

# **SUIVI DES GLISSEMENTS DU SITE DE STOCKAGE DE REMBLAI DES SOLS LATERITIQUES NICKELIFERES D'AMBATOVY MADAGASCAR PAR IMAGES SATELLITES MULTIDATES**

## ***FOLLOW UP OF STOCKPILE LANDSLIDE OF AMBATOVY NICKEL LATERITIC SOIL IN MADAGASCAR BY MULTIDATES SATELLITE IMAGE***

Fidiniavo Ravokatra et Lala Andrianaivo

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Laboratoire de  
Géotechnique, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar, e-mail : [fidiniavo@yahoo.fr](mailto:fidiniavo@yahoo.fr)

### **Résumé**

Le site de stockage ST5 de remblai des sols latéritiques nickélicifères d'Ambatovy ayant une hauteur moyenne de 47m est exposé au phénomène d'instabilité de talus. La méthode indirecte par analyse des images satellites multitudes du Google Earth entre 2011 à 2017 et par traitement Système d'Information Géographique à l'aide de logiciel ArcGIS version 10 a été utilisée pour identifier et suivre les glissements de terrain du site.

Il a vécu quatre (4) événements de glissement dont deux (2) sont ceux du flanc de talus et deux (2) du pied de talus.

Deux (2) dispositifs de confortation de talus sont suggérés : le drainage et l'enherbement.

*Mots clés : glissement, sols latéritiques nickélicifères, images satellites multitudes, drainage, enherbement, Ambatovy*

### **Abstract**

*The stockpile ST5 of Ambatovy nickel lateritic soil with average height 47m is exposed to the risk of landslide. The indirect method by multitudes satellite image of Google Earth between of 2011 to 2017 and by Geographical Information System ArcGIS software version10 is used to identify and follow up the landslide event.*

*The site is lived four (4) landslides' event whose two (2) are hillside and two (2) toe of embankment slope.*

*Two (2) comfort devices are proposed: drainage and grassing.*

*Key words: landslide, nickel lateritic soil, multitudes satellite images, drainage, grassing, Ambatovy*

## **1. INTRODUCTION**

Le Projet Ambatovy est l'un des grands projets miniers optant la méthode d'exploitation des mines à ciel ouvert à Madagascar voire dans la région de l'océan indien et de l'Afrique. Les ouvrages géotechniques réalisés dans l'exploitation des mines à ciel ouvert sont les ouvrages en terre déblais profonds et remblais à grande hauteur. Huit (8) sites sont aménagés pour le stockage de différents types des sols issus de l'excavation. Six (6) sites sont destinés à recevoir les sols latéritiques à faible teneur en nickel à Ambatovy estimée à inférieure à 1% (PGES – Opération d'Ambatovy, 2013). Ils se feraient objet des futures zones d'exploitation minière à partir de la vingtième année du début de l'exploitation tout en espérant ultérieurement que la qualité et la quantité des réserves répondraient aux conditions et exigences du marché à cette époque (EIE d'Ambatovy, 2006).

Cette étude se limite à l'ouvrage en terre de remblai des terrils miniers à faible teneur en nickel qui est constitué par le sol d'assise et le corps du remblai.

Le stockage ST5 est le principal site parmi ces six (6) et est l'objet de la présente étude.

La compréhension de l'évolution spatio-temporelle de ce site de stockage ST5 à l'aide de la méthode indirecte acquisition des images satellites multitudes permet d'identifier et de suivre les glissements vécus par ce site.

La proposition de dispositif de confortation de talus vise à éviter ou atténuer les glissements potentiels de ce site.

## **2. MATERIELS ET METHODES**

La méthodologie de l'étude comprend l'approche, les démarches suivies, et les moyens utilisés à la production des données issues de l'analyse des images satellites et des cartes thématiques de la hauteur du remblai à chaque point du site de stockage pour un temps déterminé.

### **2.1. Approche**

Les images satellites utilisées dans ce travail sont issues d'un logiciel cartographie sur web appelé Google Earth. Le terme multitudes signifie capturer les clichés des différentes périodes disponibles pour un endroit bien délimité. Des informations quantitatives obtenues par la mesure des paramètres se rapportant à la délimitation géométrique d'un site pour une capture sont traitées à l'aide de calcul des écarts relatifs par rapport à une suivante capture.

### **2.2. Démarches**

Elles se reposent sur l'acquisition des données multi dates de la télédétection par le logiciel Google Earth version gratuite Mars 2017 et sur leur traitement par le Système d'Information Géographique à l'aide du logiciel ArcGis version 10 et Microsoft Excel.

#### *2.2.1. Acquisition des différentes images satellites multitudes*

L'acquisition des différentes images satellites multi dates est basée sur la capture du cliché de photo satellite d'une date donnée.

Selon les différentes phases de développement du projet Ambatovy, l'année 2011 est prise la référence temporelle pour le suivi de l'évolution de stockage dans l'empreinte minière. Dix (10) clichés sont capturés entre Février 2011 – Mars 2017 pour les images satellites mais pour l'analyse thématique trois références temporelles sont établies à savoir les années 2011, 2013, et 2017.

#### *2.2.2. Traitement d'un cliché obtenu*

D'un cliché donné, la géométrie d'un tas de stockage est délimitée par son périmètre de base et celui du sommet à l'aide des outils de traçage de polygones offerts par Google Earth.

La valeur d'un paramètre géométrique qui est obtenue à l'aide de l'outil servant à mesurer la polygone ou le polygone est affichée sur deux fenêtres dénommées fenêtres de mesure. La première fenêtre affiche :

- la date de capture d'image ;
- la valeur de la surface délimitée ;
- et la valeur du périmètre délimité.

La deuxième fenêtre donne les informations suivantes sous l'onglet affichage :

- les coordonnées du centre de l'image ;
- la distance de capture de l'image ;
- l'inclinaison de l'image ;
- la direction de l'image captée ;
- la date de la capture d'image.

#### *2.2.3. Traitement des paramètres mesurés*

Les indicateurs de l'évolution spatio-temporelle sont subdivisés en deux types de paramètres :

- Les paramètres mesurés tels la superficie, le périmètre de base et du sommet du site et la longueur de la pente qui sont déterminés sur le cliché à l'aide de l'outil de mesure de distance ;
- Les paramètres calculés qui sont chiffrés à partir de ceux de mesurés à savoir la longueur moyenne des pentes, les écarts relatifs constatés entre deux dates de capture consécutive et le ratio d'évolution spatio-temporelles afférents à la superficie et au périmètre.

Les paramètres mesurés sont traités avec le logiciel Microsoft Excel dans le but de déterminer les paramètres calculés :

- Longueur moyenne de la pente

Elle est la moyenne arithmétique des longueurs de pentes mesurées autour du site de stockage.

- Ecart relatif de superficie ou de périmètre

Le nombre de jours d'analyse de situation est la période  $P = (t+1) - t$

avec P : Période d'analyse en jour

t : temps de capture d'un cliché

t+1 : temps de capture suivante du même cliché

L'écart dans l'espace est la différence entre deux superficies ou périmètres d'un site de stockage pour deux temps de capture consécutifs.

- Ratio d'évolution spatio-temporelle

Ratio d'évolution spatio-temporelle est le rapport entre l'écart dans l'espace de deux captures consécutives d'un lieu et le nombre de jours d'analyse de la situation.

Le ratio d'évolution spatio-temporelle superficie en  $m^2/j$  et celui du périmètre le calcul de ratio d'évolution spatio-temporelle périmètre en  $m/j$ .

#### 2.2.4. Traitement de la représentation cartographique

La représentation cartographique qui permet la valorisation et capitalisation des relations spatiales d'un ou plusieurs phénomènes ou thèmes est la cartographie thématique. Cette dernière est un outil d'analyse et d'aide à la décision et de communication pour représenter de variables.

Une carte thématique sur la hauteur du remblai du site est créée pour apprécier l'évolution spatio-temporelle de ces trois (3) sites de stockage cité supra dans la dimension verticale.

### 2.3. Moyens

Les principaux moyens utilisés pour évaluer l'évolution spatio-temporelle sont :

- la télédétection qui est le domaine offrant des images satellites à partir desquels des séries de données sont obtenues à l'aide du logiciel cartographie basé sur le web appelé Google Earth en version gratuite. Ce logiciel offre de ses fonctionnalités la localisation des sites étudiés, la délimitation de leur contour, et de leur profil topographique ;
- le Système d'Information Géographique qui permet de tracer l'emplacement, la distribution spatiale ainsi que les données attributaires décrivant les caractéristiques géographiques par le logiciel ArcGis version 10.

## 3. RESULTATS

L'exploitation de nickel et cobalt du Projet Ambatovy est située à environ 120km à l'Est de la capitale Antananarivo de Madagascar, et environ à 15km au nord nord-est de Moramanga. Elle appartient à la circonscription administrative de la Région d'AlaotraMangoro, District de Moramanga et embrasse trois (3) Communes Rurales Morarano Gare, Ambohibary et Andasibe.

Le stockage des différents sols latéritiques issus de l'excavation de l'exploitation de la mine se fait par la méthode de remblayage. Huit (8) sites se sont servis à ce stockage et répartis dans différents endroits de l'empreinte minière selon une sélection par teneur en nickel :

- Deux(2) sites de stockage de remblai des sols latéritiques à haute teneur en nickel dénommés ST1 et ST2 ;
- Six (6) sites de stockage de remblai des sols latéritiques à faible teneur en nickel dénommés ST3, ST4A, ST4B, ST4C, ST5 et ST6

La figure 01 illustre la localisation de ces sites de stockage de remblais des sols latéritiques en 2011 (PGES-OP, 2013).

Cette étude se limite au site de stockage principal ST5 ayant comme coordonnées de centre 18°51'7.66"S et 48°17'26.66"E. Dix (10) clichés sont capturés de l'année 2011 au 2017.

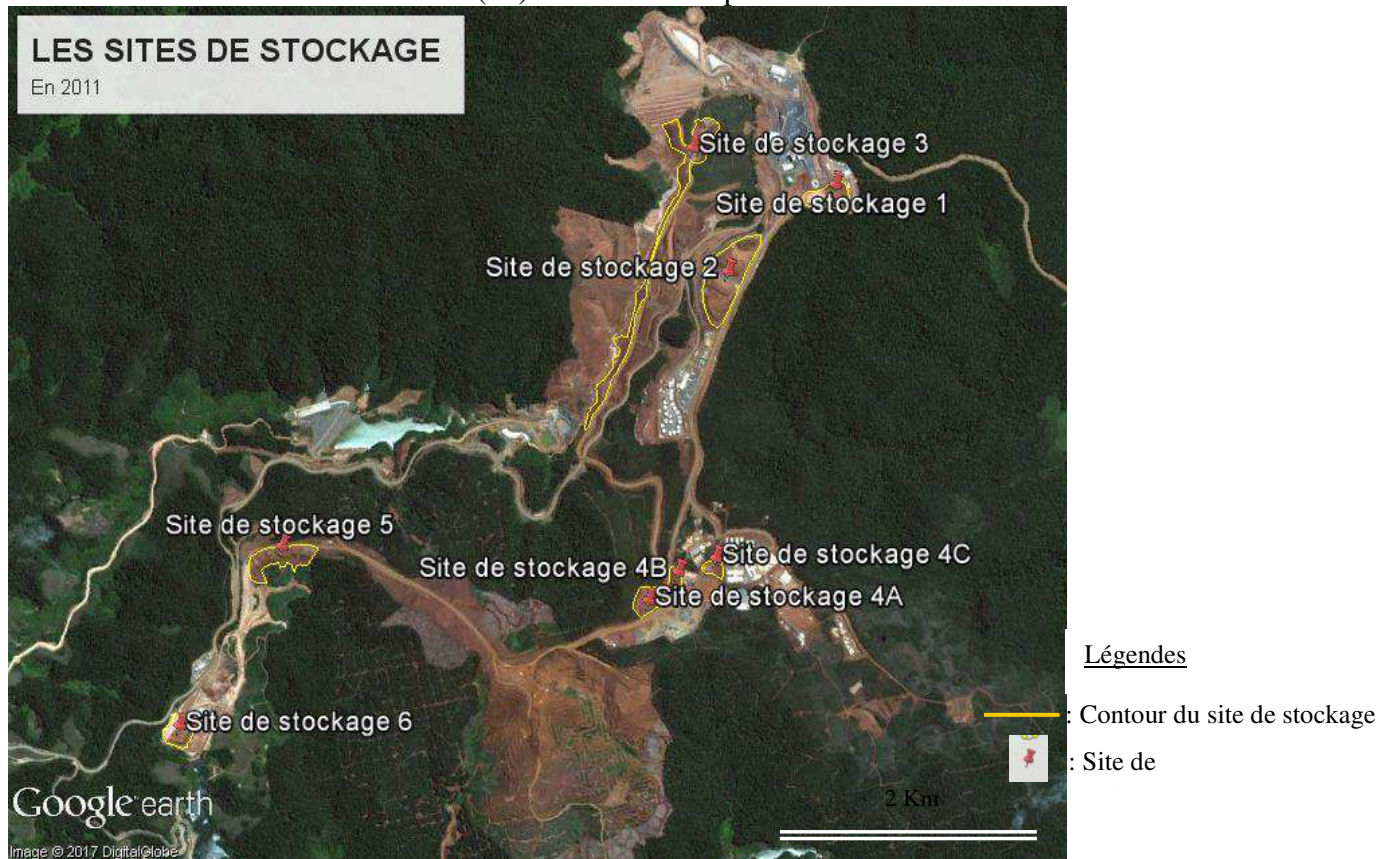


Figure 01: Carte de localisation des sites de stockages de remblai (Source : PGES – Opération du projet Ambatovy, 2013)

### 3.1. Acquisition des images satellites multitudes

Un cliché est illustré par la délimitation du périmètre de base et celui du sommet ainsi que quelques longueurs de pente.

Les informations de capture des clichés sont résumées dans le tableau 01.

Tableau 01: Informations de capture des clichés du site de stockage ST5

| Cliché N° | Date de capture   | Distance de capture (m) | Figure |
|-----------|-------------------|-------------------------|--------|
| 01        | 19 Février 2011   | 464                     | 02     |
| 02        | 29 Décembre 2011  | 662                     | 03     |
| 03        | 07 Mars 2012      | 689                     | 04     |
| 04        | 23 Septembre 2012 | 668                     | 05     |
| 05        | 12 Mars 2013      | 675                     | 06     |
| 06        | 28Mai 2013        | 679                     | 07     |

|    |                   |       |    |
|----|-------------------|-------|----|
| 07 | 25 Septembre 2013 | 662   | 08 |
| 08 | 01 Novembre 2013  | 617   | 09 |
| 09 | 16 Octobre 2016   | 1 493 | 10 |
| 10 | 15 Mars 2017      | 1 599 | 11 |

Les figures 02 à 11 traduisent en cliché d'images l'évolution spatio-temporelle du site de stockage ST5 entre 2011 et 2017.

La figure 02 montre l'état du site de stockage ST5 en 19 Février 2011.

La partie défrichée en contre bas de la pente du talus de la piste en terre présente la superficie occupée par le remblai des sols latéritiques nickélifères à faible teneur en nickel.

Le remblai évolue en forme conique à sommet aplati dont le contour orange sur la figure délimite le périmètre du sommet tandis que le vert est celui de la base. Les droites en couleur blanche sont les traces de mesure de longueur de pente en différents points de mesure du versant de remblai.

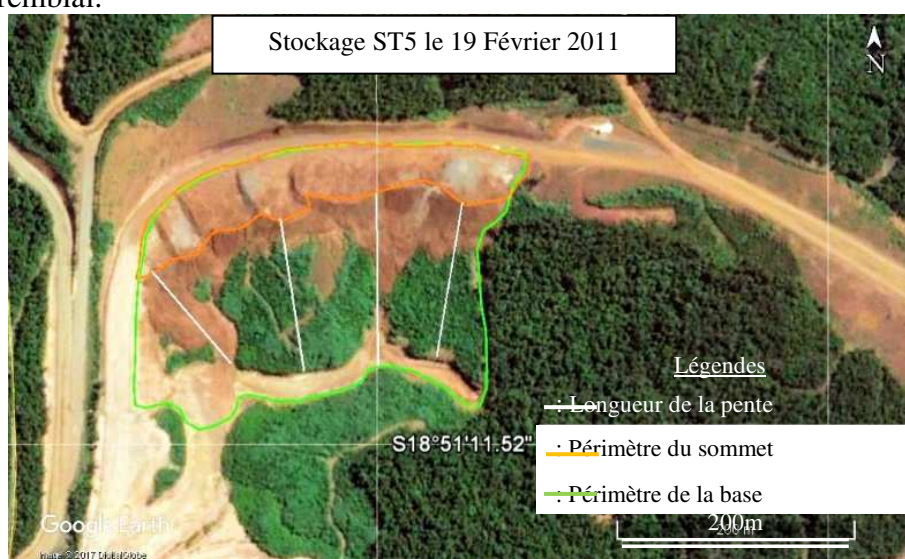


Figure 1: Site de stockage ST5 en 19 Février 2011

La figure 03 montre l'état du site de stockage ST5 en 29 Décembre 2011.

La forme conique à sommet aplati du remblai se précise en évoluant dans la direction sud – est et sud. Ce sommet aplati présente de différents niveaux sous formes d'escalier ; et sa superficie entourée par la ligne orange et celle de la base entourée par la ligne verte s'élargissent dans ces directions.

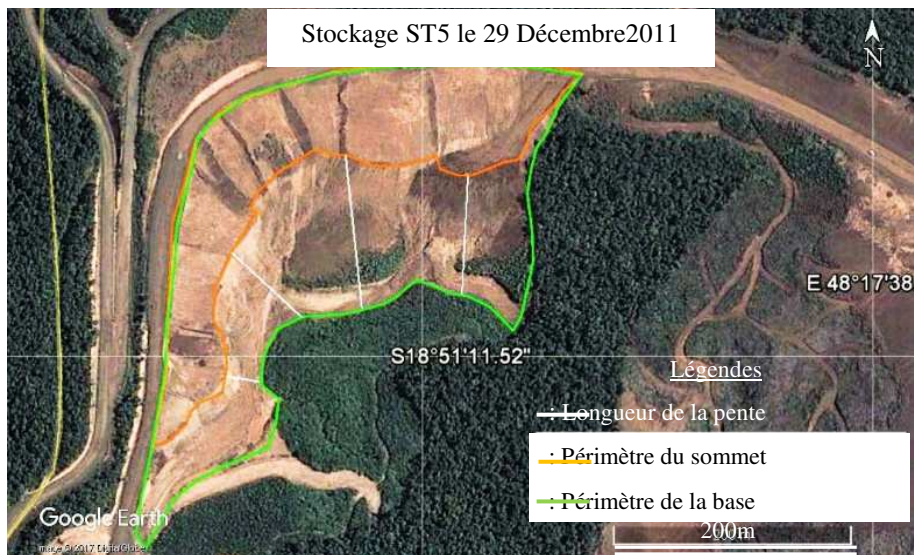


Figure 2: Site de stockage ST5 en 29 Décembre 2011

La figure 04 illustre l'état du site de stockage ST5 en 07 Mars 2012 qui est marquée par

- l'élargissement de la superficie de la base ;
- la pente du talus qui devient plus raide ;
- la présence d'eau au pied de talus.

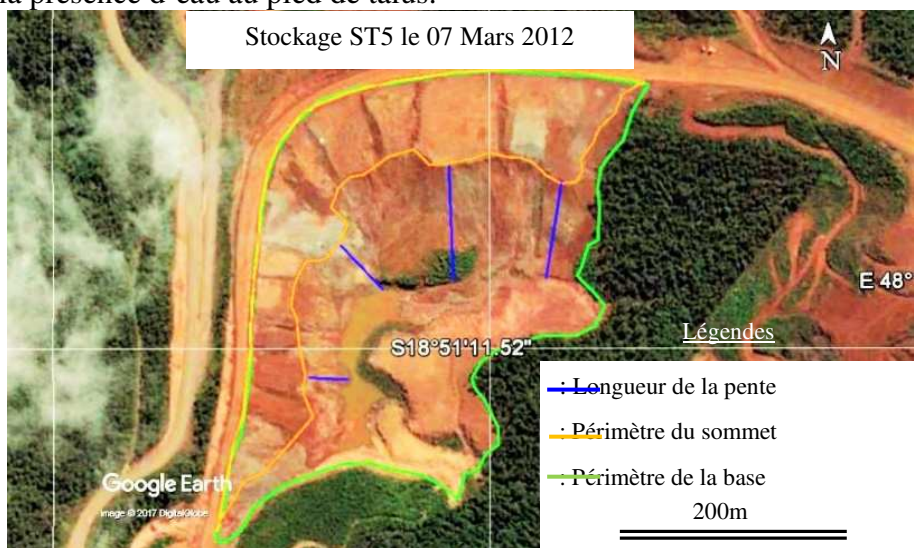


Figure 3: Site de stockage ST5 en 07 Mars 2012

La figure 05 qui décrit de l'état du site de stockage ST5 en 23 Septembre 2012 témoigne

- le déplacement de la tête du talus vers le bas dans la direction sud ainsi que celui de la partie du versant ;
- l'élargissement de la superficie du sommet du talus dans la direction sud également ;
- la présence du dépôt des sols au pied du talus.

Stockage ST5 le 23 Septembre 2012

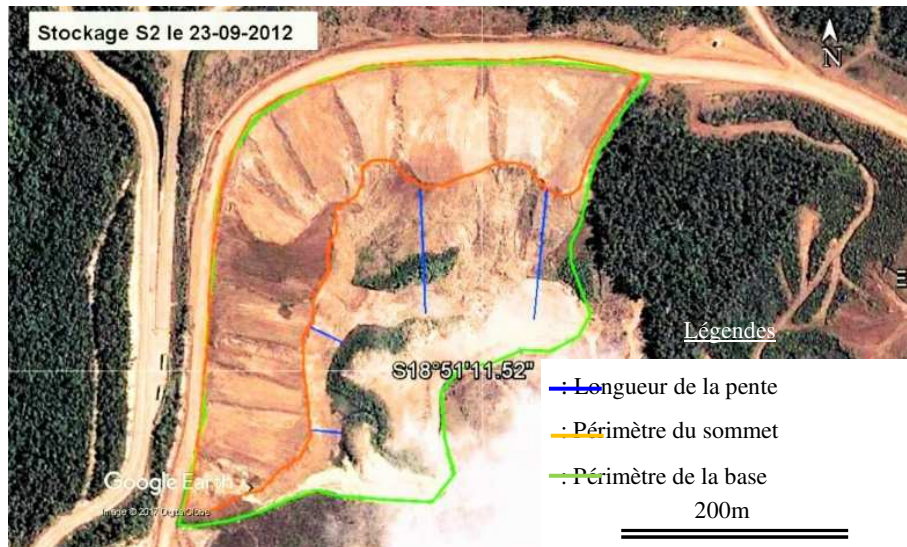


Figure 4: Site de stockage ST5 en 23 Septembre 2012

La figure 06 montre l'état du site de stockage ST5 en 12 Mars 2013 qui dessine la continuité de

- déplacement de la tête du talus vers le bas dans la direction sud ainsi que celui de la partie du versant ;
- l'élargissement de la superficie du sommet du talus dans la direction sud également ;
- l'élargissement également de la superficie de base avec l'abondance du dépôt des sols au pied du talus.

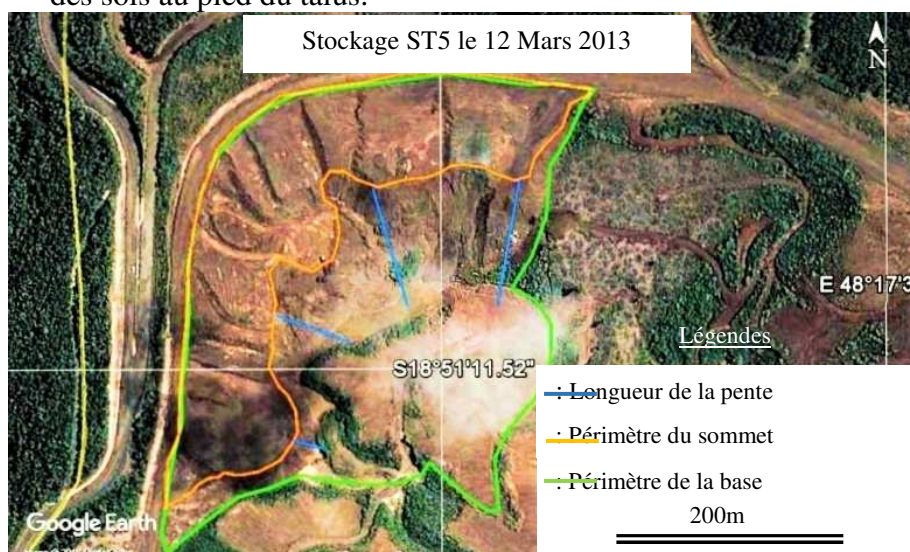


Figure 5: Site de stockage ST5 en 12 Mars 2013

La figure 07 illustre l'état du site de stockage ST5 en 28 Mai 2013 qui apparaît :

- la formation des trois (3) tas de remblai issus des ouvertures à partir du sommet de ce site ;
- déplacement du versant du premier tas au nord vers le sud ;
- déplacement du versant du tas au centre vers le sud – est ;
- déplacement du versant du tas au sud vers l'est.

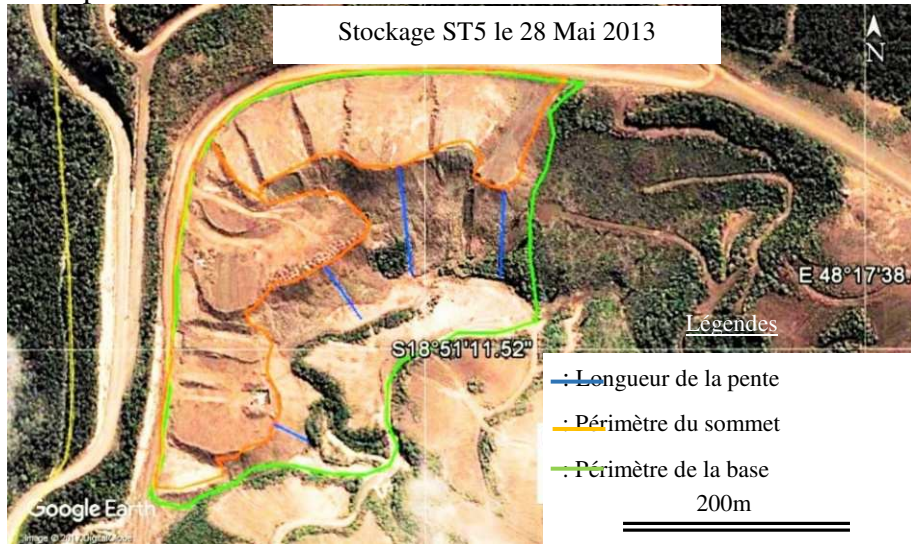


Figure 6: Site de stockage ST5 en 28 Mai 2013

La figure 08 montre l'état du stockage du site ST5 en 25 Septembre 2013 et fait voir

- l'étalement de la superficie du sommet ;
- le remplissage de la superficie de base ;
- l'affaiblissement de la pente du versant.

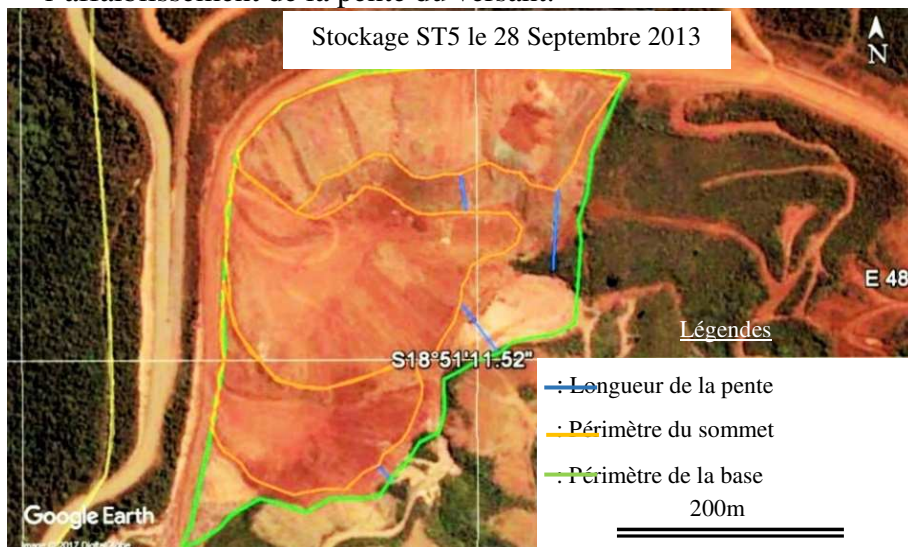


Figure 7: Site de stockage ST5 en 25 Septembre 2013

La figure 09 décrit l'état du site de stockage ST5 en 01 Novembre 2013 caractérisée par

- la fusion des trois (3) tas apparus précédemment ;
- l'étalement de la superficie du sommet ;



- l'allongement de la pente dans la direction nord au sud.

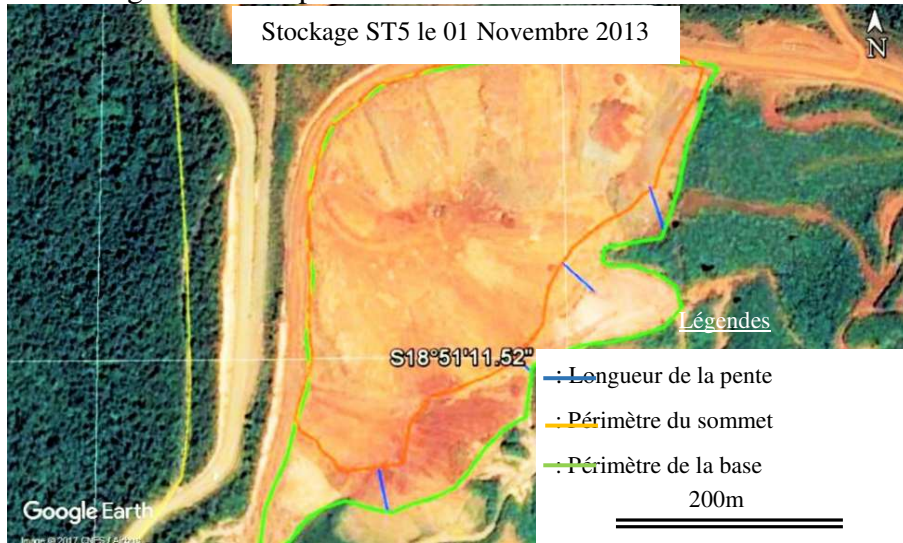


Figure 8: Site de stockage ST5 en 01 Novembre 2013

La figure 10 illustre l'état du site de stockage ST5 en 16 Octobre 2016 et fait ressortir l'élargissement de la superficie du sommet et de la base du site tandis que leur périmètre reste constant.

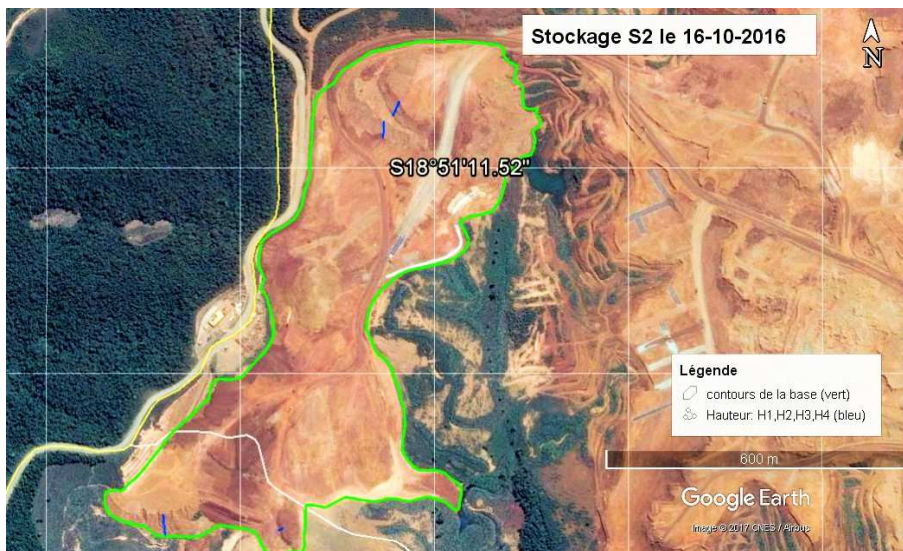


Figure 9: Site de stockage ST5 en 16 Octobre 2016

La figure 11 fait voir l'état du site de stockage ST5 en 15 Mars 2017 lequel est devenu un ensemble de tas de stockage dont la circulation à l'intérieur est reliée par des voies de desserte piste en terre.



Figure 10: Site de stockage ST5 en 15 Mars 2017

### 3.2. Indicateurs de l'évolution spatio-temporelle du site de stockage ST5

L'évolution spatio-temporelle du site de stockage ST5 est caractérisée par les indicateurs décrivant les changements observés au sommet et à la base ainsi qu'au niveau de la longueur des pentes.

#### 3.2.1. Evolution de géométrie de la base du site de stockage ST5

Le tableau 02 ci-après résume les indicateurs de l'évolution spatio-temporelle de la base du site de stockage ST5 regroupant les paramètres mesurés et calculés de cette évolution.

Tableau 02: Indicateurs de l'évolution spatio-temporelle de la géométrie de base du site de stockage ST5

|  | 19 Fév<br>2011 | 29 Déc<br>2011 | 07 Mars<br>2012 | 23 Sept<br>2012 | 12 Mars<br>2013 | 28 Mai<br>2013 | 25 Sept<br>2013 | 01 Nov<br>2013 | 16 Oct<br>2016 | 15 Mars<br>2017 |
|--|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Base du stockage ST5   |                |                |                 |                 |                 |                |                 |                |                |                 |
| Superficie (m <sup>2</sup> )                                       | 58 564         | 70 504         | 92 500          | 89 421          | 100 857         | 91 064         | 91 246          | 89 190         | 356 096        | 408 239         |
| Périmètre (m)  | 1 044          | 1 383          | 1 425           | 1 304           | 1 415           | 1 320          | 1 323           | 1 405          | 3 533          | 3 928           |
| Ecart relatif superficie (m <sup>2</sup> )                         |                | 11 940         | 21 996          | -3 079          | 11 436          | -9 793         | 182             | -2 056         | 266 906        | 52 143          |
| Ecart relatif périmètre (m)  |                | 339            | 42              | -121            | 111             | -95            | 3               | 82             | 2 128          | 395             |
| Nombre des jours (j)   |                | 313            | 69              | 200             | 170             | 77             | 120             | 37             | 1080           | 150             |
| Ratio d'évolution spatio-temporelle superficie (m <sup>2</sup> /j) |                | 38,1           | 318,8           | -15,4           | 67,3            | -127,2         | 1,5             | -55,6          | 247,1          | 347,6           |
| Ratio d'évolution spatio-temporelle périmètre (m/j)                |                | 1,1            | 0,6             | -0,6            | 0,7             | -1,2           | 0,0             | 2,2            | 2,0            | 2,6             |

- De 19 Février 2011 au 29 Décembre 2011, la superficie de la base du site de stockage ST5 s'élargit au rythme moyen de 38,1 m<sup>2</sup>/j et son périmètre connaît un allongement moyen de 1,1m/j.
- Jusqu'au 07 Mars 2012, l'augmentation de ladite superficie passe au rythme de 318,8 m<sup>2</sup>/j en espace de 69 j et suivi d'une prompte régression à
- -15,4 m<sup>2</sup>/j au 23 Septembre 2012. Entre cette période, l'évolution du périmètre présente une légère diminution de 0,6 m/j à -0,6 m/j.
- De 23 Septembre 2013 à 12 Mars 2013, la superficie de la base du site de stockage ainsi que son périmètre a connu un élargissement respectif de 67,3 m<sup>2</sup>/j et de 0,7m/j.
- De 12 Mars 2013 à 28 Mai 2013, une redoutable régression de -127,2 m<sup>2</sup>/j de la superficie de base du site de stockage et de - 1,2 m/j afférente à son périmètre.
- Jusqu'au 25 Septembre 2013, la situation reste statu quo de celle de 28 Mai 2013.
- De 25 Septembre 2013 au 01 Novembre 2013, la régression de la superficie de base se poursuit avec un ratio de -55,6 m<sup>2</sup>/j contre une augmentation de 2,2 m/j de son périmètre.
- Depuis 01 Novembre 2013 jusqu'au 17 Mars 2017, la superficie de base connaît un élargissement allant de 247,1 m<sup>2</sup>/j en 16 Octobre 2016 à 347,6 m<sup>2</sup>/j en 17 Mars 2017.

### 3.2.2. Evolution de géométrie du sommet du site de stockage ST5

Le tableau 03 ci-après résume les indicateurs de l'évolution spatio-temporelle du sommet du site de stockage ST5 regroupant les paramètres mesurés et calculés de cette évolution.

Tableau 03: Indicateurs de l'évolution spatio-temporelle de la géométrie du sommet du site de stockage ST5

|  | 19 Fév.<br>2011 | 29 Déc<br>2011 | 07 Mars<br>2012 | 23 Sept<br>2012 | 12 Mars<br>2013 | 28 Mai<br>2013 | 25 Sept<br>2013 | 01 Nov.<br>2013 | 16 Oct.<br>2016 | 15 Mars<br>2017 |
|--|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Sommet du stockage S2  |                 |                |                 |                 |                 |                |                 |                 |                 |                 |
| Superficie (m <sup>2</sup> )                                       | 14 718          | 32 670         | 34 921          | 46 710          | 45 816          | 47 733         | 67 284          | 67 574          | 270 296         | 142 820         |
| Périmètre (m)  | 790             | 1 203          | 1 390           | 1 300           | 1 350           | 1 638          | 2 121           | 1 108           | 2 770           | 2 367           |
| Ecart relatif superficie (m <sup>2</sup> )                         |                 | 17 952         | 2 251           | 11 789          | -894            | 1 917          | 19 551          | 290             | 202 722         | -127 476        |
| Ecart relatif périmètre (m)  |                 | 413            | 187             | -90             | 50              | 288            | 483             | -1 013          | 1 662           | -403            |
| Nombre des jours (j)   |                 | 313            | 69              | 200             | 170             | 77             | 120             | 37              | 1 080           | 150             |
| Ratio d'évolution spatio-temporelle superficie (m <sup>2</sup> /j) |                 | 57             | 33              | 59              | -5              | 25             | 163             | 8               | 188             | -850            |
| Ratio d'évolution spatio-temporelle périmètre (m/j)                |                 | 1,3            | 2,7             | -0,5            | 0,3             | 3,7            | 4,0             | -27,4           | 1,5             | -2,7            |

- De 19 Février 2011 au 29 Décembre 2011, une augmentation de la superficie avec un ratio de 57 m<sup>2</sup>/j et de 1,3 m/j pour le périmètre est observée dans la partie sommitale du site de stockage ST5.
- Une légère diminution de 33 m<sup>2</sup>/j a été observée au niveau de la superficie contre un accroissement de 2,7 m/j du périmètre en 07 Mars 2012.
- Jusqu'au 23 Septembre 2012, la superficie a connu une augmentation de 59 m<sup>2</sup>/j mais le périmètre a enregistré un rétrécissement de - 0,5 m/j.
- De 23 Septembre 2012 au 12 Mars 2013, un recul important jusqu'au -5 m<sup>2</sup>/j de la superficie du sommet du site de stockage S2 et de -0,3 m/j du périmètre a caractérisé l'évolution spatio-temporelle du site.

- Pour une période de 77j, l'évolution de la superficie pris un rythme de 25 m<sup>2</sup>/j et celle de périmètre à 3,7 m/j résume la situation de la partie au sommet du site en 28 Mai 2013.

- Cette tendance continue jusqu'en 25 Septembre 2013 pour la superficie et le périmètre avec les ratios d'évolution respectifs 163 m<sup>2</sup>/j et 4,0 m/j.
- Après 37 j soit le 01 Novembre 2013, le périmètre du sommet a enregistré un recul considérable de – 27,4 m/j contre une légère augmentation de 8 m<sup>2</sup>/j pour la surface.
- A partir de ce moment jusqu'au 16 Octobre 2016, la superficie a connu un rythme de progression 188 m<sup>2</sup>/j et le périmètre de 1,5 m/j.
- Pourtant une diminution notable de la superficie du sommet a été constaté en 15 Mars 2017 avec un ratio de -850 m<sup>2</sup>/jet le périmètre de – 2,7m/j.

### 3.2.3. Evolution de la longueur des pentes du site de stockage ST5

Le tableau 04 ci-après résume les indicateurs de l'évolution spatio-temporelle de la longueur des pentes du site de stockage ST5 regroupant les paramètres mesurés et calculés de cette évolution.

Tableau 04: Indicateurs de l'évolution spatio-temporelle de la longueur des pentes du site de stockage ST5

|   | 19 Fév.<br>2011 | 29 Déc<br>2011 | 07 Mars<br>2012 | 23 Sept<br>2012 | 12 Mars<br>2013 | 28 Mai<br>2013 | 25 Sept<br>2013 | 01 Nov.<br>2013 | 16 Oct.<br>2016 | 15 Mars<br>2017 |
|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Longueur des pentes du site de stockage ST5 |                 |                |                 |                 |                 |                |                 |                 |                 |                 |
| Point de mesure LP1 (m)                     | 101,0           | 101,0          | 35,3            | 23,4            | 26,7            | 14,0           | 22,7            | 34,9            | 42,6            | 49,2            |
| Point de mesure LP2 (m)                     | 128,0           | 128,0          | 54,6            | 27,9            | 68,2            | 14,0           | 17,2            | 12,6            | 10,6            | 36,4            |
| Point de mesure LP3 (m)                     | 143,0           | 143,0          | 99,4            | 99,0            | 104,0           | 16,0           | 18,4            | 34,6            | 31,5            | 64,5            |
| Point de mesure LP4(m)                      | 129,0           | 129,0          | 86,1            | 104,0           | 109,0           | 13,0           | 11,7            | 37,3            | 30,7            | 27,1            |
| Longueur moyenne de la pente (m)            | 125,3           | 125,3          | 68,9            | 63,6            | 77,0            | 14,3           | 17,5            | 31,6            | 28,9            | 44,3            |

- De 19 Février 2011 au 29 Décembre 2011, la longueur moyenne de la pente reste à 125,3m ;
- Un raccourcissement à 68,9m a été observé en 07 Mars 2012 lequel s'était continué à se stabiliser à 77m en 12 Mars 2013.
- Pourtant, pour une période de 77j, entre 12 Mars 2013 et 28 Mai 2013, la longueur moyenne des pentes a raccourci révélateur de 77m à 14,3m ;
- Un léger allongement des pentes à 17,5m a été enregistré jusqu'en 25 Septembre 2013 ;
- Après 37j seulement soit le 01 Novembre 2013, la longueur moyenne des pentes a été pratiquement doublée à 31,6m ;
- A partir de ce moment jusqu'au 16 Octobre 2016, la longueur a resté quasi constante à 28,9m ;
- Jusqu'en 15 Mars 2017, la longueur moyenne des pentes a passé à 44,3m.



### 3.3. Carte thématique de hauteur du remblai

Les figures 12 à 14 représentent l'évolution de la hauteur de remblai dans le site de stockage ST5 en trois (3) différentes dates de capture à savoir 19 Février 2011, 12 Mars 2013, et 15 Mars 2017.

La couleur verte indique les altitudes comprises entre 1 076m à 1 062m soit une hauteur maximale de remblai de 14m.

La couleur bleue correspond aux altitudes variant de 1 062 m à 1 058 m soit une hauteur maximale de remblai de 4m.

La couleur orange symbolise les altitudes de 1 011m à 1 058m soit une hauteur maximale de remblai de 47m.

La hauteur cumulée qu'on pourrait rencontrer dans ce site de stockage ST5 est de 65m.

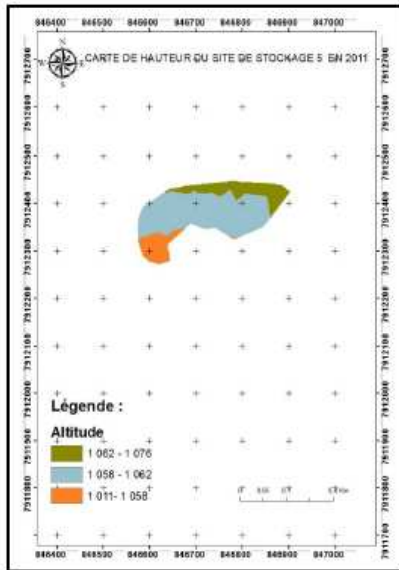


Figure 122: Carte thématique hauteur du remblai du site de stockage ST5 en 2011

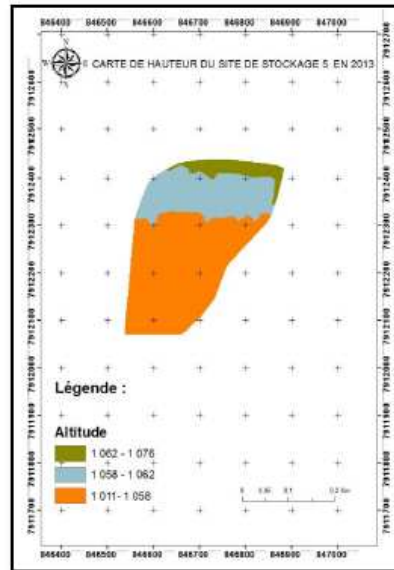


Figure 11: Carte thématique hauteur du remblai du site de stockage ST5 en 2013

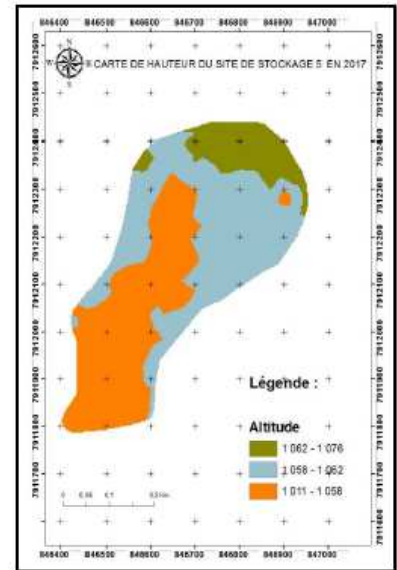


Figure 13: Carte thématique hauteur du remblai du site de stockage ST5 en 2016

Entre 2011 et 2013, une dominance de la couleur orange suivie de bleue dont la forme s'était allongée dans la direction du Sud a marquée l'évolution du site.

Entre 2013 à 2017, cette dominance a été conservée mais la forme se différencie en s'élargissant dans toutes les directions.

## 4. DISCUSSION

### 4.1 Evolution du site de stockage ST5

Le site de stockage ST5 s'est évolué dans la forme conique à sommet aplati mais il semble qu'il est assujéti au risque d'érosion et de glissement marqués par la présence des rigoles ou des ravins sur les différentes parties du corps de l'ouvrage géotechnique de remblai.

Il paraît que quatre (4) évènements de glissement s'étaient produits entre 2013 à 2017 pour ce site.

- Du cliché d'image du 07 Mars 2012, les paramètres de la géométrie de base indiquant une augmentation excessive de 318,8m<sup>2</sup>/j et brusque en espace de 69 j de sa surface laquelle se rapporte au raccourcissement de la longueur moyenne des pentes paraissent la présence de glissement à flanc de talus.

- Cette instabilité s'est poursuivie en 2013 dont le cliché d'image en 28 Mai 2013 laisse penser à l'intensité d'un autre glissement au pied du talus marqué par une perte de surface de base à  $127,2 \text{ m}^2/\text{j}$  et un raccourcissement considérable des pentes de 77,0 m à 14,3m.
- Malgré l'arrêt d'utilisation de ce site après ces évènements de glissement suscités, l'instabilité a persisté et provoqué un autre glissement au pied de talus témoigné par le cliché d'image du 01 Novembre 2013 dont les paramètres indicatifs sont la perte de superficie de base à  $-55,6 \text{ m}^2/\text{j}$  et du périmètre de sommet à  $-27,4 \text{ m/j}$  pour une période de 37 j .  
Ce site de stockage ST5 a été réutilisé en 2016 selon le cliché d'image du 16 Octobre 2016 en indiquant une augmentation de  $247 \text{ m}^2/\text{j}$  pour la superficie de la base et  $188 \text{ m}^2/\text{j}$  pour celle du sommet.
- Pourtant, il semble qu'un glissement à flanc de talus s'était produit dans le premier trimestre de 2017 prouvé par le cliché d'image du 15 Mars 2017. La base du site d'est augmentée en superficie tandis que celle du sommet a connu une perte de  $-850 \text{ m}^2/\text{j}$  suivi d'un allongement des pentes de 28,9 m à 44,3 m en espace de 150 j.

#### 4.2 Dispositifs de confortation

Dans le suivi du glissement, l'objectif est d'assurer la stabilité de l'ouvrage ou d'ausculter à priori les configurations à risques et surveiller à posteriori de près le comportement de glissement déclaré (Hadadou et al., 1992).

Nombreuses sont les technologies et techniques disponibles permettant de suivre, d'ausculter et de surveiller la stabilité de talus de l'ouvrage en terre de remblai. Pourtant, le choix réside sur leur mise en œuvre qui pourrait engendrer des difficultés opérationnelles et des coûts financiers susceptibles, dans certains cas, d'affecter la rentabilité du projet (Aubertin et al., 2002).

Deux (2) dispositifs de confortation sont recommandés entre autres le drainage et la stabilisation par enherbement.

##### *Confortation par drainage*

Bien que les spécifications techniques détaillées seraient prescrites à l'issue des études géotechniques normalisées à ce type d'ouvrage en terre et que le suivi et contrôle continu de mise en œuvre serait inéluctable, les mesures systématiques suivantes devraient être entreprises à l'exécution de l'ouvrage en terre de remblai pour assurer le drainage :

- avant la mise en verse du remblai, deux mesures techniques devraient être considérées à savoir la préparation du sol d'assise à disposer sa meilleure portance qui dépend du choix de matériel de compactage, la qualité de compactage, et surtout le réseau d'assainissement du site ; et l'utilisation de géotextile pour éviter le brassage des matériaux du sol d'assise et le remblai.
- pendant la mise en verse du remblai, le suivi et le contrôle devraient être axés sur la disposition de mise en verse en redan à hauteur de 5 à 7m et par couche de 1,5 à 1,7m d'épaisseur (Marielle, 2011 et Mario, 2015) ; la qualité de compactage en mesurant la teneur en eau  $w$  et les densités sèches  $\gamma_d$  à l'aide d'un gamma densimètre ; et la mise en place des dispositifs drainants et filtrants du remblai tels que des matériaux granuleux ou utilisation des géotextiles comme drain ou filtre afin d'améliorer la dissipation des surpressions interstitielles. La construction des risbermes pourrait être envisageable pour la stabilité vis-à-vis de glissement au pied de talus.

- après la mise en verse, plusieurs méthodes d'instrumentation de suivi sont préconisées à mettre en œuvre conjointement afin de disposer des données complémentaires de mouvement en surface et en profondeur du talus (Hadadou et al., 1992) tels les plots topographiques qui servent à repérer les mouvements en surface et à délimiter les zones instables ; les extensomètres en sondage qui permettent de détecter les éventuels mouvements d'affaissement ; et ses inclinomètres qui indiquent la direction des mouvements et mesurent les déformations.

#### *Confortation par enherbement*

Le dispositif de confortation par stabilisation des sols par enherbement pourrait parfaire ces mesures systématiques citées supra. Il devra s'harmoniser avec le relief environnant et atteindre son équilibre écologique pour protéger le remblai. Les espèces floristiques choisies devront être donc généralement autochtones et capable de fixer les sols le plus profondément possible en mettant à l'abri des divers agents d'érosion. La difficulté de ce dispositif réside à la période d'implantation pour que l'espèce soit suffisamment développée et ait l'enracinement avant la première forte pluie pour tenir le terrain (Colas, 1976).

## **5. CONCLUSION**

L'évolution spatio-temporelle du site de stockage ST5 de remblai des sols latéritiques nickélifères d'Ambatovy est analysée à l'aide des images satellites multitudes et du Système d'Information Géographique. A chaque cliché d'image capturé, l'analyse s'était focalisée sur la délimitation et la mesure des superficies et le périmètre de la base, du sommet et la longueur moyenne des pentes du site ainsi que la cartographie thématique de la hauteur du remblai.

Deux (2) rapports appelés ratio sont définis par l'écart relatif de superficie ou de périmètre à la période entre deux captures d'image successive et chronologique et ont permis d'apprécier la progression ou la régression de ces paramètres mesurés.

La première capture d'un cliché offerte par l'image satellite Google Earth date du 19 Février 2011 qui est devenu l'état de référence de l'analyse.

Le site de stockage ST5 en disposant une hauteur maximale de remblai de 47m a vécu quatre (4) évènements liés au glissement à pied et au flanc de talus en 07 Mars 2012, 28 Mai 2013, 01 Novembre 2013, et 15 Mars 2017.

Il a été fermé temporairement entre le 28 Mai 2013 et le 01 Novembre 2013 et réutilisé en 2016.

#### *Perspectives*

Une étude devrait être réalisée sur la compréhension des mécanismes et facteurs régissant la rupture des pentes et l'évaluation des risques futurs d'instabilité et de déformation du massif de stockage de remblais des sols latéritiques. L'objectif principal de l'analyse numérique est de comprendre les conditions de stabilité de talus et le comportement global du massif de stockage de sols latéritiques nickélifères à Ambatovy à l'aide de calcul par les méthodes des éléments finis. Le problème de stabilité à court terme devrait être analysé suivant la hauteur maximale admise et la cadence de stockage adaptée à ce type d'ouvrage géotechnique de remblai.

Une étude hydrogéologique complète de l'ouvrage devrait être menée avant de concevoir tout système de drainage. Elle aura pour but d'identifier et de gérer la présence d'eau et de fournir tous les éléments nécessaires à leur solution.

Les éléments du complexe écologique tels le climat, les sols, les inventaires du milieu floristique et forestier de la zone ainsi que les techniques de traitement de talus par

enherbement devraient être analysés pour que l'enherbement puisse jouer son rôle de stabilisateur dès son premier stade de développement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelkrim B. (2006) « SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de Wilaya de Naâma Algérie ». Thèse de doctorat. Géographie, Université Joseph – Fourier, Grenoble I. France.
- Aubertin M., Mbonimpa M., Jolette D., Bussière B, Chapuis R., Michael J. et Riffon O. (2002). « Stabilité géotechnique des ouvrages de retenue pour les résidus miniers: problèmes persistants et méthodes de contrôle ». Revue Canadienne de Géotechnique. Québec.
- Colas G., Mogier J.C., Ursat P. (1976). « Stabilisation des sols stériles par enherbement ». Bulletin de Liaison spécial. Laboratoire des Ponts et Chaussées de Paris. France. P161
- Corominas J, Van Westen C, Fratini P, Cascini L, Malet J.P, Fotopoulou S, Catani F, Van Den Eeckhaut M, Mavrouli O, Agliardi F, Pitilakis K, Winter M.G, Pasteur M, Ferlisi S, Tofani V, Hervas J, et Smith J.T.(2014) « Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk ». *Bulletin of engineering geology and the environment* : 79 : 209 – 263
- Desjardins R., Rognon P., Benalia M., et Alem E. (2005) « Progrès importants des études sur l'évolution des dunes grâce à l'utilisation combinée des satellites civils et militaires : l'exemple du Tafilalet Maroc ». Sécheresse (Paris), vol 16, n°3, pp. 153 – 164.
- Fisher G.B, Amos C.B, Bookhagen B, Burbank D.W, et Godard V. (2012) « Channel widths, landslides, faults and beyond: The new world order of high-spatial resolution Google Earth imagery in the study of earth surface processes ». *Geological Society of America Special Papers*, 492: 1-22
- Guzzetti F, Mondini A.C, Cardinali M, Fiorucci F, Santagelo M, et Chang K.T. (2012) « Landslide inventory maps : New tools for an old problem ». *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66
- Hadadou R., Soukatchoff V., Paquette Y., Driancourt D., (1992). « Surveillance et auscultation du comportement géotechnique de talus de mine à ciel ouvert influencés par des travaux souterrains (application à la fosse Ste Marie). Colloque "Structure et comportement des géomatériaux », Nancy, France. pp.517-26.
- Maki Mateso J.C, Dewitte O. (2014) « Vers un inventaire des glissements de terrain et des éléments à risque sur les versants du Rift à l'ouest du lac Kivu (RDC) ». *Geo – Eco – Trop*, 38, 1, n.s : 137 - 154
- Marielle P. (2011). « Modélisation 3D de la répartition du nickel du site minier de Goro en Nouvelle – Calédonie ». Mémoire de fin d'études Master National Argile. Institut de Recherche pour le Développement de Nouméa en Nouvelle-Calédonie et Université de Poitiers – France.
- Mario B. (2015). « Reconnaissances géotechniques de site de stockage de sols latéritiques nickélifères à basse teneur d'Ambatovy Madagascar ». Rapport d'étude
- Marius C. (1995) « Effets de la sécheresse sur l'évolution des mangroves du Sénégal et de la Gambie ». Sécheresse (Paris), vol 6, n°1, pp 123 – 125.
- Projet Ambatovy (2006). « Etude d'Impacts sur l'Environnement ». Volume A. Rapport d'Etude. Madagascar
- Projet Ambatovy (2013). « Plan de Gestion Environnemental Spécifique - Phase Opération ». Rapport d'Etude. Madagascar
- Rognon P. (1996) « Sécheresse et aridité : leur impact sur la désertification au Maghreb ». Sécheresse (Paris), vol 7, n°4, pp. 287 – 297.