



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministre de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI –TEBESSA-

Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de Vie

Département de sciences de la terre et de l'univers

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences de la terre et de l'univers

Filière : géologie

Spécialité : géologie de l'ingénieur et géotechnique

Thème :

Apport des nouvelles technologies d'instrumentation à distance dans l'étude des glissements de terrain

**Présenté par : Louai Zerrougui
Amara Dhia Eddine**

Devant les membres du jury :

**Président : Boubaya Djamel
Rapporteur : Fehdi Chames Eddine
Examineur : Athmania Djamel**

**Université Larbi Tebessi-Tebessa
Université Larbi Tebessi-Tebessa
Université Larbi Tebessi-Tebessa**

Session : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ
الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à tous ceux qui m'ont soutenue tout au long de mon parcours et qui ont contribué à l'obtention de notre master. Sans leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements indéfectibles, cet accomplissement n'aurait pas été possible.

Tout d'abord, nous remercions sincèrement notre superviseur, [Fehdi Chames Eddine], pour ses conseils inestimables, son expertise et ses encouragements constants. Leur dévouement, leur patience et leurs commentaires perspicaces ont joué un rôle déterminant dans l'élaboration de notre recherches et l'amélioration de notre compétences universitaires. Nous sommes vraiment reconnaissant pour leur mentorat et les opportunités qu'ils m'ont offertes d'épanouir tant sur le plan personnel que professionnel.

Nous sommes aussi redevables aux membres de la faculté de [université larbi tbessi /département de sciences de la terre et de l'univers] pour leur enseignement exceptionnel, leur passion pour la connaissance et leur engagement en faveur de l'excellence. Leur expertise, leurs cours rigoureux et leurs discussions stimulantes ont élargi mes horizons et approfondi ma compréhension de mon domaine d'études. Nous exprimons notre gratitude à tous les professeurs qui ont partagé leurs connaissances et incité à poursuivre l'excellence dans notre étude.

Nous remercions sincèrement le personnel et les administrateurs de [nom de l'université/du département] pour les efforts inlassables qu'ils déploient afin de maintenir un environnement universitaire enrichissant. Leur soutien administratif, leur aide opportune et leur dévouement à garantir une expérience d'apprentissage sans heurts ont été d'une valeur inestimable.

Nous tenons à exprimer notre remerciement à notre amis et camarades de classe qui nous ont accompagné tout au long de ce programme de master. Leurs amitiés, leurs camaraderies et leurs discussions intellectuelles ont non seulement rendu l'expérience d'apprentissage agréable, mais nous ont également poussé à notre dépasser. Je suis reconnaissante pour les amitiés nouées et les souvenirs créés, que nous chérirai à jamais.

En outre, nous exprimons notre gratitude à notre familles pour son amour indéfectible, ses encouragements et sa foi en notre capacités. Leurs soutiens constants, leur compréhension et leurs sacrifices ont été les fondements de notre réussite. Nous sommes reconnaissant de leurs patiences dans les moments difficiles et de leurs célébrations dans les moments de triomph.

Sommaire

Remerciements.

Sommaire

Liste des abréviations

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre 1 : généralités sur les mouvements de terrain

I.les mouvements de terrain lents et continus.....02

I.1.les tassements.....02

I.1.1.définition02

I.1.2.sources de tassement.....02

I.1.3. types de tassement en géotechnique.....03

I.2.affaissement de terrain06

I.2.1.définition.....06

I.2.2.les causes.....07

I.3.fauchage.....08

I.4.fluage.....09

I.4.1.définition.....09

I.4.2.étapes du fluage.....	09
I.4.3.comment prévenir le fluage de sol.....	10
I.5.les glissements de terrain.....	11
I.5.1.définition.....	11
I.5.2.éléments descriptifs du phénomène.....	12
I.5.3.dimensions d'un glissement de terrain.....	13
I.5.4.le volume de glissement.....	14
I.5.5.la vitesse de glissement.....	14
I.5.6.les types de glissement de terrain.....	14
I.5.7.les facteurs déclenchant d'un glissement.....	16
I.5.8.les paramètres influençant l'alea.....	17
II.les mouvements de terrain rapide et discontinu.....	19
II.1.L'effondrement de terrain.....	19
II.1.1.Définition.....	19
II.1.2.les causes.....	20
II.1.3.les types d'effondrement de terrain.....	20
II.2.Eboulements, chute des blocs et pierres.....	22
II.2.1.Définition.....	22

II.2.2.Les causes	23
II.2.3.Les types d'écroulement des roches.....	23
II.3.Avalanche.....	26
II.3.1.Définition.....	26
II.3.2.Les facteurs.....	27
II.3.3.les types d'avalanche.....	28
II.4.Les coulées de boue.....	31
III.Conclusion.....	32

Chapitre 02 : Les techniques utilisées dans l'étude des glissements de terrain à distance

I.1.L'utilisation de la télédétection dans l'étude à distance.....	34
I.1.généralité	34
I.2.Historique de la télédétection	36
I.3.les domaines d'application de la télédétection	37
I.4.Les types de télédétection.....	40
II. La photo interprétation.....	46
II.1.Définition.....	46
II.2.Le principe de la photo interprétation.....	47

II.3.les avantages et les inconvénients de la photo interprétation.....	54
III. La télédétection utilisée Insar.....	55
III.1.définition.....	55
III.2.Types de radar utilisé en télédétection.....	56
III.3.Le principe de l’Insar.....	57
III.4.Comparaison entre l’Insar et la photo interprétation.....	60
III.5.les avantages et les inconvénients de l’Insar.....	61
IV. Lidar.....	62
IV.1.Définition	62
IV.2. Les types de Lidar	63
IV.3.Le principe de Lidar.....	67
IV.4.les avantages et les inconvénients du Lidar	72
V. Conclusion	73

Chapitre 03 : exemples sue l’étude des glissements de terrain par des techniques nouvelles (Photo interprétation,Insar,Lidar)

I. Exemple 01 : cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le vignoble champenois entre epernay et dormans (France) : apport de télédétection multi spectrale.....	75
I.1.Cas d’étude	75
I.2.Géologies de site	76

I.3.Méthodologie d'étude	77
I.4.Résultats.....	79
I.4.1.Photo interprétation et analyse morphologique à l'échèle du versant.....	79
I.4.2.Analyse des signatures spectrales	81
I.5.Interprétation et discussion.....	85
I.6.Conclusion.....	87
II.Exemple 02 : Utilisation de PS-Insar avec des images Sentinel-1 pour la surveillance des déformations dans le nord-est de l'Algérie.....	88
II.1.Cas d'étude.....	88
II.2.Géologie de site	90
II.3.interprétation et résultat.....	91
II.3.1.interprétation.....	91
II.3.2.Résulta.....	94
II.4.Conclusion.....	96
III. Exemple 03 : Caractérisation et surveillance d'un glissement rocheux actif d'une mine à ciel ouvert en utilisant Lidar, Therford Mines, Québec, Canada.....	97
III.1.Cas 'étude.....	97
III.2.Surveillance Lidar.....	98

III.3.Analyse préliminaire.....	99.
III.3.1.Géologie.....	99
III.3.2.Etendue du glissement.....	100
III.3.3.Orientation et géométrie des pentes.....	101
III.4.Analyse structurale.....	102
III.5.Evolution des déplacements par secteur	103
III.6.Résultats.....	105
III.7.Conclusion.....	106
Conclusion générale	108
Références bibliographique	110
Résumé	
Abstract	
المخلص	

Liste des abréviations

MNT	Modèle numérique de terrain
MNS	Modèle numérique spatial
INSAR	L'interférométrie SAR
SAR	Synthetic aperture radar
LIDAR	Light detection and ranging
RADAR	Radio detection and ranging
PIR	Proche infrarouge
MIR	Moyen infrarouge
SWIR	Infrarouge loatain
SNAP	Sentinel application platform
NDVI	Indice de végétation par différence normalisé
NDWI	Indice d'eau par différence normalisé
PS-INSAR	Persistent scatterer interferometry
MTQ	Ministère des transports du Québec
TLS	Terrestrial laser scanning
ALS	Airborne laser scanning

Liste des figures

Figure	Page
Figure 01 : exemple d'un tassement	02
Figure02 : Tassement uniforme	03
Figure 03 : Tassement différentiel	04
Figure 04 : Tassement de courbure	05
Figure 05 :untype de mouvement de terrain, l'affaissement de terrain – d'après Mina Izadi	06
Figure 06 : coupe schématique de fauchage	08
Figure 07 : exemple de fauchage dans des roches métamorphiques	08
Figure 08 : schéma descriptif du fluage	09
Figure 09 : les étapes de fluage	11
Figure 10 : Glissement de St Geniez-de-	12
Figure11 :élément descriptif d'un glissement de terrain	14
Figure 12 : Dimensions d'un glissement de terrain.	15
Figure 13 : glissement plan	16
Figure 14 : glissement rotationnel	16
Figure15 : Glissement rotationnel complexe	16
Figure 16 : exemple sue l'effondrement de terrain	19
Figure 17 : Un schéma représente l'effondrement localisé de terrain	21
Figure 18 : Un schéma représente l'effondrement généralisé de terrain	21
Figure 19 :Un schéma représente une chute des roches dans le nord	22
Figure 20 : Une photo que représente chute de blocs – BRGM -	24
Figure 21 : Une photo représente un éboulement rocheux - ici.radio-canada.ca -	24
Figure 22 : Une photo qui représente une avalanche rocheuse	25
Figure 23 : Un schéma représente les zones d'accumulation d'une avalanche - avalanchequebec.ca -	26
Figure 24 : Un schéma représente les trois types d'avalanche selon la composition de manteaux neigeux – AFP -	28
Figure 25 : Coulée boueuse dans la commune de Tréminis	31
Figure 26 : principe de fonctionnement des capteurs passifs et actifs d'après Helen Gurgel	35
Figure 27 : la télédétection passive par des capteurs satellitaires –d'après linajarboui	40
Figure 28 : un exemple de télédétection actif : RADAR - d'après Jean-Paul Rudant	41

Figure 29 :l'élévation de résolution radiométrique NASA earth observatory images d'après Joshua	42
Figure 30 :les différentes résolutions spatiales – d'après Shunlin Liang et Lindi Wang	43
Figure 31 : les différences entre les capteurs hyperspectraux et les capteurs multispectraux	44
Figure 32 : la résolution temporelle – d'après Manuel Arbelo	45
Figure 33 : la résolution temporelle (schéma simplifier) d'après Canada.ca	45
Figure 34 :un exemple de photo-interprétation – d'après www.aamspi.com	46
Figure 35 : un exemple d'une image oblique de la Vallée des Baux – d'après A. Humbert et C. Renard 21/07/2012	47
Figure 36 : un exemple de l'image panoramique : panoramique aérienne de Kirchbourg Luxembourg – d'après Gérard Borre	48
Figure 37 : une image satellitaire verticale de Tébessa 22/10/2013 d'après l'USGS	49
Figure 38 : un schéma représente la technique de RADAR – d'après Matthias Jauvin www.solscope.fr	55
Figure 39 : une map de Lynnhaveninlet Virginia utilisent la technique de lidar – NOAA's National Ocean service	62
Figure 40 : lidar topo-bathymétrique aéroporté – osur.univ-rennes.fr	64
Figure 41 : la gauche : une image de l'étude de terrain et dans l'image droite : une image représente un capteur lidar mobile.	65
Figure 42 : schéma lidar 1D - d'après CADDEN www.cadden .FR	65
Figure 43 : schéma lidar 2 D –d'après CADDEN www.cadden.fr	66
Figure 44 : schéma lidar 3D – d'après CADDEN www.cadden .FR	67
Figure 45 : le principe physique de lidar	67
Figure 46 : modèle numérique de surface "MNS"	70
Figure 47 : modèle numérique de terrain "MNT "	71
Figure 48 : la vallée de la Marne entre Epernay et Vandières	75
Figure 49 : litho stratigraphie du secteur de Vandières (Marne. France)	76
Figure 50 : le glissement de terrain de Vandières	77
Figure 51 : Methodologie adoptée pour l'étude	79
Figure 52 : changement d'état de surface entre 1984 et 2016 à Vandières	80
Figure 53 :Photo-interprétation multi-date du versant de Vandières	81
Figure 54 : comparaison de la réponse NDWI	82
Figure 55 : Réponses NDWI et NDVI des parcelles viticoles	83
Figure 56 : Réponses NDWI à l'échelle parcellaire(Vandières).	84
Figure 57 : susceptibilité au glissement et vulnérabilité des zones viticoles de la vallée de la Marne	86
Figure 58 : localisation géographique de la zone d'étude	89
Figure 59 : carte lithologique de la zone d'étude	90
Figure 60 : carte de vitesse moyenne de déformation en ligne de mire de Constantine	91
Figure 61 : carte de la vitesse moyenne de déformation de Constantine (centre)	92
Figure 62 : carte de déformation d'El-Amal	93
Figure 63 : carte de déformation à l'aéroport de Constantine	93
Figure 64 : Dégâts causés par un glissement sur l'infrastructure à sidi arab	94

Figure 65 : Ecole endommagée dans le quartier de boussouf	95
Figure 66 : surveillance lidar aéroporté du mur est de la mine LAB	97
Figure 67 : surveillance lidar aéroporté après la rupture	97
Figure 68 : positions de lidar	98
Figure 69 : plan de la mine LAB avec la géologie orienté vers la droite	100
Figure 70 : géologie simplifiée du mur Est	100
Figure 71 : Ecart de distance (m) entre le MNT de 22/11/2010 et celui du05/08/2013	101
Figure 72 : division de la zone d'instabilité	102
Figure 73 : Normales de la surface de rupture extraites de	103
Figure 74 : Normales de la surface de rupture du TLS novembre 2013	103
Figure 75 : évolution des déplacements cumulatifs	104
Figure 76 : Vecteurs déplacements pour en rouge et en bleu	104
Figure 77 : évolution du déplacement du glissement	104
Figure 78 : schématisation des volumes négatifs et positifs après rupture	105

Liste des tableaux

Tableaux	Page
Tableaux01 : classification morphologique des avalanches	29
Tableaux02 : les applications qui utilise la télédétection –d’après www.univsalis.fr	39
Tableaux03 : classification des nuages des points	69
Tableaux04 : caractéristiques des données utilisées et description des indices	78
Tableaux05 : Dates des relevés lidar au cours de la période de surveillance	99

Introduction Générale

Les mouvements de terrain sont des phénomènes géologiques naturels caractérisés par le mouvement descendant de sol, des roches ou des autres matériaux sur des pentes, due à l'existence des vides dans ce sol qui produisent en raison des divers facteurs, notamment des influences géologiques, climatiques et humaines et peuvent avoir des impacts significatifs sur l'environnement, les infrastructures et la vie humaine.

Le glissement de terrain est l'un de ces mouvements de terrain et le plus fréquent que tout autres, il peut se produire n'importe où dans le monde et implique le déplacement des masses de sol sur le long d'une pente. Lorsque la stabilité de cette pente est compromise, entraînant le mouvement descendant des couches de sol en raison d'un phénomène naturel ou d'une activité humaine sous l'influence de la gravité et pour cela il est le plus dangereux que les autres mouvements de terrain car il cause des conséquences dévastatrices, causant la perte de vies humaines, la destruction des infrastructures et la perturbation des réseaux de transport, notamment les routes, les voies ferrées et les pipelines, et des dommages environnementaux importants, ce qui rend leur étude et leur compréhension cruciales pour la prévention et la gestion.

Il y a des plusieurs méthodes et techniques utilisées dans l'étude de la phénomène de glissement de terrain et les techniques de télédétection, telles que la photogrammétrie, l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR) et le Light Detection and Ranging (LiDAR), sont les meilleures techniques dans l'étude à distance de glissement de terrain, où ces technologies avancées fournissent des données précieuses pour la surveillance, la cartographie et l'analyse de la déformation du terrain, permettant aux chercheurs et aux géologues de mieux comprendre la dynamique de ces dangers naturels et aide dans la prévention ou réduction des conséquences de ce catastrophe.

Dans notre étude, nous aborderons ces mouvements de terrain et spécialement le glissement de terrain, et aussi parlerons des meilleures techniques de télédétection (photo-interprétation, InSAR et Lidar) utilisées dans l'étude des glissements de terrain en détail et donnerons quelques exemples pour expliquer comment utilisent ces techniques et prouver que ces techniques sont parmi les meilleures méthodes d'étude de ces phénomènes.

Chapitre 01

Généralité sur les mouvements de terrain

I. Les mouvements de terrain lents et continus :

I.1. Les tassements

I.1.1. Définition :

Dans les sciences de la Terre, le tassement est la lente réduction d'un bâtiment ou d'un corps rocheux par compression progressive (compactage) du substrat.

Le tassement du sol est sa déformation verticale due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids.

Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés les tassements sont presque instantanés mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables.



Figure 01 : exemple d'un tassement <www.perspectives-agricoles.com>

I.1.2. Sources de tassement :

Les sources de tassement peuvent être de différente nature :

- un niveau d'assise variable pour un même bâtiment, comme une maison ne comprenant qu'un sous-sol partiel.
- une nature de sol d'assise hétérogène : un côté sur de l'argile et un autre côté sur du calcaire ou présence de points durs (roches) et de points mous (compressibles comme du remblai non compacté).
- variation de la teneur en eau du sol d'assise, comme un terrain argileux qui se rétracte en période de sécheresse et qui gonfle au retour des pluies.

- une infiltration d'eau inhabituelle et son accumulation, dues à des intempéries ou au perçage d'une canalisation.
- la proximité de racines, la présence d'une source souterraine, la configuration topographique (dénivelés, pente importante).
- un sol instable constitué de remblais, comme un ancien dépôt de gravats, le rebouchage d'un ancien passage souterrain ou d'une carrière.
- la présence en sous-sol de vides naturels et d'affaissements miniers.
- des travaux dans les avoisinants, comme la réalisation de fouilles pour les fondations d'un nouveau bâtiment accolé ou implanté à proximité.
- les vibrations engendrées par des travaux à proximité (comme le battage de pieux) ou le passage d'engins lourds à proximité.
- le poids des nouvelles charges de construction sur des terrains voisins.
- l'altération du béton ou des aciers noyés dans ce béton à cause de l'agressivité du milieu.
- les erreurs de conception et d'exécution dues à une sous-évaluation des efforts ou au non prise en compte de l'étude de sol : ce cas est rencontré surtout dans le cas de fondations profondes.

I.1.3. Types de tassement en géotechnique

a) Tassement uniforme : Si un tassement uniforme se produit, la structure (ou la route ou la voie ferrée) se tassera de la même quantité sur sa longueur et aucun dommage ne se produira - bien que l'ensemble de la structure sera plus bas, bien sûr.

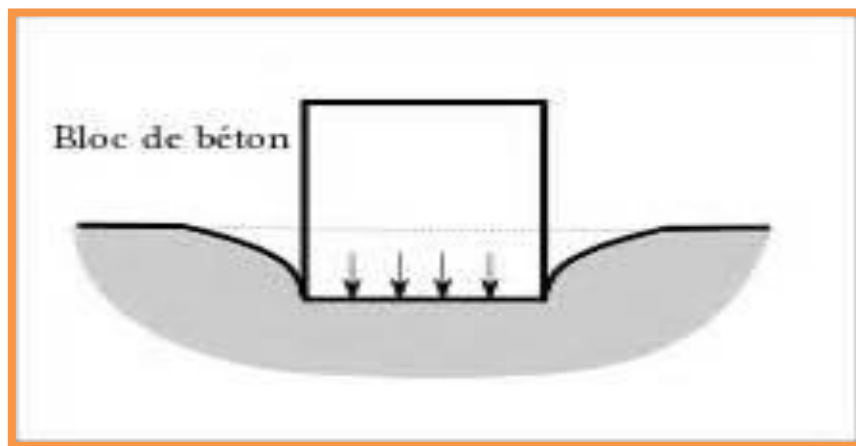


Figure02 : Tassement uniforme

b) Tassement différentiel : Souvent cité dans les spécifications pour juger des performances de l'ingénierie géotechnique, le tassement différentiel se produit lorsqu'une partie d'une structure s'installe plus (ou plus rapidement) qu'une autre.

Un tassement différentiel est un mouvement d'enfoncement du sol qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer : basculement, voire renversement des constructions, augmentation importante des efforts dans les structures. C'est un grave facteur de désordre qui est la plupart du temps irrémédiable. Même lorsque le sous-sol est assez uniforme, les charges unitaires différentes sur les fondations peuvent provoquer un tassement différentiel très important.

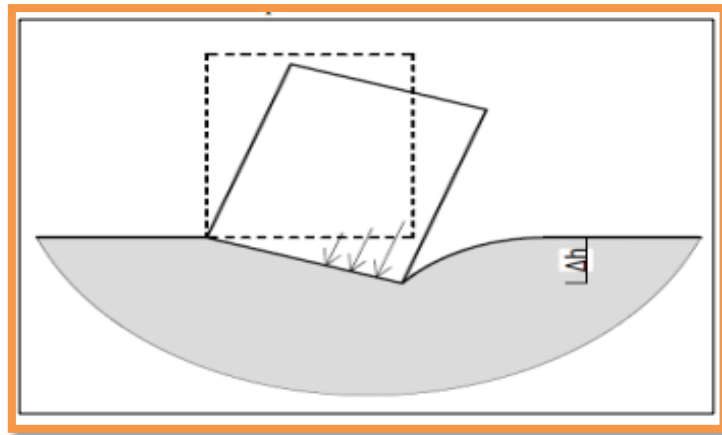


Figure 03 : tassement différentiel

- Les tassements différentiels peuvent avoir plusieurs origines :
 - origine liée au chargement
 - origine liée aux appuis
 - origine liée au site

c) Tassement de courbure :

Si une structure s'incline, une ligne droite peut être tracée entre l'un de ses bords et l'autre. Si, cependant, cette ligne est en courbe, cela indique que différentes sections de la structure se déplacent à un degré plus ou moins important

Ce tassement de courbure peut provoquer des distorsions dans la structure, induisant des efforts de traction qui ne peuvent pas être supportés par les matériaux de construction (tels que la maçonnerie) ou par le revêtement routier. À terme, cela entraînera des dommages et des fissures (et dans les chemins de fer, une courbure excessive peut empêcher les trains de circuler sur des voies déformées).

La courbure peut être exprimée par le taux de déflexion: le mouvement vertical maximal, divisé par la longueur de la structure sur laquelle ce mouvement est mesuré. La courbure est donc un élément clé lors de l'évaluation de la performance de tassement des structures.



Figure 04 : Tassement de courbure

I.2. Affaissement de terrain:

I.2.1. Définition:

l'affaissement de terrain est un type de mouvement lent et continue qui correspond à une fléchissement ou une tassement lent et progressive des couches de sols sans rupture brutale des terrains de surface qui causent des dépression topographiques en forme de cuvettes dans des grand rayons de courbure .

ce phénomène causent due à l'existence des cavités souterraines naturelles créés par la phénomène de la dissolution des roches soluble comme les carbonates ,calcaires et les dolomie ou humaines créés due à l'excavation minier et les carriers ,le drainages des eaux sou terrain ,pétrole et gaz .

L'affaissement du sol peut causer de graves dommages aux infrastructures telles que les bâtiments, les routes, les ponts et les systèmes de drainages, ces zones touchées peuvent se fissurées, s'inclinées ou même s'effondrées.



Figure 05 : une type de mouvement de terrain, l'affaissement de terrain
– d'après Mina Izadi , www.tehrantimes.com

I.2.2 Les causes:

L'affaissement de terrain défini comme un phénomène endogène causé par des déplacements verticaux différentiels de la surface de la terre dus à des facteurs naturels ou anthropiques :

a) Les causes anthropiques :

Les opérations minières souterraines, telles que L'extraction des minéraux ou de ressources du sous-sol utilisées dans les activités industrielle humaines peuvent créer des vides sous terrain et avec le temps ces vides peuvent tasser, provoquant l'affaissement du sol sus-jacent .L'ampleur de l'affaissement dépend de la taille et de la profondeur des couloirs de ses mines.

l'extraction excessive des eaux souterraines aussi L'une des causes les plus courantes d'affaissement où la nappe phréatique s'abaisse ,provoquant le compactage de sol .aussi certaines techniques d'extraction de pétrole et de gaz comme la fracturation hydraulique (fracking) peuvent provoqué les affaissements car l'extraction de ces fluides peuvent provoquer un affaissement du à la diminution de pression et la support de sol .

b) Les causes naturelles :

Le phénomène de dissolution des roches soluble due à les réactions chimiques entre ces roches et l'eau qui créés des zones karstique joues un grand rôle dans l'affaissement de terrain .aussi certains types de sol, comme l'argile peuvent subi une compression et un retrait avec le temps en raison des processus naturels qui et le séchage et l'humidification due les changements climatiques (température et précipitation) qui causent des changements de teneur en eau de ce sol.

Il est important de noter que les causes de l'affaissement du sol se produisent sur de longues périodes et peuvent pas être immédiatement perceptibles .Cependant, ils peuvent accumulés est formée des affaissements importants et des modifications du paysage.

I.3. Fauchages :

Définition : dans le dictionnaire de géologie, le fauchage est un type de déformation superficielle, sous l'influence de la gravité, de la tranche des couches qui affleurent sur une pente, ce qui pour l'observateur, entraîne une évaluation erronée de leur pendage en profondeur (qui est le pendage significatif lié aux structures).

En générale le fauchage c'est un mouvement lent des têtes de couches qui s'incurvent peu à peu vers le bas sous l'effet de la gravité. Ce type de déformation affecte des formations géologiques sur laquelle la schistosité, la foliation ou le litage sont proches de la verticale. Le mécanisme de fauchage peut évoluer et se transformer en un mécanisme de glissement rocheux.

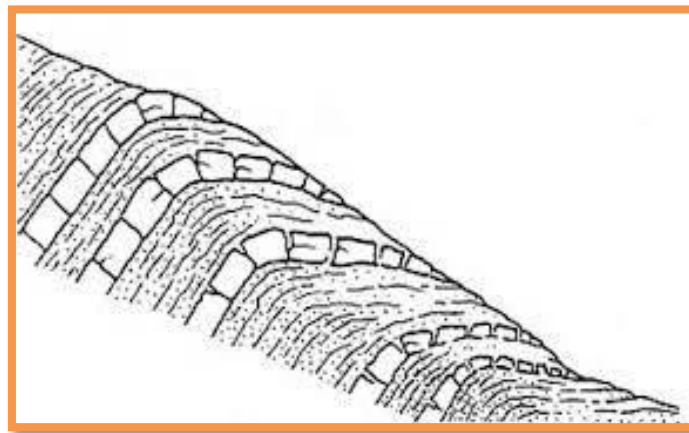


Figure 6 : coupe schématique de fauchage

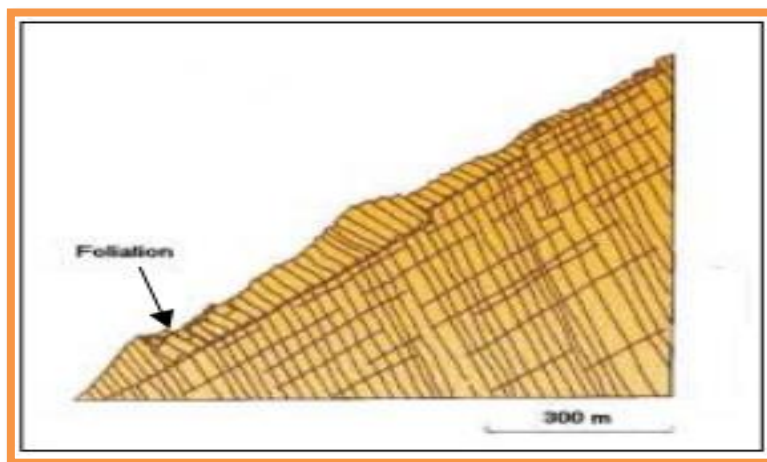


Figure 07 : Exemple de fauchage dans des roches métamorphiques (fauchage affectant un versant à une échelle hectométrique, d'après FREITAS et WATERS, 1973)

I.4. Fluage

I.4.1. Définition : Le fluage du sol est un processus opérant à l'échelle granulaire. Il se produit sur des pentes douces et se remarque à la surface ondulée qu'il produit. Le sol humide se déplace très lentement le long de la pente car le poids de l'eau le pousse vers l'avant. Les éclaboussures de pluie peuvent libérer des grains de sol qui tombent plus bas.

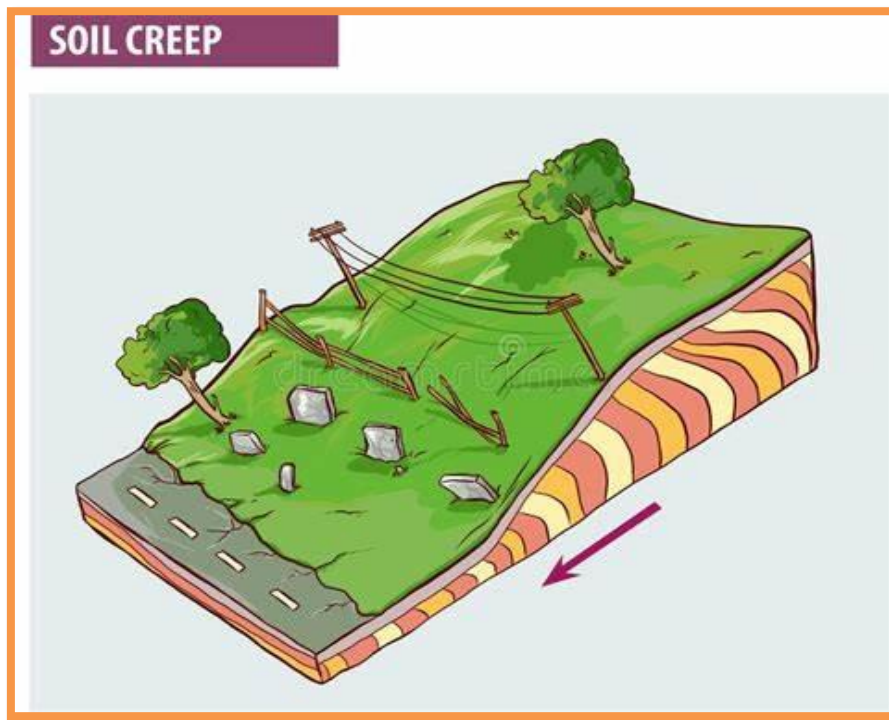


Figure 08 : schéma descriptif du fluage <https://fr.dreamstime.com/>

Le fluage est dû à l'expansion et à la contraction répétée du régolithe, qui peut être causées par le gel et le dégel ou l'humidification et le séchage répétés. Le fluage peut être reconnu par des arbres inclinés, des clôtures inclinées et des murs de soutènement déplacés.

I.4.2. Étapes du fluage

Comme on peut le voir sur la figure, le fluage dépend du temps et passe par plusieurs étapes:

- **Fluage primaire.** Au stade initial, ou fluage primaire, ou fluage transitoire, le taux de déformation est relativement élevé, mais diminue avec l'augmentation du temps et de la déformation en raison du fait que le matériau connaît une augmentation de la résistance au fluage ou de l'écrouissage. Ceci est suivi d'un fluage secondaire (ou enrégime permanent) au stade II, lorsque la vitesse de fluage est faible et que la déformation augmente très lentement avec le temps.

- **Fluage secondaire.** Pour le fluage secondaire, parfois appelé fluage en régime permanent, le taux est constant, c'est-à-dire que le tracé devient presque linéaire.

La vitesse de déformation diminue jusqu'à un minimum et devient presque constante au début de l'étape secondaire. Cela est dû à l'équilibre entre l'écroutissage et le recuit (adoucissement thermique).

Cette étape de fluage est la mieux comprise. Le fluage en régime permanent est souvent la phase de fluage la plus longue. Aucune résistance du matériau n'est perdue au cours de ces deux premières étapes de fluage.

En ingénierie des matériaux, le paramètre le plus important d'un essai de fluage est peut-être la pente de la partie secondaire de la courbe de fluage ($\Delta P/\Delta t$)

. C'est le paramètre de conception technique qui est pris en compte pour les applications à longue durée de vie. Ce paramètre est souvent appelé taux de fluage minimum ou régime permanent.

- **Fluage tertiaire.** En fluage tertiaire, il y a accélération de la vitesse et éventuellement rupture ultime.

Le taux de déformation augmente de manière exponentielle avec la contrainte en raison de phénomènes de striction ou de fissures, cavités ou vides internes qui diminuent la surface effective de l'échantillon.

Tout cela conduit à une diminution de la section efficace et à une augmentation de la vitesse de déformation. La force est rapidement perdue à ce stade tandis que la forme du matériau est modifiée de façon permanente.

L'accélération de la déformation par fluage dans l'étape tertiaire conduit finalement à la rupture, qui est fréquemment appelée rupture et résulte de changements microstructuraux et/ou métallurgiques.

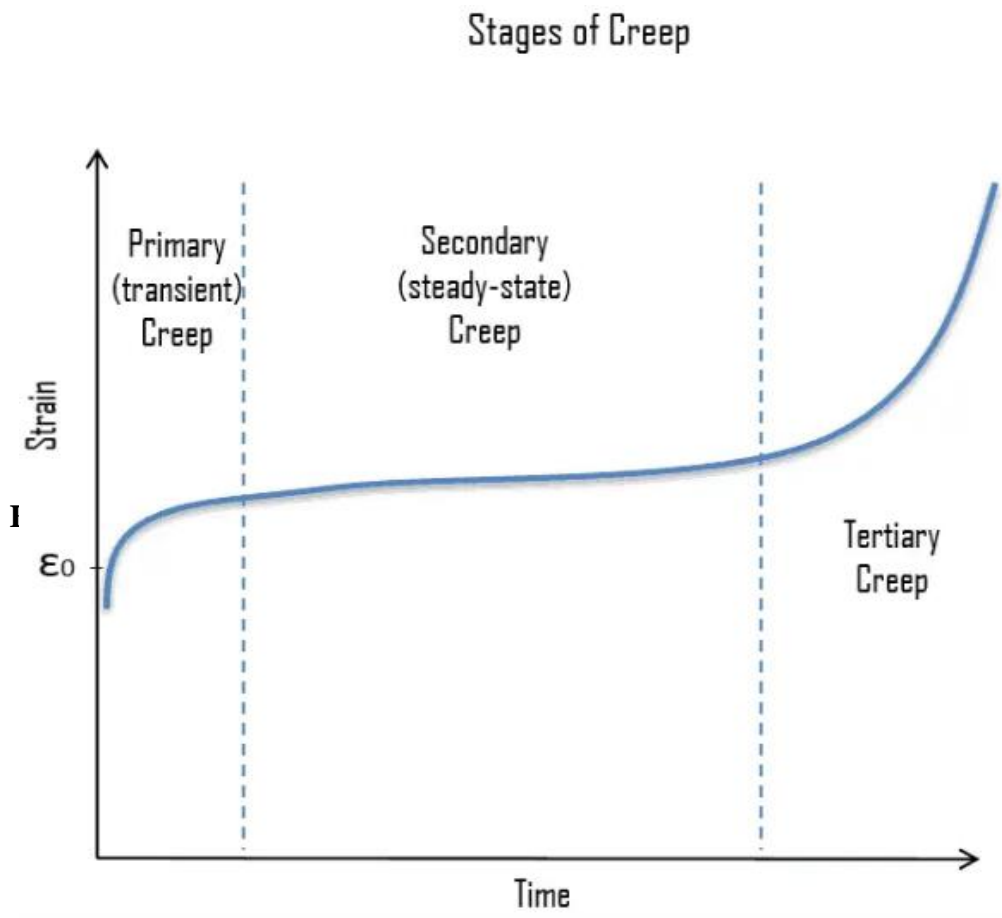


Figure 09 : les étapes de fluage J. W. Glen, « The creep of polycrystalline ice », *Proceedings of the Royal Society*

I.4.3. Comment prévenir le fluage du sol ?

Recouvrez le sol exposé d'une variété de plantes – arbres, arbustes, plantes vivaces et annuelles – pour créer une barrière qui empêche le sol de se déplacer sous l'effet du vent et de l'eau. Les racines des plantes maintiendront également le sol en place. Placez du paillis ou des pierres entre les plantes pour couvrir davantage le sol exposé. (Construire en terrain argileux La réglementation et les bonnes pratiques Édition novembre 2021).

I.5. Les glissements de terrains :

I.5.1 Définition :

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) d'une masse de sol cohérente vers le bas sur une pente, autrement dit un plan de glissement ou appelée aussi surface de cisaillement de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Ce phénomène se produit lorsque la force gravitationnelle agissant sur une masse de terre dépasse la résistance des matériaux qui la composent et causent par des plusieurs facteurs telles que : les précipitations abondantes, les tremblements de terre, l'érosion des pentes, l'activité humaine (comme les activités de construction ou l'excavation), les modifications du niveau d'eau souterraine, ainsi que la nature géologique des sols.

Le glissement de terrain peut causer des dégâts considérables, notamment l'endommagement ou la destruction d'infrastructures telles que les routes, les ponts, les habitations et les installations publiques et peuvent aussi entraîner des pertes de vies humaines, des blessures et des déplacements de population et de plus perturbé les cours d'eau, provoqué des inondations ou des avalanches et entraîner une dégradation de l'environnement, notamment la destruction de la végétation et la contamination des ressources d'eau.



Figure10: Glissement de St Geniez-de-Bertrand (Aveyron, Midi-Pyrénées, avril 2009) © BRGM - I. Bouroullec

I.5.2.Eléments descriptifs du phénomène :

Les divers éléments définis ci-dessous, conformes à la nomenclature anglo-saxonne, sont illustrés par (la figure:1).

- Escarpement principale:** Surface inclinée ou verticale souvent concave, limitant le glissement à son extrémité supérieur et prolongée en profondeur par la surface de glissement.
- **Couronne :** Zone située au-dessus de l'escarpement principal, souvent peu affecter par le désordre. Seules quelques fissures ou crevasses témoignent de la mise en traction des terrains dans cette zone.
- **Tête :** Limite amont du glissement et plus précisément partie où le matériau glissé se trouve en contact avec l'escarpement principal.
- **Escarpement secondaire :** Cicatrice semblable à l'escarpement principal mais visible dans la masse remaniée. Ces escarpements confèrent à la masse en mouvement une structure en escalier.
- **Elément :** Fraction de la masse glissée située entre deux escarpements.
- **Flanc :** Limite latérale du glissement prolongeant l'escarpement principal.
- **Pied :** Correspond à l'intersection aval de la surface topographique initiale. Le pied est souvent masqué par le bourrelet.
- **Extrémité inférieur ou pouce :** Zone aval du mouvement de terrain ou extrémité du bourrelet.
- **Rides transversales :** Elles se forment dans le bourrelet du mouvement de terrain, témoins d'efforts de compression pouvant aboutir à des chevauchements dans le matériau.
- **Surface de rupture ou de glissement :** Surface séparant la masse glissée des terrains en place.
- **Corps :** Partie centrale du glissement recouvrant la surface de rupture.
- **Fissures et crevasses :** Ruptures au sein du matériau se manifestant par des fentes d'importance et de forme divers suivant leurs positions. On peut distinguer trois grands types élémentaires :
 - fissures de traction,
 - fissures de cisaillement,
 - fissures de compression

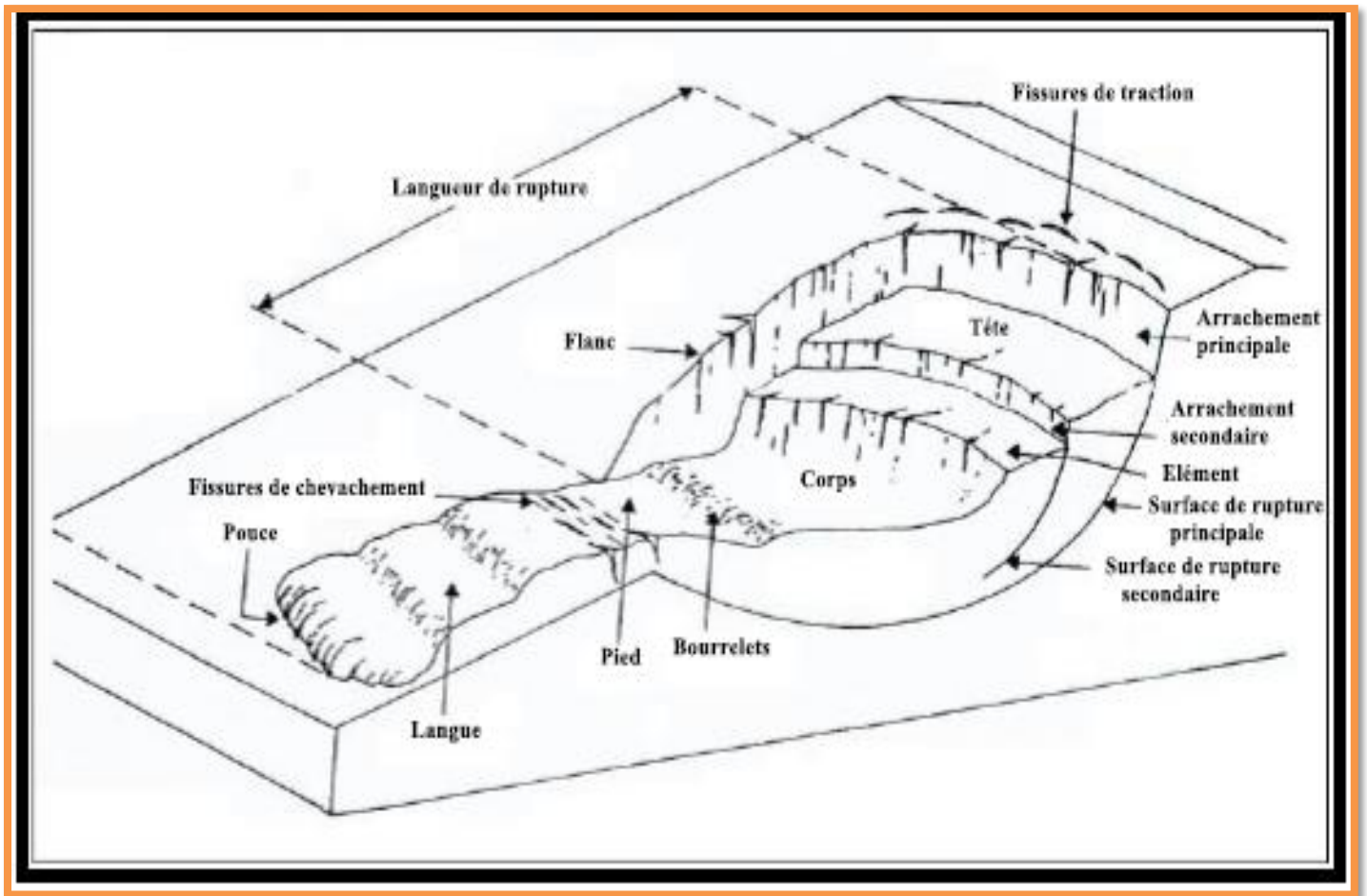


Figure 11 : élément descriptif d'un glissement de terrain

I.5.3. Dimensions d'un glissement de terrain :

Les dimensions du glissement sont définies par la largeur, la longueur (totale et de la rupture) et de la profondeur.

- a) Largeur** : distance entre les flancs.
- b) Longueur totale** : c'est la distance entre la couronne et le pouce.
- c) Longueur de la rupture** : distance entre la couronne et le pied.
- d) Profondeur de glissement** : distance entre la surface de rupture et le terrain naturel.

I.5.4. Le volume de glissement :

Les volumes en mouvement dans les glissements peut atteindre des dizaines de million de m³. les terrains concernés sont généralement à forte composante argileuse.

En peut rencontre des glissements dans les terrains sableux, Caillaux, ou même dans les roches fissurés ou fracturés.

I.5.5. La vitesse de glissement

On peut citer les phases suivantes :

- La phase de préparation : c'est des mouvements à vitesse constante quelque mm à cm par année cette phase peut durée très lentes du qqns années à quelques milliers d'année.
- La phase de rupture : c'est une phase de mouvement rapide au cours de laquelle se produit un réajustement conduisant un nouvel état d'équilibre qu'on appelle phase de relaxation.
- La phase de stabilisation : une phase plus stable que les précédentes.

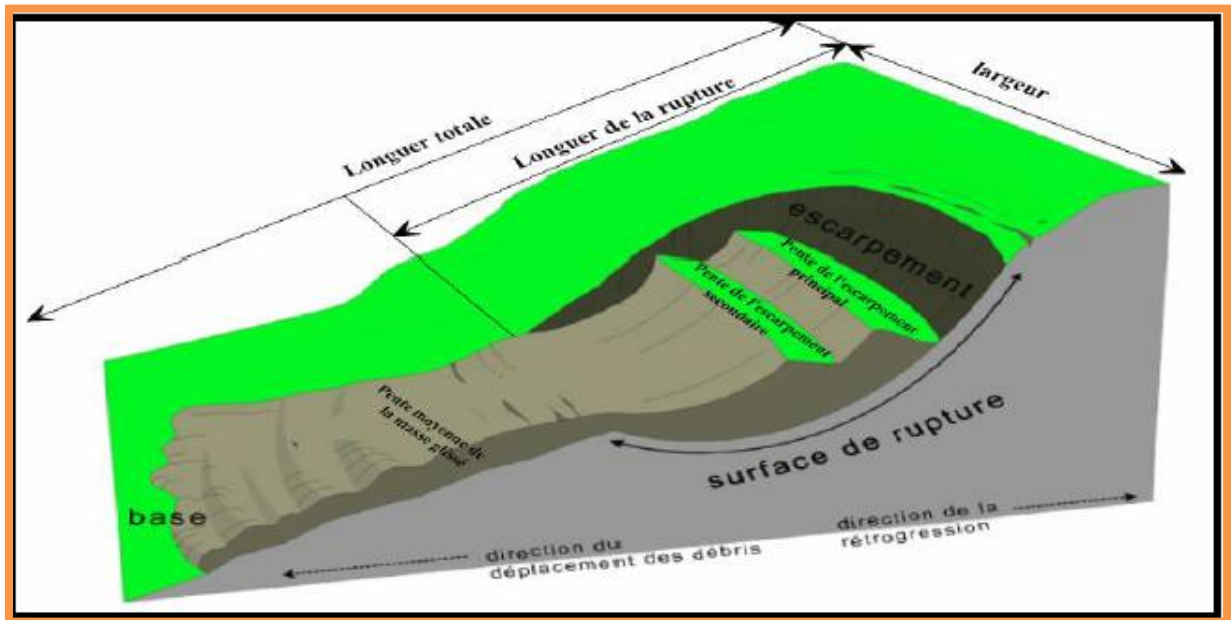


Figure 12 : Dimensions d'un glissement de terrain.

I.5.6. Les types de glissement de terrain

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- glissement plan ou transactionnel, le long d'une surface plane.
- glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe.
- glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.

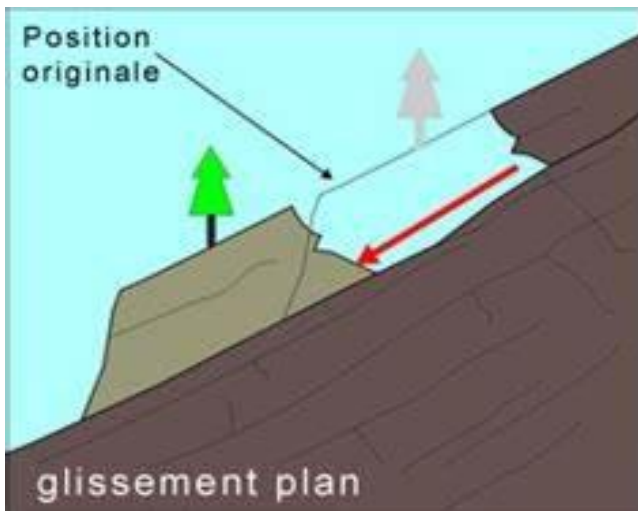


Figure 13 : glissement plan

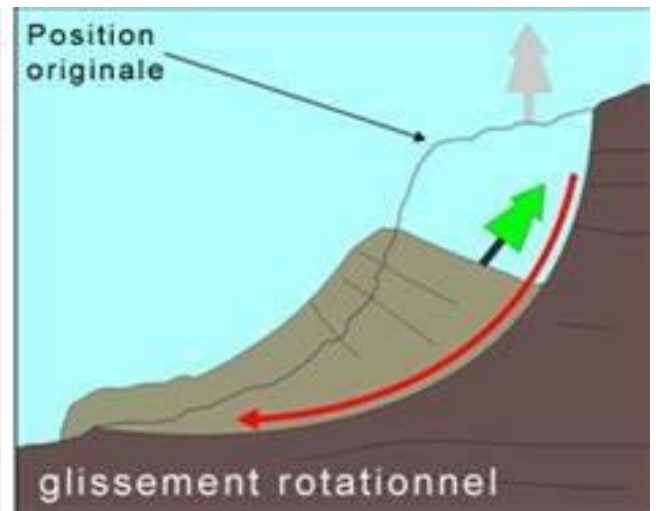


Figure 14 : glissement rotationnel

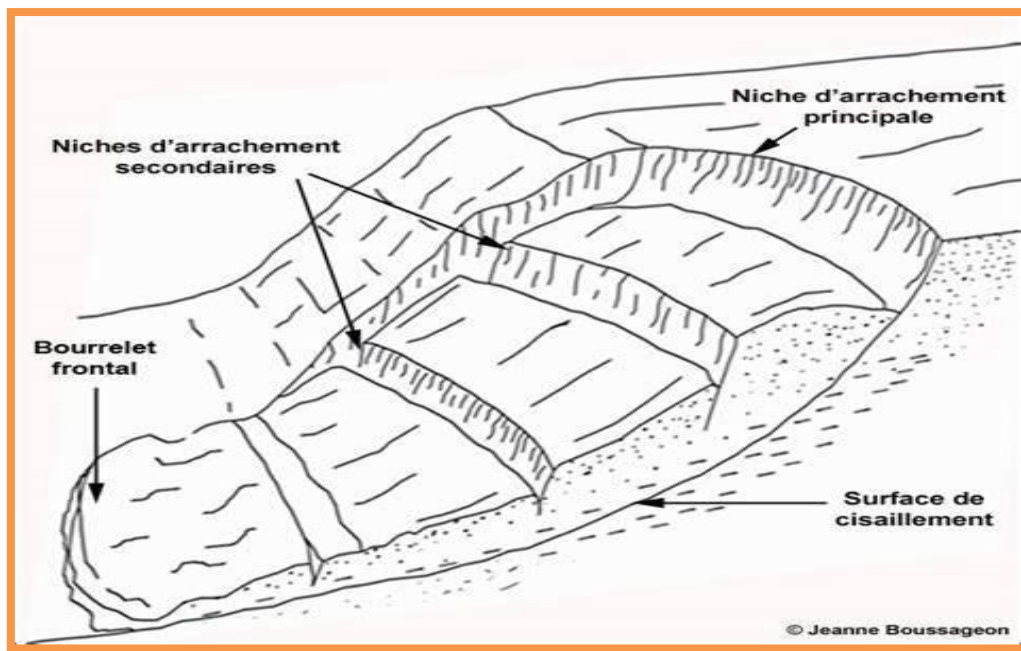


Figure 15 : Glissement rotationnel complexe

I.5.7. Les facteurs déclenchant d'un glissement :

Très souvent, les glissements de terrain sont déclenchés par un ensemble de facteurs divers. Certaines conditions doivent être réunies pour menacer la stabilité d'un versant.

-La pente : les glissements de terrain peuvent se produire sur des pentes modérées à raides, d'une déclivité de 10 à 40 degrés généralement.

Dans les terrains inclinés, le sol a tendance à glisser vers l'aval. L'ampleur de ce phénomène est principalement déterminée par trois forces:

-Gravité: force qui entraîne la matière vers le centre de la Terre; dépend de la pente du terrain.

-Force de frottement: force qui freine une couche de terrain meuble ou de roche par frottement contre la couche sous-jacente.

-Force de cohésion: force qui repose sur l'attraction des particules du sol entre elles et de l'attraction entre ces particules et l'eau stockée dans le sol.

Tant que les forces de résistance (force de frottement et cohésion) sont plus fortes que la force motrice (gravité), la stabilité du versant est garantie. Si l'équilibre des forces change et la force motrice devient plus importante que les forces de résistance, un glissement de terrain se déclenche. Se produit alors une rupture entre deux couches de roche ou de sol et une masse se met à glisser plus ou moins rapidement vers l'aval.

I.5.8. Les paramètres influençant l'alea :

a) Les paramètres naturels

-La géologie : les caractéristiques mécaniques d'un matériau, sa perméabilité, son état d'altération est autant de paramètres conditionnant la pente limite d'équilibre et l'occurrence du mouvement.

-La géomorphologie : l'importance de la pente de terrain va permettre le développement de certains types de glissement. Une pente faible sera suffisante pour le déclenchement de phénomènes de solifluxion ou de fluage. La couverture végétale joue également un rôle dans la stabilité, la propagation et le déclenchement des glissements de terrain. Ce rôle peut être bénéfique ou néfaste selon le cas. Ainsi, les racines des végétaux renforcent la cohésion des sols, mais en cas de vent, l'effet de levier peut déraciner les arbres, ouvrant ainsi des brèches dans le sol et favorisant les infiltrations d'eau.

-L'hydrogéologie : les circulations d'eau en surface contribuent aux instabilités des masses de sol, par un phénomène d'entraînement des matériaux.

-Les séismes : là encore, c'est la mise en vibration des éléments du sol et la modification des conditions de pesanteur qui peuvent être à l'origine de la déstabilisation des masses en place.

b) Les paramètres anthropiques

-La modification de l'hydrologie : de la même manière que pour les phénomènes d'éboulements, la modification de l'hydrologie par une activité humaine peut créer des zones à risques nouvelles.

-La modification du relief : lors des chantiers de construction, les opérations de terrassement peuvent entraîner la suppression d'une butée de pied stabilisatrice d'une masse de terrain, ou bien augmenter la pente d'un versant composé de matériaux pas assez cohérents pour cette nouvelle topographie. Le remblaiement engendre une surcharge pouvant déclencher ou aggraver un glissement. De même il entraîne un tassement du sol et ainsi une diminution de la perméabilité, amplifiant l'instabilité.

II. Les mouvements de terrain rapide et discontinu :

II.1.L'effondrement de terrain:

II.1.1Définition:

L'effondrement de terrain est un mouvement très rapide et discontinu (dans une manière brutale et dans une période de temps court) de couches de sol ou de roches dans des zones limitées provoquant des dépressions généralement en forme d'entonnoir (extrêmement ouverte à la surface et extrêmement étroite au fond) au-dessus de la surface de terre où il varie d'environ 1 mètre de profondeur à des fosses de plus de 50 mètres de profondeur en fonction de la géométrie de l'excavation souterraine.

Ce type de mouvement est causé par un fléchissement sans rupture ou par une rupture des couches de sol ou des appuis d'une cavité souterraine d'origine naturelle (phénomène de dissolution ou de suffusion) ou artificielle (exploitation souterraine, carrière, sape de guerre) où le terrain au-dessus ne peut plus le supporter.

Ce phénomène combine des processus liés à la gravité mais aussi à l'évolution des cavités souterraines naturelles avec la dissolution de certaines roches (gypse) et aggravés par les activités humaines (carrières et ouvrages souterrains) créant des «fontis».

Ce type de mouvement de terrain peut apparaître soudainement ou se développer progressivement avec le temps. Il peut poser des risques importants pour les infrastructures, les propriétés et la sécurité humaine, car les bâtiments, les routes et d'autres structures peuvent être engloutis par le sol qui s'effondre.



Figure 16 : exemple de l'effondrement de terrain

II.1.2 Les causes :

Ce type de mouvement de terrain causent par l'existence des vides et des cavités créés dans certaines profondeurs à cause de:

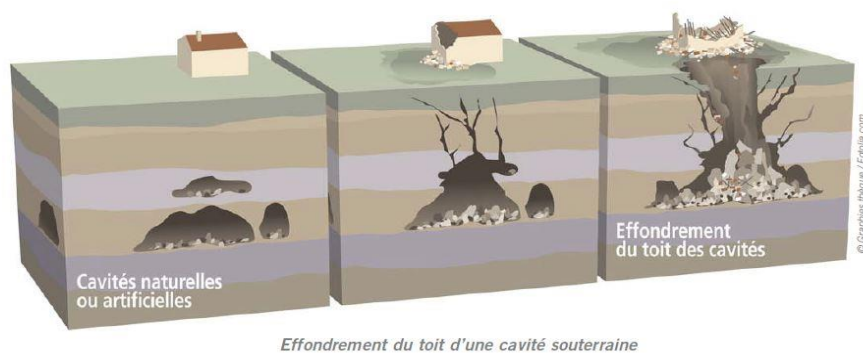
1. Les activités industrielles humaines : L'existence des cavités artificielles dues à l'exploitation minier ou carrières pour extraire les matériaux nécessaires à ses activités : agriculture et constructions principalement (les sablières, les carrières de pierres à bâtir ou chaux...), qui enlèvent des grandes quantités des matériaux souterrains et résultent à fragilisent la stabilité du sol et causent la formation des effondrements.
2. Des cavités naturelles : L'existence des karsts ou des zones karstiques sous la phénomène de la dissolution des roches soluble comme les carbonate ,calcaire ou gypse souterrain des sols causer par la réaction entre ces roches et l'eau que réalisent les acides ,en particulier le gaz carbonique, due à la circulations d'eau dans ces massifs qui dissolvent et fragilisent ces roches avec le temps et crée des cavités souterraines et des réseaux de canaux interconnectés.
Lorsque le toit de ces cavités devient trop faible pour supporté le poids des couches de sol ou de roche sus-jacentes, il s'effondre.

La présence d'une cavité engendre la modification de l'équilibre des éléments dans le sol. Pour tous les types de cavités, des dégradations sont à prévoir du fait que les caractéristiques mécaniques (résistance mécanique) du matériau encaissant diminuent progressivement qui causent une fragilisation des piliers de ces cavités et crée des chutes des couches des toits de sol.

II.1.3. Les types d'effondrement de terrain:

Il existe deux types d'effondrement de terrain selon la profondeur de la chute des couches et le dommage causé : effondrement localisé et effondrement généralisé.

a) L'effondrement localisé: Les effondrements localisés provoquent des affaissements de faibles superficies en surface et caractérisés par l'apparition soudaine des cratères d'effondrement en surface dont l'extension horizontale varient généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre et à des grandes profondeurs.



Effondrement du toit d'une cavité souterraine

Figure 17 : Un schéma représente l'effondrement localisé de terrain
- mementodumaire.net/les-risques-naturels -

b) L'effondrement généralisé: Les effondrements généralisés causés généralement par la rupture d'un ou plusieurs piliers ou toits de cavités, ce type se caractérise aussi par une apparition soudaine des cratères d'effondrement d'une très grande superficie, par contre la profondeur de ces affaissements est moindre que pour les effondrements localisés qui correspondent à la hauteur de galeries de cavités.

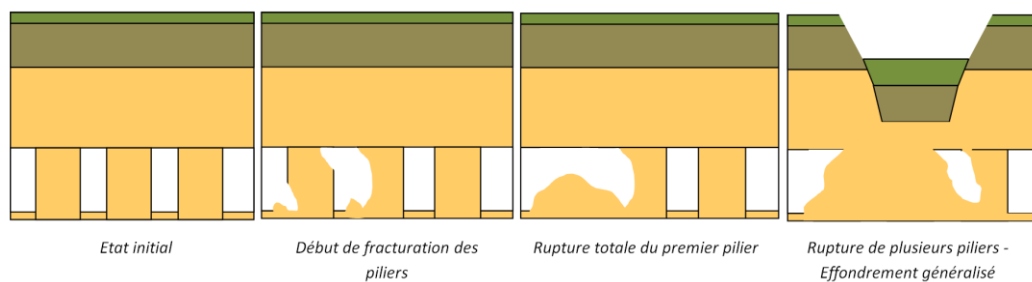


Figure 18 : Un schéma représente l'effondrement généralisé de terrain -
<http://eprcf33.fr> -

II.2.Eboulements, chute des blocs et pierres :

II.2.1.Définition:

Les éboulements ou chutes de pierres et de blocs sont des types de mouvement de terrain rapides et discontinus et très fréquents dans les zones montagneuses ,définis par des ruptures brutales et des chutes soudaines de masses rocheuses importantes sous l'influence de la gravité ,affectant généralement les sites en falaise avec une trajectoire généralement qui suit la ligne de la plus grande pente ou des trajectoires obliques, résultant lors de rebonds de la forme géométrique de certains blocs (plaque roulant sur la tranche) ou de petites irrégularités du versant .

Ces roches parcourent des distances variées selon des facteurs, à savoir : l'énergie développée par les roches, la taille des roches, le volume et la forme des blocs, la nature du sol et la végétation...

Ces mouvements rapides résultent du développement des fissures préexistantes dans la roche et sont généralement précédés par un glissement ou un basculement de la masse rocheuse concernée selon une surface de discontinuité existante, dont les volumes mis en jeux varient de quelques mètres cube à plusieurs centaines de millions de mètres cube, causent des dommages importants car Ils peuvent surviennent avec peu ou pas d'avertissement, ce qui les rend particulièrement dangereux.

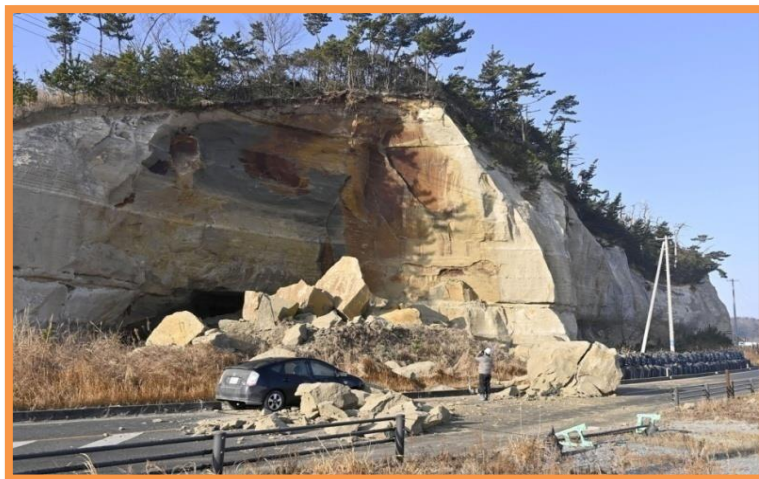


Figure 19 : Un schéma représente une chute des roches dans le nord-est de japon - wtop.com/asia -

II.2.2. Les causes:

Les éboulements rocheux peuvent déclencher par des causes naturelles ou artificielles qui fragilisent les roches et ouvrent les fissures et falaises qui existent dans ces roches, parmi les causes naturelles :

a) Les causes naturelles:

Les conditions climatiques sont l'une des premières causes d'éboulement : Fortes précipitations, les variations de températures, le phénomène de gel et dégel et la neige fragilisent les roches progressivement causent les fissures qui existent dans ces roches d'œuvre et rendent plus susceptibles de se détacher et de tomber éventuellement, provoquent l'éboulement. aussi la vibration causent par les séismes.

b) Les causes humaines :

La vibration causent par le passage des engins et véhicules, les carriers et l'excavation minières, l'utilisation des explosives, les constructions des tunnels et des autres structures peuvent déstabiliser les formations rocheuses et causent la déclenche ces éboulement.

L'enlèvement de la végétation aussi joue un rôle dans la stabilité des roches et augmente la probabilité d'éboulement.

II.2.3. Les types d'éboulement des roches:

On peut classer les éboulements rocheux dans des types selon les volumes des blocs :

a) La chute de blocs:

que l'on appelle dans le milieu anglophone « Fragmentalrockfalls » (Evans and Hungr, 1993), se caractérise par le détachement d'une masse rocheuse dont les éléments, en nombre limité, interagissent lors de la phase de propagation principalement avec le relief (pas d'interaction entre blocs), ces blocs d'éboulement rebondissent ou roulent sur le versant, causent une chaîne et mobilisent plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes d'autres matériaux (blocs rocheux, roches, débris, terre et boue) qui s'écoulent à grande vitesse et sur une très grande distance et causent des avalanches rocheuses.



Figure 20 : Une photo que représente chute de blocs – BRGM -

b) Les éboulements rocheux:

Sont présentés comme des mouvements gravitaires de taille intermédiaire ($< 10\ 000\ m^3$) mais extrêmement rapides (vitesses $> 5\ m/s$) où un comportement en masse – inter granulaire – est clairement identifié (Bourrier, 2008) et dont l'origine et le mouvement résultent de surfaces de discontinuité facilement identifiables.



Figure 21 : Une photo représente un éboulement rocheuse - ici.radio-canada.ca -

c) les avalanches rocheuses: consistent en des mouvements gravitaires de très gros volumes (>10 000 m³) dont le comportement peut être assimilé à celui d'un fluide, de la même manière que les avalanches de sol ou de neige. (Scavia et al. 2010; Pirulli, 2005; Mckinnon et al. 2008)."(Yeison-Stiven CUERVO archives)



Figure 22 : Une photo qui représente une avalanche rocheuse - www.aquaportail.com -

II.3.Avalanche:

II.3.1.Définition :

les avalanches est un mouvement rapide de terrain, Le terme « avalanche » est un mot d'origine suisse : il combine « avaler » (descendre) et « lavantse » (glisser) , elle correspond à un déplacement rapide d'une masse de neige sur une pente, provoqué par une rupture du manteau neigeux . Elle se déclenche en haute montagne et dévale les pentes que joue un rôle moteur dans un écoulement avalancheux, à des vitesses variant de quelques mètres par seconde (environ 10 km/h) à plus de 100 m/s (plus de 350 km/h) sous l'effet de la gravité et son poids.

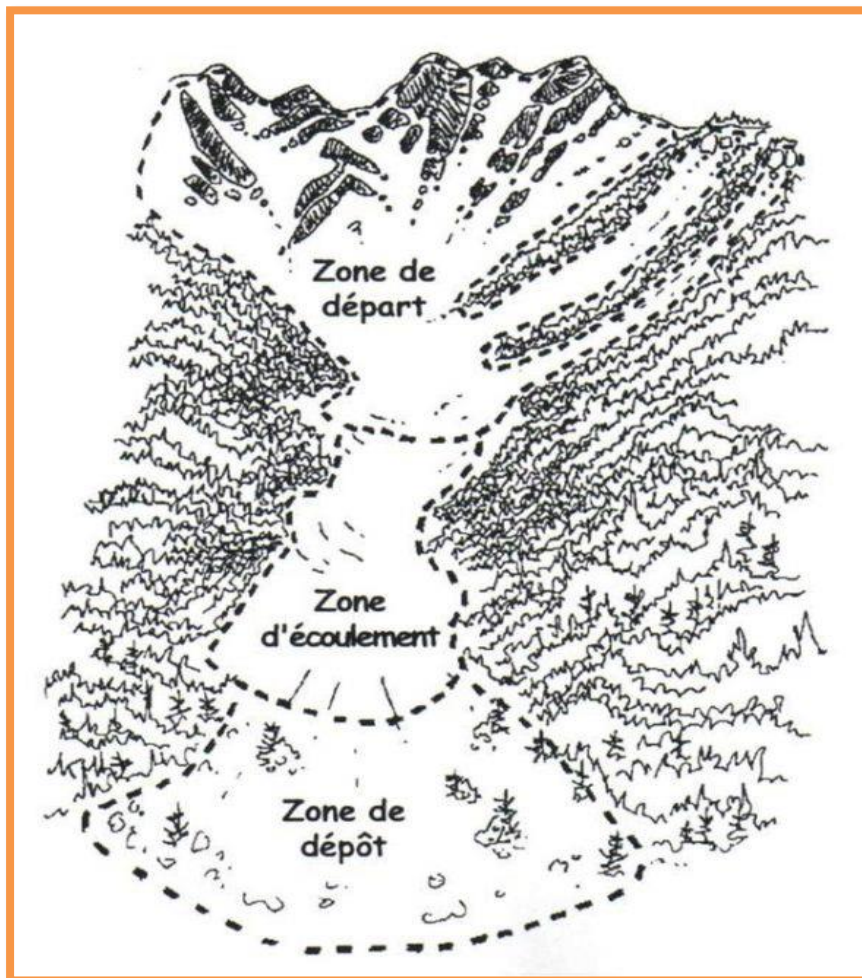


Figure 23 : Un schéma représente les zones d'accumulation d'une avalanche - avalanchequebec.ca -

II.3.2.Les facteurs:ce phénomène est déclenché a cause des facteur relier au neiges, topographie de terrain et des autres facteurs :

a)la topographie de terrain: "Les avalanches peuvent apparaître indifféremment sur des versants ou dans des couloirs, mais les sites avalancheux présentent souvent des caractéristiques communes, qui favorisent plus ou moins l'activité avalancheuse. On identifie généralement une zone de départ ou d'accumulation, une zone d'écoulement ou de transit et une zone d'arrêt ou de dépôt" (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE – France)

b) La pente : Elle intervient très fortement sur la dynamique de l'écoulement qui est la vitesse D'écoulement et aussi sur l'orientation de la trajectoire à l'arrivée sur la zone d'arrêt ou de dépôt, généralement dans des degrés comprises entre 25 ° et 55 °.

c) La neige et manteau neigeux:Les chutes de neige peuvent provoqué des avalanches ,il se forme une nouvelle couche sur le manteau, dont les caractéristiques dépendent des conditions météorologiques, principalement la température . la neige se transforme, sous les effets de son poids, du vent et surtout de la différence de température ausein des couches (gradient de températures) que change la cohérence et la stabilité du la manteau neigeux et déclenche ces avalanches , c'est le phénomène de "métamorphose de la neige".

d) Le vent et la température : Lors de chutes de neige accompagnées de vent , la neige est transporter et accumuler en quantité importante dans les pentes abritées . aussi avec la température , un fort ou moyen réchauffement augmentent la teneur en eau liquide dans le manteau neigeux et transforme La neige sous l'effet de la chaleur causent des instabilités et déclenche des avalanches.

II.3.3.Les types d'avalanche :

Il existe différents types d'avalanches, selon la composition du manteau neigeux,morphologie, départ d'avalancheetc.

- Trois types selon la composition du manteau neigeux :

a)L'avalanche poudreuse : produisent lorsque de la neige fraîche et sèche (poudreuse) est tombée en abondance et accumulé donnent des avalanches de très grandes dimensions avec un épais nuage de neige (aérosol) qui progressant et dévale sur le pente à des grande vitesses (100 à 400 km/h). Leur puissance destructrice est très grande et leur La trajectoire est assez rectiligne et elles peuvent remonter sur un versant opposé. Le souffle qui les accompagne peut provoquer des dégâts en dehors du périmètre du dépôt de l'avalanche.

b) L'avalanche de plaque:déclenche à cause de la formation d'une plaque de neige fraîche par le vent et soleil due à une cassure linéaire est visible dans la zone de départ appelé "la cassure brusque», qui glisse sur une couche faible et déjà existante du manteau neigeux, cet écoulement est beaucoup plus lent (rarement plus de 100 km/h).

c) L'avalanche de neige humide:ce type d'avalanche déclenchant lorsque la neige est imbibé d'eau à cause de l'arrive de printemps ou après une pluie ,ce neige et humidifiée dans la température de 0°C et deviens lourde qu'elle dévale la pente à une vitesse relativement lente, entre 30 et 60km/h.

- Deux types selon la départ d'avalanche:"Il existe deux grands types de rupture : le départ en plaque et le départ ponctuel.

Le départ en plaque est provoqué par une cassure linéaire qui limite la zone de départ. Si la cohésion du manteau neigeux est faible, le départ est souvent ponctuel. Le manteau neigeux se rompt à partir d'un point unique. "(Ministère de l'écologie et développement durable – France) .

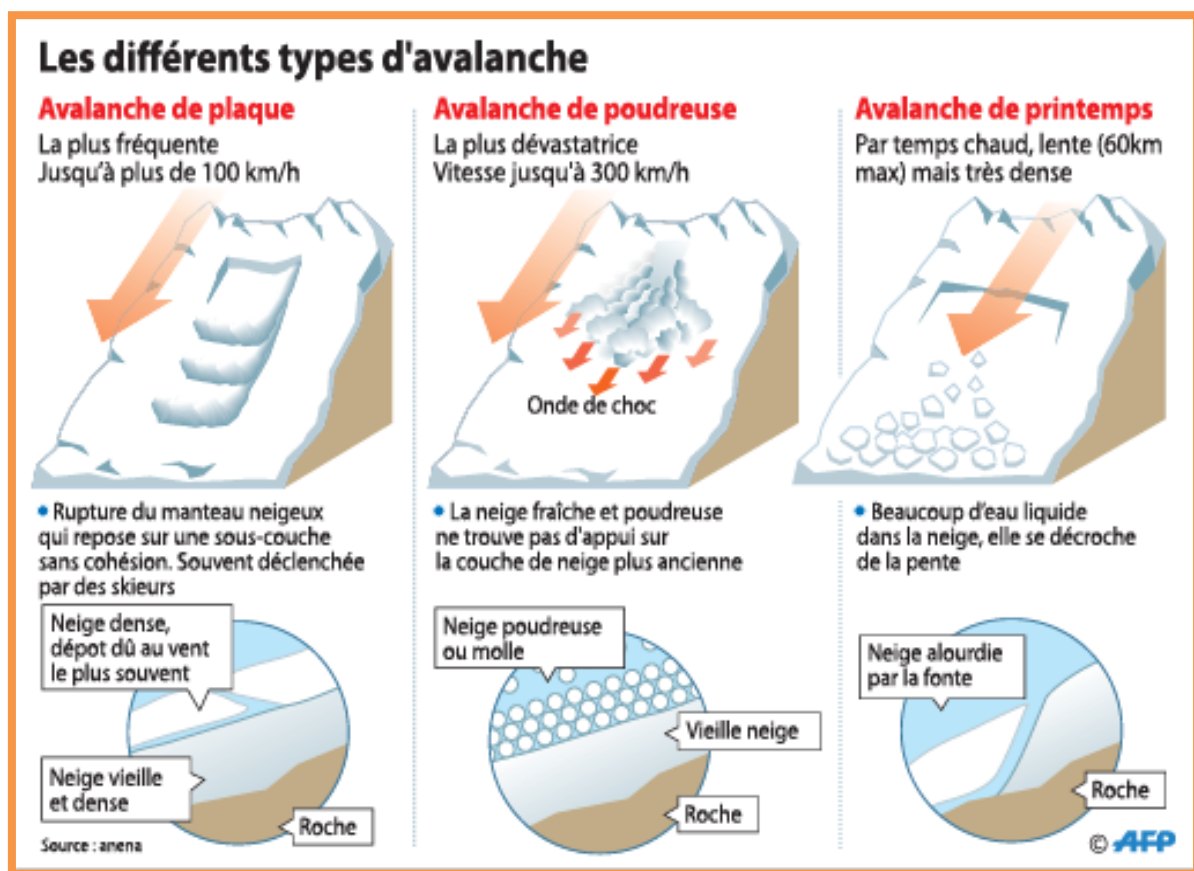


Figure 24 : Un schéma représente les trois types d'avalanche selon la composition de manteaux neigeux – AFP -

- Selon la morphologie de l'avalanche:

Tableau 01 : classification morphologique des avalanches
-Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie France-

Zones	Critères		Caractères distinctifs
Zone de départ	Types de déclanchement		<ul style="list-style-type: none"> • Déclanchement spontané :causes liées à l'évolution du manteaux neigeux (Avalanche spontané). • déclanchement provoqué : causes extérieurs au manteaux neigeux (Avalanche provoqué) : non humaine :corniche, sérac ,animal ,séisme...(avalanche provoqué naturellement) humaines :involontaire (Avalanche provoquée accidentellement) volontaire (Avalanche provoquée artificiellement)
	Géométrie de départ		<ul style="list-style-type: none"> • Départ ponctuel :avalanche partant d'un point (départ sous forme de poire ou de cône) • Départ linéaire :avalanche partant d'une ligne (avalanche de plaque)
	Qualité de la neige	Teneur en eau	<ul style="list-style-type: none"> • Nulle :avalanche de neige sèche • Faible :avalanche de neige humide • Forte :avalanche de neige mouillé
		Cohésion	<ul style="list-style-type: none"> • Faible :avalanche de neige pulvérulent • Faible à modérée :avalanche de plaque friable (tendre) • Forte :avalanche de plaque dure
		Type de neige	<ul style="list-style-type: none"> • Récente : Non ventée :neige fraîche ou particules reconnaissable Ventée :particules reconnaissable ou grains fins • Evoluée :grains fins ,faces planes ,particules reconnaissables ou grains ronds
	Position du plan de glissement		<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'épaisseur du manteaux neigeux (avalanche de surface) • Sur le sol (avalanche de fond)
Zone d'écoulement	Forme de terrain		<ul style="list-style-type: none"> • Pente ouverte (avalanche de versant) • Couloir ou gorge (avalanche de couloir)

	Dynamique (ou type d'écoulement)	<ul style="list-style-type: none"> • Avec nuage :de particules de neige : Au niveau du front (avalanche en aérosol) Dernière le font (avalanche avec panache)
	Neige reprise	<ul style="list-style-type: none"> • Avec ablation du manteau neigeux • Sans ablation du manteau neigeux
	Présence des blocs et/ou d'autres éléments	<ul style="list-style-type: none"> • Avec (blocs tabulaire ,glace ,rochers ,arbres) • Sans
Zone de dépôt	Rugosité superficielle	<ul style="list-style-type: none"> • faible (dépôt fin) • forte (dépôt grossier :blocs boules)
	Qualité de la neige	<ul style="list-style-type: none"> • humide (dépôt humide) • sèche (dépôt sec)
	Souillure visible	<ul style="list-style-type: none"> • avec (avalanche souillée :terre ,rochers ,arbres) • sans (avalanche propre)

II.4. Les coulées de boue

II.4.1. Définition : Une coulée de boue est une coulée très rapide de débris partiellement ou complètement fluidisés par l'ajout de quantités importantes d'eau à la matière source². L'écoulement est dû à une instabilité gravitaire.

La coulée de boue peut correspondre à deux situations :

- rupture de pentes de terrains sursaturés ; rupture de poche, surcharge de nappe ;
- déclenchement sur une pente par temps hyper sec de pluie importante.

C'est le plus rapide (jusqu'à 80 km/h) et le plus fluide des différents types de mouvements de terrain. Elle est composée d'au minimum 30 % d'eau et 50 % de limons, vases et autres matériaux argileux. Il convient de ne pas la confondre avec une inondation boueuse et les laves torrentielles. Les coulées de boue se forment souvent sur des versants et se constituent en cours d'eau à régime torrentiel. La puissance destructrice de certaines d'entre elles permet une comparaison avec les avalanches.

Ce phénomène hydrologique se manifeste en particulier dans les régions arides et semi-arides où l'on peut observer de longues périodes de sécheresse suivies d'averses inattendues et torrentielles. Ces dernières hydratent si brutalement les sols, fortement desséchés, qu'ils s'effritent et font grossir ces cours d'eau temporaires. Il s'agit alors d'un phénomène de solifluxion.

Il existe également un phénomène de coulée de boue par ruissellement lors de cumuls de précipitations importants. Elles touchent les zones agricoles arables où la pente est un facteur déterminant dans la virulence et l'étendue de ces coulées de boue. On peut prendre en exemple l'Alsace.



Figure 25 : Coulée boueuse dans la commune de Tréminis

III. Conclusion chapitre 01 :

Finale­ment, les mou­ve­ments de ter­rain sont des phé­nomè­nes géo­logi­ques natu­rels qui ont des impacts impor­tants sur les vies hu­maines et l'en­vi­ron­ne­ment, Ils se pro­duisent lors­que la sta­bi­li­té des pen­tes ou des coteaux est com­pro­mise, entraî­nant le mou­ve­ment vers le bas du sol, des roches et des débris et ils peuvent être déclen­chés par divers fac­teurs, nota­ment les fortes pluies, les trem­ble­ments de terre, les ac­ti­vi­tés vol­cani­ques et les ac­ti­vi­tés hu­maines telles que la défor­es­ta­tion, les ex­ploita­tions mi­nières et la mau­vaise utilisation des terres.

Les consé­quences des mou­ve­ments de ter­rain peuvent être dévas­tra­trices où ils pré­sentent des risques impor­tants de la sécu­ri­té hu­maine, causant des blessures, des pertes de vie et le dépla­ce­ment de com­mu­nau­tés, aussi les infra­struc­tures tels que les routes, les ponts et les bâ­ti­ments, peuvent être détruites ou gra­ve­ment en­dom­ma­gées, per­tur­bant les sys­tèmes de transport et en­tra­vant les efforts de sau­ve­ta­ge et de récu­pé­ra­tion.

Ces mou­ve­ments ont aussi des effets néfas­tes sur l'en­vi­ron­ne­ment résultant la perte d'ha­bi­tat, l'éro­sion des sols et la con­ta­mi­na­tion des sources d'eau, et pour évité les risques associés aux mou­ve­ments de ter­rain, il est essen­tiel de mettre en œuvre des mesu­res globales et proac­ti­ves comme la réa­li­sa­tion des études géo­logi­ques ap­pro­fon­di­es pour iden­ti­fi­er les zones sujettes aux ces mou­ve­ments, la mise en œuvre de régle­men­ta­tions en ma­tière d'amé­na­ge­ment des ter­ri­toires et le zonage pour empê­ché la con­struc­tion dans les zones à haut risque et le dé­ve­lop­pe­ment des sys­tèmes d'alerte pré­coce pour four­ni des alertes en temps op­por­tun aux com­mu­nau­tés à risque, aussi la promo­tion de ges­tion pra­tique et durable des terres telles que le reboi­se­ment et le con­trôle de l'éro­sion pour ré­duire la proba­bi­li­té de ces phé­nomè­nes.

Chapitre 02

Les techniques utilisées dans l'étude des glissements de terrain à distance

I.L'utilisation de la télédétection dans l'étude à distance de glissement de terrain :

I.1.généralité :

La télédétection, ou "remotesensing" en anglais, est les processus et les techniques utilisées de la détection et surveillance d'un objet ou un terrain utilisent les mesures des rayonnement réfléchi et émis à distance de l'objet étudié. Il est défini d'après la commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale qui est : « L'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. "Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988", et précisément La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent ,par l'acquisition d'images ,d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans) ,sans contact direct avec celle-ci .La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information. d'après (Centre Canadien de Télédétection) .ces techniques permettant l'acquisition des informations physique sur l'environnement : des information géométrique (forme , position et dimensions) , informations optique (réflexion ,transmission ,absorption ...etc.) , des informations physico-chimique (température ,teneur en eau ,matières organique du sol ...) et des autres propriétés physique de zone obtenir par la traitement et analyse de ces rayonnement , utilisent des outils appelés des "capteurs «attachés aux : les ballons ,les avions ,les satellites à défilement (circule dans une orbite à distance de 500 Km à 1500Km au surface de terre et utilisés généralement pour la météorologie, pour les systèmes de téléphonie planétaire et le GPS) ou géostations (des satellites fixés dans l'espace à des grandes distances de 35000Km à 36000Km au surface de terre et utilisent aussi pour le GPS télécommunications, positionnement, prévision météorologique).

Ces capteurs à étaient perfectionnés et en constant développement depuis les années soixante pour améliorer la résolution spatiale, où le premier capteur utilisé est l'appareil photographique, ce capteur analogique utilisant des émulsions chimiques photosensibles (sensibles à la lumière visible essentiellement) pour produire des photographies aériennes. Aujourd'hui il y a deux types des capteurs utilisés :

-Capteurs passifs : ce type de capteurs enregistrent le rayonnement électromagnétique naturel réfléchi (la portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par l'objet ou terrain étudié et transmettent aux récepteurs sous forme de données numériques.

-Capteurs actifs : ce type de capteurs émettent artificiellement un rayonnement électromagnétique produit par sa propre énergie pour illuminer l'objet étudié par un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers cet objet ou terrain.

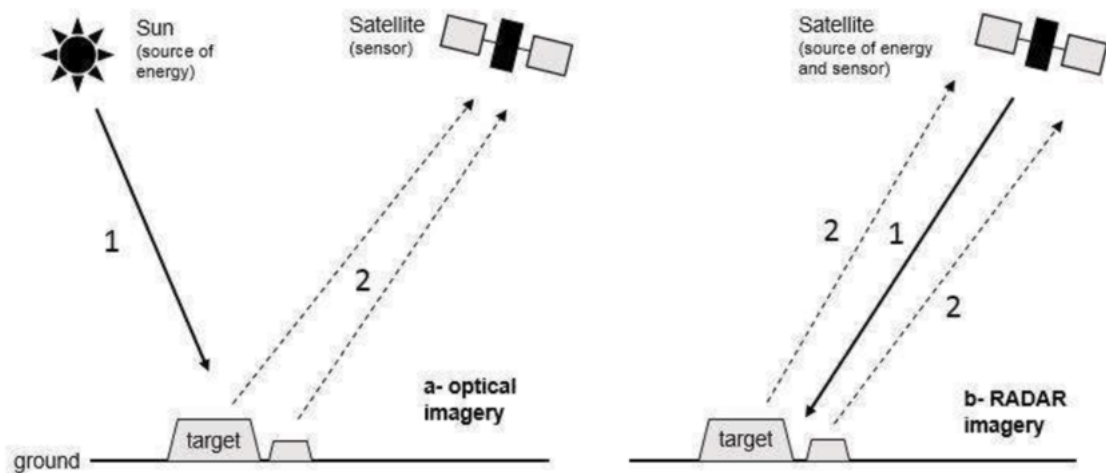


Figure 26 : Principe de fonctionnement des capteurs passifs et actifs - d'après Helen Gurgel

Ces capteurs envoient les informations collectées sous forme de données numériques aux récepteurs qui sont des stations d'analyses qui interprètent ces informations ou données et analysés utilisent les techniques de la photo-interprétation.

I.2.Historique de la télédétection :

L'histoire de la télédétection peut se résumer en quelques événements majeurs , la premier c'est en 1856 qui indique la première utilisation de télédétection à partir d'un appareil photographique attaché au ballon à air chaud par G.F. Tournachon que peut être considérée comme le point de départ de ce qui deviendra la télédétection ,et l'année 1909 indique l'utilisation de la télédétection par attaché l'appareil photographique depuis un avion pour la premier fois .dans la 1ère guerre mondiale jusqu'à les années 50 ,l'utilisation de la télédétection augmentent dans une manier intensive dans quelque domaines et spécialement dans la domaine militaire et en 1957 ,la premiers satellites qui utilise la télédétection est lancé appelés "Spoutnik1",ce lancement déclenchés une période marqué par les débuts de l'exploration de l'Espace et lancement des autre satellite et la développement de la télédétection commencé en 1957 et s'achève en 1972 ,indiqué par :Lancement de "Tiros" (Television and Infra-Red Observation Satellite)la premier satellite météorologique équipé de caméras de télévision américains pour le suivi des masses nuageuses en 1960 , et la lancement de ERTS (EarthResourcesTechnology Satellite que rebaptisé ensuite Landsat 1) qui est la premier satellite spécialisé de télédétection des ressources terrestres en 1972 qui ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et développés ce dernier par :l'augmentation de la résolution spatiale des capteurs et la diversification des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique .en 1978 ,le satellite " SEASAT" a était lancé comme la premier satellite spécialisé dans la télédétection de l'océan, équipé, entre autres capteurs, d'un radar .

Et dans les années 80 jusqu'à 90 les domaines d'application de télédétection devenant très vaste avec le développement des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier qui permet d'accusé des photos à haute résolution spatialequi sont utilisés même aujourd'hui.

I.3. Les domaines d'application de la télédétection :

Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées car il est utilisable dans des plusieurs domaines et aider à recueillir les informations facilement. Ces domaines comprennent :

I.3.1.La Cartographie :

C'est La premier d'application de la télédétection, il est très important pour la cartographie dans le passé, le présent et, surtout, le futur. Les propriétés géométriques des images acquises ainsi que l'information qu'elles contiennent sont naturellement à la source de nombreuses applications cartographiques, facilitent La création de cartes topographiques de base dans des zones non encore couvertes et donnent tous-les-jours mise à jour de ces cartes utilisent les photos recueillis.

I.3.2.Météorologie et climatologie :

la prédiction et la surveillance de la météo et les conditions climatiques autour du globe été l'une des premiers applications de la télédétection , permettent l'étude de l'atmosphère et assurer une couverture globale très fréquemment répétée de la planète par des résolutions spatial plus hautes et donnent des informations critiques de l'atmosphère :les températures ,la précipitations ,les mouvements des nuages ...etc. , et rassembler des modèles numériques de prévision météorologique ou de l'évolution climatique future .

I.3.3.Agriculture et environnement :

les techniques de la télédétection sont aussi utilisés dans les domaines d'agriculture et l'environnement , qui est un outil important pour détectés la variabilité de la culture pour la valorisation de la récolte, la gestion de l'irrigation, la fertilisation variable et la détection précoce des ravageurs et des maladies dans l'agriculture , aussi dans l'environnement par la gestion de la végétation et les forêts , détermination des zones sensibles et des zones menacées par les pressions et activités humaines ,aide à la délimitation des zones à protégés comme les réserves naturelles ,la gestion de l'eau douces et marines ,et la zonages des terrain pollués ou exposé au désastres comme la déforestation ,Sécheresse ,Incendies ,Inondations....etc. .

I.3.4.La géologie et génie civile :

La géologie n'est pas limitée juste à l'étude sur la surface de la Terre ,ce domaine aussi utilisé la télédétection pour extraient des informations sur la structure et la composition de la surface de la Terre et rassemblés des données multispectrales sur la composition lithologique des roches et sols ,produire une représentation détaillée des reliefs et la morphologie de terrain étudié ,l'exploration pétrolière et minier ,identifier, les lignes de failles actives ,la surveillance et l'étude des phénomènes naturels et risques géologiques comme: les éruptions volcaniques par la représentation de la distribution des dépôts volcaniques ,les séismes par rassemblé des informations sur les failles actives sur ce terrain ,les inondations par présentés des phases

séquentielles des inondations incluant la durée, la profondeur et la direction des courants. Il est aussi utilisé pour détecter et étudier les phénomènes d'instabilité des versants comme les éboulements et les chutes des blocs, et spécialement les glissements de terrain par rassemblement des informations sur : le type de sol, la géomorphologie de terrain, la précipitation, les failles et les degrés des pentes ...etc..il permet d'extraire le comportement de la surface du glissement selon deux types d'information : des informations visuelles sur la morphologie du glissement et son évolution dans le temps comme les ouvertures de fissures et apparition de bourrelets, et une quantification de l'amplitude, de la vitesse et de la direction des déplacements de surface.

Il est aussi utilisé au génie civil comme un outil de : surveillance des projets, la planification de ces projets, la gestion des territoires, définir avec précision la géométrie des rues et routes, des rails, des tunnels, des ponts et de toute autre structures ou infrastructures, incluant les infrastructures souterraines.

I.3.5.L'océanographie :

La technologie de télédétection devient un outil puissant pour étudier le fond de l'océan car il offre l'avantage de permettre une vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux). Ils permettent aussi d'observer les phénomènes ondulatoires présents sur l'océan comme les vagues en particulier, et utilisent le rayonnement pour analyser la couleur, température et la turbidité d'eau. Il joue un grand rôle aussi dans les mesures de production biologique et dans les études des glaces de mer en régions polaires.

**Tableau 02 : les applications qui utilise la télédétection – d'après
www.universalis.fr/encyclopedie**

Vecteurs	Capteurs	Domaines d'applications
Télédétection de l'ATMOSPHERE (Météorologie, Climatologie):		
Satellites géostationnaires (Météosat). Satellites à défilement (NOAA).	Basse et moyenne résolution (on privilégie la répétitivité et la couverture spatiale). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Sondeurs atmosphériques. Dans le futur : radars pluviométriques, lidars (capteurs à laser).	Etude de la nébulosité Mesure des températures Vapeur d'eau et précipitations Eléments du bilan radiatif
OCÉANOGRAPHIE et ETUDES LITTORALES		
Avions. Satellites météorologiques ou de télédétection terrestre, Satellites spécialisés (Nimbus, Seasat, ERS-1).	Toutes résolutions selon les espaces considérés (de l'océanographie côtière à l'océanographie globale). Capteurs passifs : visible, infrarouge, microondes. Radars imageurs, radar-altimeètre, diffusiomètre.	Analyse de la couleur de l'océan (production biologique, turbidité). Mesures des températures de surface de la mer. Vagues et vents. Altitude de la surface (dynamique de l'océan). Glaces de mer.
APPLICATIONS TERRESTRES		
Avions. Satellites à défilement en orbite polaire (Landsat, SPOT).	Surtout haute et très haute résolution spatiale : Photographie aérienne. Capteurs passifs : radiomètres à balayage (domaine optique). Capteurs actifs : radars imageurs.	Cartographie régulière et thématique Géologie, prospection minière, géomorphologie. Hydrologie, neige, risques naturels. Agriculture, sylviculture. Urbanisme. Aménagement, génie civil.ect...

I.4. Les types de télédétection :

I.4.1. La télédétection passive :

Ces méthodes utilisent la lumière existante naturellement et elle est utilisable juste où le soleil éclaire la terre. Lorsque le soleil illumine la terre, les satellites détectent l'énergie réfléchie par la terre et enregistrent ces énergies et transformés aux images satellitaires, La plupart des systèmes passifs utilisés dans la télédétection fonctionnent dans les parties visible, infrarouge, infrarouge thermique et micro-ondes du spectre électromagnétique. Ces capteurs incluent : un accéléromètre qui mesure l'accélération (changement de vitesse par unité de temps) ,un Radiomètre hyper-spectral qui est un capteur multispectral avancé qui détecte des centaines de bandes spectrales très étroites dans les parties visible, proche infrarouge et infrarouge moyen du spectre électromagnétique avec des résolution spectrale très élevés ,une radiomètre d'imagerie qui a une capacité de balayage pour fournir un réseau bidimensionnel de pixels à partir duquel une image peut être produite ,une radiomètre qui mesure quantitativement l'intensité du rayonnement électromagnétique dans certaines bandes du spectre par exemple, visible, infrarouge ou micro-onde ,une Sondeur qui mesure les distributions verticales des paramètres atmosphériques tels que la température, la pression et la composition à partir d'informations multispectrales et une Spectromètre pour détecter, mesurer et analyser le contenu spectral du rayonnement électromagnétique incident.

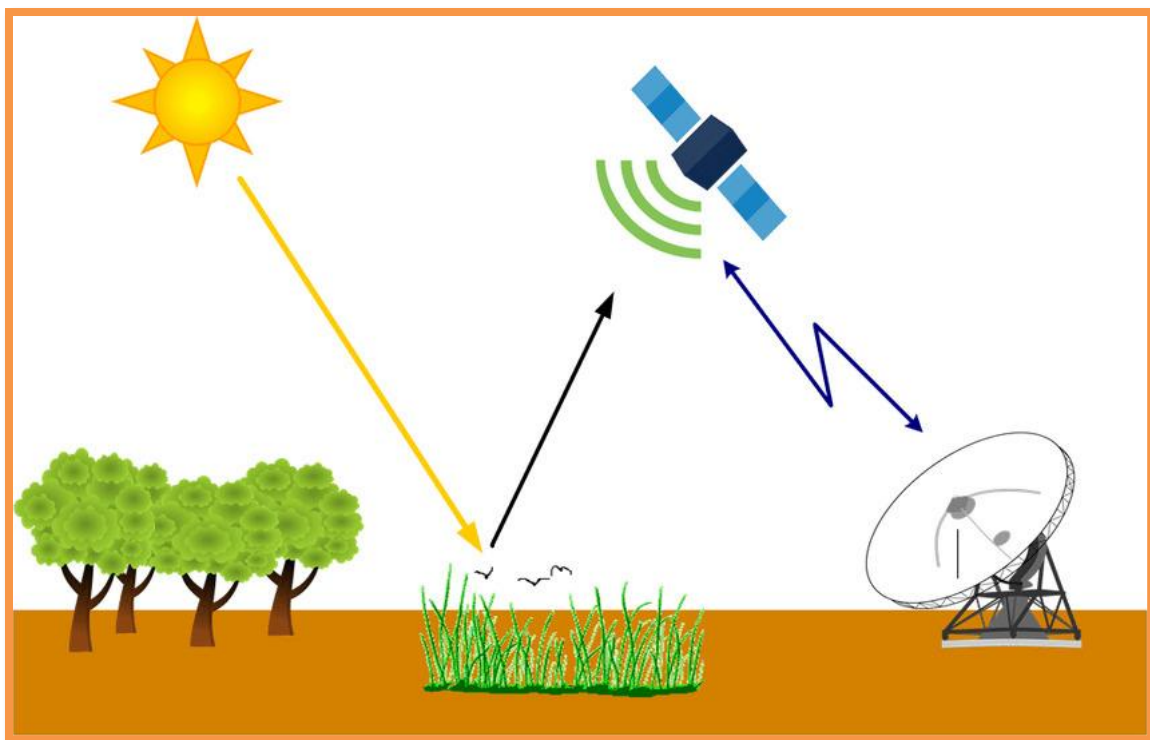


Figure 27: La télédétection passive par des capteurs satellitaires – d'après Lina Jarboui

I.4.2. La télédétection active :

dans l'autre main la télédétection active utilise des capteurs qui transmettent des ondes électromagnétiques sur une cible et détectent les changements dans le signal de retour et pour cela il est capable de pénétrer dans l'atmosphère dans la plupart des conditions météorologiques. Ces instruments sont utilisés pour mesurer les signaux réfléchis, réfractés ou diffusés par la surface de la terre ou son atmosphère. Ce type de télédétection est utilisé dans plusieurs des capteurs comme : LIDAR qui est un capteur de détection et de télémétrie de la lumière qui utilise les impulsions lasers et enregistre le temps entre les impulsions transmises et rétrodiffusées et la vitesse de ses ondes pour calculer la distance parcourue, le RADAR qui est un capteur de détection et de télémétrie des ondes radio qui émet un rayonnement micro-onde dans une série d'impulsions à partir d'une antenne et détecte son rayonnement, et la Diffusiomètre qui utilise les micro-onde à haute fréquence conçue spécifiquement pour mesurer le rayonnement rétrodiffusé.

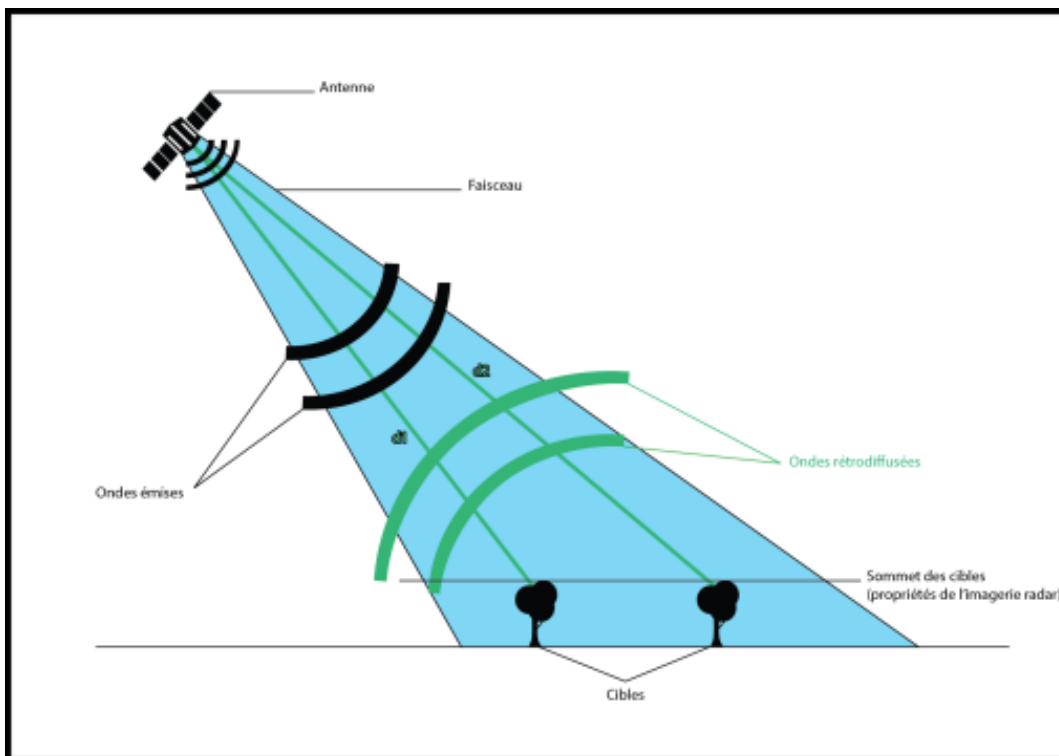


Figure 28 : Un exemple de télédétection active : RADAR – d’après Jean-Paul Rudant

I.5. Les résolutions de données captées :

Les résolutions jouent un grand rôle dans l'utilisation des données captées, soit par les capteurs actifs ou passives, il y a 4 types des résolutions :

I.5.1. La résolution radiométrique :

La résolution radiométrique est la quantité d'informations dans chaque pixel, c'est-à-dire le nombre des bits représentant l'énergie enregistrée ou dans termes plus simples, la résolution radiométrique mesure la capacité d'un capteur à différencier et représenté les variations d'intensité des rayonnements électromagnétique réfléchi ou émis.

Ce type de résolution généralement quantifiée par le nombre des bits utilisés pour représenter les valeurs numériques de chaque pixel dans les données de télédétection ,Par exemple, une résolution de 8 bits est 2^8 qui indiquent que le capteur à des 256 valeurs numériques potentielles (0-255) pour stocker les informations et une résolution 16 bits est 2^{16} qui indiquent que le capteur à des 65,536 valeurs numériques potentielles (0-65,536) pour stocké les informations et une résolution, et pour cela le plus la résolution radiométrique est élevée ,plus il y a des valeurs disponibles pour stocké les informations ,offrant une meilleure discrimination même les plus petites différences d'énergie.

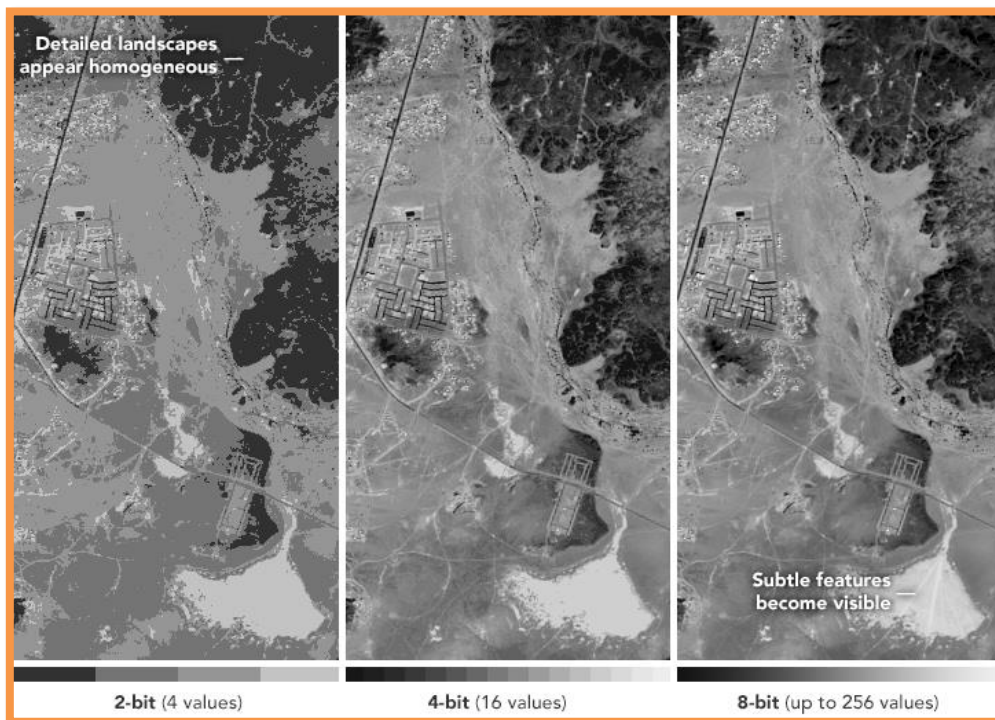


Figure 29 : L'élévation de résolution radiométrique - NASA Earth Observatory images d'après Joshua Stevens

I.5.2. La résolution spatiale :

La résolution spatiale référence au niveau de détail capté par un capteur de télédétection en termes de surface du sol couvert par chaque pixel ou point, et pour cela une résolution spatiale plus élevée signifie des tailles de pixel ou de point plus petites, permettant la détection et la représentation des caractéristiques plus fines à la surface de la terre.

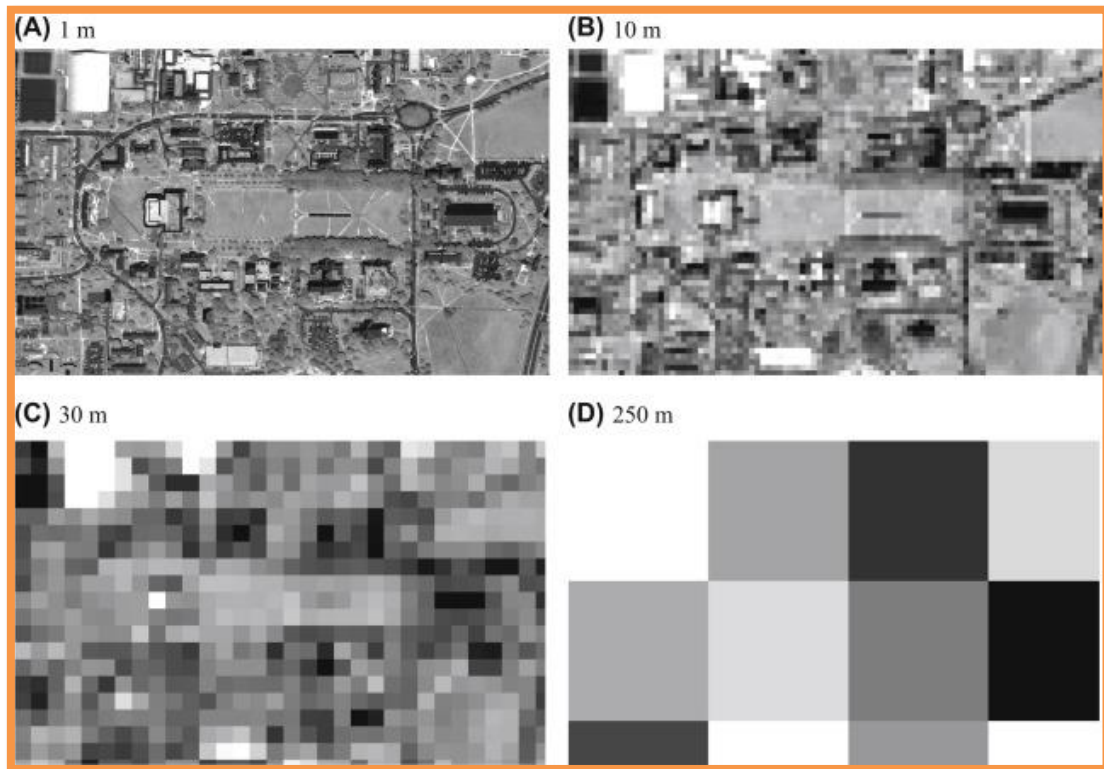


Figure 30 : Les différentes résolutions spatiales – d'après Shunlin Liang et Jindi Wang

I.5.3. La résolution spectrale :

La résolution spectrale est la capacité d'un capteur de télédétection à détecter et différencier des diverses longueurs d'onde ou bandes de rayonnement électromagnétique, cette résolution est relié au nombre et la largeur des bandes spectrales disponibles dans le capteur où une résolution spectrale élevée signifie que ses bandes sont plus étroites une faible résolution spectrale a des bandes plus larges couvrant une plus grande partie du spectre.

Des nombreux capteurs sont considérés comme multispectraux, ce qui signifie qu'ils ont 3 à 10 bandes et certains capteurs ont des centaines à des milliers des bandes et sont considérés comme hyper spectraux.

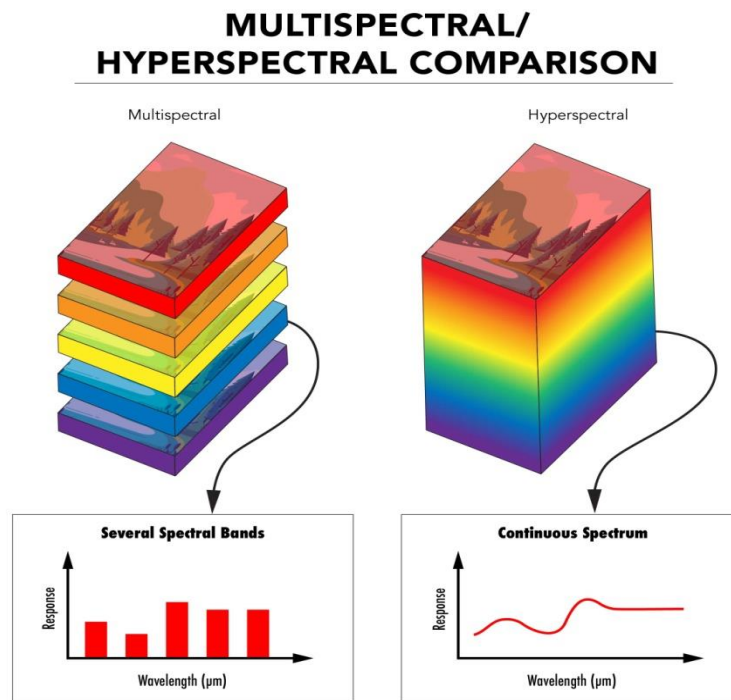


Figure 31 :Les différences entre les capteurs hyperspectral et les capteurs multispectral - www.edmundoptics.com.sg

I.5.4.La résolution temporelle :

La résolution temporelle présente l'intervalle de temps entre les acquisitions successives des données d'une zone étudiée. Cette résolution dépend de plusieurs facteurs, tels que le type de capteur utilisé (comme les capteurs optiques, thermiques, radar ou multi spectraux qui a des résolutions temporelles différents), l'orbite ou la trajectoire, la largeur de bande que ces capteurs couvrent et la stratégie d'acquisition des données.

Une résolution temporelle élevée est avantageuse dans la surveillance des processus dynamiques tels que la croissance de la végétation, les changements de couverture terrestre, le développement urbain et les catastrophes naturelles mais pose des problèmes de traitement et de stockage des données due aux gros volumes de données générés à des intervalles plus courts.

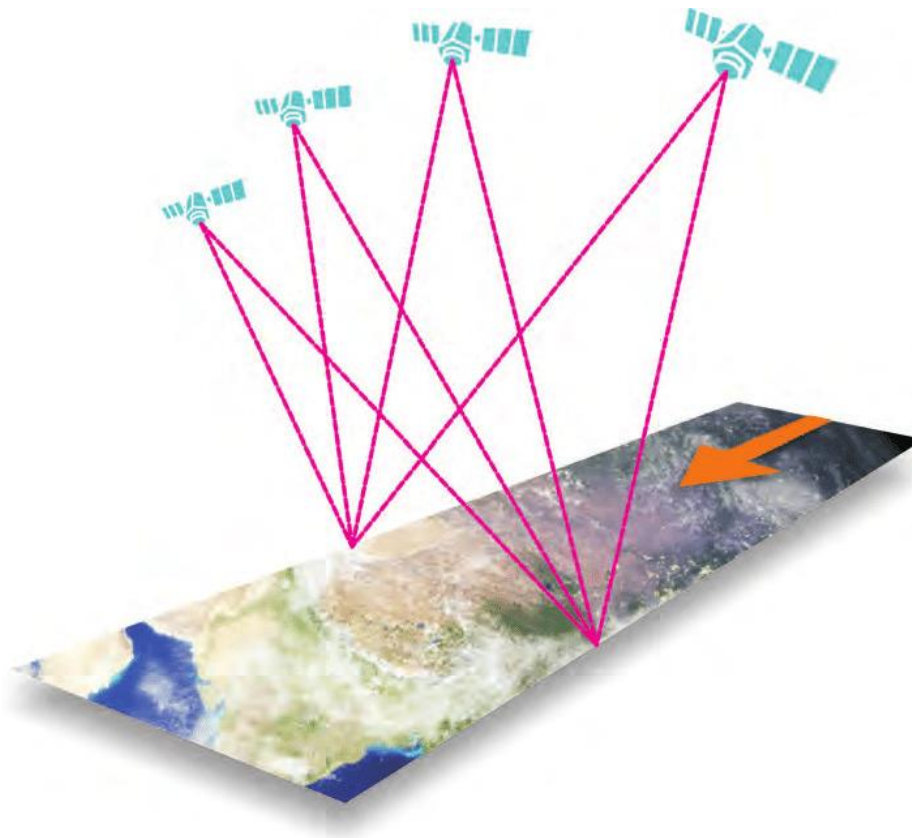


Figure 32: la résolution temporelle – d’après Manuel Arbelo

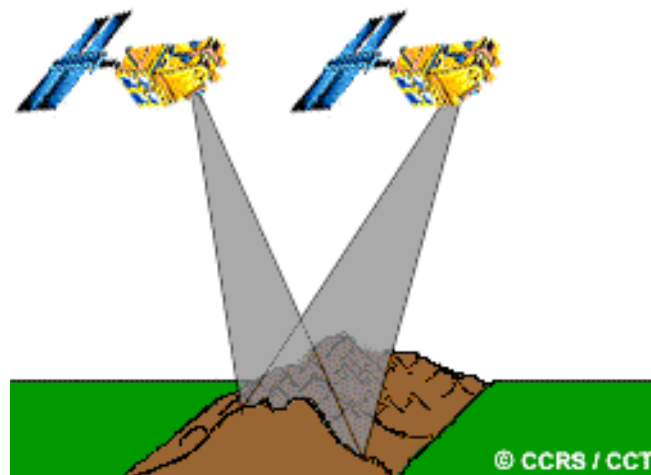


Figure 33 : la résolution temporelle (schéma simplifier) d’après Canada.ca

II. La Photo-interprétation :

II.1.Définition :

La photo interprétation est une technique passive d'analyse et de mesure des images utilisent les images aériennes et satellitaires comme support fondamental pour but d'identifié et de mesuré les différentes cibles dans ces images pour pouvoir les informations utiles de coordonnées tridimensionnelles.

Le terme « photo-interprétation » est presque ancien que la photographie elle-même (environ 150 ans), il passe la phase où il est une technique optique-mécanique purement analogique à des méthodes analytiques basées sur des solutions assistées par les algorithmes mathématiques d'ordinateurs et enfin à une photogrammétrie numérique et électronique basée sur l'imagerie numérique et la vision par ordinateur, qui dépourvue de tout matériel opto-mécanique.

Cette technique est utilisée dans des plusieurs domaines et applications requiert une forme cartographique comme la géologie, agriculture, occupation des sols .il est aussi utilisé dans archéologie pour les études chronologiques de terrain, l'océanographie, météorologie et aussi dans écologie et urbanisme.

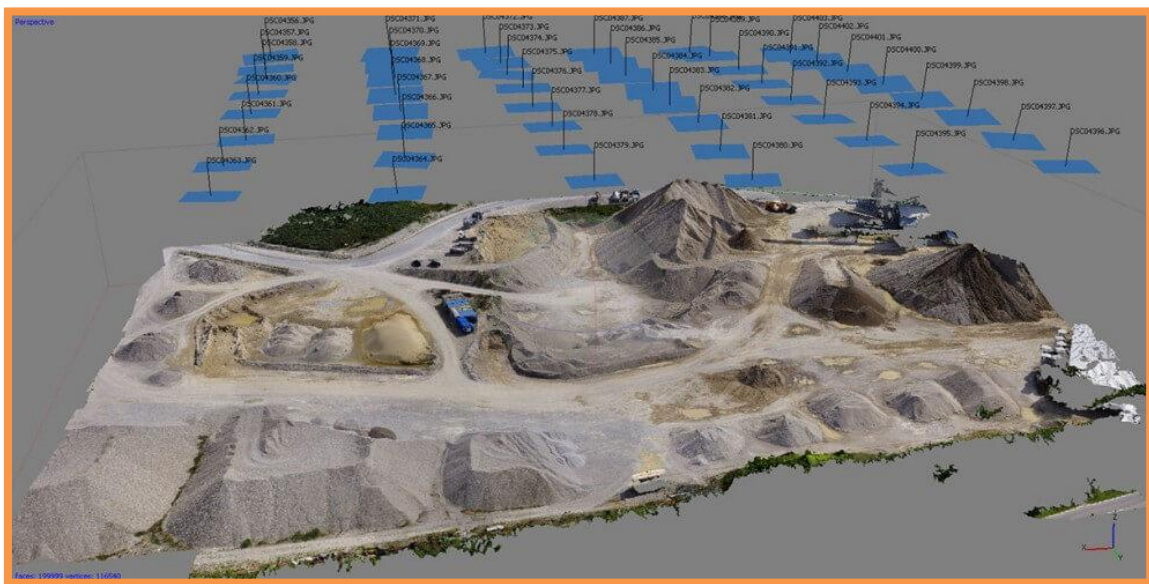


Figure 33 : Un exemple de photo-interprétation – d'après www.aamspi.com/services/aerial-

II.2. Le principe de la photo-interprétation :

II.2.1. L'acquisition des photos aériennes :

La photo-interprétation est une technique passive utilisant la photographie aérienne et satellitaire qui permet de créer des images aériennes par la présence de la lumière naturelle pour rassembler les mesures et les données sur un objet ou un terrain glissé dans notre cas est analysent le changement de position à partir de deux images différentes ou plus .les capteurs de ce type de télédétection sont généralement attachés sur des véhicules aérienne (avions ,satellites ,drones...etc.) et utilisent une source d'énergie ou d'illumination naturel qui existe sous forme des rayonnements électromagnétiques réfléchies par la terre ,ces rayonnements captés par des instruments appelés "Radiomètre" et "Radiomètre imageur" qui mesurent quantitativement l'intensité de ses rayonnement électromagnétique de certaines bandes du spectre dans des angles multiple pour fournis des réseaux bidimensionnel de pixels à partir duquel des image peut être produite .ces photos classés en fonction de longueur d'onde et l'angle de prise de vue selon trois types :

a) Les images obliques :

Un type des images prise généralement vers le bas sous un angle de 40° à 50° entre l'axe optique de la caméra et la ligne du nadir par rapport au sol (le nadir est le point de contact au sol de cette ligne verticale). Ce type des images obtenues par la photographie aérienne.



Figure 34 : Un exemple d'une image oblique de la Crau et la Vallée des Baux – d'après A. Humbert et C. Renard 21/07/2012 - journals.openedition.org

b) Les images panoramiques :

Ce type des images permettent de couvrir des zones très larges souvent de plusieurs kilomètres, captés par des grands angles entre 45° et 180° . Ce type des images obtenues par la photographie aérienne.



Figure 35 : Un exemple de l'image panoramique : Panoramique aérienne de Kirchberg Luxembourg – d'après Gérard Borre

c) Les images verticales :

ces images se produisent lorsque l'axe est vertical qui se confond avec la ligne du nadir 0° (l'axe optique est perpendiculaire au sol), ce type des images est le plus courant et le plus utilisable dans la photo-interprétation car il aide dans les mesures des distances et des autres informations sur le terrain en conjonction avec les cartes topographiques et géologiques et des autres sources. Les images verticales d'un terrain ne sont pas identiques mais la corrélation entre ses images assure un recouvrement longitudinal d'environ 60 % (photos dans l'axe de la ligne de vol) et un recouvrement latéral entre 20 à 40 % (photos de lignes de vol parallèles). Ce type des images généralement collectées à des fins de cartographie et elle est très excellente dans l'intégration géométrique et peut être facilement ortho rectifiée et pour cela elle offre une claire vue du MNT. Généralement, ces images sont stockées dans des agences qui offrent des plusieurs choix de temps, de satellite utilisée et les buts d'étude comme l'"USGS" (United States Geological Survey), l'"IGN FR"....etc.

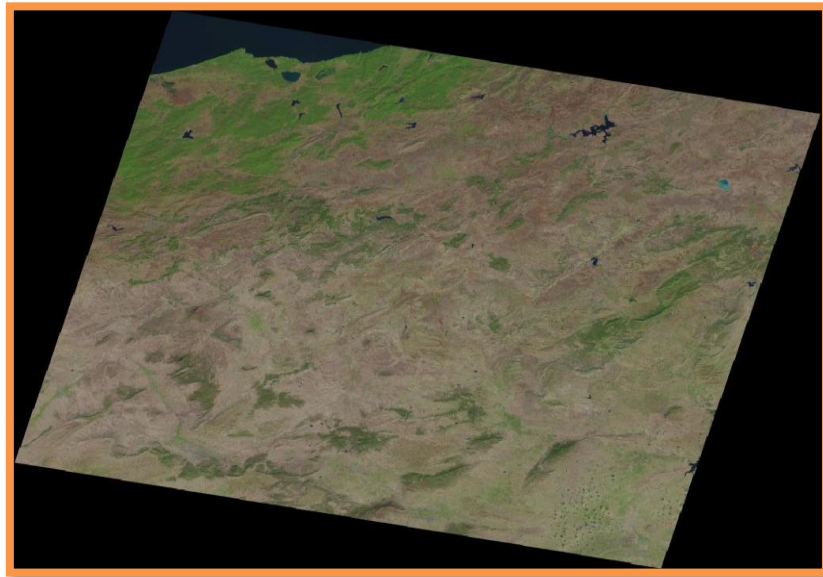


Figure 36 : Une image satellitaire verticale de Tébessa,22/10/2013 –d'après l'USGS

II.2.2.L'interprétation et analyse des donnés :

L'interprétation est le processus de détection, d'identification, de description, d'évaluation et de mesure des différentes cibles (le cible est toute structure ou objet observable dans une image) dans une image. La méthode d'interprétation peut être visuelle ou numérique ou une combinaison des deux, ces deux techniques à des avantages et des inconvénients et même après l'analyse numérique, les résultats sont également analysés visuellement.

a)L'interprétation visuelle des images :

Cette technique consiste d'extraire des informations qualitatives et quantitatives des images qui implique l'identification des divers objets sur le terrain qui peuvent être naturels ou artificiels constitués des points, des lignes ou des polygones. Généralement, l'interprétation visuelle requiert peu ou pas d'équipement mais il est souvent limité à un seul canal de données ou une seule image à la fois car il est très difficile d'effectuer une interprétation visuelle avec plusieurs images. Ces techniques permettent d'observer les différences dans les images par comparés les caractéristiques suivent :

-Ton ou couleur : le ton est la luminosité relative du niveau de gris sur une image en noir et blanc ou une image couleur/F.C.C. Ces caractéristiques permettent de mesurer l'intensité du rayonnement réfléchi ou émis des objets du terrain où les objets relativement sombres à des rayonnement réfléchis moins que les objets qui apparaissent clairs.

-La texture : la texture représente l'arrangement et la fréquence des variations de tons dans une image, cette caractéristique produite par une unité agrégée des caractéristiques qui peuvent être trop petites pour être clairement discernées individuellement sur l'image qui sont : la forme, la taille, le motif et l'ombre des caractéristiques du terrain et il dépende de l'échelle ou la résolution de ces images.

-La forme : la forme est une caractéristique très importante dans l'interprétation qui représente l'allure générale, la configuration ou le contour d'une cible individuel apparus dans ces images .il indique la présence de certains objets dans le terrain comme : les régions urbaines, les bordures des forêts, les fermes...etc.

-L'ombre : l'ombre est un élément utile dans l'interprétation, car elle est créée due à l'existence de soleil, ces caractéristiques permettent d'identifier l'heure de la photographie, estimé la hauteur des objets et la topographie et les reliefs qui apparue dans l'image. Le contour ou la forme d'une ombre donne une impression de la vue de profil des objets mais les objets dans l'ombre deviennent difficiles à interpréter.

-La taille : la taille des objets est une caractéristique très importante dans l'interprétation des images. Il est important d'évaluer la taille d'une cible par rapport aux autres objets de l'image car il accélérer l'interprétation.

-Le motif : le motif est la disposition spatiale des objets naturels et artificiels dans l'image .il est créé due à la répétition de certaines formes générales ou relations dans les tons et la texture et il facilite leur reconnaissance.

-Le site : le site référencé l'emplacement topographique ou géographique d'image .il est aussi un élément important dans l'interprétation des images où les objets ne sont pas clairement identifiés à l'aide des éléments précédents

b) L'interprétation numérique des images :

L'interprétation numérique de l'imagerie de télédétection est une forme de traitement et analyse des images satellites et aérienne à l'aide de diverses techniques numériques et algorithmes pour extraire des informations précieuses et pour but d'enregistrées ces images satellitaires ou aérienne dans un format numérique .c'est une domaine multidisciplinaire qui combine la télédétection, le traitement des images, l'analyse géo spatiale et les techniques de traitement des données et pour cela il passe des plusieurs étapes :

-Les corrections radiométrique et géométrique :

La correction radiométrique est une étape essentielle dans le traitement des images satellites pour supprimer ou compensé les distorsions et variations radiométriques causées par les caractéristiques du capteur, les effets atmosphériques et des autres facteurs pour assurer que les valeurs des pixels de l'image représentent des mesures précises et comparables de la réflectance ou la radiance émise de la surface de la terre.

Dans l'autre main la correction géométrique ou appelée aussi la "rectification géométrique" et "ortho rectification" est le processus de suppression des distorsions géométriques des images aérienne et satellitaire pour représenter la surface de la Terre en termes de localisation spatiale et d'échelle avec précision .cet étape est très crucial et nécessaire car ces images sont généralement affectées par des plusieurs types des distorsions comme :la position et l'orientation du capteur ,le relief du terrain, la courbure de la terre et les effets atmosphériques

Ces deux corrections utilisent des modèles mathématiques complexes décrivant les interactions principales, ces modèles sont très efficaces mais besoins la connaissance des valeurs de certains paramètres comme la composition de l'atmosphère.

-L'amélioration des images : Ces des techniques utilisées pour améliorer la qualité visuelle des images. Ces techniques visent à mettre en évidence des caractéristiques spécifiques comme : l'amélioration de contraste, la réduction de bruit et l'amélioration d'apparence générale des images pour une meilleure analyse et interprétation.

-La fusion des images : la fusion des images est le processus que consiste de combiné plusieurs images de la même zone pour produire une nouvelle image fusionnée géométriquement et/ou sémantiquement plus riche que les images initiales .ce technique permettent d'améliorer la qualité général ,les détails et les information de produit finale .elle utilisent des plusieurs méthodes et techniques pour faire la fusion comme :la fusion basée de

pixels ,fusion basée de fonction et la fusion basée de model .avant la fusion ,les images d'entrée peuvent être alignées dans l'espace pour assurer que les pixels correspondants représentent le même emplacement sur la surface de la terre .

-La classification et segmentation des images : Sont deux techniques importantes utilisées dans le traitement numérique de terrain qui consiste d'impliqué la catégorisation et l'identification des différents objets ,caractéristiques ou types de couverture terrestre dans l'imagerie .La classification des images est la processus de la catégorisation des images dans des groupes selon certains caractéristiques l'aide des données de formation étiquetées où chaque pixel ou région est étiqueté manuellement avec sa classe correspondante utilisent divers algorithmes (classification supervisée) ou en fonction des similitudes dans leurs propriétés spectrales à l'aide d'algorithmes de regroupement (classification non supervisée) .d'autre part, la segmentation des images satellitaire consiste de diviser les images d'une région homogène selon leurs caractéristiques comme les valeurs spectrales ,la texture et la forme pour regrouper les pixels ou régions de la même propriétés et délimiter des limites entre différents objets ou classes de couverture terrestre .

-Extraction des caractéristiques :L'extraction des caractéristiques des images et une étape très important dans la photo-interprétation qui fait référence au le processus d'identification et de capté des caractéristiques ou des attributs spécifiques d'intérêt dans les images donné.

Ces caractéristiques peuvent représentées des objets, des motifs ou des propriétés présentes dans la surface de la terre et sont classifiés dans deux catégories majeurs :basées sur les pixels concentre sur des pixels individuels ou des petits parties dans l'image qui incluse des valeurs spectrales ,telles que l'intensité ou la réflectance dans différentes bandes spectrales, des composants de couleur (par exemple, RVB) et des propriétés de texture (par exemple, entropie, homogénéité) et l'autre basées sur les objetsqui peuvent inclue des propriétés telles que les valeurs spectrales moyennes et les mesures de texture ou les descripteurs de forme.

Ces caractéristiques extraites fournissent des informations précieusesutilisent dans des applications multiples comme la classification de la couverture terrestre, la détection d'objets, la détection de changements et la surveillance environnementale.

-La Détection des changements :La détection des changements est aussi très important dans l'interprétation, ces les processus basés sur la recherche de divergences dans deux images satellitaires avant et après un certain événement par analysés des données statiques et géo spatiales qui se produisent entre plusieurs ensembles des images capturées à des moments différents.

Cette étape joue un rôle crucial dans le suivi et la compréhension des différentes dynamiques environnementales, sociales et urbaines car il permet d'identifier les changements et les mouvements dans la couverture terrestre, l'utilisation des terrains, les infrastructures, les ressources naturelles et pour suivre l'évolution et les conséquences des inondations, des incendies, des sécheresses continues et des autres catastrophes et événements météorologiques extrêmes.

-Visualisation et interprétation des résultats : La visualisation des images satellitaires et aériennes signifie la présentation des données dans un format visuellement interprétable pour faciliter la compréhension des informations dans les images et permettre aux utilisateurs d'explorer, observer et analyser ces images dans une manière dynamique. Elles donnent une étude chronologique complète de site.

Dans cette étape aussi on peut faire une visualisation 3D de terrain combinant l'imagerie satellitaire et aérienne avec des modèles numériques de terrain (MNT) pour créer une représentation tridimensionnelle de la surface de terrain utilisant des logiciels et des logiciels comme l'ArcGIS qu'il est utilisable dans des applications et domaines multiples.

II.3. Les avantages et les inconvénients de photo-interprétation :

II.3.1. Les avantages :

- La photogrammétrie est souvent plus abordable que les autres techniques de télédétection comme Lidar (Light Detection and Ranging) car il utilise des images aériennes ou satellites couramment disponibles pour capturer et analyser des données sur des vastes zones.
- Selon l'imagerie utilisée, la photo-interprétation peut fournir des données à haute résolution permettant une analyse précise et détaillée.
- Ces techniques permettent de couvrir des vastes zones allant de petits sites à des grands paysages dans un seul ensemble de données permettant une analyse et une surveillance complètes de la zone d'intérêt.
- La photo-interprétation permet l'analyse des changements dans le temps par comparaison des images capturées à différents moments pour détecter et mesurer les variations temporelles, telles que les changements de couverture terrestre, la croissance urbaine ou les phénomènes naturels, fournissant des informations précieuses pour diverses applications.
- La photo-interprétation peut générer des modèles 3D précis et détaillés du terrain étudié, par analyse de plusieurs images superposées et reconstruit des structures tridimensionnelles, des modèles de terrain ou des modèles numériques de surface, qui trouvent dans des applications multiples comme l'urbanisme, l'ingénierie, l'archéologie et la réalité virtuelle.

II.3.2. Les inconvénients :

- L'inconvénient majeur de la photo-interprétation est le relevé d'images n'est pas possible en l'absence de lumière car les satellites ne peuvent pas projeter leurs propres sources de lumière.
- Aussi les effets atmosphériques et environnementaux car il est sensible aux conditions atmosphériques et facteurs environnementaux qui peuvent affecter la qualité de l'image tel que la couverture nuageuse, la brume, les ombres ou les variations des conditions d'éclairage qui impactent la précision de l'imagerie, introduisant potentiellement des erreurs dans les produits dérivés.
- Le géoréférencement précis de l'imagerie et le besoin des points de contrôle au sol sont essentiels pour obtenir une photo-interprétation de haute qualité et pour cela il nécessite des efforts et des ressources supplémentaires pour le positionnement précis de l'imagerie, en particulier pour les applications qui nécessitent une grande précision.

III. La Télédétection utilisée Insar :

III.1.Définition :

L'Insar ou (Interferometric synthetic aperture radar) est une technique d'imagerie actif qui utilise les ondes radios (signal hyperfréquence) émises et enregistrées par des systèmes radar aéroportés ou bord de satellites pour mesurer l'élévation de la surface topographique et détecter les déplacements ou changements de terrain à partir de la résolution de phase .cette énergie circule normalement dans l'espace en ligne droite et à vitesse constante et fait usage de l'écho produit par l'obstacle situé sur la trajectoire ,illuminés des portions de terrain et reçoit les ondes réfléchies par le zone étudié qui permet de réaliser des mesures à toute heure du jour et de nuit de certaines caractéristiques comme: la position horizontale ,la géomorphologie ,les altitudes ,les formes ...etc. .

L'Insar exploite la propriété de l'écho sur les objets par l'émission des ondes électromagnétiques à hautes fréquences généralement entre 300 mégahertz (MHz) et 15 gigahertz (GHz) dans l'espace ,et des parts de ces ondes sont interceptés par l'objet ou terrain et reflétés au récepteur ,ces ondes peuvent facilement amplifiées, et pour cela le récepteur peut détecter des objets à des grandes distances où les autres émissions, telles que le son ou la lumière visible, seraient trop faibles pour détectées,et cependant moins sensibles aux conditions atmosphériques Par rapport à l'imagerie satellitaire optique que utilisent les ondes du spectre visible permettent d'acquies des donnés même aux conditions très dégradées (pluie, brouillard) .

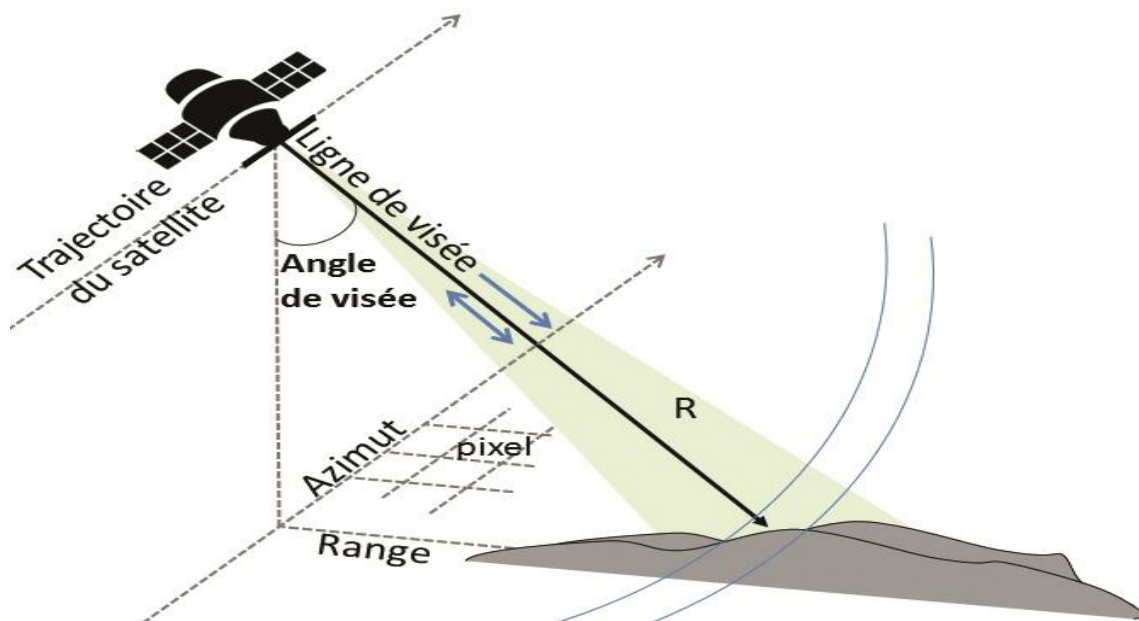


Figure 38 : un schéma représente la technique de RADAR – d'après Matthias Jauvin www.solscope.fr

III.2.Types de radar utilisé en télédétection :

III.2.1.RADAR Altimètre: Un altimètre est un instrument de mesure Originellement conçue et développée pour l'étude des surfaces océaniques (mesurent les altitude des grands plans d'eau continentaux et des fleuves), permettant de déterminer la distance verticale entre un point et une surface de référence. Les antennes radar des altimètres embarqués à bord des satellites émettent des signaux, ondes électromagnétiques à très hautes fréquences appartenant au domaine des micro-ondes (0.3 -1000 GHz) comprises entre 1 GHz et 40 GHz, au nadir et reçoivent en retour les échos réfléchis par la surface impactée.Les longueurs des ondes utilisées permettent l'utilisation de ce type de RADAR quelles que soient les conditions météorologiques (mesures possibles au travers des nuages moyennant de corriger certains de leurs effets).

III.2.2.Diffusomètre radar :Un diffusomètre est un radar qui servant à la mesure du facteur de rétrodiffusion d'une onde électromagnétique "radar" depuis des altitude entre 750 à 850 km, par mesuré la surface efficace radar de réflexion d'une surface partransmettesdes impulsions et mesuré la portion d'énergie retournée.Ce type de radar utilisé pour différents usages, en particulier, il peut être un type de radar météorologique sans image directe (pour mesurer la hauteur des vagues ou la force des vents à partir d'un satellite artificiel ou d'un avion).La performance du diffusiomètre n'est qu'à peine perturbée par la couverture nuageuse ou l'illumination solaire de telle sorte que cet instrument peut être utilisé efficacement dans les régions polaires, souvent sombres ou couvertes par les nuages. Mesure la surface efficace de réflexion de la cible en transmettant une impulsion et en mesurant la portion d'énergie retournée.

III.2.3.Radar météorologique :Un radar météorologique est un type de radar utilisé en météorologie pour repérer les précipitations, calculer leur déplacement et déterminer leur type (pluie, neige, grêle, etc.), La structure tridimensionnelle des données obtenues permet non seulement de reconnaître la position de ces précipitations mais à partir du signal de retour, il doit estimer leur intensité, la vitesse à laquelle elles se déplacent et leurs mouvements à l'intérieur des nuages ,où servant comme des traceurs pour déduire la direction et la vitesse des vents dans la basse atmosphère .

III.3.Le principe de l'Insar :

L'imagerie radar est un outil de télédétection actif (c'est-à-dire que le radar est à la fois émetteur et récepteur du signal) utilisant des ondes électromagnétiques allant du millimètre à quelques mètres des gammes de longueur où il permettent de formées des images SAR à partir de ces ondes émises et enregistrées par les systèmes radar aéroportés ou à bord de satellites ,il utilisent des trois mesures fondamentales du radar imageur sont celles du temps d'aller-retour de l'onde entre le radar et le sol, de l'intensité de l'onde reçue et du déphasage (par la suite appelée phase) entre la référence de l'onde émise et l'onde reçue.et pour cela les images SAR sont classifié dans deux grands catégories :les images de phase et les images d'amplitude .

-Les images d'amplitude du signal reçu : ce type dépend des propriétés du sol (le signal est plus ou moins réfléchi, transmis ou diffusé) et correspond à la quantité des ondes revenant vers le satellite. Par exemple, les roches exposées et les zones urbaines présentent de fortes amplitudes, tandis que les surfaces planes lisses (comme les bassins d'eau calmes) présentent de faibles amplitudes, où les pixels clairs correspondent à des zones de fort rayonnement rétrodiffusé (par exemple les zones urbaines) et les pixels sombres correspondent à un faible rayonnement rétrodiffusé (par exemple, un bassin d'eau calme).

-Les images phase du signal reçu: ce type des images dépend de la phase pixellaire (due à la nature du sol et des objets qui y sont présents) de la phase de trajet .les cibles à différentes distances du radar (différentes slant ranges) introduisent des retards différents entre la transmission et la réception du rayonnement mais en raison de la nature périodique du signal, des distances de déplacement qui diffèrent par un multiple entier de la longueur d'onde introduisent exactement le même changement de phase afin de former l'image SAR (bidirectionnelle) .les pixels dans les images de phase (appelée cellule de résolution au sol) correspond à une valeur de phase comprise entre 0 et 2π

III.3.1.Le prétraitement des données SAR :

Après accéder aux données SAR (des images radar de la surface de la terre) à partir de satellites tels que ERS, JERS et RADARSAT, on peut passer à l'autre étape qui est le prétraitement de ces données. Le prétraitement des images SAR consiste de supprimer le bruit et corriger les distorsions géométriques de ces images par : définit la relation entre les coordonnées sol et l'image, converti les valeurs des pixels de l'image du nombre numérique (DN) à une unité de mesure géophysique standard de rétrodiffusion radar ,combinent toutes les bandes en une seule image puisque les scènes SAR peuvent composées de plusieurs bandes ou sections ,et finalement la correction du terrain utilisent l'aplanissement radiométrique du terrain (RTF) et la géocodage qui permettent pour éliminer les distorsions radiométriques

dépendantes de la géométrie et pour supprimer les distorsions géométriques telles que les raccourcis et les ombres ,en utilisant des MNT (Digital Elevation Model) pour connecter ces images à un système des coordonnées géographiques avec respect de la pente du terrain .

III.3.2.Génération des inter-féogrammes :

Les inter-féogrammes sont créés par comparaison de deux ou plusieurs images radar acquises sur la même zone à des moments différents pour comparer la différence de phase mesurée entre les images SAR, qui correspond au déplacement relatif ou à la déformation du sol.

Cette étape est très cruciale dans l'étude d'un terrain, utilisent des processus tels que :

la Co-enregistrement pour assurer l'alignement au niveau des pixels corrigés, les petites différences géométriques, telles que la rotation, la translation et la mise à l'échelle, entre les images sélectionnés ,le calcul des interférencesqui consiste à combiné les images SAR Co-enregistrées pixel par pixel pour obtenu la différence de phase entre elles ,le Filtrage de bande de phase qui est appliqué pour isolé les informations de phase souhaitées et supprimer le bruit et les signaux indésirables par l'utilise des techniques comme des filtres adaptatifs ou des filtres spectraux pour améliorer la qualité des franges interférométriques ,et finalement l'estimation de cohérence qui effectuée pour évaluer la fiabilité de l'améliorer .

III.3.3."Phase Unwrapping" :

"phase unwrapping" est l'étape la plus compliquée et la plus importante du traitement des données interférométriques.

Après la génération des inter-féogrammes, les valeurs de phase sont enveloppées entre $-\pi$ et π en raison de la nature périodique de la fonction trigonométrique utilisée pour représenter la phase et pour cela, le déroulement de phase vise à éliminer ces discontinuités de phase et a obtenu des valeurs de phase continues et précises qui sont essentielles dans la création des images de phase pour interpréter les déformations du sol ou d'autres phénomènes géophysiques.

Le déroulement de phase utilise des algorithmes pour reconstruire des valeurs de phase continue en estimant le nombre des cycles complets (2π) nécessaires et ajoutant ou soustrayant des multiples de 2π pour effectuer chaque mesure de phase avec précision.

Ces algorithmes de déroulement de phase comme (Cost Flow (MCF), Branch-Cut et Goldstein) suivent généralement une approche guidée par la qualité, où la fiabilité ou la « qualité » de chaque mesure de phase est prise en compte, cette qualité est souvent dérivée des valeurs de cohérence obtenues lors de la génération de l'interférogramme où une cohérence plus élevée indique des mesures de phase plus fiables tandis qu'une cohérence plus faible implique des valeurs de phase plus ambiguës.

III.3.4.Le filtrage :

Le filtrage est une étape appliquée aux inter-féogrammes pour supprimer le bruit et les signaux indésirables, il inclue des filtres spatiaux (par exemple, Lee, Médian) et des filtres adaptatifs (par exemple, Goldstein, Gamma-MAP) qui permettent d'améliorer la qualité des franges interférométriques et améliorer la précision des mesures de déformation.

Ces filtres incluent : des filtres de cohérence pour supprimer ou dégrader les informations de phase dans les zones à faible cohérence, généralement associées à la végétation ou à des surfaces très texturées, le filtrage spatial exploite les propriétés spatiales des interférogrammes pour réduire le bruit et améliorer les signaux de déformation qui incluent : les filtres médians, les filtres gaussiens et les filtres de Lee, le filtrage spectral qui analyse le spectre de puissance de l'interférogramme utilisé pour dégrader le bruit de la bande de fréquence souhaitée qui améliore efficacement les signaux de déformation. Le choix du filtrage dépend des caractéristiques de l'interférogramme, du niveau de suppression de bruit souhaité et des objectifs spécifiques de l'étude, il est courant d'appliquer plusieurs filtres de manière séquentielle pour obtenir des résultats optimaux.

III.3.5. Le géocodage :

Le géocodage ou la géoréférencement consiste à transformer les données SAR traitées des coordonnées radar (qui est généralement un système de référence à distance oblique et azimut) en coordonnées géographiques de la surface de la terre, cette étape permet d'analyser des données comme la latitude et la longitude à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) et pour cela il souligne la nécessité d'utiliser le meilleur MNT disponible pour le géocodage, dans le pire des cas un MNT global avec une erreur de hauteur maximale de l'ordre de 100 mètres peuvent être utilisés.

Le géocodage nécessite des informations précises sur la géométrie des capteurs tels que la position et l'orientation de l'antenne radar ainsi que des orbites satellites car ils sont essentiels pour relier avec précision les mesures radar à la surface de la terre.

III.3.6. Visualisation des données SAR :

La visualisation des données SAR est une étape essentielle pour interpréter les résultats et extraire des informations significatives sur la déformation de terrain.

Cette étape consiste à mapper les valeurs de phase sur une roue chromatique ou une rampe de couleurs où chaque couleur représente une zone de phase spécifique qui aide à distinguer les différentes valeurs de phase et identifier les modèles de déformation, il consiste aussi à générer des cartes de déformations qui montrent les déplacements de surface mesurés sur des périodes de temps spécifiques.

On peut aussi ces représentations 2D à des modèles 3D en combinant les images SAR avec le modèle numérique d'élévation (MNT) correspondant de la zone pour générer une représentation tridimensionnelle de la surface déformée.

La visualisation des données SAR est un processus très crucial et joue un grand rôle pour identifier les anomalies et les changements de terrain étudié et conduire une meilleure compréhension de zone.

III.4. Comparaison entre l'InSAR et la photo-interprétation :

La photo-interprétation est une technique de télédétection passive qui est moins cher que l'InSAR utilisera lumière naturelle et spécialement la lumière de soleil pour capter les images, pour cela il est impossible d'obtenir ces images dans l'absence de lumière et il est plus impossible pour capter ces images dans des conditions climatiques et atmosphériques difficiles comme l'existence des couvertures nuageuses et les couvertures neigeux.

Dans l'autre main, l'interprétation des images SAR permettent de calculer des mesures plus précises et dans des zones très vastes, c'est une technique active qui utilise les ondes RADAR pour captés les données qui permettent une surveillance continue de zone étudiée même aux conditions météorologiques difficiles contrairement aux photo-interprétations mais il est plus coûteux pour obtenir ces données et pour cela il est un grand inconvénient.

III.5. Les avantages et les inconvénients de l'Insar :

III.5.1. Les avantages :

On peut résumer les avantages d'Insar en quelques points :

- Ce type d'interprétation permettent de mesurer à haute précision par exploité les caractéristiques des ondes RADAR .il permettent une précision sous-centimétrique à sous-métrique dans la mesure des déformations, déplacements et des changements d'élévation de terrain.
- La technique d'Insar permettent de couvrir des vastes zones dans une seule acquisition car les systèmes utilisables dans ces techniques peuvent captés des vastes régions allant de centaines à des milliers de kilomètres carrés dans un seul passage permettent un étude et surveillance efficace des phénomènes à l'échelle régionale.
- SAR est une technique de télédétection active qui émet se propres signaux micro-ondes et pour cela il permet d'acquise les informations dans toute les conditions climatiques, jour et nuit et n'est pas affecté par la couverture nuageuse, ce qui permet une surveillance continue même dans des conditions météorologiques difficiles contrairement aux techniques de télédétection optiques.
- L'Insar permet des mesures répétées de la même zone dans le temps qui permet l'analyse des changements temporels, tels que l'évolution des schémas de déformation ou la surveillance des processus géophysiques en cours.

III.5.2. Les inconvénients :

- Les signaux SAR peuvent subir une décorrélation dans les zones à végétation dense, à couverture de neige ou à surfaces très texturées où il peut réduire la qualité des interférogrammes et limiter la capacité des mesures avec précision de déformation.
- L'accès aux données SAR, en particulier celles des missions satellitaires commerciales, peut être limité et peuvent être coûteux et nécessite une expertise et des ressources spécialisées.
- Le traitement des données Insar implique des algorithmes et des techniques de calcul complexes qui nécessitent une expertise en télédétection.
- L'Insar fournit des mesures précises dans le sens horizontal mais a des limites dans le sens vertical qui donne des mesures de déformation verticale généralement inférieure à celle des mesures horizontales en raison de facteurs tels que la ligne de visée du satellite et la topographie de terrain.

IV.Lidar :

IV.1.Définition :

"*Light Detection and Ranging*" ou Lidar , est un système de mesure géométrique actif et sans contact utilisant des capteurs ,aéroportée ou au surface de terre , envoyant rapidement des impulsions de lumière ,ces capteurs dont le fonctionnement repose sur une mesure de la distance sans contact au laser avec des longueurs d'ondes optiques, c'est-à-dire des longueurs des ondes qui vont de quelques centaines de nanomètres à quelques microns ,travaille comme émetteur par collecter des nuages de points (XYZ) denses et géoréférencés qui serviront à représenter un objet ou la morphologie d'un lieu en 3D par des mesures portant sur: la composition, les propriétés physiques et la dynamique de terrain, la topographie des surfaces naturelles et des zones urbanisées, les propriétés physiques de la végétation...etc. .

le lidar est analogue au radar (radio detecting and ranging) ,sauf qu'il est basé sur des impulsions discrètes de lumière laser et le radar utilise des impulsions micro-ondes (fréquences de 1 à 100 GHz) ou du sonar qui utilise des ondes sonores ,et pour cela il est une technique active (générer et envoyés d'énergie vers une objet ou terrain et ensuite détecter le rayonnement émis de ce objet ou terrain) ,Cette caractéristique permet les capteurs de collectés les données la nuit où l'air est généralement plus clair et le ciel contient moins de trafic aérien que pendant la journée . LeLidar est composé principalement de 2 éléments : un émetteur laser (fonction d'émission) qui envoie un signal lumineux et un télescope (fonction de réception) comprenant un collecteur de lumière qui reçoit la lumière réfléchié.

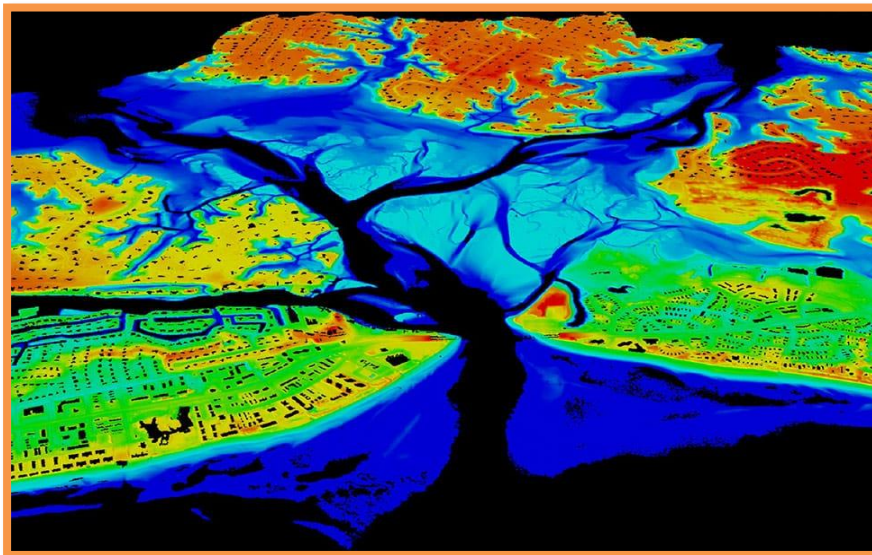


Figure 39 : Une map de Lynnhaven Inlet, Virginia utilise la technique de lidar - NOAA's National Ocean Service

IV.2. Les types de Lidar :

IV.2.1. Selon l'altitude :

a) Lidar aéroporté : ce type utilisant un capteur de laser infrarouge installé sur un hélicoptère ou un avion à aile fixe. La lumière laser infrarouge de formes gaussiennes (d'une durée de 5 à 10 ns) et de fréquence temporelle élevée (~100 kHz), est dirigée vers le sol et renvoyée au capteur lidar aéroporté mobile, balayant le paysage pour mesurer la distance entre l'avion et le sol et produire une représentation tridimensionnelle des paysages en haute définition. Les instruments utilisés dans ce type de réaliser jusqu'à 500000 tirs laser par seconde depuis une altitude typique de 1000 m et de mesurer jusqu'à 20 points par m² au sol avec une précision des points mesurés est inférieur à 10 cm verticalement et 20 cm horizontalement qui permet traverser partiellement la végétation pour caractériser le sol sous la canopée. Il existe deux types de capteurs aéroportés : topographique et bathymétrique.

-Données lidars topographiques : Les données lidars topographiques permettent de dériver des modèles de surface pour les utiliser dans de nombreuses applications, telles que la forêt, l'hydrologie, la géomorphologie, l'urbanisme (modélisation de sites ou de monuments, bâtiments...), l'écologie de paysage, le génie côtier, l'évaluation des études et les calculs volumétriques, cartographie, de terrain.

-Lidar bathymétrique : Le lidar bathymétrique est un type d'acquisition aéroportée qui pénètre dans l'eau que réalise une imagerie complète d'un environnement, en synchronisant les données au-dessus et en dessous de l'eau, de façon autonome et en temps réel. La plupart des systèmes lidar bathymétriques rassemblent simultanément l'altitude et la profondeur de l'eau, ce qui fournit un levé lidar aéroporté de l'interface entre l'eau et la terre. Avec un levé lidar bathymétrique, la lumière infrarouge (système laser traditionnel) est reflétée vers l'avion à partir de la surface de la terre et de l'eau, tandis que le laser vert supplémentaire traverse la colonne d'eau. Les analyses des deux différentes impulsions permettent d'établir les profondeurs de l'eau et les altitudes du littoral. Les informations bathymétriques sont très importantes à proximité du littoral, dans les ports et près des rives et rivages et il permet également de localiser des objets sur le fond océanique.

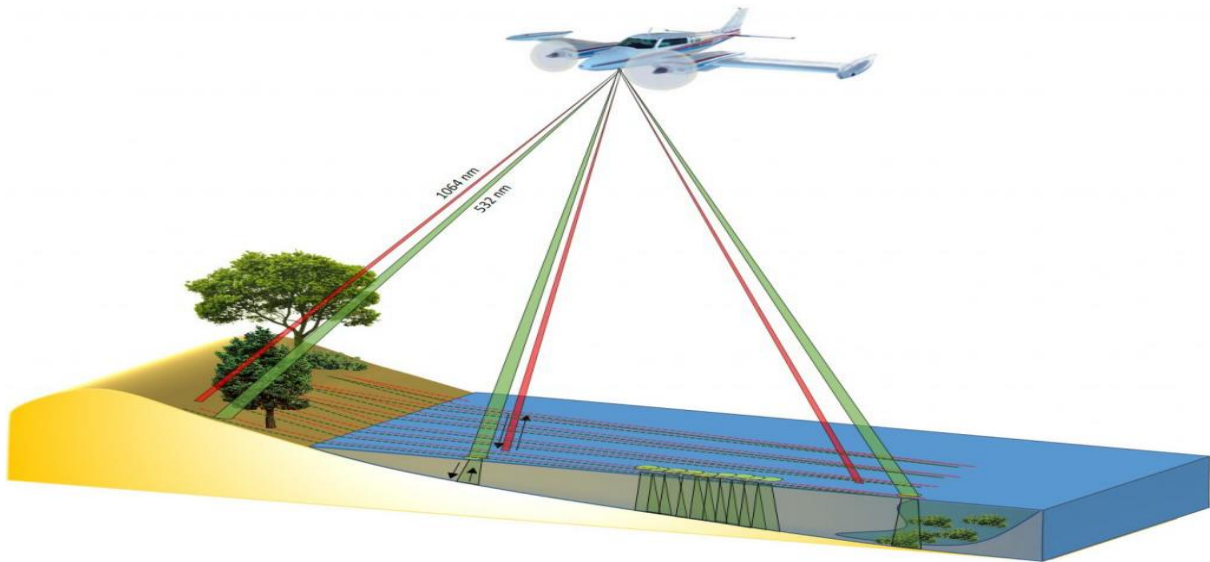


Figure 40 : Lidar topo-bathymétrique aéroporté -osur.univ-rennes.fr

b) Lidar terrestre : le lidar terrestre est utilisé pour le relevé 3D des informations de terrain, et utilisé dans des plusieurs domaine d'applications : modélisation 3D de tunnels, viaducs, ponts, conservation et gestion des sites, surveillance de phénomènes naturelles et risques géologique, notamment dans les mines et les carrières à ciel ouvert, la suivie des constructions des bâtis, structures et équipements... etc. Il existe deux types principaux de lidar terrestre, mobile et statique :

Dans le cas d'une acquisition mobile, le système lidar est monté sur un véhicule mobile composé d'un capteur lidar, de caméras, de système de positionnement par satellite (GPS, Global Positioning System) et d'un système de navigation à inertie (INS, Inertial Navigation System), comme avec les systèmes lidar aéroportés, les données acquises servent à analyser l'infrastructure des routes et à localiser des fils aériens qui empiètent, des lampadaires et des panneaux de signalisation à proximité des routes ou voies ferrées. dans le cas d'une acquisition statique, le système lidar est généralement monté sur un trépied ou un appareil stationnaire qui contiens de tachéomètres automatiques, c'est-à-dire d'appareils de mesure constitués, au minimum, d'un théodolite et d'un distancemètre qui fonctionnent de manière continue et automatisée.

Les deux types des capteurs lidar recueillent des points très denses et très précis, qui permettent d'identifier précisément les objets. Ces nuages de points denses permettent de gérer des ressources, d'étudier les autoroutes et les voies ferrées, étudié les risques naturels et spécialement géologique (dans notre cas le glissement de terrain) et même de créer des modèles de ville en 3D pour les espaces extérieurs et intérieurs.



Figure 41 : la gauche :Une image de l'étude en terrain utilise une capteur Lidar statique de mark Leica - P40 et dans l'image droite :Une image représente une capteur lidar mobile d'après :Jeffrey Verbeurgt (l'image gauche) et Mario Herger (l'image droite)

IV.2.2. selon les dimensions utilisées dans l'étude :

a)Lidar 1D :Un capteur LIDAR unidimensionnel (1D) fonctionne un peu comme un capteur à ultrasons où il émise un rayonnement linéaire unidimensionnelle en direction de l'objet à mesurer et mesure la distance à l'objet le plus proche le long d'une ligne devant lui pour déterminer les distances et les changements de distance par rapport à des cibles naturelles (jusqu'à 100 % de réflectance).

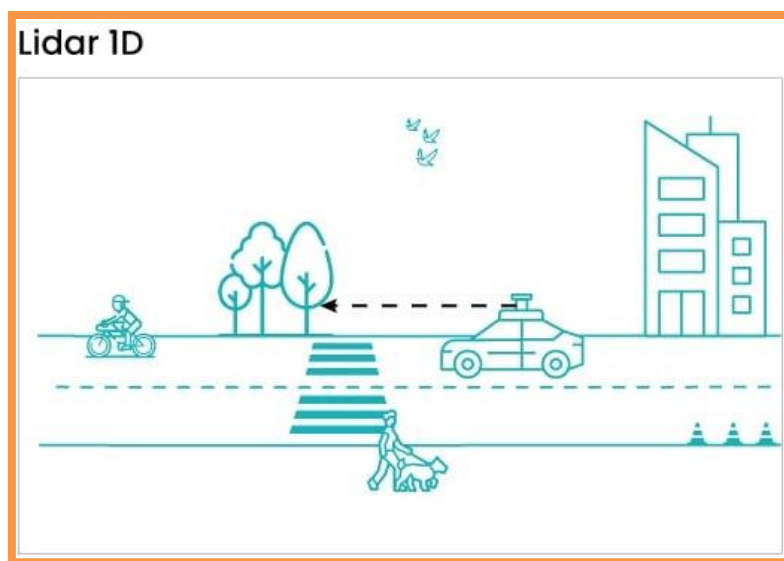


Figure 42 : schéma lidar 1D – d'après CADDENwww.cadden.fr

b)Lidar 2D :Un capteur LIDAR bidimensionnel (2D) émet un seul faisceau de lumière vers l'objet cible sur un plan horizontal et reçoit ce rayon afin de collecter les données objectives de cible sur les axes X et Y, mesure la distance dans toutes les directions dans un plan. Généralement, ceci est réalisé (plus ou moins) en plaçant simplement un capteur LIDAR 1D sur une plaque tournante qui tourne à une vitesse constante, permet un 360°scan.

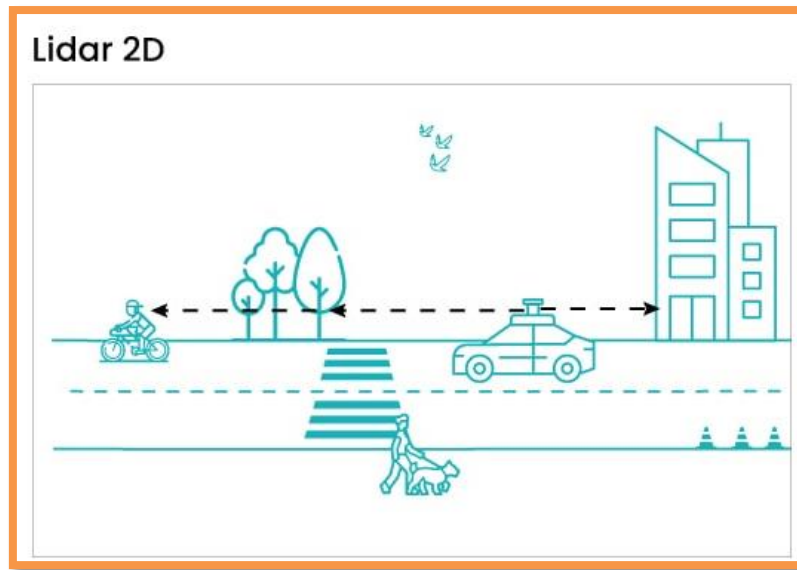


Figure 43 : schéma Lidar 2D – d'après CADDEN
www.cadden.fr

c)Lidar 3D: Un capteur LIDAR tridimensionnel (3D) à une principe de fonctionnement généralement le même que celui du lidar 2D à la différence presque le lidar 3D possède un mécanisme supplémentaire permettant l'acquisition des points géoréférencés en trois dimensions. Il génère ainsi des relevés constitués de millions de données regroupées en nuages des points retranscrivant la géométrie exacte des objets ,terrain ,toute structure, infrastructure et installation industrielle .

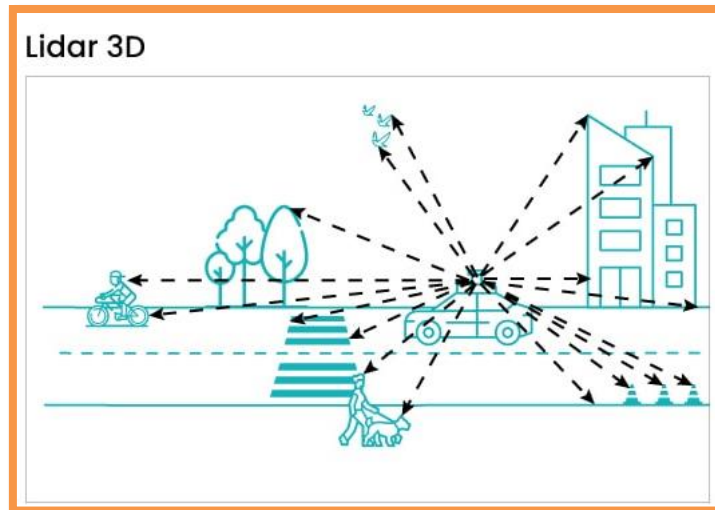


Figure 44: schéma Lidar 3D – d'après CADDEN

IV.3.le principe d'utilisation de Lidar:

le lidar est une technique qui utilise des capteurs actifs envoyant rapidement des impulsions de lumière, sous forme de rayonnements lasers pour mesurer le « temps de vol » (TOF ou « Time-Of-Flight ») ou temps de propagation de la lumière en français des faisceaux lumineux ,où ces rayons réfléchies sur les objets environnants (arbre, piéton, voiture, bâtiments, etc.) ou vers le sol directement dans une vitesse constante (environ de 299 792 458 m/s) et dans des longueurs d'onde entre 900 et 1550 nm. Ce capteur envoie des centaines de milliers d'impulsions par seconde et capture des millions des données par mesuré.

Le temps de réflexion que prend la lumière pour revenir au capteur comme la vitesse de la lumière est une valeur constante. Ces données sont ensuite collectées et traitées pour créer un modèle 3D de l'environnement appelé un nuage de points.

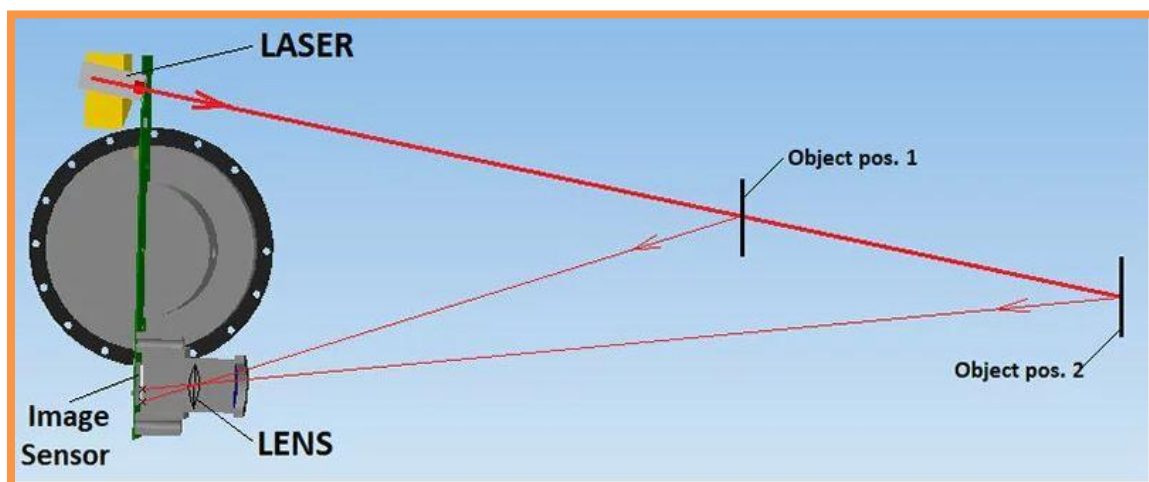


Figure 45 : Le principe physique de lidar - www.generationrobots.com

Cette technique est une méthode de mesure des distances de manière très précises en éclairant la cible avec une lumière laser effectuée un balayage pour enregistrer les coordonnées x, y, z de plusieurs points et obtenir les distances entre le capteur et les obstacles environnants. Cet éclairage actif permet d'utiliser les capteurs avec la même efficacité la nuit, le jour, dans les tunnels, et aussi bien en extérieur qu'à la lumière artificielle.

IV.3.1.Prétraitement des données :

Les données Lidar sont initialement collectées sous forme de nuage des points, composés des grands nombres des points individuels qui représentent les points des lasers réfléchis par la surface du terrain étudié, et pour cela il est nécessaire d'utiliser des filtres pour supprimer ou réduire les points indésirables de l'ensemble des données pour séparer les points d'intérêts.

Le prétraitement est une étape cruciale dans l'interprétation des données Lidar qui vise à réduire des points dans des certaines élévations et de sol/sursol, des végétations ou l'élimination des valeurs aberrantes et points parasites utilisent plusieurs des divers complexes algorithmes et techniques pour effectuer ces filtres en fonction de l'application et les caractéristiques des données.

IV.3.2.Classification des nuages des points :

Les nuages des points Lidar contiennent généralement des informations sur différents types d'objets, tels que la végétation, les bâtiments et le terrain. Pour cela, les points Lidar peuvent être classés en plusieurs catégories selon des algorithmes définis par l'ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) qui utilise des fonctionnalités telles que la hauteur des points, l'intensité et les propriétés géométriques pour distinguer les différents objets dans le terrain.

Tableau03 : classification des nuages des points.

Valeur de classification	Signification
0	Jamais classé
1	Non attribuée
2	Sol
3	Végétation basse
4	Moyenne végétation
5	Haute végétation
6	Bâtiment
7	Point bas
8	Réservé
9	Eau
10	Ferroviaire
11	Surface routière
12	Réservé
13	Fil métallique (protection)
14	Conducteur métallique (phase)
15	Toue de transmission
16	Connecteur de structure métallique (isolant)
17	Tablier de pont
18	Niveau sonore élevé
19-63	Réservé
64-255	Défini par l'utilisateur

IV.3.3. La génération de "MNT" et "MNS" :

Dans cette étape nous pouvons utiliser les données lidar dans la création des :

a) Modèle numérique de surface (MNS) :

Le modèle numérique de surface représente la surface de la terre avec toutes les caractéristiques au-dessus du sol telles que les bâtiments, la végétation et les infrastructures et pour cela il fournit une vue complète de la topographie et des objets présents dans la zone étudiée.

Le modèle numérique de terrain est créé à partir des valeurs d'élévation de chaque point du nuage des points pour générer une surface maillée ou raster utilisant des techniques d'interpolation telles que la triangulation et la pondération inverse de la distance pour estimer les valeurs d'élévation entre les points Lidar.

Les "MNS" sont généralement utilisés dans des vastes applications comme : la modélisation 3D, les télécommunications, la modélisation des inondations, l'urbanisme, l'aviation et des autres applications.

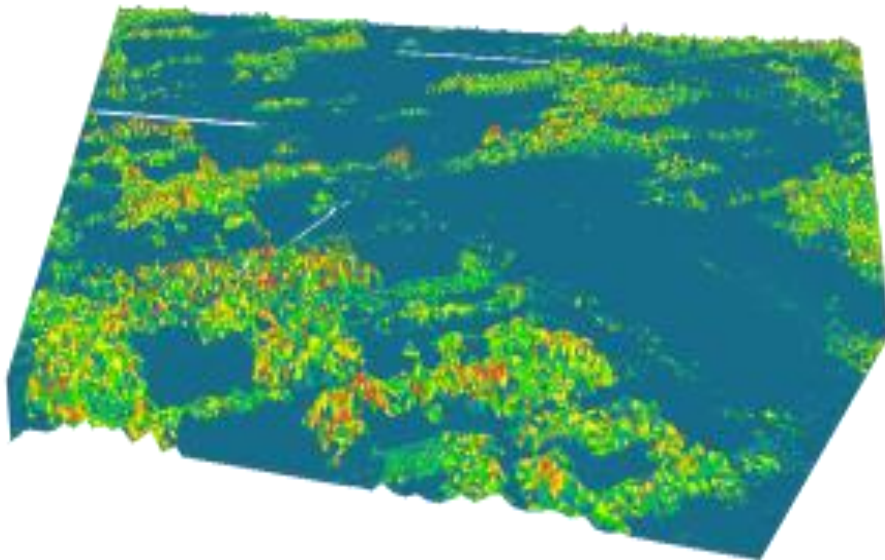


Figure 46 : Un modèle numérique de surface "MNS" –
gisgeography.com

b) Modèle numérique de terrain ou d'élévation "MNT" :

D'autre part, le modèle numérique de terrain (MNT) représente le terrain sans l'influence de la végétation, des bâtiments et des autres structures. Des diverses techniques sont appliquées pour supprimer les objets au-dessus du sol et conservé juste les points de sol qui utilise des algorithmes tels que la segmentation du sol et le filtrage basé sur les caractéristiques des points pour identifier les points au sol qui sont ensuite utilisés pour créer une surface maillée ou raster représentant le terrain nue. Les modèles numériques de terrain sont utilisés dans des applications telles que l'analyse du terrain, la modélisation hydrologique, les calculs des pentes et dans l'aspect et l'analyse du champ de vision.

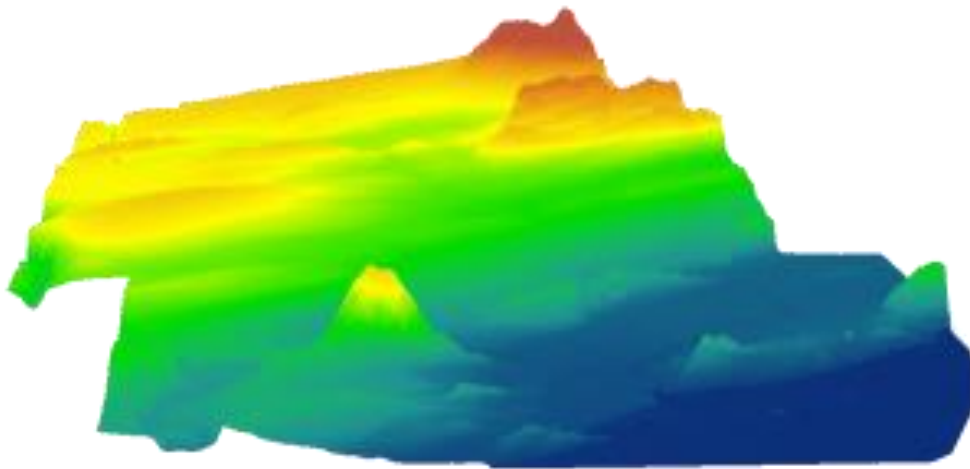


Figure 47 : Modèle numérique de terrain (MNT) -
gisgeography.com

IV.3.4. L'analyse des données : Les données Lidar peuvent être utilisées pour extraire diverses caractéristiques telles que la hauteur du couvert forestier, les empreintes des bâtiments, les réseaux routiers et les caractéristiques hydrologiques. Elles utilisent des algorithmes pour identifier et délimiter des objets ou structures.

Et parce qu'ils sont collectés à différentes périodes de temps, ces données permettent de détecter et quantifier les changements de terrain étudiés par l'analyse des différences entre deux ou plusieurs ensembles de données Lidar pour identifier les variations d'élévation, la présence des objets ou des autres caractéristiques qui sont très précieuses dans la surveillance des changements et des phénomènes de couverture terrestre, la croissance urbaine et l'évaluation des catastrophes naturelles. Et car les données Lidar sont intrinsèquement tridimensionnelles, elles permettent, par l'utilisation de logiciels, la création de modèles 3D qui sont utilisés dans la visualisation et l'analyse immersive de l'environnement qui facilite l'extraction des caractéristiques.

IV.4. Les avantages et inconvénients du Lidar :

On peut résumer les avantages et les inconvénients de la technique de Lidar dans quelques points :

a) Avantages du Lidar

- Le Lidar offre une très haute résolution spatiale, permettant une cartographie détaillée de la surface de la terre car Il peut capter des caractéristiques topographiques à petite échelle, des structures de végétation, des bâtiments et des autres objets rapidement et avec une grande précision.
- Le Lidar peut mesurer avec précision les informations d'altitude du terrain, la hauteur de la végétation et la hauteur des bâtiments, cela le rend précieux pour la génération des modèles numériques d'élévation (MNT), la modélisation des inondations, la planification urbaine et les applications forestières.
- Le Lidar est une technologie de télédétection active qui fonctionne sur la base des impulsions lasers émises et pour cela Il peut acquérir des données jour et nuit et n'est pas affecté par la couverture nuageuse, ce qui permet d'adapter à l'acquisition des données en continu dans diverses conditions météorologiques.
- Les systèmes Lidar peuvent capter rapidement des vastes zones, offrant une acquisition des données efficaces par rapport aux autres méthodes traditionnelles d'étude à distance de sol et dans un délai plus court.
- Le Lidar a la capacité de pénétrer les couverts végétaux et capté la surface du sol, permettant la génération des modèles numériques de terrain sous une couverture végétale très dense.

b) les inconvénients du Lidar :

- Le Lidar peut être coûteux à acquérir et exploité, en particulier si l'on considère les "hardwares", les logiciels, d'acquisition, de traitement et de stockage des données qui est peut-être un facteur limitant pour certains projets ou organisations.
- La couverture et la densité de points des données Lidar sont influencées par des facteurs tels que l'altitude de vol, l'angle de balayage et les paramètres d'acquisition de données. Il est aussi inefficace en cas de fortes pluies, de nuages bas, de brouillard ou de fumée, ou encore en présence d'obstacles transparents.
- Le traitement et l'interprétation des données Lidar peuvent être complexes et nécessiter des logiciels, des ressources informatiques et un personnel qualifié.

V. Conclusion chapitre 02 :

Finally, the remote sensing techniques such as photogrammetry, InSAR (Radar

Interferometry with synthetic aperture) and Lidar (Light Detection and Ranging) have revolutionized our ability to collect information about the Earth's surface from a distance. Because they offer very precise tools for mapping, monitoring and understanding diverse landscapes, environments, and phenomena of our planet.

Photogrammetry or photo-interpretation, which consists of extracting measurements and 3D models from photographs is a remote sensing technique that is effective and less expensive than others. For this, there are applications in various fields, notably cartography, urbanism, archaeology and disaster management and it also allows identifying land use changes and evaluating terrain characteristics.

On the other hand, InSAR uses radar waves to measure surface deformations with great precision and detect changes in terrain. By comparing several radar images acquired over time such as soil subsidence, volcanic activity, and tectonic movements, it also provides crucial information for early warning systems and strategies to avoid risks.

Lidar technology uses laser pulses to measure distances and create detailed 3D representations of objects and terrain, this technique is widely used in topographic cartography, forest inventory, urban planning and infrastructure management where Lidar provides rich information on height, structure and vegetation density, the elevation of the Earth's surface and terrain characteristics.

In general, these remote sensing techniques have revolutionized our ability to study and monitor the Earth's surface, providing more precise and important information used in various scientific disciplines, further expanding our understanding of the planet and its dynamic processes.

Chapitre 03 :

**Exemples sur l'étude des glissements
de terrain par des techniques
nouvelles (photo interprétation,
Lidar, Insar)**

I. Exemple 01 : Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le vignoble champenois entre Epernay et Dormans (France) : apport de la télédétection multi spectrale.

I.1 cas d'étude :

Entre l'entonnoir de percée cataclinale d'Epernay et la commune de Dormans (fig. 48), la Marne et ses affluents entaillent les terrains du Campanien (craie), du Thanétien (argiles et sables), de l'Yprésien (sables et argiles), du Lutétien (Marnes et caillasses, tuffeau), du Bartonien (sables et calcaires) et du Priabonien (calcaire) (fig. 49). La zone d'étude, centrée sur 49°03'50''N-3°50'50''E, couvre 600 km². En creusant sa vallée, la Marne a façonné dans ces terrains des versants cultivés en vignes depuis la fin des années 1950. Après plusieurs épisodes de remembrement (Colin, 1971), l'activité viticole s'est étendue et recouvre à présent plus de 10 500 hectares dans le secteur d'étude.

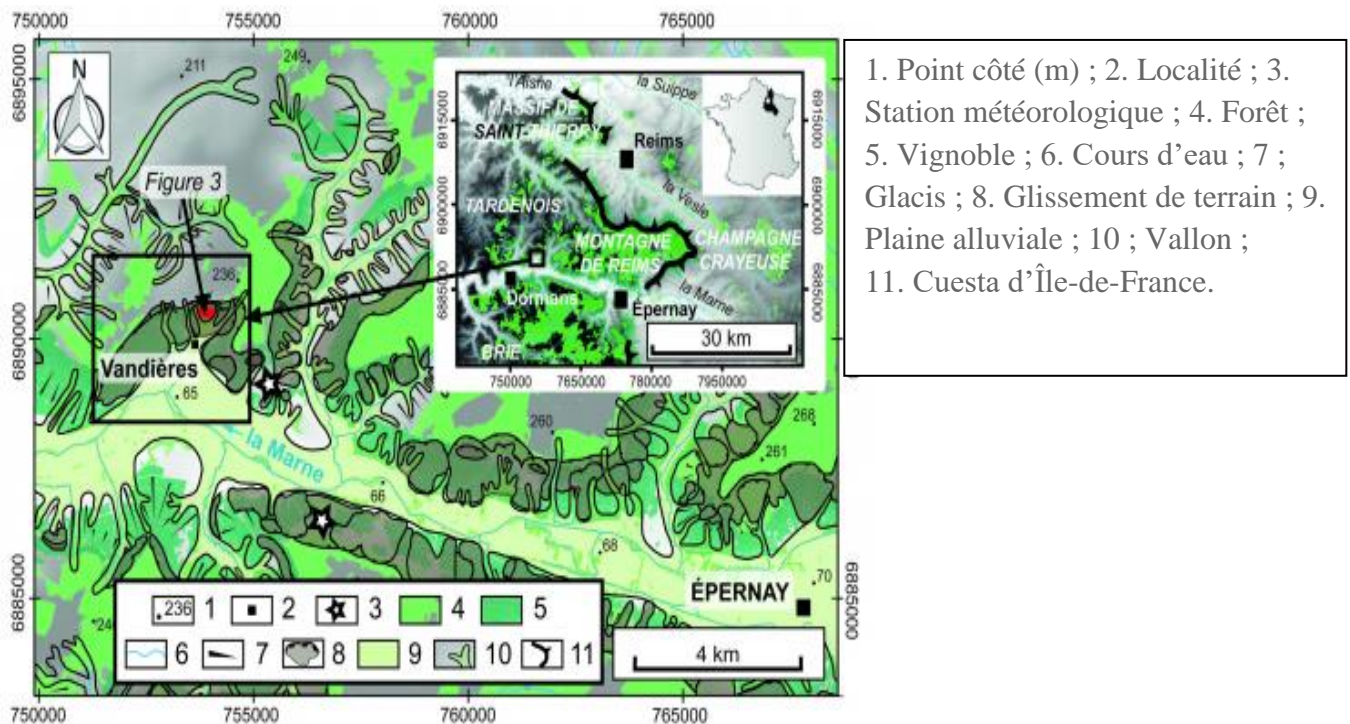
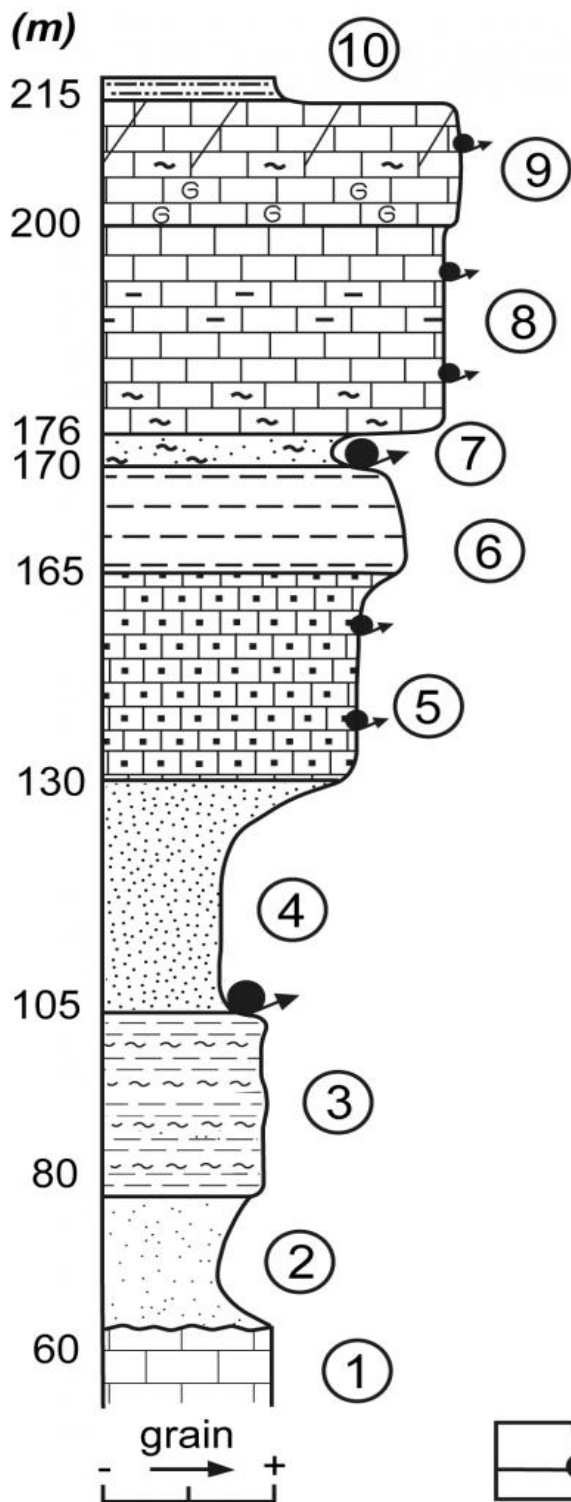


Figure 48 : La vallée de la Marne entre Épernay et Vandières : contexte géomorphologique.

I.2. géologies de site :

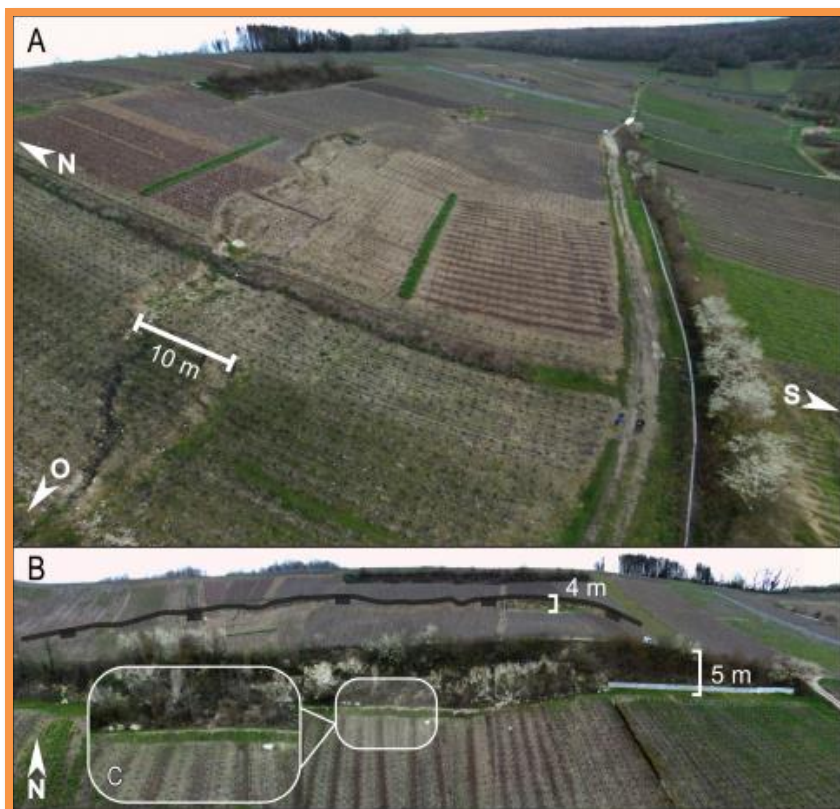


1. Craie (Campanien) ; 2. Sables de Châlons-sur-Vesle (Thanétien supérieur) ; 3. Argiles du Soissonnais (Yprésien inférieur) ; 4. Sables de Cuise (Yprésien supérieur) ; 5. Tuffeau de Damery (Lutétien moyen) ; 6. Marnes et caillasses (Lutétien supérieur) ; 7. Sables d'Auvers-Beauchamp (Bartonien) ; 8. Calcaires de Saint-Ouen (Bartonien) ; 9. Calcaires de Champigny (Priabonien) ; 10. Argiles à meulière (Quaternaire) ; 11. Source.

Figure 49 : Litho stratigraphie du secteur de Vandières (Marne, France).

Au cours des phases morphogéniques actives (ana- et cataglaciales) du Pléistocène moyen et supérieur, les versants des vallées entaillant le plateau tertiaire ont été dominés à l'Ouest par des processus de karstification (Lejeune et Devos, 2001 ; Damien et al., 2016 ; Devos et al., 2016), à l'Est par des processus de cambrure de versant (Pierre et al., 2017 ; Ortonovi et al., 2020), et le long de la vallée de la Marne par des glissements coalescents (fig. 48) toujours actifs qui créent des désordres chroniques sur la plupart des versants (Bollot et al., 2015). Plus de 3 000 ha de vignes sont affectés par des glissements anciens ou récents, soit un peu moins d'un tiers de la surface totale (29 %).

C'est le cas sur la commune de Vandières (fig. 50), dont un versant est affecté par la réactivation d'un glissement holocène (Bollot, 2014). La cicatrice d'arrachement de la réactivation principale s'étire à présent sur plus de 240 m, en amont d'un talus d'origine anthropique conçu initialement pour diminuer la pente du bas de versant et pour permettre aux engins agricoles de circuler plus facilement sur le versant (fig. 50A). Cette cicatrice montre toujours des signes d'activité. Actuellement, la zone affaissée qui détruit chaque année toujours plus de pieds de vigne a une superficie de 15,6 ares (1 560 m²) et de nouvelles instabilités apparaissent en même temps que la pente de cet arrachement s'accroît : apparition et élargissement des fissures d'appel au vide, fluage. En aval du talus d'origine anthropique se produisent des chutes de blocs



A : cicatrice d'arrachement liée à une réactivation superficielle vers 160 m d'altitude, et talus anthropique vers 140 m (13/03/2020) ; B : vue de face du versant (14/03/2020) ; C : blocs calcaires éboulisés en contrebas du talus anthropique.

Figure 50 : Le glissement de terrain de Vandières.

I. 3. Méthodologie d'étude :

La démarche adoptée vise à identifier et quantifier le facteur « saturation en eau des sols » qui peut jouer un rôle prépondérant dans la susceptibilité aux glissements de terrain. L'approche par télédétection des surfaces de sols est choisie car elle permet l'étude et le suivi du comportement des surfaces dans plusieurs domaines spectraux de manière continue. Les images satellites utilisées (ESA, 2018) couvrent la période 2017-2019. L'avantage des satellites Sentinel-2A et B est qu'ils assurent une diffusion continue de scènes larges (290 km) à une fréquence de passage élevée (2,5 par jour à cette latitude). Pourvus d'un imageur multispectral MSI, ils offrent des produits radiométriquement corrigés, opérationnels tel quel, de 13 bandes spectrales, dont 3 dans le visible (bande 2, bande 3, bande 4, correspondant au domaine du bleu, du vert et du rouge, respectivement) et 9 dans l'infrarouge (bandes correspondant au PIR – proche-infrarouge, au MIR – moyen-infrarouge et au SWIR – infrarouge lointain). Seules les images comportant moins de 10 % de couverture nuageuse ont été sélectionnées pour l'étude (fig. 51), soit un total de 50 images pour la période allant de janvier 2018 à novembre 2019. Les bandes 3 (vert), 4 (rouge), 8 (PIR) et 11 (MIR) ont été géo-référencées en Lambert-93 EPSG 2154 sous la plateforme SNAP (*Sentinel Application Platform*). Afin de mesurer l'évolution annuelle de l'activité photosynthétique des vignes, la réflectance des sols humides en hiver ainsi que la réflectance de la végétation, deux indices ont été calculés en utilisant le logiciel QGIS 3.4 (tab. 1) : l'indice de végétation par différence normalisé – NDVI (Rouse et Haas, 1973 ; Tucker et al., 1979), et l'indice d'eau par différence normalisé – NDWI_g (Gao, 1996) et NDWI_{mf} (McFeeters, 1996) *i.e.*, un indice de stress hydrique.

Tableau 04 : caractéristiques des données utilisées et description des indices.

Source	Traitement	Résolution spatiale	Echelle	Objectif
Sentinel-2	NDVI NDWI _g NDWI _{mf}	10m 20m 10m	Versant,vallé Vallé Versant,vallée	Evolution biomasse Teneur en eau Teneur en eau
IGN	-	20 à 70cm	Versant	Evolution glissement

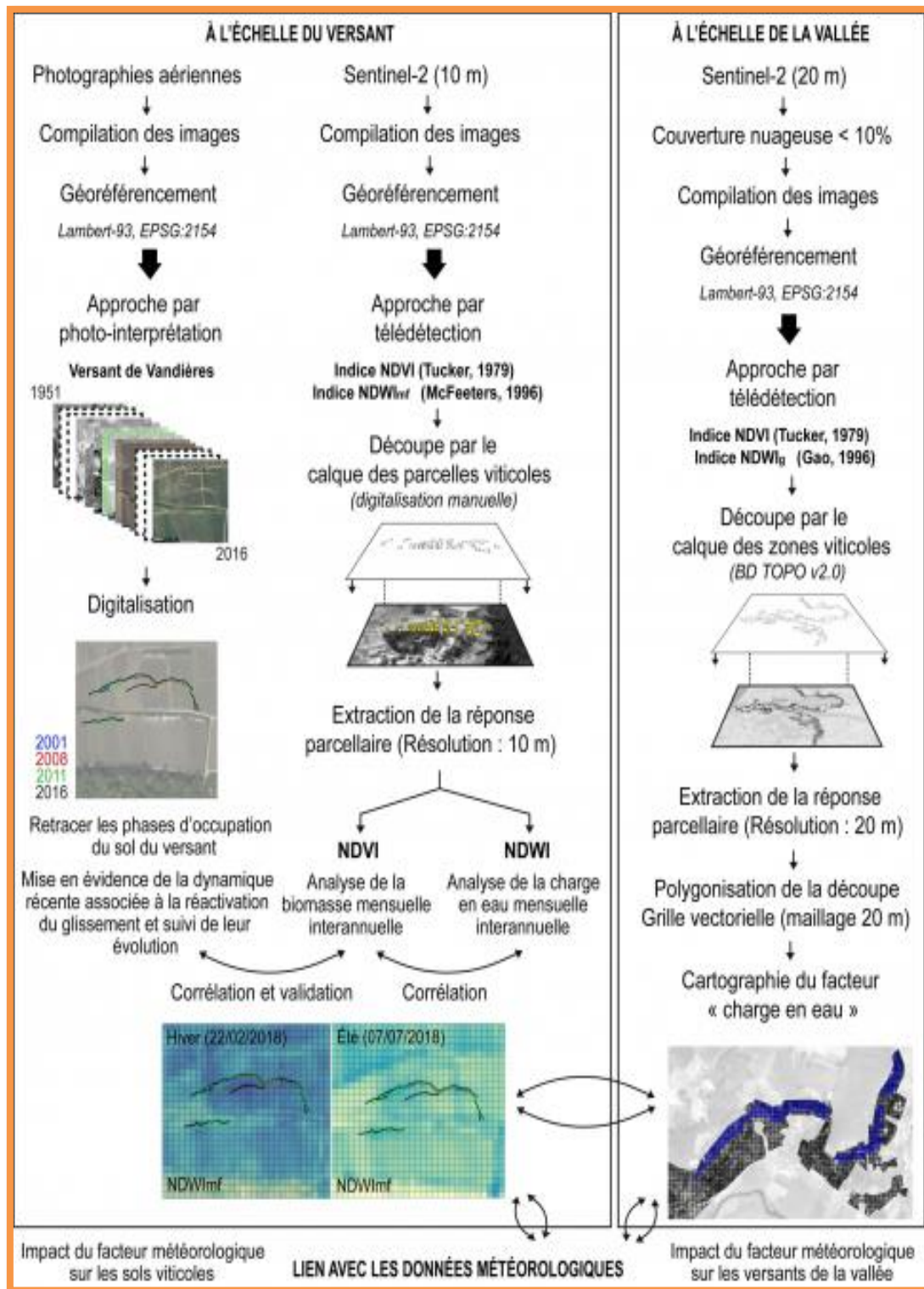


Figure 51 : Méthodologie adoptée pour l'étude.

I. 4. Résultats :

I. 4.1. Photo-interprétation et analyse morphologique à l'échelle du versant

Le versant de Vandières a subi plusieurs phases de remembrement (fig. 53). Les photographies aériennes de 1951 montrent que le versant était alors planté en vigne. Après les années 1960, le versant a été laissé en friche et s'est spontanément reboisé ; il ne retrouve sa vocation viticole qu'à partir des années 1990. Le modelé associé à la réactivation récente du glissement apparaît entre 1990 et 1994, période de bilan hydrique excédentaire pendant laquelle on dénombre d'ailleurs beaucoup de glissements dans la région (Bollot, 2014). Depuis, ce modelé de glissement s'étend graduellement. En outre, à partir de 2016, le tuffeau de Damery qui affleure le long du talus anthropique s'éboulasse (sous l'effet de la poussée des terrains situés à l'amont et/ou de phénomènes de gélifraction), avec une accélération significative du processus depuis le printemps 2019 (observations mensuelles sur le terrain) se traduisant par une accumulation de blocs dans les parcelles en contre-bas. (fig. 50, 52). Cette évolution sur 20 ans suggère une susceptibilité croissante, initiée par le déboisement et accentuée par le terrassement.

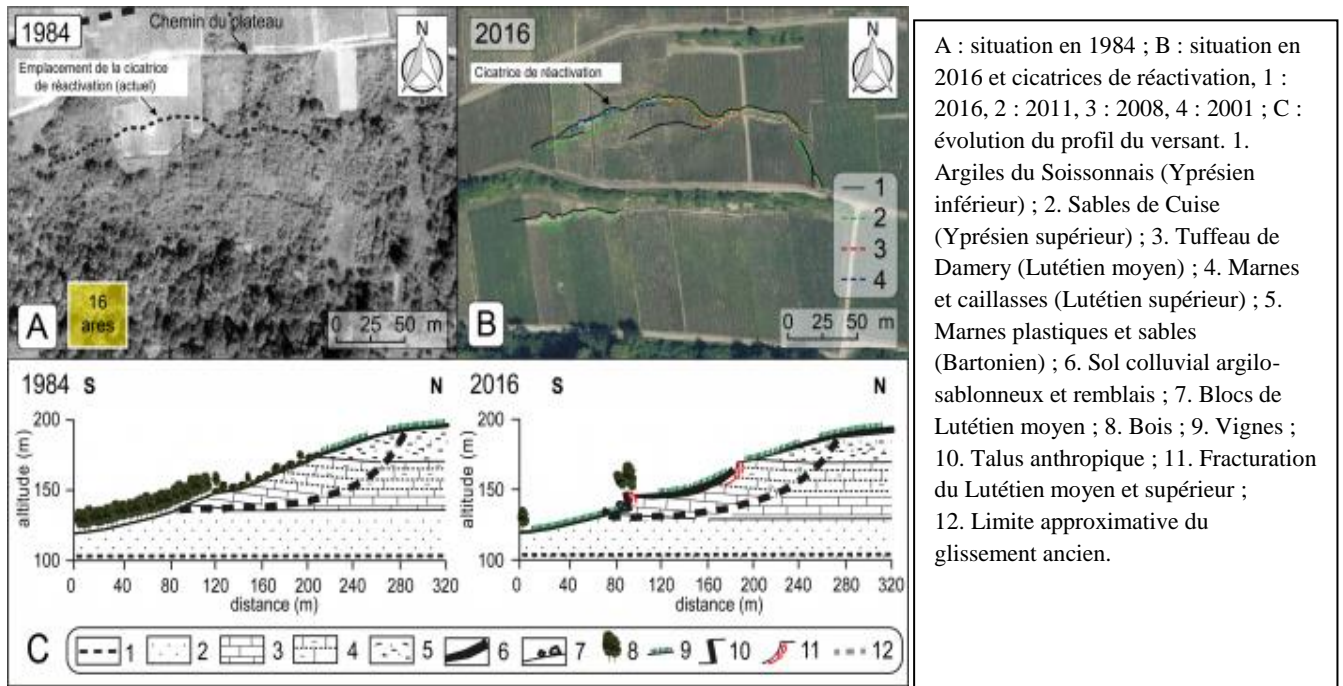


Figure 52 : Changement d'état de surface entre 1984 et 2016 à Vandières (photographies aériennes de l'IGN).

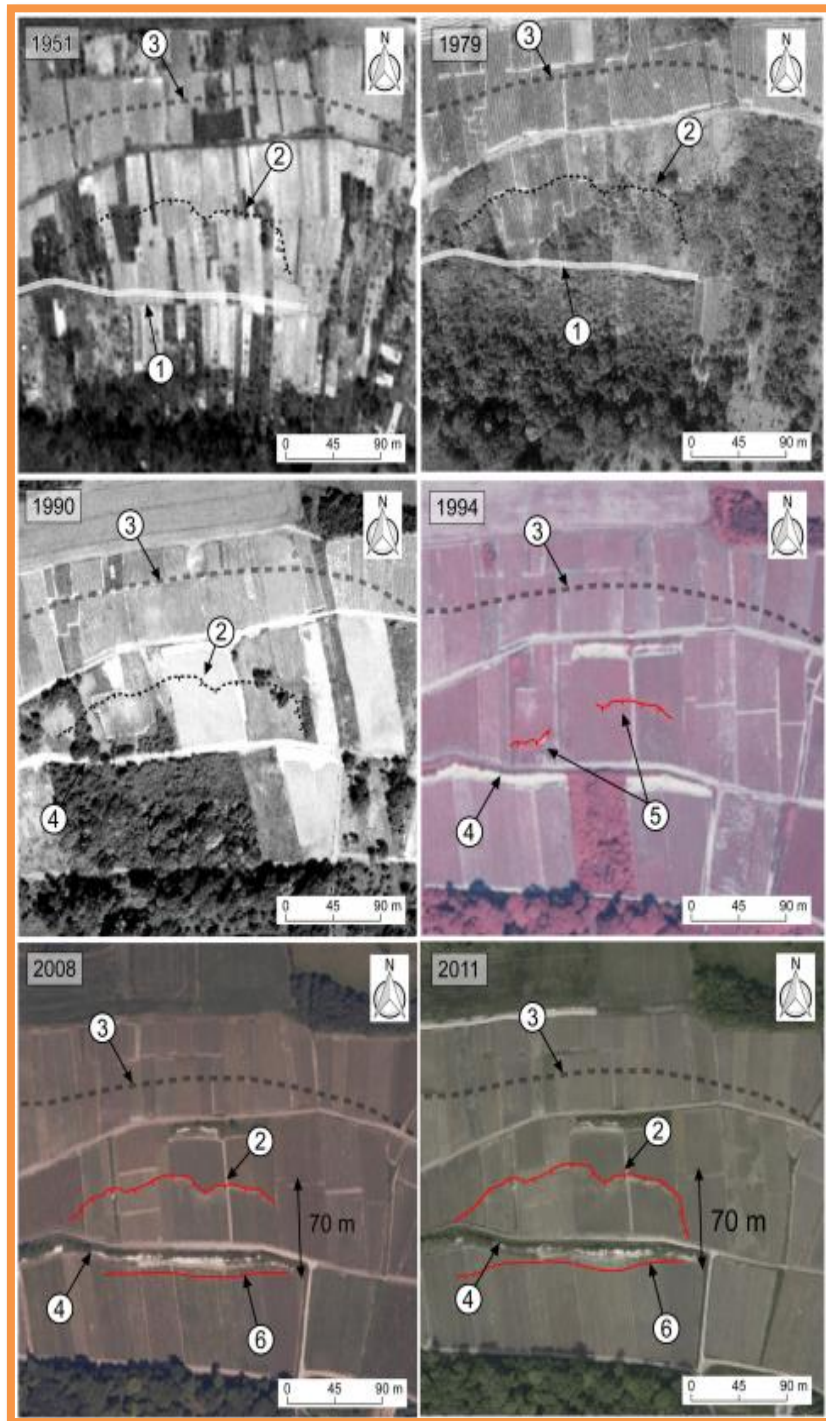


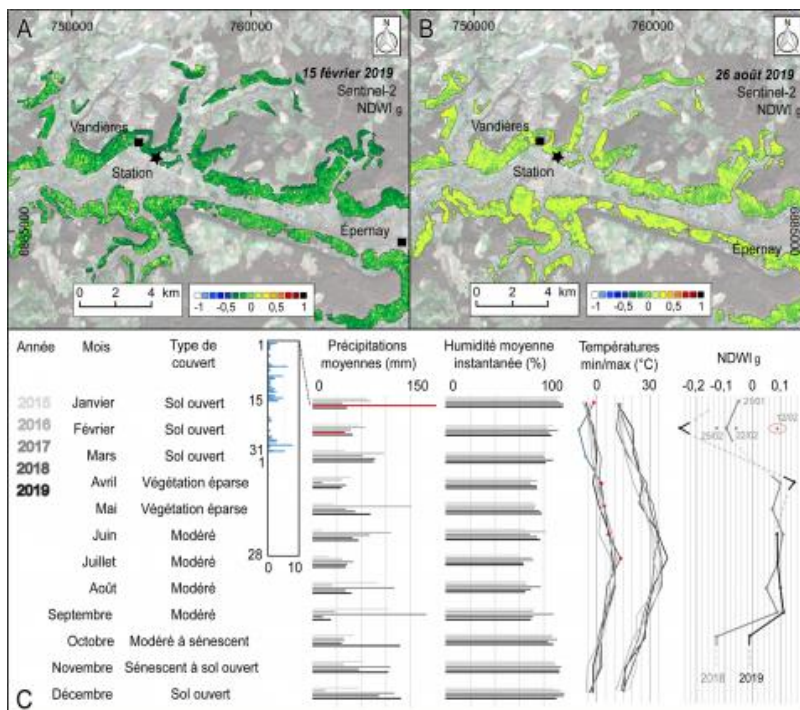
Figure 53 : Photo-interprétation multi-date du versant de Vandières.

I. 4.2. Analyse des signatures spectrales :

10 La variation des indices de surfaces, à l'échelle du glissement, traduit des variations spatiales de l'humidité des sols (et de la phytomasse) et la variation de la réponse brute tout au long de l'année, à l'échelle de la vallée, permet d'établir des seuils moyens pour les valeurs de NDWI et de NDVI toutes parcelles confondues. Le changement d'échelle permet donc de dresser une cartographie saisonnière (fig. 54A-B) de la "charge en eau" des sols viticoles de ce segment de la vallée et de mettre en évidence des zones se distinguant par des valeurs de NDWI hivernale spécifiques.

I. 4.2.1. À l'échelle de la vallée de la Marne :

11 Sur une année, les pics de valeur de NDWI des parcelles viticoles des versants de la vallée de la Marne sont compris entre $-0,17$ en janvier-février et $0,12$ en août-septembre (fig. 54-55A), ce qui correspond à des sols d'humidité faible à moyenne, respectivement (Ding et al., 2017). En mars-avril, on observe une remontée progressive des valeurs (de $-0,15$ et $-0,10$), puis une nette augmentation à partir du mois de mai conduisant à un paroxysme estival. De là, les valeurs déclinent jusqu'en novembre, suivant la phase de sénescence foliaire de la vigne et l'augmentation de l'humidité moyenne instantanée. Au milieu de l'automne, on retrouve un indice correspondant à une réponse de sol viticole nu, modérément humide. L'évolution de la réponse de NDVI de ces parcelles a la même régularité mais une plus grande amplitude annuelle : les valeurs les plus basses ($0,25$) sont atteintes en hiver et les plus hautes ($0,65$) en été (fig. 55B).



A : en hiver ; B : en été ; C : couverture du sol et données météorologiques (station de Châtillon-sur-Marne) entre 2015 et 2019.

Figure 54 : Comparaison de la réponse NDWI_g (vallée de la Marne et affluents).

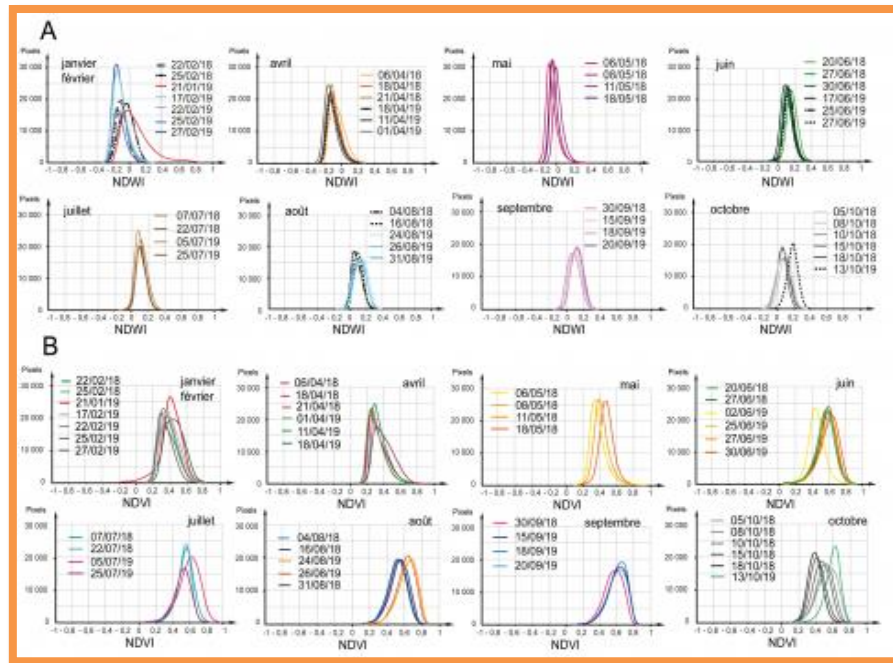
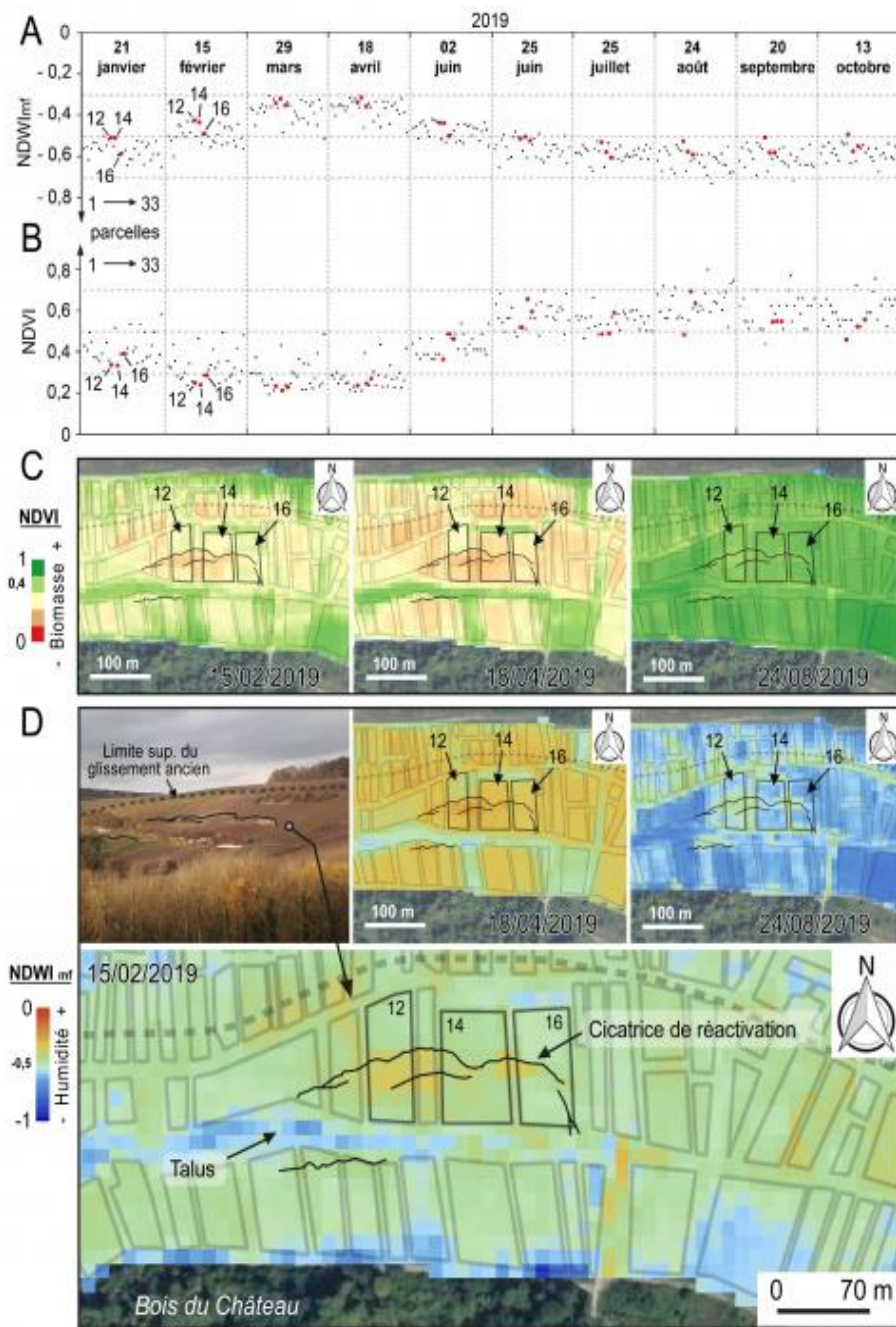


Figure 55 : Réponses NDWI_g et NDVI des parcelles viticoles (vallée de la Marne).

I. 4.2.2. À l'échelle du versant :

Pour l'année 2019, le comportement de NDWI_{mf} des 32 parcelles choisies sur le versant de la commune de Vandières suit la tendance générale de NDWI établie à l'échelle de la vallée (fig. 54, 56A-B). Pendant la période hivernale, les valeurs moyennes de NDWI_{mf} enregistrées sont de $-0,5$ et augmentent progressivement pour atteindre $-0,3$ en mars et en avril (fig. 56A). La décroissance des valeurs débute en mai-juin pour atteindre un minimum ($-0,6$ en moyenne) en août-septembre. À l'inverse, en hiver, les sols enregistrent des réponses de NDVI très basses (autour de $-0,2$) mais ces valeurs ne cessent d'augmenter au printemps lorsque la végétation se densifie, et jusqu'en été, atteignant $0,6$ en moyenne (fig. 56B). À Vandières, on observe en outre des contrastes d'une parcelle à l'autre, pour une même occupation des sols (*i.e.*, vigne) : les parcelles en marge de la zone d'arrachement récent présentent des valeurs de NDWI_{mf} moins élevées que les parcelles, relativement humide, affectées par cet arrachement (parcelles 12, 14 et 16 sur la Figure 56D). Les valeurs de NDVI des parcelles affectées par la réactivation sont basses. Cela semble être un bon indicateur de l'activité du glissement, qui se traduit par un retard de la croissance végétale dû à une sécheresse édaphique pouvant s'expliquer par la structure des matériaux (perméabilité de fissure accrue). En somme, la saturation en eau conduit à une instabilité, laquelle modifie les écoulements (en les accélérant), ce qui se répercute sur la productivité végétale.

Quoiqu'il en soit, si la structure superficielle peut favoriser l'infiltration en surface, le drainage profond dans les marnes du Lutétien supérieur est ralenti par des lits d'argiles blanches (Hatival, 1977). De façon générale, les parcelles affectées par des mouvements de terrains anciens et volumineux (à Vandières, l'épaisseur de la masse glissée initiale n'est pas connue) (Bollot, 2014) fournissent des valeurs élevées de NDWI_{mf}, comprises entre $0,25$ et $0,30$ en hiver, ce qui traduit la teneur en eau élevée des formations superficielles, comparativement aux secteurs où la structure géologique initiale est conservée.



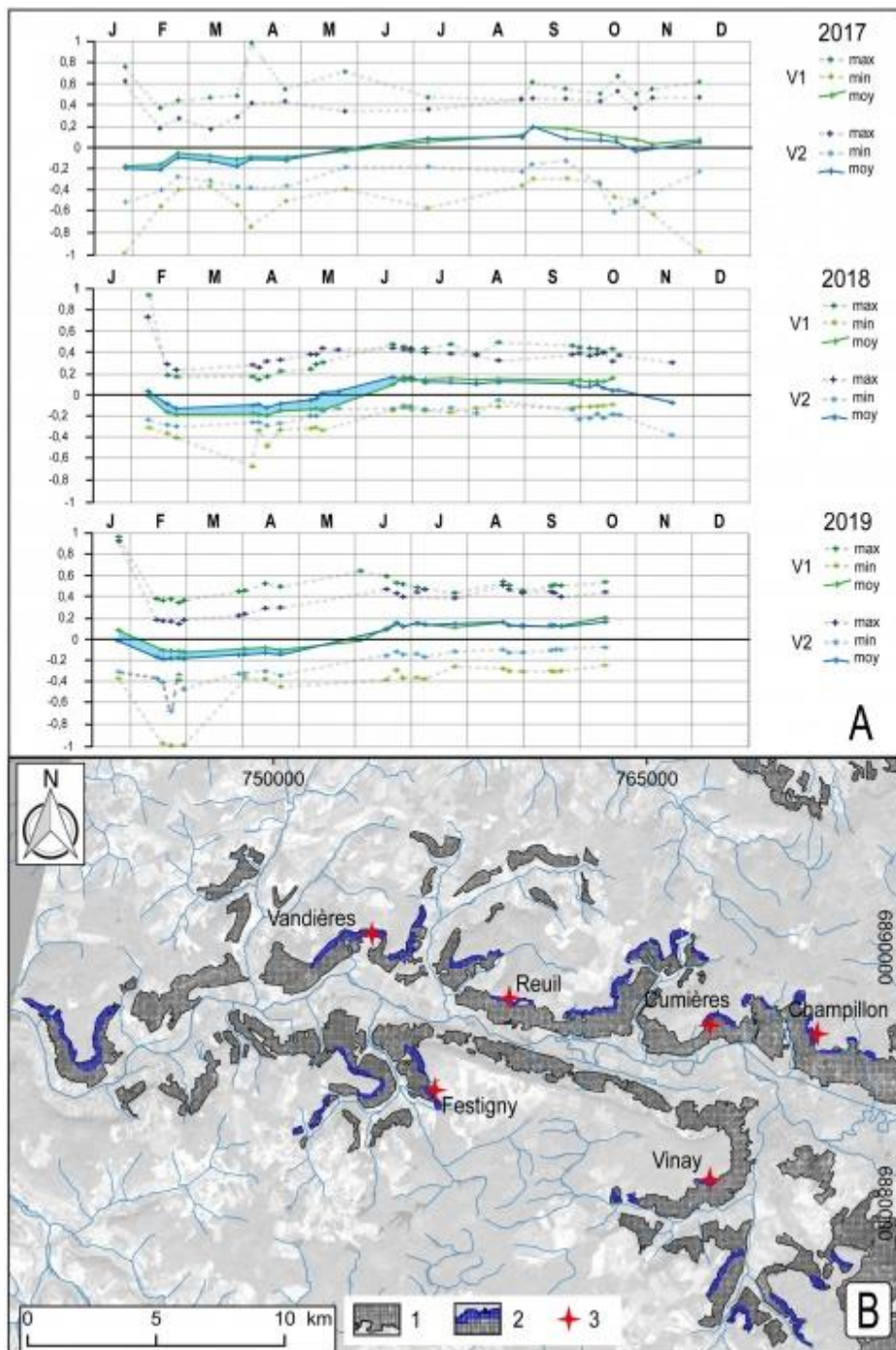
A : évolution annuelle des réponses NDWI ; B : évolution annuelle des réponses NDVI ; C : influence du modelé et des aménagements sur la réponse NDVI ; D : impact des réactivations sur la réponse NDWI.

Figure 56 : Réponses NDWI_{mf} à l'échelle parcellaire (Vandières).

I. 5. Interprétation et discussion

À l'échelle de la vallée de la Marne, un comportement spécifique de la réponse NDWI a été constaté dans certaines zones : s'agissant de réponses propres aux parcelles viticoles, la disparité spatiale des valeurs enregistrées est plus importante pendant les mois où la charge en eau des sols est élevée (février, mars, avril). Il est donc possible d'établir un zonage (fig. 57) permettant de distinguer : les secteurs à faible variation d'humidité (V1), et les secteurs tantôt nettement plus secs tantôt plus humides que la moyenne (V2). À la fin de l'hiver et au début du printemps, la réponse $NDWI_g$ des secteurs V2 se distingue bien de celle des secteurs V1, alors que les valeurs ont tendance à s'égaliser le reste de l'année (fig. 57A). Ce comportement contrasté traduit à la fois une susceptibilité différentielle et une temporalité des instabilités : les hauts de versant sont plus exposés aux réactivations, particulièrement à la sortie de l'hiver. C'est en effet ce qui a été observé sur les deux dernières années (2018 et 2019) : les six grandes réactivations connues se sont produites en zone V2 (fig. 57B).

À l'échelle du versant, entièrement planté en vignes comme c'est le cas à Vandières, il est possible d'établir le lien entre l'état hydrique du sol, la phénologie de la végétation – tels que restitués par les données Sentinel-2 (résolution de 10 m) – et la localisation des réactivations sur un glissement de terrain. Le suivi mensuel par télédétection est donc pertinent aux deux échelles retenues, et la cartographie en résultant doit permettre d'orienter les aménagements (drainage des secteurs périodiquement trop humide). Par ailleurs, l'impact du glissement de terrain sur la vigne peut être quantifié grâce au NDVI : on remarque, à Vandières, que les parcelles affectées par des instabilités ont un indice systématiquement plus bas tout au long de l'année que celui des autres parcelles, signe de dégradation de la biomasse végétale aboutissant à une surface de type « sol ouvert ». Située en zone V2, instable, la réactivation du glissement de Vandières, en modifiant le bilan hydrique, s'auto-entretient. Il est en outre probable que le processus résulte d'une forte anthropisation depuis plus de soixante ans (déforestation, opérations de curage, création d'un talus, couloirs non enherbés et labourés entre les rangées de vigne favorisant le ravinement, mais aussi l'évaporation directe des sols).



A : évolution de la réponse NDWI_g des zones viticoles de type « V1 » et « V2 » pour les années 2017, 2018 et 2019 ;
 B : carte de vulnérabilité. 1. Zone « V1 » ; 2. Zone « V2 » ; 3. Réactivations en 2018 et 2019.

Figure 57 : Susceptibilité au glissement et vulnérabilité des zones viticoles de la vallée de la Marne.

I. 6. Conclusion

Dans un contexte où les versants sont fortement anthropisés (sylviculture, vignoble), l'appréhension et la spatialisation des facteurs de déclenchement des glissements de terrain grâce à la télédétection permettent d'ajouter de nouvelles pistes au suivi et à la gestion de la susceptibilité des versants et de la vulnérabilité du vignoble aux mouvements de masse. Cette approche complète celles basées sur les facteurs lithologiques et topographiques (Van Den Eeckhaut et al., 2010) et sur les ressources en eau (Bollot et al., 2015) déjà réalisées dans le vignoble champenois. Elle précise en outre la spatialisation et la temporalité du risque, et les résultats portent sur de vastes surfaces. Elle met également en avant la combinaison des forçages anthropique et climatique (sur plus d'un demi-siècle), ce qui est un atout pour une gestion globale de risque.

Par ailleurs, l'analyse spatio-temporelle de glissements lents – qui modifient les conditions morphodynamiques – pourrait encore être améliorée grâce à la *corrélation multiple d'images* (satellitaires) *par paires* (Stumpf et al., 2014 ; Stumpf et al., 2017) et à l'aide de drones (Bellvert et al., 2014). À la manière d'études intégrant le plus grand nombre de facteurs (Fang et al., 2020 ; Bui et al. 2020 ; Lissak et al., 2020), un modèle de susceptibilité des sols viticoles aux glissements de terrain pourrait être élaboré. En outre, un couplage avec les données géophysiques, renseignant sur la géométrie en 2 ou 3 dimensions des mouvements de terrain (Lissak et al., 2014), permettrait de modéliser et de quantifier les volumes déplacés et de localiser les zones d'infiltration afin d'évaluer leur impact sur la stabilité du versant (travaux en cours). Enfin, il serait intéressant de corrélérer ces résultats avec des données issues de l'imagerie radar, plus traditionnellement utilisées et qui apportent des informations sur la rugosité et l'humidité de surface.

II.Exemple 02 :Utilisation de PS-InSAR avec des images Sentinel-1 pour la surveillance des déformations dans le nord-est de l'Algérie

II.1.Cas d'étude :

Constantine, située dans le nord-est de l'Algérie, a été choisie comme zone d'étude. C'est la troisième ville la plus peuplée d'Algérie avec 938 475 habitants (ONS 2008) et l'une des villes les plus anciennes d'Algérie (Cirta il y a environ 2300 ans). Elle est également célèbre pour son patrimoine culturel, y compris des constructions de valeur architecturale, situées sur l'Atlas Tellien. Le climat de la région de Constantine est semi-aride, caractérisé par des températures élevées et une faible humidité, avec principalement deux saisons des pluies et deux saisons sèches distinctes. La saison sèche s'étend de juin à août, avec une température moyenne de 28 °C, et la saison des pluies dure de décembre à février, avec environ 60 % de la quantité annuelle de précipitations. La fréquence et l'intensité des précipitations sont concentrées sur une courte période pendant laquelle les tempêtes de pluie et les crues soudaines représentent les principaux facteurs de risque de glissement de terrain. Le réseau hydrologique de Constantine est composé des rivières Rhummel et Boumerzoug (débit permanent). Les affluents de ces rivières sont le Mellah et le Megharouel à l'ouest, et le ChaabetErsas et le Chaabet El Klab à l'est qui coulent occasionnellement. La distance au réseau fluvial a une influence sur l'occurrence des glissements de terrain dans la région, c'est-à-dire qu'environ 30% des glissements de terrain historiques ont été enregistrés le long du côté est du Rhummel. Cette zone présente des glissements de terrain au moins depuis octobre 1993, par exemple près de l'avenue Kitouni. Pendant la nuit, les déformations de la pente ont atteint une vitesse de plusieurs centimètres et en décimètres par heure. Plus tard, en 2003, la profondeur des surfaces du sol de chaque bloc glissant a été estimée entre 12-16 m en utilisant des mesures d'inclinomètre, où la vitesse générale des déplacements s'élève à 4 cm/an. Les principaux éléments (blocs d'éboulement) du glissement de terrain se sont produits au fond du CoudiatAty. Le corps principal du glissement s'étend jusqu'à la rive gauche du Rhumel la masse instable se trouvait dans un chenal de près de 1100 m de long et 300 m de large, d'où environ deux millions de tonnes de terre et de matériaux ont été déplacés.

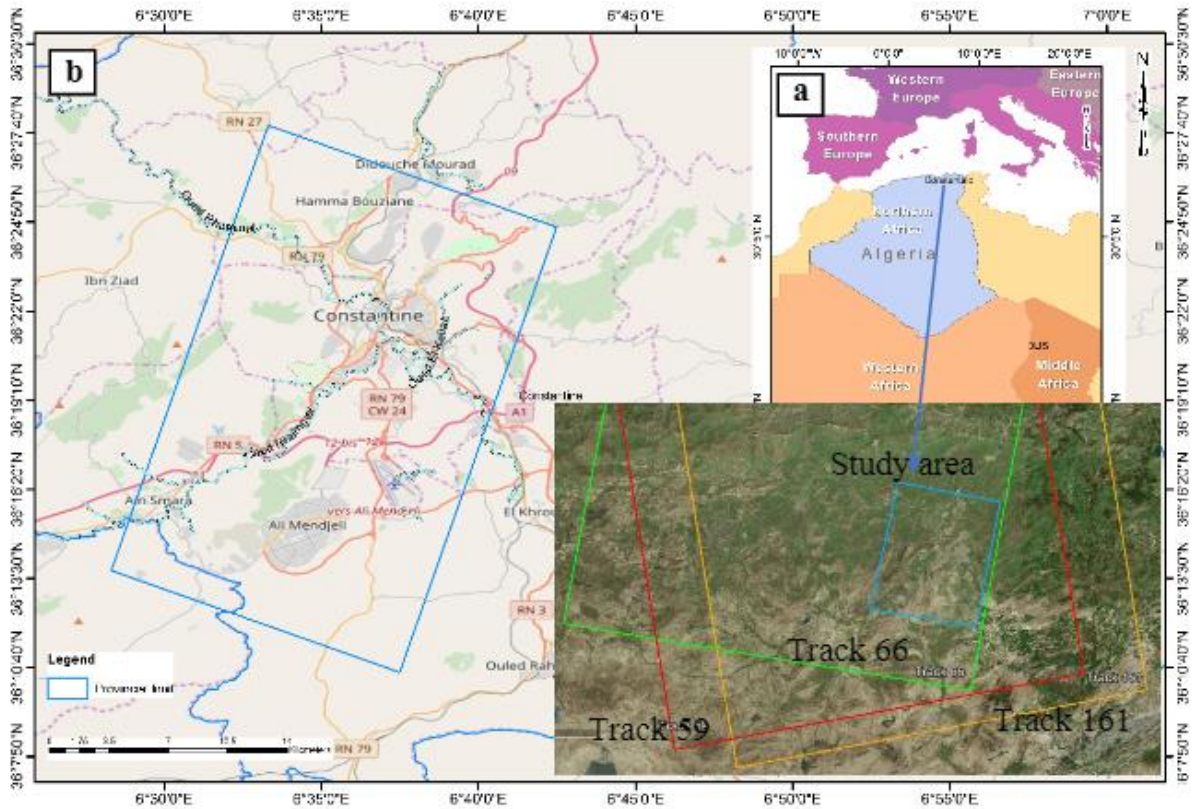


Figure 58 : (a) Localisation géographique de la zone d'étude dans le nord-est de l'Algérie ; (b) Limite provinciale de la ville de Constantine et carré de la zone d'étude.

Cette zone présente des glissements de terrain au moins depuis octobre 1993, par exemple près de l'avenue Kitouni. Pendant la nuit, les déformations de la pente ont atteint une vitesse de plusieurs centimètres et même centimètres par heure. Plus tard, en 2003, la profondeur des surfaces du sol de chaque bloc glissant a été estimée entre 12-16 m en utilisant des mesures d'inclinomètre, où la vitesse générale des déplacements s'élève à 4 cm/an. Les principaux éléments (blocs d'éboulement) du glissement de terrain se sont produits au fond du CoudiatAty. Le corps principal du glissement s'étend jusqu'à la rive gauche de la vallée du Rhumel, la masse instable se trouvait dans un chenal de près de 1100 m de long et 300 m de large, d'où environ deux millions de tonnes de terre et de matériaux ont été déplacés.

II.2.Géologie de site :

D'un point de vue géologique, la région de Constantine appartient au domaine externe de la chaîne du Tell Atlas, une partie des Alpes nord-africaines (Maghrebides), construite pendant les principales phases de compression paroxystique des époques éocène et miocène et de la période quaternaire. La plupart des glissements de Constantine se produisent dans les sédiments du Miocène et parfois dans les matériaux crétacés de la nappe de Tellian avec une grande hétérogénéité, une forte perméabilité, une présence d'eau très sensible et une plasticité moyenne à élevée.

Constantine présente quatre formations litho-stratigraphiques principales, comme le montre la figure 59 :

1. Les calcaires et les marnes du Crétacé qui appartiennent à la formation néritique de Constantine, par exemple la roche de Constantine et d'El Ménia-Djebbas.
2. les marnes crétacées-éocènes et les marnes calcaires de la nappe de charriage tellienne.
3. les argiles sableuses et les conglomérats du Mio-Pliocène ; c'est la lithologie la plus répandue et elle représente la moitié de la région. Le groupe argilo-marneux contient localement des horizons de sable et de gravier d'épaisseur variable. Les glissements de terrain fréquents se produisent dans des couches de conglomérat entrecoupées de marne
4. les terrasses alluviales et les formations calcaires lacustres du Quaternaire.

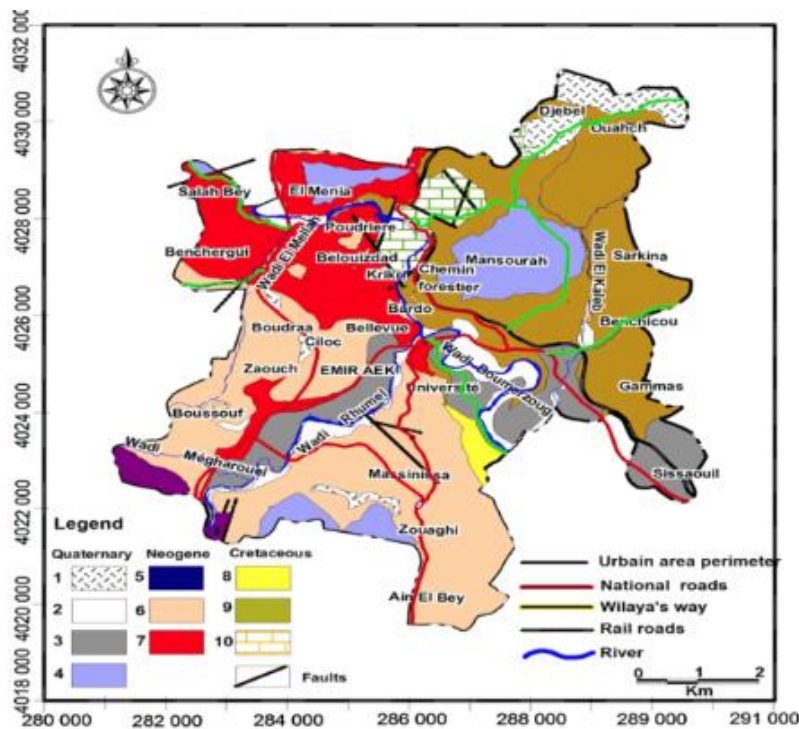


Figure 59 : Carte lithologique de la zone d'étude : 1-Colluvions, conglomérats et épaissements quaternaires ; 2-Terrasses alluviales récentes quaternaires ; 3-Terrasses alluviales anciennes quaternaires ; 4-Formations calcaires lacustres quaternaires ; 5-Formations calcaires lacustres pliocènes ; 6- Argiles marneuses du Miocène ; 7- Conglomérats du Miocène ; 8- Formations massyliennes (Crétacé supérieur) ; 9- Marnes calcaires du Tellien (Crétacé-Éocène) ; 10- Calcaire néritique (Cénomanién-

II.3. interprétations et résultat :

II.3.1. Interprétation : Nous avons utilisé PS -insar qui nous a permis de localiser les principales déformations dans la ville de Constantine. La figure 60A montre la carte des déformations obtenue pour la pile 1, couvrant la période du 6 août 2015 au 17 décembre 2017. La figure 60B montre la carte des déformations obtenue pour la pile deux, couvrant la période du 13 février 2015 au 26 juillet 2017.

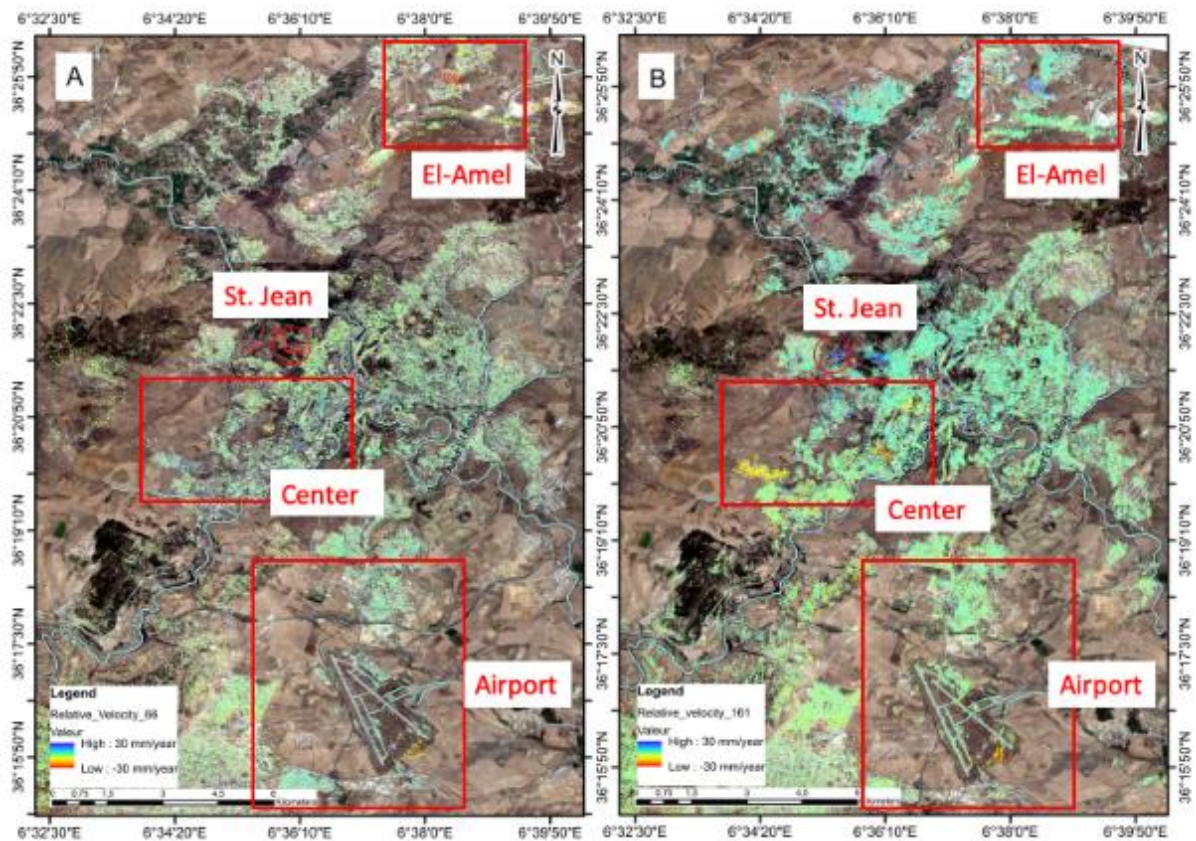


Figure 60 : Carte de vitesse moyenne de déformation en ligne de mire (LOS) de Constantine.

De fortes déformations sont observées au centre de la ville à deux endroits, qui sont autour de l'avenue de la République et du quartier Boussouf. Dans le quartier Boussouf, nous avons trouvé des mouvements entre -7 et -12,7 mm/an dans la zone des 470 logements et entre 7 et 10 mm/an dans le quartier Hadji Mou. Le mouvement de surface autour de la zone d'El-Amal (voir figure 62) est moins clair dans certaines zones, en raison de la décorrélation temporelle dans les zones rurales et les zones suburbaines. Au sud de Bekira, Hay laCity, Hay Barkat, OueladZiyad, et Hey Elcharikatara, le mouvement de surface est visible dans la Figure 62. Encore une fois, la direction du mouvement est différente pour les orbites ascendantes et descendantes, avec un mouvement de 17 à 23 mm/an pour l'orbite ascendante et un mouvement de -22 à -33 mm/an pour l'orbite descendante. Cela indique un mouvement horizontal relativement fort.

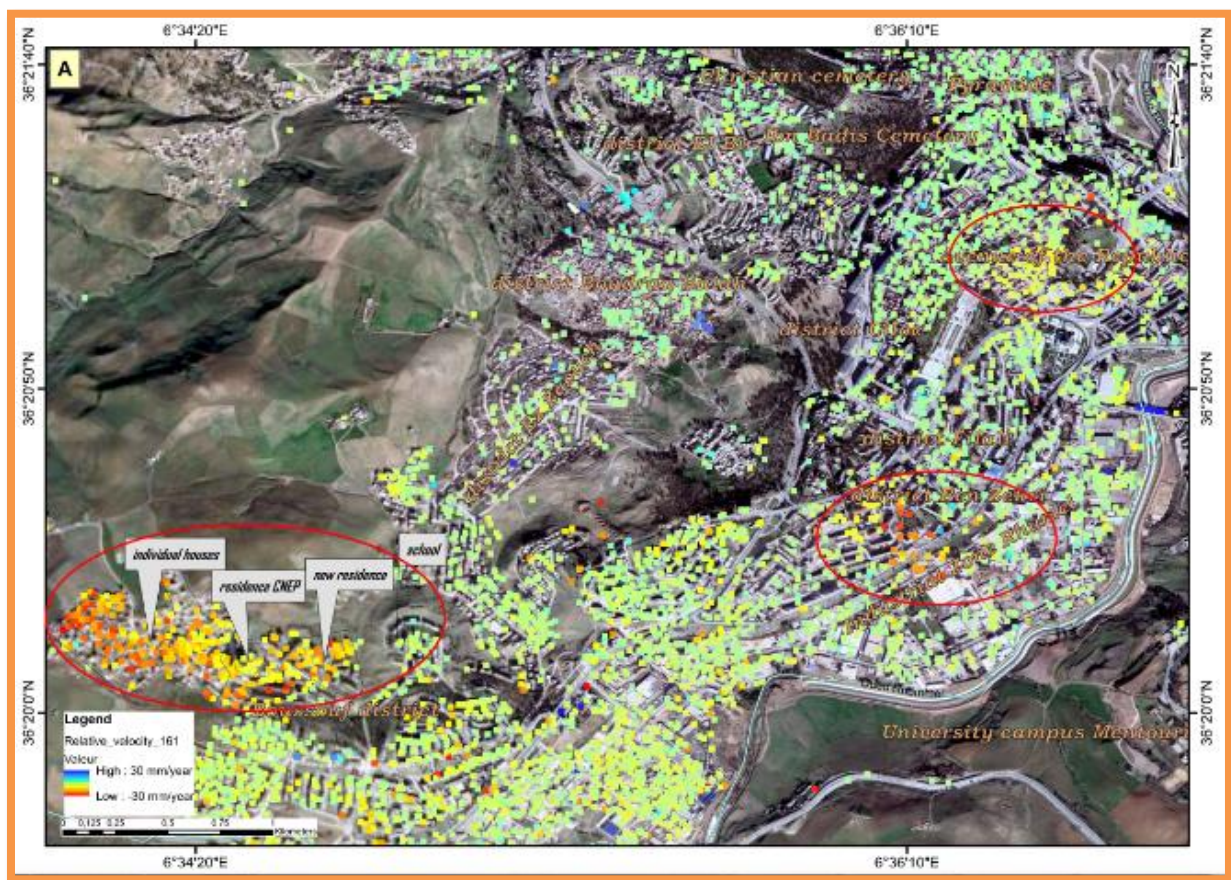


Figure 61 : carte de la vitesse moyenne de déformation de Constantine (centre).

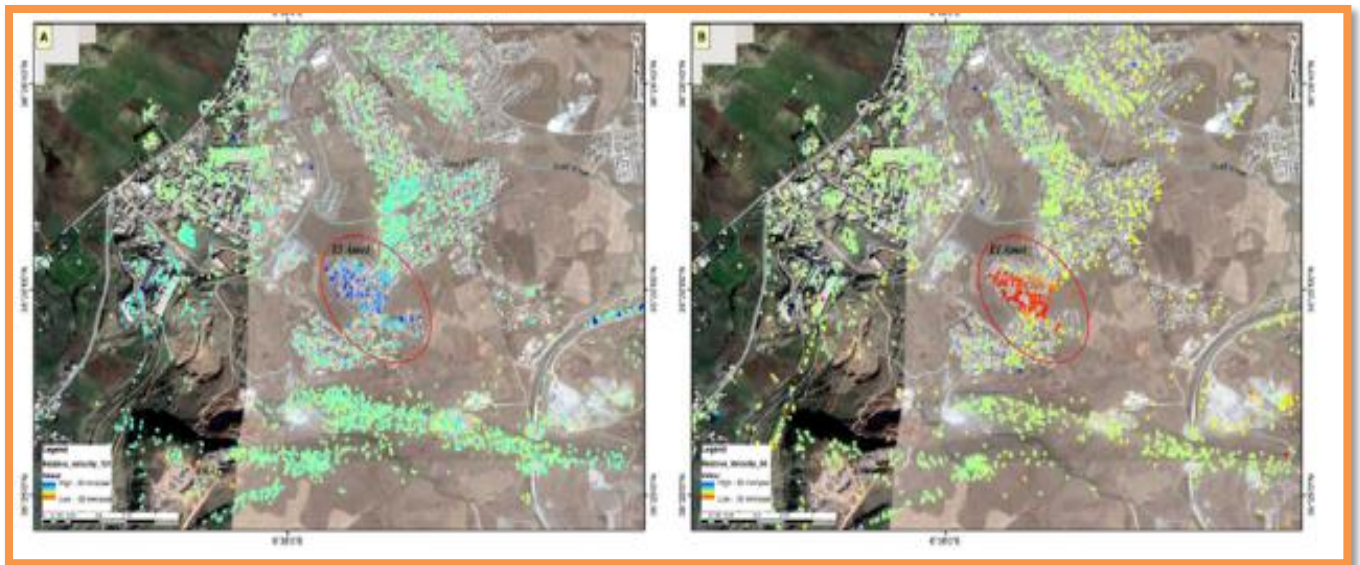


Figure 62 : Carte de déformation d'El-Amal

La subsidence peut être trouvée dans la partie sud de Constantine. En particulier à l'extrémité sud de l'aéroport, nous avons trouvé des vitesses négatives de l'orbite ascendante entre -14 et -25 mm/an et des vitesses négatives de l'orbite descendante allant de -13 à -19 mm/an (voir Figure 63). Cela indique une subsidence relativement forte à l'extrémité sud de l'aéroport, qui pourrait affecter les pistes dans un avenir proche.

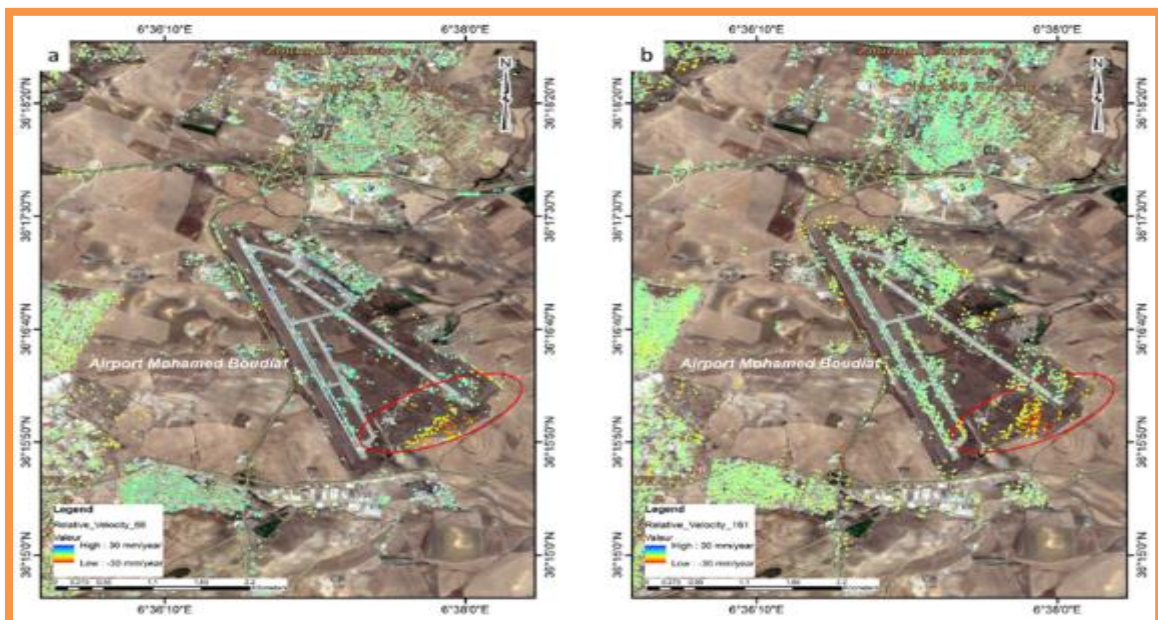


Figure 63 : Carte des déformations à l'aéroport de Constantine

II.3.2.Résultat :

L'application du PS-InSAR sur Constantine a révélé un certain nombre de sites déjà connus montrant des déformations et des mouvements du sol (par exemple, Boussouf et Saint Jean), où la comparaison des études antérieures et des enquêtes de terrain avec nos résultats montre un bon chevauchement. Comme le montre la carte géologique de Constantine, nous avons trouvé la superposition de formations géologiques où le contraste rhéologique entre elles est élevé, au fond la formation calcaire dure et épaisse appelée "néritique constantinois" attribuée au Jurassique inférieur et au Crétacé, recouverte par un matériau hautement plastique constitué d'argile et de grès. Les glissements de terrain à Constantine et la carte des pentes expliquent cette relation, puisque la plupart des glissements de terrain constantinois se produisent là où les pentes sont supérieures à 10 %. Cependant, les glissements de terrain ne sont pas uniquement dus à des facteurs naturels, les activités anthropiques peuvent également stimuler les déplacements de masse terrestre.

Les causes de cette instabilité sont dues à divers facteurs naturels et anthropiques tels que la prédominance des formations lithologiques de consistance molle, la topographie accidentée des pentes, l'infiltration des eaux de pluie dans le sol, l'absence de couverture végétale sur les pentes dégradées, l'état dégradé des réseaux de drainage sanitaire de la ville, les constructions sommaires et l'absence de drainage des eaux de pluie.



Figure 64 : Dégâts causés par un glissement de terrain sur l'infrastructure à Sidi Arab (sud de Didouche Mourad).



Figure 65 : École endommagée dans le quartier de Boussouf

II.4.Conclusion :

Nous avons présenté des exemples de risques géomorphologiques et géologiques menaçant les zones urbaines du nord-est de l'Algérie et des glissements de terrain liés à des facteurs topographiques/géologiques. Le PS-InSAR met en évidence les zones de déformations car il permet un échantillonnage dense des observations, plusieurs centaines de mesures par kilomètre carré. L'expansion urbaine de la ville de Constantine est confrontée à des glissements de terrain qui endommagent de nombreux bâtiments. A Boussouf, les causes sont liées à la faible stabilité des pentes marneuses du Miocène, souvent perturbées par des travaux de terrassement excessifs, et à l'occupation du lit des rivières, ce qui est également le cas dans les trois autres localités de la partie centrale de Constantine, à savoir, Au contraire, dans la partie nord de Constantine, la superposition d'une formation géologique à fort contraste rhéologique et du réseau de failles peut constituer un horizon de détachement potentiel. Cependant, les facteurs naturels ne sont pas la seule cause des glissements de terrain. L'exploitation d'argiles pour la carrière de l'usine de céramique de Didouche-Mourad peut accélérer la déformation. Comme nous pouvons le constater, Constantine est confrontée à de sérieux problèmes de glissements de terrain, et les autorités locales doivent donc garder un œil ouvert sur ces phénomènes. Un contrôle permanent est nécessaire pour surveiller les zones affectées. Une méthode relativement peu coûteuse et précise est l'estimation des mouvements de surface à l'aide de PS-InSAR, en particulier avec la disponibilité mondiale des données Sentinel-1. Enfin, la carte des risques de glissements de terrain a permis d'identifier les glissements potentiellement les plus dangereux. Les glissements de terrain à Constantine se déplacent constamment à faible vitesse, quelques centimètres par an en moyenne. Les dommages aux bâtiments sont le résultat de déplacements cumulés sur plusieurs années, ce qui explique pourquoi les habitants ne veulent pas évacuer leurs maisons. Le travail actuel de surveillance des dangers et des risques, ainsi que l'inventaire des glissements de terrain des études existantes ont été fortement orientés vers la gestion des risques et leur application. Les résultats les plus récents peuvent être utilisés pour mieux estimer la nature et/ou l'étendue de ces catastrophes naturelles potentielles à l'aide de PS-InSAR.

III.Exemple 03 : Caractérisation et surveillance d'un glissement rocheux actif d'une mine à ciel ouvert en utilisant le LiDAR, Thetford Mines, Québec, Canada.

III.1.Cas d'étude :

La mine à ciel ouvert LAB Chrysotile (profondeur de la fosse principale : 330m) est localisée à proximité de la ville de Thetford Mines, Québec, Canada. Depuis l'arrêt de son exploitation pour des raisons économiques et l'arrêt des pompages en 2011, un glissement s'est produit sur le mur Est de la fosse le 12 juillet 2012. Cette rupture a eu pour conséquence d'emporter une portion de la route 112 sur laquelle des fissures de tension étaient apparues dès 2011. La route 112 étant la route principale et l'axe économique de la région, sa fermeture a des conséquences importantes pour la population locale. Pour cette raison, cette portion de route a fait l'objet d'une surveillance par le MTQ (Ministère des Transports du Québec) dès l'apparition des premières fissures (Dorval 2011). À partir de juin 2012, le Laboratoire de mécanique des roches du Département de génie des mines de l'Université Laval a poursuivi la surveillance du mur Est de la fosse à l'aide d'un LiDAR terrestre (Optech 2011). Ce suivi a permis de produire une série de MNT (Modèles Numériques de Terrain) (Figure 66 et Figure 67) pour reconstituer l'évolution du glissement sur 18 mois et montrer que le glissement était toujours actif en novembre 2013. D'autres travaux actuellement en cours portent sur l'analyse de la stabilité du mur Ouest de la fosse à proximité du nouveau tracé de la route 112 (Amoushahi et al. 2014).

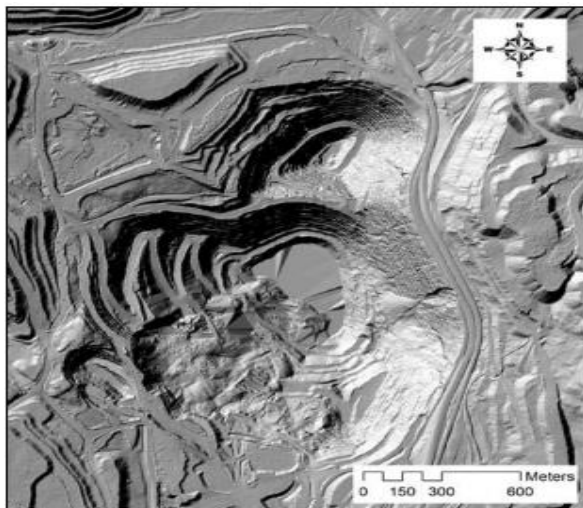


Figure 66 :Surveillance LiDAR aéroporté (ALS) du mur Est de la mine LAB Chrysotile le 22 novembre 2010.



Figure 67: Surveillance LiDAR aéroporté (ALS) du mur Est de la mine LAB Chrysotile après la rupture du 12 juillet 2012.

III.2 SURVEILLANCE LIDAR

III.2.1 Positions du lidar terrestre : Deux positions A et B ont été choisies (Figure 68) pour effectuer la numérisation jusqu'à l'enneigement du point B au cours de l'été 2013. Par conséquent, les TLS sont enregistrés uniquement du point A à partir de septembre 2013; d'autres positions LiDAR n'ont pas pu être choisies pour des raisons de sécurité ou d'inaccessibilité.

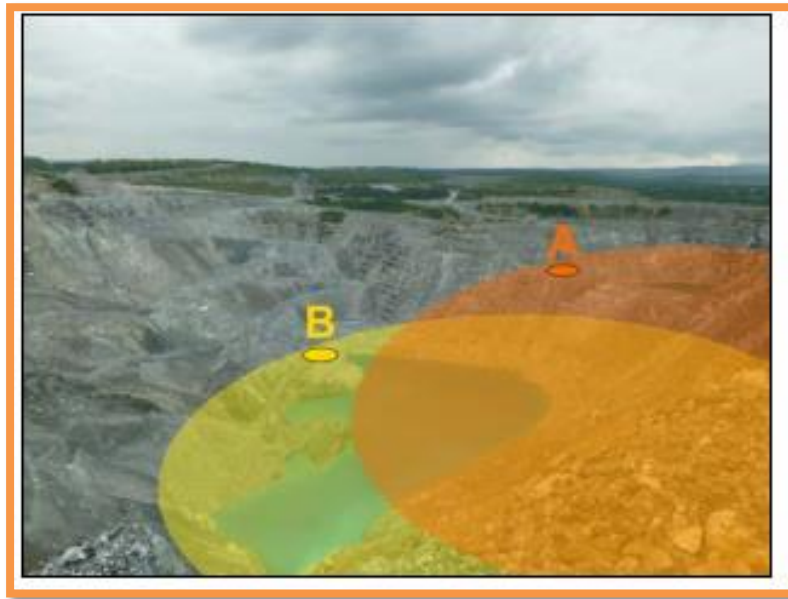


Figure 68 : Positions du Lidar face au mur Est

III.2.2 Suivi LIDAR :

Avant septembre 2013, deux TLS étaient obtenus (2 positions A et B) et combinés pour produire un TLS unique avec une densité moyenne de 22 cm entre les points. Cette densité a été maintenue à partir de septembre 2013 depuis l'unique point de mesure A. Or la distance de ce point à la zone Sud du mur Est, dépasse la distance optimale qui est d'environ 1.8km. Par conséquent, le MNT produit à partir de ces nuages de points, est constitué de nombreuses zones d'ombres pour ce secteur. En revanche, selon Bonnaffe et al. (2007), le niveau de détail reste suffisant pour obtenir de bons résultats. Pour améliorer la précision, les TLS obtenus (Tableau 05) ont ensuite été combinés à l'ALS qui le précède pour produire un MNT pour chaque date d'enregistrement (Figure 66, Figure 67). Autrement dit, 15 MNT ont été réalisés pour reconstituer l'évolution du glissement du mur Est sur 2 années consécutives (Tableau05). La rupture s'étant produite le 12 juillet 2012, la géométrie de la fosse a donc été capturée avant et après la rupture.

Tableau 05 : Dates des relevés LiDAR au cours de la période de surveillance.

MNT_ID	Type de nuage de points	Date du relevé	Temps écoulé (jours)
0	ALS	22 nov 2010	-
1	TLS	29 juin 2012	0
2	TLS	11 juil 2012	12
3	ALS	13 juil 2012	14
4	TLS	02 aout 2012	34
5	TLS	29 aout 2012	61
6	TLS	27 sept 2012	90
7	TLS	12 nov 2012	136
8	TLS	05 juin 2013	341
9	TLS	17 juin 2013	353
10	ALS	05 aout 2013	402
11	TLS	19 sept 2013	447
12	TLS	19 sept 2013	447
13	TLS	11 oct 2013	469
14	TLS	08 nov 2013	497

III.3 ANALYSE PRÉLIMINAIRE :

III.3.1 Géologie : La géologie du site est schématisée sur les Figure 69 et Figure 70. Le mur Est est constitué de péridotite massive dans la partie haute (en jaune sur les Figure 69 et Figure 70) et de serpentinite schisteuse dans la partie basse (en orange sur la Figure 69 et Figure 70). Une bande de granite massive (en vert sur Figure 69) traverse la mine dans la direction SO-NE. Pour finir, deux inclusions de talc sont présentes dans la partie basse du mur Sud de la fosse principale (en violet sur Figure 69).

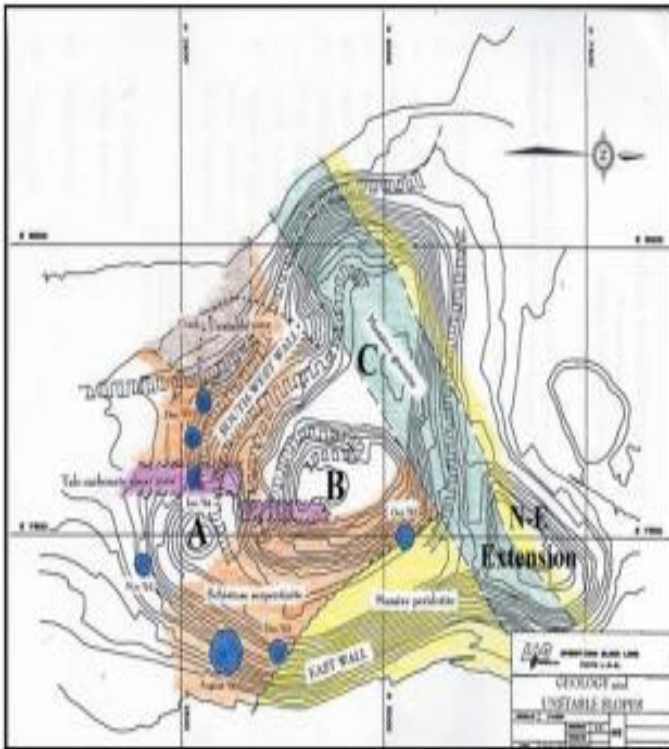


Figure 69 : Plan de la mine LAB Chrysotile avec la géologie avec l'axe Nord orienté vers la droite. (Beauchamp 1994)

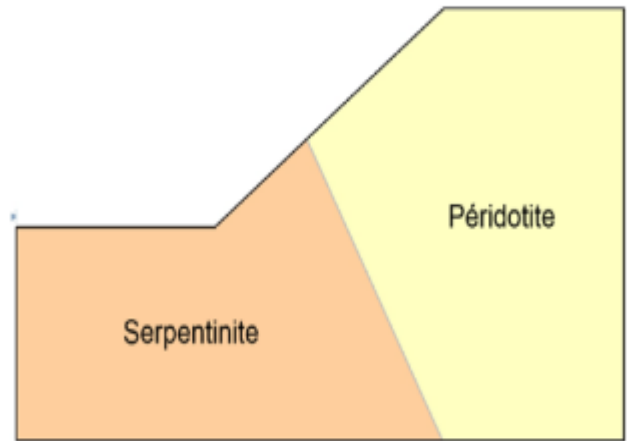


Figure 70 : Géologie simplifiée du mur Est selon une coupe orientée selon la direction de 250°

III.3.2 Étendue du glissement :

Un différentiel entre MNT selon l'axe vertical fait ressortir l'étendue du glissement (ligne bleu sur la Figure 71). L'analyse de cette image permet de conclure que la masse en mouvement excède largement celle de la zone ciblée au départ pour l'étude (délimitée par la ligne blanche sur la Figure 71). En effet, elle s'étend de 250m plus en arrière vers le Sud-Est de la fosse principale. Les limites du glissement sont confirmées sur le terrain par la présence de fissures de tension. Finalement, le résultat de cette simple opération montre la pertinence d'utiliser le LiDAR pour obtenir de l'information quantitative de manière efficace tel que souligné par Prokop et Panholzer (2009).

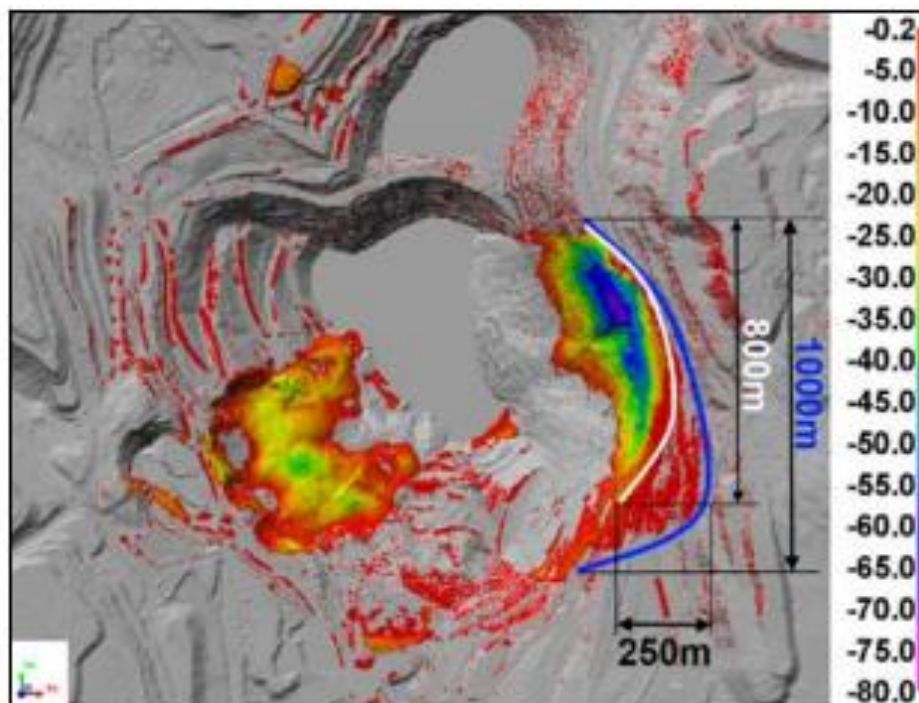


Figure 71 : Écart de distance (m), entre le MNT du 22 novembre 2010 et celui du 5 août 2013 avec la zone très active délimitée par la ligne blanche et l'étendue globale du glissement délimitée par la ligne bleue.

III.3.3 Orientation et géométrie des pentes :

Pour la suite de l'étude, le mur Est de la mine LAB Chrysotile est divisé en 4 secteurs (secteur 1, 2, 3 et 4 sur la Figure 72) et le mur Sud en 2 secteurs (secteur 5 et 6 sur la Figure 72). Cette procédure permettra par la suite de regrouper les vecteurs déplacements par secteur.

L'orientation moyenne de la pente a été évaluée pour chaque mur à l'aide du logiciel Polyworks (Innovmetric 2012). Le pendage et la direction du pendage est de $42^\circ/250^\circ$ pour le mur Est (secteur 2, 3 et 4), de $36^\circ/295^\circ$ pour le mur Sud-Haut (secteur 5) et $31^\circ/320^\circ$ pour le mur Sud-Bas (secteur 6).

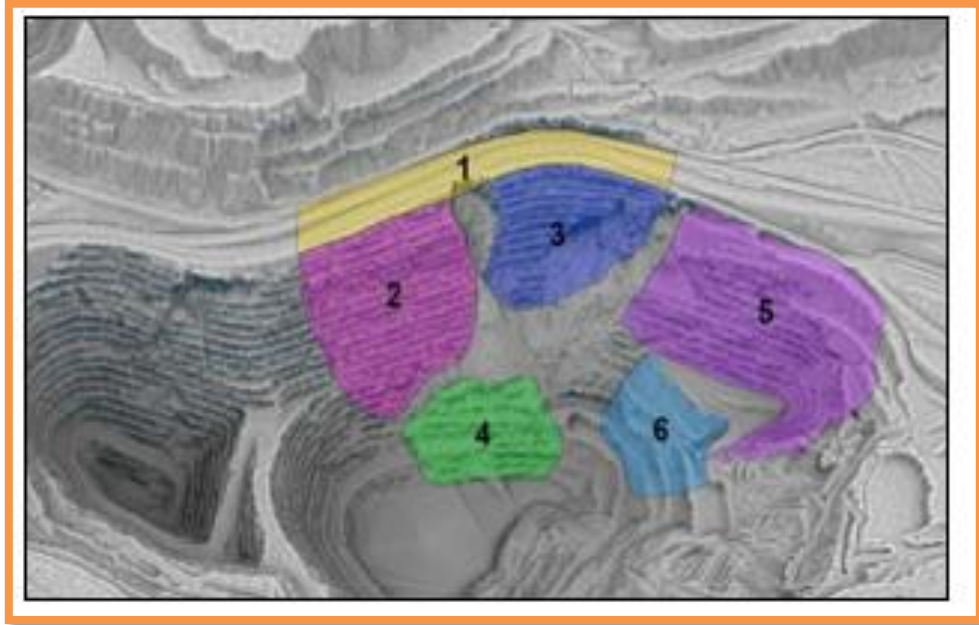


Figure 72 : Division de la zone d'instabilité en 6 secteurs

III.4 ANALYSE STRUCTURALE :

L'analyse structurale préliminaire est réalisée sur la partie apparente de la surface de rupture du mur Est avec l'ALS 2013 et le dernier TLS enregistré en 2013. Ces deux nuages de points sont importés dans le logiciel Coltop (Terr@num 2013) qui calcule automatiquement la normale pour chaque point du nuage (Figure 73 et Figure 74). Concernant le TLS (Figure 74), le blanc est la couleur dominante du secteur Sud du mur Est. Cette dégradation du nuage s'explique par la présence de nombreuses zones d'ombres et une faible densité de points dans ce secteur, produisant, de fait, une forte contrainte pour le calcul des normales par Coltop. Pour l'ALS (Figure 73), les zones de couleur noire représentent des cavités non visibles depuis les airs. Elles ne contiennent aucune normale. Par conséquent, l'analyse structurale devient pertinente et significative lorsque ces deux nuages sont combinés pour compléter les zones d'ombres de l'une par les zones denses en normales de l'autre et réciproquement.

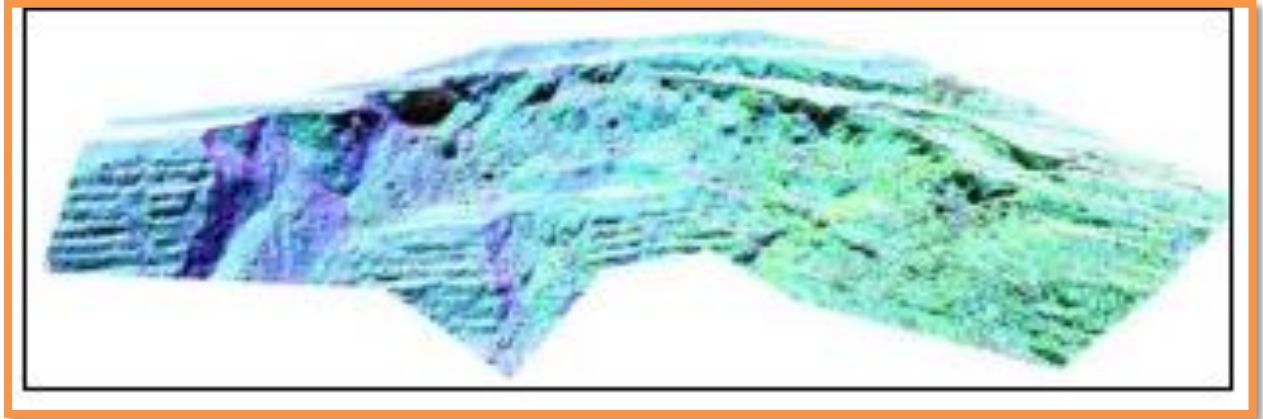


Figure 73 : Normales de la surface de rupture extraites de l'ALS



Figure 74 : Normales de la surface de rupture extraites du TLS novembre 2013.

III.5 Évolution des déplacements par secteur :

Pour les secteurs 1 à 4, la composante cumulative selon l'axe des déplacements de chaque vecteur est représentée graphiquement sur la Figure 75. La comparaison des courbes obtenues montre une hétérogénéité significative des déplacements entre les secteurs 1 à 3. Si l'orientation est supposée similaire (section 5.1), les déplacements ne le sont pas.

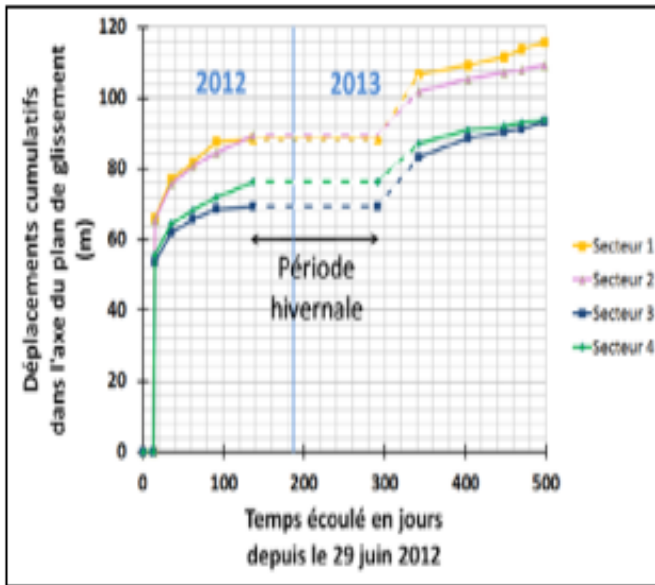


Figure75 : Évolution des déplacements cumulatifs suivant la direction des vecteurs déplacements pour les secteurs 1, 2, 3 et 4.

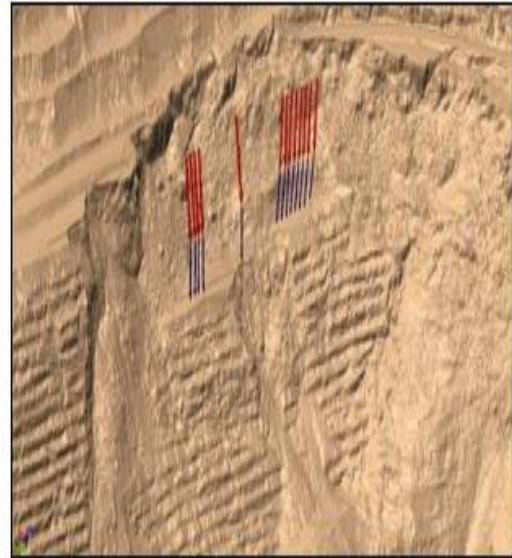


Figure 76 : Vecteurs déplacements pour la période entre le 11 et 13 juillet (en rouge) et du 13 juillet au 5 août 2013 (en bleu)

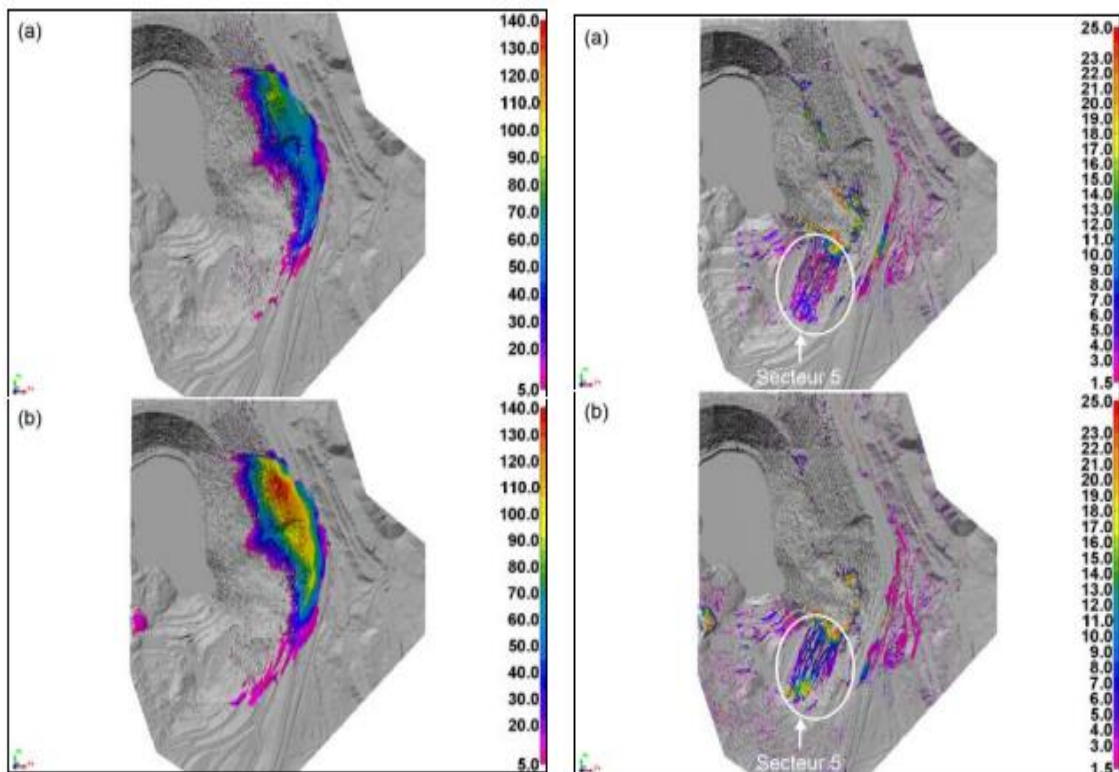


Figure77 : Évolution des déplacements (m) du glissement suivant l'axe du vecteur déplacement du secteur 1 et 5 (a) entre le MNT du 29 juin 2012 et le MNT du 13 juillet 2012 et (b) entre le MNT du 29 juin 2012 et le MNT du 5 août 2013.

III.6 résultats :

En comparant l'orientation des vecteurs déplacements à celles des familles de joints, il apparaît que l'orientation de la famille de joints 4 est proche de celle des plans de glissements des secteurs 1, 2 et 3. L'analyse structurale présentée à la section 3.2 démontre qu'une rupture planaire sur les discontinuités de la famille 4 ne peut pas expliquer à elle seule le glissement de ce mur. Il est cependant possible d'expliquer le glissement dans la partie supérieure de la pente, dans le massif de péridotite qui est de bonne qualité, par un glissement le long des discontinuités de cette famille (Figure 78). La partie inférieure du glissement s'effectuerait alors au travers du massif rocheux de serpentinite qui est de plus faible qualité et il prendrait une forme circulaire (Figure 78). Des travaux préliminaires de modélisation numérique ont également démontré la validité de cette hypothèse, Caudal et al. (2014). Cette explication concorderait également avec les vecteurs déplacements mesurés dans le secteur 4. Une rupture le long du contact géologique contribuerait également à expliquer le comportement observé. Concernant le mur Sud, il est difficile d'être aussi affirmatif, car trois MNT ne permettent pas de quantifier avec autant de certitude l'orientation des vecteurs déplacements tout au long du suivi. Cependant, il est raisonnable d'affirmer qu'une forme de glissement similaire à celle du mur Est expliquerait le comportement de la pente. Les déplacements bien plus lents s'expliqueraient principalement par la présence de la butée, mise en place par la minière, au pied de la pente.

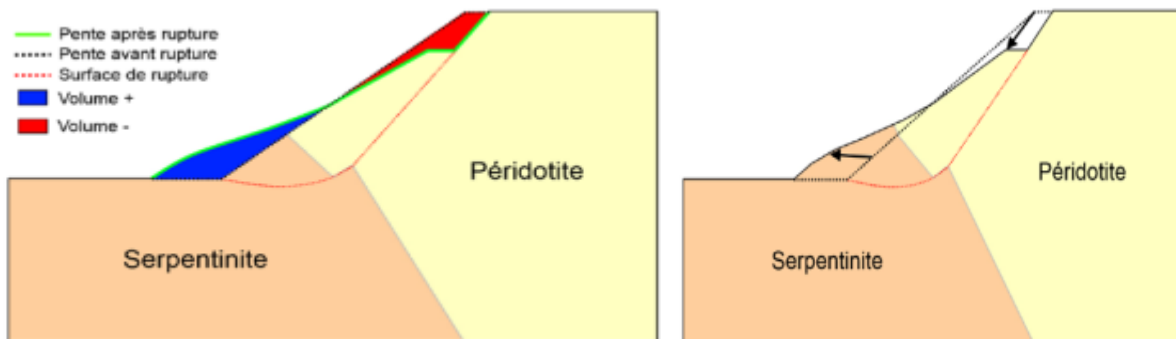


Figure78 : Schématisation des volumes négatifs et positifs après rupture de pente (Caudal et al 2014).

III.7 CONCLUSION :

De nombreuses études ont montré l'efficacité du LiDAR en termes de compréhension des mécanismes de rupture de pente. Concernant l'étude du glissement actif de Thetford Mines, l'utilisation des LiDAR terrestre et aéroporté a permis de reproduire son évolution sur 2 ans. Cette étude divisée en 3 phases, propose d'abord une série de mesures pouvant être rapidement effectuée à partir des MNT donnant ainsi une idée générale de la problématique (géométrie et orientation des pentes, étendue globale du glissement, vitesse de remplissage de la fosse et évolution du glissement par le biais de la mesure des volumes négatifs). La deuxième phase montre qu'une analyse structurale préliminaire a pu être réalisée et faire ressortir l'existence de 5 familles de joints, dont 3 confirment les informations en provenance du bureau d'ingénierie de LAB Chrysotile, mais également la présence d'une autre famille qui serait critique pour la stabilité d'ensemble de la pente. La troisième phase montre l'intérêt d'utiliser les MNT pour quantifier le mouvement. En déterminant des vecteurs déplacements, les mouvements sont quantifiés et la cinématique définie. Finalement, en combinant ces 3 phases d'analyse, la mécanique du glissement s'explique par la combinaison d'une rupture planaire et circulaire.

Conclusion générale

Enfin, le glissement de terrain est un risque géologique naturel ayant des impacts significatifs sur les vies humaines, les infrastructures et l'environnement, se produisant dans différentes parties du monde, dans divers paysages et conditions climatiques. Ce phénomène est influencé par des facteurs tels que la topographie, la géologie, le climat, la végétation et les pratiques d'utilisation et gestion des terrains et pour cela, des stratégies efficaces d'atténuation et de gestion des glissements de terrain sont essentielles pour réduire les risques associés à ces aléas qui nécessitent une étude complète pour mieux comprendre de la zone influencée.

Les techniques de télédétection sont l'une des meilleurs moyens d'étudier à distance les zones de glissement où elles jouent un rôle crucial dans la surveillance des changements qui se produisent sur le terrain, offrant de nombreux avantages dans l'étude des glissements de terrain. Ces techniques, qui comprennent : la photogrammétrie, InSAR et Lidar, peuvent fournir des données précieuses en utilisant divers types d'ondes électromagnétiques, sur de vastes zones et de longues périodes de temps sur les terrains affectés par ce phénomène, permettant aux chercheurs et aux professionnels de recueillir des informations cruciales qui aident dans l'étude de ce phénomène de manière économique et efficace.

La photogrammétrie, grâce à l'analyse des images aériennes ou satellitaires, permet d'obtenir des informations cruciales de terrain glissé et crée des modèles 3D de haute résolution des zones propices aux glissements de terrain qui permettent des mesures précises des caractéristiques du terrain, l'identification des instabilités potentielles des pentes et la cartographie des cicatrices de glissement pour détecter et quantifier les mouvements du sol, fournissant des données précieuses pour la surveillance des glissements de terrain et les systèmes d'alerte précoce.

D'autre part, l'InSAR est devenue un outil inestimable pour surveiller le glissement de terrain sur de vastes zones et détecter les déformations de surface et même les mouvements du sol les plus subtils à l'échelle du millimètre qui permettent l'identification de glissement de terrain à évolution lente et de leurs éventuels signes précurseurs.

La technologie Lidar joue également un rôle crucial dans les études de glissement de terrain en fournissant des données d'élévation précises et détaillées où elle permet de créer des modèles numériques de terrain à haute résolution par émission d'impulsions laser et mesure de leur temps de retour pour révéler les changements subtils du terrain et les déformations de surface indicatives de l'activité des glissements de terrain.

Ces techniques offrent aussi la possibilité d'étudier les zones en temps presque réel ou revisiter les données plus anciennes de ces terrains qui est un avantage très important dans l'étude des changements apparus dans les zones glissées. Ces techniques aussi, combinées avec les systèmes d'information géographique (SIG), permettent aux chercheurs de créer des cartes et des modèles spatialement explicites et riches en informations où il combine les données de télédétection

avec des autres ensembles des données géo spatiales telles que les données topographiques et géologiques.

En générale, la télédétection offre des avantages substantiels pour l'étude des glissements de terrain, notamment une couverture étendue, une analyse de séries chronologiques, une détection rapide, des capacités multi spectrales, l'intégration avec le SIG, la non-invasion et la rentabilité. Ces avantages en font l'un des meilleurs moyens d'améliorer la compréhension, la surveillance et la gestion des risques de glissement de terrain, contribuant ainsi à la protection des communautés et des infrastructures vulnérables.

Références bibliographique

Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J. M., and Blanchard, J. 2010. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology* 119 (3–4):162-171.

Amoushahi, S., Grenon, M., Locat, J., and Turmel, D. 2014. Assessment of the influence of an inactive open pit mine on the design of a Highway. *Proceedings of GEOHAZARDS 6*, June 15–18, Kingston, Canada

Ashby, Michael; Hugh Shercliff; David Cebon (2007). *Matériaux: ingénierie, science, traitement et conception* (1ère éd.). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-8391-3.

Bellvert J., Zarco-Tejada P.-J., Girona J., Fereres E. (2014) – Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15, 361-376.

Bollot N. (2014) – Les mouvements de terrain du vignoble champenois : approche géomorphologique et hydrologique.

Bollot N., Devos A., Pierre G. (2015) – Ressources en eau et glissements de terrain : exemple du bassin versant de la Semoigne (bassin de Paris, France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 21 (1), 7-20

Bonnaffe, F., Jennette, D., and Andrews, J. 2007. A method for acquiring and processing ground-based lidar data in difficult-to-access outcrops for use in three-dimensional, virtual-reality models. *Geosphere* 3 (6):501-510.

Borgogno-Mondino E., Novello V., Lessio A., de Palma L. (2018) – Describing the spatio-temporal variability of vines and soil by satellite-based spectral indices: A case study in Apulia (South Italy). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 42-50.

Bui D. T., Tsangaratos P., Nguyen V.-T., Van Liem N., Trong Trinh P. (2020) – Comparing the prediction performance of a Deep Learning Neural Network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment. *Catena*, 188.

Caudal, P. (2012). Analyse d'un glissement actif par suivi LiDAR et modélisation de la rupture : mine LAB Chrysotile à Thetford Mines (Québec). Cnam Paris, France

Colin G. (1971) – Un grand département agricole : la Marne. Travaux de l'Institut de Géographie de Reims, 7, 3-15

Damien T., Pierre G., Devos A., Lejeune O., Javaux B. (2016) – Typologie des karsts de la côte d'Île-de-France entre Sézanne et Reims. *Karstologia*, 67, 59-64.

Devos A., Fronteau G., Bollot N., Barbin V., Duchêne S., Chalumeau L. (2016) – Un paléokarst "supra-pergélisol" dans les calcaires lutétiens (Soissonnais, France). *Karstologia*, 67, 53-58

Département américain de l'énergie, science des matériaux. DOE Fundamentals Handbook, Volume 1 et 2. Janvier 1993

Département américain de l'énergie, science des matériaux. DOE Fundamentals Handbook, Volume 2 et 2. Janvier 1993.

Eberhart, Mark (2003). Pourquoi les choses se cassent : Comprendre le monde par la manière dont il se décompose. Harmonie. ISBN 978-1-4000-4760-4.

ESA (2018) – Copernicus open access hub. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [WWW document]

Fang Z., Wang Y., Peng L., Hong H. (2020) – Integration of convolutional neural network and conventional machine learning classifiers for landslidesusceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 139.

Gaskell, David R. (1995). Introduction à la thermodynamique des matériaux (4e éd.). Éditions Taylor et Francis. ISBN 978-1-56032-992-3.

Gao B.-C. (1996) – A normalized difference water index for remotesensing of vegetationliquid water fromspace. *RemoteSensing of Environment*, 58, 257-266.

Gonzalez-Viñas, W. & Mancini, HL (2004). Une introduction à la science des matériaux. Presse universitaire de Princeton. ISBN 978-0-691-07097-139

Gordon, P., and Charles, T. 2008. Terrestrial Laser Scanners. In Topographic Laser Ranging and Scanning, 87-126: CRC Press. InnovMetric Software Inc., 2012. Polyworks v. 12.0.17, build 5761, 64 bit.

Guérémy P., Marre A. (1996) – Une nouvelle méthode de cartographie géomorphologique applicable aux aléas naturels, Travaux de l’Institut de Géographie de Reims, 93-94, 5-40

Guérémy P., Vejux V. (1987) – Mouvements de terrains successifs : les glissements et les coulées du versant sud de la Montagne d’Avize (Marne, France). Travaux de l’Institut de Géographie de Reims, 69-72, 113-127

Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P., and Wardlow, B. (2007) – A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34.

Hatrival J.-N. (1977) – Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille d’Epernay, BRGM, Orléans, avec notice, 19 p

Kasperski, J., Delacourt, C., Allemand, P., Potherat, P., Jaud, M., and Varrel, E. 2010. Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France). *Remote Sensing* 2 (12):2785-2802.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. 2012. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards* 61 (1):5-28.

Jacques Locat & Dominique Turmel : Département de géologie et de génie géologique – Université Laval, Québec, QC, Canada

JR Lamarsh, AJ Baratta, Introduction au génie nucléaire, 3e éd., Prentice-Hall, 2001, ISBN : 0-201-82498-1.

LAGAGNA Lotfi LAIMOUCHE Amar Amine :Département de Génie Civil Université
A. MIRA-Bejaia2015/2016

Lejeune O., Devos A. (2001) – Caractéristiques et spécificités du karst de la Montagne de Reims ; comparaison avec les autres karsts de contact lithostratigraphique de l'est du Bassin parisien. *Revue Géographique de l'Est*, 41 (4), 165-175.

Lissak C., Maquaire O., Malet J.-P., Bitri A., Samyn K., Grandjean G., Bourdeau C., Reiffsteck P., Davidson R. (2014) - Airborne and ground-based data sources for characterizing the morpho-structure of a coastallandslide. *Geomorphology*, 217, 140-151.

Lissak C., Bartsch A., De Michele M., Gomez C., Maquaire O., Raucoules D., Roulland T. (2020) – RemoteSensing of AssessingLandslides and Associated Hazards. *Surveys in Geophysics*, 41, 1391-1435.

Marre A. (2004) – Existe-t-il des terroirs viticoles en Champagne ? *Revue Géographique de l'Est*, 44 (1-2), 17-30.

Mc Feeters S. K. (1996) – The use of the NormalizedDifference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of RemoteSensing*, 17 (7), 1425-1432.

OldrichHungr, Serge Leroueil et Luciano Picarelli, « *The Varnes classification of landslide types, an update* »)

Ortonovi S., Bollot N., Pierre G., Devos A., Perarnau R. (2020) – Dynamique et modelé des versants cambrés de la vallée de l'Ardre (plateau éocène du Soissonnais, bassin de Paris, France). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 26 (2), 117-126.

Peng C., Deng M., Di L. (2014) – Relationshipsbetweenremote-sensing-based agricultural droughtindicators and root zone soilmoisture: a comparative study of Iowa. *IEEE Journal of Selected Topics in AppliedEarth Observations and RemoteSensing*, 7 (11), 4572-4580.

Philippe Caudal & Martin Grenon Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux – Université Laval, Québec, QC, Canada

Pierre G., Devos A., Bollot N. (2017) – Origin and influence of the superficial structure on the morphogenesis (Eocene plateaux of the eastern Paris Basin). *GeoResJ*, 13, 103-113.

Rouse J.W., Haas R.H. (1973) – Monitoring vegetationsystems in the great plain with ERTS. Third ERTS Symposium, 1, 309-317. - Washington DC: NASA.

Stumpf A., Malet J.-P., Allemand P., Ulrich P. (2014) – Surface reconstruction and landslidedisplacementmeasurementswith Pléiades satellite images. *ISPRS Journal of Phtogrammetry and RemoteSensing*, 95, 1-12

Stumpf A., Malet J.-P., Delacourt C. (2017) – Correlation of satellite image time-series for the detection and monitoring of slow-movinglandslides. *RemoteSensing of Environment*, 189, 40-55.

Tucker C. J. (1979) – Red and photographicinfraredlinear combinations for monitoring vegetation. *RemoteSensing of the Environment*, 8 (2), 127-150.

Van Den Eeckhaut M., Marre A., Poesen J. (2010) – Comparison of twolandslidesusceptibilityassessments in the Champagne-Ardenne region (France), *Geomorphology*, 115, 141-

William D. Callister, David G. Rethwisch. *Science et génie des matériaux : une introduction* 9e édition, Wiley ; 9 édition (4 décembre 2013), ISBN-13 : 978-1118324578.

Wyllie, D. C., and Mah, C. W. 2004. *Rock slope engineering : civil and mining.* 4th ed. London: Taylor & Francis.

Zhang M., Su W., Fu Y., Zhu D., Xue J.-H., Huang J., Wang W., Wu J., Yao C. (2019) – Super-resolutionenhancement of Sentinel-2 image for retrieving LAI and chlorophyll content of summer corn. *European Journal of Agronomy*, 111.

Résumé

Les mouvements de terrain englobent des divers phénomènes géologiques qui incluent le déplacement ou la déformation de la surface de la terre qui peuvent se produire en raison des facteurs naturels tels que l'activité tectonique et les forces gravitationnelles, ainsi que des causes anthropiques qui englobent les activités humaines telles que l'exploitation minière, l'extraction des eaux souterraines et la construction des infrastructures, tous ces facteurs peuvent déclencher des affaissements, des glissements de terrain, des chutes de pierres et des autres types de mouvements de terrain.

Les impacts des mouvements de terrain peuvent être importants et de large gamme et peuvent même causer des impacts sur les ressources en eaux souterraines, perturbés les réseaux de transport et présentés des risques de la sécurité humaine et les moyens de subsistance, causent des blessures, des pertes de vies et le déplacement des communautés. Les infrastructures, qui incluent les routes, les ponts et les bâtiments, peuvent être détruites ou gravement endommagées, perturbant les systèmes de transport et entravant les efforts de sauvetage et de récupération. De ce fait, l'évaluation et la surveillance des mouvements de terrain sont essentielles pour une gestion efficace des terres et une atténuation des risques qui fournissent des données précieuses pour comprendre l'ampleur, le rythme et la distribution spatiale des mouvements de terrain, et l'un des meilleurs moyens et techniques qui nous donne des informations précises sur ces phénomènes est la télédétection.

Notre étude concentre principalement sur les techniques de télédétection connues les plus efficaces et les plus courantes (photogrammétrie, InSAR et Lidar) et comment elles sont devenues des outils indispensables dans l'étude des mouvements de terrain et en particulier dans notre cas des glissements de terrain, nous fournissant des informations précieuses sur la dynamique, le suivi et l'évaluation de ce phénomène.

Ce travail contient un aperçu général sur les mouvements de terrain et les principales causes de ces phénomènes géologiques aux côtés des types de ces mouvements, nous parlerons aussi des techniques de télédétection et de la manière de traiter les données acquises après la détection des différentes ondes électromagnétiques renvoyées par la zone de glissement de terrain étudiés qui sont émis soit par le satellite ou l'avion ou émis par le soleil et donnent des exemples détaillés de chaque technique pour donner une meilleure compréhension de la façon d'utilisation de ces techniques dans l'étude des glissements de terrain.

Mots clés : mouvements de terrain, glissement de terrain, télédétection, photo interprétation

InSAR, lidar

Abstract

Land movements encompass various geological phenomena that involve the displacement or deformation of the Earth's surface which can occur due to natural factors such as tectonic activity and gravitational forces, as well as anthropogenic causes which encompass human activities such as mining, groundwater extraction, and the construction of infrastructure, all these factors can lead to subsidence, landslides, rock-falls, and other types of land movements.

The impacts of land movements can be significant and wide-ranging and can even impact groundwater resources, disrupt transportation networks, and pose risks to human safety and livelihoods causing injury, loss of life, and displacement of communities.

Infrastructure, including roads, bridges, and buildings, can be destroyed or severely damaged, disrupting transportation systems and hindering rescue and recovery efforts and because of that, assessing and monitoring land movements is crucial for effective land management and hazard mitigation which provide valuable data for understanding the magnitude, rate, and spatial distribution of land movements, and one of the best ways and techniques that gives us a precise information about these phenomena is remote sensing.

Our study will focus mainly about the most effective and common known remote sensing techniques (photogrammetry, Insar and Lidar) and how they became indispensable tools in the study of land movements and especially in our case landslides, providing us with valuable insights into the dynamics, monitoring, and assessment of this phenomena.

This work include a general insight about land movement and the main causes of these geological phenomena alongside the types of these movements, we will also talk about remote sensing techniques and how to treat data acquired after detecting the various electromagnetic waves sent back by the landslide zone studied that are emitted either by the satellite or airplane or emitted by the sun providing a detailed examples of each technique to give a better understanding of how can we use them in landslide studying.

Keywords: earth movements, landslides, remote sensing, photo interpretation

Insar, lidar

المخلص

تشمل الانهيارات الأرضية العديد من الظواهر الجيولوجية التي تشمل إزاحة أو تشوه سطح الأرض والذي قد يحدث بسبب عوامل طبيعية مثل النشاط التكتوني وقوى الجاذبية ، فضلاً عن الأسباب البشرية التي تشمل الأنشطة البشرية مثل التعدين واستخراج المياه الجوفية وإنشاء البنية التحتية ، التي تؤدي إلى الهبوط والانهيارات الأرضية والانهيارات الصخرية وأنواع أخرى من الانهيارات الأرضية.

يمكن أن تكون آثار الانهيارات الأرضية كبيرة وواسعة النطاق ويمكن أن تسبب تأثيرات على موارد المياه الجوفية وتعطل شبكات النقل وتشكل مخاطر على سلامة البشر وسبل عيشهم ، وتسبب إصابات وفقدان الأرواح وتشريد المجتمعات.

يمكن أن تتعرض البنية التحتية ، بما في ذلك الطرق والجسور والمباني ، للتدمير أو إتلافها بشدة ، مما يؤدي إلى تعطيل أنظمة النقل وإعاقة جهود الإنقاذ. لذلك ، يعد تقييم ومراقبة الانهيارات الأرضية أمراً ضرورياً للإدارة الفعالة للأراضي وتخفيف المخاطر بتوفير بيانات قيمة لفهم حجم ومعدل وتوزيع الانهيارات الأرضية ، ومن أفضل الوسائل والتقنيات التي تعطينا معلومات دقيقة عن هذه الظواهر الاستشعار عن بعد .

تركز دراستنا بشكل أساسي على تقنيات الاستشعار عن بعد الأكثر فعالية والأكثر شيوعاً (المسح التصويري ، Insar و Lidar) وكيف أصبحت أدوات لا غنى عنها في دراسة الانهيارات الأرضية وخاصة في حالة الانزلاقات الأرضية لدينا . ، مما يوفر لنا معلومات قيمة عن ديناميات ورصد وتقييم هذه الظاهرة.

يحتوي هذا العمل على لمحة عامة عن الانهيارات الأرضية والأسباب الرئيسية لهذه الظواهر الجيولوجية إلى جانب أنواع هذه الحركات ، كما سنتحدث عن تقنيات الاستشعار عن بعد وكيفية معالجة البيانات المكتسبة بعد الكشف عن الموجات الكهرومغناطيسية المختلفة المرسله من منطقة الانهيارات الأرضية التي تتم دراستها والتي تنبعث إما عن طريق الأقمار الصناعية أو الطائرات أو المنبعثة من الشمس مع إعطاء أمثلة مفصلة لكل تقنية لإعطاء فهم أفضل لكيفية استخدام هذه التقنيات في دراسة الانهيارات الأرضية.

الكلمات المفتاحية: حركات الأرض ، والانهيارات الأرضية ، والاستشعار عن بعد ، المسح التصويري، Insar ، Lidar