

Contribution à la Reconnaissance Géologique et Géophysique du Pont Naturel d’Iminifri-Maroc

Said Bouhachm

Amroumoussa Benmoussa

Université Sultan Moulay Slimane/ Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoressources et Environnement

Amina Wafik

Université Cadi Ayad / Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco
Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources

Abdessamad Najine

Raji Abdletife

Université Sultan Moulay Slimane/ Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoressources et Environnement

Doi: [10.19044/esipreprint.10.2023.p459](https://doi.org/10.19044/esipreprint.10.2023.p459)

Approved: 16 October 2023

Posted: 18 October 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Bouhachm S., Benmoussa A., Wafik A., Najine A. & Abdletife R.(2023). *Contribution à la Reconnaissance Géologique et Géophysique du Pont Naturel d’Iminifri-Maroc*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.10.2023.p459>

Resume

Le pont naturel d’Iminifri l’objet de cette étude est situé dans la commune de Tifni. Administrativement, il relève du cercle de Demnate, la Province d’Azilal-Maroc. L’étude géologique et géophysique des différentes formations pour la vérification de la stabilité du pont. L’analyse des résultats et leur interprétation montre que l’ossature du pont naturel d’Iminifri est formée principalement de concrétions travertineuses calcaires. Ce sont des formations quaternaire constituées par des dépôts bio-carbonatés correspondant à d’anciennes émergences liasiques aujourd’hui disparues ou déplacées. La nature variée des formations travertineuses témoignent de leur formation dans des milieux différents : les ruptures de pente, les chenaux à écoulement pérenne, les berges concaves des méandres soumises à l’action prolongée des embruns dégagés par l’agitation de l’eau. Plusieurs types d’encroûtement travertineux ont été identifiés. Les plus abondants sont les

encroûtements plans, les encroûtements de buissons, les encroûtements sur support végétal et les encroûtements sur galets. Toutes les constatations effectuées confirment que les matériaux de la dalle formant l'ossature du pont sont fragilisés et visiblement dégradés. La lente altération et le comportement différé des matériaux soumis à des contraintes agressives sont en général à l'origine de la dégradation des conditions de stabilité. Des facteurs exogènes jouent également un rôle prépondérant comme les infiltrations pluviales et les vibrations engendrées par le trafic routier. Ils peuvent brutalement accélérer un processus de dégradation qui semblait être de plus en plus accentué. Objectif de cette étude à la vérification de la stabilité du pont et à l'analyse des résultats et leur interprétation. La reconnaissance géologique a été complétée par des investigations géophysiques en utilisant des méthodes adaptées aux conditions pétrophysiques des formations géologiques. D'après les études effectuées sur le pont, il est raisonnable de dire que la structure d'Iminifri évolue plus ou moins rapidement vers sa ruine. Ce qui nous pousse à trouver des solutions urgentes pour sauver ce patrimoine géologique du danger d'effondrement.

Mots-clés: Stabilité, Altération, Géophysique, Travertins, Iminifri

Contribution to the Geological and Geophysical Recognition of the Natural Bridge of Iminifri-Morocco

Said Bouhachm

Amroumoussa Benmoussa

Université Sultan Moulay Slimane/ Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoresources et Environnement

Amina Wafik

Université Cadi Ayad / Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco
Laboratoire Dynamique de la Lithosphère et Genèse des Ressources

Abdessamad Najine

Raji Abdetife

Université Sultan Moulay Slimane/ Faculté des Sciences et Techniques,
Béni Mellal, Morocco, Laboratoire Géoresources et Environnement

Abstract

The natural bridge of Iminifri, the subject of this study, is located in the commune of Tifni. Administratively, it falls under the Demnate circle, Azilal Province, Morocco. The geological and geophysical study of the various formations is aimed at verifying the stability of the bridge. The analysis of the results and their interpretation shows that the framework of

the natural bridge of Iminifri is primarily composed of limestone travertine concretions. These are Quaternary formations consisting of biocarbonate deposits corresponding to ancient Liassic emergences that have since disappeared or shifted. The diverse nature of the travertine formations reflects their formation in different environments: slope breaks, perennial flow channels, concave banks of meanders subjected to the prolonged action of spray generated by water agitation. Several types of travertine encrustations have been identified, including flat encrustations, bushy encrustations, encrustations on vegetation, and encrustations on pebbles. All observations confirm that the materials forming the bridge's framework are weakened and visibly degraded. Slow deterioration and delayed behavior of materials subjected to aggressive stresses are generally the cause of deteriorating stability conditions. Exogenous factors also play a significant role, such as rainwater infiltration and vibrations generated by road traffic. They can abruptly accelerate a degradation process that appeared to be increasingly pronounced. The objective of this study is to verify the stability of the bridge and analyze the results and their interpretation. Geological reconnaissance was complemented by geophysical investigations using methods adapted to the petrophysical conditions of the geological formations. Based on the studies conducted on the bridge, it is reasonable to conclude that the structure of Iminifri is evolving towards its ruin, more or less rapidly. This pushes us to urgently find solutions to save this geological heritage from the danger of collapse.

Keywords: Stability, Alteration, Geophysics, Travertines, Iminifri

Introduction

Le pont d'Iminifri est une arche naturelle d'une hauteur de 30 m, formé par le creux d'oued l'Assif. Il est l'un des sites les plus visités de la région de Demnate pour son aspect touristique qui attire les touristes passionnés par les monuments historiques et aussi l'aspect scientifique par son caractère exceptionnel conféré notamment par l'arche créée par les formations travertineuses. Il convient de rappeler également que le site d'Iminifri est classé en vertu de l'arrêté. vizir el du 19 Mars 1949 (18 Joumada I 1368) publié dans le journal officiel n° 1903 du 15 Avril 1949 un site d'intérêt biologique et écologique. Il bénéficie donc d'une protection administrative, qui impose les mesures de sa sauvegarde et de sa préservation. Ce pont naturel est situé à la jonction des deux routes régionales RR 302 et RR 307 qui lient Demnate à respectivement Ouaouizaght au Nord-Est et la route nationale N 10 entre Ouarzazate et Skoura au Sud, à 6 kilomètres à l'Est de la ville de Demnate (Frödin, 2016). Le suivi technique de cet ouvrage exceptionnel par les services chargés de l'équipement et du

transport, avait fait ressortir que l'ouvrage serait le siège de chutes de blocs rocheux, faisant craindre pour sa stabilité et pour la sécurité des biens et des personnes. On se propose dans la présente étude de collecter toutes les données géologiques et géophysiques nécessaires et suffisantes pour évaluer l'état physique des matériaux formant l'ossature de l'arche et préciser les facteurs endogènes et exogènes responsables de l'altération de ces matériaux. Le choix s'est porté sur les méthodes géophysiques de type sondages électrique et sismique réfraction couplée avec les résultats des investigations géologiques régionales et locales.

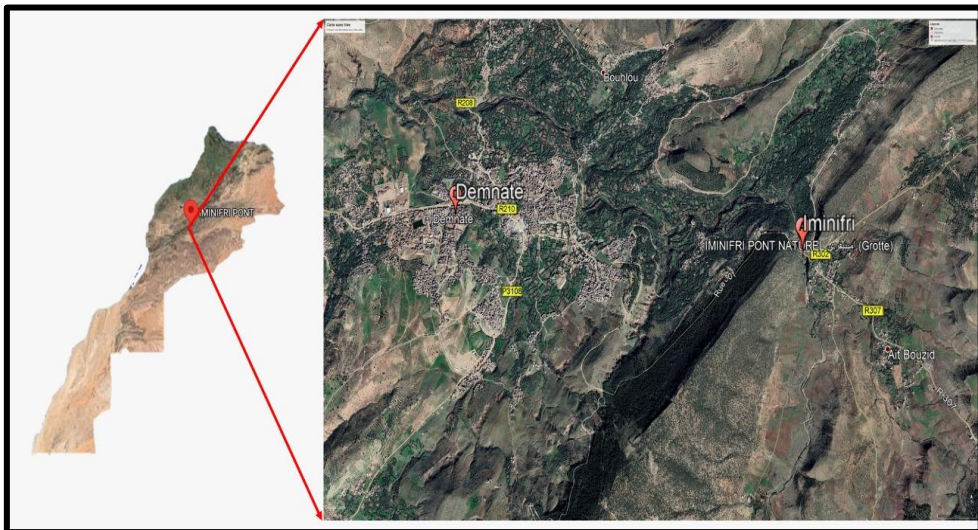


Figure 1. Situation géographique du Pont naturel d'Iminifri

Méthodes

Utilisez la section des méthodes pour décrire les méthodes statistiques utilisées pour l'analyse des données. Utilisez cette section pour décrire les méthodes utilisées, les sujets étudiés ou les matériaux utilisés. Si la recherche est terminée, utilisez le passé.

Résultats

Rapporter avec concision les résultats trouvés. Utilisez les tableaux et les figures selon le cas. Ne répétez pas excessivement les résultats rapportés dans les tableaux et les figures dans le texte. Réservez la discussion des résultats à la section Discussion.

II. Contexte géologique

La synthèse des travaux géologiques effectués, montre que les formations rencontrées dans le site d'Iminifri sont, essentiellement du Secondaire et du Quaternaire (Landel et al., 2016). Les formations du

Primaire et du Tertiaire sont quasiment absentes. Dans ce contexte, la série stratigraphique débute avec le Trias (l'ère secondaire) qui est constitué par des argiles rouges à niveaux salifères, avec des affleurements localisés de basalte doléritique. Ces derniers sont attribués au magmatisme triasique(Sadki, 1996).

- **Le Jurassique** est représenté par le Domérien calcaro-dolomtique du Lias inférieur. Ces formations affleurent dans toute la région et sont affectées par une faille de direction Nord-Est /Sud-Ouest, mettant à nu les formations triasiques sous-jacentes. Le niveau liasique est le siège de plusieurs sources qui résurgent dans la zone d'étude.
- **Le Crétacé** affleure au niveau de certaines zones sur les versants à pentes fortes à l'Est de la zone d'étude. Il est représenté par les formations du Cénomano-Turonien qui relève du Crétacé moyen. Il s'agit de marnes jaunes et blanches avec des bancs de calcaires durs.
- **Le Quaternaire** est représenté par des dépôts alluvionnaires et colluvionnaires qui ont résulté de l'érosion des reliefs de la chaîne montagneuse au Sud.
 - Le Quaternaire ancien comporte des limons roses à concrétions calcaires, à galets ou à cailloutis avec des niveaux de conglomérats fluviaux et parfois lacustres. Il s'agit probablement de dépôts d'âge Amirien.
 - Le Quaternaire moyen est représenté par des limons à cailloutis et à conglomérats caractérisés par des encroûtements calcaires.
 - Le Quaternaire récent est constitué par des limons rouges parfois tirsifiés, et des conglomérats calcaires attribués au Soltanien. Il englobe aussi les matériaux accumulés dans certaines cuvettes et qui proviennent de la décomposition sur place des calcaires et dolomies et du ruissellement périphérique. Ces dépôts sont essentiellement argileux et peuvent atteindre des épaisseurs importantes.
 - Les formations travertineuses sont des formations quaternaires constituées par des dépôts de travertin, correspondant à d'anciennes émergences liasiques, aujourd'hui disparues ou déplacées. Ils peuvent avoir plusieurs faciès : tufeux, gréseux et même conglomératique.

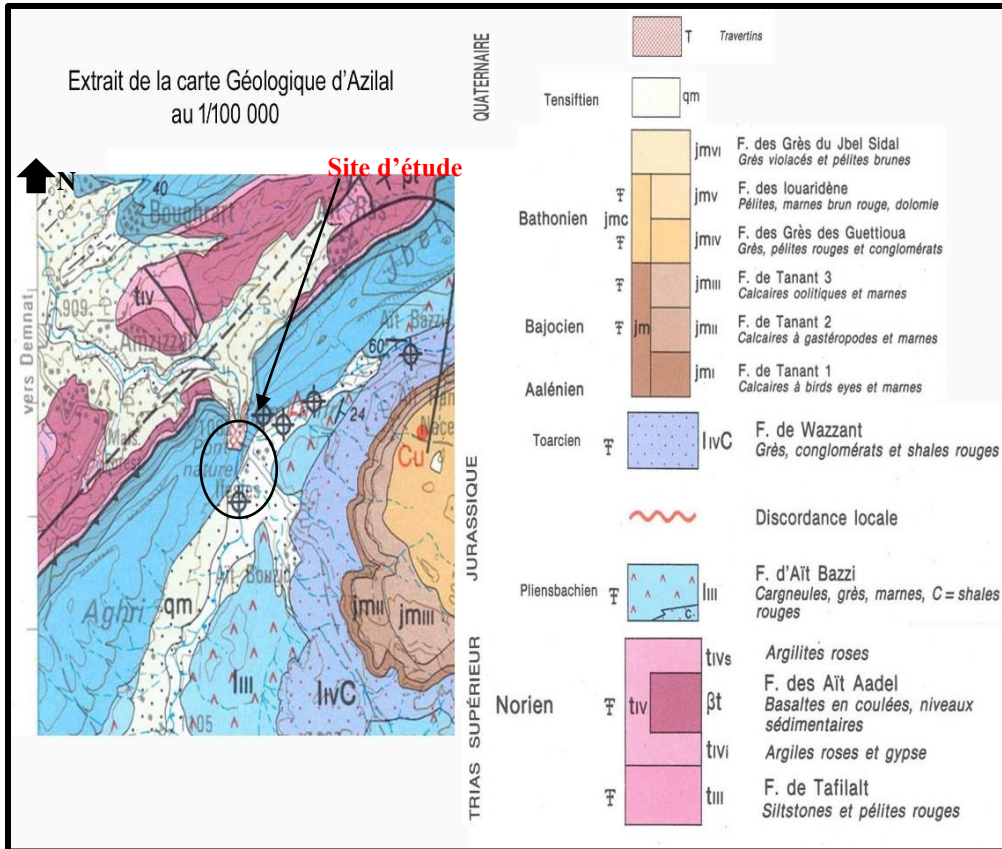


Figure 2. Carte géologique de la région d'Iminifri
(Extrait de la carte géologique du Maroc au 1/50000) Feuille d'Azilal (Jenny, 1988)

❖ Les Travertins du Quaternaire :

Il s'agit de précipitations de carbonates inorganiques qui se forment à partir des eaux des sources froides ou thermales. Ce concrétionnement peut être influencé par la présence de bactéries ou d'algues, souvent incrustées dans la matrice calcitique, sans pour autant qu'elles puissent consister en précipitations organiques, dans la mesure où les réactions métaboliques ne sont pas forcément impliquées dans le processus de précipitation. Ainsi, les travertins sont des sédiments carbonatés continentaux, représentés sous toutes les latitudes, dont la formation peut actuellement être observée et étudiée. L'architecture des dépôts travertineux apparaît extrêmement variée et, bien que les facteurs contrôlant la précipitation de ce type de carbonate soient connus (hydrologie, climat, tectonique), la mise en place et l'évolution diagenétique de ces sédiments, restent complexes. Le rôle direct des organismes est bien visible sur les masses travertineuses qui forment l'ossature de l'arche objet de la présente expertise. Les travertins d'Iminifri forment une plaque subhorizontale au contact du Lias. Ils sont

particulièrement développés aux griffons des principales sources karstiques, ou jalonnent l'emplacement d'anciennes émergences aujourd'hui disparues ou déplacées. Ces dépôts biochimiques constituent des cascades travertineuses. Leurs lieux préférentiels de dépôt étaient là où les eaux subissaient leur première chute. Leur rôle hydrogéologique est non négligeable car ces formations perméables jouent le rôle d'intermédiaire

Dans l'aboutissement de seaux karstiques (Bouchaou et al., 1997), avec les cours principaux. Les travertins sont des dépôts généralement problématiques à cause de leur position géographique isolée dans un encaissant calcaire, de leur morphologie et de leurs faciès distincts. Les méthodes de recherche (levé géomorphologique et analyse pétrographique) mises en œuvre pour déterminer leur origine, ont livré des résultats convergents. Ceux-ci permettent de conclure que les processus génétiques responsables de l'édification de ces travertins sont de nature hydrothermale (Beudet, 1971). D'autres facteurs secondaires comme l'hydrologie de surface, les facteurs biogéniques et physico-chimiques y ont également laissé des traces (Knouz et al., 2016). Les analyses minéralogiques préliminaires réalisées sur des échantillons de travertins prélevés dans différents endroits du site, ont montrées plusieurs phases de recristallisation, bien que macroscopiquement la calcite semblait parfaitement cristallisée. Elle se présente de couleur brun-miel avec une faible porosité. L'explication géomorphologique de ce type de formation est souvent cherchée dans l'existence d'une rupture de pente, dans le profil longitudinal du cours d'eau. Cette rupture provoque une augmentation de la turbulence et, par conséquent, modifie les équilibres physico-chimiques. Ces accumulations présentent une disposition étagée sur les versants, en contrebas des sources karstiques qui leur ont donné naissance. Elles descendent dans le fond même de la vallée, et sont formées de couches de mousses et de tiges incrustées de carbonates. Ces formations offrent une épaisseur variable et une stratification grossière. Elles dessinent une série d'inflexions qui s'adaptent à la topographie de l'ancien versant (Beudet, 1971). Très souvent le développement vertical de ces dépôts donne des édifices travertineux d'allure cunéiforme, dont la plus grande épaisseur est comprise entre 10 et 20 m.

2.1 Contexte climatique

Le climat de la région est de type semi-aride à caractère continental. Les précipitations s'échelonnent irrégulièrement d'Octobre-Novembre à Avril-Mai ; elles sont quasi-inexistantes en Juillet et en Août. Les températures s'élèvent progressivement depuis Avril pour atteindre leur maxima en Juillet et en Août et s'abaissent nettement depuis mi-Septembre jusqu'au minima de Janvier-Février. L'hygrométrie est faible, la moyenne mensuelle varie de **40%** (août) à **70%** (janvier).

III. Méthodes et matériel

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un résistivimètre IRIS Syscal R1et d'un sismographe de type PASI Plus spécialement conçu pour la prospection des terrains superficiels et souterrains et parfaitement adapté aux études géologiques et structurales. La zone d'études avec un surface probablement de 320 m² et un périmètre de 100 m est ainsi couverte en une seule implantation. Les mesures de la résistivité électrique sont réalisées selon les axes X et Y, ainsi que dans la direction à 45° de sorte à couvrir efficacement le volume à reconnaître. Cette méthode d'investigation correspond au "cross-diagonal Survey" tel que défini par (Barker & Loke, 1996). Cette méthode d'investigation géophysique par ondes de surfaces et tomographie électrique ont été mises en œuvre dans une parcelle pont de Iminifri couvrant une superficie de 320 m². La deuxième méthode de sismique réfraction permet quant à elle, la détermination, entre autres, des caractéristiques mécaniques instantanées des sols. La plus fréquemment utilisée, consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes de compression, générées par un système de percussion ou, quand c'est nécessaire, par de l'explosif. Bien qu'on peut saisir également la vitesse de propagation des ondes de cisaillement par un appareillage spécifique, on peut cependant les déduire, à un stade préliminaire, des vitesses des ondes de compression, si le coefficient de Poisson des sols est connu. Les données géophysiques ont été traitées, analysées, puis interprétées par le biais de programmes spéciaux comme IPI2WIN, RES2DINV et Surfer, en tenant compte des informations géologiques disponibles sur le site. Des corrélations ont été effectuées d'une manière systématique entre les données acquises. Ces corrélations ont permis de lever certaines indéterminations et d'affiner les modèles du sous-sol(Deceuster & Kaufmann, 2007).

3-1. Principe de la tomographie électrique :

La tomographie électrique est une méthode géophysique qui permet d'obtenir des images de la résistivité électrique du sous-sol. Elle repose sur une combinaison des deux techniques électriques classiques : traîné et sondage. Ces deux dernières permettent de déterminer la résistivité électrique du sous-sol grâce à un dispositif quadripôle (AMNB) formé de deux électrodes d'injection de courant A et B et deux autres de mesures de la différence de potentiel M et N connectées à un résistivimètre.

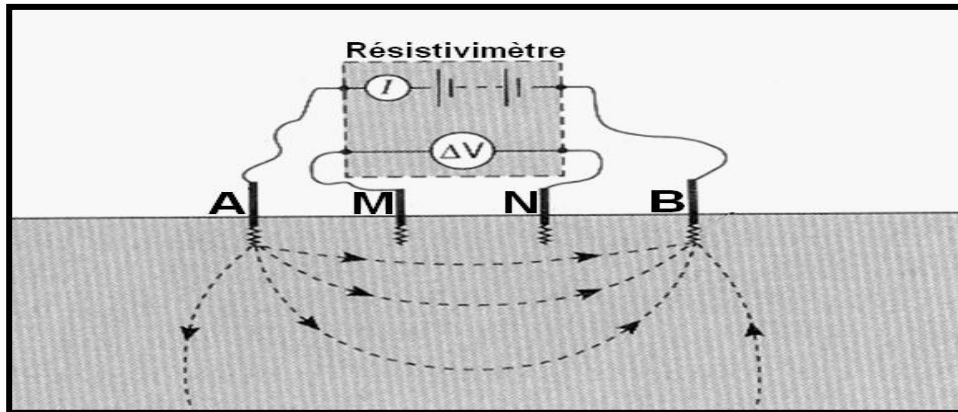


Figure 3. Dispositif quadripôle de mesure de la résistivité électrique

En tomographie électrique, on utilise un dispositif multi-électrodes qui offre la possibilité d'acquérir un grand nombre de mesures. Ceci permet d'avoir une image de la résistivité du sous-sol en particulier dans les régions à géologie complexe caractérisée par des variations latérales qui rendent l'utilisation des sondages électriques inadéquate. La tomographie électrique consiste à réaliser simultanément des profils multiples de résistivité correspondant à des espacements d'électrodes de plus en plus grands. Il existe plusieurs façons de disposer les électrodes. Pour une configuration classique de type Wenner, le schéma général de l'acquisition consiste à augmenter régulièrement le nombre (n) de séparation unitaire (a) des électrodes.

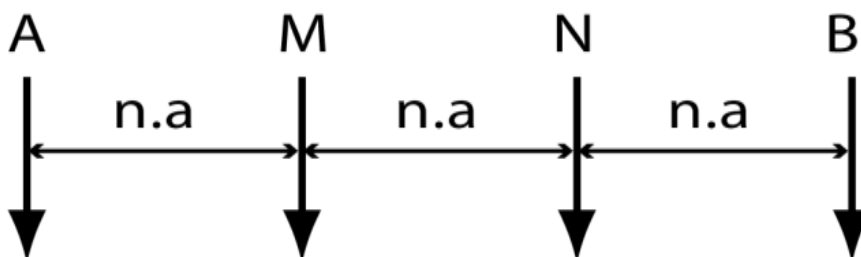


Figure 4. Schéma d'un dispositif Wenner

Les valeurs de la résistivité apparente sont reportées au milieu du dispositif à une profondeur proportionnelle à n . Ceci conduit à l'établissement d'une pseudo-section qui est une simple représentation des données et ne correspond pas à une coupe verticale de la résistivité du sous-sol. L'établissement d'une telle coupe nécessite une inversion des données qui consiste à minimiser, de façon itérative, l'écart entre les pseudo-sections mesurée et calculée à partir d'un modèle initial.

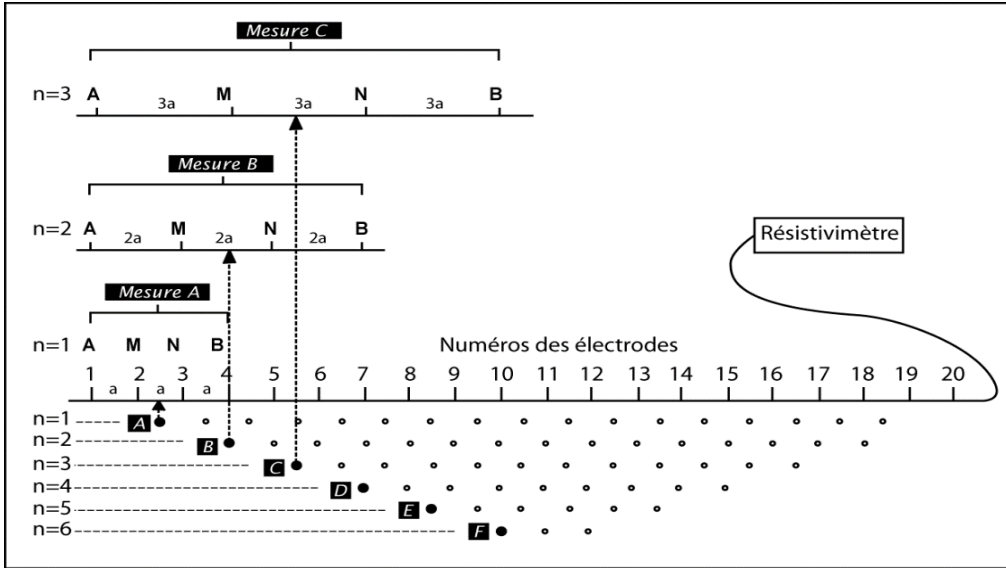


Figure 5. Établissement d'une pseudo-section

Tableau 1. De l'emplacement sondage electrique

N° Sondage électrique	Orientation	Coordonnées du centre	Longueur
I	NNW-SSE	X :350852,73; X:350941,19 Y :126711,21; Y:126643,34	150 m
II	NNW-SSE	X :350857,18; X:350942.50 Y :126720,00; Y:126645,34	150 m
III	ENE-WSW	X :350863,75; X:350961,13 Y :126700,42; Y:126700	150 m
IV	ENE-WSW	X :350871,22; X :350963,59 Y :126692,4; Y :126695,62	150 m



Figure 6. Plan des Mesures géophysiques effectués

3.2 Les caractéristiques de site d'étude



Figure 7. Coiffe de l'arche en travertin sur les calcaires dolomitiques



Figure 8. Aspect des travertins sus-jacents au calcaire dolomitique

La nature variée des formations travertineuses témoigne de leur formation dans des milieux différents : les ruptures de pente, les chenaux à écoulement pérenne, les berges concaves des méandres soumises à l'action prolongée des embruns provoqués par l'agitation de l'eau, les sources et les suintements. Plusieurs types d'encroûtement travertineux ont été identifiés. Les plus abondants sont les encroûtements plans, les encroûtements de buissons, les encroûtements sur support végétal et les encroûtements sur galets. La précipitation de ces encroûtements se produit au cours des saisons sèches, combinée avec la saturation en carbonate de calcium dissout et le développement de la végétation (Duponcheel et al., 2009).

Dans cette zone, quelques caractéristiques permettent de distinguer au moins trois ou quatre générations de travertins dans une esquisse relative de chronologie. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- ❖ Présence de plusieurs niveaux d'accumulation fluviale avec des éléments détritiques ;
- ❖ Différentes générations de colluvions ;
- ❖ Stades de diagénèse et de karstification plus ou moins avancés offerts par les divers ensembles travertineux ;
- ❖ Morphologie dégradée ou bien conservée ;
- ❖ Position géomorphologique.

Deux types de mesures d'angle sont nécessaires pour caractériser l'orientation des structures observées sur le terrain (stratification, fractures, diaclases etc.). Seul le calcaire dolomitique comporte des diaclases et des joints, au contraire du massif de travertin qui en est exempt de par sa nature et sa texture.



Figure 9. Boussole de mesure des pentages

Le tableau suivant indique les pentages des stratifications du massif.

Tableau 2. Direction et pendage des stratifications

NUM	SIS	Lat. (°)	Long. (°)	Direction	Pendage
1	<i>AVAL</i>	31,7251	-6,9726	55 (NE)	25
2		31,7252	-6,9724	60 (NE)	35
3		31,7254	-6,9723	70 (NE)	45
4		31,72535	-6,9724	60 (NE)	36
5		31,72525	-6,9723	60 (NE)	25
6		31,72517	-6,97219	60 (NE)	28
7		31,7253	-6,9723	60 (NE)	41
8		31,72537	-6,97217	56 (NE)	41
9		31,7253	-6,9721	62 (NE)	41
10	<i>AMONT</i>	31,723	-6,9714	30 (NE)	32



a. Pendage rive gauche,
à l'amont de l'arche (Sud)



b. Effondrement de gros
blocs dans le lit de l'oued

Figure 10. Pendage NE vers le lit de l'oued sur sa rive gauche (vue vers le Sud)

L'effondrement des gros blocs dans le lit de l'oued, se présente dans des conditions identiques, à l'aval de l'arche vers le Nord. La photo b (figure 11) en donne un aperçu. On y aperçoit en arrière-plan, le pendage défavorable vers le lit de l'oued. La situation stratigraphique est donc similaire à celle qui règne à l'amont de l'arche vers le Sud, entraînant les mêmes effondrements de gros blocs de calcaire dolomitique (Jenny, 1988).



Figure 11. a. Face avale (Nord de l'arche vue vers le Sud) **b.** Gros bloc dans le lit de l'oued, au Nord de l'arche vers l'aval

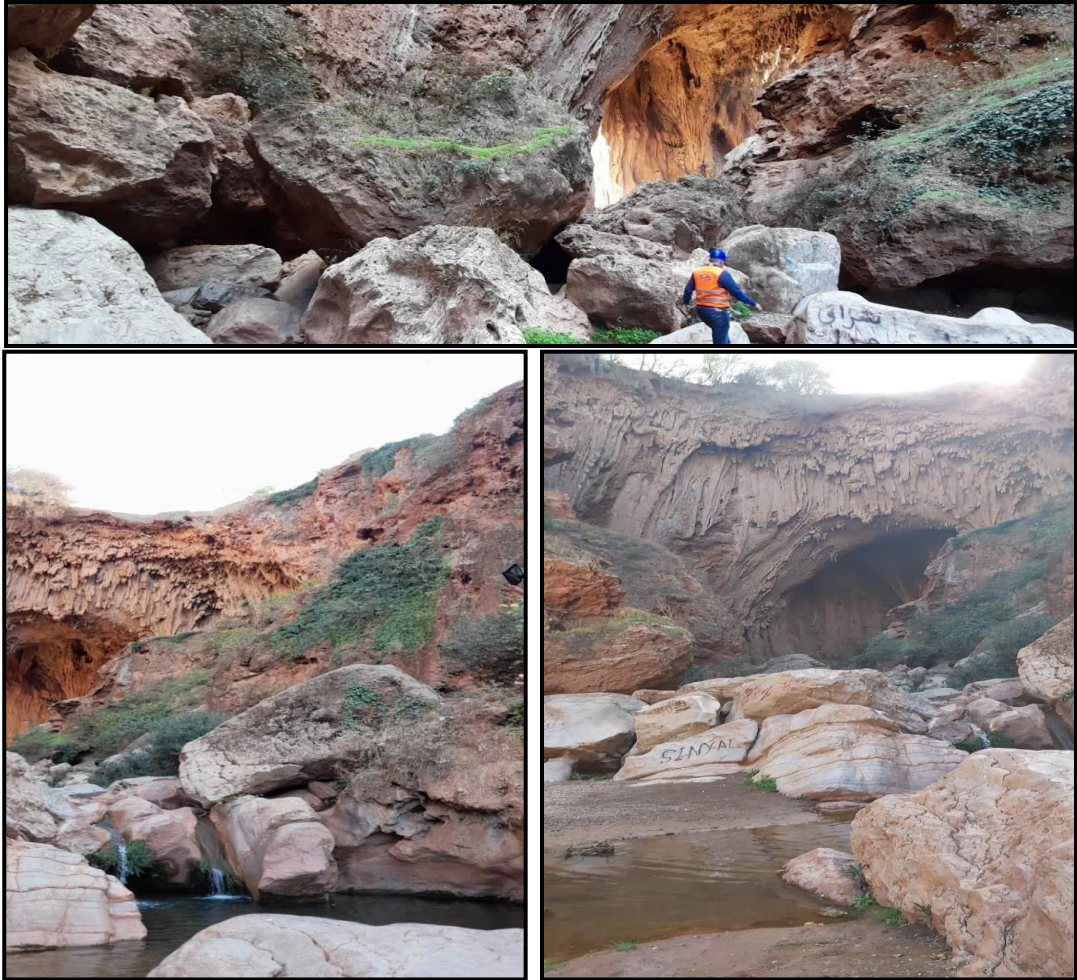
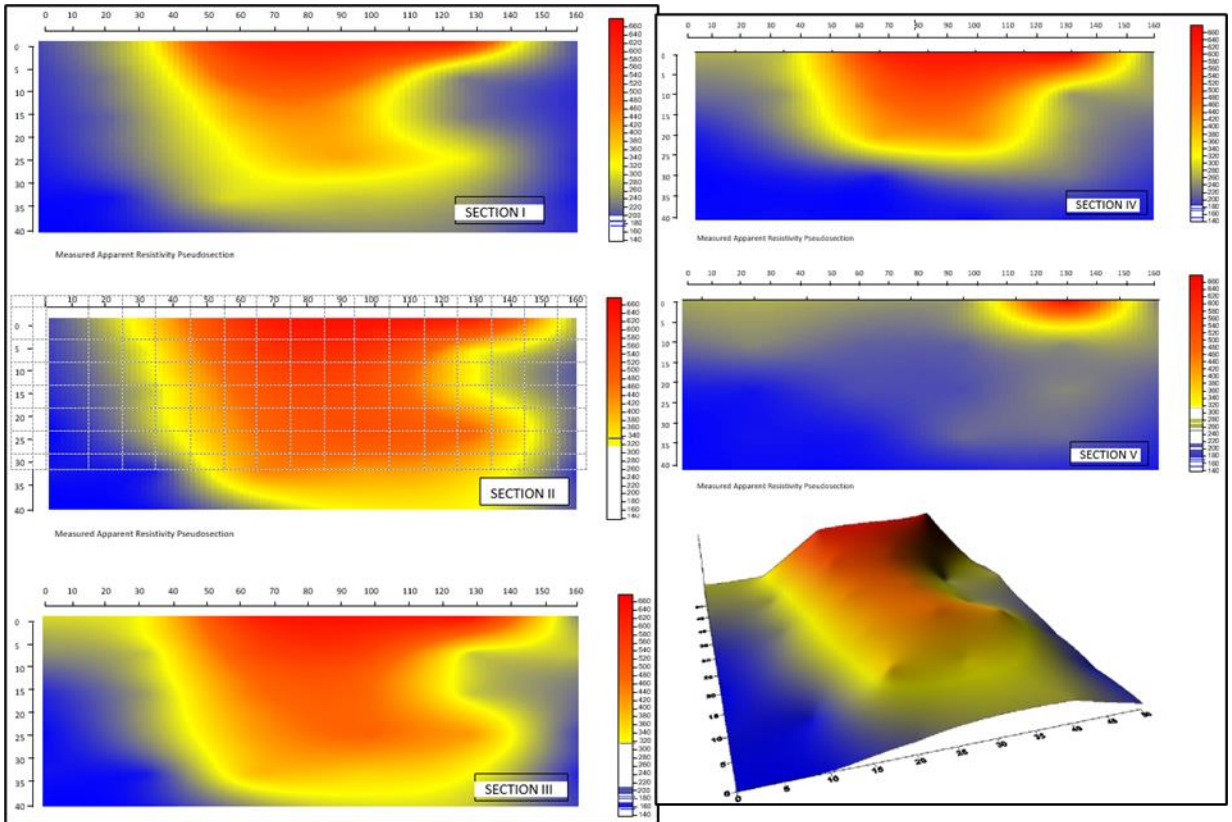


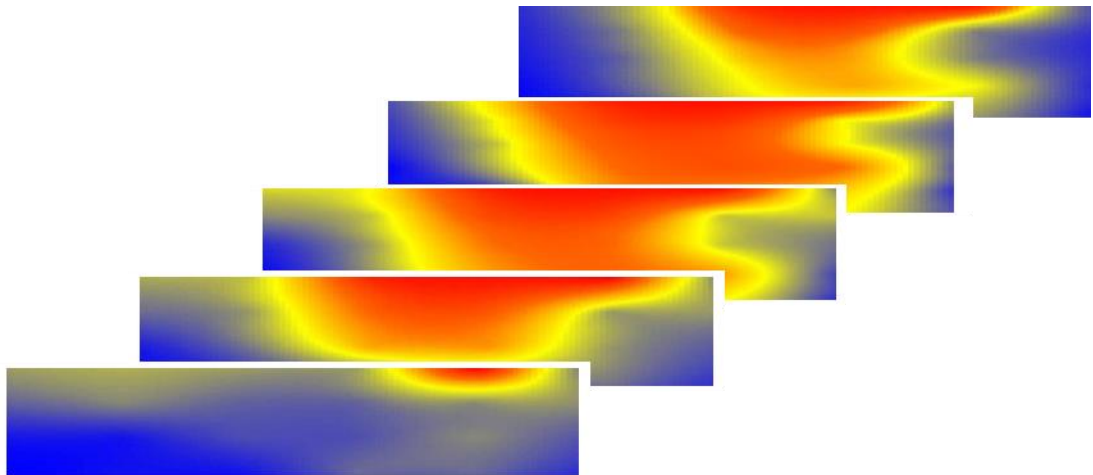
Figure 12. Photos illustrant les éboulements et chutes de blocs à partir de l'arche

III. Résultats

Les résultats obtenus sur chaque traînée de mesure, sont représentés (figure 13). Chaque profil comporte l'échelle chromatique des résistivités en Ωm , à sa droite. Le dernier graphique est une représentation 3D des résistivités :



a. Répartition des résistivités par profil



b. Mise en parallèle des sections de résistivité
Figure 13. Profils géo-électriques

Les mesures des profils géo-électriques ont montré que le massif rocheux est caractérisé par une résistivité comprise entre 240 et 340 Ωm , sur toute la zone D'iminifri. Toutefois, la cartographie des résistivités (Figure 14), montre que celles-ci se présentent dans un couloir étroit d'orientation SW-NE, passant par le Sud-Est de l'arche de façon homogène (Loke & Barker, 1996), de 300 à 340 Ωm . Cette résistivité croît de façon très sensible de 340 à plus de 600 Ωm au NE, vers l'aval de l'oued, loin du site de l'arche. Sur l'axe-même de l'arche, d'orientation Sud-Nord, la résistivité décroît progressivement du Sud vers le Nord, de 320 à 240 Ωm .

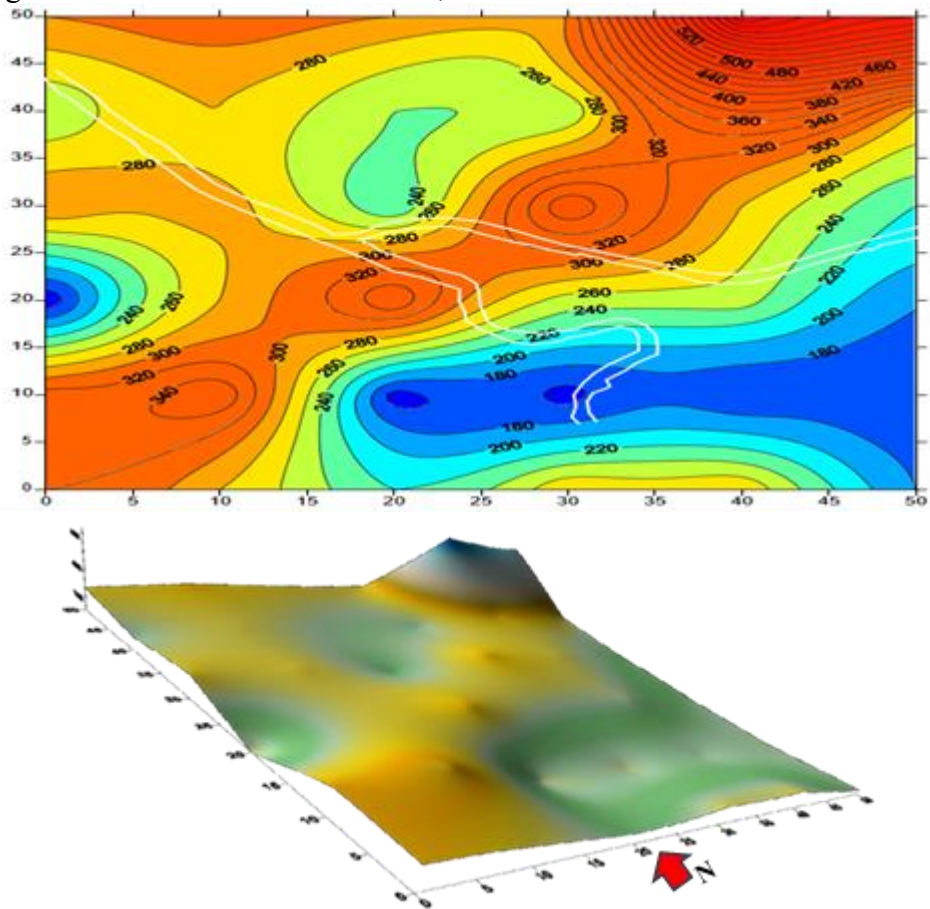


Figure 14. Cartographie et modèle 3D de la résistivité autour du site

On peut conclure sur la base de la prospection géo-électrique que :

- L'épaisseur de la dalle Travertineuse varie entre 2 m environ au droit de l'arche et 15 m vers le Nord-Est, au-delà de la route RR 302, dans la limite de la zone prospectée par la méthode géo-électrique (Figure 15).

- Plusieurs anomalies électriquement résistantes, sont présentes sur le site. On peut les attribuer à des poches encaissées dans la masse travertineuse, probablement engendrées par des faciès carbonatés, saturés par les eaux d'infiltration.
- Le sol de fondation serait hétérogène, avec présence de faciès tantôt conducteurs, tantôt résistants, qui s'alterneraient avec des tufs et des calcaires travertineux interstratifiés, probablement altérés. Cette alternance fait selon des épaisseurs variables. Il s'agirait donc de matériaux hétérogènes et composites, renfermant divers constituants de différentes résistivités (Paysage, 2009).

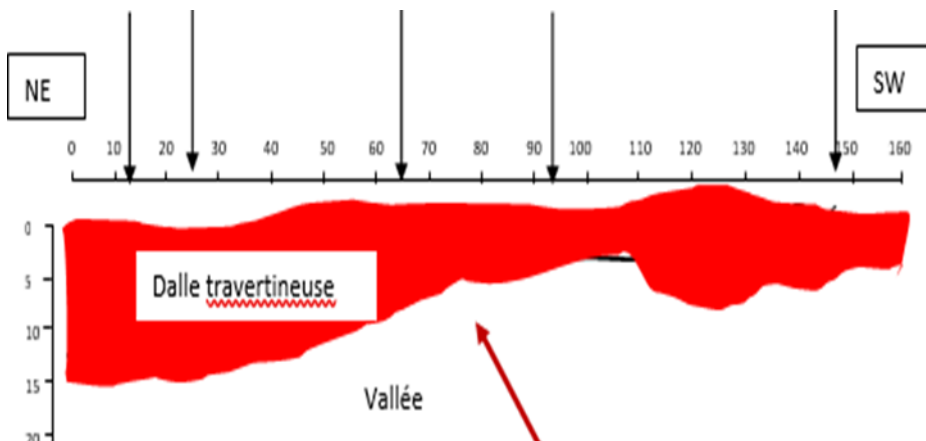


Figure 15. Une coupe lithologique NE-SW

Résultats des mesures de sismique réfraction :

La campagne de de sismique réfraction a concerné trois différents profils (Figure 16). Ils ont été réalisés tant sur la plateforme supérieure de l'arche, que dans la vallée de l'Assif Tidsi.



Figure 16. Installation des géophones reliés au sismographe

Les profils sismiques, établis après l'interprétation des mesures, sont comme indiqué sur les graphiques chromatique (figure17) . Les vitesses y sont exprimées en mètres par seconde.

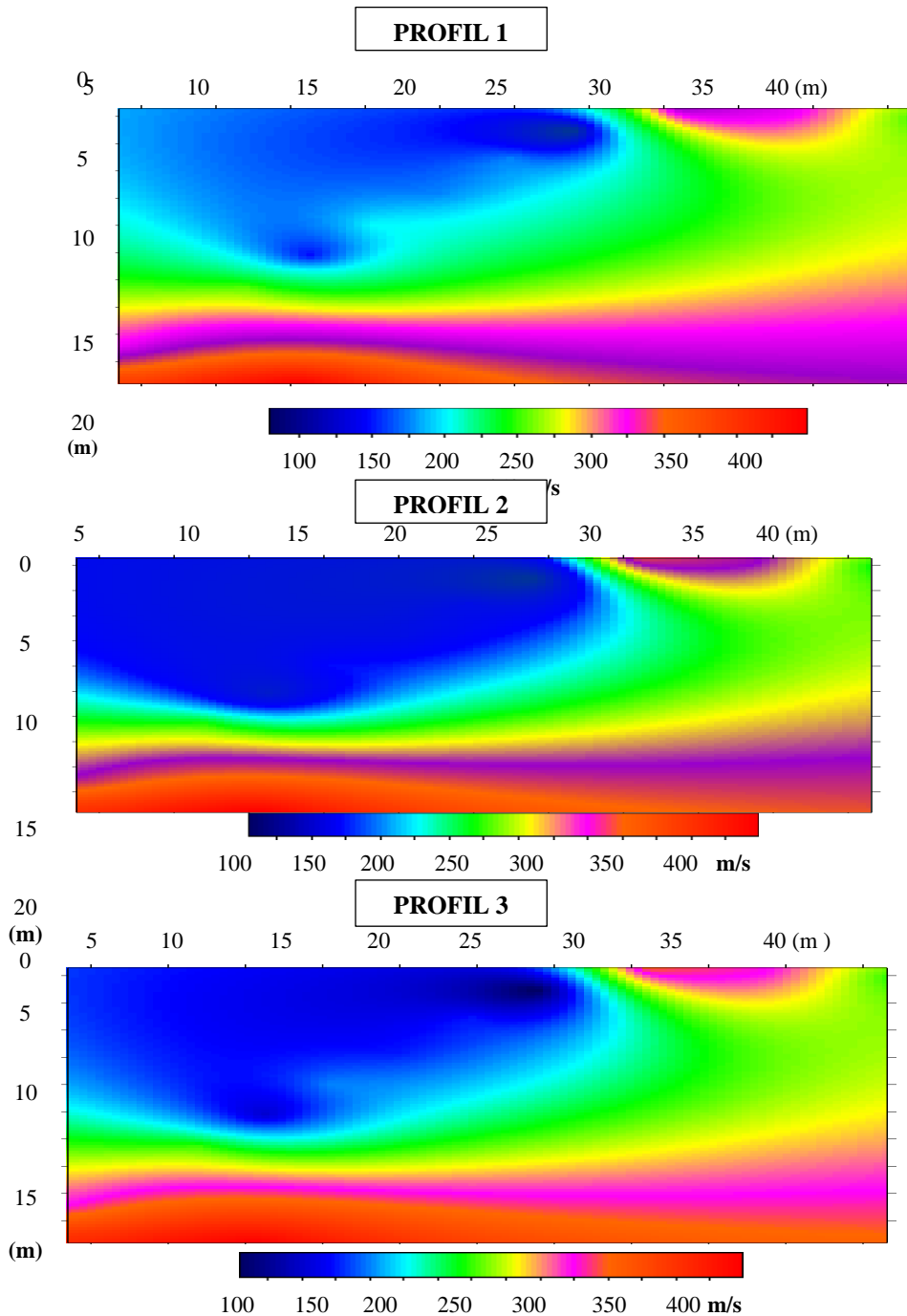


Figure 14 : Profils sismiques

Le tableau 3 synthétise l'ensemble des résultats des mesures de sismique réfraction. Il fournit également la vitesse globale équivalente de toute la couche superficielle de 13 m d'épaisseur.

Tableau 3. Récapitulatif des résultats

PROFIL	Profondeurs (m)	Vitesses (m/s)	Epaisseur (m)	Vitesse Equivalente (m/s) ^(*)
1	0 – 1,25	130	1,25	225,315
	1,25 – 5,99	229	4,74	
	5,99 – 13,99	256	8,00	
	> 13,99	400	-	
2	0 – 0,50	129	0,50	280,381
	0,50 – 4,88	183	4,38	
	4,88 – 13,26	263	8,38	
	> 13,26	390	-	
3	0 – 0,74	182	0,74	214,400
	8,74 – 6,32	189	5,58	
	6,32 – 17,55	247	11,23	
	> 17,55	452	-	

On déduit de la campagne des profils sismique-réfraction, les grandeurs caractéristiques des roches qui constituent le site d'Iminifri.

❖ Vitesse V_p Retenue

L'empreinte des véhicules formant les convois routiers normalisés, est limitée. Elle varie de 0,25 m (B_c) à 1,00 m (M_c 120). Le bulbe des contraintes résultant de leur circulation, ne pénètre pas dans le sol de plus de 2m, sauf cas exceptionnel (convoi E). Considérant ce qui précède, il convient de retenir sur une base sécuritaire, la vitesse V_p de la couche superficielle, dont la valeur minimale varie entre 130 et 183 m/s. Nous avons pris pour les calculs de stabilité, relativement à la moyenne des minima V_m , la vitesse V_p suivante :

$$\text{équation N}^\circ 1 : V_p = V_m/1,10 = 150 \text{ m/s}^2$$

❖ Grandeurs Dérivées

* Vitesses V_s des ondes de cisaillement

Le rapport de la vitesse V_p des ondes de compression à la vitesse V_s des ondes de cisaillement, est un coefficient α qui dépend du coefficient ν de Poisson. Sachant que ce coefficient est généralement compris entre 0,3 et 0,38 pour les roches calcaires, nous avons retenu pour les roches du site d'Iminifri, à ce stade de l'étude, $\nu = 1/3$. Pour cette valeur de ν , le rapport des vitesses

$$V_p/V_s \text{ est } \alpha = 2. \text{ Soit } V_s = V_p/2 = 75 \text{ m/s. : équation N}^\circ 2$$

* Module de déformation instantané **E_i**

L'expression exacte du module de déformation instantané, fait intervenir la densité γ de la roche, son coefficient de Poisson ν et la vitesse **V_p** de propagation des ondes de compression. Tous calculs faits sur la base de $\gamma = 19,6 \text{ kN/m}^3$, $\nu = 1/3$ et **V_p** = 150 m/s, on obtient la valeur de **E_i** = 25,841MPa.

* Module de déformation statique **E_s**

Le module de déformation statique **E_s** est obtenu à partir du module de déformation instantané **E_i**, en fonction du coefficient de fluage à long terme de la roche calcaire. Tous calculs faits le coefficient obtenu est **E_i/E_s** = 2,461. Ainsi **E_s** = 10,50 MPa.

* Fréquence propre **f₀** de l'arche d'Iminifri

La fréquence propre de vibration d'une épaisseur **H** d'un massif rocheux, est liée à la vitesse des ondes de cisaillement **V_s** par la relation $f = V_s/4H$. On obtient ainsi les fréquences suivantes autour de l'arche.

Face	Position	Fréquence f₀ (Hz)
SW (Amont)	Appuis	0,740
	Clé	6,602
N (Aval)	Appuis	0,464
	Clé	0,768

Le travertin repose sur un massif de calcaire dolomitique appartenant au Jurassique inférieur (Secondaire). Ce massif se présente en bancs dont le pendage est incliné vers le cours d'Assif Tislit. Le lit que ce dernier a creusé dans le calcaire dolomitique, a provoqué en raison du pendage défavorable de ce dernier, la chute de nombreux blocs rocheux qui jonchent le lit de l'oued, là où ce massif affleure.

Conclusion

Les deux phénomènes vibratoires qui sollicitent l'arche sont les séismes d'une part et des tirs de mine dans trois carrières à 11 km environ au Sud de l'arche. Le phénomène hydraulique revêt deux aspects : les précipitations pluvieuses d'une part et les infiltrations qui proviennent de la séguia, par l'irrigation des terres agricole d'autre part (Cayla & Duval-Massaloux, 2013). Les pluies ont une action érosive sur le travertin par percussion et par ruissellement. Les infiltrations lentes et continues en provenance de la séguia ont une action régénératrice du travertin, selon la réaction chimique de précipitation du CaCO_3 . De ce point de vue elles ont un effet réparateur naturel de l'érosion du travertin. L'arche peut être considérée actuellement stable, sous l'effet du trafic routier. Donc toutes les études effectuées sur le pont, il est raisonnable de dire que la structure d'Iminifri

évolue plus ou moins rapidement vers sa destruction. Ce qui nous pousse à chercher des solutions pour sauver ce patrimoine géologique du risque d'effondrement.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Aïtomar, T., Taïbi, A. N., Hannani, M. El, Khalki, Y. El, Aïtomar, T., Taïbi, A. N., Hannani, M. El, El, Y., & Nouvelle, K. (2020). *Nouvelle méthodologie d ' inventaire et d ' évaluation des géomorphosites dans le contexte du géoparc M ' goun (Maroc)* To cite this version : HAL Id : hal-02515903.
2. Al-Fares, W., Bakalowicz, M., Albouy, Y., Vouillamoz, J.-M., Dukhan, M., Toe, G., & Guérin, R. (2001). Contribution de la géophysique à l ' étude d ' un aquifère karstique - Exemple : le site karstique du Lamalou. *3ème Colloque GEOFCAN, 25-26 Septembre 2001, Orléans, 25–26.*
3. Beaudet, G. (1971). Le Quaternaire marocain : état des études. *Revue de Géographie Du Maroc, 20*, 3–56.
4. Bouchaou, L., Chauve, P., Mudry, J., Mania, J., & Hsissou, Y. (1997). Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride: Cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). *Journal of African Earth Sciences, 25(2)*, 225–236. [https://doi.org/10.1016/S0899-5362\(97\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0899-5362(97)00100-0).
5. Cayla, N., & Duval-Massaloux, M. (2013). Le géotourisme : patrimoines, pratiques, acteurs et perspectives marocaines. *Collection EDYTEM. Cahiers de Géographie, 14(1)*, 101–116. <https://doi.org/10.3406/edyte.2013.1228>.
6. Deceuster, J., & Kaufmann, O. (2007). *Application des tomographies en résistivité électrique 3D à la reconnaissance de zones karstifiées , Belgique.* Actes du 4ème colloque GEOFCAN, Paris, France, 137-142.
7. Duponcheel, M.A., Georgeon A. Ragot C. (2009). Diagnostic et Perspectives Pont naturel d ' Iminifri. Institut National d'Horticulture et de Paysage. Rapport inédit, Ingénierie des Territoires. 94 p.

8. Frödin J. (1922). Géographie Physique de l'Ouest du Maroc. Geografiska Annaler, Vol. 4 pp. 58-76. Wiley on behalf of Swedish Society for Anthropology and Geography eds. Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/519735>.
9. El Khammari, K., Najine, A., Jaffal, M., Aïfa, T., Himi, M., Vásquez, D., Casas, A., & Andrieux, P. (2007). Imagerie combinée géoélectrique–radar géologique des cavités souterraines de la ville de Zaouit Ech Cheikh (Maroc). *Comptes Rendus Geoscience*, 339(7), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.06.001>.
10. Elaloui, A., Marrakchi, C., Fekri, A., Maimouni, S., & Aradi, M. (2015). Mise En Place D’Un Modèle Qualitatif Pour La Cartographie Des Zones À Risque D’Érosion Hydrique Dans La Chaîne Atlasique: Cas Du Bassin Versant De La Tessaoute Amont. (Haut Atlas Central, Maroc). *European Scientific Journal*, 11(29), 1857–7881.
11. Jenny, J. (1988). Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc au 1/100.000 (feuille d’Azilal, Haut Atlas central). Notes et Mem. Serv. géol. Rabat, 339 bis, 104 pp.
12. Knouz, N., Boudhar, A., Mostafa, E., & Aghzaf, B. (2016). Étude de La Vulnérabilité Des Nappes à La Pollution En Zones Semi-Arides: Cas de La Nappe Phréatique Des Béni Amir Au Maroc. *Journal of Mediterranean Geography. Méditerranée* [Online], Ecosystems, Hydrology, document; 6 : 1-17. Disponible en ligne : <https://journals.openedition.org/mediterranee/7853>.
13. Landel, P., Senil, N., Mao, P., Sur, E., Poles, L. E. S., Du, D. E., Diagnostic, P., Des, S., & Patrimoniales, R. (2016). *ETUDE SUR LES POLES D ’ ECONOMIE DU PATRIMOINE DIAGNOSTIC STRATEGIQUE DES RESSOURCES PATRIMONIALES DE LA REGION* Pierre-Antoine Landel , Nicolas Senil , Pascal Mao To cite this version : HAL Id : halshs-01387639.
14. Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44(1), 131–152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
15. Sadki, D. (1996). Le Haut-Atlas central (Maroc). Stratigraphie et paléontologie du Lias supérieur et du Dogger inférieur –dynamique des bassins et des peuplements. *Doctorat Université de Lyon, France*. 142: 245 p. *Geoly_0750-6635_1996_Mon_142_1_1789*. 3–245.
16. Zaitouni M., & Ibouh H. (2016). *Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau, du sol et du couvert végétal dans la plaine du Tadla entre 1984 et 2015*. September. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19180.16000>.