

Document public

Rapport d'expertise :

Surveillance de l'évolution des deux glissements de terrain à l'Est de Grand Ilet, Ravine Roche à Jacquot Bilan du suivi réalisé de 2015 à 2019

BRGM/RP- 69492-FR
Avril 2020

Cadre de l'expertise : Appui à la DEAL Réunion dans le cadre de la convention relative au suivi des glissements de terrain impactant le domaine public fluvial du 31/08/2017

Localisation géographique du sujet de l'expertise : Ravine Roche à Jacquot – Grand Ilet - Salazie

Auteurs BRGM : LE MOIGNE B., RAULT C.

Demandeur : DEAL / SEB / UPEMA – La Réunion

1.89 3740.46 -625.5



Géosciences pour une Terre durable


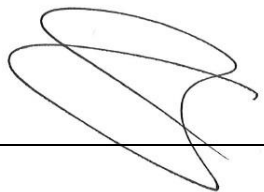
brgm

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM. Il constitue un tout indissociable et complet ; une exploitation partielle ou sortie du contexte particulier de l'expertise n'engage pas la responsabilité du BRGM.

La diffusion des rapports publics est soumise aux conditions de communicabilité des documents, définie en accord avec le demandeur. Aucune diffusion du présent document vers des tiers identifiés ne sera volontairement engagée par le BRGM sans notification explicite du demandeur.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Vérificateur : Y. THIERY		Date : 14/04/2020
Approbateur :		Date : 15/04/2020
Nom : K. SAMYN		Directeur régional - La Réunion

Mots-clés : expertise, risques naturels, escarpement, glissement de terrain, chute de blocs, mouvements de terrain, éboulement, Salazie, Grand Ilet

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

LE MOIGNE B., RAULT C. (2019) Surveillance de l'évolution du glissement de Ravine Roche à Jacquot d'août 2015 à août 2019. Rapport BRGM/RP- 69492-FR. 36 p.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Cadre et objectifs	7
2. Rappel des faits et des premiers constats suite aux glissements.....	8
2.1. GLISSEMENT DE RAVINE ROCHE A JACQUOT AVAL.....	8
2.1.1 Caractéristiques du glissement : constats initiaux.....	8
2.1.2 Bilans dressés suite aux différents diagnostics concernant l'évolution du glissement et les aléas résiduels.....	11
2.2. GLISSEMENT DU SECTEUR NOURRY.....	12
2.2.1 Caractéristiques du glissement : constats initiaux.....	12
2.2.2 Bilans dressés suite aux différents diagnostics concernant l'évolution du glissement et les aléas résiduels.....	14
3. Précision de la géométrie des glissements et suivi de leurs évolutions depuis 2014 à partir des données de topographie et d'imagerie aérienne nouvelles	14
3.1. DONNEES PHOTOGRAPHIQUES ET TOPOGRAPHIQUES DISPONIBLES POUR L'ANALYSE	14
3.2. PRECISION DE LA GEOMETRIE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN PAR COMPARAISON DES MNT DE 2008 ET DE 2015.....	16
3.2.1 Glissement de Ravine Roche à Jacquot aval.....	16
3.2.2 Glissement du secteur Nourry	18
3.3. ANALYSE DE L'EVOLUTION TOPOGRAPHIQUE DES GLISSEMENTS ET DES PRODUITS DE DESTABILISATION DEPUIS 2014	19
3.3.1 Glissement de Ravine Roche à Jacquot aval.....	19
3.3.2 Glissement secteur Nourry	25
3.3.3 Mobilité sédimentaire dans la Ravine Roche à Jacquot.....	29
4. Evaluation des risques résiduels et recommandations	31
4.1. GLISSEMENT DE RAVINE ROCHE A JACQUOT AVAL.....	31
4.2. GLISSEMENT DU SECTEUR NOURRY.....	31
5. Retours d'expérience sur la réalisation de campagne de photogrammétrie PIMANT pour le suivi des glissements de terrain	33
6. Conclusions.....	34

Liste des illustrations

Figure 1 : Localisation de l'emprise du glissement de terrain de Ravine Roche à Jacquot aval (source : Géoportail)	9
Figure 2 : Géologie du glissement de la Ravine Roche à Jacquot aval.....	10
Figure 3 : Localisation de l'emprise du glissement du secteur Nourry (source : Géoportail ; Ortho ©IGN 2017)	12
Figure 4 : Vue sur le glissement de terrain Nourry (10/01/2014)	13
Figure 5 : Localisation des points de contrôle utilisés pour le géo référencement du levé photogrammétrie PIMANT réalisé en Aout 2019.	16

Suivi des glissements de terrain de la ravine Roche à Jacquot entre 2015 et 2019

Figure 6 : Représentation de la différence d'altitude entre le MNT de 2015 (Sintégra) et celui de 2008 (IGN) drapé sur le MNT de 2008 au niveau du glissement de ravine Roche à Jacquot aval. A zone d'ablation, B. Comblement d'une dépression en amont des éperons rocheux, C. Disparition d'éperons rocheux, D. Zone d'accumulation, E. Comblement du lit de la rivière de la Ravine Roche à Jacquot.	18
Figure 7 : Représentation de la différence d'altitude entre le MNT de 2015 (Sintégra) et celui de 2008 (IGN) drapé sur le MNT issue de donnée de 2008 au niveau du glissement Nourry. A : zone d'ablation et B : Zone d'accumulation.	19
Figure 8 : Comparaison diachronique des ORTHO® IGN de 2011, 2017, 2018	20
Figure 9 : Comparaison diachronique d'images satellites des dates suivante 26/09/2013, 19/04/2014, 25/03/2015, 30/06/2016, 22/05/2017, 07/05/2018 et 01/06/2019) (source : ©GoogleEarth).....	21
Figure 10. Suivi de l'évolution de l'Est de Ravine Roche à Jacquot et du glissement éponyme entre 2015 et 2017 et 2015 et 2019 à partir des MNS 2015, 2017 et 2019 (voir tableau 2). L'enveloppe du glissement est dessinée en pointillés noirs. En rouge figurent les zones d'accumulation et en bleu les zones d'érosion. On note que le MNS 2017 n'est pas exploitable dans la Ravine Roche à Jacquot car lissé.....	22
Figure 11. Profils topographiques des MNT de 2008, 2015 et des MNS de 2017 et 2019 sur un axe longitudinal au sud du glissement de Ravine Roche à Jacquot aval. En rouge sont figurées les zones d'accumulation, en bleue sont représentées les zones d'ablation. Le secteur du profil de 2017 situé dans la ravine n'est pas exploitable.....	23
Figure 12. Profils topographiques des MNT de 2008, 2015, 2017 et 2019 sur un axe longitudinal au Nord du glissement de Ravine Roche à Jacquot aval. En rouge sont figurées les zones d'accumulation, en bleue sont représentées les zones d'ablation. Le secteur du profil de 2017 situé dans la ravine n'est pas exploitable. .	24
Figure 13 Comparaison diachronique des contours de la cicatrice d'arrachement sur la base des ORTHO® IGN de 2003, 2008, 2011, 2017, 2018	26
Figure 14 :Comparaison des MNS sur le secteur du glissement Nourry entre 2015 et 2017, 2017 et 2019 et entre 2015 et 2019 : Limitation des modèles dans ces zones. L'enveloppe du glissement englobant également la ravine Nourry est dessinée en pointillés noirs. En rouge figurent les zones d'accumulation et en bleu les zones d'érosion.....	27
Figure 15 : Profils topographiques des MNT de 2008, 2015, 2017 et 2019 sur un axe longitudinal au Nord du glissement Secteur Nourry. En rouge sont figurées les zones d'accumulation, en bleue sont représentées les zones d'ablation.	28
Figure 16 : Différence des MNS de 2015 et de 2019 au niveau du lit de la Ravine Roche à Jacquot, localisation des principaux constats d'évolution et des prises de vues présentées en Figure 17(triangles blancs).....	29
Figure 17 : Evolution du lit de la Ravine Roche à Jacquot en aval du glissement principal, en deux points localisés sur la Figure 16, entre décembre 2014 et juillet 2019 (point de vue 1) et octobre 2016 (point de vue 2).....	30

1. Cadre et objectifs

Suite au passage du cyclone Béjisa le 02/01/2014, l'encaissement en rive droite de la Ravine de Roche à Jacquot a été affecté par deux glissements de terrain volumineux à savoir :

- Un glissement rocheux déclenché en bordure Est du glissement de grande ampleur de Grand-Ilet (370 Mm³, Belle, 2014¹). Son volume fut estimé sur le terrain en 2014 à la suite de l'évènement, entre 300 000 à 350 000 m³. Cet évènement est nommé *glissement de Ravine Roche à Jacquot aval* dans la suite du présent rapport ;
- Un second glissement rocheux déclenché sur la bordure Nord du glissement de Grand-Ilet. Son volume fut estimé entre 10 000 et 12 000 m³ à partir d'observations de terrain réalisées suite à l'évènement en 2014. Dans le présent rapport ce glissement est nommé *glissement du secteur Nourry*.

La DEAL de La Réunion, a missionné le BRGM pour réaliser un diagnostic, puis une surveillance de ces deux phénomènes gravitaires.

Dans ce cadre, 3 inspections de terrain ont été réalisées :

1. post-Béjisa (10/01/2014 et 26/03/2014),
2. pré-saison cyclonique 2014/2015 (24/12/2014)
3. post-saison cyclonique 2014/2015 (12/08/2015).

Les deux premières reconnaissances ont été traitées dans le rapport BRGM/RP-64815-FR² tandis que les évolutions des glissements observées lors de la troisième inspection a fait l'objet du rapport BRGM/RP65204-FR³. Au regard des risques résiduels identifiés lors de ces diagnostics, la poursuite de la surveillance de ces glissements avait été prescrite. Il avait été recommandé de suivre les évolutions morphologiques, à partir de données topographiques acquises par exemple par télédétection laser (LiDAR) ou par photogrammétrie.

Le présent rapport a pour objectifs de (i) faire un bilan sur l'évolution subit par ces glissements de terrain en tirant parti des données topographiques et des orthophotographies nouvelles et (ii) d'actualiser l'évaluation des risques résiduels et les recommandations afférentes.

En 2015, la plateforme PIMANT⁴ (Plate-forme d'Imagerie Aéroportée Numérique des Territoires) opérée par la Région Réunion a été mise en place afin d'acquérir des données photographiques de très haute résolution (10 à 50 cm) du territoire pour produire des orthophotographies et des modèles numériques de surface (MNS) de la région. Des campagnes particulières ont été réalisées dans le cirque de Salazie, dans le but de qualifier et de quantifier, à l'aide de cet équipement, l'évolution des glissements de grande ampleur qui s'y trouvent.

¹ Belle P. (2014) - Contribution des processus hydrologiques et hydrogéologiques aux glissements de terrain de grande ampleur. Application au contexte tropical de La Réunion. Thèse de doctorat. Université de La Réunion – BRGM. 348 p.

² Aunay B., Vincent C. (2015) – Surveillance de l'évolution des deux glissements de terrain à l'Est de Grand Ilet, Ravine Roche à Jacquot - Diagnostics de janvier et décembre 2014. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-64815-FR. 37 p.

³ Aunay B. (2015) Surveillance de l'évolution des deux glissements de terrain à l'Est de Grand Ilet, Ravine Roche à Jacquot. Diagnostic d'août 2015. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-65204-FR. 25 p.

⁴ Délibération n°201660681 de la Commission Permanente du Conseil Régional en date du 08 novembre 2016 relative au financement de la plateforme d'imagerie aéroportée numérique des territoires (PMANT);

Dans la présente étude, les orthophotographies et données de topographie issues de quatre missions d'acquisition réalisées à l'aide de la plateforme ont été utilisées pour l'analyse de l'évolution des glissements ayant affectés la ravine Roche à Jacquot depuis leur déclenchement en 2014. En complément, il a également été utilisé des données à notre disposition provenant d'autres campagnes de mesure.

Cette expertise s'inscrit dans le cadre de la convention de recherche et développement partagée relative au suivi des glissements de terrain impactant le domaine public fluvial établie entre la DEAL-Réunion et le BRGM, notifiée le 31/08/2017.

2. Rappel des faits et des premiers constats suite aux glissements

Les constats et les diagnostics qui ont été prononcés à la suite des glissements sont fondés sur des observations de terrain et des campagnes d'observations hélicoptérées dont le détail est fourni en Tableau 1. Le détail de chaque étude peut être trouvé dans les rapports associés (Table 1).

Constat et diagnostic	Type	Date	Rapport de référence
Post Béjisa	Observations hélicoptérées	10/01/2014	BRGM/RP-64815-FR ⁵
	Observations de terrain	26/03/2014	
Pré saison cyclonique 2014-2015	Observations hélicoptérées	24/12/2014	BRGM/RP-64815-FR
	Observations de terrain	24/12/2014	
Post saison cyclonique 2014-2015	Observations hélicoptérées	12/08/2015	BRGM/RP65204-FR ⁶
	Observations de terrain	12/08/2015	

Tableau 1. Observations de terrain réalisées pour dresser les premiers constats et diagnostics suite au glissements ayant affectés la Ravine Roche à Jacquot lors du cyclone Béjisa (janvier 2014).

2.1. GLISSEMENT DE RAVINE ROCHE A JACQUOT AVAL

2.1.1 Caractéristiques du glissement : constats initiaux

Localisation : Le glissement de Ravine Roche à Jacquot aval se situe sur le versant en rive droite de l'encaissement de la ravine éponyme, en bordure Est du plateau de Grand-Ilet (Figure. 1) sur le territoire de la commune de Salazie (La Réunion).

⁵ Aunay B., Vincent C. (2015) – Surveillance de l'évolution des deux glissements de terrain à l'Est de Grand Ilet, Ravine Roche à Jacquot - Diagnostics de janvier et décembre 2014. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-64815-FR. 37 p.

⁶ Aunay B. (2015) Surveillance de l'évolution des deux glissements de terrain à l'Est de Grand Ilet, Ravine Roche à Jacquot. Diagnostic d'août 2015. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-65204-FR. 25 p.



Figure 1 : Localisation de l'emprise du glissement de terrain de Ravine Roche à Jacquot aval (source : Géoportail)

Date d'occurrence : probablement au cours de l'alerte rouge du cyclone Bėjisa (02/01/2014 au 03/01/2014). Les fortes pluies associées au passage du cyclone Bėjisa (850 mm en 2j à la station de Grand-Ilet) ont déclenché les désordres observés sur le site (ruissellement, infiltration et saturation de terrains instables et hétérogènes).

Dégâts et enjeux : aucune victime n'est à déplorer. Aucun enjeu de proximité sur ce secteur.

Volume éboulé : de l'ordre de 315 000 à 350 000 m³ (estimé à partir d'observations de terrain et de la comparaison de photographies avant et après évènement). L'épaisseur de la masse glissée a été considérée équivalente à l'épaisseur de la cicatrice d'arrachement visible aux bordures de la zone de départ. Cette estimation du volume initial est réévaluée dans la suite du rapport à partir de nouvelles données disponibles (section 3.2).

Secteur d'initiation : Deux principales zones de départ distinctes sont identifiées : la première dans la partie sommitale de la pente et la seconde, vers le bas où un ensemble d'éperons rocheux, vraisemblablement constitués de matériaux issus d'un précédent éboulement/ravinement, se sont effondrés.

Secteur de propagation : Les matériaux ont atteint le fond de la Ravine Roche à Jacquot (lit mineur et espace de liberté). Une accumulation de 4-5 m voire localement 8 m au niveau d'une cascade. Des indices suggèrent qu'un ou plusieurs embâcles se sont produits suite au glissement (accumulation de blocs et troncs au niveau des rétrécissements du lit et marques de passage de laves torrentielles associée potentiellement à une ou plusieurs débâcles). Les matériaux accumulés en pied du versant ont été dégagés par les forts débits de la Ravine Roche à Jacquot au cours de l'alerte rouge et des jours suivants. De nombreux arbres arrachés ont été observés dans le lit du cours d'eau.

Configuration géologique et géomorphologique du secteur : Le secteur diagnostiqué se situe à la limite Est du plateau de Grand-Ilet. Sa morphologie est de type bad-lands⁷ se développant sur 300 m de hauteur et dont la pente avoisine 30-35° en moyenne soit une pente d'équilibre relative (Figure 2). La pente atteint 40 à 50° à proximité du pied de glissement. Cette pente est peu ou pas végétalisée. De nombreuses sources émergent dans la partie supérieure de la pente, au niveau de la base du glissement de Grand-Ilet (Belle, 2014).

Trois formations géologiques peuvent être identifiées de haut en bas :

- Les brèches de Grand Ilet dans la partie sommitale (< 50 m d'épaisseur). Ce sont les terrains affectés par le glissement global du plateau de Grand Ilet suivi dans le cadre du projet MvTerre-2⁸ ;
- Une intrusion indifférenciée (≈ 20 m d'épaisseur) ;
- Des coulées basiques zéolitisées partiellement recouvertes par les débris du glissement.

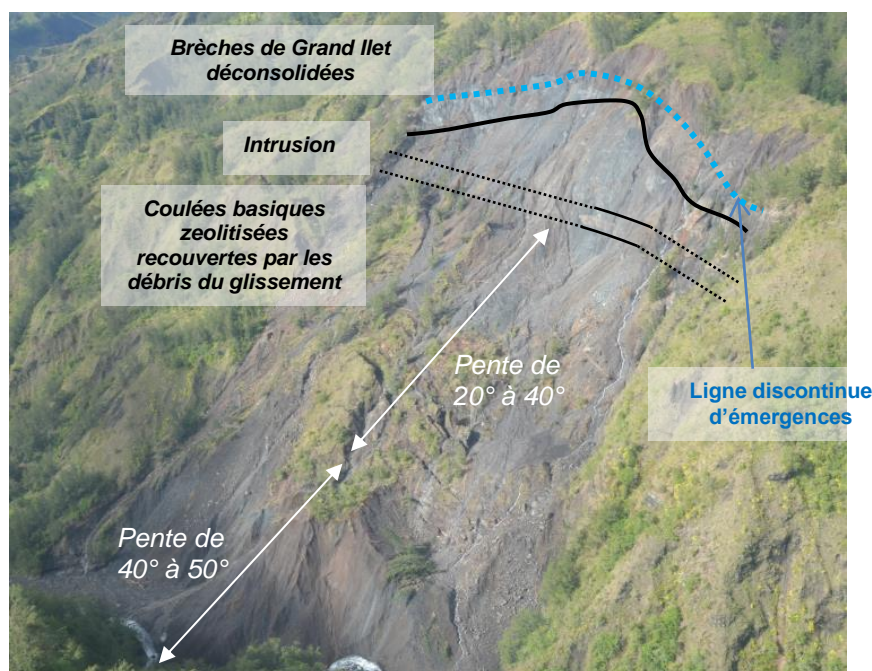


Figure 2 : Géologie du glissement de la Ravine Roche à Jacquot aval

La ligne discontinue d'émergences marque la limite entre le glissement de grande ampleur actif de Grand Ilet et son substratum (ligne noire).

⁷ Terrain où la faible végétation et le ruissellement important ont contribué à la formation de profondes ravines.

⁸ MvTerre-2 : Détection, suivi et modélisation des mouvements de terrain de grande ampleur dans les cirques de La Réunion. Projet de recherche cofinancé par les fonds Européens FEDER (PO2007-2013), l'Etat, la Région Réunion et le BRGM.

2.1.2 Bilans dressés suite aux différents diagnostics concernant l'évolution du glissement et les aléas résiduels

- ❖ Le diagnostic post-Cyclone Béchisa : Les observations ont permis de qualifier un risque d'embâcle en raison de la configuration géométrique de la ravine propice (présence de goulot d'étranglement dans le lit de la ravine) et des volumes de matériaux mobilisables. Les enjeux exposés identifiés sont limités aux usagers de la Rivière du Mât. Il a pour cela été préconisé un suivi régulier du secteur.
- ❖ Le diagnostic pré-saison cyclonique 2014-2015 : Les observations de terrain n'ont pas mis en évidence d'évolution notable, hormis des phénomènes de ravinement et des glissements superficiels. Ces derniers étant qualifiés d'épiphénomènes au regard des volumes mobilisables. Le risque d'embâcle est diminué par rapport début de l'année 2014, en raison d'une probable consolidation des matériaux glissés. Cependant, ce risque n'a pas été écarté, notamment à cause de l'encombrement persistant du lit de la Ravine Roche à Jacquot par des blocs pluri-métriques et des troncs d'arbres pouvant favoriser la formation de barrage naturel.
- ❖ Le diagnostic post-saison cyclonique 2014-2015 : La saison cyclonique 2015, avec une pluviométrie moyenne en dessous des normales, a principalement été marquée par le passage de la tempête tropicale modérée Haliba (du 07 au 11/03/2015) à proximité de La Réunion. Sur ces 4 jours, les hauteurs maximales de pluie ont atteint dans les Hauts 1273 mm à Grand Ilet. Le cumul des pluies tombées en 4 jours correspond à celui enregistré en 2 jours lors du cyclone Béchisa (1^{er} et 2 janvier 2014).

Les principaux constats et analyse des risques ressortant de cette inspection furent les suivants :

- La géométrie et la morphologie générales du glissement de terrain n'ont pas évolué de manière notable (pas de recul significatif en tête du glissement ni de modification de la pente moyenne des matériaux) hormis des réajustements ponctuels internes au glissement;
- Des mouvements de terrain mineurs (volumes unitaires de quelques centaines de m³) se sont produits au sein de l'importante masse de matériaux préalablement déstabilisés. Il s'agit là de remobilisations locales sans incidence sur la géométrie générale du glissement ;
- Les matériaux glissés sur la partie aval du glissement de terrain, secteur Sud, ont été incisés. Un nouveau cône de déjection s'est formé. Le thalweg constituant le drain principal du glissement s'est élargi;
- Les matériaux de la zone d'épandage au pied du glissement de terrain ont été remobilisés par la rivière de la Ravine Roche à Jacquot :
 - au droit du glissement : déplacement du cours de la rivière de l'intrados vers l'extrados du méandre (vers le pied du glissement) soit un déplacement de plus de 80 m
 - à l'aval du glissement incision d'une terrasse alluviale sur une profondeur de plus de 4 m;
- L'embâcle, située en pied de glissement, secteur Nord, et constituée d'arbres enchevêtrés et de blocs a été dégagée. Une cascade d'une hauteur de 8 m s'est formée suite à l'incision du cours d'eau ;

2.2. GLISSEMENT DU SECTEUR NOURRY

2.2.1 Caractéristiques du glissement : constats initiaux

Localisation : Le glissement du secteur Nourry se situe sur le versant en rive droite de l'encaissement de la ravine Roche à Jacquot, en bordure Nord du plateau de grand Grand-Ilet (Figure 3).



Figure 3 : Localisation de l'emprise du glissement du secteur Nourry (source : Géoportail ; Ortho ©IGN 2017)

Date d'occurrence : au cours de l'alerte rouge du cyclone BÉJISA (02/01/2014 au 03/01/2014).

Volume éboulé : entre 3 000 et 5 000 m³ (estimation reposant sur les observations de terrain et d'après analyse d'images satellites avant et après l'événement)

Dégâts et enjeux : aucune victime n'est à déplorer. Aucun enjeu direct sur ce secteur. Il est néanmoins nécessaire de rappeler que des serres et une habitation sont situées à une distance de 80 m environ de la niche d'arrachement du glissement. La bordure du plateau de Grand Ilet dans ce secteur est sujette à un recul rapide (moyenne de 10 m par an, recul de 40 m entre 2004 et 2005 et 70 m entre 2005 et 2006 (tempête tropicale Diwa)) ;

Secteur d'initiation : Partie supérieure d'une ancienne cicatrice d'arrachement

Zone de propagation : les matériaux ont atteint le fond de la Ravine Roche à Jacquot, en empiétant sur 60 à 70% de la largeur de l'ancien lit (lit mineur et espace de liberté⁹). D'après les constats présentés dans le rapport BRGMRP-64815-FR, il ne semble pas que des embâcles aient pu se former.

Configuration géologique et géomorphologique du secteur : Le secteur glissé se situe sur une pente de 80 m de hauteur et dont la pente topographique avoisine 35-40° (Figure 4). Cette pente était peu végétalisée et était déjà sujette à de nombreux éboulements lors de chaque épisode de précipitations intenses. De nombreuses sources émergent sur la pente notamment au niveau de la base du glissement de Grand-Ilet (Belle 2014). La pente est constituée de brèches de Grand-Ilet déconsolidées.

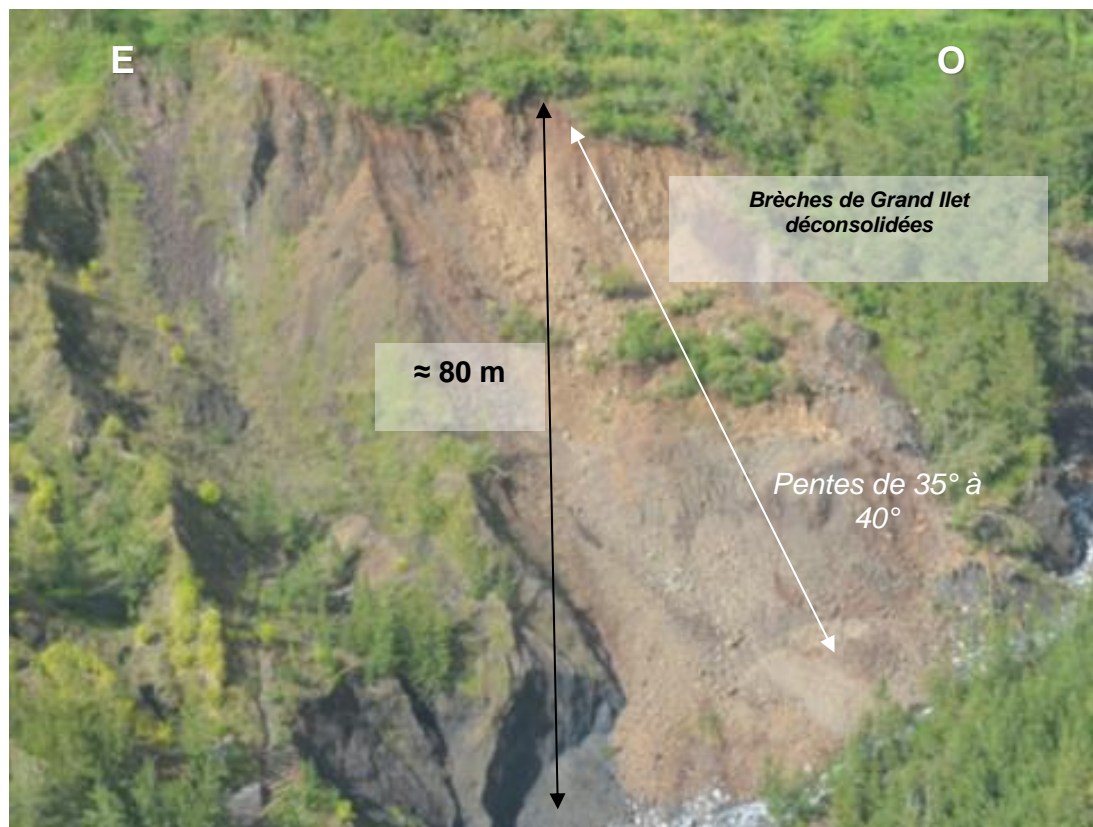


Figure 4 : Vue sur le glissement de terrain Nourry (10/01/2014)

Aménagements particuliers du secteur : Des travaux de lutte contre les risques associés aux glissements de grande ampleur et aux phénomènes érosifs ont été réalisés au début des années 1980 dans la ravine Roche à Jacquot et dans ses affluents (Ravine Clain, Ravine Nourry, Ravine de l'église, Ravine Blanche, Ravine Bonald et Ravine Boyer). L'un des objectifs initiaux était de participer au maintien d'une butée de pied pour limiter l'accélération du glissement de Grand Ilet et les érosions de berge. Des travaux de correction torrentielle complémentaires ayant le même objectif ont été réalisés entre 2013 et 2015 à environ 400 m en amont du glissement Nourry.

⁹ Espace de liberté ou espace de mobilité ou espace de bon fonctionnement : espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres.

2.2.2 Bilans dressés suite aux différents diagnostics concernant l'évolution du glissement et les aléas résiduels

- ❖ Le diagnostic post-Cyclone Béchisa : Le glissement du secteur Nourry avait été considéré comme propice à une érosion régressive importante (recul de plus de 100 mètres au cours des 10 dernières années observées dans ce secteur). Il a pour cela et en raison du recul rapide de la bordure de Grand Ilet à ce niveau, été recommandé, à l'approche d'événements cycloniques, dans un premier temps d'évacuer les habitations proches de la bordure du plateau. Ces recommandations concernant les parcelles AB54, BN137 et BN138 ont été précisées dans le rapport concernant l'exposition des habitations du cirque de Salazie aux phénomènes gravitaires¹⁰.
- ❖ Le diagnostic pré-saison cyclonique 2014-2015 : Il n'avait pas été observé d'évolution notable sur le secteur. La niche d'arrachement était toujours marquée et « propre » (sans instabilité résiduelle) avec quelques traces de d'érosion liées au ruissellement des eaux du plateau en amont. Les aléas résiduels et les recommandations associées demeuraient inchangés.
- ❖ Le diagnostic post-saison cyclonique 2014-2015 : Il n'avait pas été observé d'évolution notable, hormis une remobilisation des matériaux présents au pied du glissement. Les aléas résiduels initialement diagnostiqués n'avaient donc pas évolués.

3. Précision de la géométrie des glissements et suivi de leurs évolutions depuis 2014 à partir des données de topographie et d'imagerie aérienne nouvelles

A la suite des premières reconnaissances des glissements de terrain de la Ravine Roche à Jacquot, post-Béchisa, il avait été recommandé de suivre les évolutions morphologiques, à partir de données topographiques (LiDAR ou par photogrammétrie). L'analyse menée tire parti des données publiques topographiques hautes résolution disponibles ainsi que des campagnes photogrammétrique PIMANT réalisées spécifiquement pour le suivi de ces instabilités.

3.1. DONNEES PHOTOGRAPHIQUES ET TOPOGRAPHIQUES DISPONIBLES POUR L'ANALYSE

Les données photographiques et topographiques disponibles couvrant les zones des événements survenus suite au passage du cyclone Béchisa (2014) sont résumées dans le Tableau 2:

	Orthophotographies	Topographie
État initial Pré-événement	<ul style="list-style-type: none"> • Ortho Haute Résolution (HR) IGN Résolution : 0,20 m Période acquisition : 06/09/2011 au 07/11/2011 	<ul style="list-style-type: none"> • MNTR® ©IGN 2011 Résolution : 5 m Mode d'acquisition : LiDAR Période d'acquisition : Aout 2008

¹⁰ Aunay B., Rey A. (2018) – Cirque de Salazie : exposition des habitations aux phénomènes gravitaires – Compléments d'informations du rapport Aunay et al (2015) - BRGM/RP-64089-FR. BRGM/RP-67984-FR.

Suivi des glissements de terrain de la ravine Roche à Jacquot entre 2015 et 2019

Post-saison cyclonique 2014/2015	-	<ul style="list-style-type: none"> • MNT¹¹ Sintégra (Maitre d'ouvrage Région Réunion) Résolution : 0,50 m Mode d'acquisition : LiDAR Période acquisition : 17-27/07/2015 • MNS¹² Sintégra (Maitre d'ouvrage Région Réunion) Résolution. 0,5 m Mode d'acquisition : LiDAR Période acquisition : 17-27/07/2015
Pré-saison cyclonique 2016/2017	<ul style="list-style-type: none"> • Orthophoto PIMANT Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Date d'acquisition : 18/10/2016 <i>Qualité insuffisante (géoréférencement, couverture et précision) pour être exploitée dans le cadre de cette étude, en l'état (décalage planimétrique dépassant localement plusieurs dizaine de mètres)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • MNS Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Mode d'acquisition : Photogrammétrie Date d'acquisition : 18/10/2016 <i>Qualité insuffisante (géoréférencement, couverture et précision) pour être exploité dans le cadre de cette étude, en l'état.</i>
Pré-saison cyclonique 2017/2018	<ul style="list-style-type: none"> • Ortho HR IGN 2017 express /www.geoportail.gouv.fr/donnees/ortho-express-2017 Résolution : 0,20 m Période d'acquisition : septembre 2017 <i>Rq : (métadonnées non disponibles)</i> • Orthophoto PIMANT Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Date d'acquisition : 20/10/2017 <i>Rq : Qualité insuffisante (géoréférencement, couverture et précision) pour être exploitée dans le cadre de cette étude, en l'état (décalage planimétrique dépassant localement plusieurs dizaine de mètres)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • MNS IGN Résolution : 0,25 m Mode d'acquisition : Photogrammétrie Période d'acquisition : septembre 2017 <i>Rq : (métadonnées fournies non disponibles) Présence d'artefact dans le lit des cours</i> • MNS Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Mode d'acquisition : Photogrammétrie Date d'acquisition : 20/10/2017 <i>Rq : Qualité insuffisante (géoréférencement, couverture et précision) pour être exploitée dans le cadre de cette étude, en l'état.</i>
Post-saison cyclonique 2017/2018	<ul style="list-style-type: none"> • Orthophoto PIMANT Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Date d'acquisition : 08/06/2018 <i>Rq : Qualité insuffisante (géoréférencement, couverture et précision) pour être exploitée dans le cadre de cette étude, en l'état.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • MNS Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Mode d'acquisition : Photogrammétrie Date d'acquisition : 08/06/2018 <i>Rq : Qualité insuffisante (géoréférencement, couverture et précision) pour être exploitée dans le cadre de cette étude, en l'état.</i>
Post-saison cyclonique 2018/2019	<ul style="list-style-type: none"> • Orthophoto PIMANT Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Date d'acquisition : 06/08/2019 	<ul style="list-style-type: none"> • MNS Région/PIMANT Résolution : 0,12 m Mode d'acquisition : Photogrammétrie Date d'acquisition : 06/08/2019

Tableau 2 : Liste des données orthophotographies et topographiques disponibles

Pour une analyse basée sur la comparaison diachronique de MNS, il est indispensable que les données utilisées soient géoréférencées avec une précision centimétrique. Le dispositif de photogrammétrie n'étant pas équipé de système de positionnement embarqué, il est nécessaire sur cette zone mobile (glissement de très grande ampleur de Grand-îlet) d'implanter et de relever la position de nombreux points de contrôle pour parvenir à cette exactitude planimétrique. La Figure 5 présente les points de contrôle implantés et relevés en amont de l'acquisition PIMANT d'août 2019.

¹¹ Modèle numérique de terrain

¹² Modèle numérique de surface

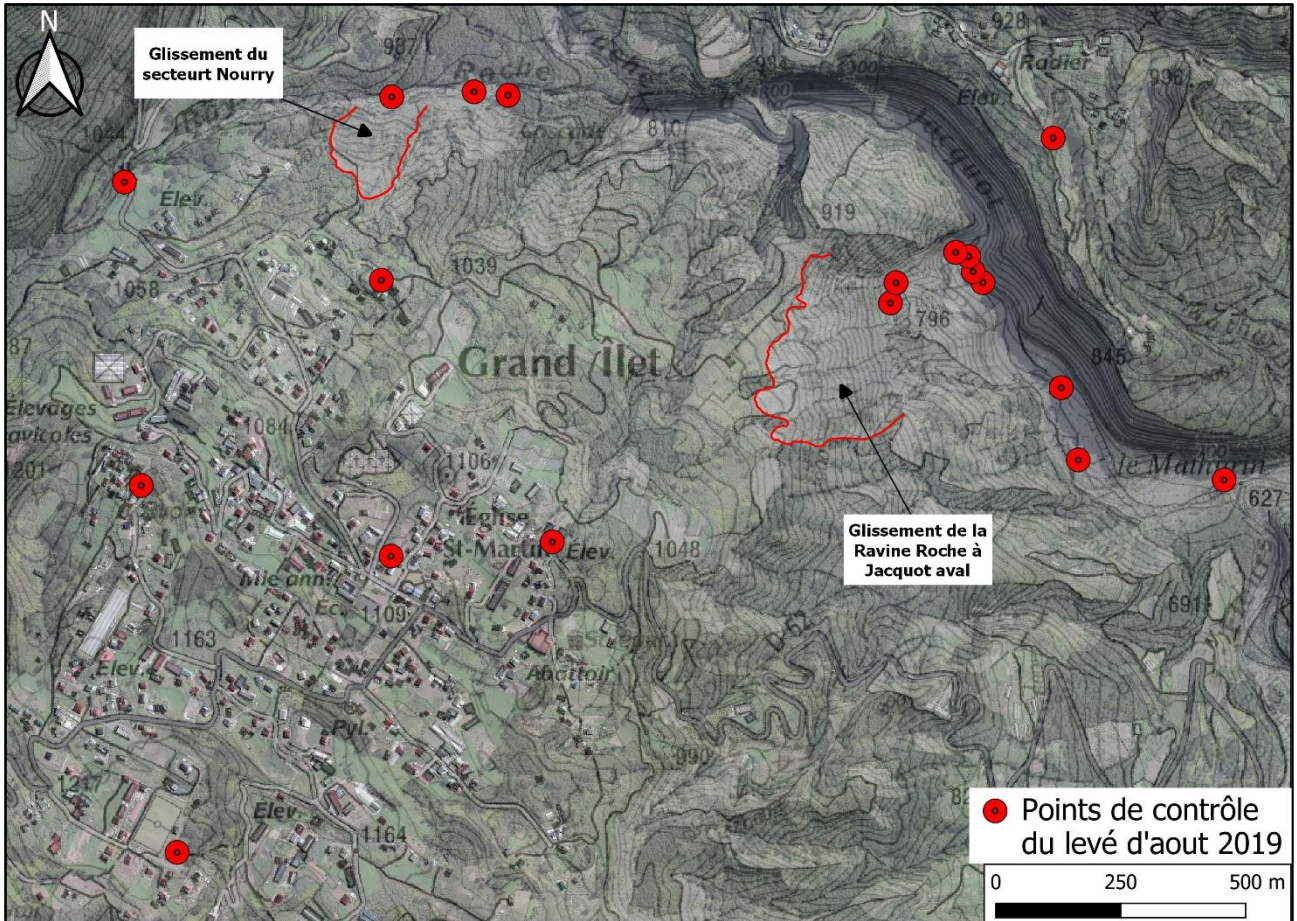


Figure 5 : Localisation des points de contrôle utilisés pour le géo-référencement du levé photogrammétrique PIMANT réalisé en Aout 2019.

3.2. PRECISION DE LA GEOMETRIE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN PAR COMPARAISON DES MNT DE 2008 ET DE 2015

3.2.1 Glissement de Ravine Roche à Jacquot aval

La comparaison du MNT[®] ©IGN 2011, produit à partir de données acquises en 2008 par l'IGN, avec le MNT produit par la société Sintégra, à partir de données acquises par la Région Réunion en 2015, permet de confirmer les zones de départ et de préciser l'estimation des volumes mobilisés par le glissement du 02/01/2014. Les principaux constats sont les suivants (les zones concernées sont repérées sur la Figure 6, par les lettres capitales correspondantes):

- A.** Une zone d'ablation principale est identifiée entre 800 et 960 m NGR
- Sa superficie est d'environ 52 000 m² ;
 - L'épaisseur des matériaux glissés en sa partie centrale est de 10 à 40 m ;
 - Le volume des matériaux glissés est estimé à **1 056 875 m³** (+/- 10 000 m³) selon la méthode proposée par James et al (2012¹³) pour quantifier les changements de topographie à partir de comparaison de MNT. Cette estimation concorde avec

¹³ James, L. A., Hodgson, M. E., Ghoshal, S., & Latiolais, M. M. (2012). Geomorphic change detection using historic maps and DEM differencing: The temporal dimension of geospatial analysis. *Geomorphology*, 137(1), 181-198.

l'estimation faite selon la méthode de Larsen et al.(2010¹⁴) basée sur l'aire du glissement. Les premières estimations évaluées à partir des premières observations de terrain annonçaient un volume de l'ordre de 300 000 à 350 000m³, elles étaient donc sous-évaluées (section 2.1.1). Cet écart est lié à la sous-évaluation de l'épaisseur moyenne de la masse glissée, qui fut estimée juste après l'événement à une dizaine de mètres sur la base de mesure de l'escarpement de la cicatrice d'arrachement.

- B. Un comblement d'une dépression interne au versant, profonde d'une trentaine de mètres, en amont de la zone d'éperons (aussi appelés « chicots » dans les précédents rapports) ;
- C. La disparition de plusieurs de ces éperons rocheux (ou « chicots ») certainement emportés par les masses glissées depuis la zone de départ ;
- D. Une accumulation de matériaux en pied de versant en particulier sur la partie nord du glissement :
 - La superficie de la zone d'accumulation est de 60 000m² ;
 - L'épaisseur de matériaux accumulés dépasse 30 m ;
 - Le volume de matériaux accumulés est estimé **880 000 m³**, selon la méthode proposée par James et al (2012) pour quantifier les changements de topographie à partir de comparaison de MNT.
- E. Un comblement du lit mineur de la Ravine Roche à Jacquot et un décalage d'environ 30 m du cours d'eau en rive gauche (vers l'est).

En juillet 2015, soit 18 mois après le déclenchement du glissement, un écart de volume de l'ordre de **175 000 m³** est donc observé entre les matériaux érodés et les matériaux accumulés. Cette

¹⁴ Larsen, I. J., D. R. Montgomery, and O. Korup (2010), Landslide erosion controlled by hillslope material, Nat. Geosci.,3(4), 247–251,doi:10.1038/ngeo776.

différence peut être imputable aux matériaux remobilisés en pied du glissement par la rivière dans la Ravine Roche à Jacquot (transport solide).

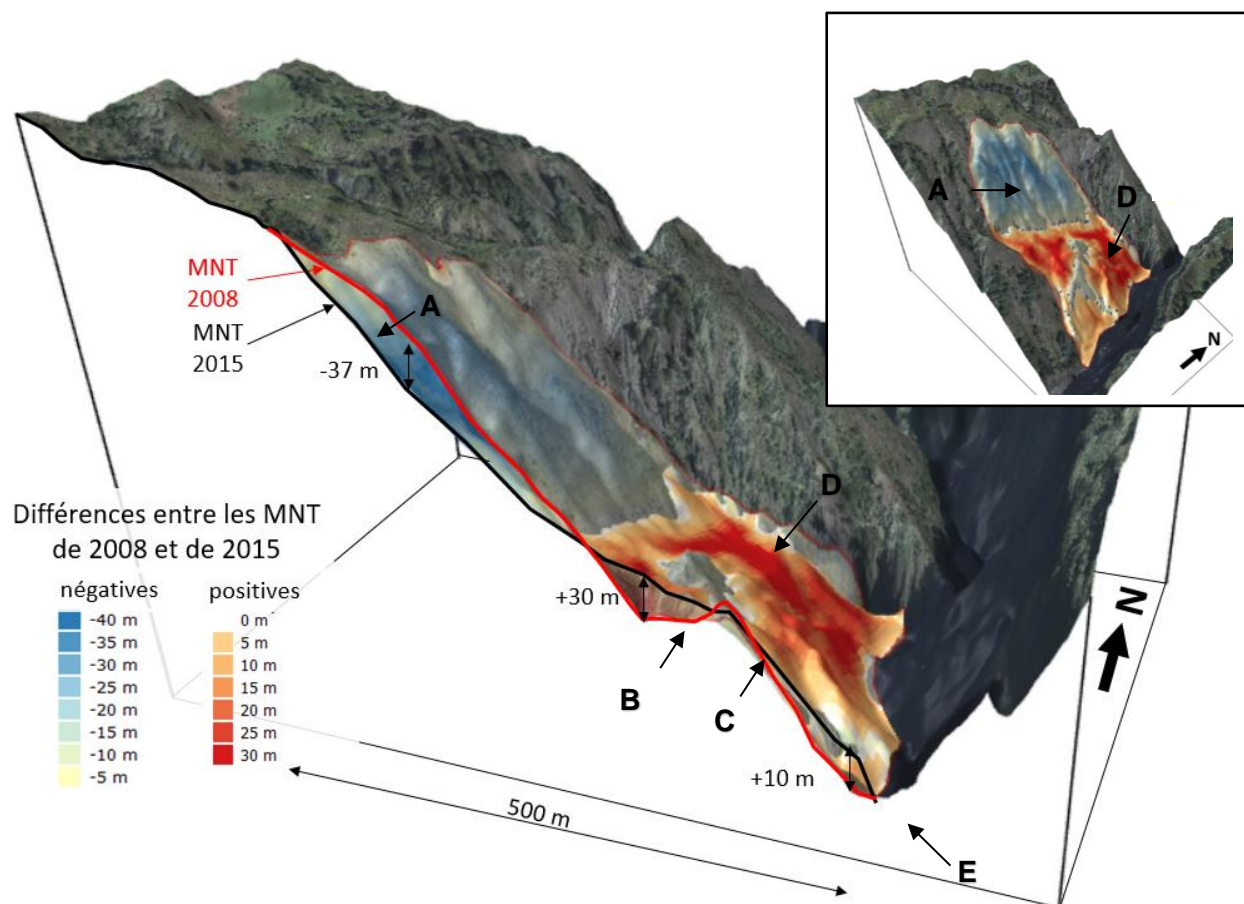


Figure 6 : Représentation de la différence d'altitude entre le MNT de 2015 (Sintégra) et celui de 2008 (IGN) drapé sur le MNT de 2008 au niveau du glissement de ravine Roche à Jacquot aval. A zone d'ablation, B. Comblement d'une dépression en amont des éperons rocheux, C. Disparition d'éperons rocheux, D. Zone d'accumulation, E. Comblement du lit de la rivière de la Ravine Roche à Jacquot.

3.2.2 Glissement du secteur Nourry

La comparaison du MNTR® ©IGN 2011, acquis en 2008 par l'IGN, et du MNT acquis par la Région Réunion en 2015 et produit par la société Sintégra, permet de confirmer les zones de départ et de préciser l'estimation des volumes mobilisés par le glissement Nourry du 02/01/2014 (Figure 7). Les principaux constats résultant de cette différence de MNT avant et après événement sont les suivants :

- A.** La zone d'ablation repérée à les caractéristiques suivantes:
- Une surface de 3 300 m² ;
 - L'épaisseur maximale de la zone de départ approche une vingtaine de mètres ;
 - Le volume glissé est estimé à **18 600 m³** (+/- 660 m³) selon la méthode proposée par James et al, 2012 pour quantifier les changements de topographie à partir de comparaison de MNT.
- B.** Une part importante des masses glissées (~10 000m³) subsiste au pied de la zone d'initiation dans un contexte de pente marquée.

La différence de volume entre la zone d'ablation et la zone d'accumulation suppose qu'environ **7 000 m³** de matériaux ont transités dans la ravine.

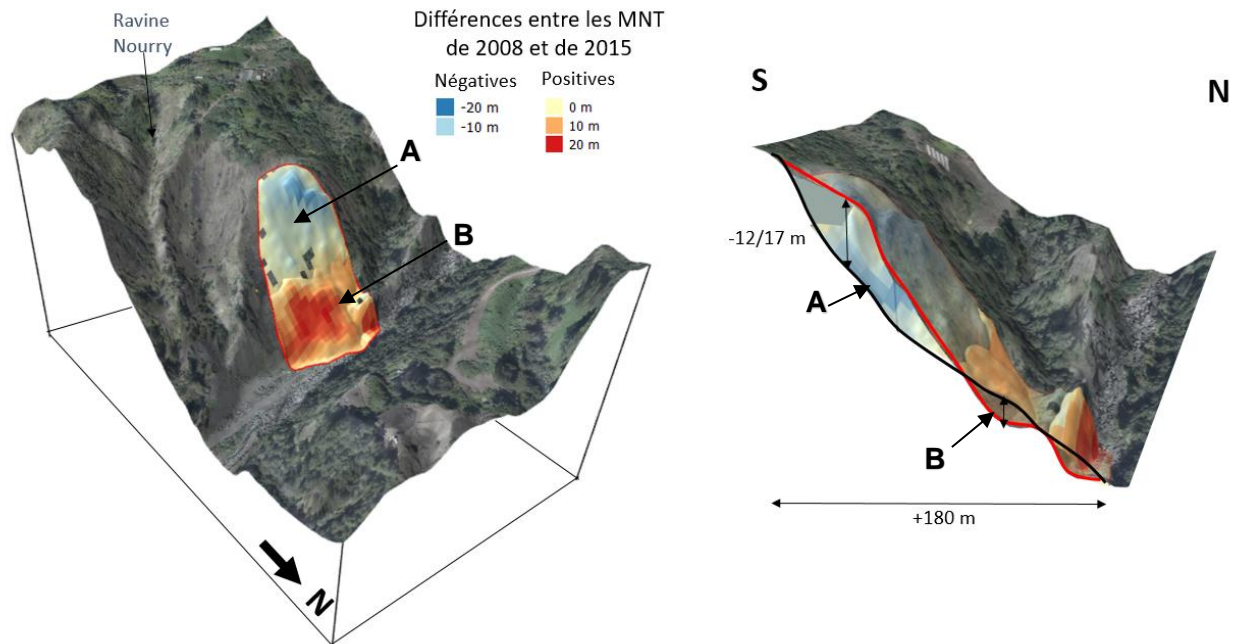


Figure 7 : Représentation de la différence d'altitude entre le MNT de 2015 (Sintégra) et celui de 2008 (IGN) drapé sur le MNT issue de donnée de 2008 au niveau du glissement Nourry. A : zone d'ablation et B : Zone d'accumulation.

3.3. ANALYSE DE L'EVOLUTION TOPOGRAPHIQUE DES GLISSEMENTS ET DES PRODUITS DE DESTABILISATION DEPUIS 2014

La comparaison diachronique d'orthophotographies permet d'observer puis de cartographier les évolutions des surfaces de glissement. La comparaison de MNT permet de compléter cette analyse en renseignant les volumes érodés et accumulés aux abords des glissements. Elle permet également de suivre les changements morphologiques du lit de la rivière au abord de ces glissements, et donc de quantifier les transits des matériaux glissés dans la ravine.

3.3.1 Glissement de Ravine Roche à Jacquot aval

a) Comparaison diachronique d'images aériennes

Les cicatrices déjà présentes dans le paysage en 2008 montre que le secteur avait déjà glissé en masse par le passé (*i.e.* avant 2014). En 2014, une partie des masses glissées ont été reprises par le glissement de Ravine Roche à Jacquot déclenché par les fortes pluies tombées lors du passage du cyclone Béchisa (janvier 2014).

La comparaison de l'orthophotographie de 2011 avec celle de 2017 permet de délimiter l'enveloppe du glissement de Béchisa, dans l'hypothèse où la majorité des changements observés sont dus à ce dernier (Figure 8).

La comparaison diachronique des orthophotos (2017 et 2019) (Figure 8) et des images satellites disponibles via GoogleEarth® (Figure 9) permettent d'observer :

- Des phénomènes localisés d'érosion régressive de la cicatrice d'arrachement. Ces reculs sont notamment observés lors de la saison des pluies 2015, marquée par le passage de la tempête Haliba (reculs de 20 à 30 m visibles sur les images satellites, Figure 9c.), puis lors de la saison des pluies 2018 marquée par le passage de plusieurs dépressions tropicales (Ava, Berguitta, Dumazile, Fakir) (reculs de 10 à 20 m, Figure 8f). Lors des autres saisons cycloniques il n'a pas été observé d'évolution notable de la cicatrice amont du glissement ;

- Aucune régression latérale du glissement ;
- Une érosion du pied du glissement (recul de la rive droite) ;
- Une revégétalisation de la zone centrale du glissement ;

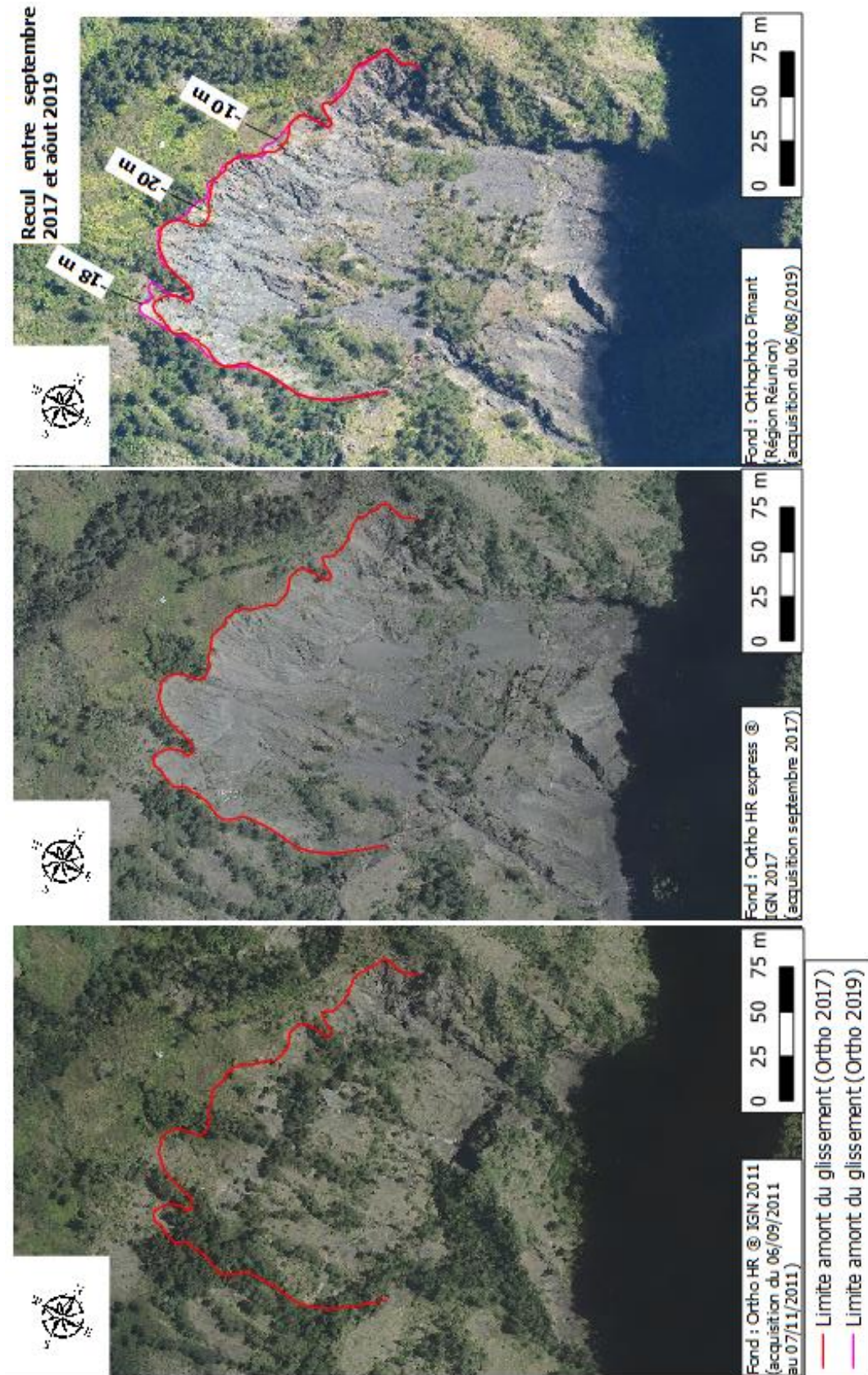


Figure 8 : Comparaison diachronique des ORTHO© IGN de 2011, 2017, 2018

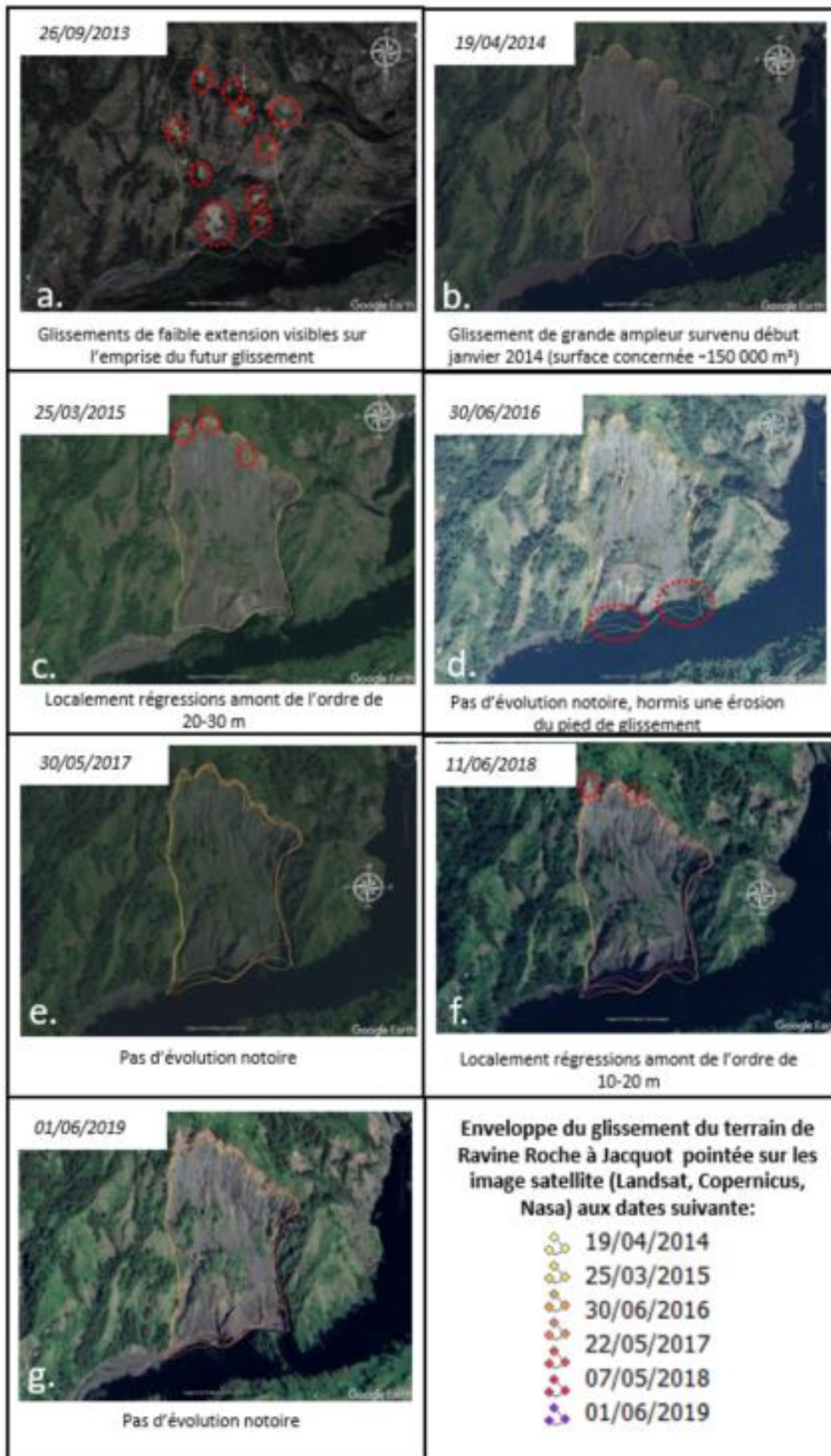


Figure 9 : Comparaison diachronique d'images satellites des dates suivante 26/09/2013, 19/04/2014, 25/03/2015, 30/06/2016, 22/05/2017, 07/05/2018 et 01/06/2019) (source : ©GoogleEarth)

b) **Analyse de l'évolution topographique du glissement post-événement du 02/01/2014 par comparaison des MNS de 2015, 2017 et 2019.**

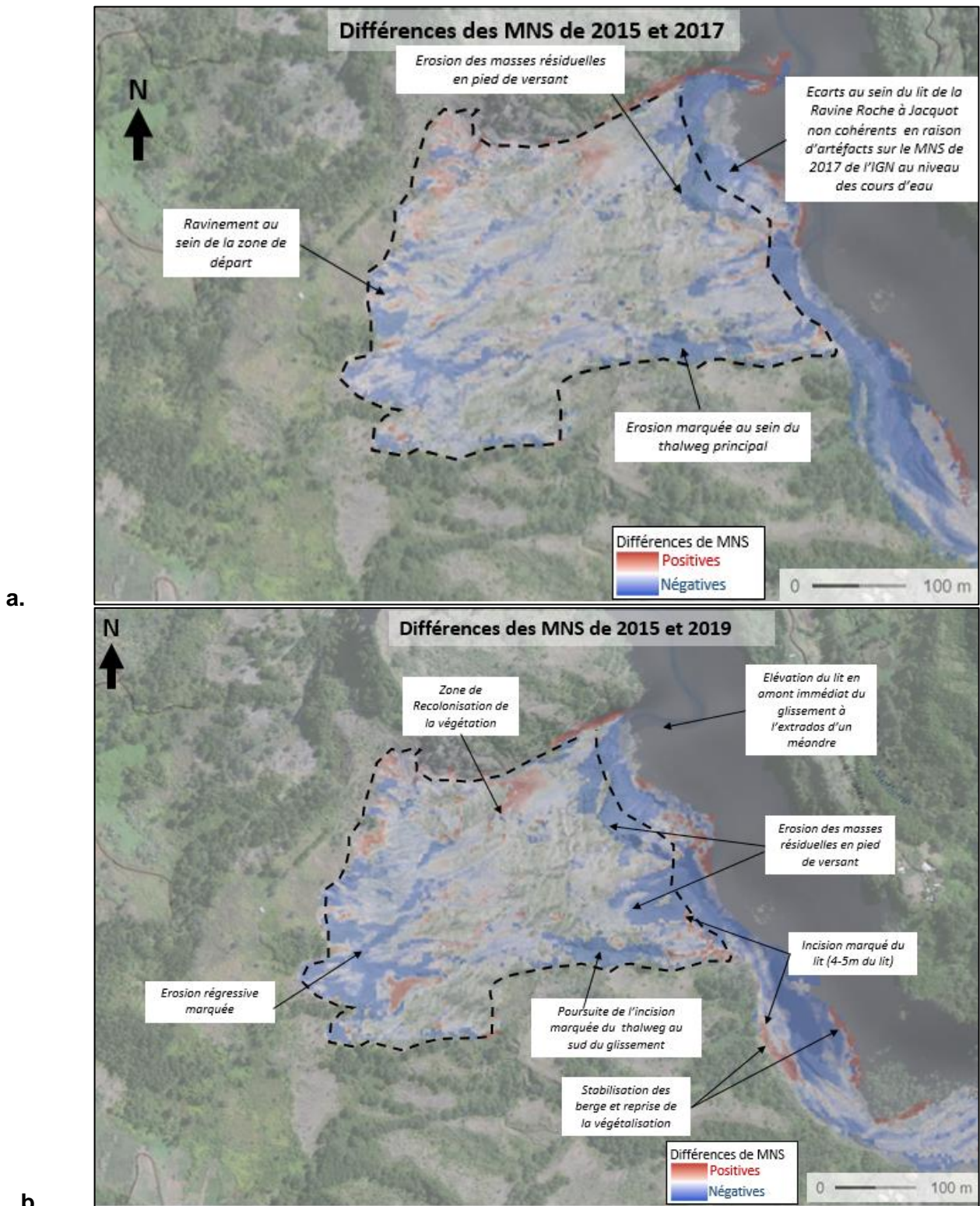


Figure 10. Suivi de l'évolution de l'Est de Ravine Roche à Jacquot et du glissement éponyme entre 2015 et 2017 et 2015 et 2019 à partir des MNS 2015, 2017 et 2019 (voir tableau 2). L'enveloppe du glissement est dessinée en pointillés noirs. En rouge figurent les zones d'accumulation et en bleu les zones d'érosion. On note que le MNS 2017 n'est pas exploitable dans la Ravine Roche à Jacquot car lissé.

Suivi des glissements de terrain de la ravine Roche à Jacquot entre 2015 et 2019

L'analyse comparative des MNS permet de confirmer les observations faites à partir des orthophotographies (Figure 10). A savoir :

- Des zones d'accumulation correspondant à une reprise de la végétation au sein du glissement ;
- Une érosion généralisée du pied de versant au pied du versant et au sein de la Ravine Roche à Jacquot sur une distance de 300 à 500 m.

Au sud du glissement de Ravine Roche à Jacquot aval, la comparaison des MNS de 2015, 2017 et 2019 (Figure 11) montre :

- Une érosion (baisse d'altitude de quelques mètres) de l'escarpement principal du glissement ;
- Une régression d'une dizaine de mètres de la limite amont du glissement vers l'ouest en accord avec les observations faites sur les orthophotographies ;
- Une incision marquée (~10 m) des masses glissées au pied du glissement entre 2015 et 2017. Entre 2017 et 2019 cette érosion s'est poursuivie, en 2019 la topographie du lit de la rivière au niveau de la coupe A-B est semblable à celle de 2008. La rivière aurait donc mis 4 ans à revenir à son état d'équilibre en cet endroit ;
- Peu (pas) d'évolution de la topographie sur la zone de replat intermédiaire.

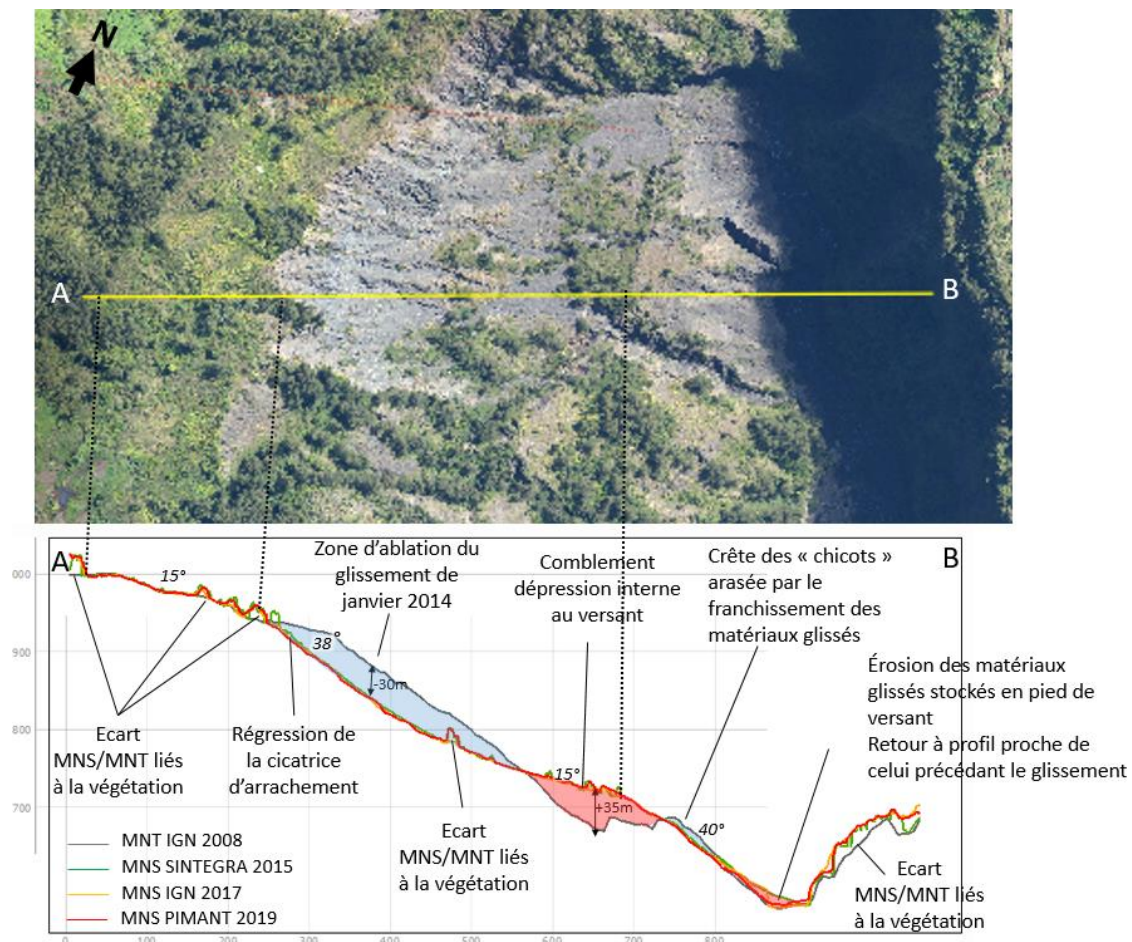
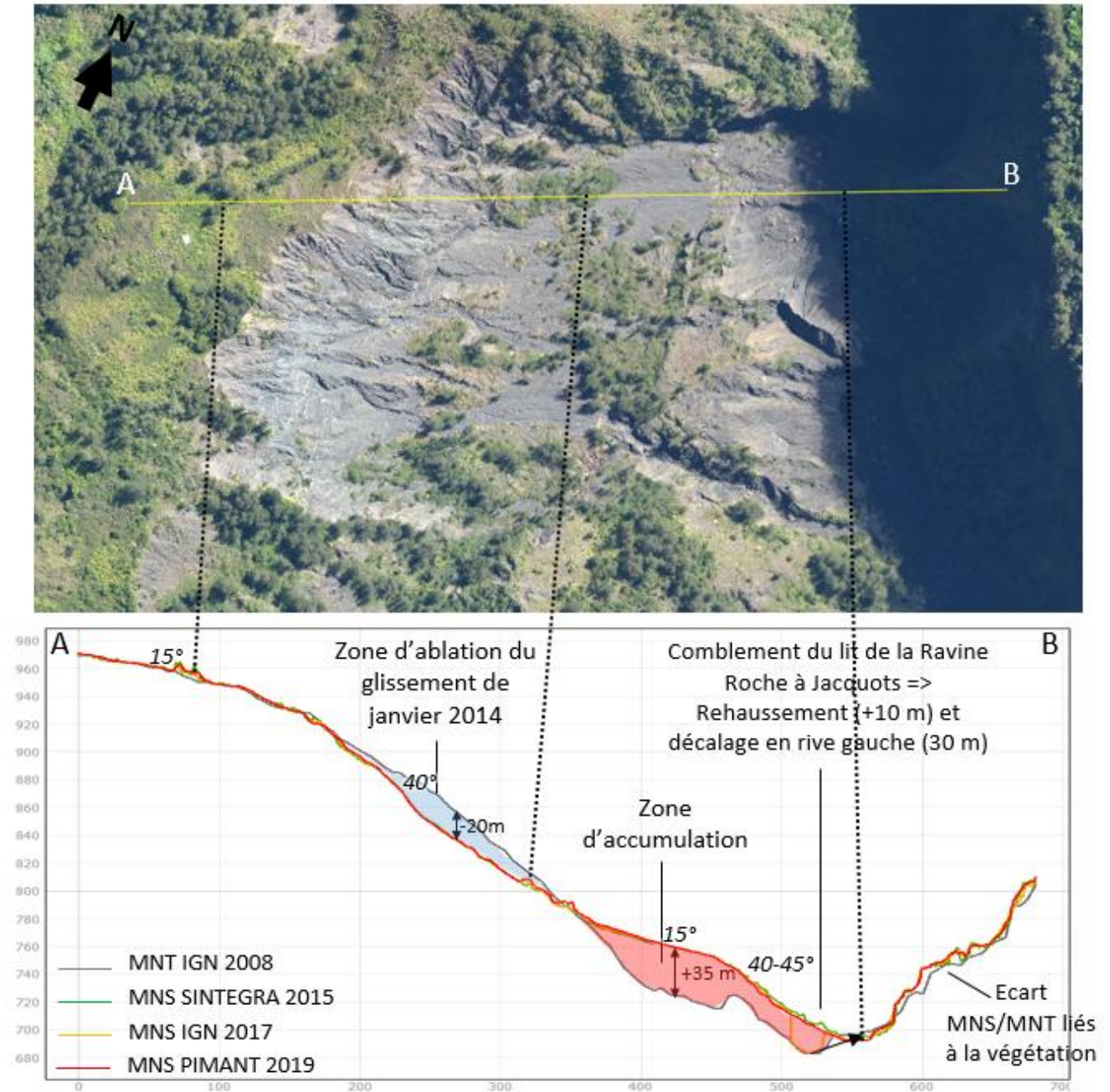


Figure 11. Profils topographiques des MNT de 2008, 2015 et des MNS de 2017 et 2019 sur un axe longitudinal au sud du glissement de Ravine Roche à Jacquot aval. En rouge sont figurées les zones d'accumulation, en bleu sont représentées les zones d'ablation. Le secteur du profil de 2017 situé dans la ravine n'est pas exploitable.

Suivi des glissements de terrain de la ravine Roche à Jacquot entre 2015 et 2019

Au nord du glissement de Ravine Roche à Jacquot aval, la comparaison des MNS de 2015, 2017 et 2019 (Figure 12) montre :

- Peu (pas) d'érosion de l'escarpement principal sur cette coupe;
- Une érosion des matériaux glissés en pied de versant conduisant à un raidissement de ce dernier ;
- Une migration progressive du lit mineur de la rivière vers la rive droite (20 m entre en 2015 et 2019) participant à l'érosion (sapement) du pied de versant ;
- Le maintien de masses glissées en pied de versant, sur des épaisseurs importantes (10-30 m), dans un contexte de pente marquée (40-45°).



3.3.2 Glissement secteur Nourry

a) *Comparaison diachronique d'images aériennes*

La comparaison diachronique des orthophotographies (2003, 2008, 2011, 2017 et 2019) (Figure 13) montre :

- En 2003, la préexistence de deux glissements en pied de versant, dont un situé dans l'axe de l'écoulement de la Ravine Nourry (phénomène de déboulé survenu en 1980 lors du cyclone Hyacinthe) ;
- Entre 2003 et 2008 :
 - o Glissement d'une centaine de mètres dans l'axe de la ravine (probable remobilisation des matériaux du déboulé de 1980), affectant les bordures et le fond de la ravine Nourry, survenu lors du passage du cyclone Dina en 2006.
 - o Apparition d'une fracture d'une centaine de mètres à l'Ouest de la ravine Nourry. Elle délimite l'amont d'un glissement ayant un déplacement de quelques mètres vers le Nord-Ouest.
 - o Incision et disparition d'un méandre en rive droite de la Ravine Roche à Jacquot.
- Entre 2008 et 2011 : pas d'évolution notoire.
- Entre 2011 et 2017 : Glissement à l'Ouest de la Ravine de Nourry lors de cyclone Béchisa le 02/01/2014. Recul d'une trentaine de mètres sur environ 60 m de large (soit 3 300 m²) de la limite tracée en 2003. L'escarpement principal de ce glissement se situe au niveau de la fracture identifiée sur l'orthophotographie de 2008.
- De 2017 à 2019 : pas d'évolution notoire.

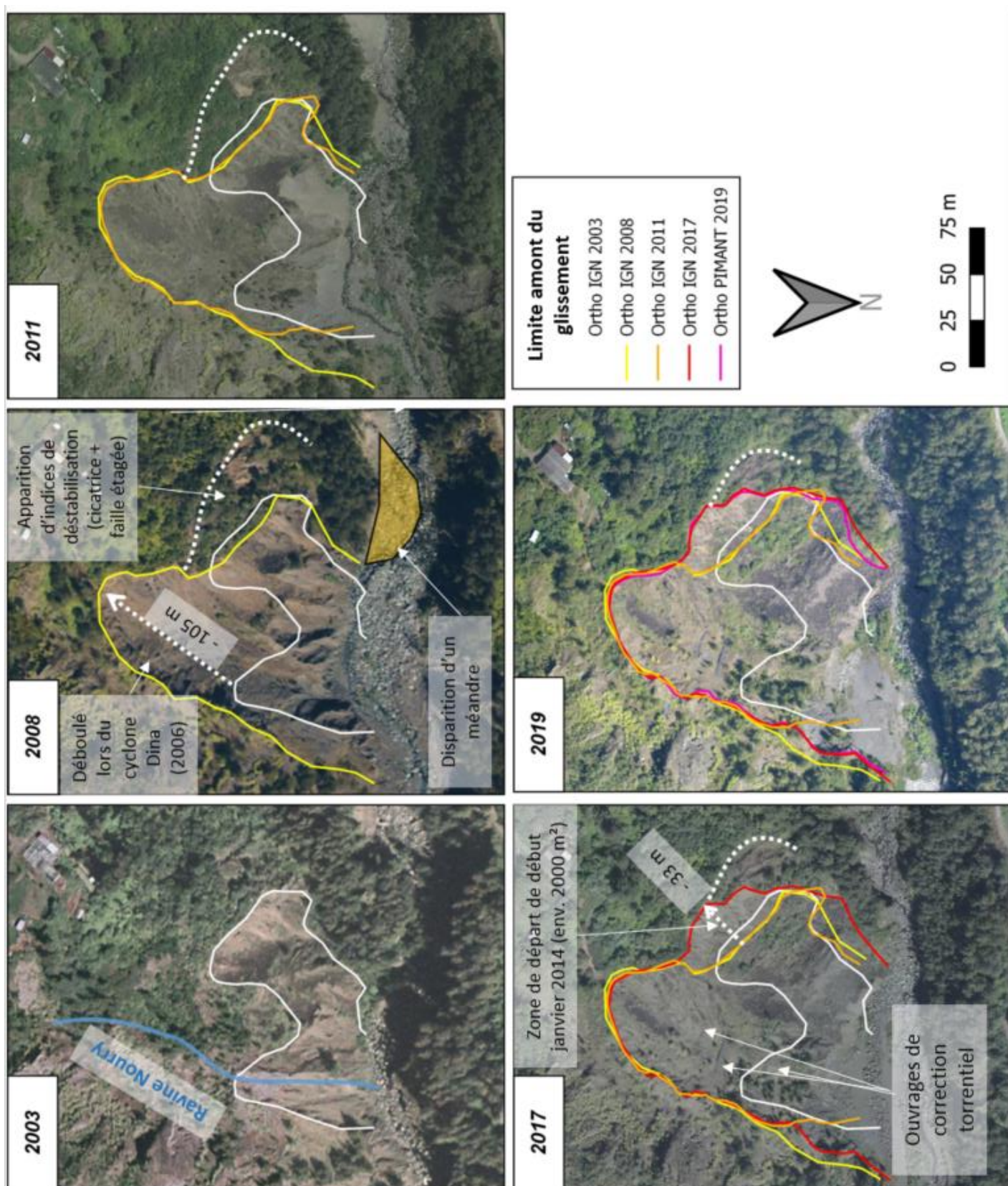


Figure 13 Comparaison diachronique des contours de la cicatrice d'arrachement sur la base des ORTHO® IGN de 2003, 2008, 2011, 2017, 2018

b) **Analyse de l'évolution topographique du glissement post-événement du 02/01/2014 par comparaison des MNS de 2015, 2017 et 2019**

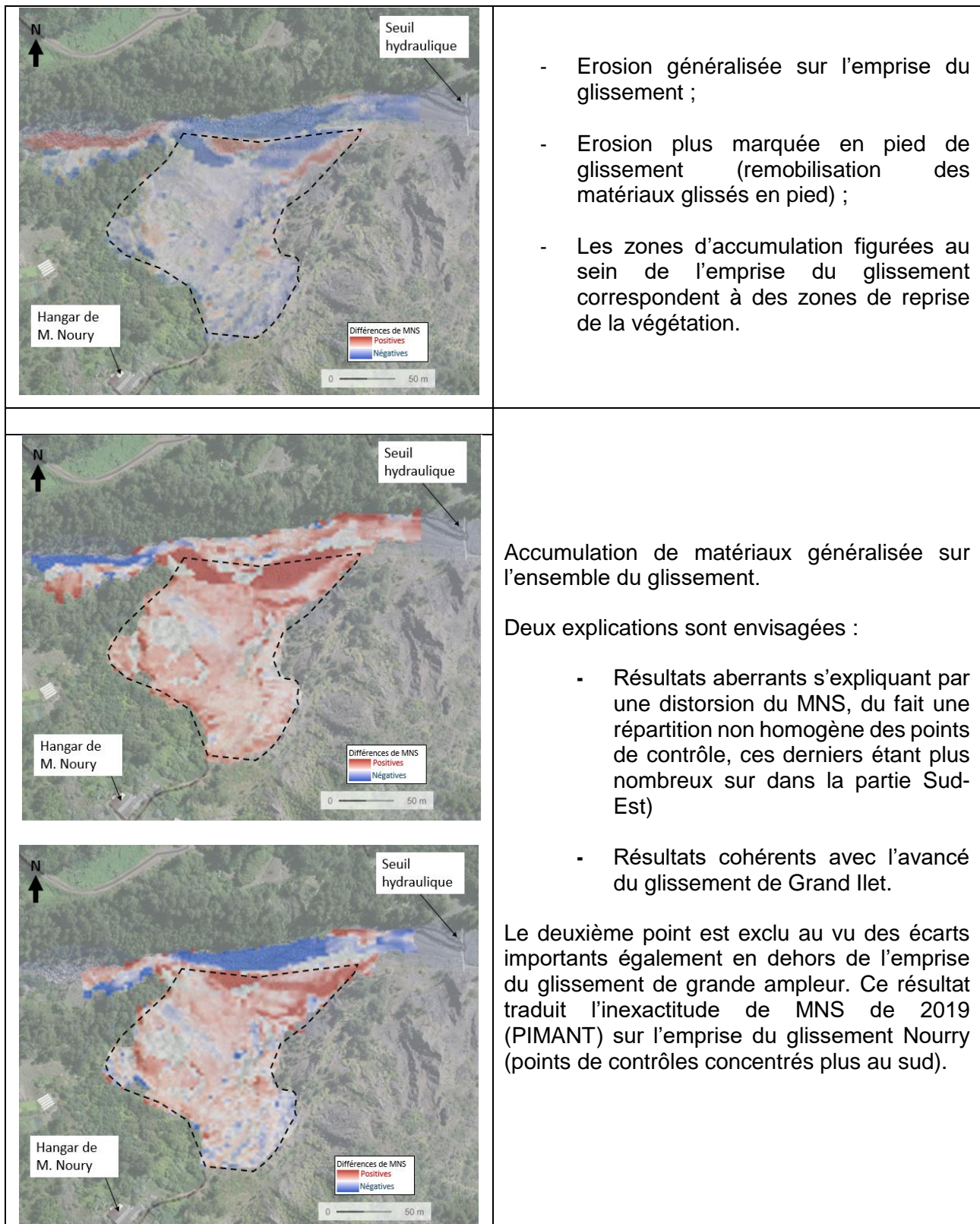


Figure 14 : Comparaison des MNS sur le secteur du glissement Nourry entre 2015 et 2017, 2017 et 2019 et entre 2015 et 2019 : Limitation des modèles dans ces zones. L'enveloppe du glissement englobant également la ravine Nourry est dessinée en pointillés noirs. En rouge figurent les zones d'accumulation et en bleu les zones d'érosion.

Au niveau du glissement Nourry, la comparaison des MNS de 2015, 2017 et 2019 montre (Figure 14 et Figure 15):

- Peu d'évolution de la zone de départ et de la zone d'accumulation ;
- Une zone accumulation de matériaux en pied de versant dans un contexte de pente marquée (40°) sur une épaisseur dépassant localement la dizaine de mètres ;
- Une surface topographique plus élevée en 2019 qu'en 2017 ou 2015. Ces résultats ne correspondent pas au contexte érosif du secteur. Ceci peut être expliqué par :
 - o Les déplacements du versant correspondant au front nord-est du glissement de Grand-Ilet dont les vitesses de déplacements sont estimées à 40-60 cm/an vers le nord-est.
 - o Une distorsion du MNS de 2019 acquis par le dispositif PIMANT en raison d'une densité de points de contrôle moins élevée sur cette zone. Cette hypothèse est la plus probable car des écarts importants entre le MNS de 2019 et les autres données topographiques sont également observés en dehors de l'emprise du glissement de grande ampleur, dans cette zone.

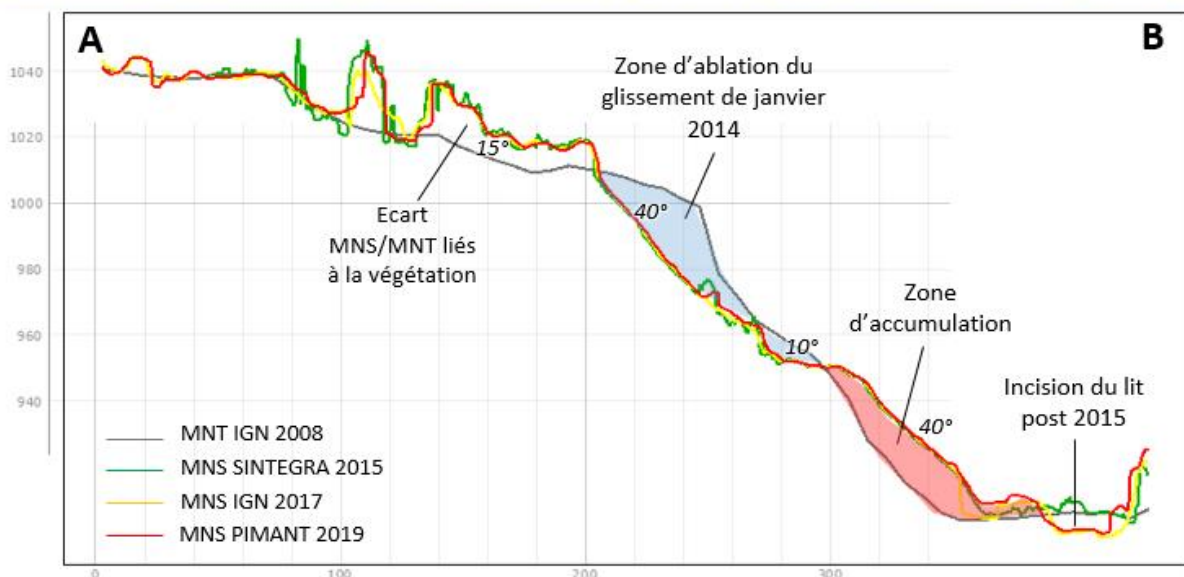


Figure 15 : Profils topographiques des MNT de 2008, 2015, 2017 et 2019 sur un axe longitudinal au Nord du glissement Secteur Nourry. En rouge sont figurées les zones d'accumulation, en bleue sont représentées les zones d'ablation.

3.3.3 Mobilité sédimentaire dans la Ravine Roche à Jacquot

Suite aux glissements, une quantité importante de matériaux s'est retrouvée dans la Ravine Roche à Jacquot. Les comparaisons des MNT d'août 2008 (IGN) et de septembre 2015 (Région/Sintégra) ont permis d'identifier un écart entre les volumes des masses glissées et celles accumulées dans le versant et en pied (voir §3.2). Cette différence est assimilable aux matériaux glissés remobilisés au cours des 20 mois suivant le déclenchement des glissements, couvrant 2 saisons cycloniques. Puis, la comparaison des MNS de septembre 2015 et d'août 2019 (Région/PIMANT) permet de suivre l'excédent de sédiments liés à ces glissements sur 47 mois couvrant 4 saisons cycloniques.

Dans le lit de la ravine, Le MNS de 2017 (IGN) n'est pas exploitable pour cette analyse car étant lissé au sein des cours d'eau, et ce à l'échelle du territoire de La Réunion.

a) A l'aval du glissement de Ravine Roche à Jacquot aval

D'après les comparaisons des MNT d'août 2008 et de septembre 2015, 175 000m³ de matériaux glissés auraient été évacués du pied du glissement au cours des 20 mois suivant l'évènement (cf. 3.2.1). Lors des reconnaissances en 2014, il avait été constaté qu'une part importante des matériaux remobilisés restait en pied du glissement et dans le lit de la rivière sur environ 500 m en aval du glissement contribuant à un exhaussement généralisé du fond de la ravine (Figure 17 a et d). Suite à la saison cyclonique 2014/2015, un abaissement de plusieurs mètres du lit sur toute sa largeur a été observé au droit du glissement et en aval immédiat (environ 200 m linéaire) (Figure 17 b et e). Plus à l'aval l'incision du lit mineur s'est concentrée en rive droite en situation d'extrados de méandre, engendrant des terrasses alluviales hautes de 4 m en rive gauche.

Ces tendances de dégraissement et d'incision se sont poursuivies comme en attestent les constats fait lors des reconnaissances de 2016 (Figure 17 f) et de 2019 (Figure 17 c) et la comparaison des MNS de septembre 2015 à d'août 2019 (Figure 16). On note également des différences positives des MNT (élévation) au niveau des berges correspondant à une possible reprise de la végétation, arrachée lors du passage de laves torrentielles associées aux débâcles.

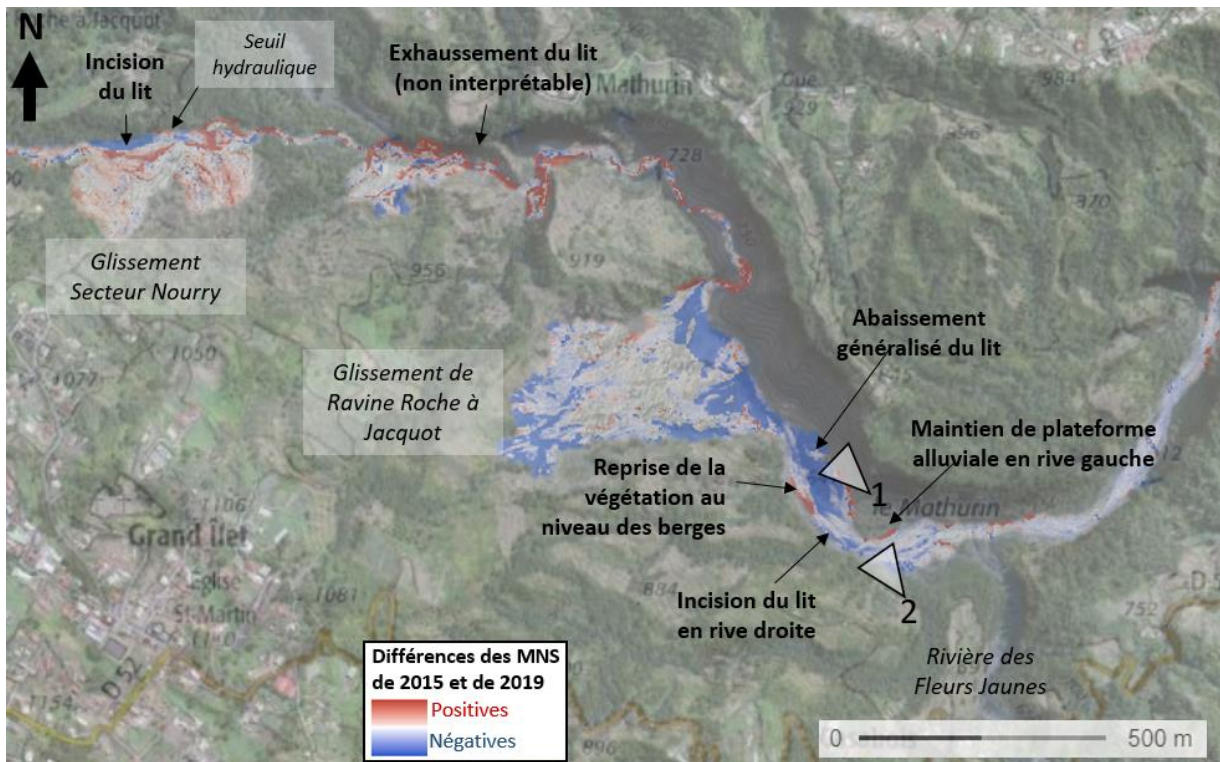




Figure 17 : Evolution du lit de la Ravine Roche à Jacquot en aval du glissement principal, en deux points localisés sur la Figure 16, entre décembre 2014 et juillet 2019 (point de vue 1) et octobre 2016 (point de vue 2).

b) **A l'aval du glissement du secteur Nourry**

La différence de volumes entre 2008 et 2015, assimilée à la remobilisation des masses glissées par la rivière et de l'ordre de 7 000m³ au niveau du glissement du secteur Nourry. Cette perte de matériaux avait été observée à la suite lors de la saison cyclonique 2014/2015 (cf. §2.2.2).

L'analyse des MNS entre 2015 et 2019 montre une incision de l'ordre de 5 m du lit de la rivière (Figure 16). Etant donné l'évacuation des matériaux glissés au sein du lit de la rivière précédemment observé, cette incision semble liée au recalibrage de la ravine dans le cadre des travaux de correction torrentielle sur ce secteur, notamment la réalisation d'un seuil hydraulique en aval immédiat du glissement et la mise en œuvre d'enrochement sur les berges et au fond de la ravine.

En aval, du seuil hydraulique achevé en 2015, la comparaison des MNT de 2015 et 2019 met en évidence une accumulation de matériaux. Ce résultat est non interprétable, car dans ce secteur le MNS 2019 est distordu. En effet, il y a peu de points de contrôle pour géo référencer le modèle, de plus du fait du fort encaissement de la ravine dans ce secteur, il y a peu de points de communs entre les photographies d'où l'introduction d'erreurs dans le modèle.

4. Evaluation des risques résiduels et recommandations

4.1. GLISSEMENT DE RAVINE ROCHE A JACQUOT AVAL

Depuis 2015, le glissement est globalement stable. On note cependant des reculs de l'ordre de la dizaine de mètres de l'escarpement principal par endroits et des phénomènes de ravinement sur le glissement. En raison de la forte pente de l'escarpement sommitale et d'une lithologie défavorable, la poursuite des phénomènes (glissements superficiels et ravinement) de réajustement morphologique pour tendre vers la pente d'équilibre à court terme (années à venir) est à prévoir.

Les masses glissées résiduelles retenues en pied de versant sur la partie sud du glissement dans un contexte de pente marquée (>40°) ne sont plus présentes et le lit est revenu à une altimétrie proche de celle précédent l'événement. A ce niveau l'aléa est équivalent à celui précédent le glissement de janvier 2014.

En revanche sur la partie nord du glissement, subsistent dans la pente de matériaux glissés lors de Béjisa sur une épaisseur importante (10-30m) soit un volume supérieur à 200 000m³. Ces masses pourraient être remobilisées, brutalement (glissement) ou progressivement (ravinement), en particulier lors d'un prochain événement pluvieux extrême. Cette situation d'instabilité est accentuée par le sapement du pied de versant par la ravine qui montre une tendance à s'inciser et à migrer en rive droite (vers le glissement).

De manière générale, lors de fortes pluies les produits de l'érosion contribuent à alimenter de façon considérable la ravine en matériaux. La déstabilisation des masses résiduelles présentes sur la partie nord du glissement peut aboutir à la formation d'un embâcle, comme cela s'est vraisemblablement produit à la suite à Béjisa. L'aléa de formation et de rupture d'un embâcle et les risques associés (exposition des usagers de la rivière) subsiste sur la zone.

4.2. GLISSEMENT DU SECTEUR NOURRY

Un volume important (~ 10 000 m³) de matériaux glissés est retenu en pied de versant, et ce sur une forte pente, également soumise à la poussée liée au déplacement du glissement de grande ampleur de Grand-Ilet. De part cette configuration, la zone est particulièrement instable.

Une évolution latérale du glissement est très probable. L'escarpement dans la continuité du glissement survenu lors du cyclone Béjisa délimite un compartiment d'environ 5 000 m², susceptible d'engendrer un glissement équivalent ou supérieur à celui survenu le 02/01/2014.

En cas de fortes pluies, les serres et l'habitations en amont de ce secteur sont directement menacées par le possible recul soudain de la bordure du plateau de Grand Ilet sur plusieurs dizaines voire centaines de mètres (déboulés) (voir rapport BRGM/RP-65204-FR¹⁵).

En raison des risques résiduels équivalents ou proches de ceux diagnostiqués en 2015 (Aunay, B., 2015, BRGM/RP-65204-FR), une poursuite de la surveillance des glissements est préconisée. Ces inspections se feront idéalement après chaque saison cyclonique ou après des phénomènes pluvieux intenses. Ces derniers peuvent être définis par les valeurs des seuils pluviométriques présentées dans le rapport concernant l'exposition des habitations du cirque de Salazie aux phénomènes gravitaires¹⁶ (soit > 2 500 mm sur 3 jours glissants ou > 5 000 mm sur 10 jours glissants). L'exposition au risque d'embâcle étant d'autant plus probable à la suite d'épisodes pluvieux importants, toute reconnaissance de terrain devra être précédée d'une reconnaissance aérienne préalable (inspection hélicoptérée ou par drone).

L'acquisition de données photographiques et topographiques régulière dans le secteur de la Ravine Roche à Jacquot est nécessaire pour suivre l'évolution des menaces résiduelles. Une acquisition après chaque saison des pluies est à envisager et est fortement conseillée.

Une surveillance à partir de l'analyse régulière des dernières images satellites disponibles (spot 5/6/7 ou Pléiades) en accès libre via des plateformes telles que SEAS-OI (Région Réunion) ou Kalidéos (CNES) pourra permettre d'identifier à moindre coût la formation d'éventuels glissements et embâcles. Cette approche est une approche complémentaire aux reconnaissances de terrain et ne pourra s'y substituer. En effet (1) elle n'apporte pas la même réactivité dans la mesure où les données sont mises à disposition que plusieurs semaines après leur acquisition, (2) les données acquises peuvent ne pas répondre à nos besoins à cause du possible délais entre l'événement et la prise de vue ou encore d'une éventuelle couverture nuageuse masquant la zone d'intérêt.

Il convient de noter que les données de topographie qui seront acquises par LiDAR, à Salazie et sur le glissement de grande ampleur de Grand Ilet notamment dans le cadre du projet de recherche publique RénovRisk-Erosion en 2019, 2020 et 2021 seront valorisées dans de prochaines publications scientifiques pour quantifier l'évolution des risques résiduels.

¹⁵ Aunay B., Bès de Berc S. et Weyland G. (2015) – Cirque de Salazie : exposition des habitations aux phénomènes gravitaires. Rapport BRGM/RP-64089-FR, 74 p.

¹⁶ Aunay B., Rey A. (2018) – Cirque de Salazie : exposition des habitations aux phénomènes gravitaires – Compléments d'informations du rapport Aunay et al (2015) - BRGM/RP-64089-FR. BRGM/RP-67984-FR.

5. Retours d'expérience sur la réalisation de campagne de photogrammétrie PIMANT pour le suivi des glissements de terrain

Le dispositif PIMANT a permis d'acquérir un modèle numérique de surface avec une précision adaptée à la caractérisation des phénomènes sur le glissement de Ravine Roche à Jacquot aval. Cette donnée a pu être comparée à des données acquises par d'autres dispositifs. Le protocole d'acquisition déployé en 2019 reste perfectible pour éviter les distorsions observées sur les zones périphériques peu contraintes par des points de contrôle.

Dans le cadre de la surveillance des glissements de Ravine Roche à Jacquot, quatre campagnes de photogrammétrie ont été réalisées avec une fréquence annuelle depuis 2016 au moyen du dispositif PIMANT. Ces campagnes ont été réalisées sur une large emprise couvrant en grande partie Grand Ilet et a fortiori les glissements suivis. Les campagnes et le traitement des données ont été financés et réalisés par l'équipe de projet PIMANT. En raison de problèmes techniques dans un premier temps (campagne 2016), puis d'une phase de mise au point des protocoles d'acquisition en contexte fortement accidenté (campagne 2017 et 2018), seule la campagne réalisée en août 2019 a été valorisée dans le cadre de cette étude.

Les données acquises lors de cette campagne étaient de relativement bonne qualité contrairement à celle des années précédentes qui était insuffisante pour être utilisée dans le cadre de cette étude. C'est pourquoi, il a, pour ces années, été préféré l'utilisation des données de topographie disponibles par ailleurs (cf. section 3.1).

Sur la zone d'étude, les lits de cours d'eau situés au fond de profonds encaissements se retrouvent au sein de zones d'ombre gênantes pour la création par photogrammétrie des orthophotos et des modèles de topographies et pour leur analyse a posteriori. Dans les zones moins escarpées, le MNS PIMANT 2019, équivalent à un MNT sur les zones dépourvues de végétation, est de cohérent avec les observations de terrain et les autres données de topographie disponibles.

Les enseignements tirés des campagnes de photogrammétrie au moyen du dispositif PIMANT sont :

- Définir un plan de vol permettant un taux de recouvrement entre les images de l'ordre de 60-80%. Ce sur-échantillonnage permet un traitement des données acquises au moyen de logiciels commerciaux tels que Pics4d et ainsi de s'affranchir de la chaîne de traitement conçue pour le dispositif PIMANT, complexe à prendre en main bien que restant la méthode optimale pour la production d'un MNS à partir du dispositif PIMANT.
- Opter pour un horaire de vol en fin de matinée, pour profiter d'une lumière zénithale. Lors de la campagne de 2016, le levé photogrammétrique a été réalisé au lever du jour avec une très faible luminosité de sorte à limiter les contrastes au sein des zones d'ombre et aussi de bénéficier de conditions météorologiques plus favorables. Les données obtenues étaient bruitées et la résolution du MNS produit était bien en deçà des capacités du dispositif, rendant alors le géoréférencement du modèle impossible, les mires positionnées n'étant pas visibles sur les images aériennes.
- Multiplier les points de contrôle et veiller à harmoniser leur densité sur l'ensemble de la zone d'acquisition ou a minima de la zone d'intérêt. En effet, dans les contextes fortement accidentés, les erreurs de géoréférencement des MNS sont à l'origine d'erreurs significatives sur des comparaisons altimétriques. Le positionnement de points de contrôle aux sommets et aux pieds de versants est à privilégier. Afin de minimiser la distorsion des modèles de topographie au niveau des falaises, il est recommandé de densifier la quantité de photographies dans ces zones.

- Matérialiser les points de contrôle par des mires de dimensions égales ou supérieures à 0,5 x 0,5 m. Celles-ci mises en œuvre en 2019, étaient facilement identifiables alors que les mires utilisées en 2016 de 0,3 x 0,3 m, n'étaient pas visibles (conséquence également d'images aériennes avec une résolution dégradées). Les mires de couleurs (peinte au sol en rose ou orange fluo à la peinture temporaire de chantier) étaient bien visibles dans le lit de la Ravine Roche à Jacquot. Tandis que les mires sous la forme de quadrant noir et blanc sur un panneau de 0,5 x 0,5 m étaient clairement identifiables sur les pelouses, sur lesquelles il aurait été dans tous les cas délicats de peindre une mire.

Une prochaine convention de partenariat Région/BRGM a pour objectif la mise au point d'un protocole d'acquisition et le développement d'outils pour la caractérisation de mouvements de terrain.

6. Conclusions

Les premiers diagnostics des glissements de terrain de la Ravine Roche à Jacquot post-Béjisa ont été réalisés à partir d'inspections visuelles terrestres et héliportées. L'approche déployée dans le cadre de la poursuite de ce suivi a consisté à comparer des données topographiques existantes ou acquises spécifiquement pour quantifier l'évolution de ces instabilités.

On regrettera que les premières acquisitions de topographie au moyen du dispositif de photogrammétrie PIMANT, en phase expérimentale, n'aient pas pu être valorisées dans le cadre de ce projet en raison de biais de géoréférencement trop importants rendant délicat toute comparaison. L'amélioration du protocole d'acquisition et de traitement fera l'objet d'actions spécifiques en partenariat avec la Région.

Les tendances d'évolutions morphologiques appréciées visuellement lors des premières reconnaissances sont confirmées par cette analyse quantitative. Cette dernière permet toutefois de réévaluer à la hausse l'estimation de volume de ces instabilités des glissements de terrain et de quantifier les masses glissées résiduelles. Ainsi il est mis en évidence :

Sur le glissement de Ravine Roche à Jacquot aval:

- Une érosion régressive de l'escarpement principal. Celle-ci pourrait se poursuivre, la pente amont du glissement restant supérieure à la pente d'équilibre du versant ;
- L'incision du lit de la Ravine Roche à Jacquot en aval du glissement;
- La disparition des masses résiduelles en pied de versant au sud du glissement ;
- La persistance de masses glissées volumineuses (>200 000m³) au pied du versant au nord du glissement dans un contexte de fortes pentes dont le pied est soumis à une érosion hydraulique.

Sur le glissement Nourry :

- Peu d'évolution de la géométrie du glissement depuis l'événement du 02/01/2014 hormis une incision du lit de la ravine suite à l'événement et une accumulation de matériaux en pied;
- La persistance de masses glissées en pied de versant dans un contexte de fortes pentes topographiques. Ces masses sont susceptibles de créer, en cas de glissement un embâcle ou éventuellement des laves torrentielles, lors de remobilisations de matériaux par les écoulements de la ravine ;
- La présence d'un compartiment délimité à l'amont par un escarpement dans la continuité de la cicatrice d'arrachement du glissement du 02/01/2014, laisse présager une régression

latérale du glissement. Celle-ci pourrait mobiliser un volume équivalent voire supérieur celui survenu lors du cyclone BÉJISA.

Les recommandations demeurent inchangées par rapport à 2015 et se résument en la poursuite de la surveillance. Les modèles de surface produits par le dispositif PIMANT, l'accessibilité des images satellites ou la démocratisation des survols par drones permettent dorénavant d'envisager une « télésurveillance » des glissements sous réserve de la disponibilité de ces données et de leur exploitabilité (absence de couverture nuageuse). Les nouvelles acquisitions de topographie par LiDAR, prévues en 2019, 2020 et 2021 dans le cadre du projet de recherche publique RenovRisk, permettront de suivre les évolutions du glissement et en particulier les masses résiduelles potentielles instables.



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

Direction régionale de La Réunion
5 Rue Sainte-Anne – CS 51016
97404 – Saint-Denis Cedex – La Réunion – France
Tél. : 02 62 21 22 14