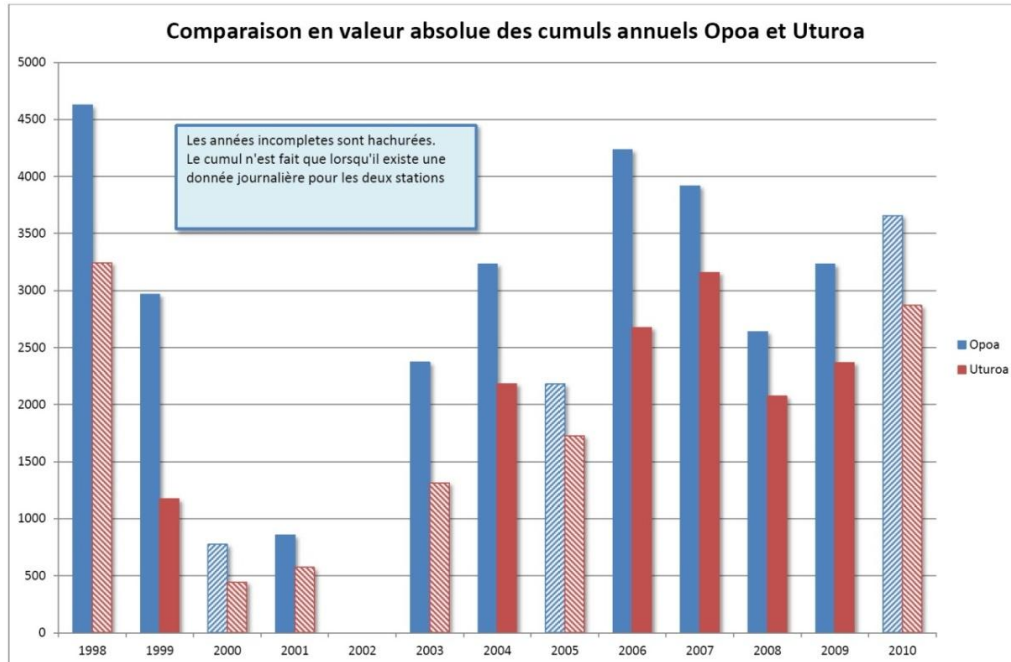


Figure 24 : Comparaison des cumuls annuels de pluies sur les deux pluviomètres



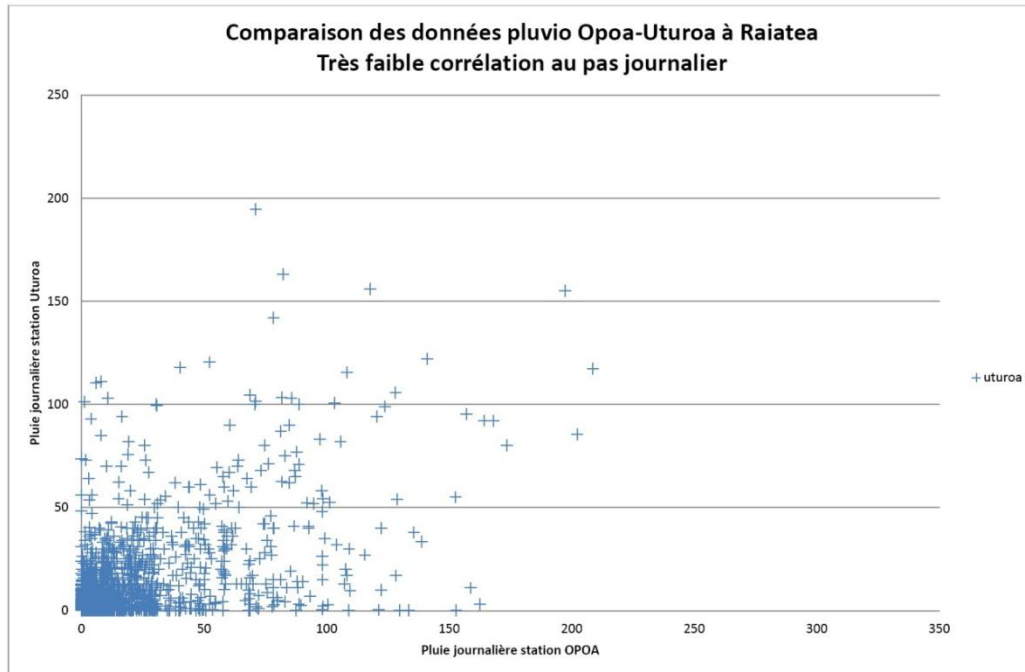


Figure 25 : Comparaison des cumuls journalier de pluies sur les deux pluviomètres

## 4. Mise en œuvre du programme ALICE®

### 4.1. PRESENTATION DU LOGICIEL ALICE

Le programme ALICE®, pour Assessment of Landslides Induced by Climatic Events, est un logiciel d'aide à la cartographie de l'aléa glissement de terrain, développé par le BRGM, pour répondre à des besoins de Recherche et de Service Public (Scénarios départementaux de risque Mouvements de terrain, programme ARAI, programme Safeland, Programme DO-SMS/SUDOE). Le programme permet une approche quantifiée du risque.

Il appartient à la famille des modèles d'évaluation basés sur une approche mécanique, pour lesquels les principales propriétés physiques du milieu sont quantifiées et utilisées par un modèle mathématique qui calcule un facteur de sécurité (Aleotti & Chowdhury, 1999). Ces modèles mettent en œuvre un Système d'Information Géographique (SIG), où l'information est spatialisée sous forme de grilles (raster). Ces modèles nécessitent de connaître la répartition spatiale (et parfois temporelle) des paramètres qui vont conditionner la stabilité des sols (caractéristiques mécaniques et géométriques des couches, état hydrique, sous une forme en général très sommaire compte tenu de la variabilité naturelle de ces paramètres au sein de zones d'étude importantes (Haneberg, 2000).

Les approches déterministes, qui se basent sur des paramètres spatialement explicites, sont les plus fréquemment mise en œuvre. Les approches probabilistes permettent de prendre en compte les incertitudes en assignant des distributions probabilistes aux paramètres du modèle (Stillwater Sciences, 2007).

En résumé, ALICE® se caractérise par :

- la mise en œuvre d'un modèle de stabilité de pente fini, avec géométrie de rupture quelconque (cercle, plan ou autres), utilisant la méthode de Morgenstern et Price (Morgenstern & Price 1965, 1967), appliquée à distance régulière le long de profils topographique 2D de versant, couvrant l'ensemble de la zone d'étude,
- l'utilisation d'un modèle hydrologique global pluie-débit, GARDÉNIA (Thierry 2003),
- la prise en compte possible d'une agression sismique régionalisée,
- une gestion de la variabilité et des incertitudes des paramètres géotechniques au moyen de distributions probabilistes (choix entre distributions normales, uniformes, triangulaires ou trapézoïdales)
- un résultat qui s'exprime non pas par une valeur de facteur de sécurité (FS), mais par une probabilité de FS inférieur à 1 (i.e. instabilité).

Le modèle est couplé à un module qui traite de la propagation et qui est détaillé au § 4.4 .

La mise en œuvre détaillée d'Alice est décrite en Annexe 1 (Guide utilisateur).

## 4.2. PRINCIPE CONSIDERE

### 4.2.1. Découpage par zone

Le territoire étudié est divisé en un certain nombre de zones, chaque zone correspondant à une coupe de sol type, empilement de couches sur un substratum. Les caractéristiques de chaque couche sont spécifiques à la zone. Pour chaque zone, l'épaisseur des couches et leurs caractéristiques mécaniques sont renseignées. La dernière couche représente le substratum.

Le modèle renseigné sur Tahaa est un modèle monocouche (cf. Figure 26) : à chaque endroit, il existe une seule couche reposant sur un horizon considéré comme du substratum, soit stable.

Chaque couche est caractérisée par son poids volumique (constant), son épaisseur (constante par zone) et des caractères géomécaniques avec leur variabilité (cohésion (en kPa) et angle de frottement interne (en degrés)).

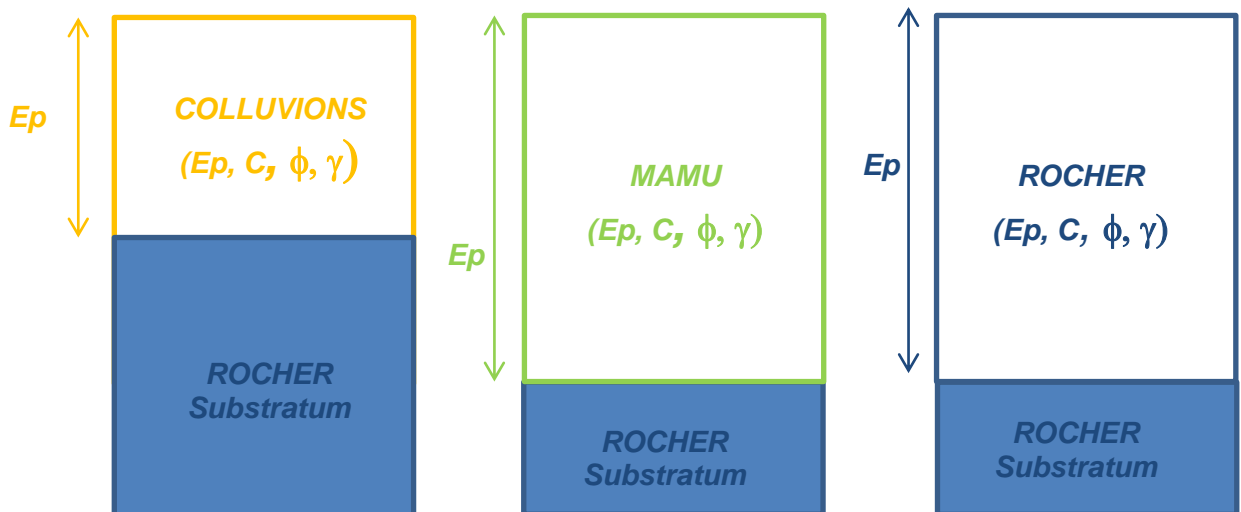


Figure 26 : Colonne de sol monocouche considérée

### 4.2.2. Type de glissement

Pour définir la géométrie la plus plausible, les glissements redoutés sont fixés comme étant des glissements-plan sur l'interface, le type de glissement le plus souvent observé en Polynésie (cf. Figure 27). La surface de rupture est donc considérée comme plane. Cela signifie que les glissements envisagés interviennent à l'interface colluvion/rocher ou mamu/rocher, ce qui est largement vérifié sur le terrain. L'exercice aurait pu considérer des surfaces de rupture circulaires, mais ce type d'événement est très rare.

La taille du glissement au niveau de l'interface oscille généralement entre 30 et 75 m d'après les retours d'expérience. Elle sera l'objet d'une étude de sensibilité (cf. § 4.5.2).

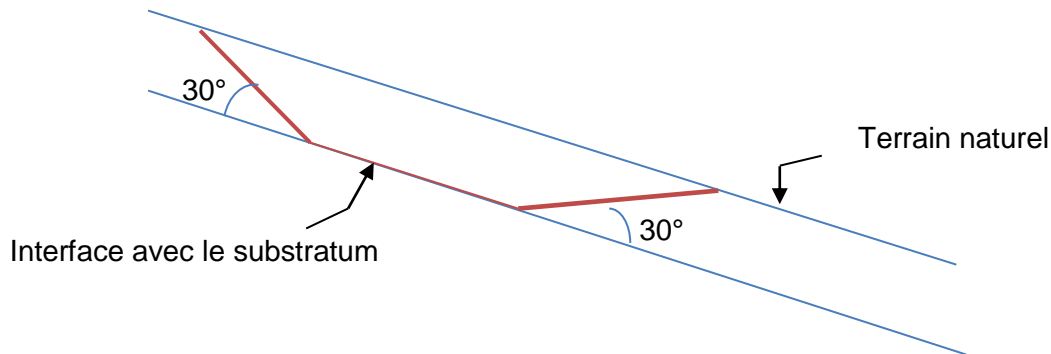


Figure 27 : Type de glissement considéré

#### 4.2.3. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques géomécaniques intervenant dans la stabilité (cohésion (en kPa) et angle de frottement interne (en degrés), sont pris en compte avec leur variabilité pour tenir compte de la variabilité naturelle de ces paramètres et des incertitudes que l'expert a sur leur valeur réelle, grandeur difficilement appréciable en géomécanique et notamment à l'échelle de travail.

La distribution probabiliste est de forme triangulaire (cf. Figure 21), pour rester le plus proche du type d'incertitude rencontrée, soit celle liée à l'expertise et au manque de donnée : l'utilisateur considère qu'il n'est pas possible que la valeur soit inférieure à un minimum, et supérieure à un maximum, et que la valeur qui correspond au sommet du triangle est la plus probable. Ce type de raisonnement rappelle par certains aspects une approche possibiliste.

Les valeurs considérées ici ont été calées par rétro-analyse et sont explicitées au § 3.6.3.

#### 4.2.4. Caractéristiques hydrogéologiques

On ne considère pas de régime transitoire puisque les données pluviométriques ne sont actuellement pas disponibles, comme décrit dans le § 3.7.2.

Le degré de saturation des terrains est donné par une valeur constante pour chaque simulation, correspondant au « taux de remplissage » de la nappe. Elle sera l'objet d'une étude de sensibilité particulière (cf. § 4.5.2).

### 4.3. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE RUPTURE : MODULE ALICE

Le principe du programme ALICE® est de calculer les facteurs de sécurité (et leur distribution) le long de profils topographiques couvrant l'ensemble de la zone d'étude.

#### 4.3.1. Génération des profils

Un module spécifique permet de générer de manière automatique ces profils 2D, espacés d'une distance égale à la taille de la maille du MNT, soit ici 25 m (choix de la valeur détaillée au § 3.1). Un exemple de ces profils automatiques est donné en Figure 28.

Le principe de cette génération est de se rapprocher automatiquement du profil de la plus forte pente. Cette génération se base essentiellement sur la topographie (MNT et carte des pentes) ainsi que sur un modèle de drainage : un profil débute d'une crête ou d'un point haut (mailles pour lesquelles la surface drainé est nulle) et se termine quand il a rejoint un drain.

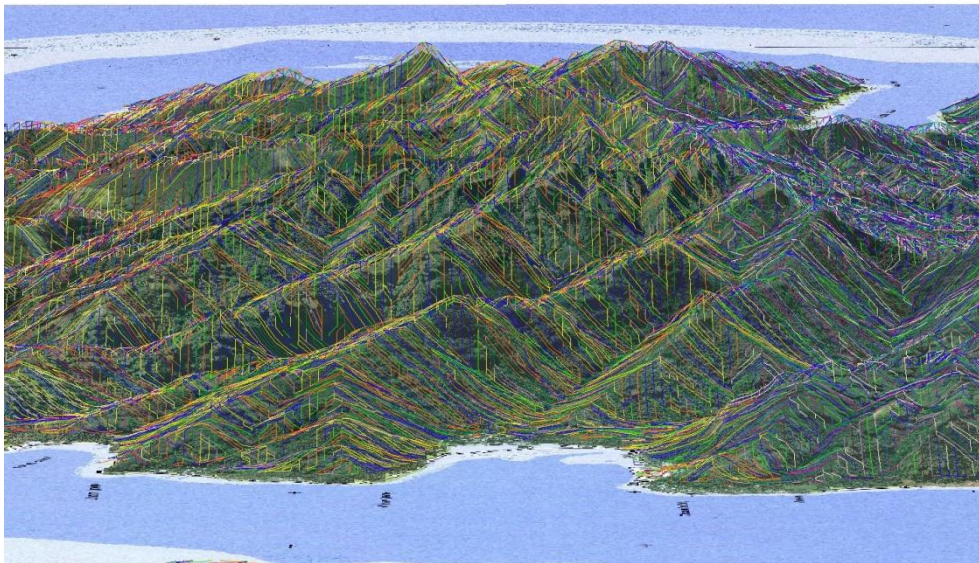


Figure 28 : Exemple des profils 2D générés automatiquement par ALICE

#### 4.3.2. Paramétrage Alice

L'ensemble des paramètres est compilée dans la fenêtre utilisateur (exemple en Figure 29). Les paramètres qui ont été renseignés ici sont :

- Données topographiques (données décrites au § 3.1) :
  - MNT

- Carte des pentes
- Direction de pente
- Accumulation
- Données mécaniques
  - Zonage géotechnique (décrit au § 3.5)
  - Pour chaque couche, caractéristiques mécaniques et variabilité (données décrites au § 3.6)

Deux variables restent des paramètres qui feront l'objet de l'étude de sensibilité décrite au § 3.6.3 :

- Le « taux de remplissage », soit l'information sur la saturation des terrains ;
- La taille des glissements redoutés.

Les fonctionnalités qui n'ont donc pas été pris en compte sont :

- le modèle hydrologique global pluie-débit (cf. § 3.7) ;
- l'agression sismique (non justifiée en Polynésie).

Il en résulte que nous n'intégrons pas les facteurs déclenchants (pluie et agression sismique) d'une part ; les résultats est donc une carte statique.

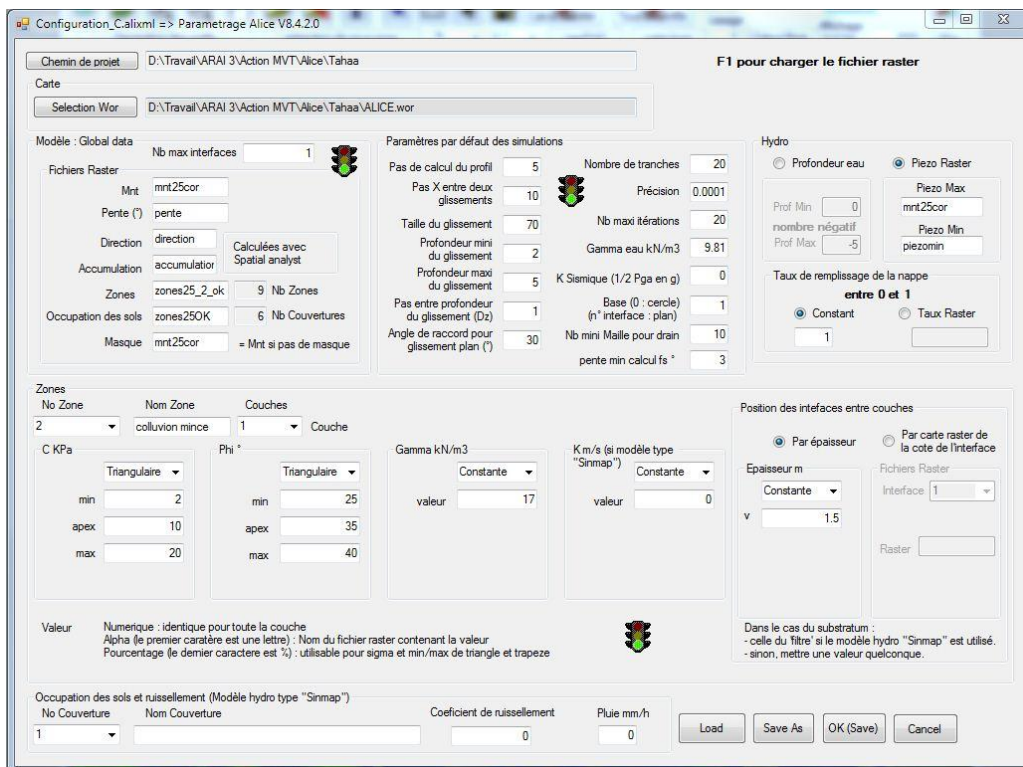


Figure 29 : Exemple de fenêtre utilisateur Alice

### 4.3.3. Calcul des facteurs de sécurité par profils – analyse de stabilité

Dans le cas simple où les paramètres d'entrée sont supposés connus, le logiciel ALICE va pouvoir estimer un facteur de sécurité, tout le long de chaque profil. Il calcule pour une configuration donnée, les coefficients de sécurité correspondants à la surface de rupture choisie par l'utilisateur. Il donne ainsi la surface de rupture critique et le coefficient associé.

Le calcul du coefficient de sécurité utilise la méthode classique, dites « des tranches », c'est-à-dire que le talus est découpé en tranches verticales d'épaisseur unitaire et l'on considère l'équilibre limite de chaque tranche. Le coefficient de sécurité correspond, pour une surface de rupture donnée, au rapport de la contrainte de cisaillement maximale mobilisable à la contrainte de cisaillement mobilisée le long de la surface de rupture. Théoriquement, une configuration est instable si ce coefficient est inférieur à 1.

La Figure 30 illustre un calcul lancé sur un profil en particulier. Les facteurs de sécurité ont été évalués tout le long du profil, à intervalle régulier. La courbe d'évolution du facteur de sécurité s'affiche (courbe 4 dans la Figure 30). Sur ce profil, la géométrie la moins stable est affichée (cercle de rupture en rouge sur la Figure 30), avec le facteur de sécurité médian.



Figure 30 : fenêtre Profil ALICE® - calcul le long du profil. L'axe vertical est gradué de manière non linéaire. En partant du bas, les lignes horizontales correspondre resp. à FS=0,1, 2, 10, 100.

#### **4.3.4. Calcul de la probabilité de déclenchement d'un glissement**

En réalité, étant donné la variabilité des paramètres d'entrées, l'ensemble des valeurs possibles doivent être prises en compte.

Le résultat ne s'exprime plus alors par une valeur de facteur de sécurité (FS), mais par une probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à 1 (i.e. soit instable). C'est cette probabilité que l'on estimera correspondre à la probabilité qu'un glissement se déclenche à cet endroit donné.

Pour cela, l'utilisateur saisit un nombre de tirages Monte-Carlo pour le calcul de variabilité. Ici, 1000 tirages ont été effectués, sachant que ce nombre influe directement sur le temps de calcul (environ 24h par calcul dans ce cas). La distribution des facteurs de sécurité et la probabilité que FS soit inférieur à 1, est calculé tout le long du profil. La courbe d'évolution de cette probabilité (courbe 6 dans la Figure 30) s'affiche (l'axe vertical est gradué de manière linéaire (sommet de la fenêtre à 100%).

Une fois les calculs effectués, les résultats (moyenne du FS et probabilité que FS soit inférieur à 1) sont reportés dans une carte raster.

Compte tenu de la proximité des profils, mais aussi du fait que le pas de calcul des glissements le long du profil peut-être inférieur à la taille de la maille du MNT, plusieurs résultats peuvent être calculés pour une même maille. Dans ce cas, le FS le plus faible et la probabilité  $FS < 1$  la plus forte sont conservés.

#### **4.4. PRISE EN COMPTE DE LA PROPAGATION : POST TRAITEMENT BORA**

Le logiciel BORA est un outil d'aide à la cartographie des aires de propagation, basée sur un modèle empirique des règles de cartographie. Cet utilitaire offre la possibilité de délimiter de façon « automatique » des zones de propagation en aval des zones de départ identifiées par ailleurs.

Le modèle de propagation (BORA) évalue la probabilité de déplacement d'une masse en chaque maille. Il ne traite pas de la probabilité de départ du mouvement de terrain (probabilité de rupture), qui est un paramètre d'entrée du modèle (traité par le module ALICE décrit ci-dessus). Ainsi, il ne fait de calcul de propagation que si la probabilité de rupture est non nulle.

##### **4.4.1. Conception du modèle**

Les règles empiriques de base de ce modèle de propagation sont les suivantes :

- Une masse quelconque se déplace a priori sur la ligne de plus forte pente ;
- Le gain ou la perte d'énergie de la masse en mouvement est fonction de la valeur de la pente ;
- L'énergie de la masse est plafonnée ;



- Il peut exister une certaine probabilité que la masse s'écarte de la ligne de plus grande pente ;
- Cet écart peut, éventuellement, consommer de l'énergie.

L'énergie de la masse est le moteur de la propagation : tant que l'énergie est positive, la propagation continue ; celle-ci ne s'arrête que lorsque l'énergie s'annule. Bien évidemment, l'énergie totale ne peut être négative ; elle est bornée à zéro. Cette énergie est définie en fonction de la pente et se cumule d'un pixel à un autre. A cette énergie évaluée en chaque pixel, est associée une probabilité.

La Figure 31 synthétise les règles de propagation d'une masse située au pixel A, avec AB ligne de plus grande pente :

- $E_A$  est l'énergie de la masse de départ (pixel A)
- $E_B$  est l'énergie de la masse dans la maille B, située strictement à l'aval de A
- $E_C, E_{C'}$  correspondent à l'énergie de la masse située dans les mailles latérales C et C', par dispersion ;
- $P_B$  et  $P_C$  sont les probabilités que la masse aille dans la maille aval, elles sont fonction d'une prime à l'axe.

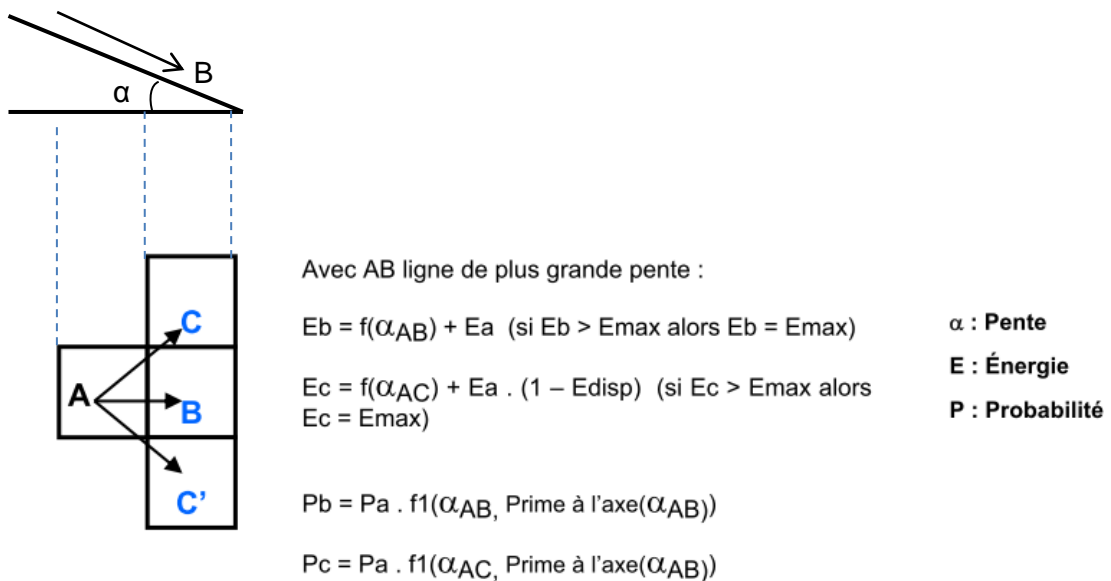


Figure 31 : Règles de propagation de BORA. Source : Terrier et Sedan (2009)

#### 4.4.2. Le paramétrage

Les paramètres d'entrées du modèle sont :

- Les paramètres  $P_1, P_2$  (pente °) et  $E_1, E_2, E_3, E_{\max}$  représentent le modèle de perte ou de gain d'énergie en fonction de la pente du versant :

- Les valeurs seuils de pente (P1 et P2) ;
  - L'énergie E1 minimale, entre 0 et P1 ;
  - L'énergie E2, entre P1 et P2 ;
  - L'énergie maximale E3 au-delà de P2,
  - Le paramètre donnant l'énergie maximale cumulée possible EMAX
- Le paramètre nommé EDISP définit l'énergie latérale dissipée. Ce paramètre renforce ou atténue l'influence de la prime à l'axe. La valeur de ce paramètre est comprise entre 0 et 1 (pas de dispersion) ;
  - Les paramètres nommés PA (Prime à l'axe), pris entre 0 et P1, P1 et P2, P2 et 90°, régissent la dispersion autour de l'axe de plus grande pente.

Les observations de terrain, notamment les distances de propagation constatées, ont permis de caler les paramètres d'entrées du modèle de propagation. Les paramètres choisis à partir du retour d'expérience sur Tahaa sont décrits en Figure 32.

Bora

PA : Prime à l'axe

P1  PA 0°

P2  PA P1

E1  PA P2

E2  PA 90°

E3

EMAX  Pmin

Edisp (1 à 0)  Si EDSISP = 1, pas de dispersion  
Pour les chutes de blocs, Edisp = 0

Aléa = P  Aléa = P x E

Recharger paramètres

Paramètres par défaut

Calcul de calage

calcul sur la carte

exit

Figure 32 : Paramètres du modèle de propagation

#### 4.4.3. Résultat du module de propagation

Le résultat se présente sous forme d'une probabilité entre 0 et 1 qui représente la probabilité qu'une masse se propage jusqu'à ce pixel (indépendamment de la probabilité qu'un glissement se déclenche) :

- Pour chaque maille de départ, la probabilité en chaque maille située à l'aval est la somme des probabilités des mailles amont ;
- En chaque maille du territoire, la probabilité est égale à la somme des probabilités causées par les différentes mailles de départ situées en amont.

#### 4.5. EVALUATION DE LA PROBABILITE DE GLISSEMENT : COMBINAISON DE LA RUPTURE ET DE LA PROPAGATION

##### 4.5.1. Combinaison de la probabilité de rupture et de propagation

Le résultat se présente sous forme d'une probabilité entre 0 et 1 en chaque pixel. En réalité, cette valeur cumule le résultat des deux modules (ALICE et BORA) soit la probabilité de rupture et la probabilité de propagation des masses (cf. Figure 33). In fine, elle correspond à la probabilité qu'un glissement affecte ce pixel (qu'il s'y déclenche, le traverse ou s'y arrête).

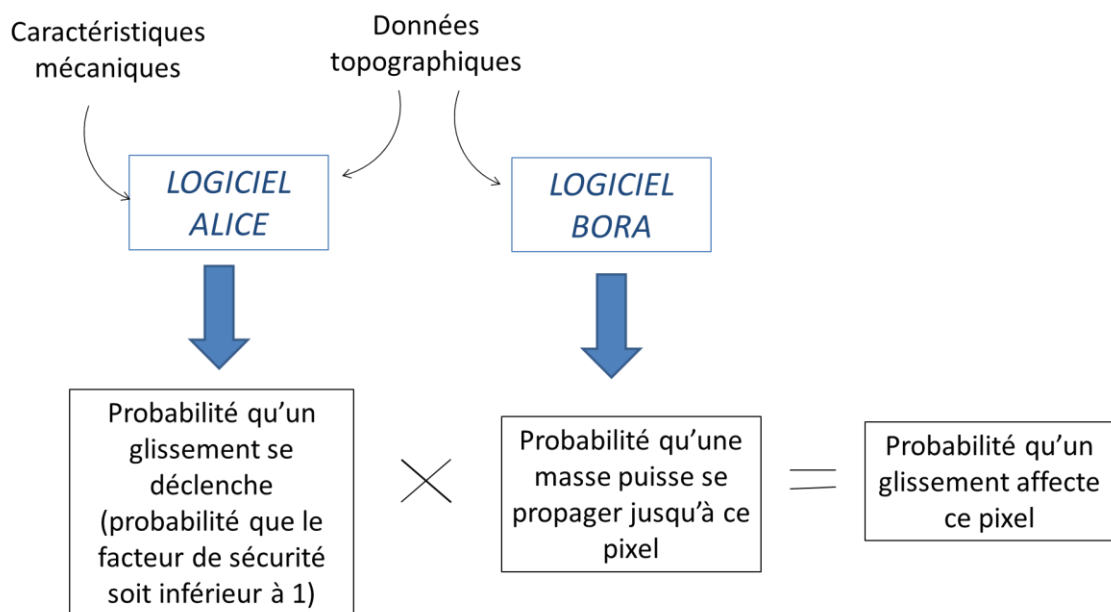


Figure 33 : Combinaison des simulations et probabilités obtenues en chaque pixel

#### **4.5.2. Analyse de sensibilité**

Deux facteurs sont variables dans le temps et dans l'espace : la taille du glissement redouté et la saturation des terrains. Nous n'avons aucun moyen de fixer ces valeurs a priori ; les valeurs sont toutes plausibles.

Or, ces facteurs ont une forte influence sur le calcul de stabilité. Pour tester l'influence de ces paramètres, la modélisation (ALICE et BORA) a été lancée pour chaque taille de glissement possible (entre 30 et 75 m) et pour chaque taux de saturation (jusqu'à 100 %). Cette étude de sensibilité a permis de mesurer l'influence de chaque paramètre, en les faisant varier et ainsi, de choisir un scénario défavorable, qui reste réaliste.

L'ensemble des cartes résultat qui combine tous les scénarios possibles, sont disponible en Annexe 2 (modélisation ALICE seule) et en Annexe 3 (modélisation ALICE couplée à BORA). Un exemple est présenté pour un glissement de taille 75 m en Figure 34.

En tout, 44 simulations ont donc été lancées :

- De 11 états de saturation (0 à 100%) ;
- De 4 tailles de glissements élémentaires (30, 45, 60 et 75 m).

#### ***Saturation***

La « taux de remplissage » de la nappe varie entre 0 % (couche superficielle considérée sèche) et 100 % (couche superficielle saturée).

En parcourant les planches en Annexe 2, il est facile de vérifier que plus ce taux augmente, plus la probabilité qu'un glissement se déclenche s'accroît.

#### ***Taille des glissements redoutés***

La taille des glissements considérés varie entre 30 et 75 m, comme le suggère les retours d'expérience. Des tailles plus importantes ne sont pas plus défavorables (butée topographique, augmentation du frottement à l'interface) et n'ont, dans tous les cas, pas été observés.

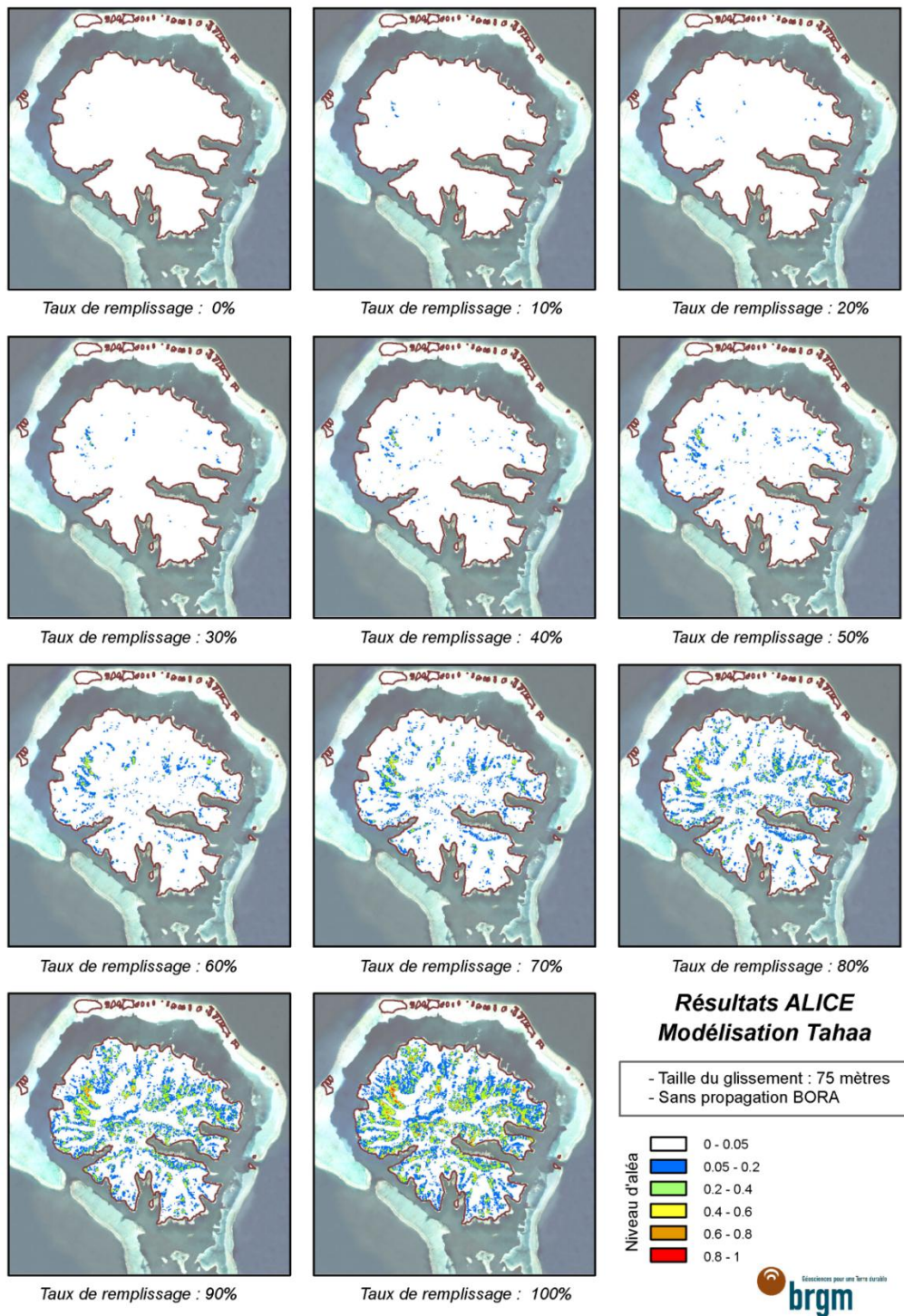


Figure 34 : Résultat ALICE pour un glissement de 75 m

### **4.5.3. Choix de la configuration de référence**

Finalement, la configuration de référence pour l'aléa, a été choisie grâce à l'itération de l'ensemble des scénarios.

Parmi l'ensemble des simulations, l'agression la plus adaptée s'est finalement avérée être une taille de glissement de 75 m, pour une saturation de 80 % de saturation.

Ce scénario a été choisie principalement parce qu'il se rapproche le plus possible de la situation catastrophique de 1998. Les cartes ont en effet, été confrontées aux événements de 1998, pour choisir celles qui représentait le mieux cette situation. Les paramètres choisis s'avèrent peu favorables à la stabilité tout en restant réalistes (une saturation à 100 % de toutes les nappes aurait été exagérée).

Ce choix tend donc à choisir comme aléa de référence, la situation de 1998 à l'échelle de l'île.

Ainsi, les événements historiques et les simulations itératives nous ont permis de fixer certains paramètres pourtant très variables (taille de glissement, taux de remplissage), de manière à être le plus représentatif d'une réalité réaliste mais particulièrement dommageable. Il n'en reste pas moins que la carte d'aléa obtenu représente un aléa glissement de terrain, tout type de situation confondue.

## **5. Analyse des résultats dans la logique PPR – enseignements**

### **5.1. PRESENTATION DES RESULTATS : UN NOUVEL ECLAIRAGE DE LA CARTE D'ALEA**

La carte d'aléa issue du PPR distingue deux zones : aléa fort et aléa moyen ; à l'inverse, la carte d'aléa ALICE, quantitative, est représentée par une échelle continue de couleur, volontairement laissée sans limite de classe. Cette échelle représente plus précisément une probabilité d'apparition d'un glissement de terrain, qui sera abusivement, dans cette partie, appelée « aléa ALICE ». De part cette différence de représentation, la classe d'aléa issue du PPR est plus intégratrice et lissée que la carte d'aléa ALICE qui nuance les valeurs.

Il n'est pas possible de remplacer la carte d'aléa par la nouvelle carte. En effet, cette étude ne traite que des glissements de terrain d'une part et dans tous les cas, l'expertise de terrain doit venir confirmer les résultats d'une simulation qui reste théorique et basée sur un modèle simplifié, notamment en terme lithologique (monocouche..). D'autre part, la carte ne représente qu'une valeur de probabilité et non d'aléa puisqu'il n'est ni intégré la notion d'intensité du phénomène ni celle de période de retour.

Cette étude aboutit plutôt à donner un nouvel éclairage à la carte d'aléa du PPR, en précisant le sens du niveau d'aléa initial et en précisant également les possibilités quant à la révision du zonage. Cette information est donc précieuse puisqu'elle apporte des outils pour estimer la confiance à accorder au zonage existant.

En termes de résultats cartographiques, il s'agit donc de proposer aux décideurs la carte d'aléa actuelle (niveau fort et moyen) à laquelle est surimposée la probabilité de glissement évaluée par Alice/Bora (valeur continue), comme illustrée en Figure 35. Les cartes résultats sont disponibles en Annexe 4 .

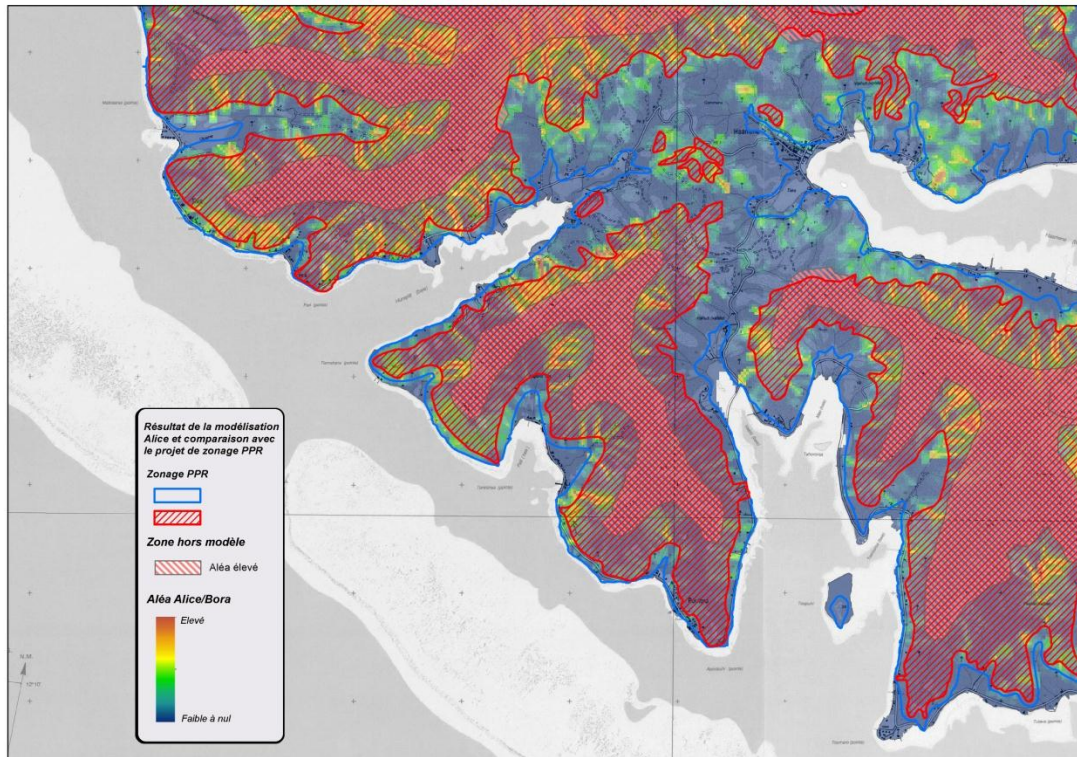


Figure 35 : Extrait de la carte résultat : Double éclairage du niveau d'aléa

## 5.2. EXPLOITATION DES RESULTATS

Cette nouvelle modélisation permet de confirmer que globalement, les cartes d'aléas établies lors du premier programme ARAI apparaissent correctes et sécuritaires. L'emprise de la zone d'aléa fort du PPR est importante et couvre la majorité des zones à aléa élevé « ALICE ». Cependant, il existe des secteurs en contradiction apparente, permettant en réalité, d'affiner la connaissance de l'aléa.

La comparaison des deux approches permet :

- de confirmer l'aléa fort sur les secteurs les plus exposés ; Sur ces secteurs, il ne sert à rien d'envisager des études de réévaluation de l'aléa ;
- d'identifier des zones d'aléa fort du PPR susceptibles de pouvoir être affinées sous condition d'acquisition de nouvelles données d'entrées (topographiques, géotechnique..) (cf. Figure 38). Sur ces secteurs, le Service de l'Urbanisme sait désormais qu'il peut être pertinent de lancer une étude pour envisager une possible révision de l'aléa ;
- de localiser, localement, des secteurs problématiques qui ressortent en aléa élevé avec la méthode déterministe ALICE mais qui étaient identifiés en aléa moyen auparavant (cf. Figure 37).



Il est important de rappeler qu'entre les deux cartes :

- il n'y a pas de différence de qualité de données d'entrée topographique ;
- la carte naturaliste du PPR est principalement issue d'expertise donc que l'investigation de terrain est pratiquement systématique et à ce titre, a pu prendre en compte des spécificités locales ;
- la carte déterministe « ALICE » de 2012 repose sur des calculs de stabilité et à ce titre, apporte une quantification de l'aléa robuste, si tant est qu'il n'y ait pas une spécificité locale, ayant une signification physique.

En résumé, à partir de cet outil, il est possible maintenant de préciser une politique de révision du zonage en hiérarchisant les secteurs prioritaires, selon les contraintes d'aménagements. Il est donc proposé :

- Dès qu'une des deux cartes présentent un aléa fort ou élevé, l'aléa doit être maintenu en fort, quand il n'y a pas de contrainte d'aménagement (situation a), b). et e). de la Figure 36)
- La révision de la carte d'aléa est à cibler sur les secteurs d'enjeux en contradiction apparente :
  - Une révision de l'aléa est envisageable pour les zones d'aléa fort du PPR actuel où l'aléa ALICE est faible, sous condition d'acquisition de nouvelles données d'entrées (situation c de la Figure 36 et exemple en Figure 36). Il peut s'agir notamment de préciser les caractéristiques mécaniques mais surtout de préciser l'épaisseur des altérites ou la présence et l'emprise des colluvions par des investigations géotechniques ;
  - Un contrôle de terrain apparaît nécessaire pour les zones d'aléa ALICE élevé situées en zone d'aléa moyen du PPR actuel (situation d de la Figure 36 et exemple en Figure 37).

La Figure 36 ci-dessous synthétise ces propositions.

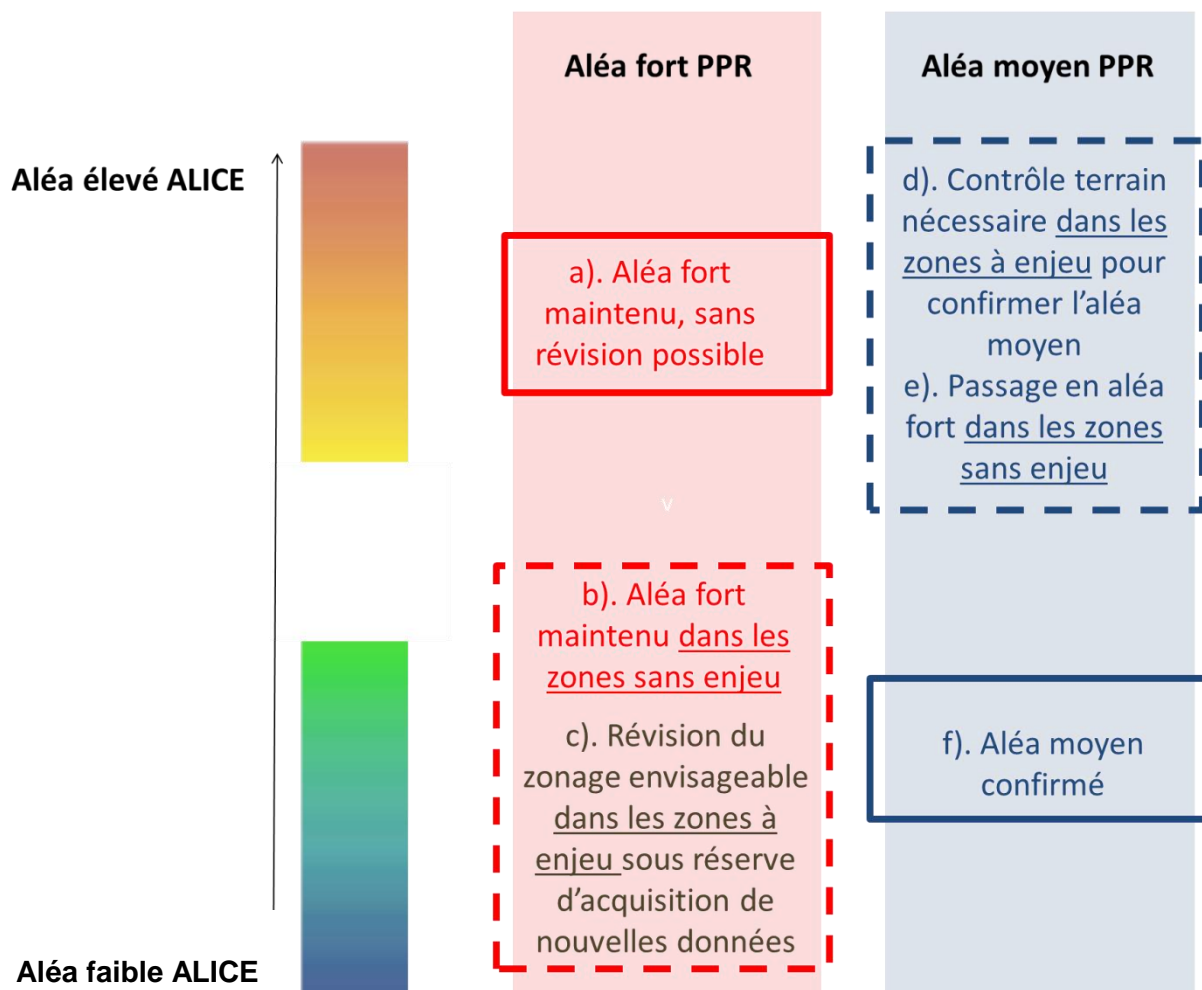
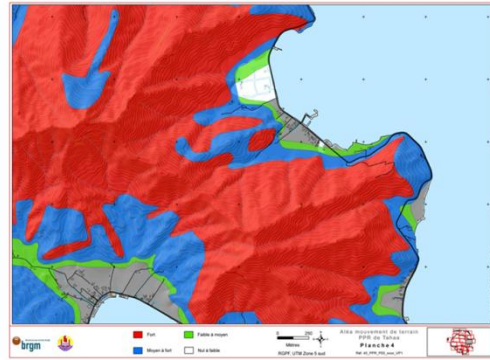


Figure 36 : Proposition de lecture des deux informations complémentaires

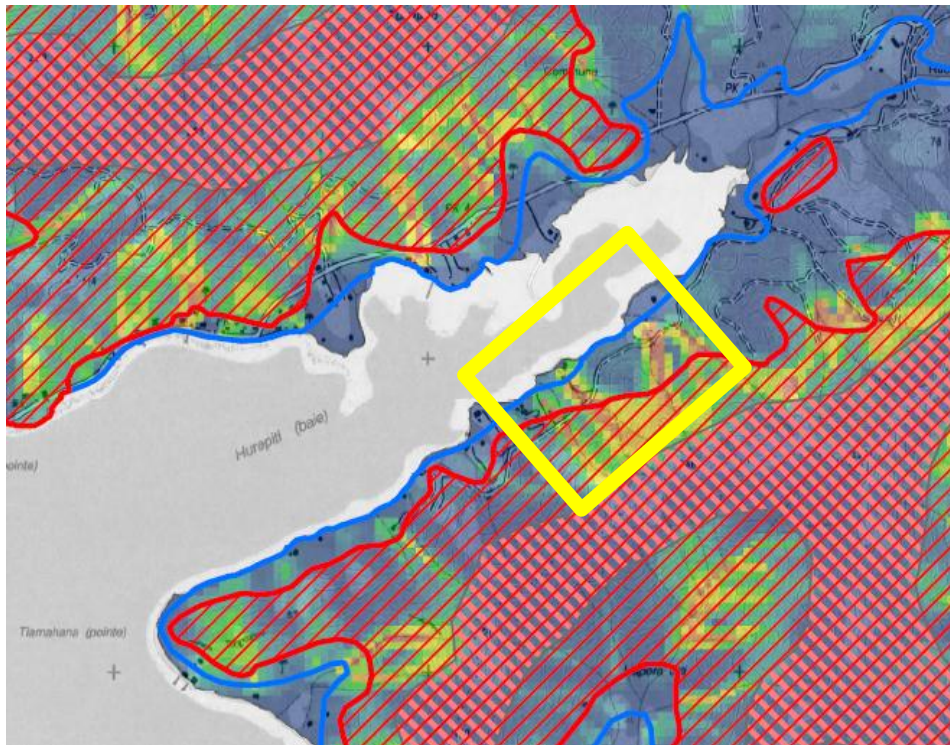


Figure 37 : Zoom des cartes en Annexe 4 pour illustrer la situation d) et e)

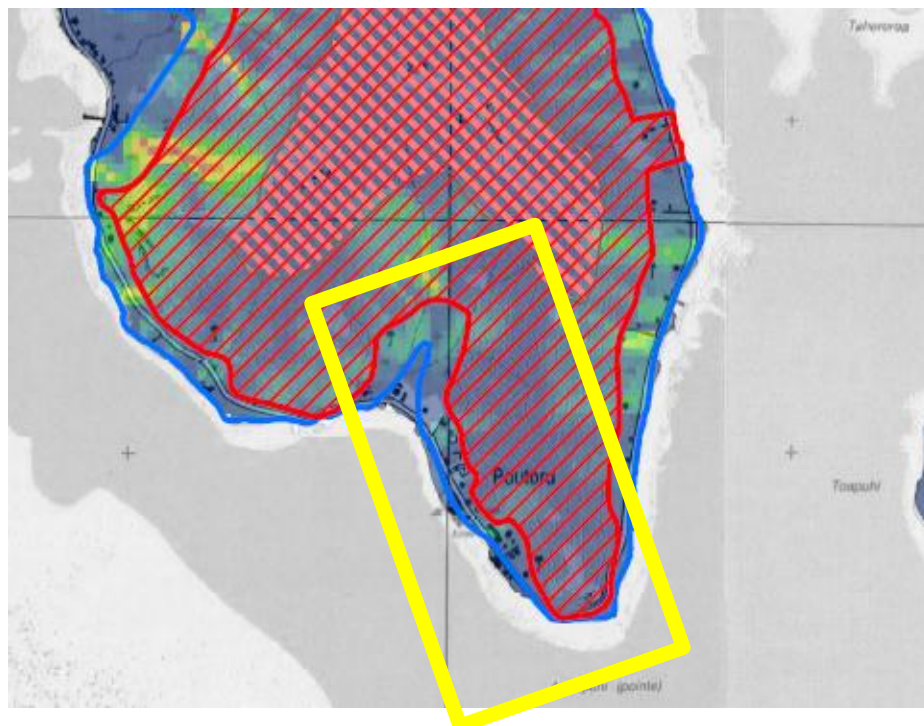


Figure 38 : Zoom des cartes en Annexe 4 pour illustrer la situation b) et c)

### 5.3. LIMITES ET PERSPECTIVES

La carte d'aléa ALICE et la carte d'aléa du PPR apportent chacune un éclairage complémentaire sur la probabilité d'apparition d'un glissement mais ne représentent pas exactement la même grandeur. La carte d'aléa ALICE a l'avantage de représenter une valeur de probabilité quantitative ayant une signification physique (la probabilité d'avoir un facteur de sécurité  $< 1$ ), qui permet d'envisager a terme, pouvoir aboutir à une véritable carte d'aléa, ce qui serait novateur en termes de mouvement de terrain. Il resterait à intégrer la notion d'intensité du phénomène d'une part et celle de période de retour (cf discussion ci-dessous sur la pluviométrie).

Cette carte s'est focalisée sur les phénomènes de glissements de terrain et n'évalue pas les événements rocheux de type chute de blocs. L'aléa n'a pas non plus été estimé sur les fortes pentes au centre du massif, concernées principalement par des éboulements ou des coulées de débris

Rappelons que le modèle géotechnique choisi est un modèle simple monocouche, qui, en accord avec l'échelle de travail, ne peut pas prendre en compte les spécificités locales, géologique ou hydrogéologique. Or, il a été montré combien la présence d'eau souterraine était souvent un facteur déclenchement de glissement. Les investigations menées dans le cadre du programme ARAI ont également confirmé que la mise en charge d'une éventuelle nappe dans le mamu (à la faveur de trachyte par exemple) et les colluvions se révèle très préjudiciables en termes de stabilité et que l'hydrogéologie du mamu était très complexe (Nédellec et Mathon, 2006).

Si la modélisation intègre les incertitudes et la variabilité naturelle des paramètres d'entrées les plus discriminants en termes de stabilité, ce modèle pourrait être améliorée en tenant compte de la variabilité spatiale à l'intérieur d'une couche (épaisseur, saturation, caractéristiques mécaniques), dès lors que cette information est disponible.

Il faut surtout rappeler que la carte finale proposée est basée sur le choix d'un scénario (ici 80 %,  $T = 75$  m), qui correspond globalement à la situation de 1998. Cependant, on ne peut, actuellement, y associer une période de retour. Celle-ci pourrait être appréciée avec l'intégration des mesures pluviométriques, facteur déclenchant principal, pour lequel il est possible d'estimer une probabilité de retour. Pour cela, il reste nécessaire d'obtenir les données pluviométriques (pluviomètre, données radar, ..) et/ou piézométrique et d'évaluer ensuite une fonction de transfert avec le taux de remplissage de la nappe, par exemple.

## 6. Conclusions

La carte d'aléa ALICE élaborée dans le cadre de cette étude, donne accès en tout point, à la probabilité qu'un glissement affecte ce point. Cette valeur intègre les incertitudes et la variabilité naturelle des paramètres d'entrées les plus discriminants en termes de stabilité.

Au terme de cette étude sur l'île de Tahaa, les décideurs disposent donc, en termes de résultats cartographiques, de la carte d'aléa mouvement de terrain actuelle issu du projet de PPR de 2006 à laquelle est surimposée la probabilité de glissement évaluée par Alice/Bora.

Cette étude donne un nouvel éclairage à la carte d'aléa du PPR, en précisant d'une part, le sens du niveau d'aléa initial et d'autre part les possibilités de révision du zonage. Cette information est donc précieuse autant pour les autorités que pour les particuliers, puisqu'elle apporte des outils pour estimer la confiance à accorder au zonage existant.

Cette nouvelle modélisation permet de confirmer que globalement, les cartes d'aléas établies lors du premier programme ARAI apparaissent correctes et sécuritaires. L'emprise de la zone d'aléa fort du PPR couvre la majorité des zones à aléa élevé « ALICE ». Cependant, il existe des secteurs en contradiction apparente, permettant en réalité, d'affiner la connaissance de l'aléa.

Les décideurs sont désormais capables de localiser plus précisément les secteurs où une révision de l'aléa est envisageable, sous condition d'acquisition de nouvelles données d'entrées. Il peut s'agir notamment de préciser les caractéristiques mécaniques mais surtout de préciser l'épaisseur des altérites ou la présence et l'emprise des colluvions par des investigations géotechniques. Par ailleurs, certains secteurs, limités, s'avèrent problématiques et exigeraient un contrôle de terrain, puisque la nouvelle modélisation indique une probabilité de glissement important dans une zone d'aléa moyen du PPR. A l'inverse, sur une grande partie du territoire communale, le niveau d'aléa fort est a priori confirmé : il ne sert à rien d'y lancer une étude de réévaluation de l'aléa.

Ces outils d'aide à la décision mis en place, le Service de l'Urbanisme peut désormais s'appuyer sur cette étude, pour envisager un affinage du zonage réaliste, ciblé sur les quelques secteurs à enjeux éligibles à ce déclassement.



## 7. Bibliographie

### Référence Polynésie française

Projet de Plan de Prévention des Risques. Commune de Tahaa. Rapport de présentation, Note méthodologique. Dossier cartographique. Service de l'Urbanisme BRGM. Septembre 2006

Blais S., Guille G., Guillou H., Maury R.C. (2004) – Carte géol. France (1/100 000), feuille de Raiatea-Tahaa – Polynésie française. Orléans : BRGM. Notice explicative par Blais S., Maury R.C., Guille G., Guillou H. (2004) 87 p.

Blais S., Maury R.C., Guille G., Guillou H. (2004) – Notice explicative, Carte géol. France (1/100 000), feuille de Raiatea-Tahaa- Polynésie française, Orléans : BRGM, 87 p. Carte géologique par Blais S., Guille G., Guillou H., Maury R.C. (2004).

Chassagneux D. (1999). La prévention des risques naturels en Polynésie française. Phase 2, tâche n°2. Examen de 15 sites à risque résiduel mouvements de terrain fort à Raiatea et Tahaa : recommandations pour la mise en sécurité. Rapport BRGM R 40619, 2 vol. 94 p., 6 annexes.

Mompelat J.M., Sedan O. et Lembezat C. (2003). Contribution du BRGM à la mise en œuvre par le Territoire de la Polynésie française d'un programme de prévention des risques naturels. Revue Géologue n°138

Nachbaur A., Mathon C., Nowak E. (2012). Les risques associés aux formations superficielles en milieu tropical : la Polynésie française. Géochronique n°121, 2012

Nédellec J.L., Mathon C. (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.

Nédellec J.L., Mathon C. (2006). Programme ARAI - Programme 3.1. – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain - Étude de sites détaillés. Rapport final. BRGM/RP-54834-FR. 173 p, 48 illustrations.

Terrier M., Sedan-Miegemolle O. (2009) Cartographie de l'aléa mouvements de terrain, commune de Tairapu Ouest (Tahiti, Polynésie française), Rapport BRGM/RP-57364-FR, 61p, 38 fig.

## Logiciel ALICE

Aleotti P, Chowdhury R (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 58, 21-44

Baum R L, Savage W Z, Godt J W (2002) TRIGRS – A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. U.S. G.S. Open-File Report 02-0424, 27 .

Baum R L, Savage W Z, Godt J W (2008) TRIGRS-A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0. US Geological Survey Open-File Report 2008–1159. Available via: <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1159/>

Haneberg W C (2000) Deterministic and probabilistic approaches to geologic hazard assessment *Environmental & Engineering Geoscience*, 6:209–226.

Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research* 30 (4), 1153–1171.

Morgenstern, N.R., and Price, VE. 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1): 79-93.

Morgenstern, N.R., and Price, VE. 1967. A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces. *Computer Journal*, 9: 388-393.

Pack R T, Tarboton D G, Goodwin C N (1998) A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping. SINMAP User's Manual , 68 pp.

Savage W Z, Godt J W, Baum R L (2003) A model for spatially and temporally distributed shallow landslide initiation by rainfall infiltration. In: *Proceedings of 3rd international conference on debris flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment*, Davos, Switzerland, 10–12 September 2003:179–187.

Savage W Z, Godt J W, Baum R L (2004) Modeling time-dependent areal slope stability. In: Lacerda WA, Erlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (eds) *Landslides-evaluation and stabilization*, *Proceedings of 9th International symposium on Landslides*, vol 1. Balkema, Rotterdam, pp 23–36

Sedan O., Mirgon C, Bes de Berc S. (2006) – Cartographie de l'aléa mouvements de terrain – Prise en compte de la propagation – Programme BORA – Rapport final. BRGM/RP-54650-FR, 166p., 145 ill., 6 annexes (volume séparé).

Sedan O. et Mompelat J.M. (1995). Convention de recherche BRGM-Région Martinique, Projet AR47, rapport de synthèse, rapport BRGM R 38433 ANT 95



Stillwater Sciences. (2007) Landslide Hazard in the Elk River Basin, Humboldt County, California. Final report. Prepared by Stillwater Sciences, Arcata, California for the North Coast Regional Water Quality Control Board.

Thiéry D. 2003 ; Logiciel GARDÉNIA version 6.0 - Guide d'utilisation, In French (GARDÉNIA software release 6.0 User's guide), BRGM report, RP-52832-FR.



## **Annexe 1**

### **Alice : Guide utilisateur**



## 1. Introduction

Le programme ALICE® est le fruit de développements réalisés par le BRGM pour répondre à des besoins de Recherche et de Service Public (Scénarios départementaux de risque Mouvements de terrain, programme ARAI, programme Safeland, Programme DO-SMS/SUDOE).

La version qui sert de base à la description du fonctionnement d'ALICE® est la V7.7.9.

Dans le rapport le sigle ZE signifie « Zone d'étude », c'est-à-dire le secteur géographique qui fait l'objet d'une modélisation ALICE®.

## 2. Principe

ALICE®, pour Assessment of Landslides Induced by Climatic Events, est un logiciel d'aide à la cartographie de l'aléa glissement de terrain, développé par le BRGM, sous une expression qui permet une approche quantifiée du risque.

Les fondements de ce logiciel ont été établis dans le cadre des travaux de recherche « AR47 » aux Antilles (méthode TROPICALE) (Sedan et Mompelat, 1995 ; Mompelat 1994).

Il appartient à la famille des modèles d'évaluation basés sur une approche mécanique (modèles géotechniques), pour lesquels les principales propriétés physiques du milieu sont quantifiées et utilisé par un modèle mathématique qui calcule un facteur de sécurité (Aleotti & Chowdhury, 1999). Ces modèles mettent en œuvre un Système d'Information Géographique (GIS), où l'information est spatialisée sous forme de grilles (raster), notamment la topographie (Modèles numérique de terrain). Ces modèles nécessitent de connaître la répartition spatiale (et parfois temporelle) des paramètres qui vont conditionner la stabilité des sols (caractéristiques mécaniques et géométriques des couches, état hydrique, sous une forme en général très sommaire compte tenu de la variabilité naturelle de ces paramètres au sein de zones d'étude importantes (Haneberg, 2000).

Les approches déterministes, qui se basent sur des paramètres spatialement explicites, sont les plus fréquemment mise en œuvre. Les approches probabilistes permettent de prendre en compte les incertitudes en assignant des distributions probabilistes aux paramètres du modèle (Stillwater Sciences, 2007).

Parmi les logiciels mettant en œuvre ces modèles, on peut citer :

- SHALSTAB (SHAllow Landslide STABility model - Montgomery & Dietrich, 1994) qui couple un modèle de stabilité de pente infinie (glissement plan) avec un modèle d'équilibre hydrologique (i.e. non transitoire). Le logiciel se présente sous forme d'extension ArcGis (ESRI)

- SINMAP (Stability INdex MAPping - Pack et al, 1998) est proche de SHALSTAB (modèle de stabilité de pente infinie, modèle hydrologique d'équilibre). Il utilise toutefois des algorithmes différents pour calculer les pentes et les bassins versant hydrologiques, et prend en compte les incertitudes des paramètres hydrologiques et géotechniques des sols sous la forme de distributions probabilistes uniformes.
- TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Slope-stability - Baum et al. 2002, 2008) est basé lui aussi sur un modèle de stabilité de pente infinie, mais sur la résolution d'une forme linéarisée des équations de Richards pour la partie hydrologique (Iverson, 2000, Savage et al. 2003, 2004):

ALICE® se caractérise par :

- la mise en œuvre d'un modèle de stabilité de pente fini, avec géométrie de rupture quelconque (cercle, plan ou autres), utilisant la méthode de Morgenstern et Price (Morgenstern & Price 1965, 1967), appliquée à distance régulière le long de profils topographique 2D de versant, couvrant l'ensemble de la zone d'étude,
- l'utilisation d'un modèle hydrologique global pluie-débit, GARDÉNIA (Thiery 2003),
- la prise en compte possible d'une agression sismique régionalisée,
- par une gestion de la variabilité et des incertitudes des paramètres géotechniques au moyen de distributions probabilistes (choix entre distributions normales, uniformes, triangulaires ou trapézoïdales)
- par un résultat qui s'exprime non pas par une valeur de facteur de sécurité (FS), mais par une probabilité de FS inférieur à 1 (i.e. instabilité).

## 3. Modèles

### 3.1. STRUCTURE D'UN PROJET ALICE

La figure 39 correspond à la fenêtre de saisie des données générales de configuration d'un modèle ALICE. Ces données sont enregistrées dans un fichier xml (d'extension « .alixml »), dont le nom est rappelé dans le titre de la fenêtre.

figure 39 : formulaire de saisie des données générales du modèle

#### 3.1.1. Dossier

L'ensemble des fichiers de données, ainsi que les résultats des traitements, sont regroupés dans un dossier du disque (figure 39-1 : saisie du chemin du projet). Seules les données cartographiques utilisées pour la lisibilité de la carte peuvent se trouver dans d'autres dossiers du disque, voire sur un serveur distant.

### 3.1.2. Interface cartographique

Le logiciel SIG utilisé par ALICE® pour représenter les cartes est MapInfo®PPBI.

L'utilisateur peut (figure 39-2 sélection Table ou Wor):

- avoir préparé, pour créer un projet ALICE®, une carte de la zone, sans restriction quant au choix des couches (Table au sens MapInfo) à afficher, et la sauvegarder dans un « workspace » (document MapInfo).
- Indiquer une table MapInfo, ALICE® créant le wor.

Après avoir initialisé les données (figure 39), ALICE® affiche cette carte (figure 40 ).

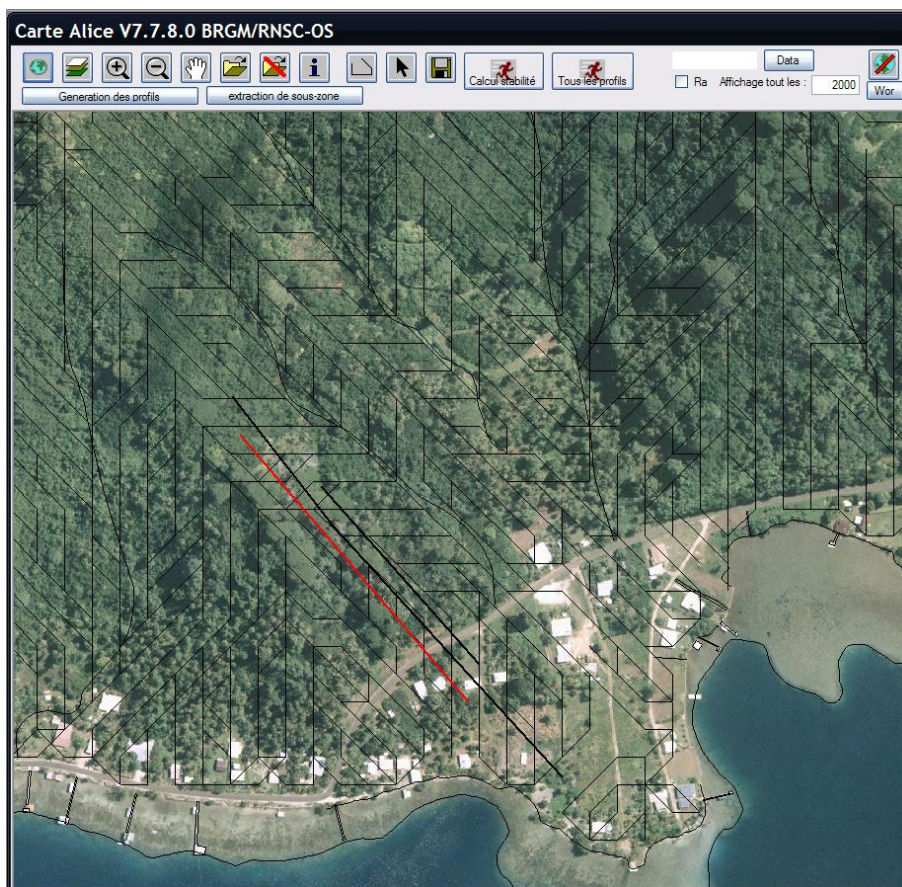


figure 40 : carte ALICE®

Le bloc de boutons (figure 41) permet un accès classique aux principales fonctionnalités nécessaires.

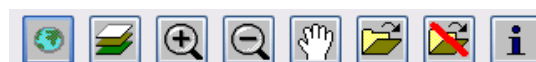


figure 41 : bloc de boutons SIG



Par ailleurs, la mise en forme de certaines cartes (figure 39- 5 à 9, 28, 29, 31 et 41) au format grille (données « raster ») nécessaires au fonctionnement d'ALICE® demandent d'être préparées à l'aide du SIG ARCGIS (ESRI®), et plus particulièrement du module «Spatial Analyst ».

### 3.1.3. Formats de fichier

Au-delà des formats de fichier utilisés par MapInfo :

- Les fichiers de configuration d'un projet ALICE® sont au format XML, avec une extension « .alixml »
- Les profils (fichiers de polygones vecteurs) sont au format d'export « Mif/Mid » de MapInfo. C'est ALICE® qui génère ces fichiers.
- Les cartes au format grille (« raster ») doivent être au format flt/hdr réel. Ce format est le format d'export réel binaire des grilles Arcview / ArcInfo. Le format est décrit à cette adresse : <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=importfromfloat>, et en annexe 1.

## 3.2. MODELE GEOTECHNIQUE

Le modèle géotechnique est une représentation de la répartition des différentes couches de terrain présentes dans la zone d'étude, qui sont susceptibles d'être impliquées dans la problématique des glissements de terrain.

Par représentation on entend d'une part la géométrie de ces couches (présence, épaisseur, ..) et d'autre part leurs caractéristiques mécaniques.

Dans ALICE® :

- Les couches sont ordonnées, numérotés de 1 à n et décrite de la surface vers la profondeur. Une couche ne peut être dessus et dessous une autre couche (ce qui n'est pas géologiquement incompatible, dans le cas des séries renversées : plis couchés). Si le cas se présente, il faut subdiviser la couche en deux.
- la dernière couche (couche « n ») correspond au substratum et a une épaisseur considérée comme infinie.

ALICE® permet l'usage de deux types de modélisations géotechniques, sachant que ces types correspondent plus à une manière de concevoir le modèle qu'à des contraintes informatiques (les modèles « hybrides » sont possibles). Il s'agit des modèles par zones, et des modèles par isohypses.

### 3.2.1. Modèle par zones

Le territoire de la zone d'étude est divisé en un certain nombre de zones, chaque zone est identifiée par un nombre entier. Une zone peut être constituée de plusieurs sous-zones distinctes (i.e. polygones distincts), qui ont en commun l'identifiant.

A chaque zone correspond une coupe de sol type, empilement de couches sur un substratum. Les caractéristiques de chaque couche sont spécifiques à la zone (i.e. la couche 1 de la zone 1 peut être complètement différente de la couche 1 de la zone 2). Pour chaque zone, l'épaisseur des couches et leurs caractéristiques mécaniques sont renseignées. La dernière couche représente le substratum.

### **Carte des zones :**

C'est une carte raster (figure 39- 8). Elle peut être utilement conçue par rasterisation d'une carte vectorielle. Typiquement ce type de carte résulte souvent d'une analyse et de combinaisons de cartes thématiques (cartes de litho-faciès, dérivées de cartes géologiques, combinées avec des cartes morphologiques, dérivées du MNT).

### **Nombre de couches par zone**

Le nombre maximal de couche est fixé, pour la globalité du modèle (i.e. toutes les zones), par le paramètre (3) nb max interfaces. Un modèle à trois couches (deux « vrais » couches plus un substratum) a deux interfaces (interface couche 1/ couche 2 et interface couche 2 / substratum).

Dans la version actuelle d'ALICE®, ce paramètre est très difficilement modifiable a posteriori, sans ressaisir l'ensemble des données du modèle. Il doit donc être choisi avec soin à la conception du modèle. Un nombre important d'interface alourdira la saisie des caractéristiques des couches, mais un nombre trop faible risque d'interdire la subdivision a posteriori d'une couche en deux...

Lorsqu'une zone contient moins de couches que le maximum, il suffit de donner une épaisseur nulle à la couche en trop, et ce en partant de la première couche. Par exemple, si le modèle permet 3 couches et un substratum, et que la zone présente une seule couche et le substratum (qui lui est toujours là), on affectera une épaisseur nulle aux couches 1 et 2.

Attention, dans la version actuelle, et avec des plans de rupture limités par une interface, une couche intermédiaire ne peut avoir d'épaisseur nulle.

### **Caractéristiques mécaniques**

Au préalable, chaque zone peut être nommée (champs 33).

Pour chaque zone, et pour chaque couche, elles sont renseignées au niveau des champs 32 à 38 de la figure 39.

La cohésion (34) en kPa, l'angle de frottement interne (35) en degrés et le poids volumique (38)  $\text{kN/m}^3$  sont explicitées sous forme de distributions probabilistes.

Les types de distribution suivants sont disponibles :

- Constante : la valeur est une constante
- Uniforme : la valeur est équiprobable entre deux bornes (mini et maxi)
- Normale : la valeur est distribuée suivant une loi normale, caractérisée par une valeur médiane et un écart-type.
- Triangulaire : la distribution est de forme triangulaire. L'utilisateur considère qu'il n'est pas possible que la valeur soit inférieure à un minimum, et supérieure à un maximum, et que la valeur qui correspond au sommet du triangle est la plus probable. Ce type de raisonnement rappelle par certains aspects une approche possibiliste.
- Trapèze : la distribution est de forme trapézoïdale. Proche de la précédente, l'utilisateur considère toutefois que les valeurs au niveau du plateau sont équiprobables.

Peut entrer également dans les caractéristiques des couches la perméabilité (39) en m/s lorsque les niveaux d'eau sont calculés avec la méthode « Sinmap ». Rentrer une valeur quelconque si ce n'est pas le cas.

La position des interfaces entre couche est définie par l'épaisseur de chaque couche pour ce type de modèle. Elle est saisie sous forme de constante pour la zone (40), dans la version actuelle d'ALICE® (pas de distribution probabiliste des épaisseurs).

Le choix de ce mode de positionnement de l'interface est ce qui caractérise une modèle par zone, par opposition au modèle par isohypses.

### 3.2.2. Modèle par isohypses

Un modèle par isohypses (i.e. carte des altitudes des interfaces des couches) est utilisé lorsque l'on dispose d'un modèle géotechnique 2,5D ou 3D, c'est-à-dire que l'on peut décrire les terrains de l'ensemble de la zone d'étude par un empilage de couches dont on connaît les caractéristiques géotechniques et géométriques. La géométrie peut être très fine, les altitudes des couches (isohypses) étant représenté sous forme raster.

Un modèle par isohypses simple n'est composé que d'une seule zone, et d'autant de couches présentes dans la zone d'étude, même si localement une couche peut être manquante (à cet endroit l'isohypse de son toit sera identique à celle de son mur ⇔ épaisseur nulle).

La carte raster de la cote de l'interface (41) est commune à l'ensemble de la zone, et donc s'il y a une seule zone, à l'ensemble du secteur d'étude.

L'application de ce principe suppose qu'une couche a globalement la même définition sur l'ensemble de la ZE. Lorsqu'une même couche présente des caractéristiques qui varient d'un point à un autre de la carte, l'utilisateur a le choix entre deux solutions :

- Soit il subdivise la couche en deux, l'une étant arbitrairement au-dessus de l'autre, sachant que de toute façon elles ne se superposeront pas.
- Soit il crée une nouvelle zone, pouvant dans ce cas saisir pour cette couche des caractéristiques différentes. Mais il est contraint de saisir pour chaque zone

les caractéristiques de chaque couche, même si elles sont identiques d'une zone à l'autre.

Dans ce deuxième cas, le modèle à isohypses est plus complexe, chaque couche étant définie géométriquement de manière globale sur l'ensemble de la ZE, mais ses caractéristiques mécaniques sont définies au niveau de chacune des zones.

### 3.3. MODELE HYDROLOGIQUE/HYDROGEOLOGIQUE

#### 3.3.1. Profondeur imposée

Le niveau d'eau dans le sol peut être imposé en fixant une profondeur, qui sera constante sur l'ensemble de la ZE.

Pour saisir cette profondeur l'utilisateur indique :

- Une profondeur minimale (sous forme de nombre réel négatif) (26)
- Une profondeur maximale (réel négatif avec une valeur absolue supérieur ou égale à celle de la profondeur minimale) (27)
- Un taux de remplissage (30)

Le taux de remplissage, variant entre 0 et 1, permet de calculer la profondeur effective (0 : profondeur effective = profondeur maximale ; 1 : profondeur effective = profondeur minimale)

Si la profondeur minimale est égale à la profondeur maximale, le taux de remplissage n'a aucune influence.

Ce taux de remplissage, qui permet de simuler les effets d'une surcharge hydrique induite par un évènement (ou une série d'évènements) hydro-pluviométriques, peut être le résultat d'une modélisation de type GARDÉNIA (cf. 3.3.4)

Lorsqu'il est possible de régionaliser ce taux, c'est-à-dire lorsqu'il est considéré comme variable au sein de la ZE, il peut être stocké dans une carte raster (31).

#### 3.3.2. Piézométrie imposée

L'hypothèse de profondeurs maximale et minimale constante sur la ZE, indépendante du relief et de la nature des terrains, est très réductrice.

On peut disposer de cartes piézométriques (altitude de la nappe), élaborées grâce à des données piézométriques, des modèles hydrogéologiques, et pondérées par l'expertise.

ALICE® permet d'utiliser ces cartes sous forme :

- d'une carte raster de la piézométrie maximale, qui correspond à un état de saturation des terrains (29),

- d'une carte raster de la piézométrie minimale (28) qui correspond à un étiage.

Le taux de remplissage (constant ou sous forme de carte raster) joue le même rôle que pour les profondeurs imposées (cf. 3.3.1).

Dans le cas de scénario hydro-pluviométrique aboutissant, après modélisation, à la création d'une carte piézométrique (cas de la modélisation « Sinmap-like », cf. 3.3.3 ), il suffit de saisir son nom en 28 et 29. Le taux de remplissage est alors quelconque.

### 3.3.3. Modèle « Sinmap-like »

Ce modèle, destinée à évaluer la hauteur de la nappe en fonction d'une sollicitation hydro-pluviométrique, est une adaptation de celui utilisé par Sinmap.

#### Conception

Hypothèses :

- Nappe parallèle à la pente
- Ecoulement parallèle à la pente
- Fuite verticale prise en compte
- Prise en compte de la pluie

Le débit dans une nappe s'exprime sous la forme (Darcy) :

$Q_s = S_{mouillée} \times gradP \times K$ ,  $K$  étant la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du milieu ( $m.s^{-1}$ ).

$S_{mouillée} = T_{maille} \times H$ ,  $H$  étant la hauteur d'eau

Donc  $Q_s = T_{maille} \times h \times gradP \times K$

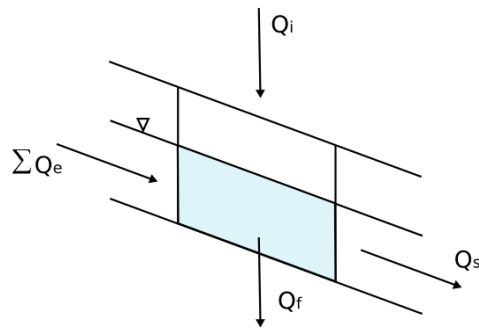
$$H = \frac{Q_s}{T_{maille} \times gradP \times K}$$

Remarque : Pour un écoulement de nappe libre,  $gradP$  correspond à la pente

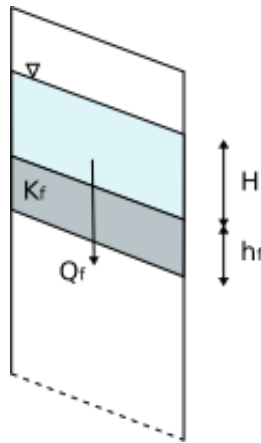
En effectuant une somme des débits entrant et de des débits sortant d'une maille, on obtient :

$$Q_s = \sum Q_e + Q_i - Q_f$$

$Q_e$  est le débit entrant dans la maille,  $Q_i$  est le débit d'eau de pluie s'infiltrant dans la maille et  $Q_f$  est le débit d'eau qui descend verticalement dans la couche sous-jacente, il est fonction de la hauteur d'eau dans la maille



Pour pouvoir exprimer la hauteur d'eau dans les terrains, deux couches sont rajoutées sous l'aquifère. La couche directement sous l'aquifère joue un rôle de filtre et la couche sous ce filtre est une couche « infinie » qui permet au fluide de circuler à travers le filtre lorsque celui-ci est suffisamment perméable.



Pour cette configuration, le débit  $Q_f$  s'exprime sous la forme :

$Q_f = S \times \text{grad}P \times K_f$ ,  $K_f$  étant le coefficient de perméabilité de la couche sous-jacente à l'aquifère.

Le gradient vertical vaut  $\frac{H + h_f}{h_{fi}}$ , donc

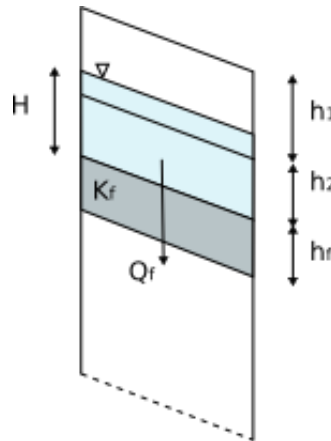
$$Q_f = T_{maille}^2 \times K_f \times \left(1 + \frac{H}{h_f}\right)$$

On obtient ainsi :

$$H = \frac{\sum Q_e + Q_i - Q_f}{T_{maille} \times \text{grad}P \times K} \text{ puis}$$

$$H = \frac{\sum Q_e + Q_i - T_{maille}^2 \times K_f}{T_{maille} \times pente \times K + \frac{1}{h_{fi}} \times K_f \times T_{maille}^2}$$

S'il y a plusieurs couches au-dessus du substratum, il est possible que la nappe reste dans la couche immédiatement au-dessus (couche 2) ou qu'elle monte jusque la couche supérieure (couche1) (cf. le schéma ci-dessous).



Dans cette configuration (2 interfaces et 3 couches dont le substratum), pour calculer la hauteur d'eau,  $H$ , on suppose dans un premier temps que la hauteur d'eau est inférieure à  $h_2$  ( $h_n$  pour généraliser). On calcule cette hauteur grâce à l'équation précédente (avec  $K=K_2$ ).

Si  $H > h_n$  :

- 1) on calcule le débit de fuite pour la couche  $n$
- 2) on calcule le débit  $Q$  évacué par la première couche, à savoir :

$$Q = (Q_e + Q_i) \cdot h_2 / H$$

On retranche ce débit du débit entrant total  $Q_e' = (Q_e - Q_i) - Q - Q_f$

- 3) on oublie la couche  $n$ , on passe à la couche  $n-1$ , en lui faisant entrer  $Q_e'$

On itère en 1 jusqu'à convergence du bilan de débit.

### Données

Le module de calcul Sinmap-like nécessite, en données d'entrée :

- le MNT de la ZE (figure 39 , 4)
- La carte de pente en degrés (5)

- Pour chaque couche du modèle, une valeur (distribution constante uniquement dans la version actuelle) de perméabilité (39)
- Une carte d'occupation des sols, raster (9), délimitant des zones (« couvertures », caractérisées par un coefficient de ruissèlement (44)
- Une intensité de pluie de scénario en mm/h (45). C'est cette intensité qui va permettre de calculer, en le pondérant par le coefficient de ruissèlement, le débit  $Q_i$

Son activation se fait à partir de la fenêtre carte.

En donnée d'entrée, le module produit une carte raster « Zeau » (surface piézométrique) dans le dossier de projet.

### **Critique**

Ce modèle, qui a le mérite de pouvoir produire un niveau piézométrique sur l'ensemble de la ZE, est critiquable sur deux points :

C'est un modèle à régime permanent, où l'épisode pluvieux est rentré sous forme d'une intensité, comme si il avait une durée infinie. Or l'aspect transitoire du régime hydraulique est déterminant dans la problématique des glissements de terrain.

Il suppose que seule l'infiltration de surface, étroitement liée à la topographie et sa morphologie, est responsable de la géométrie de la nappe. Ce faisant, le modèle hydrogéologique mime le modèle de drainage superficiel, ce qui est la plupart du temps en contradiction avec la réalité.

C'est pour ces raisons qu'a été développé un interfaçage avec un modèle pluie/débit de type GARDÉNIA.

#### **3.3.4. Interfaçage avec un modèle global pluie/débit de type GARDÉNIA**

GARDÉNIA est un modèle pluie/débit développé par le BRGM (Thierry 2003).

### **Conception**

Le modèle GARDÉNIA simule le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire ou au niveau aquifère en un point. Ce modèle est global, car il considère une "entrée" globale (une "lame d'eau" sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une "sortie" unique qui est, suivant le cas, le débit à l'exutoire ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. L'analogie entre l'allure exponentielle de la vidange d'un réservoir et celle du tarissement d'une rivière ou d'une source, ou encore de la baisse des niveaux d'une nappe souterraine, permet de représenter le comportement hydraulique d'un bassin versant par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres. Des fonctions de transfert non linéaires sont utilisées pour améliorer cette schématisation.



GARDÉNIA simule le cycle de l'eau (figure 42) par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade (figure 43) qui représentent globalement respectivement :

- les premières dizaines de centimètres du sol, siège des phénomènes d'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire d'écoulement rapide ;
- une ou deux zones aquifères d'écoulement souterrain lent et retardé.

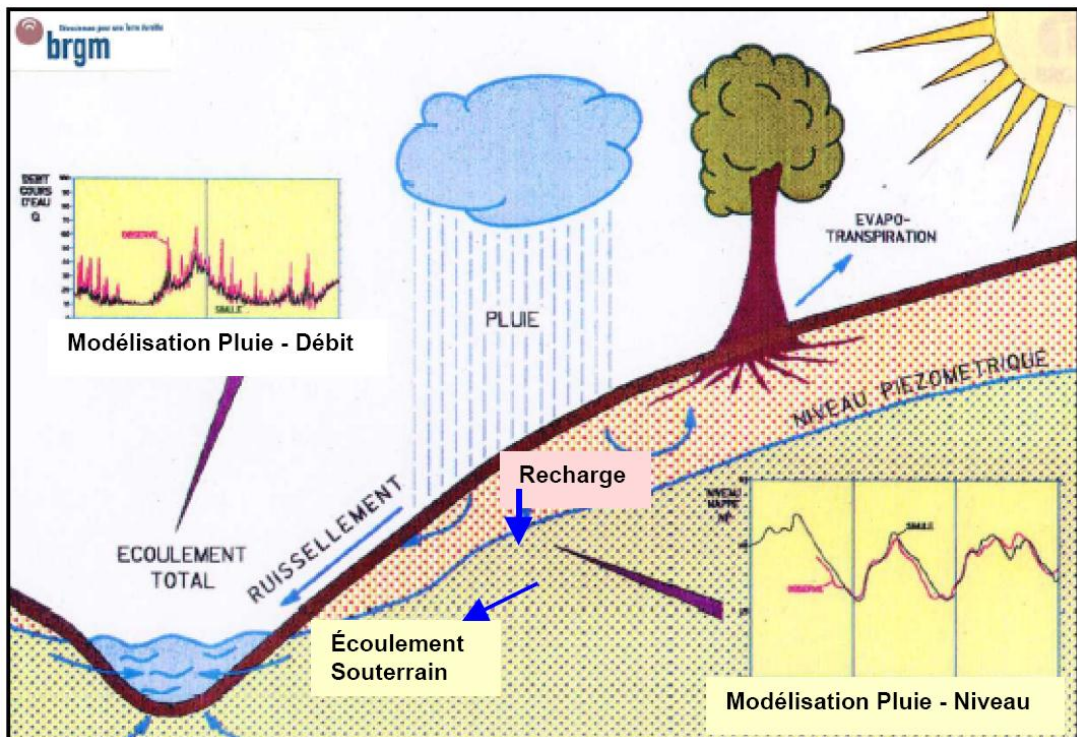


figure 42 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant.

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle de telle sorte qu'ils permettent de calculer des chroniques de débit ou de niveaux piézométriques aussi proches que possible de celles qui ont été effectivement observées.

Le calage se fait par une méthode semi-automatique. L'utilisateur fournit un jeu de paramètres initiaux et indique ceux qui doivent être optimisés selon un algorithme non-linéaire adapté de la méthode de ROSENBROCK. Le logiciel fait alors varier ces paramètres jusqu'à trouver un jeu fournissant la meilleure adéquation entre séries calculées et observées.

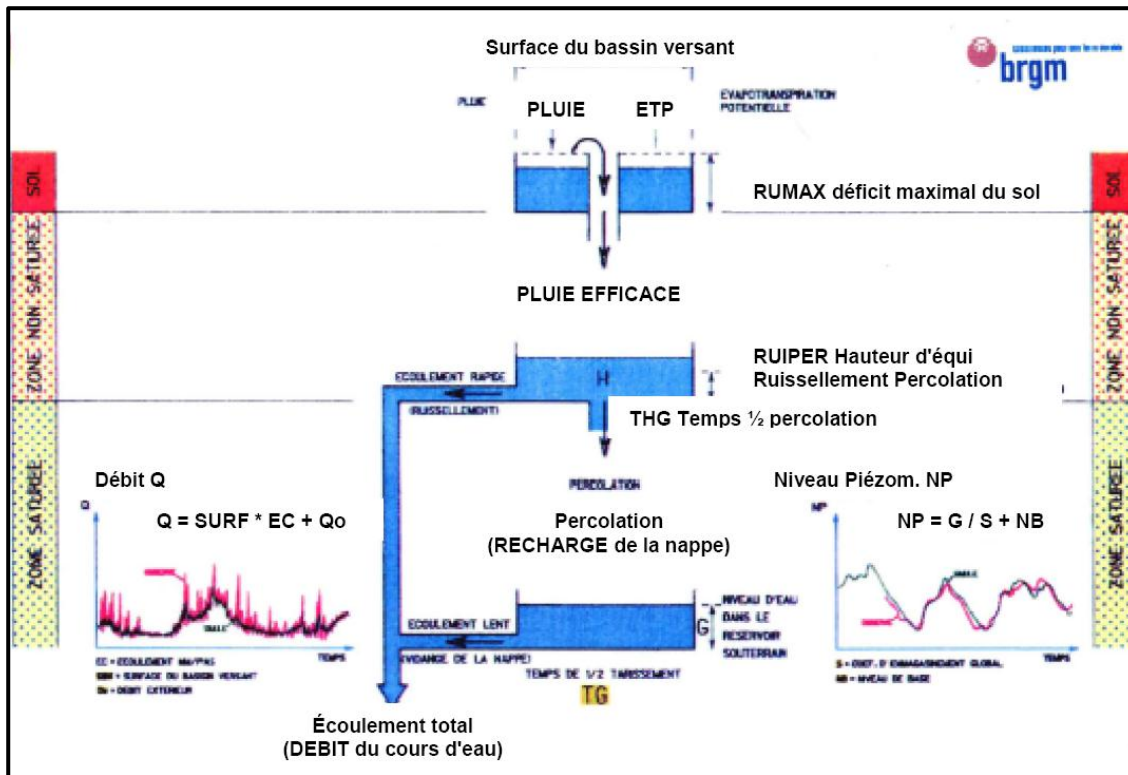


figure 43 : schéma de principe du logiciel GARDÉNIA

### Mise en œuvre dans le cadre d'ALICE®.

GARDÉNIA est principalement conçu pour traiter des problématiques de ressource en eaux (souterraine et de surface). Son utilisation dans une problématique de stabilité de pente est intéressante car :

- Contrairement au modèle Sinmap-like, ce modèle garde la « mémoire » des épisodes pluvieux antérieurs, et les différents paramètres évoluent au cours du temps.
- La quantité d'eau au niveau du réservoir de la zone non saturée (réservoir H, figure 44) est un bon indicateur du « taux de remplissage de la nappe » au sens ALICE®.

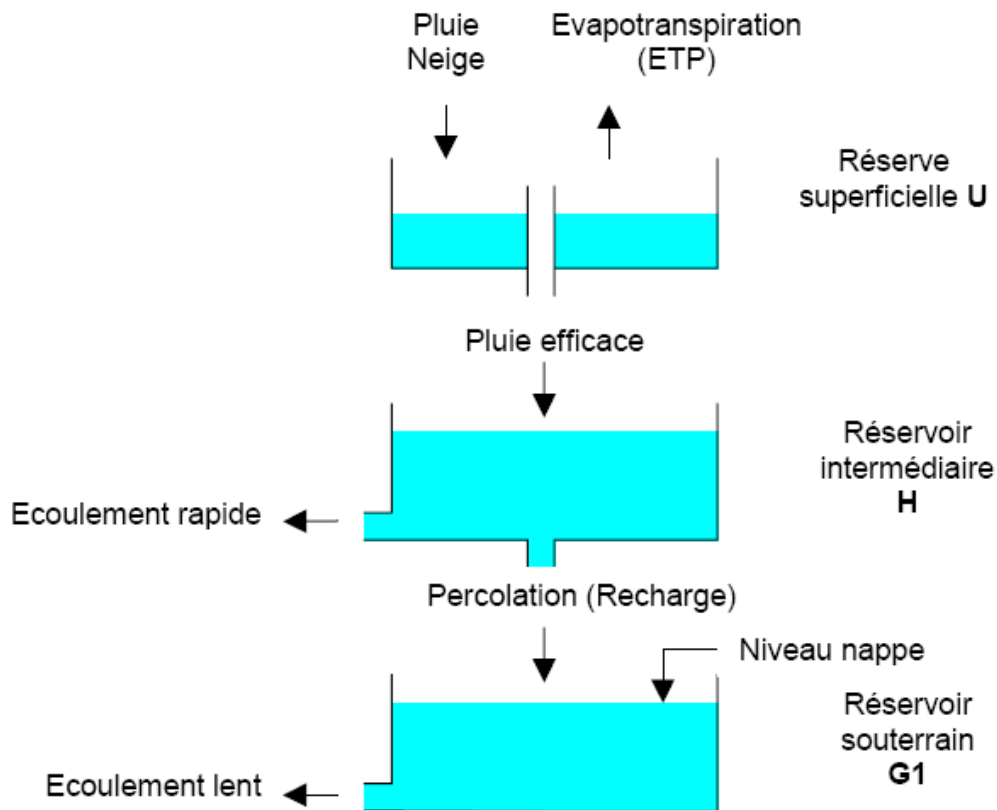


figure 44 : schéma des réservoirs GARDÉNIA

GARDÉNIA nécessite pour son calage :

- une chronique continue de précipitation (lame d'eau) ;
- une chronique continue d'évapotranspiration potentielle (ETP), qui peut être calculée à partir d'une série continue d'insolation et de température de l'air (et éventuellement d'humidité relative) ou bien obtenue auprès des services de Météorologie ;
- une chronique, pas forcément continue, de débit à l'exutoire du bassin ou de niveau en un piézomètre situé dans le bassin.

Pour son utilisation ALICE®, le plus délicat est de disposer de chroniques de débits ou de piézomètres représentatives.

Un calage avec un historique de glissements de terrain peut pallier au manque de données de débits.

Concrètement, l'utilisateur doit renseigner un niveau minimum et maximum de profondeur ou piézométrie imposée (cf. 3.3.1 et 3.3.2), et indique comme taux de remplissage celui du réservoir H.

Une version simplifiée (figure 45) de GARDÉNIA, nommée GARDÉNIA-LT est associée en tant que projet distinct à ALICE®.

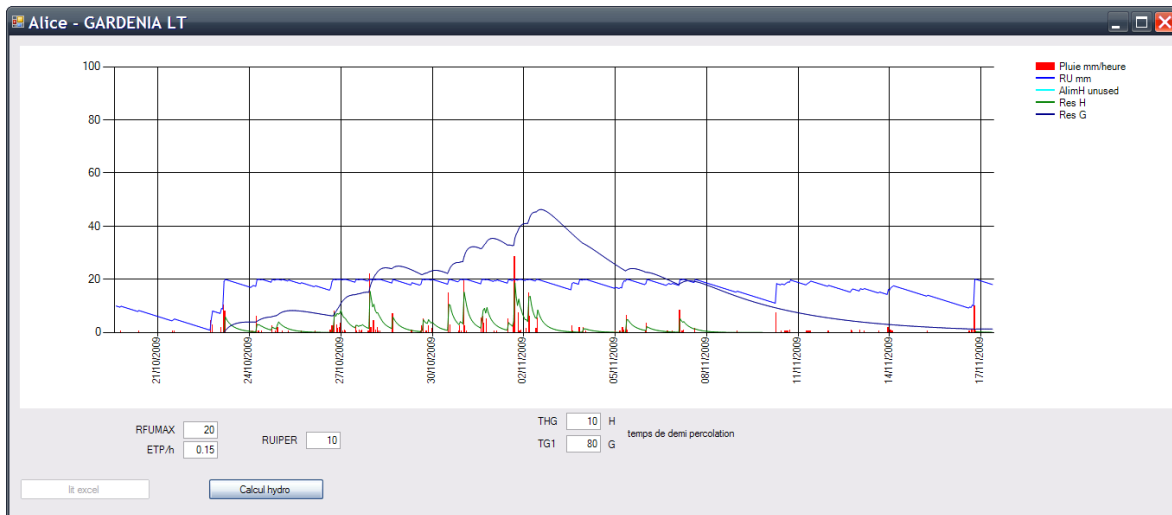


figure 45 : fenêtre GARDÉNIA LT d'ALICE®

### Critique

- Dans le cas d'utilisation de GARDÉNIA, c'est à l'utilisateur de définir les niveaux mini et maxi de la nappe.
- L'utilisation de ce modèle nécessite un minimum de chroniques de données climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques, complétés par un historique bien daté des glissements de la ZE.

### 3.4. GENERATION DES PROFILS TOPOGRAPHIQUES

ALICE® calcule en tous points de la ZE les facteurs de sécurité et leur distribution le long de profils topographiques. S'il est possible de saisir la trace d'un profil sur la carte à l'aide des outils MapInfo, il serait fastidieux de vouloir couvrir l'ensemble de la ZE de cette manière.

En conséquence, un module spécifique est accessible par le biais d'un bouton de la carte ALICE® (figure 40). Il va calculer un ensemble de profils, espacé d'une distance

égale à la taille de la maille du MNT, sur l'ensemble de la ZE. La trace de ces profils est visible sur la figure 40.

Pour cela, ce module utilise comme données d'entrée (figure 39, 4 à 7)

- MNT
- Pente
- Direction de pente
- Accumulation

Les deux dernières cartes raster sont calculées grâce aux fonctions hydrologiques de l'extension Spatial Analyst du logiciel ARCGIS (cf. Annexe 2). La pente est également calculée avec ARCGIS.

Un autre paramètre contrôle également la génération des profils. Il s'agit de la surface drainée minimale (figure 39), exprimé en nombre de mailles du MNT, pour que la maille soit considérée comme appartenant à un drain. Un profil part d'une crête ou d'un point haut (mailles pour lesquelles la surface drainée est nulle), et se termine au niveau d'un drain.

Le résultat est enregistré dans les deux fichiers « profils.mif » et « profils.mid » (cf.3.1.3 **Formats de fichier**).

## Calculs de stabilité

### 3.5. PARAMETRAGE PAR DEFAUT DES SIMULATIONS

Une série de paramètres concernant :

- La géométrie des profils topographiques
- La géométrie de la surface de rupture
- Le fonctionnement du modèle de stabilité

ont des valeurs par défaut qui sont saisies dans la fenêtre de données d'ALICE® (figure 39).

Il s'agit :

Géométrie :

- Du pas de calcul du profil (11), en mètres. deux points du profil. Elle peut (et souvent doit) être inférieure à la taille de la maille du MNT, pour notamment éviter des pseudos – ruptures de pente d'un maille à l'autre.
- Du pas X entre deux glissements (12), en mètres. C'est la valeur de distance horizontale qui sépare deux glissements le long du profil, c'est-à-dire là où sera calculé le FS et sa distribution. Plus cette distance sera faible, plus les résultats seront précis, mais plus le temps de calcul sera long.
- La taille du glissement (13). Un calcul ALICE® se fait pour une taille de glissements donnée, qui résulte de l'analyse typologique des glissements potentiels et passés de la ZE. Si plusieurs types et donc plusieurs tailles doivent être étudiés, plusieurs calculs ALICE® doivent être lancés.
- Profondeurs mini (14), maxi (15) et Pas entre profondeur (16) sont des valeurs en mètres, utilisées pour définir les cercles de rupture, lorsque ce mode de calcul est activé.
- Angle de raccord pour glissement plan (17), en degrés. C'est l'angle que fait le débouché de la rupture à l'amont et à l'aval du glissement, avec la pente, lorsque le mode de calcul par glissement plan est activé.

Paramètres du calcul de stabilité :

- Nombre de tranches (18). La masse potentiellement instable est découpée en tranche verticale d'égale largeur. Plus elles sont nombreuses, plus le calcul est précis, mais plus il est long.
- Précision (19), nb max itérations (20). Pour atteindre une précision donnée du calcul de FS, le modèle va itérer un certain nombre de fois. La méthode de Morgenstein et Price converge dans ALICE® majorité des situations très vite. Si ce n'est pas le cas en moins d'itérations que le nombre maximum fixé, la méthode renvoi une valeur indéterminée (qui est traitée par ALICE®).
- Gamma eau (21)  $\text{kN/m}^3$ . C'est le poids volumique de l'eau.
- K sismique (22), en g. C'est le coefficient de charge sismique, en général égal à une demi- valeur de Peek Ground Acceleration (PGA).

- Base (0 : cercle – n° interface : plan) (23): ce nombre entier caractérise le type par défaut de géométrie de rupture. La valeur 0 impose un calcul par cercles de rupture, utilisant les paramètres 14, 15 et 16. Dans le cas d'un glissement plan, c'est l'interface entre deux couches qui délimite la base du glissement. Et c'est le n° d'interface qui est renseigné.
- Pente minimale pour le calcul de FS (25) en degrés. Afin de réduire les temps de calculs, l'utilisateur peut indiquer la pente entre le point haute et bas du glissement en dessous de laquelle le calcul de FS n'est pas réalisé.

Toutes ces valeurs sont des valeurs par défaut, et peuvent être modifiées au moment du calcul, comme cela est décrit au chapitre suivant

### 3.6. CALCUL LE LONG D'UN PROFIL

Les calculs de stabilité le long d'un profil sont très utiles en phase de constitution du jeu de données nécessaires au calcul d'une carte ALICE®. Ils permettent également de retro-analyser des glissements anciens, et ainsi d'ajuster les caractéristiques mécaniques des couches, au-delà des essais de laboratoire ou de l'expertise.

Pour permettre ce type de calculs, un profil doit être déterminé.

Il faut sélectionner un profil existant avec l'outil (1) de la figure 46.



figure 46 : choix d'un profil pour des calculs de stabilité

On peut éventuellement en saisir un au préalable avec l'outil (2). Une fois le profil sélectionné, l'appui sur le bouton (3) affiche la fenêtre de calcul le long d'un profil (figure 47).

Cette figure montre un profil avec un calcul de glissement circulaire.

Le bouton (1) permet de tracer le cercle de centre  $X_c$ ,  $Y_c$  et de rayon 60.

Le bouton (2) permet de calculer le facteur de sécurité FS médian qui s'affiche en (4).

Le bouton (3) permet de calculer la distribution pour les NbMC tirages Monte-Carlo. La probabilité de FS <1 s'affiche en (5), la forme de la distribution en (6).

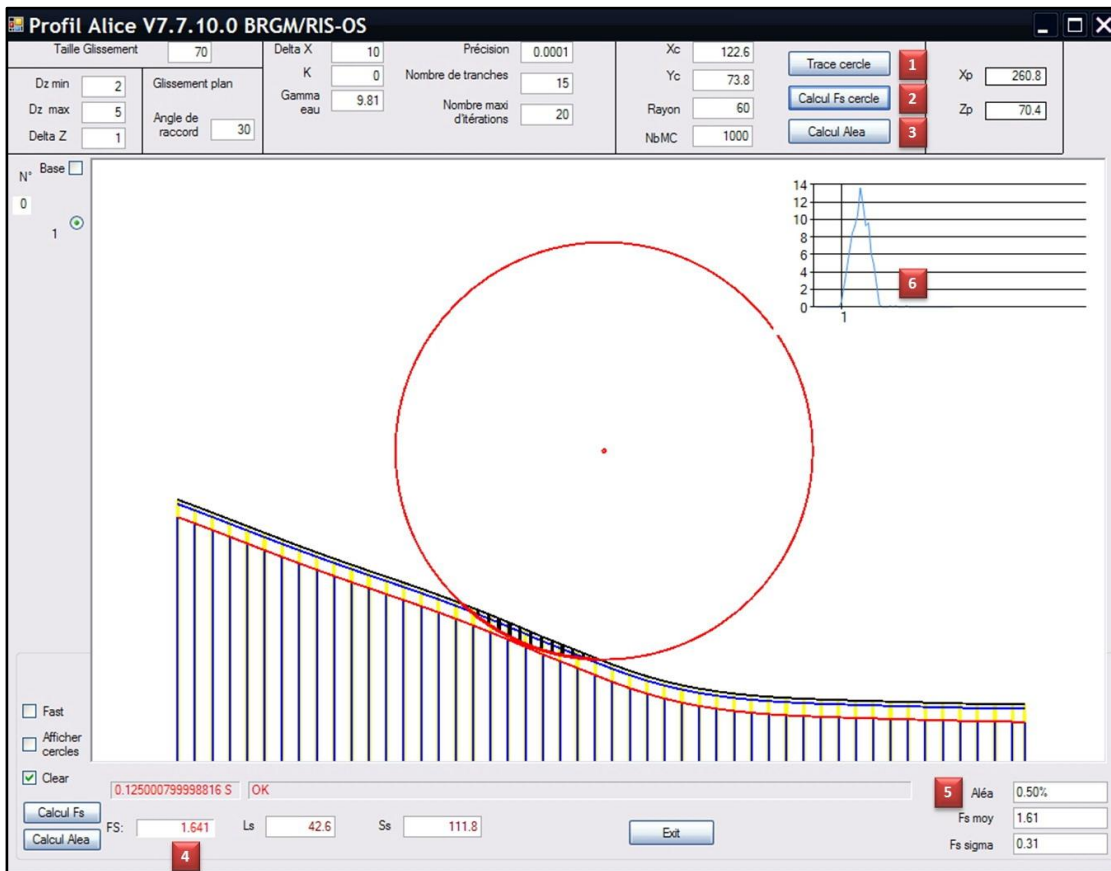


figure 47 : fenêtre Profil ALICE® - calcul en un point

La figure 48 illustre un calcul avec des glissements plan (« base » coché en (1)), tout le long du profil. Lorsqu'un calcul de FS (2) est demandé, les glissements potentiels sont calculés tout le long du profil, à intervalle régulier (deltaX). La courbe d'évolution du facteur de sécurité (4) s'affiche. L'axe vertical est gradué de manière non linéaire. En partant du bas, les lignes horizontales corresponde respectivement à FS=0, FS=1, FS=2, FS= 10 et FS=100.

La géométrie la moins stable est affichée, avec le facteur de sécurité médian.



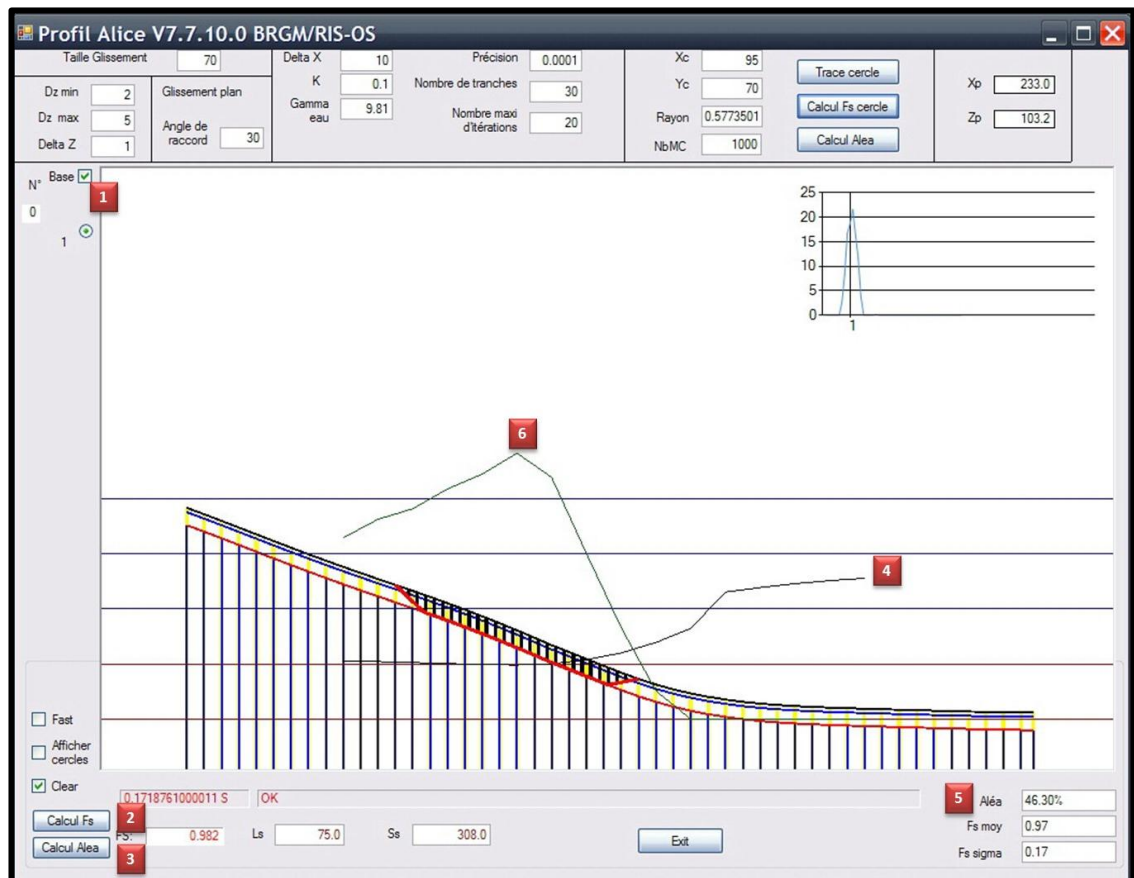


figure 48 : fenêtre Profil ALICE® - calcul le long du profil

Lorsqu'un calcul d'aléa (3) est demandé, la distribution des facteurs de sécurité, et la probabilité de  $FS < 1$  sont également calculés pour tous les glissements potentiels le long du profil. La courbe d'évolution de la probabilité (6) s'affiche. L'axe vertical est gradué de manière linéaire (sommet de la fenêtre à 100%).

### 3.7. CALCUL D'UNE CARTE

Une fois les paramètres du modèle callés, il est possible de calculer une carte. Pour cela ALICE® :

- calcule chaque profil comme décrit au chapitre précédent,
- reporte les résultats sur une carte raster.

Compte tenu de la proximité des profils, mais aussi du fait que le pas de calcul des glissements le long du profil peut-être inférieur à la taille de la maille du MNT, plusieurs résultats peuvent être calculés pour une même maille. Dans ce cas le FS le plus faible, et l'aléa (probabilité  $FS < 1$ ) le plus fort est conservé.

Le calcul d'une carte se fait à partir de la fenêtre carte, par appuis sur le bouton « tous les profils » (figure 49).

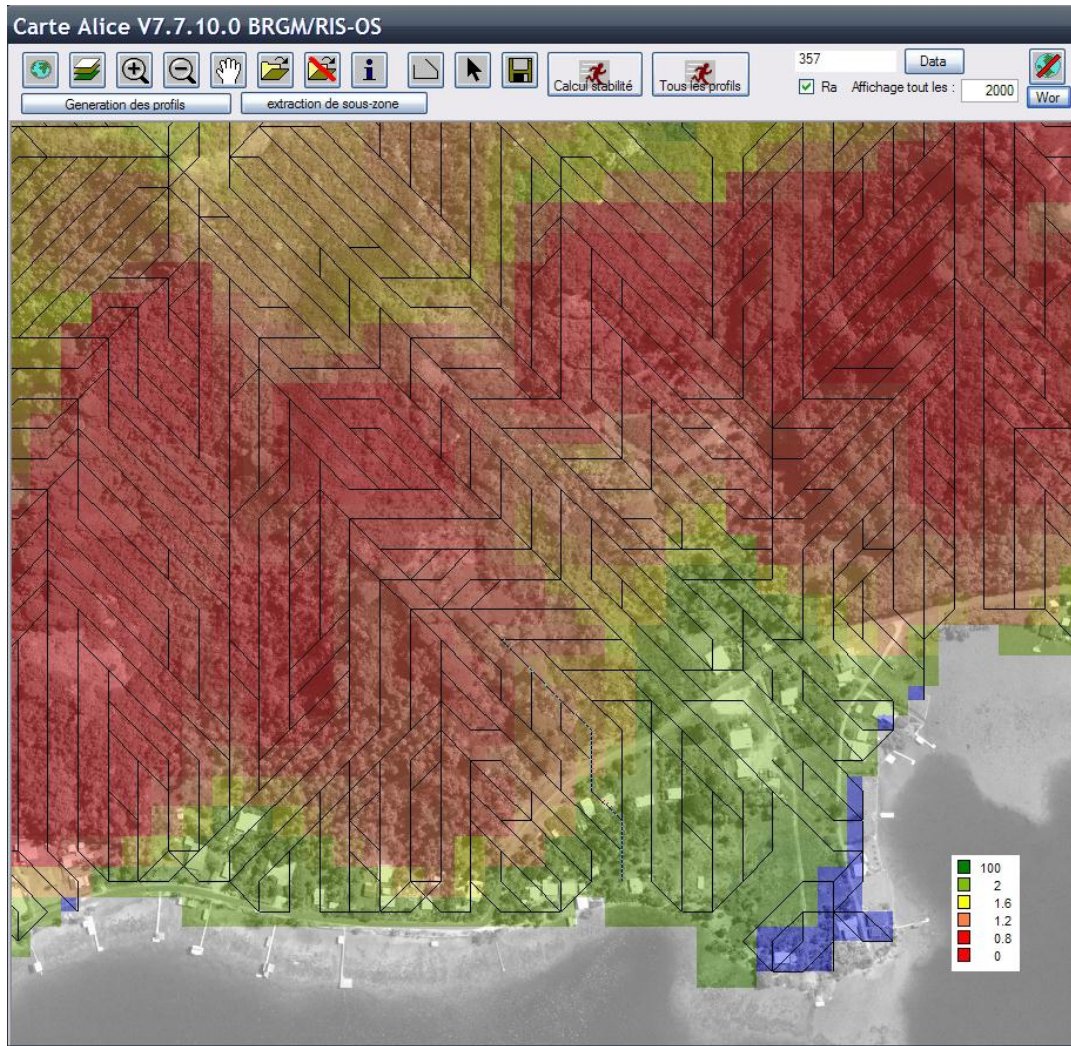


figure 49 : Carte ALICE® des facteurs de sécurité

L'utilisateur est invité ensuite à saisir le nombre de tirages Monte-Carlo pour le calcul. Pour calculer une carte de facteur de sécurité (figure 49) il faut indiquer le chiffre 1, dans tous les autres cas c'est la carte d'aléa (figure 50) qui est calculée.

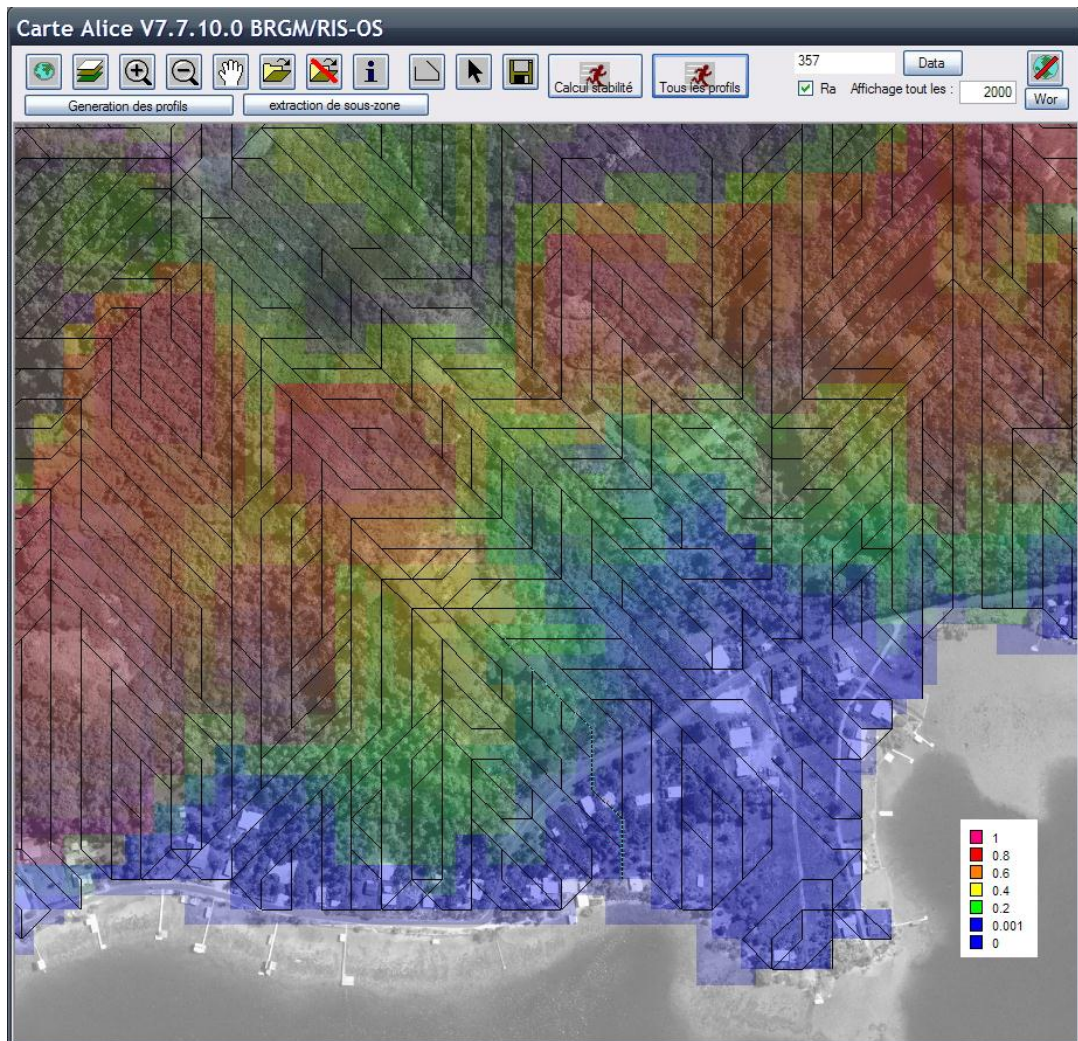


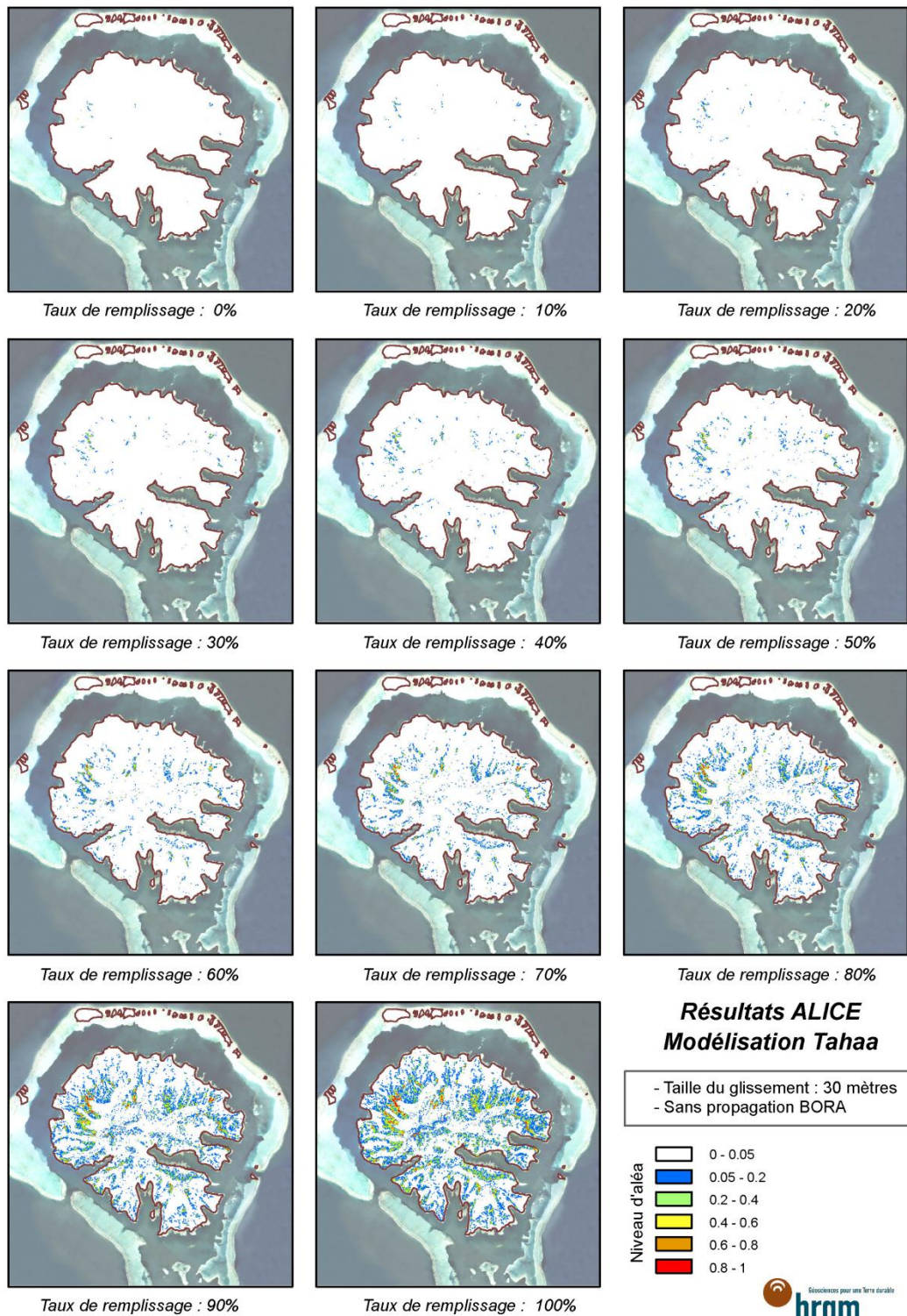
figure 50 : Carte ALICE® de l'aléa (probabilité  $FS < 1$ )

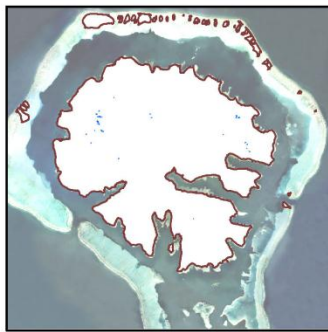


## **Annexe 2**

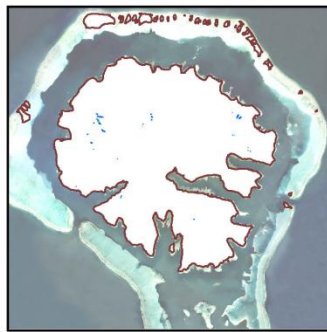
### **Résultat ALICE, Sans propagation**



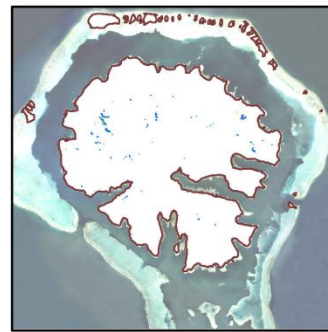




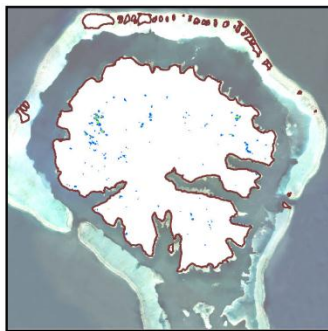
Taux de remplissage : 0%



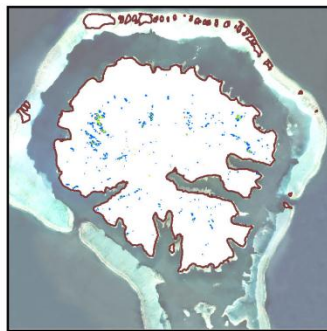
Taux de remplissage : 10%



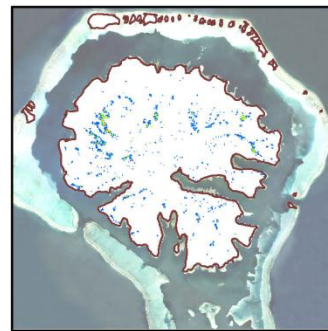
Taux de remplissage : 20%



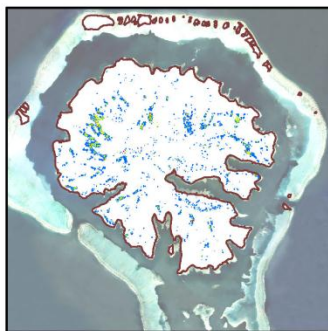
Taux de remplissage : 30%



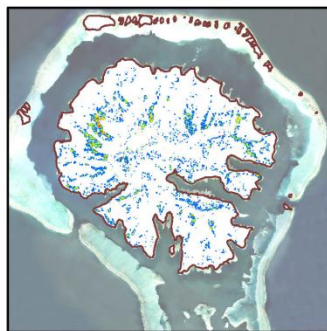
Taux de remplissage : 40%



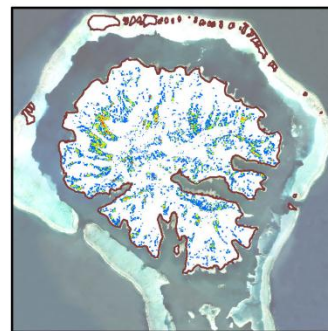
Taux de remplissage : 50%



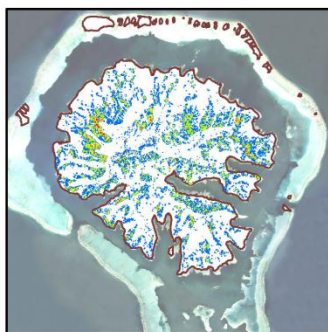
Taux de remplissage : 60%



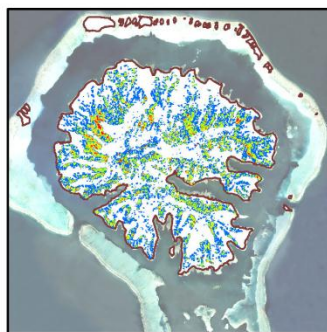
Taux de remplissage : 70%



Taux de remplissage : 80%



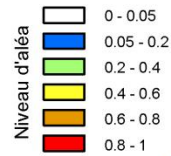
Taux de remplissage : 90%



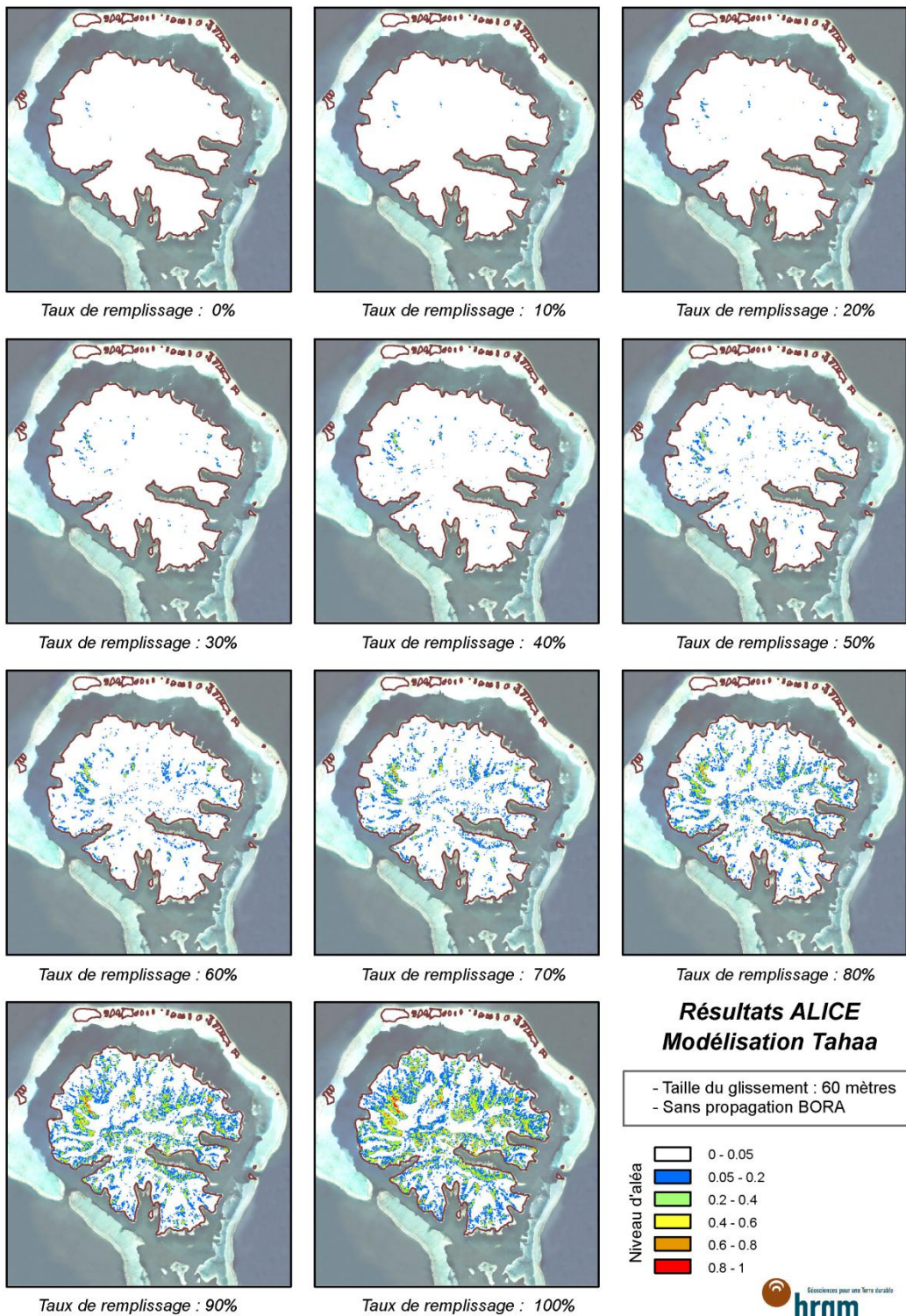
Taux de remplissage : 100%

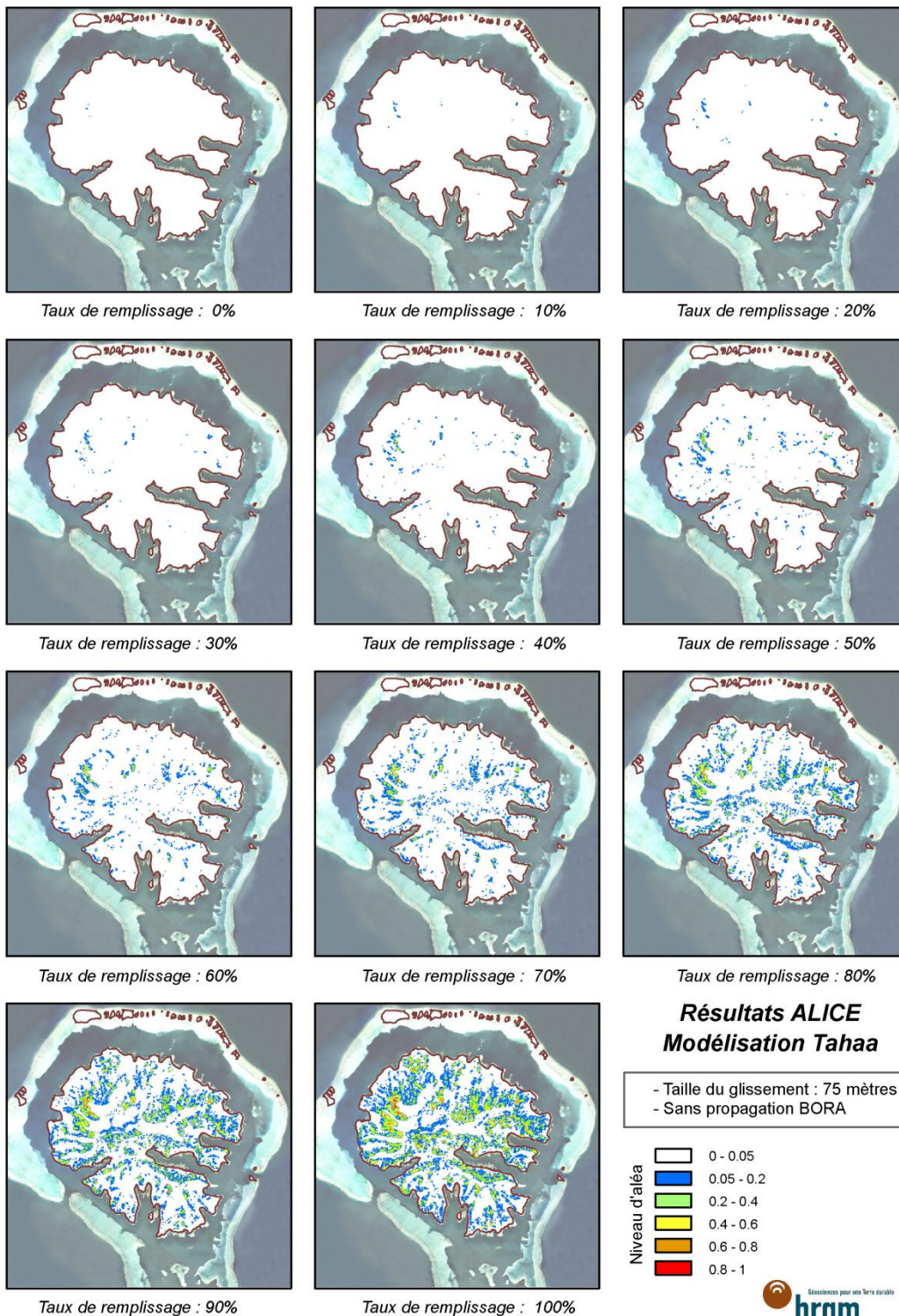
**Résultats ALICE**  
**Modélisation Tahaa**

- Taille du glissement : 45 mètres  
- Sans propagation BORA





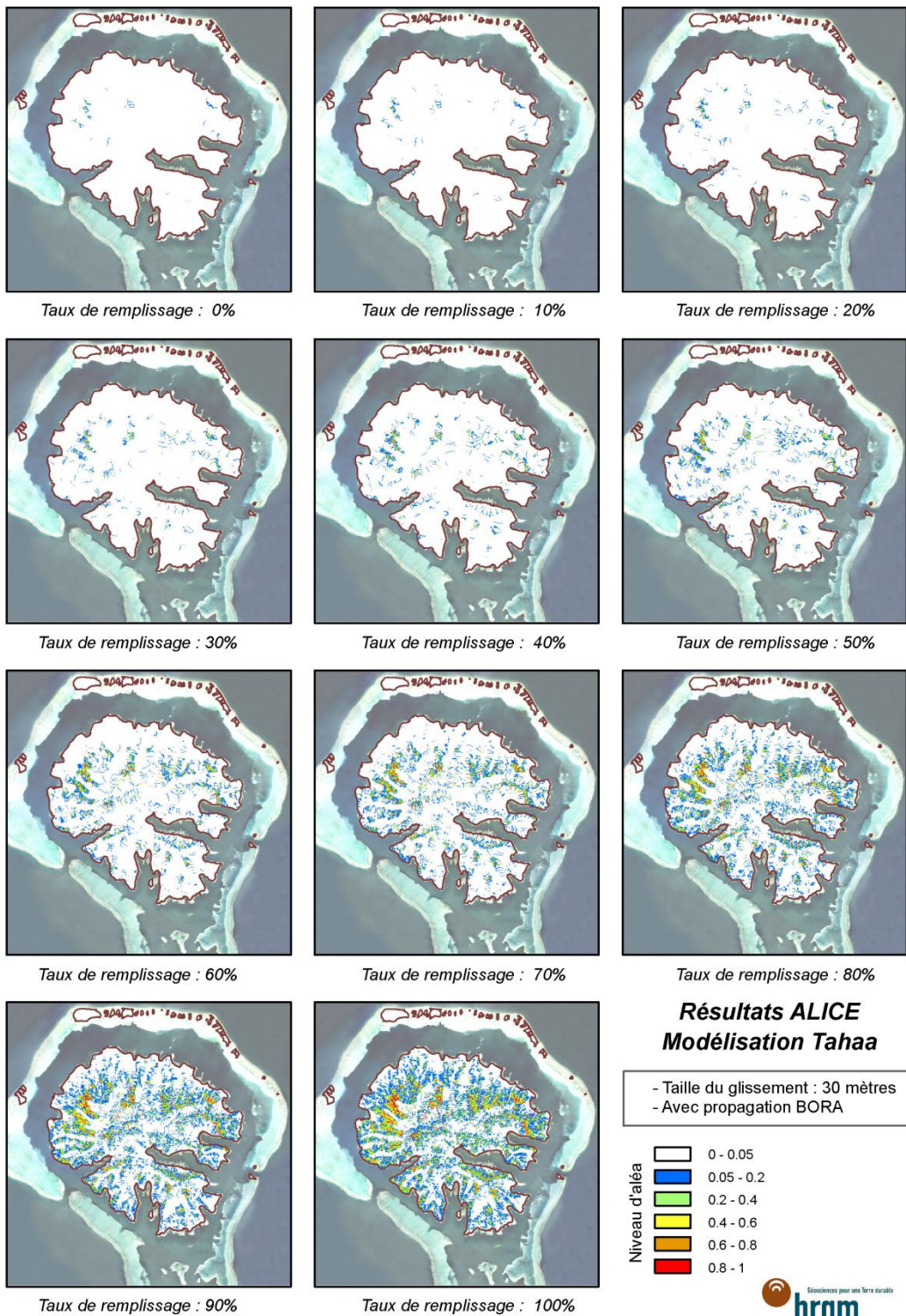


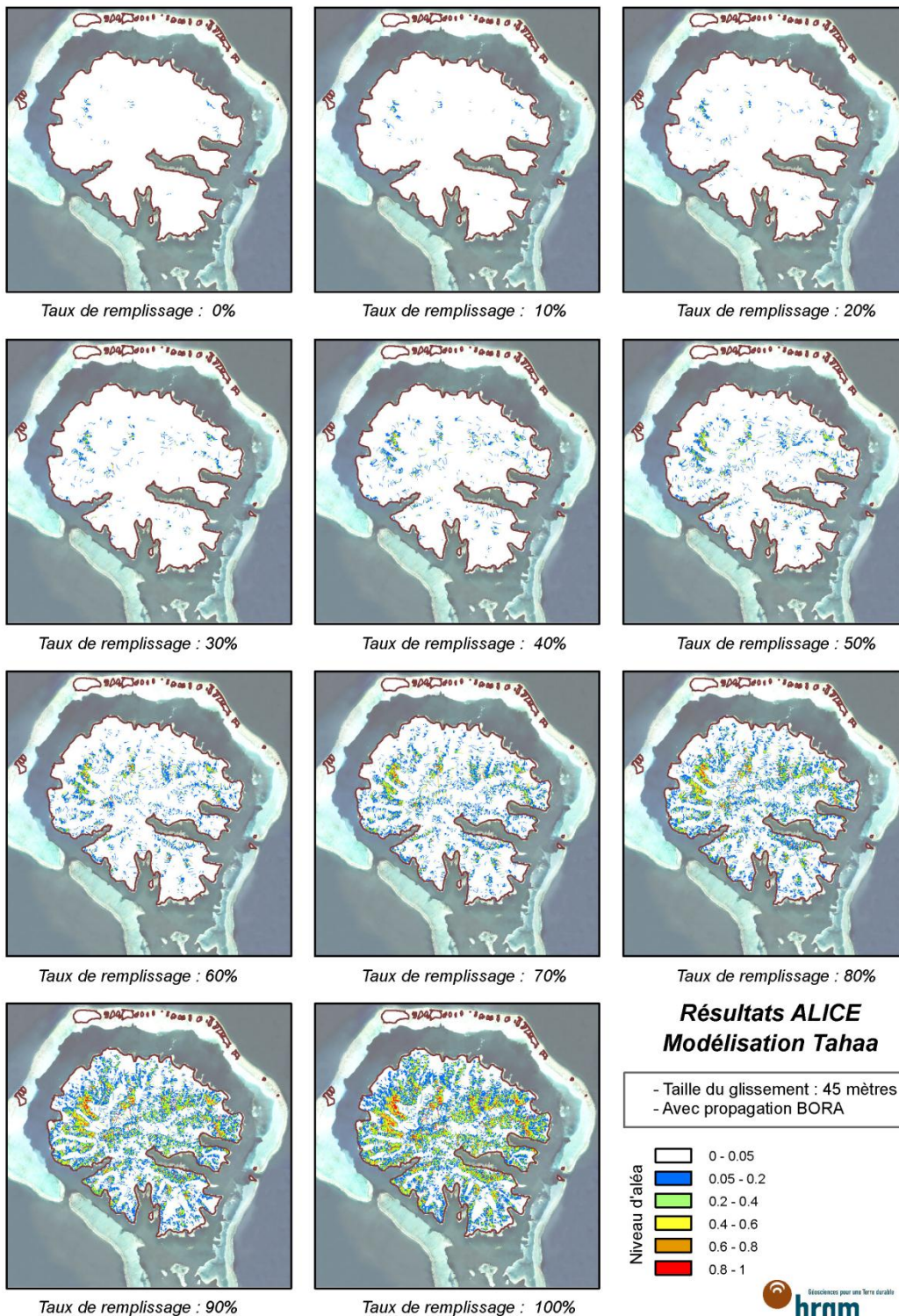


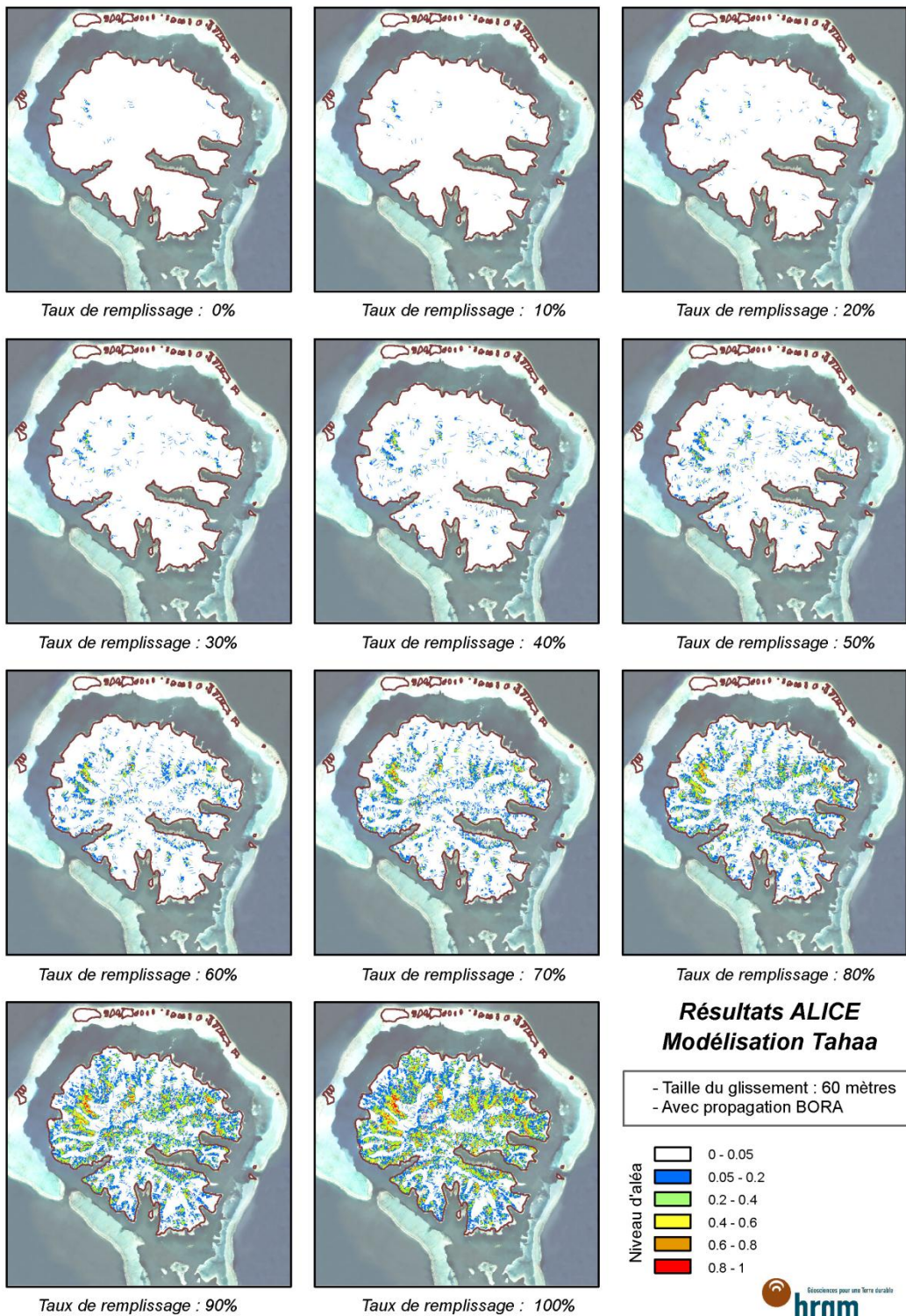
## **Annexe 3**

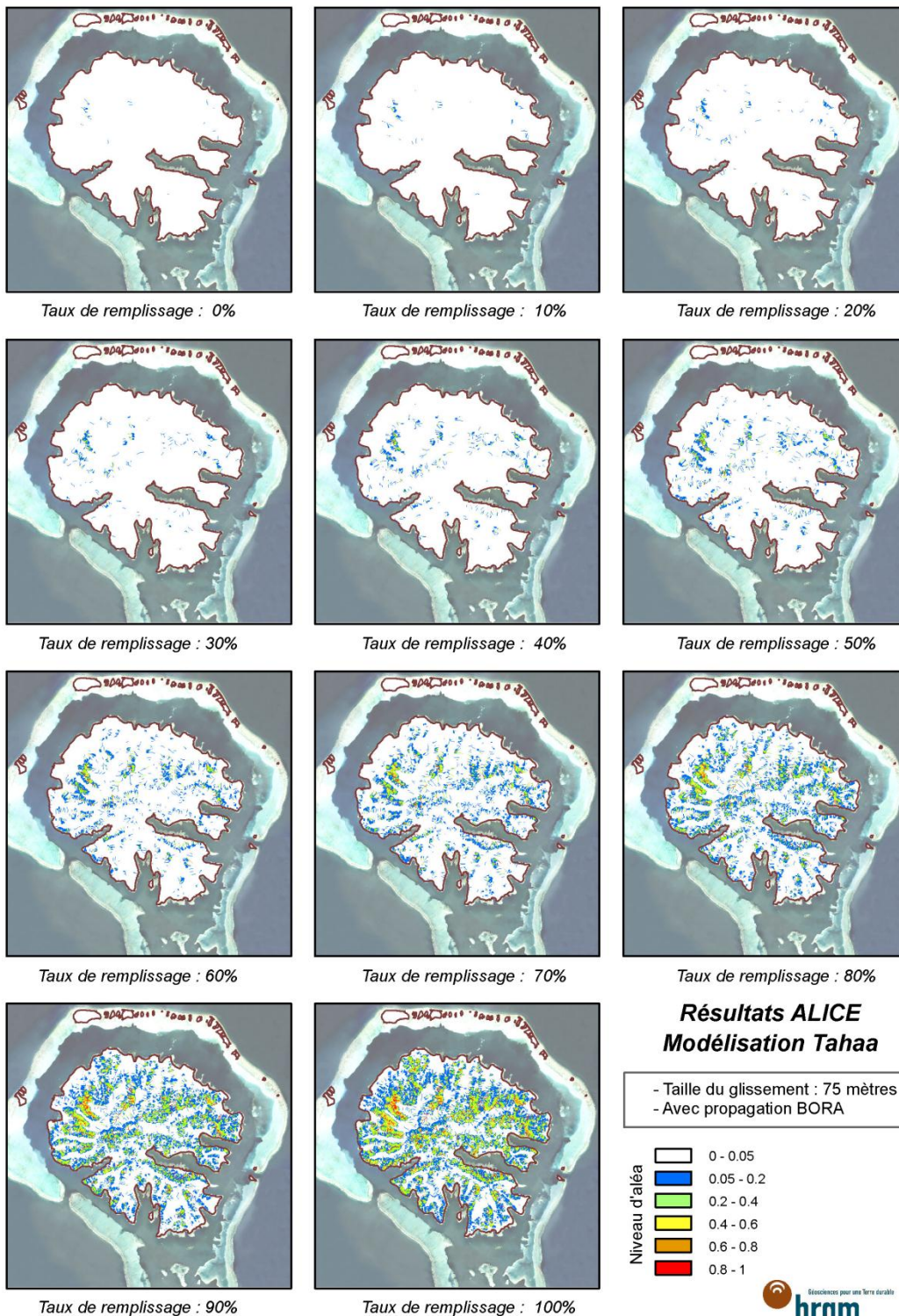
### **Résultat ALICE, Avec propagation**









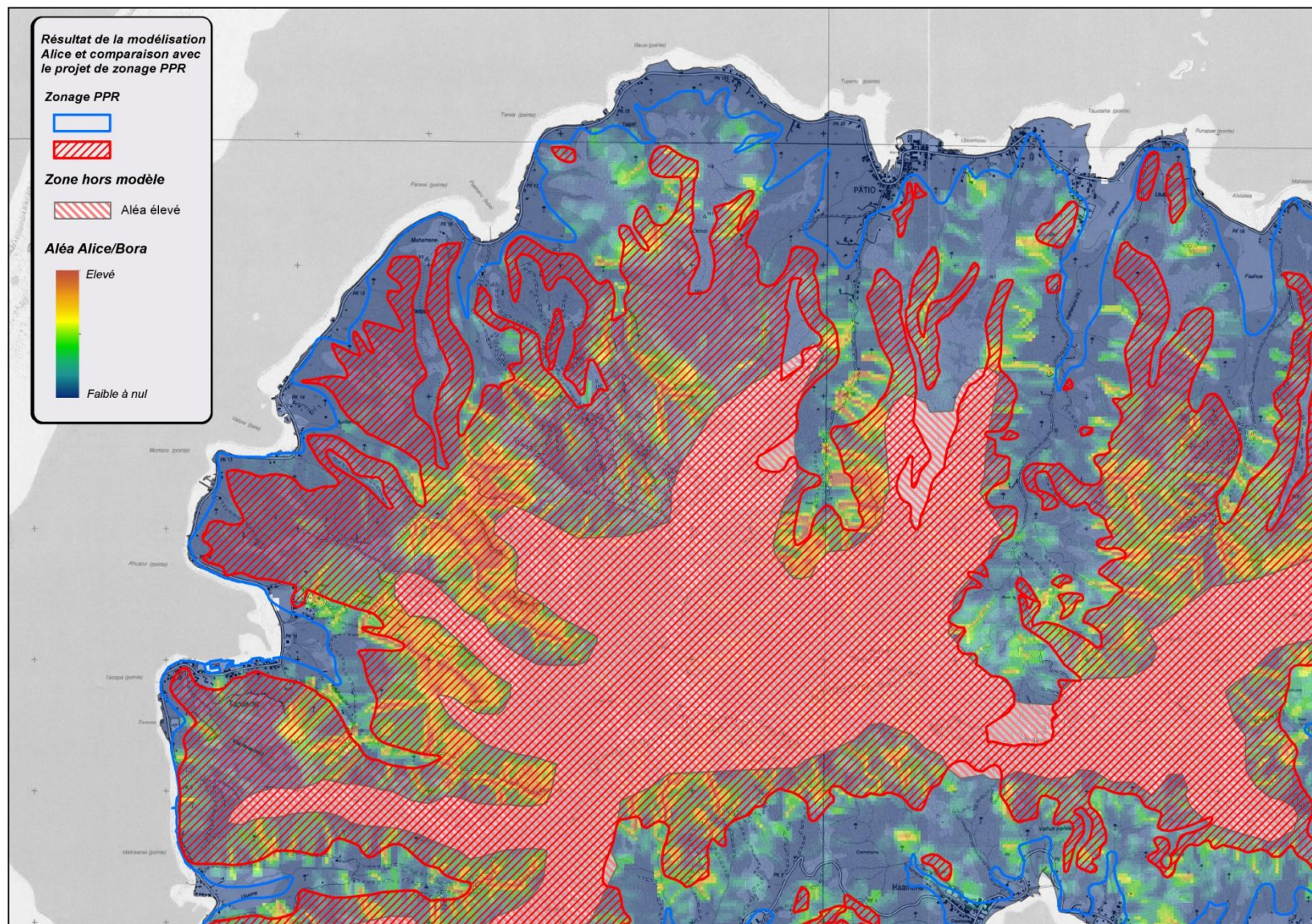




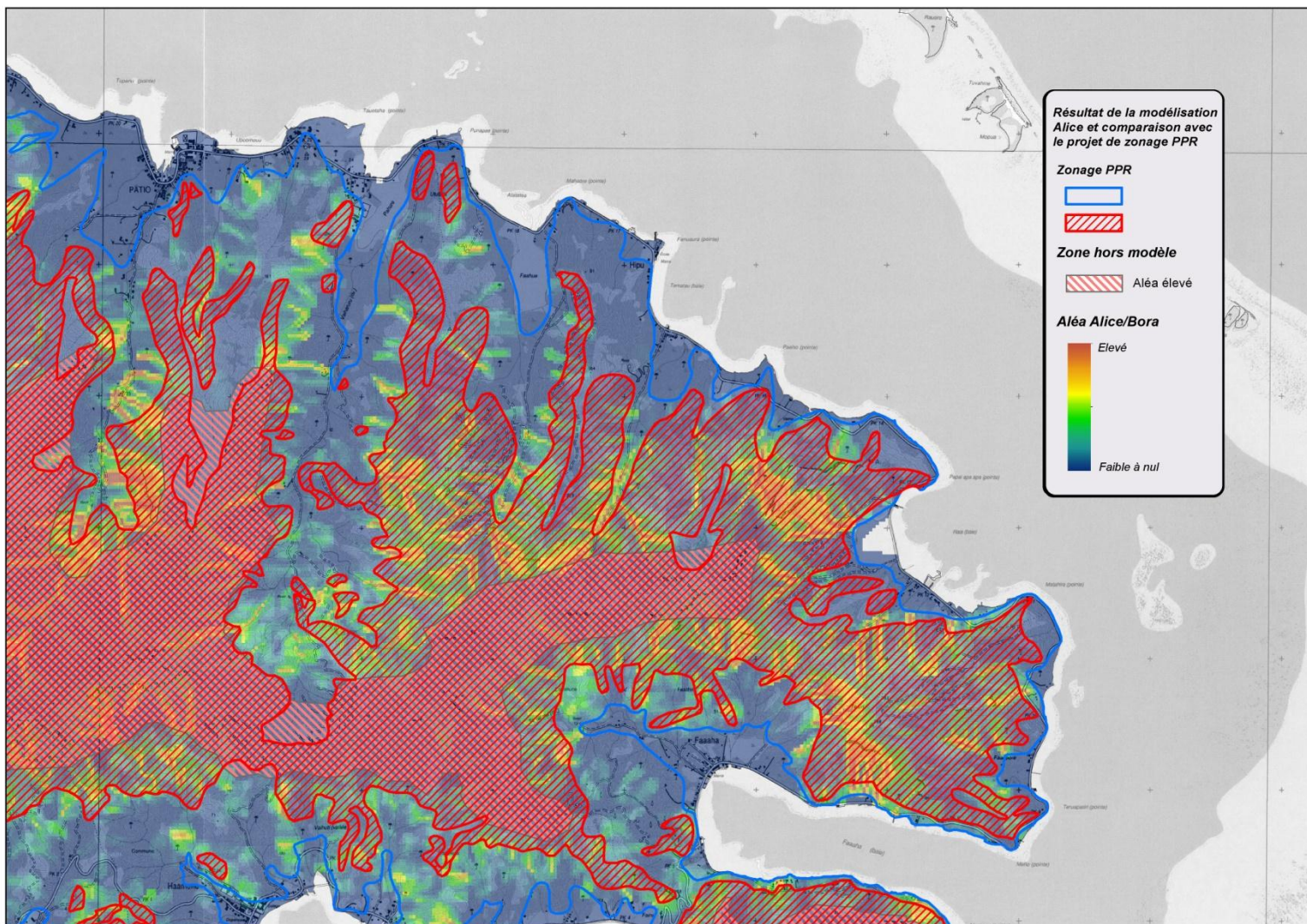
## **Annexe 4**

### **Résultat de la modélisation ALICE et comparaison avec le projet de zonage PPR**

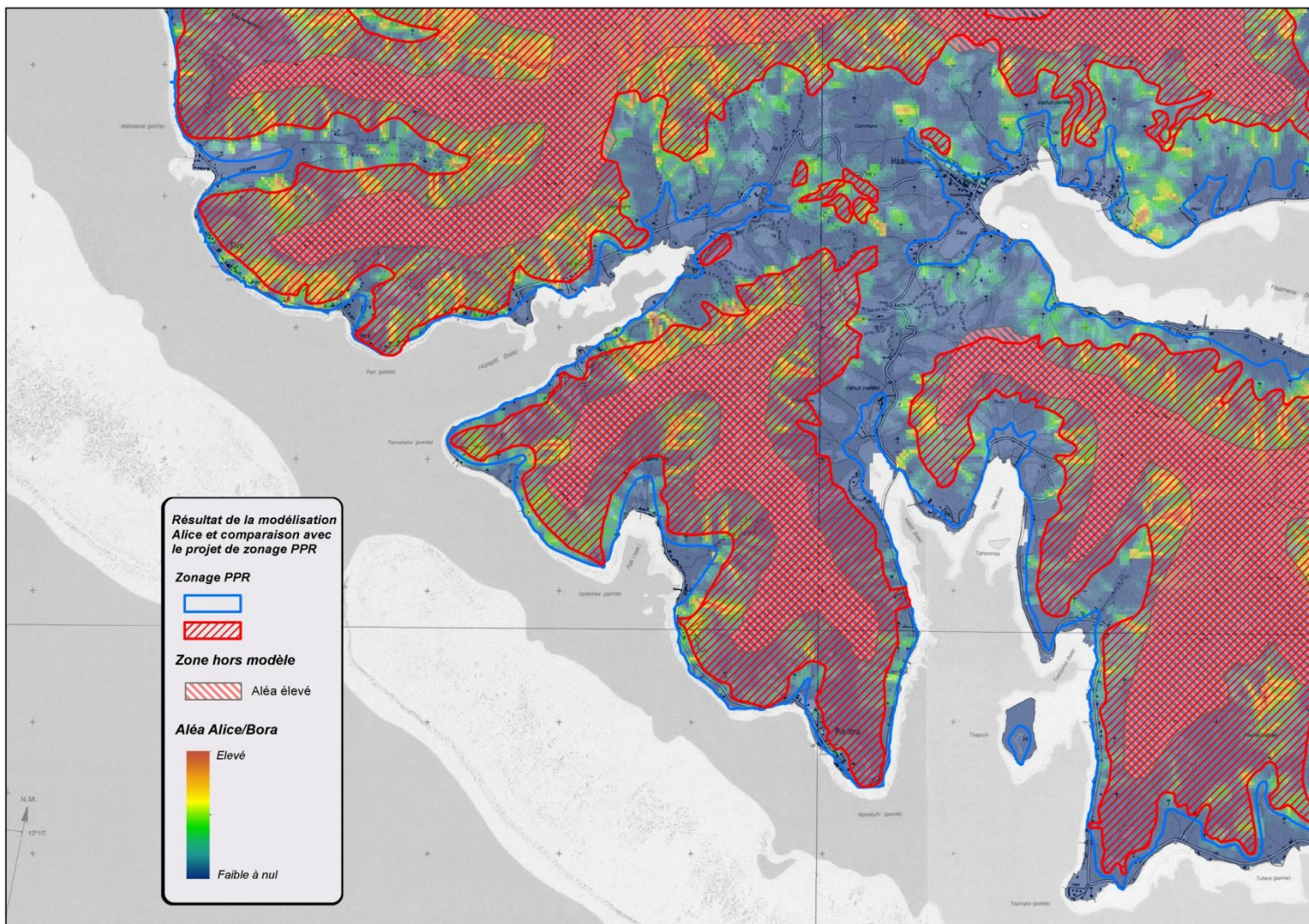






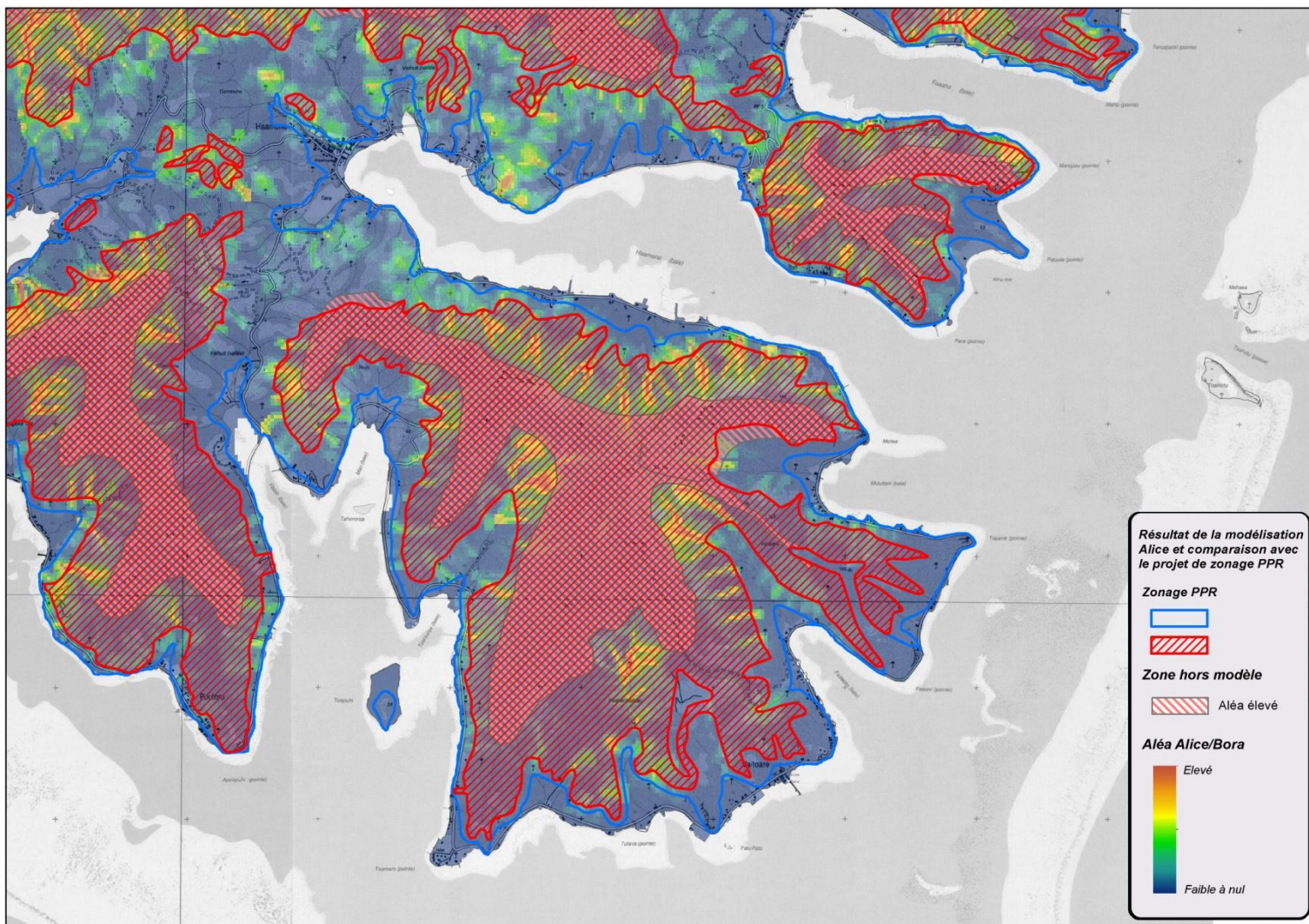


















**Centre scientifique et technique  
Service DRP**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34