

INFLUENCE DU MODE DE RÉPARATION DES FISSURES PAR LES MATÉRIEAUX COMPOSITES SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS ORDINAIRE, FIBRÉ, HAUTE PERFORMANCE ET HAUTE PERFORMANCE FIBRÉ

NOUVEL INDICE DE PRIORITÉ DE FINANCEMENT DES ROUTES (IPFR) POUR LA SÉLECTION DES PROJETS ROUTIERS DE « HAUTE PRIORITÉ » DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT EN UTILISANT L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES



RÉTRO ANALYSE DE L'INSTABILITÉ DU VERSANT « PETIT D15 » SITUÉ SUR L'AUTOROUTE MARRAKECH-AGADIR AU MAROC





DES DÉCHETS À LA RICHESSE

Les avantages de l'économie circulaire

Peter Lacy et Jakob Rutqvist

« Notre civilisation de consommation, avec des produits à utilisation de plus en plus courte, dont nous nous désintéressons alors qu'ils sont encore parfaitement fonctionnels, et des déchets collectivement coûteux à éliminer, entraîne un immense gaspillage. Or l'économie, et particulièrement l'économie libérale, s'enorgueillit de générer de l'efficacité et de supprimer le gaspillage. Les auteurs de ce livre sont donc bien fondés de le placer sous l'égide de l'économie bien comprise, et non d'un idéalisme rêveur. »

— **Bertrand Collomb, de l'Institut – Président d'honneur de Lafarge**

« La pertinence et l'importance des solutions de l'économie circulaire sont maintenant largement reconnues. L'économie circulaire est un modèle extrêmement puissant pour faire face à beaucoup de challenges actuels en termes d'emploi, de croissance, d'efficacité des ressources, et pour la lutte contre les changements climatiques. Certaines entreprises ont franchi le

pas de la circularité, comme Suez Environnement, un précurseur et un acteur majeur dans ce domaine, notamment dans le recyclage et la récupération. Il faut désormais que toutes les entreprises se lancent dans cette transformation. C'est en cela que ce livre peut faire la différence. »

— **Jean-Louis Chaussade, PDG de Suez Environnement**

« Économie circulaire, responsabilité circulaire, profit circulaire. Si simple, et pourtant si puissant. Ce livre est une contribution pratique destinée à faire évoluer vos modèles économiques dans un monde où les ressources sont de plus en plus limitées. Il est facile d'entrevoir qu'à l'heure de la transparence, les citoyens du monde entier vont avoir ce type d'exigence vis-à-vis des entreprises. Il est temps de passer à autre chose. »

— **Paul Polman, PDG d'Unilever**

Peter Lacy est « Global Managing Director » des services de développement durable à Accenture et membre de l'équipe dirigeante d'Accenture Strategy. Il est conseiller auprès des Nations unies et du Forum économique mondial, auprès des gouvernements, des PDG, et des conseils d'administration dans le monde entier...

Jakob Rutqvist est un dirigeant d'Accenture's Strategy and Sustainability practice et fait partie de l'équipe dirigeante de sa branche nordique. Avant de rejoindre Accenture, il était lobbyiste dans les domaines de l'innovation, du climat et de l'énergie, et ...

BON DE COMMANDE À RETOURNER AUX ÉDITIONS ESKA

Contact : adv@eska.fr - 12, rue du Quatre Septembre - 75002 Paris - Tél. : 01 42 86 55 75 - Fax : 01 42 60 45 35 - www.eska.fr

Je désire recevoir l'ouvrage « **LES DÉCHETS À LA RICHESSE** » de Peter Lacy et Jakob Rutqvist - Code EAN 978-2-8224-0429-7

Prix : 30,00 € + 1,00 € de frais de port, soit € x exemplaire(s) = €

Je joins mon règlement à l'ordre des Éditions ESKA par :

- Carte Bleue Visa n°..... Date d'expiration : Signature obligatoire
- Chèque bancaire
- Virement bancaire au compte des Éditions ESKA
IBAN : FR76 3000 4008 0400 0101 3985 836 BIC BNPAFRPPCE

Société / Nom, prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Tél. : Fax : E-mail :

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Serge KEBABTCHIEFF

Rédaction

Rédacteur en chef

François Buyle-Bodin,
université de Lille

Représentant l'Union des Associations Françaises de Génie Civil



Jean-Marc Tanis (EGIS), Président

Représentant l'Association Française de Génie Civil AFGC



Bruno Godart (IFSTTAR), Président du CA
Patrick Guiraud (Cimbéton),
Président du Comité des Affaires Générales
Thierry Kretz (IFSTTAR),
Président du Comité Scientifique et Technique

Représentant l'Association Universitaire de Génie Civil AUGC



Olivier Plé,
Président du CA ASSOCIATION UNIVERSITAIRE DE GÉNIE CIVIL
Gilles Escadeillas, Vice-Président du CA

Représentant l'Ifsttar

Jean-Luc Clément, direction scientifique

Représentant l'Union des Ingénieurs et Scientifiques Francophones UISF

Élie Absi, président

Relations internationales

Zoubeir Lafhaj, École Centrale de Lille

ABONNEMENT:

Editions ESKA

<http://www.eska.fr>

12, rue du Quatre-Septembre - 75002 PARIS
Tél. : 01 42 86 55 65 - Fax : 01 42 60 45 35

FABRICATION: AGPA Editions

4, rue Camélinat - 42000 Saint-Etienne
Tél. : 04 77 43 26 70 - Fax : 04 77 41 85 04
E-mail : agpaedit@wanadoo.fr

PUBLICITÉ - à la rédaction

IMPRESSION :

Imprimé en France

sommaire

éditorial

Prof. François BUYLE-BODIN

* * * *

<p>■ Nouvel Indice de Priorité de Financement des Routes (IPFR) pour la sélection des projets routiers de « haute priorité » dans les pays en développement en utilisant l'analyse en composantes principales.....</p> <p><i>New Road Funding Priority Index (RFPI) for the selection of "high priority" road projects in developing countries using principal component analysis</i></p> <p><i>Emmanuel KOSSÈ KABA, Gabriel J. ASSAF</i></p>	7
<p>■ Rétro analyse de l'instabilité du versant « Petit D15 » situé sur l'autoroute Marrakech – Agadir au Maroc.....</p> <p><i>Retro analysis of the instability of the "Petit D15" slope located on the Marrakech - Agadir highway in Morocco</i></p> <p><i>Hakim AHMARI, Gabriel J. ASSAF</i></p>	30
<p>■ Influence du mode de réparation des fissures par les matériaux composites sur les performances des bétons ordinaire, fibré, haute performance et haute performance fibré.....</p> <p><i>Influence of the mode of repair of cracks by composite materials on the performances of ordinary, fibrous, high-performance and high-performance fibrous concrete</i></p> <p><i>Bachir REDJEL, Ghania MIROUZI, Khaoula AZZOUZ, Bachir KEBAILI</i></p>	49
<p>abstracts — résumés.....</p>	4
<p>communiqués et colloques.....</p>	55
<p>bulletin d'abonnement.....</p>	2
<p>recommandations aux auteurs.....</p>	6



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner aux Éditions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. 01 42 86 55 65 – Fax 01 42 60 45 35

Nom

Raison sociale.....

Adresse.....

Code postal Ville Pays

Je m'abonne pour l'année 2018 (6 numéros/an) à la revue « *Annales du BTP* » :

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE individuel (TTC) : 274 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER individuel (HT) : 333 € |
| <input type="checkbox"/> Tarif FRANCE institution (TTC) : 344 € | <input type="checkbox"/> Tarif ETRANGER institution (HT) : 396 € |

Je joins : Un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA

- Un virement bancaire aux Editions ESKA -
BNP Paris - Champs Elysées - 30004-00804 - Compte 000101399.56

* 3/2018

LISTE DES ANNONCEURS

Annonces de colloques : AFCG, GC 2019, 20 et 21 mars 2019, Cachan, p. 55

Chères lectrices, chers lecteurs,

Nous progressons dans le renouvellement de notre comité éditorial, qui s'accompagnera du retour des rubriques, sous une forme différente de celle d'il y a une dizaine d'années.

On retrouvera les rubriques techniques sur les matériaux, les structures et les procédés de construction. S'y ajouteront des rubriques internationales portant sur les innovations dans le BTP dans différents pays essentiellement francophones, des rubriques à visée pédagogique destinées aux étudiants, des présentations de réalisations remarquables, et des retirages d'articles des Annales de l'ITBTP sélectionnés par un comité particulier.

Cette évolution s'inscrit sur la fin 2018 et début 2019.

Dans ce numéro transitoire vous trouverez trois articles, dont deux portent sur les routes, coécrits par le professeur Assaf de Montréal, qui a accepté de participer à notre comité éditorial.

Depuis 25 ans, le professeur Gabriel J. Assaf enseigne, conseille et encadre des travaux qui portent sur la conception, l'évaluation, la réhabilitation et la gestion des chaussées à l'École de Technologie Supérieure de Montréal. Les articles présentés dans les Annales visent à maximiser l'effet des investissements routiers en privilégiant la rentabilité économique et l'entretien.

Bonne lecture,

Le rédacteur en chef.
Prof. François BUYLE-BODIN

NOUVEL INDICE DE PRIORITÉ DE FINANCEMENT DES ROUTES (IPFR) POUR LA SÉLECTION DES PROJETS ROUTIERS DE « HAUTE PRIORITÉ » DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT EN UTILISANT L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

EMMANUEL KOSSÈ KABA, GABRIEL J. ASSAF

Cet article présente un nouvel indice de priorité de financement des routes (IPFR) prenant en compte simultanément les dimensions techniques, économiques, sociales et environnementales dans la perspective d'aider les décideurs dans leurs processus de sélection des projets de construction et de préservation des routes de *haute priorité*. L'IPFR est un outil d'aide à la décision qui a permis l'évaluation de 50 projets routiers, dont 25 projets de construction des routes non revêtues et 25 projets de préservation de routes revêtues existantes. Les étapes de construction de l'IPFR sont le développement d'un cadre théorique, suivi de la sélection des indicateurs pertinents, la normalisation des valeurs des indicateurs, le test de corrélation et de signification, la pondération avec l'analyse en composantes principales (ACP), l'agrégation et le calcul de l'IPFR.

L'IPFR a permis la sélection de 10 projets dits de *haute priorité*. Parmi ces projets de *haute priorité*, 60 % sont des projets de préservation et 40 % sont des projets de construction, ce qui constitue une preuve de l'importance d'entretenir les routes, mais aussi d'en construire de nouvelles à condition que celles-ci aient un IPFR proche de 100. Les résultats obtenus prouvent que l'IPFR pourrait être utile à l'amélioration du processus de priorisation des infrastructures routières dans les pays en développement en se basant sur une approche scientifique rigoureuse.

NEW ROAD FUNDING PRIORITY INDEX (RFPI) FOR THE SELECTION OF "HIGH PRIORITY" ROAD PROJECTS IN DEVELOPING COUNTRIES USING PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

This article presents a new Road Funding Priority Index (RFPI) that simultaneously considers the technical, economic, social and environmental dimensions in order to assist decision makers in their selection processes of high-priority road construction and preservation projects. The RFPI is a decision support tool that has allowed the assessment of 50 road projects, including 25 unpaved road construction projects and 25 existing paved road preservation projects. The stages of development of the RFPI are the establishment of a theoretical framework, the selection of the relevant indicators, the standardization of indicators values, the correlation and significance test, the weighting using the principal component analysis (PCA), the aggregation and calculation of the RFPI.

Ten (10) so-called high-priority road projects were selected based on their RFPI values. Among these high-priority road projects, 60% are preservation projects and 40% are construction projects, which is evidence of the importance of maintaining existing roads, but also of construction of new ones as long

as those have an RFPI close to 100. These research findings demonstrate that the RFPI is useful for improving the process of prioritizing road infrastructure in developing countries based on a rigorous scientific method.

RÉTRO ANALYSE DE L'INSTABILITÉ DU VERSANT « PETIT D15 » SITUÉ SUR L'AUTOROUTE MARRAKECH – AGADIR AU MAROC

HAKIM AHMARI, GABRIEL ASSAF

Au mois de Décembre 2010, un glissement est survenu dans le versant « petit D15 » qui se situe dans la zone extrême nord du déblai D15 qui prolonge l'autoroute Marrakech Agadir au Maroc. Cette rupture semble associée à une combinaison de facteurs qui a mené à une diminution graduelle des propriétés du massif rocheux et finalement à l'instabilité de la pente. Parmi ces facteurs, notons les effets cumulatifs des vibrations des explosions en pied de la pente et les effets cumulatifs météorologiques (précipitations, variations importantes de température). Le versant a subi un glissement profond en phase d'exploitation, heureusement, ce glissement n'a pas entraîné de pertes de vies humaines, mais si le problème ne se traite pas sérieusement en utilisant des méthodes de stabilisation appropriées, la circulation routière risquera d'être paralysée surtout avec des pluies torrentielles. La rupture a causé des désordres importants dans le versant lui-même et dans les ouvrages situés dans son voisinage immédiat.

Nous présentons dans ce travail les résultats d'une série de calculs de stabilité effectués sur cette pente, ces calculs visent à analyser les causes probables de la rupture afin de proposer la solution de confortement adéquate.

RETRO ANALYSIS OF THE INSTABILITY OF THE "PETIT D15" SLOPE LOCATED ON THE MARRAKECH - AGADIR HIGHWAY IN MOROCCO

In December 2010, a slip occurred on the slope "small D15" which is in the extreme north of slope D15 and which extends the Marrakech Agadir highway in Morocco. This break appears to be associated with a combination of factors that has led to a gradual decrease in rock mass properties and ultimately to slope instability. These factors include the cumulative effects of footfall blasting vibrations and cumulative weather effects (Precipitation, significant temperature variations). The slope has undergone a deep shift during the operation phase, fortunately, this shift has not resulted in loss of life, but if the problem is not dealt with seriously using appropriate stabilization methods, road traffic may be paralyzed especially with torrential rains. The rupture caused major disturbances in the slope itself and in the works located in its immediate vicinity.

We present in this work the results of a series of stability calculations carried out on this slope, these calculations aim at analyzing the probable causes of the rupture to propose the adequate solution of comfort.

**INFLUENCE DU MODE DE RÉPARATION DES
FISSURES PAR LES MATÉRIAUX COMPOSITES
SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS
ORDINAIRE, FIBRÉ, HAUTE PERFORMANCE
ET HAUTE PERFORMANCE FIBRÉ**

BACHIR REDJEL, GHANIA MIROUZI,
KHAOULA AZZOUZ, BACHIR KEBAILI

Une technique de réparation par injection de la résine seule et par injection de mortier de résine suivie de collage de bande en tissu de fibres de carbone (TFC) et en tissu de fibres de verre (TFV) a été expérimentée sur des corps d'épreuves en béton ordinaire, en béton de fibres métalliques, en béton à haute performance et en béton à haute performance fibré après avoir été rompus complètement en flexion. Il apparaît que le TFV est plus performant en tant que matériau de réparation que le TFC

et que le mortier de résine est un produit de réparation meilleur que la résine seule.

***INFLUENCE OF THE MODE OF REPAIR OF
CRACKS BY COMPOSITE MATERIALS ON THE
PERFORMANCES OF ORDINARY, FIBROUS, HIGH-
PERFORMANCE AND HIGH-PERFORMANCE
FIBROUS CONCRETE***

A technique of repair by injection of resin and by injection of mortar of resin followed by collage of cloth band of carbon fiber (TFC) and cloth of fiber glass (TFV) was experimented on specimens of ordinary concrete, high-performance concrete, high-performance fibrous concrete after being completely broken in bending. It seems that the TFV is more successful as material of repair than the TFC and that the mortar of resin is a product of repair better than the only resin.

recommandations aux auteurs

CONTEXTE GÉNÉRAL

Les Annales du BTP sont avant tout une revue technique francophone s'adressant à un public d'ingénieurs et de décideurs œuvrant dans les multiples secteurs du BTP au sens le plus large du terme, à savoir la construction, le bâtiment, les travaux publics, l'ingénierie, les infrastructures urbaines et territoriales.

Les grands enjeux sous-tendus dans tout article pouvant paraître dans la revue sont à mettre en regard avec les problématiques d'aujourd'hui, progrès et innovation technologiques, développement économique dans le respect de l'environnement, valorisation des produits de la recherche dans le monde professionnel, défense du secteur de la construction dans l'économie mondiale...

Les auteurs sont invités à prendre en considération ces aspects dans toute leur diversité. Beaucoup d'articles en effet ne manqueront pas de se baser sur une présentation de travaux de recherche, qu'elle soit fondamentale ou appliquée. Néanmoins, à la différence d'une revue scientifique, les Annales attendent de ses contributeurs plus une description exhaustive de l'intérêt que leurs travaux pourraient présenter à la communauté professionnelle qu'une description précise de leur cheminement intellectuel.

Quand un article est le prolongement d'un colloque ou d'une rencontre scientifique, l'auteur devra donc veiller dans la réécriture à ne pas trop détailler sa démarche, mais à montrer l'intérêt de sa recherche pour le lectorat de la revue, en montrant en particulier dans l'introduction et la conclusion quels étaient ses grands objectifs. Il ne s'approfondira pas plus que nécessaire sur l'aspect scientifique, sachant que le lecteur ne sera pas forcément un spécialiste de sa discipline. En un mot l'auteur doit chercher à vulgariser son discours.

PRÉSENTATION DU MANUSCRIT

Le texte doit être soumis sous format électronique .doc ou .odt envoyé au rédacteur en chef François BUYLE-BODIN à l'adresse annaesbtp@gmail.com

En cas de refus de transmission pour cause de lourdeur des fichiers, l'auteur pourra envoyer un cédérom à **M. BUYLE-BODIN, rédacteur en chef de la revue Annales du BTP, Polytech'Lille – Université Lille 1, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex.**

Afin de faciliter la diffusion du savoir, l'éditeur n'exige pas des auteurs une mise en forme particulière de leur article. Aucune contrainte de longueur n'est posée, mais l'idéal est aux alentours de 15 pages en arial 10 interligne simple.

Les unités de mesures et les symboles doivent respecter les règles typographiques internationales.

Il est nécessaire de préciser :

- le titre en français et en anglais ;
- le ou les auteurs : nom, prénom, titres, coordonnées ;
- un résumé de 15 lignes maximum en français et en anglais ;
- les figures et photographies originales peuvent être fournies à part en .eps, .tif ou .jpg. Elles seront publiées en noir et blanc et doivent donc être d'un bon niveau de gris, au moins 400 dpi ;
- une illustration caractéristique de l'article pourra figurer en couleur sur la une de couverture et devra donc être d'une résolution maximale. Ne pas oublier de mentionner les crédits photographiques.

FONCTIONNEMENT DE LA RELECTURE

Le rédacteur en chef accuse réception du manuscrit et lance la phase d'approbation. Il s'appuie pour la relecture et la sélection finale des articles sur un comité comprenant des experts reconnus de la profession, ainsi que des membres des conseils scientifiques des principales associations du BTP partenaires des Annales.

Le rédacteur en chef de la revue fait part à l'auteur de la décision de publier ou non le texte, il précise éventuellement les corrections à apporter.

Le rédacteur en chef se charge de la transmission du manuscrit à l'éditeur.

AGPA Editions, 4, rue Camélinat, 42000 Saint-Etienne.

L'auteur recevra gratuitement quelques exemplaires du numéro de la revue dans lequel est publié son article.

NOUVEL INDICE DE PRIORITÉ DE FINANCEMENT DES ROUTES (IPFR) POUR LA SÉLECTION DES PROJETS ROUTIERS DE « HAUTE PRIORITÉ » DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT EN UTILISANT L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

NEW ROAD FUNDING PRIORITY INDEX (RFPI) FOR THE SELECTION OF "HIGH PRIORITY" ROAD PROJECTS IN DEVELOPING COUNTRIES USING PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Emmanuel KOSSÈ KABA, Gabriel J. ASSAF

kaba.emmanuel@gmail.com

Gabriel.Assaf@etsmtl.ca

Département de génie de la construction, École de technologie supérieure
1100, Notre-Dame Ouest Montréal Québec, Canada H3C 1K3

1. INTRODUCTION

Les routes sont cruciales pour le développement économique et socioéconomique des communautés et contribuent ainsi à leur bien-être et à la réduction de la pauvreté en Afrique

subsaharienne. Elles permettent de connecter les individus aux marchés, aux écoles, aux hôpitaux et aux centres sociaux. De plus, pour l'atteinte des objectifs de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030 dont le thème est « Transformer notre monde », les gouvernements et les institutions financières

internationales doivent investir judicieusement dans les secteurs stratégiques des pays en développement, dont font partie les routes.

La construction des routes constitue en effet un enjeu très important pour le développement économique et socioéconomique car elle permet le désenclavement des régions isolées et facilite les échanges commerciaux nationaux et internationaux, bien que les densités du réseau routier de la majorité des pays en développement (route à faible volume de trafic avec un débit moyen journalier moyen plus petit que 300 véhicules par jour) en kilomètre de routes par habitant et par kilomètre carré soient très faibles comparativement à la moyenne mondiale des régions. Le réseau routier de l'Afrique comporte seulement 204 km de routes sur 1 000 km², avec seulement un quart qui est revêtu, tandis que la moyenne mondiale est de 944 km sur 1 000 km², avec plus de la moitié des routes revêtues (Ken, 2011). Cependant, il est aussi important de maintenir les routes existantes du réseau routier dans un bon état pour ne pas restreindre l'accessibilité et la mobilité au cours de l'année. En outre, si les travaux d'entretien préventif (courant, périodique) ne sont pas réalisés au moment opportun, l'état des routes se dégrade très rapidement, ce qui peut mener à des travaux de réhabilitation majeurs ou de reconstruction qui coûteront environ 4 fois plus cher que les travaux d'entretien (Burningham et Stankevich, 2005).

Le déséquilibre entre le taux de dégradation des infrastructures existantes et les fonds affectés à leur entretien, la tendance à privilégier les nouvelles constructions et la méconnaissance de l'importance d'un entretien de qualité réalisé au moment opportun s'avèrent les défis à relever pour le secteur routier dans les pays en développement (DFID, 2016). De surcroît, le manque de financement des projets routiers tant pour la construction que pour l'entretien constitue un autre défi très important à relever. Le but principal de cette étude est le développement d'un indice de priorité de financement des routes (IPFR) pour sélectionner des projets dits de *hautes priorités* admissibles au financement des administrations routières et des bailleurs des fonds. La spécificité de cette étude est que le développement de l'IPFR a été effectué en utilisant des méthodes d'analyse statistique multivariée et en collectant des données disponibles et accessibles de l'administration routière concernée. L'obtention des intrants pour une analyse sophistiquée comme l'analyse coût-avantage (CA) avec le logiciel HDM-4 nécessite beaucoup de temps et est dispendieux ; de plus, l'analyse CA est monocritère. L'IPFR est donc un tremplin pour la sélection des projets routiers de *hautes priorités* qui feront l'objet d'évaluation fonctionnelle et structurale et d'analyse de la demande en trafic rigoureuse pour l'obtention des données plus détaillées qui permettront des analyses technico-économiques plus sophistiquées avec le logiciel Highway design and Management (HDM-4). Cet outil se veut innovateur puisque très peu d'applications ont été conduites dans le secteur routier.

Ce document présente d'abord une revue de la littérature sur les outils de priorisation des routes, suivie de la méthodologie qui décrit la zone d'étude et les étapes de construction de l'IPFR, des résultats et de la discussion qui présentent principalement les résultats de l'ACP et enfin une conclusion récapitulant les éléments saillants de cet article.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1. Outils de priorisation des projets

Cette revue de littérature présente un récapitulatif des outils d'aide à la décision applicables dans le secteur des infrastructures routières. Les outils d'aide à la décision constituent l'ensemble des méthodes, des approches analytiques, des procédures et des structures permettant l'évaluation des projets ou des politiques dans les administrations routières (Healy et al., 2007). Plusieurs outils ont été développés par des chercheurs pour aider les décideurs et les administrations de gestion des routes dans leurs processus de prise de décision concernant les projets de transports. Ces outils peuvent être regroupés en 2 grandes catégories : les outils d'analyse monocritère (analyse de coûts de cycle de vie, analyse coût-avantage) et des outils d'analyse multicritères (analyse hiérarchique des procédés, optimisation mathématique).

2.2. L'analyse de coût de cycle de vie et analyse coût-avantage

L'analyse de coût de cycle de vie (ACCV) des projets est un sous-ensemble de l'analyse coût-avantage utilisant des principes d'analyse économique pour comparer différentes alternatives d'investissements des projets ayant les mêmes avantages pendant la durée de vie utile des projets. Cependant, l'analyse coût-avantage (CA) est la plus fréquemment utilisée pour l'évaluation économique des projets routiers, que ce soit dans les pays en développement ou développés (Bhandari, Shahi et Shrestha, 2016). L'analyse CA est une analyse quantitative qui permet de comparer tous les coûts et les avantages actualisés à l'année de référence afin de déterminer les principaux critères économiques (World Bank Group, 2010). Les coûts considérés dans l'évaluation économique des projets routiers sont composés des coûts d'administration (coûts de construction, d'entretien, de réhabilitation, résiduels, de gestion), des coûts des usagers (coûts de temps de trajet, d'exploitation des véhicules, des accidents), des coûts des externalités (coûts de pollution de l'air, de nuisance sonore et de perturbation du voisinage) (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994a). Les avantages des projets routiers sont subdivisés en avantages quantifiables (en termes monétaires) et non quantifiables (PIARC, 2013). Les avantages quantifiables sont composés des réductions des coûts usagers et d'entretien et du développement économique régional. Les avantages non quantifiables sont principalement issus de l'augmentation des revenus et de la qualité de vie de la population locale, par exemple la santé, l'éducation, l'interaction sociale et la participation à la vie politique. Bien que ces avantages non quantifiables soient importants, ils sont très rarement considérés dans l'analyse économique, car l'analyse CA ne permet que l'évaluation des avantages en termes monétaires. Les principaux critères économiques sont la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rendement interne (TRI) et le rapport avantage-coût (A/C) et permettent la vérification de la rentabilité économique des projets.

Bien que l'analyse CA soit un outil robuste d'évaluation de la rentabilité économique des projets routiers, la fiabilité de ces

résultats est tributaire des types et des sources des données (Kaan *et al.*, 2004). En effet, les intrants de l'analyse CA nécessitent des informations très détaillées et assez précises des chaussées. Cependant la collecte de ces informations peut s'avérer très dispendieuse tant en coût qu'en temps pour les pays en développement dont les fonds sont déjà très limités pour une multitude de projets routiers à financer. D'autres considérations peuvent aussi rendre l'analyse CA moins attrayante comme l'exigence que tous les coûts et les avantages soient monétisables et l'évaluation des projets routiers sur la base d'un seul critère qui est le critère économique. D'après (Beria, Maltese et Mariotti, 2012), l'analyse CA est une approche rigoureuse formelle, procurant un cadre rationnel pour l'évaluation des projets et des résultats clairs qui peuvent être facilement communiqués et partagés. Toutefois, ces procédures techniques d'application sont très complexes. Aussi le processus utilisé pour monétiser certaines externalités environnementales intangibles est-il questionnable. Par conséquent, l'analyse multicritère peut s'avérer une bonne alternative pour la sélection de projets en utilisant les données disponibles et accessibles répondant aux objectifs et aux politiques adoptés par les administrations routières des pays en développement ou les bailleurs de fonds.

2.3. L'analyse multicritère

Les approches d'analyse multicritère (AMC) sont de plus en plus utilisées dans l'évaluation et la priorisation des Infrastructures pour répondre aux exigences de concilier les objectifs politiques et le manque de données (Marcelo *et al.*, 2016). Le processus de prise de décision de financement des infrastructures est un problème complexe nécessitant la participation de plusieurs parties prenantes ayant des objectifs très souvent divergents. Dans ce cadre, une AMC qui permet de faire le compromis entre les différents objectifs sous forme de critères est appropriée. Ainsi, l'AMC est définie par (Beria, Maltese et Mariotti, 2012) comme étant un outil de sélection d'alternatives de projets ayant des impacts sociaux, économiques et environnementaux pertinents en considérant une multitude de critères et d'opinions des parties prenantes. L'AMC commence par l'énumération des objectifs, suivie de l'identification des indicateurs correspondant à ces objectifs, et la mesure des indicateurs. Les mesures des indicateurs ne s'effectuent pas seulement en termes monétaires, mais aussi en termes non monétaires (appréciations qualitatives). Les indicateurs qualitatifs s'appuient sur des méthodes d'attribution des points (échelle de Likert), de classement et de pondération pour inclure les aspects intangibles comme les aspects sociaux et certains aspects environnementaux (Beria, Maltese et Mariotti, 2012). La détermination des poids des indicateurs est l'étape fondamentale de l'AMC. Donc, les méthodes d'AMC se différencient principalement au niveau de leurs procédures de détermination des poids. Il existe principalement cinq (5) méthodes multicritères appropriées pour l'évaluation des projets de transports : analyse hiérarchie des procédés (AHP), analyse en réseau des procédés (ANP), REGIME, ELECTRE family, approche Multi-attribute utility, type ADAM (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). Une attention particulière est accordée à l'AHP dans ce document, puisqu'elle est la plus connue et la plus utilisée pour l'évaluation des infrastructures routières.

L'AHP est une technique mathématique d'aide à la prise de décision développée par (Saaty, 1980) et la plus fréquemment utilisée pour faciliter le processus de sélection des meilleures alternatives par les décideurs. En effet, l'AHP permet de décomposer un processus de prise de décision complexe en structure hiérarchique qui comporte au minimum trois niveaux. Le premier niveau est l'objectif ultime de l'analyse, suivi des critères principaux au deuxième niveau et des sous-critères au troisième niveau (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). La principale caractéristique de L'AHP est qu'en plus des données quantitatives (monétisables), les données qualitatives peuvent aussi être incluses. Les étapes de l'AHP sont les suivantes : la structuration d'une hiérarchie, la priorisation par comparaison par paires, l'établissement du vecteur de priorité et la vérification de la cohérence de préférence des jugements (Farhan et Fwa, 2009). La structuration de la hiérarchie consiste à dresser un organigramme en spécifiant l'objectif ultime au premier niveau et les critères et les sous-critères aux niveaux suivants. Les critères peuvent être davantage décomposés en sous-critères dépendamment de la complexité du problème étudié (Javed, 2011). La comparaison par paires des critères et des sous-critères est effectuée à l'aide d'une échelle de 9 points recommandée par (Saaty, 1980). Ainsi, la préférence de jugement est faite en attribuant une valeur de 1 aux éléments de même importance, 3 à l'élément un peu plus important que l'autre, 5 à l'élément plus important que l'autre, 7 à l'élément beaucoup plus important que l'autre et 9 à l'élément beaucoup plus important que l'autre. Les valeurs intermédiaires 2, 4, 6, 8 peuvent aussi être attribuées aux préférences de jugement en fonction de l'importance d'un élément par rapport à un autre. Le vecteur priorité est la synthèse des priorités de comparaison par paires des critères ou des sous-critères. La synthèse des priorités est effectuée à partir du deuxième niveau en multipliant les priorités locales par la priorité correspondant à leur critère du niveau supérieur, et en les additionnant pour chaque élément du niveau correspondant aux critères que chaque élément affecte (Tsamboulas, Yiotis et Panou, 1999). La dernière étape de l'AHP est la vérification de cohérence de la préférence des jugements. Pour ce faire, (Saaty, 1980) a établi une limite de 10% d'incohérence permise par les jugements humains qui est le coefficient de consistance (CR). CR est le rapport entre l'indice de cohérence (IC) et l'indice de cohérence aléatoire (RI). IC dépend de la valeur propre maximale de la matrice de priorité et RI dépend du nombre de critères ou sous-critères.

Les méthodes de prise de décision à l'aide de l'AMC peuvent être subdivisées en deux grandes catégories : la catégorie comprenant les méthodes avec une série d'alternatives connues explicitement (un nombre fini d'alternatives) et la catégorie avec des méthodes comportant une série d'alternatives connues implicitement (Cafiso *et al.*, 2002). Les méthodes de la première catégorie incluent l'AHP qui est déjà décrit ci-dessus. Au niveau des méthodes de la deuxième catégorie, les alternatives sont représentées sous forme de vecteurs de variables de décision et les critères sont les fonctions objectives de ces variables. L'ensemble des solutions admissibles de ces variables sont les contraintes exprimées sous forme d'équations et d'inéquations (Cafiso *et al.*, 2002). Dans la littérature, les méthodes de cette deuxième catégorie sont nommées méthodes d'optimisation multicritères (MO). L'optimisation mathématique des projets routiers est un outil très complexe. Cependant, elle permet

d'allouer efficacement les ressources afin que les avantages des projets routiers soient maximisés ou les coûts totaux minimisés (fonction objective) en considérant la limite budgétaire (contraintes) (AASHTO, 2012). Les modèles mathématiques tels que les programmations linéaire, non linéaire et dynamique sont utilisés pour optimiser les projets d'entretien, de construction et de réhabilitation de routes. Toutefois, la programmation linéaire est la plus recommandée par les chercheurs, car elle s'avère simple à utiliser, s'adapte à différentes situations et s'applique au niveau réseau pour trouver la solution optimale (Javed, 2011). La programmation linéaire ne permet pas cependant d'analyser un nombre élevé de variables de décision et comporte des problèmes liés aux combinaisons linéaires. Ces inconvénients peuvent être résolus par l'utilisation de l'algorithme génétique (AG). L'AMC permet d'analyser l'importance des indicateurs en fonction de poids. Cependant, les poids des différents indicateurs pourraient être agrégés linéairement avec les valeurs normalisées des indicateurs pour une évaluation globale de chaque projet routier. L'agrégation des indicateurs est nommée indicateurs ou indices composites (IC).

2.4. Indices composites

L'indice composite (IC) est un outil permettant de mesurer un phénomène complexe en considérant simultanément plusieurs dimensions. L'IC composite est issu de l'agrégation de plusieurs indicateurs ou sous-indicateurs afin de mettre en évidence des dimensions complexes et souvent imperceptibles telles que l'environnement, l'économie, le social ou le développement technologique. Cependant, les scientifiques ne sont pas unanimes quant à l'utilisation de l'IC. Donc naturellement, il y a des débats entre ceux qui sont pour et ceux qui sont contre cet indice (OECD, 2008). En ce qui concerne ceux qui soutiennent le développement de l'IC, ils soutiennent que l'IC permet de synthétiser des problèmes complexes pour appuyer les décideurs en leur donnant une vision plus large qui facilitera davantage l'interprétation qu'en cherchant à développer des tendances sur plusieurs indicateurs distincts. Ils défendent aussi l'idée que l'IC est plus attrayante pour l'intérêt public, puisqu'il peut être utilisé pour comparer les performances des projets et pour réaliser les suivis et évaluations dans le temps de ces projets. Ils estiment également que l'IC peut contribuer à la réduction de la taille d'un grand nombre d'indicateurs ou à l'incorporation de l'information dans une taille limitée d'indicateurs existants. Cependant, ceux qui sont contre l'application de l'IC estiment qu'il peut mener à l'adoption de politiques fallacieuses et non robustes dans le cas où il aurait été mal construit ou mal interprété; ce qui peut conduire les décideurs à prendre des décisions simplistes. De plus, les opposants à l'application de l'IC affirment aussi que chaque étape de construction de l'IC nécessite des choix et jugements qui peuvent être subjectifs et conduisent à des résultats erronés, c'est-à-dire que les étapes de sélection et de pondération sont souvent influencées par des défis ou des objectifs politiques divergents des parties prenantes. L'exigence d'une grande quantité de données pour la construction de l'IC est aussi un argument avancé par ceux qui sont contre l'utilisation de cet indice. Bien que les arguments des chercheurs sceptiques quant à l'utilisation de l'IC soient justifiables, des solutions ont été développées pour combler ces manques dans les

étapes de construction de l'IC. En effet, l'analyse de sensibilité permet de vérifier la robustesse des IC. En outre, un sous-indice composite peut être développé pour chaque dimension afin d'éviter les prises de décisions simplistes. Le développement des sous-indices et l'analyse de typologie des projets routiers feront l'objet d'un prochain article. Les jugements d'opinions qu'implique chaque étape de construction de l'IC doivent être transparents et basés sur des principes statistiques solides (Mainali et Silveira, 2015; OECD, 2008; Saisana et Tarantola, 2002).

Il existe plusieurs exemples d'indices composites qui ont été développés à travers le monde. L'indice de développement humain (IDH) a été introduit en 1999 pour mesurer le développement humain de 177 pays en se basant sur les composantes comme l'expérience de vie, le taux d'alphabétisation des adultes et le taux brut d'inscription. Les indicateurs de ces trois composantes ont été aussi utilisés pour la construction des sous-indices tels que le produit intérieur brut (PIB), l'indice d'éducation (IE) et l'indice d'expérience de vie (IEV). L'indice de durabilité environnemental (IDE) a été développé en 2000 pour évaluer l'aptitude de protection de l'environnement de 146 pays au cours des prochaines décennies. L'IDE a été construit en établissant des composantes comme les systèmes environnementaux, la réduction du stress, la réduction de la vulnérabilité humaine, la capacité sociale et institutionnelle et la gérance totale. Au total, les cinq composantes de l'IDE étaient composées de 21 indicateurs. L'indice de vulnérabilité économique (IVE) a été créé en 1992 pour mesurer l'ampleur à laquelle l'économie d'un pays est exposée aux aléas sur lesquels il n'a pas le contrôle. L'IVE a permis de comparer 117 pays en considérant des composantes comme les perspectives commerciales, la concentration de l'exportation, la dépendance de la stratégie d'importation et périphéricité (Bandura, 2008). Bien que ces indicateurs composites aient reçu beaucoup de critiques, ils sont maintenant utilisés à travers le monde pour comparer et évaluer les performances des pays. En ce qui concerne le secteur de transport, à notre connaissance il existe un seul indice composite qui est l'indice de sécurité routière (ISR) développé pour comparer la sécurité routière entre les pays. L'ISR a été développé en se basant sur des indicateurs issus des résultats finaux de sécurité routière (taux de mortalité, ampleur des accidents), des résultats intermédiaires (taux de port de la ceinture de sécurité, résistance à l'impact et la composition du parc automobile, conduite avec des facultés affaiblies), et les caractéristiques des pays (niveau de motorisation et densité de la population) (Gitelman, Doveh et Hakkert, 2010).

Les principales étapes de construction de l'IC énumérées dans le manuel *Handbook on constructing composite indicators* sont (OECD, 2008) : (1) cadre théorique et conceptuel, (2) sélection des données, (3) imputation des données manquantes, (4) analyse multivariée, (5) la normalisation et (6) la pondération et l'analyse d'incertitude et de sensibilité. Ces principales étapes seront adaptées pour le développement de la méthodologie de l'IPFR.

Dans ce document, l'attention est portée sur le développement de l'IC en utilisant l'ACP. La construction des IC en utilisant l'ACP a été beaucoup exploitée dans des domaines scientifiques autres que les infrastructures routières. (Ouyang et al., 2006) se sont basés sur 16 indicateurs de qualité des eaux de surface en utilisant l'ACP pour évaluer les indicateurs plus influents

des variations saisonnières de qualité des eaux de surfaces. (Fuquan, Lu et Xiang, 2008) ont aussi utilisé des indicateurs caractérisant les facteurs de la sécurité routière des pays en utilisant l'ACP pour identifier les facteurs ayant des influences majeures et mineures et les caractéristiques du trafic routier. (Friesen, Seliske et Papadopoulos, 2016), pour leur part, ont utilisé l'ACP pour développer des indices des statuts socio-économiques pour mesurer les disparités socioéconomiques des communautés dans le but d'une bonne répartition des services de santé. Après une revue de la littérature approfondie, il a été trouvé qu'une seule étude a été effectuée dans la priorisation des infrastructures. En effet, (Marcelo et al., 2016) ont développé deux sous-indices à l'aide de l'ACP. Ces deux sous-indices développés, qui sont l'indice social et environnemental (ISE) et l'indice financier et économique (IFE), ont permis de représenter les projets sur un plan cartésien en considérant la limite budgétaire et déterminé les projets de haute priorité, de haute priorité sociale et environnementale, de haute priorité financière et économique et de faible priorité. Toutefois, cette étude ne spécifie pas si les hypothèses de l'ACP ont été satisfaites. De plus, les quatre dimensions n'ont pas été agrégées, et la détermination des niveaux de projets est très subjective. Toutes ces insuffisances ont été prises en compte pour le développement de l'IPFR.

3. SOURCE DES DONNÉES

Les données utilisées pour le développement de l'IPFR ont été collectées dans une administration routière de l'Afrique de l'Ouest. Cependant, l'échantillon statistique complet n'a pas été présenté dans cet article en raison de sa taille et pour des raisons de confidentialité des données exigées par cette administration.

4. ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude est située dans l'un des pays membres de l'union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA). L'union économique et monétaire ouest-africaine (UEMOA) est une organisation africaine créée en 1962 dont les pays membres sont le Bénin, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée-Bissau, le Mali, le Niger, le Sénégal et le Togo (BOAD, 2015). La carte présentée dans la figure 1 représente l'étendue de l'Afrique de l'Ouest dont une des régions en jaune représente la zone d'étude. Le linéaire total du réseau routier de l'espace UEMOA est de 247 311 km de routes classées dont une bonne partie se trouve en mauvais état (BOAD, 2015). D'une manière générale, le réseau routier est composé des routes classées et des routes non classées. Les routes classées comprennent les routes nationales

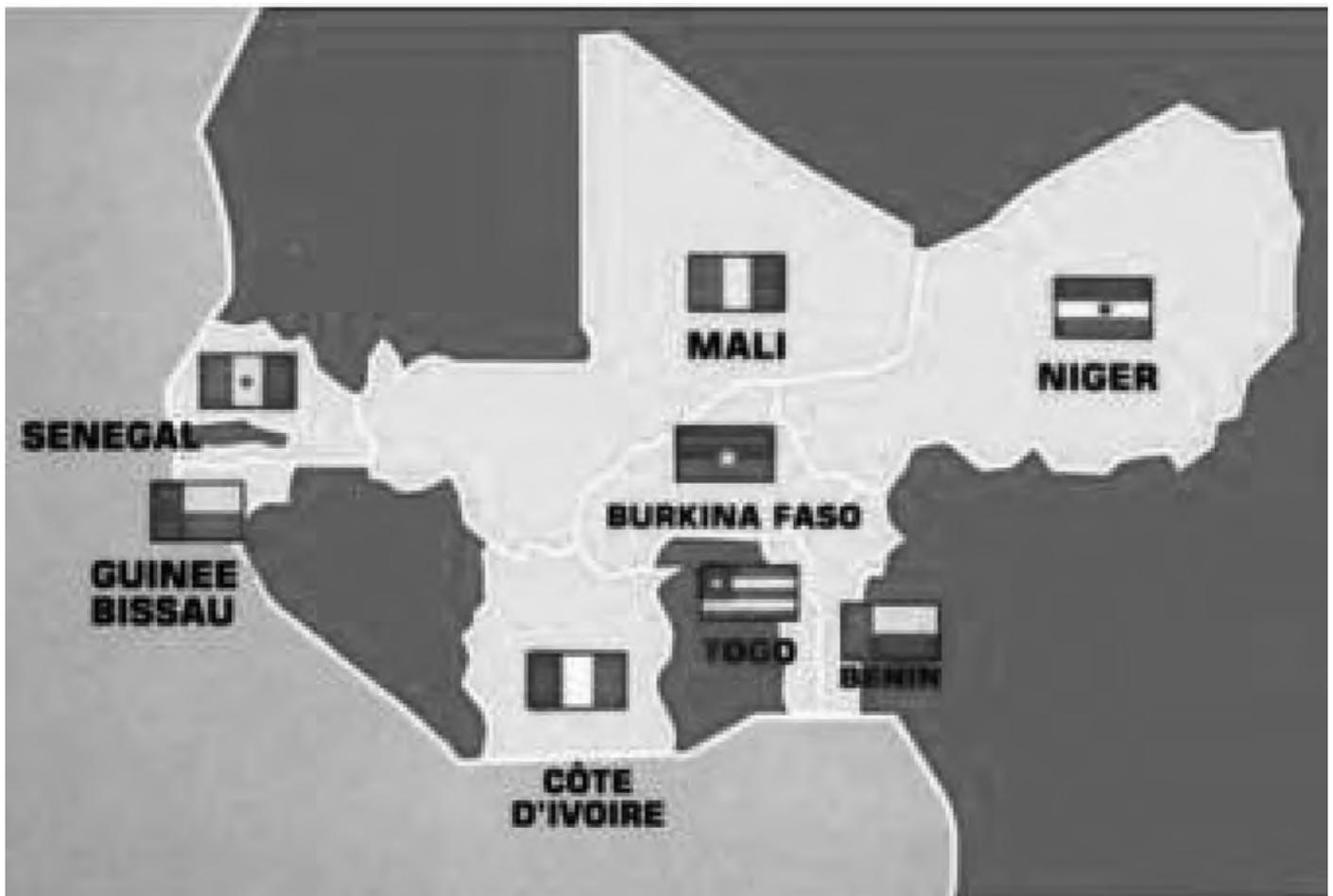


Figure 1 : Pays membres de L'UEMOA Tirée de BOAD (2005)

inter-états (RNIE) reliant la capitale du pays et les centres ruraux ou urbains des provinces du pays ou des pays limitrophes, et les routes nationales (RN) reliant les provinces entre elles, facilitant ainsi les échanges commerciaux des marchandises et le transport des personnes. Les routes non classées comportent des routes communales (RC) et des pistes rurales permettant l'accessibilité des infrastructures de bases comme les écoles, les hôpitaux, les marchés, etc., et permettent aussi de dynamiser les activités socioéconomiques des communautés rurales. Les types de revêtement sont aussi utilisés pour classer les routes. Ainsi, le réseau routier peut être subdivisé en routes revêtues et non revêtues. Les routes revêtues sont composées de routes en béton bitumineux (BB), en enduit superficiel monocouche (Esm) ou bicouche (Esb) et en Béton (très peu dans la zone UEMOA). Les routes non revêtues sont constituées des routes en graveleux latéritiques (GL) et des routes en terre (T). Dans cette étude, des tronçons de routes non revêtues en graveleux latéritiques totalisant une longueur 729 km et de routes

revêtues en béton bitumineux et enduit superficiel bicouche avec une longueur totale de 812 km ont été utilisés pour la construction de l'IPFR.

5. MÉTHODOLOGIE

Le développement de l'IPFR s'est appuyé sur le processus de construction des indices composites du manuel *Handbook on constructing composite indicators* publié en 2008 par l'organisation de coopération et de développement économiques (OECD, 2008), et a été adapté au domaine de l'Infrastructure routière. Comme présenté à la figure 2, les principales étapes de construction de l'IPFR ont été l'établissement d'un cadre théorique et conceptuel, suivi de la sélection des indicateurs pertinents, la transformation des indicateurs catégoriels, la normalisation, le test de la corrélation, et de la signification, la pondération et l'agrégation et le calcul de l'IPFR.

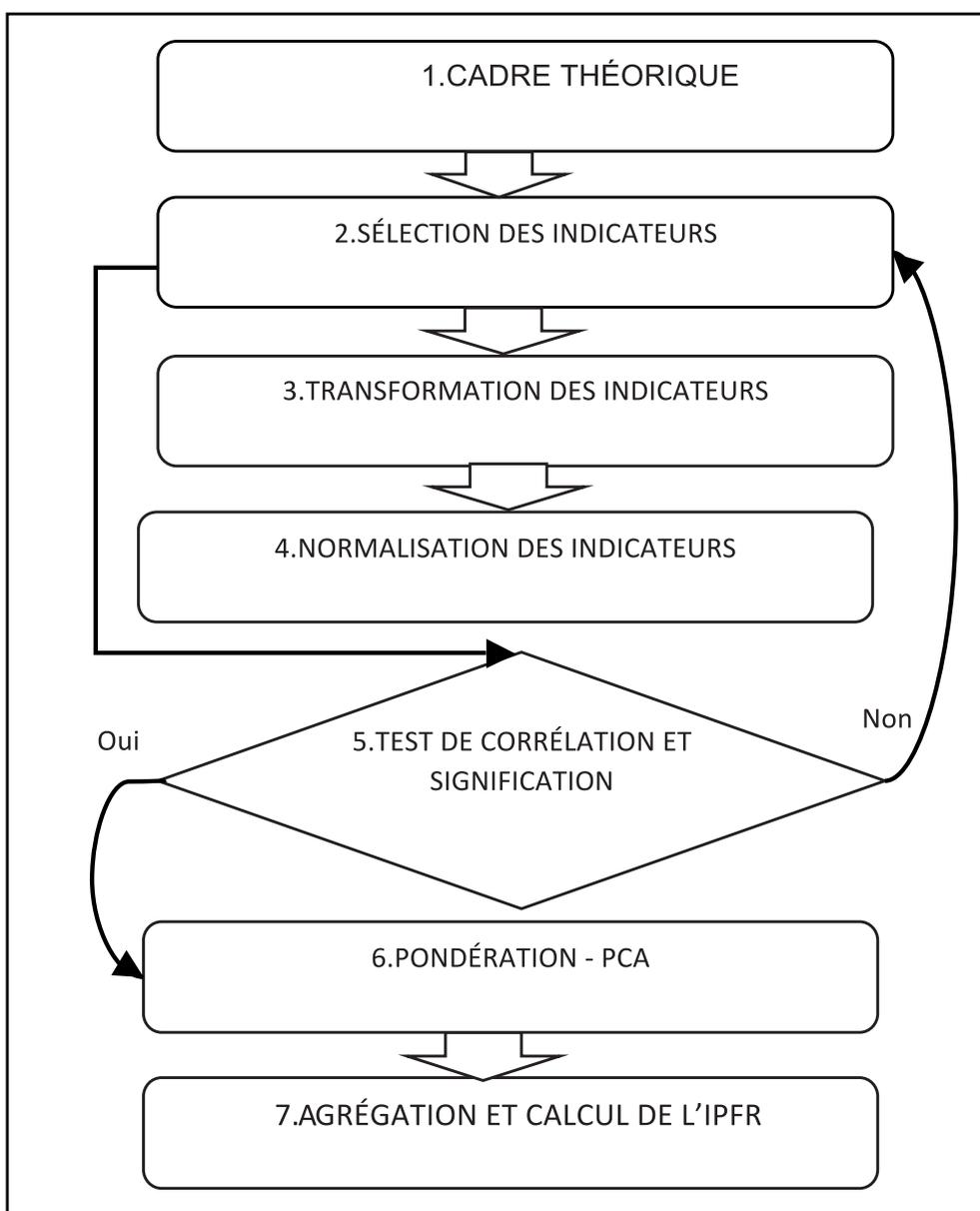


Figure 2 : Étapes de construction de l'IPFR

Tableau 1 : Cadre théorique et conceptuel de l'IPFR

Indice de Priorité de Financement des Routes (IPFR)				
Dimension	Impact	Indicateurs	Unité	Type de donnée
Technique	Bonne Performance	L	km	Quantitatif
		IRI	m/km	
		TJMA-VL	véh/h	
		TJMA-PL	véh/h	
Économique	Justifiable et rentable	CPCVEV	\$US/km	Quantitatif
		CPCVTT	\$US/km	
		RCCVU	\$US/km	
Sociale	Avantages élevés	POP	Habitants	Quantitatif
		SSB	n/a	
		M	n/a	
		UT	n/a	
Environnementale	Effets néfastes faibles	ZES	n/a	Qualitatif
		LPE	n/a	
		PE	n/a	
		ZE	n/a	

5.1. Étapes de construction de l'IPFR

5.1.1. Cadre théorique et conceptuel

Un cadre théorique et conceptuel adéquat permet de définir clairement le phénomène multidimensionnel à mesurer et ses dimensions, et constitue ainsi une référence pour la sélection des indicateurs et des méthodes de pondération (OECD, 2008). Ce cadre établit le lien entre les dimensions, les indicateurs et les sous-indicateurs. Le cadre théorique et conceptuel dans cette étude a été établi en sollicitant l'avis d'experts dans chacune des quatre (4) dimensions telles que des ingénieurs en conception et gestion des routes, des environnementalistes et des sociologues, ainsi que des experts du milieu universitaire. L'analyse pertinente des avis des différents spécialistes a permis d'établir le cadre théorique et conceptuel présenté au tableau 1. Ainsi, avec l'établissement de ce cadre, il est évident que pour être admissibles au financement, les projets doivent avoir des performances techniques fiables, être rentables et justifiables économiquement, avec des impacts négatifs minimes sur l'environnement et des avantages sociaux élevés pour la population locale. Deux types d'indicateurs ont été utilisés dans cette étude : il s'agit des indicateurs quantitatifs composés de valeurs continues et des indicateurs qualitatifs qui sont plutôt difficiles à quantifier comme les aspects sociaux et environnementaux. Ces

aspects sont appréciés à l'aide de l'échelle de Likert à 4 points allant de 1 pour très faible à 4 pour très élevé. Ces échelles sont présentées dans la section transformation.

5.1.2. Sélection des indicateurs

Les forces et les faiblesses des indicateurs composites sont étroitement liées aux critères de sélection des indicateurs. Afin de maximiser la qualité de l'ensemble des résultats finaux, la sélection devrait être basée sur la pertinence, la justesse, la disponibilité, l'accessibilité, la cohérence et l'interprétabilité des indicateurs (OECD, 2008). Les indicateurs ont été sélectionnés dans cette étude en mettant en évidence des critères de transparence, de précision, d'hypothèses des méthodes de pondération, de disponibilité, de pertinence et de développement durable applicables aux infrastructures routières dans le contexte des pays en développement. La méthode de pondération qui a été utilisée dans cette étude est l'analyse en composantes principales (ACP) dont la corrélation des indicateurs est une hypothèse fondamentale. Par conséquent, les indicateurs sont assez corrélés entre eux (voir tableau 2). Ces indicateurs sont issus principalement de plusieurs revues de littératures approfondies telles que des articles sur les indicateurs durables de priorisation de routes, des guides de conception, des rapports sur des études d'évaluation d'impacts sociaux et environnementaux de la Banque mondiale et de l'administration routière des pays en

Tableau 2 : Indicateurs sélectionnés pour l'établissement de l'IPFR

Sigle	Description	Référence
L	Longueur du tronçon de la route	(Haas <i>et al.</i> , 2009); (COST, 2007); (PIARC, 2004); (PIARC, 2012); (Haas, Hudson et Zaniewski, 1994b); (Kumar, 2014)
IRI	Indice de Rugosité International	
TJMA-VL	Trafic Journalier Moyen des Véhicules Légers	
TJMA-PL	Trafic Journalier Moyen des Poids Lourds	
CPCVEV	Coût Pondéré de Cycle de Vie d'Exploitation des Véhicules	(Amiril <i>et al.</i> , 2014); (Bhandari, Shahi et Shrestha, 2016); (Mata <i>et al.</i> , 2013); (Mazziotta et Pareto, 2013); (Shen, Wu et Zhang, 2011); (Wirehn, Danielsson et Neset, 2015); (ADB, 2003); (BAFD, 2015); (FAD, 2001); (Lantran, Baillon et Pagès, 1994); (MCC, 2007); (World Bank, 2017)
CPCVTT	Coût Pondéré de Cycle de Vie du Temps de Trajet	
RCCVU	Réduction des Coûts de Cycle des Usagers	
POP	Population desservie	
SSB	Service Sociaux de Base	
M	Marché	
UT	Unité de transformation	
ZES	Zone Écologiquement Sensible	
LPE	Lieu de Passage d'Eau	
PE	Points d'eau	
ZE	Zone d'érosion	

développement. Un total de 15 indicateurs corrélés dont quatre (4) indicateurs techniques (3) indicateurs économiques, quatre (4) indicateurs sociaux et quatre (4) indicateurs environnementaux ont été sélectionnés.

Les descriptions plus détaillées de ces 15 indicateurs sélectionnés sont :

a) Longueur du tronçon (L)

Les longueurs des tronçons exprimées en mètre linéaire (ml) ont été obtenues en subdivisant le réseau routier en sections homogènes en se basant sur des critères comme la classe de la route (RNIE, RN, RC), le type de revêtement de surface de la chaussée (T, GL, BB et ES) et le trafic (TJMA-VL et TJMA-PL) et l'état (IRI).

b) Indice de rugosité internationale (IRI)

L'IRI exprimé en mètre par kilomètre (m/km) caractérise la régularité (UNI) de la surface de la chaussée liée au confort de roulement et à la sécurité des usagers. L'IRI se calcule à partir des mesures du profil longitudinal de chaussée à l'aide d'un système virtuel type-réponse de simulation de quart de voiture roulant à 80 km/h (COST, 2007). Une chaussée plate et en bon état est généralement caractérisée par une valeur d'IRI faible (par exemple IRI < 2 m/km), alors que plus la valeur de l'IRI

est élevée (IRI > 4 m/km), plus l'état de la route se détériore. Dans cette étude, les valeurs de l'IRI des tronçons de routes non revêtues (GL) sont comprises entre 8 et 20 m/km correspondant à un état bon à mauvais, alors que celles des routes revêtues (BB/ES) sont comprises entre 6 et 3.5 équivalant à un état bon à passable. Il est important de mentionner que les routes revêtues sont celles qui sont susceptibles de recevoir des interventions préventives. Cependant, la prévention des chaussées est plus rentable lorsque la chaussée est toujours effective, d'où la nécessité d'inclure dans le processus de sélection des projets routiers, des tronçons de route ayant des états variant de bon à passable.

c) Trafic moyen journalier annuel des poids lourds et de véhicules légers (TJMA-PL, TJMA-VL)

Le trafic normal, le trafic induit et le trafic détourné sont les trois principaux types de trafic fréquemment utilisés dans les analyses économiques des projets routiers. Le trafic normal est le nombre de véhicules circulant sur la route existante en l'absence du nouveau projet routier prévu ; le trafic induit est l'augmentation du nombre de véhicules dû à la réduction des coûts et de la durée du transport résultant de l'utilisation plus fréquente de la route existante après la réalisation du nouveau projet routier; le trafic détourné est issu de la déviation du trafic

des routes ayant la même origine et destination que la route du nouveau projet (Archondo-Callao, 2004). Les données du trafic sont généralement issues d'analyses de la demande de trafic routier et des campagnes de pesages des véhicules en considérant les variations saisonnières. Toutefois, pour cette étude, les données existantes du trafic normal de chaque tronçon (TJMA-PL et TJMA-VL) exprimées en nombre de véhicules par jour ont été collectées. Ces données du trafic routier sont composées du trafic normal des véhicules lourds (TJMA-PL) et du trafic normal des véhicules légers (TJMA-VL). Les véhicules lourds (poids lourds) sont des véhicules motorisés ayant une charge totale supérieure à 3.5 tonnes tandis que les véhicules légers ont une charge totale inférieure à 3.5 tonnes (Kerali et Odoki, 2006).

d) Coût pondéré de cycle de vie d'exploitation des véhicules (CPCVEV)

Le coût pondéré de cycle de vie d'exploitation des véhicules est constitué des coûts d'exploitation des véhicules (CEV) pondérés par le trafic projeté sur une durée de vie de 20 ans en considérant un taux de croissance de 4%. Les coûts de carburant, de lubrifiants, de changement d'huile, des pièces à rechange, de pneu, d'entretien, de l'amortissement et de l'équipage formant les CEV varient en fonction des caractéristiques géométriques de la route (rugosité, altitude, déclivité, etc.). Dans cette étude, le CPCVEV exprimé en USD/km a été estimé approximativement en utilisant les outils développés par la Banque mondiale (World Bank, 2006) pour le calcul des CEV (RED-VOC HDM-4).

e) Coût pondéré de cycle de vie de temps de trajet (CPCVTT)

Le coût pondéré de cycle de vie de temps de trajet (CPCVTT) exprimé en \$USD/km est le produit du temps du trajet et du coût de temps de trajet pondérés par le trafic total en considérant un cycle de vie de 20 ans et un taux de croissance de 4%. En plus de l'état de la route (IRI), la détermination du temps du trajet prend en compte le trajet effectué pendant les heures de travail et hors des heures de travail et le temps du trajet de transport des marchandises. Le coût du temps des trajets effectués durant les heures de travail est déterminé en se basant sur les taux salariaux, alors que celui du temps des trajets effectué hors des heures de travail est fondé sur la volonté des usagers à payer pour réduire la durée de leurs trajets dans le but d'utiliser cette durée pour leurs loisirs (DFID, 2002). Dans cette étude, le coût du temps de trajet a été déterminé à l'aide du modèle (HDM-RUC) de la Banque mondiale (World Bank, 2006) en considérant les valeurs de l'IRI des tronçons de route de la zone du projet. Le modèle de la détermination du CPCTT est *HDM-RUC* dont les intrants sont issus du fichier *World Bank Road Use Costs Study Results – Africa* des outils de la Banque mondiale (World Bank, 2006).

f) Réduction des coûts pondérés de cycle de vie des usagers (RCCVU)

La réduction des coûts de cycle de vie des usagers constitue la majeure partie des avantages des projets routiers. Ces coûts composés des coûts d'exploitation des véhicules, les coûts de temps de trajet et des coûts des accidents ont été évalués en comparant l'alternative de base (sans projet) et l'alternative avec le projet. Le RCCVU dans cette étude a été calculé en utilisant le

même modèle que celui de CPCVEV et de CPCVTT en assumant qu'avec l'alternative de base, les valeurs de l'IRI des tronçons sont celles qui ont été collectées auprès de l'administration routière concernée et que l'alternative avec projet permettrait d'avoir des valeurs d'IRI de 2 m/km à la suite de construction ou d'interventions préventives sur les tronçons.

g) Population (POP)

La population se rapporte à la démographie. Cependant, elle englobe un éventail de problèmes liés ses caractéristiques et à son dynamisme (taille, densité, genre, âge, migration urbaine/rurale, etc.), à l'éducation, à la santé, à la croissance économique, à l'agriculture et aux ressources naturelles (ADB, 2003). Dans cette étude, l'indicateur POP est le nombre d'habitants desservis par le tronçon de route se trouvant dans la zone d'influence du projet.

h) Services sociaux de base (SSB)

Les services sociaux de base sont principalement les infrastructures communautaires de bases composées des écoles, des marchés, des centres de santé, etc. La construction ou la préservation fournit une meilleure accessibilité à ces infrastructures de base en assurant la desserte permanente entre les villages et provinces ainsi que le développement du commerce local. Dans cette étude, l'indicateur SSB a été évalué qualitativement en se basant sur le nombre d'infrastructures de base à proximité du tronçon considéré.

i) Marché (M)

Les marchés sont inclus dans les infrastructures de base, mais les experts ont trouvé pertinent d'ajouter un indicateur Marché (M) qui prendra en considération uniquement le nombre de marchés agricoles traversés par le tronçon considéré pour promouvoir l'agriculture locale. L'indicateur M a été déterminé qualitativement en se basant sur le nombre de marchés agricoles traversés par les tronçons.

j) Unité de transformation (UT)

L'indicateur UT a été choisi dans l'optique de promouvoir les zones à hautes potentialités agricoles. L'indicateur UT a été déterminé en fonction des unités de transformation (usines, moulins, etc.) à proximité des tronçons.

k) Zone écologiquement sensible (ZES)

Les zones écologiquement sensibles (ZES) sont les endroits critiques de protection de l'écosystème composé des zones humides, des aires protégées, la faune et la flore. L'indicateur ZES a été déterminé en se basant sur le nombre de zones sensibles traversées par les tronçons.

l) Lieu de passage d'eau (LPE)

Les lieux des passages d'eau sont les cours d'eau se trouvant dans la zone d'influence du projet ou à proximité des tronçons considérés. La prise en compte de ces cours d'eau est très importante, car si le drainage de la route est défectueux, en cas d'inondation les couches des chaussées sont fragilisées et dans certains cas la chaussée peut être complètement détruite. L'indicateur LPE a été déterminé en se basant sur le nombre de lieux de passage d'eau à proximité ou traversé par les tronçons.

m) Point d'eau (PE)

Les points d'eau (PE) sont les zones où sont localisés des bornes-fontaines, des abreuvoirs pour bétail, des forages, des mares et toutes retenues d'eau se situant dans la zone d'influence du tronçon. L'indicateur PE a été déterminé en basant sur le nombre de zones de points d'eau.

n) Zone d'érosion (ZE)

L'érosion des sols survient le plus souvent quand le système de drainage de la route est défaillant. Ainsi, une rupture de la chaussée peut survenir dans le cas où l'eau serait retenue sur la route, et lorsque les drains latéraux sont inexistantes pour résister aux fortes précipitations et aux inondations (USAID, 2014).

L'indicateur ZE a été déterminé en considérant le nombre de zones d'érosion à proximité des tronçons.

5.1.3. Transformation des indicateurs qualitatifs en échelle ordinale

Les indicateurs continus ou quantitatifs, les indicateurs discrets ou qualitatifs et les indicateurs chronologiques sont les trois (3) principaux types d'indicateurs requis pour une analyse statistique multivariée (Jambu, 1991). Les indicateurs quantitatifs sont des indicateurs qui peuvent prendre toutes les valeurs possibles des nombres réels. Un indicateur qualitatif se définit comme étant les indicateurs qui peuvent prendre des nombres finis de valeurs numériques, de catégories ou de codes ; les

Tableau 3 : Transformation des variables en échelle ordinales

Indicateur	Échelle ordinale	Appréciation	Description
SSB	3	Élevé	Le nombre de services sociaux de base à proximité du tronçon supérieur ou égal à 4
	2	Moyen	Le nombre de services sociaux de base à proximité du tronçon compris entre 2 et 4
	1	Faible	Le nombre de services sociaux de base à proximité du tronçon inférieur à 2
M	3	Élevé	Le nombre de marchés traversés par le tronçon supérieur ou égal à 2
	2	Moyen	Le nombre de marchés traversés par le tronçon inférieur à 2
	1	Faible	Le tronçon ne traverse aucun marché
UT	3	Élevé	Le nombre d'unités de transformation à proximité du tronçon supérieur ou égale à 2
	2	Moyen	Le nombre d'unités de transformation à proximité du tronçon inférieur à 2
	1	Faible	Absence d'unité de transformation à proximité du tronçon
ZES	1	Élevé	1 zone et +
	2	Faible	0 zone
LPE	1	Très élevé	+ de 3 lieux
	2	Élevé	De 2 à 3 lieux
	3	Moyen	1 lieu
	4	Faible	0 lieu
PE	1	Élevé	+ 3 de zones
	2	Moyen	De 2 à 3 zones
	3	Faible	1 zone
	4	Négligeable	0 zone
ZE	1	Élevé	+ de 3 zones
	2	Moyen	De 2 à 3 zones
	3	Faible	1 zone
	4	Négligeable	0 zone

variables chronologiques sont des variables qui sont soit quantitatives ou qualitatives mesurées à des intervalles égaux. Les mesures des indicateurs en échelles primaires sont indispensables aux analyses statistiques multivariées à l'aide du logiciel SPSS. Les échelles primaires sont composées d'échelles nominale, ordinale, d'intervalles et de proportions (Malhotra, 2011). Cependant, l'ACP a été utilisé pour la pondération des indicateurs dans cette étude et requiert que les données soient mesurées en échelles ordinales et d'intervalle. Par conséquent, les indicateurs qualitatifs SSB, M, UT, ZES, LPE, PE et ZE qui étaient en échelle nominale ont été transformés en échelle ordinale comme cela est présenté dans le tableau 3. Toutefois, les indicateurs environnementaux (ZES, LPE, PE, ZE) ont été mesurés en échelle ordinale inversée (tableau 3). L'échelle a été inversée dans la perspective de minimiser les impacts environnementaux néfastes en pénalisant ainsi leurs indicateurs en nombre de points. Par conséquent, plus la valeur de l'indicateur est faible plus les risques environnementaux sont faibles.

5.1.4. Normalisation des indicateurs

La normalisation est la transformation des indicateurs en nombres adimensionnels pour les rendre comparables. Les indicateurs sont hétérogènes en raison de la différence de leurs unités et de leurs échelles de mesure. Donc, il convient d'établir une structure de comparaison commune de tous les indicateurs avant l'utilisation de l'analyse en composante principale. Dans cette étude, les valeurs des indicateurs ont été normalisées en utilisant la méthode de normalisation z-score telle que présentée par l'équation 1.

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

Où

Z_{ij} : Valeur normalisée selon ma méthode z-scores de l'indicateur j du projet i

X_{ij} : Valeur de l'indicateur j du projet i

μ_j : Moyenne de l'indicateur j des projets i

σ_j : Écart-type de l'indicateur j des projets i

La normalisation z-score consiste à convertir tous les indicateurs à la même échelle selon la loi de distribution normale de moyenne 0 et d'écart 1 (OECD, 2008). En plus d'avoir des propriétés théoriques pertinentes comme la symétrie et les mesures de tendance centrales identiques (Malhotra, 2011), la loi de distribution normale est la plus convenable et préconisée pour la normalisation des indicateurs utilisés ultérieurement pour l'ACP (Jambu, 1991), d'où le choix de cette méthode dans cette présente étude.

5.1.5. Le test de corrélation et de signification

Le but de cette analyse est de développer l'IPFR en se basant sur l'analyse l'ACP. Cependant, cette technique n'est applicable que si certaines hypothèses fondamentales sont satisfaites. Parmi ces hypothèses, il y a l'exigence que les données soient quantitatives, assez corrélées, linaires, distribuées selon la loi normale et en taille suffisante. Il existe plusieurs tests incorporés dans le logiciel SPSS pour valider ces hypothèses. Dans cette étude, pour s'assurer que ces hypothèses ont été validées, les données catégorielles ont été transformées en échelle ordinale puis l'ensemble des données sont normalisées selon la loi

normale avant de procéder à deux tests importants : l'indice d'adéquation Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) et le test de sphéricité (p-value) de Barlett. Dans le cas où le KMO est supérieur à 0.5 et le p-value à 5% (Malhotra, 2011), les hypothèses sont validées et l'étape suivante qui est la pondération des indicateurs peut être effectuée avec l'ACP. Dans le cas où les hypothèses ne sont pas validées, l'ACP n'est pas applicable et les indicateurs présentant des corrélations faibles peuvent être supprimés dans l'étape sélection des indicateurs. Toutefois, la suppression doit se faire toujours en se basant sur le cadre théorique et conceptuel pour éviter de soustraire l'analyse des indicateurs pertinents. En ce qui concerne la taille des données, il n'y a pas de consensus clair, mais (Osborne et Costello, 2004) suggèrent que le nombre d'observations (projets routiers) soit toujours supérieur au nombre de variables (indicateurs) et recommandent dans la limite du possible l'utilisation d'une taille de données toujours élevée pour minimiser la probabilité des erreurs, maximiser la précision d'évaluation de la probabilité statistique et accroître la généralité des résultats obtenus. L'analyse peut aussi adopter des techniques de pondération participatives comme l'AHP, le processus d'allocation de budget (BAP) et l'analyse conjointe (CA).

5.1.6. Pondération

Les hypothèses de l'ACP ayant été validées, la prochaine étape est la détermination des poids relatifs à chaque indicateur en utilisant l'ACP. L'ACP a été utilisé pour la pondération principalement en raison de sa capacité d'explorer les propriétés sous-jacentes des données par l'utilisation des techniques statistiques rigoureuses et de vérifier la multidimensionnalité du phénomène.

a) Théorie de la méthode de l'analyse en composantes principales (PCA)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une variante de l'analyse factorielle, les deux méthodes étant des techniques statistiques de l'analyse multivariée. La méthode PCA est une technique de simplification ou de réduction de variables quantitatives corrélées afin d'obtenir un plus petit nombre de variables non corrélées nommées « composantes principales », qui sont des combinaisons linéaires des variables initiales. Les composantes principales étant des subdivisions de la variance totale des variables initiales, la première composante (C_1) est la combinaison linéaire des variables initiales dont la contribution à la variance totale est la plus élevée comme le montre l'équation 2 (Jambu, 1991; Li *et al.*, 2012; Malhotra, 2011; OECD, 2008; Pituch et Stevens, 2016). La deuxième composante principale non corrélée (C_2), représentée par l'équation 3, est établie de telle sorte qu'elle compte pour la deuxième contribution à la variance totale la plus élevée et ainsi de suite pour l'obtention des autres composantes principales (C_p) (équation 4) jusqu'au nombre, limite p.

$$C_1 = W_{11}Z_1 + W_{12}Z_2 + \dots + W_{1p}Z_p \quad (2)$$

$$C_2 = W_{21}Z_1 + W_{22}Z_2 + \dots + W_{2p}Z_p \quad (3)$$

$$C_p = W_{p1}Z_1 + W_{p2}Z_2 + \dots + W_{pp}Z_p \quad (4)$$

C_1, C_2, C_p sont les composantes principales retenues, P est le nombre de composantes principales retenues qui constituent la plus grande partie de la variance totale des variables initiales normalisées Z_1, Z_2, Z_p . W_{11}, W_{21}, W_{n1} qui sont les coefficients de pondération ou scores factoriels des composantes principales. Dans le cas où les scores factoriels sont transformés de telle sorte que $W_1^T W_1 = 1$ avec $W_1 = W_{11}, W_{12}, \dots, W_{1p}$, la variance C_1 est égale à la valeur propre la plus élevée de la matrice de covariance de l'échantillon utilisé. Par conséquent, la plus grande valeur propre du vecteur propre équivaut aux scores factoriels de C_1 et ainsi de suite pour C_n (Pituch et Stevens, 2016). En bref, le but visé de cette analyse ACP est l'obtention d'un nombre de facteurs principaux relativement faibles occupant la plus grande partie de la variance totale des variables initiales. L'ACP a été réalisé en utilisant le logiciel *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS). La prochaine étape après l'extraction des composantes principales est la détermination du nombre de composantes à retenir.

b) Le nombre de composantes principales à retenir

Les critères de détermination du nombre de composantes principales à retenir qui ont été utilisés dans cette étude sont les suivants : le critère de Kaiser, le test du coude, le critère de la variance expliquée.

- Critère de Kaiser : En utilisant ce critère, les composantes principales, dont les valeurs propres supérieures 1, sont uniquement retenues. La variance de la composante principale est représentée par sa valeur propre. Après la normalisation des indicateurs initiaux, leurs variances sont égales à 1. Par conséquent, toute valeur propre inférieure à 1 n'est pas retenue parce qu'il n'est pas pertinent d'ajouter une composante principale dont la variance est inférieure à la variance expliquée par un indicateur.
- Test du Coude : Cette méthode du coude de (Cattell et Vogelmann, 1977) consiste à dresser un graphique des valeurs propres en fonction du nombre de composantes principales et à utiliser la forme du graphique pour trouver le nombre de composantes principales à retenir. Le graphique comporte une partie dont une cassure nette assortie d'une pente raide est observée pour les grandes valeurs propres et une partie déclinant progressivement vers le bas pour les autres valeurs propres. Le point de changement de concavité correspond en général au nombre de composantes principales à retenir.
- Critère de la variance expliquée : Les composantes principales contribuant à moins 60% de la variance totale sont retenues (Malhotra, 2011). Selon l'objectif de l'analyse, une contribution de 80% ou 90 % de la variance totale peut être requise (OECD, 2008).

c) La rotation des composantes principales

La rotation des composantes principales retenues facilite l'interprétation des résultats de l'ACP. La rotation consiste en un changement des axes (composantes principales) afin que chaque axe soit très corrélé avec certains indicateurs initiaux et peu corrélé avec les autres indicateurs. Les rotations sont subdivisées en deux catégories (Pituch et Stevens, 2016) : les rotations orthogonales composées des rotations *Quatrimax*, et *Varimax*, et les rotations obliques composées des rotations dont les plus importantes sont les rotations *Oblimin* et *Promax*. Dans cette

présente étude, la rotation *varimax* a été utilisée pour faciliter l'interprétation des résultats de l'ACP. *Varimax* est une méthode de rotation orthogonale qui minimise le nombre d'indicateurs très corrélé avec chacune des composantes principales pour simplifier l'interprétation des composantes principales. Les coefficients de corrélations entre chacune des composantes principales et les indicateurs initiaux après la rotation sont nommés loading et sont utilisés pour l'identification des indicateurs explicatifs. Le logiciel SPSS a été utilisé pour effectuer l'ACP avec rotation *varimax*.

d) Détermination des indicateurs explicatifs et des coefficients de pondération des composantes principales

Les indicateurs explicatifs sont des indicateurs ayant des loading significatifs après la rotation des composantes principales. (Malhotra, 2011) suggère de considérer comme indicateurs explicatifs de chaque composante principale les indicateurs dont les loading sont les plus élevés. Les règles de détermination des indicateurs explicatives sont basées sur des considérations empiriques et peuvent être ajustées en fonction de l'objectif de l'analyse. Dans cette étude, les indicateurs explicatifs de chaque composante principale sont ceux dont les loading après rotation *varimax* sont supérieurs à 0.5.

e) Détermination des poids des indicateurs

Les poids donnent des indications sur l'importance relative de chaque indicateur dans la construction de l'IPFR. Le nombre de composantes principales retenues est le paramètre le plus important dans l'établissement des poids des indicateurs. Dans cette étude, le poids de chaque indicateur a été calculé en faisant le produit du score factoriel (coefficient de pondération) après rotation de l'indicateur explicatif et sa variance. Les équations 5 et 6 ont été utilisées pour la détermination des poids de chaque indicateur.

$$A_j = W_{jp} N_p \quad (5)$$

$$N_p = \frac{V_p}{\sum_{n=1}^p V_p} \quad p < n \text{ et } \forall j \quad (6)$$

Où

A_j : le poids de l'indicateur j

n : le nombre d'indicateurs

p : le nombre de composantes principales

j : le nombre d'indicateurs explicatifs

W_j : coefficient de pondération ou score factoriel de l'indicateur explicatif j de la composante principale p

N_p : Proportion de variance expliquée normalisée de la composante principale p

V_p : Proportion de variance expliquée par la composante principale p

5.2. Agrégation et calcul de l'indice de priorité de financement des routes (IPFR)

Les agrégations permettent de combiner les indicateurs et leurs différents poids en utilisant des méthodes d'agrégation linéaires ou géométriques pour la détermination du score total de chaque

projet. Dans cette étude, il a été assumé que les scores totaux des projets sont proportionnels au poids des indicateurs et que les indicateurs pouvaient se compenser entre eux, d'où le choix de la méthode d'agrégation linéaire. Les scores totaux des projets ont été calculés en utilisant l'équation 7.

$$IC_i = \sum_{j=1}^n A_j Z_{ij} \quad (7)$$

Où

IC_i : score total du projet i

A_j : poids de l'indicateur j

Z_{ij} : valeur normalisée de l'indicateur j du projet i

5.2.1. Calcul de l'IPFR

L'indice IPFR a été établi en mettant en échelle de 0 et 100 le score total. Dans cette étude, l'IPFR de chaque projet a été calculé par l'équation 8.

$$IPFR_i = \frac{IC_i - IC_{imin}}{IC_{imax} - IC_{imin}} \times 100 \quad (8)$$

Où

$IPFR_i$: indice de priorité de financement des routes du projet i compris entre 0 et 100.

IC_i : score total du projet i

IC_{imin} : score total minimum de l'ensemble des projets i

IC_{imax} : score total maximum de l'ensemble des projets i

6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1. Corrélations des indicateurs

Une bonne corrélation entre les indicateurs initiaux est requise pour l'utilisation de l'ACP. De plus, la multicolinéarité des indicateurs initiaux s'avère une condition nécessaire à l'interprétation des résultats de l'ACP. L'indice d'adéquation KMO et le test de sphéricité de Bartlett sont fréquemment utilisés comme des critères de vérification du degré de corrélation et de la multicolinéarité des indicateurs initiaux. Comme présenté dans le tableau 4, l'indice KMO est de 0.637, ce qui est supérieur à 0.5 (Malhotra, 2011) et l'hypothèse nulle est rejetée puisque le test de sphéricité de Bartlett donne un khi-deux de 464,976 avec 6 degrés de liberté significatifs à 5% (p-value inférieur à 5%). Par conséquent, l'ACP est approprié à cette étude. Certains analystes dans leurs travaux de recherches ne recommandent l'application de l'ACP que si le KMO est au moins égal à 0.6 (Antony et Rao, 2007). Avec un KMO de 0.637 (tableau 4),

cette condition est satisfaite. En plus de la corrélation et de la multicolinéarité, les données de l'échantillon statistique de cette étude sont toutes quantitatives puisqu'elles ont été transformées et normalisées. En outre, l'échantillon de cette étude a été composé avec 50 projets routiers (25 projets de construction et 25 projets de préservation) et de 15 indicateurs dont le rapport projet sur indicateur est supérieur à 3 :1 suggéré par (OECD, 2008). Le rapport 3 :1 est aussi supérieur au rapport 2 :1 recommandé par (Costello et Osborne, 2005). En somme, l'ACP est applicable aux données de cette étude et les résultats interprétables.

6.2. Nombre de composantes principales retenues

L'interprétation des résultats de l'ACP commence par la détermination du nombre de composantes principales à retenir. Puisqu'il y a autant de composantes que de nombres d'indicateurs, certains critères devront être appliqués pour extraire le nombre de composantes principales pertinentes à l'étude. Le tableau 5 présente les résultats de l'extraction des composantes avec une rotation *varimax* pour faciliter l'interprétation. Les cinq (5) premières composantes sont les composantes principales conformément au critère de Kaiser, étant donné que leurs valeurs propres sont toutes supérieures à 1. La contribution à la variance totale des composantes principales 1, 2, 3, 4 et 5 est respectivement de 21.75%, 17%, 12.79%, 11.65% et 10.45 %. Ainsi, les cinq (5) premières composantes contribuent à 73,64 % de la variance totale, ce qui est supérieur à 60% de la variance totale (Malhotra, 2011). Par conséquent, d'après le critère de la variance expliquée, les cinq (5) premières composantes sont encore retenues comme composantes principales. Le nombre de composantes principales peut aussi être déterminé par le critère de (Cattell et Vogelmann, 1977) en observant le graphique des valeurs propres représenté dans la figure 3. Ce faisant, un changement abrupt est décelé après la sixième (6^e) composante représentée par une cassure nette. Ainsi, toutes les composantes situées avant la cassure nette sont les composantes principales à retenir dont le nombre est de 5. Donc, les trois (3) critères convergent tous vers 5 composantes principales, ce qui signifie que tous les 15 indicateurs initiaux peuvent être représentés par seulement 5 composantes principales. Il est très rare que le nombre de composantes principales soit égal au nombre des dimensions spécifiées dans le cadre théorique et conceptuel, étant donné que le nombre de composantes principales à retenir est basé purement sur des critères statistiques alors le nombre de dimensions dépend des considérations des experts multidisciplinaires et des décideurs (bailleur de fonds et administration routière). Néanmoins, en

Tableau 4 : Indice KMO et Test de sphéricité de Bartlett

Indice de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)		0,637
Test de sphéricité de Bartlett	Khi-deux	464,976
	Degré de liberté	105
	Signification	0,000

considérant le loading le plus élevé dans chacune des composantes principales, les composantes 1 et 4 peuvent être qualifiées de *technique*, la composante 2 d'environnementale et les composantes 3 et 5 de *sociaux*. De plus, le fait de trouver plusieurs composantes principales indique clairement la nature multidimensionnelle du phénomène mesuré. Donc, la considération d'une seule composante principale n'est pas recommandée pour l'établissement des poids des indicateurs. À la suite de la détermination des cinq (5) composantes principales, la

prochaine étape est l'identification des indicateurs explicatifs et la détermination des poids des indicateurs initiaux.

6.3. Indicateurs explicatifs et coefficients de pondération des composantes principales

Les indicateurs explicatifs sont des indicateurs initiaux donc les loading sont supérieurs à 0.5. En rappel, les loading sont

Tableau 5 : Résultats de l'extraction des composantes principales avant et après rotation

Composante	Valeurs propres initiales			Sommes extraites du carré des chargements			Sommes de rotation du carré des chargements		
	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé	Total	% de la variance	% cumulé
1	4,290	28,599	28,599	4,290	28,599	28,599	3,263	21,750	21,750
2	2,452	16,347	44,946	2,452	16,347	44,946	2,550	16,999	38,750
3	1,863	12,421	57,367	1,863	12,421	57,367	1,918	12,789	51,538
4	1,409	9,396	66,762	1,409	9,396	66,762	1,748	11,650	63,188
5	1,031	6,873	73,635	1,031	6,873	73,635	1,567	10,447	73,635
6	0,942	6,281	79,916						
7	0,715	4,768	84,684						
8	0,630	4,199	88,883						
9	0,458	3,052	91,934						
10	0,401	2,675	94,609						
11	0,377	2,515	97,124						
12	0,181	1,204	98,328						
13	0,147	0,978	99,306						
14	0,094	0,627	99,933						
15	0,010	0,067	100,000						

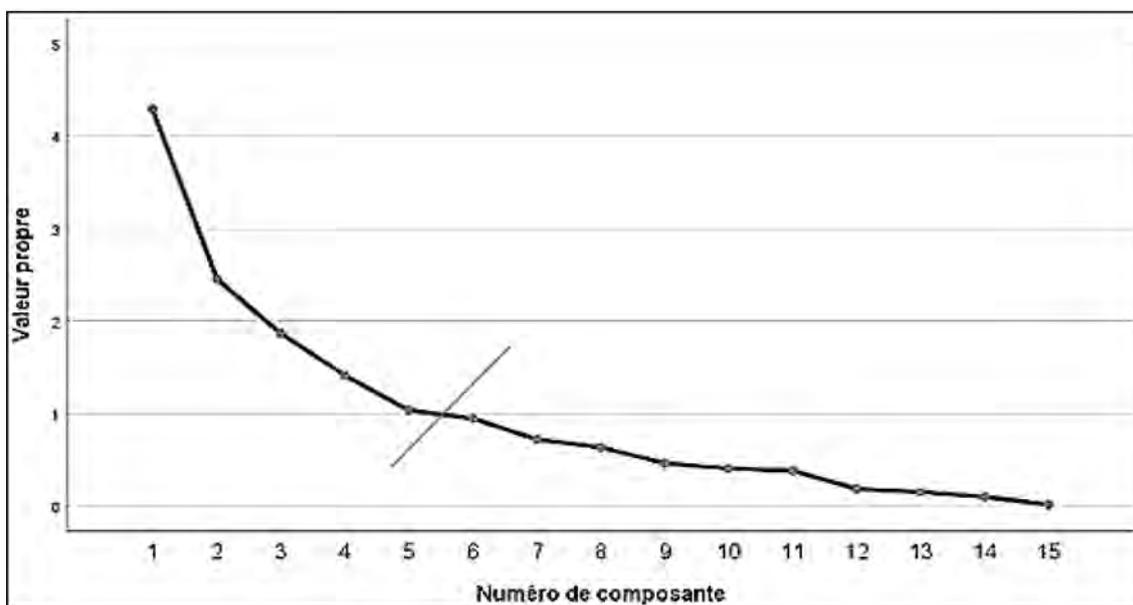


Figure 3 : Graphique des valeurs propres

des coefficients de corrélation entre les indicateurs initiaux et chaque composante principale et leurs valeurs sont comprises entre -1 et 1. La matrice des loading telle que présentée dans le tableau 6 a été obtenue après rotation *varimax* pour faciliter l'identification des indicateurs explicatifs (en italique et gras). Le signe négatif des valeurs de certains loading indique que la corrélation entre les indicateurs et de la composante principale est considérée est négative; ceci ne veut pas dire que la corrélation est faible, mais indique que les indicateurs de cette composante principale doivent être interprétés en sens inverse et que ces indicateurs contribuent négativement à la variance totale de la composante principale concernée. L'exemple du loading de l'indicateur PE présenté dans le tableau 6 prouve sa contribution négative à la composante principale 1. (Costello et Osborne, 2005) recommandent de considérer comme indicateurs explicatifs d'une composante principale les indicateurs dont les valeurs absolues des loading sont supérieures à 0.5. Des chercheurs comme (Doukas et al., 2012; Keeley et McDonald, 2015; Ouyang et al., 2006; Shrestha et Kazama, 2007) ont considéré comme indicateurs explicatifs les indicateurs initiaux ayant des loading au moins égaux à 0.8 dans leurs études. Cependant, le critère de loadings au moins égaux à 0.5 est le plus recommandé par les livres de référence (Freudenberg, 2003; Jambu, 1991) qui ont été consultés pour la réalisation de cette étude. Les indicateurs explicatifs peuvent alors être considérés comme les indicateurs les plus influents (positivement ou négativement) de chacune des composantes principales. Il est important de mentionner aussi qu'avec la rotation *varimax*, chaque indicateur explicatif correspond à une et une seule composante principale; ceci signifie qu'une composante principale peut avoir plusieurs indicateurs explicatifs, mais les cinq (5) composantes principales ne peuvent jamais avoir le même indicateur explicatif simultanément. Dans le cas échéant, l'interprétation et la

détermination des coefficients de pondération deviennent une tâche complexe. Ainsi, tels qu'indiqués dans le tableau 7, les indicateurs explicatifs de la composante principale 1 sont : TJMA-VL, CPCVEV, PE ; les indicateurs explicatifs de la composante principale 2 sont : IRI, RCCVU, SSB, ZES, LPE ; les indicateurs explicatifs de la composante principale 3 sont : M, UT ; les indicateurs explicatifs de la composante principale 4 sont : TJMA-PL, CPCVTT ; et les indicateurs explicatifs de la composante principale 5 sont : L, POP.

Après l'identification des indicateurs explicatifs dans le tableau 6, les coefficients de pondération ou scores factoriels (en italique et gras) correspondant à chaque indicateur explicatif sont identifiés dans la matrice des coefficients des composantes présentées dans le tableau 7. Ainsi, chaque composante principale est estimée par les équations 9, 10, 11, 12 et 13 suivantes :

$$C_1 = 0.297 Z_{TJMA-VL} + 0.250 Z_{CPCVEV} - 0.370 Z_{PE} \quad (9)$$

$$C_2 = 0.215 Z_{IRI} + 0.276 Z_{RCCVU} - 0.255 Z_{SSB} + 0.293 Z_{ZES} + 0.237 Z_{LPE} + 0.228 Z_{ZE} \quad (10)$$

$$C_3 = 0.493 Z_M + 0.374 Z_{UT} \quad C_3 = 0.493 Z_M + 0.374 Z_{UT} \quad (11)$$

$$C_4 = 0.554 Z_{TJMA-PL} + 0.358 Z_{CPCVTT} \quad (12)$$

$$C_5 = 0.507 Z_L + 0.553 Z_{POP} \quad (13)$$

La suite de l'analyse consiste maintenant à calculer le poids de chaque indicateur (coefficient de pondération globale) en se basant sur les cinq (5) composantes principales.

Tableau 6 : Matrice des loading : rotation Varimax

Indicateur	Composante				
	1	2	3	4	5
L	-0,226	-0,229	-0,060	0,262	0,754
IRI	-0,308	0,627	0,168	-0,502	0,074
TJMA-VL	0,905	-0,094	0,208	0,240	0,026
TJMA-PL	0,319	-0,163	-0,058	0,873	-0,009
CPCVEV	0,875	0,035	0,269	0,332	0,041
CPCVTT	0,495	0,129	0,425	0,595	0,287
RCCVU	0,256	0,641	0,515	-0,029	0,200
POP	0,205	0,133	0,030	-0,148	0,842
SSB	0,244	-0,647	0,292	0,012	0,057
M	-0,075	-0,178	0,842	-0,091	0,133
UT	0,192	-0,122	0,634	0,081	-0,225
ZES	-0,047	0,733	-0,032	-0,071	0,008
LPE	-0,452	0,531	-0,263	0,304	-0,284
PE	-0,844	0,021	0,158	-0,086	0,051
ZE	0,239	0,581	-0,176	-0,045	-0,060

Tableau 7 : Matrice des coefficients de pondération des composantes

Indicateur	Composante				
	1	2	3	4	5
L	-0,175	-0,068	-0,061	0,220	0,507
IRI	-0,032	0,215	0,125	-0,228	0,050
TJMA-VL	0,297	-0,009	-0,007	-0,048	-0,029
TJMA-PL	-0,078	0,013	-0,027	0,554	-0,020
CPCVEV	0,250	0,054	0,043	0,045	-0,025
CPCVTT	-0,014	0,122	0,195	0,358	0,129
RCCVU	0,032	0,276	0,266	0,006	0,079
POP	0,102	0,045	-0,103	-0,161	0,553
SSB	0,054	-0,255	0,113	-0,094	0,001
M	-0,146	-0,056	0,493	-0,008	0,009
UT	-0,033	-0,024	0,374	0,048	-0,217
ZES	0,003	0,293	0,004	0,025	0,013
LPE	-0,225	0,237	-0,021	0,380	-0,153
PE	-0,370	0,005	0,218	0,166	0,041
ZE	0,145	0,228	-0,124	-0,053	-0,025

6.4. Poids des indicateurs

Le poids de chaque indicateur représente son importance par rapport aux indicateurs dans la construction de l'IPFR. Des indicateurs ayant des poids élevés influencent plus l'IPFR que ceux ayant des poids faibles ou négatifs. Le tableau 8 présente la contribution à la variance totale des cinq (5) composantes principales retenues. Ces variances sont normalisées conformément à l'équation 6 comme cela est présenté dans le tableau 9. Ainsi, le poids chaque indicateur présenté dans le tableau 10 est le produit de l'indicateur explicatif et de la variance normalisée de sa composante principale correspondante comme cela est spécifié par l'équation 5. Des chercheurs comme (Antony et Rao, 2007; Krishnan, 2010) ont déjà utilisé une procédure

similaire pour déterminer les poids des indicateurs et ont conclu que cette méthode était pertinente et appropriée pour l'évaluation de l'importance des indicateurs en vue d'une utilisation ultérieure. Après la détermination des poids de chaque indicateur comme présenté dans le tableau 10, la prochaine étape est le calcul du score global de chaque projet routier.

6.5. Scores totaux des projets

Le score total de chaque projet routier déterminé par l'équation 7 de la section méthodologie est la combinaison linéaire des poids des indicateurs (tableau 10) et des valeurs normalisées des indicateurs. Les scores totaux des projets sont proportionnels aux

Tableau 8 : Variance expliquée des composantes principales

Composantes principales					
1	2	3	4	5	% de variance totale
21,75	17,00	12,79	11,65	10,45	73,64

Tableau 9 : Variance expliquée normalisée des composantes principales

Composantes principales normalisées					
1	2	3	4	5	% de variance totale
0,30	0,23	0,17	0,16	0,14	1,00

Tableau 10 : Coefficient de pondération global des indicateurs

Indicateurs	Poids ou coefficient de pondération
L	0,072
IRI	0,050
TJMA-VL	0,088
TJMA-PL	0,088
CPCVEV	0,074
CPCVTT	0,057
RCCVU	0,064
POP	0,078
SSB	-0,059
M	0,086
UT	0,065
ZES	0,068
LPE	0,055
PE	-0,109
ZE	0,053

poids des indicateurs. Par conséquent, plus les poids des indicateurs sont élevés et positifs, plus les scores totaux des projets seront élevés. À l’opposé des poids négatifs, des indicateurs produiront des scores totaux plus faibles. Comme présenté dans le tableau 10, les poids des indicateurs du trafic (TJMA-VL, TJMA-PL), de la population (POP), des coûts d’exploitation des véhicules (CPCVEV) et la longueur (L) sont les plus élevés (>0.07), donc ils influenceront positivement les scores totaux ; les poids des indicateurs IRI, CPCVTT, RCCVU, UT, ZES, LPE et ZE sont moyens et positifs (> 0,05 et < 0,07), donc ils exerceront une moyenne influence positive sur les scores totaux ; alors que les poids des indicateurs SSB et PE sont négatifs, donc ils contribueront à réduire considérablement les scores totaux des projets. Dans d’autres études, des indicateurs dont les poids étaient très faibles ont été exclus du calcul des scores totaux des projets (Farhan *et al.*, 2017). L’écart entre les poids n’est pas très élevé. Par conséquent, l’ensemble des poids des indicateurs sont utilisés pour le calcul des scores totaux des projets. La dernière étape subséquente au calcul du score total de chaque projet est l’établissement de l’IPFR.

6.6. Indice de priorité des financements (IPFR) et classements des projets routiers

L’IPFR de chaque projet consiste simplement en la mise en échelle de 0 à 100 de son score total en utilisant l’équation 8 présentée dans la section méthodologie. Les cinquante (50) projets routiers dont vingt-cinq (25) projets de construction et vingt-cinq (25) projets de préservation sont ensuite classés en ordre décroissant en fonction de leurs indices de priorité de financement comme présenté dans la figure 4 et 5 et 6. Les projets,

dont les codes, commencent par les lettres A et P sont respectivement des projets de construction et des projets de préservation. Les projets routiers sont par la suite subdivisés par niveau de priorité comme présenté dans le tableau 11. Ainsi, les projets de priorité « très élevée à moyenne » sont présentés dans la figure 4, « faible » dans la figure 4 et « très faible » dans la figure 5. Dans les figures 4, 5 et 6, le projet en couleur rouge représente le projet à niveau de priorité « très élevé », les projets en couleur orange ont un niveau de priorité « élevé », les projets en jaune ont un niveau de priorité « moyen », les projets en couleur en verte claire ont une priorité « faible », et les projets en couleur vert foncé ont un niveau de priorité « très faible ».

Tableau 11 : Niveau de priorité des projets

Niveau de Priorité	Plage de l’IPFR
Très élevé	85-100
Élevé	60-84
Moyen	40-59
Faible	15-39
Très faible	5-14

Les résultats montrent que l’IPFR ne favorise pas un type de projet précis (construction ou préservation) par rapport à un autre, mais plutôt les projets dont la somme des performances dans les quatre (4) dimensions (technique, économique, sociale et environnementale) est élevée. Comme présenté dans figure 4, le projet de préservation P1 (IPFR = 100%) est le projet routier dont le financement est le plus prioritaire, suivi du projet construction A10 (IPFR = 82.24%) et du projet de préservation P2 (IPFR = 75.73%).

La figure 7 présente les répartitions des projets routiers par niveau de priorité et par type de projet (construction et préservation). Comme présenté dans le graphique a), les proportions de chaque type de projet par rapport à l'ensemble des projets et les longueurs des projets par priorité «très élevée», «élevée», «moyen», «faible» et «très faible» sont respectivement de 2% et 9.77 km (P1), de 4% et 48.6 km (A10 et P2), de 24%

487.24 km (P18, P17, A11, A5, P7, A16, P16, A24, A23, P10, A18, P15), de 50% et 846 km (P14, A13, A7, P20, P24, P22, P1, P6, P3, A25, A14, A12, A9, P25, A2, P13, A20, A19, A6, P12, A17, P11, P8 et A21) et de 20% et 149.km (A15, A22, A8, A1, P9, P21, P4, A4, P5 et P23). Les projets de construction et préservation de priorité « très élevée à moyenne » représentent respectivement des proportions de 50% et 50 % avec

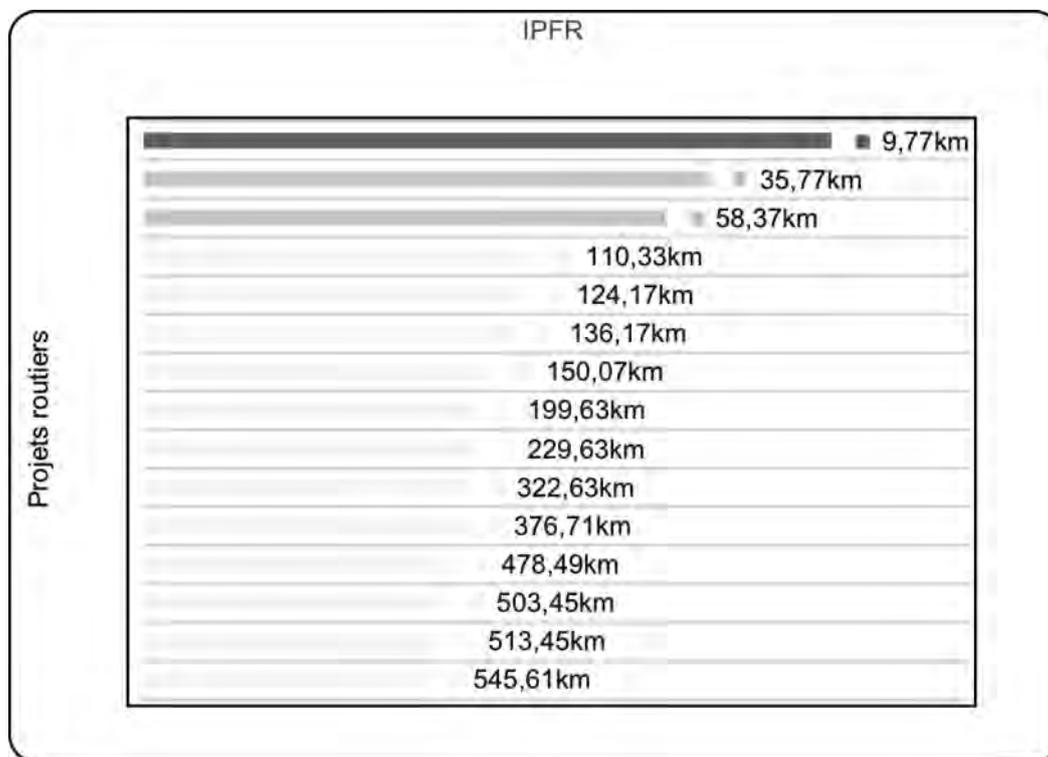


Figure 4 : IPFR des projets : Très élevé à moyen (40-100%)

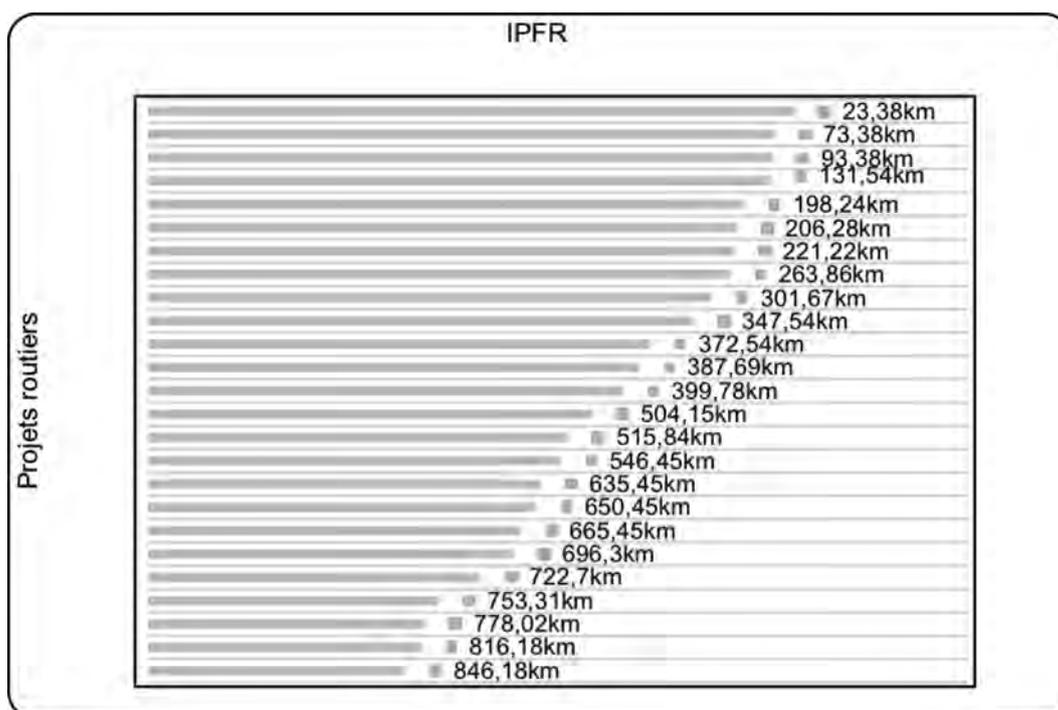


Figure 5 : Indice IPFR des projets : Faible (15-39%)

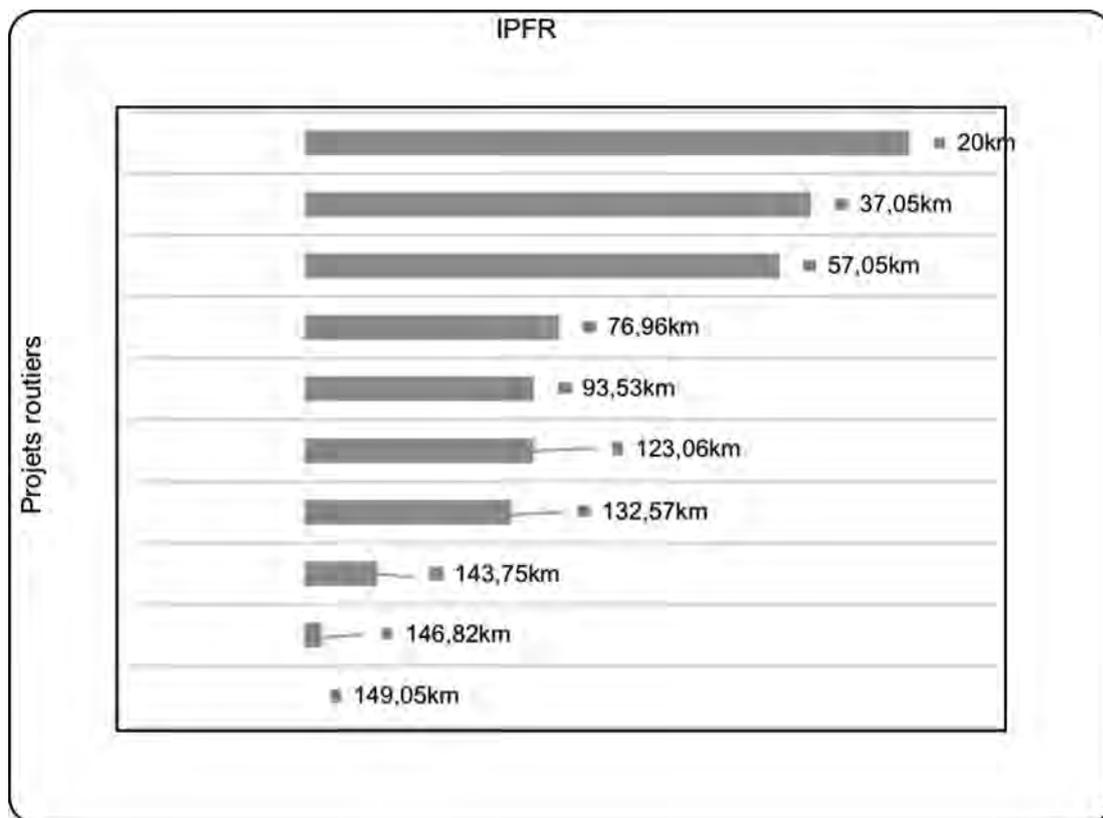
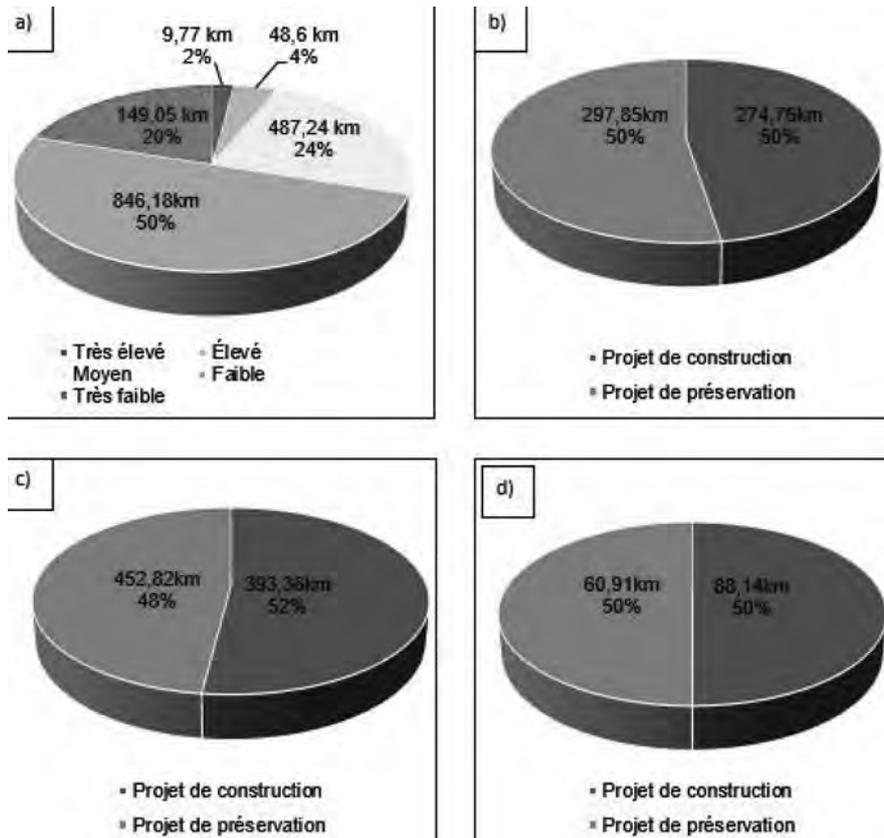


Figure 6 : Indice IPFR des projets : Faible (0-14%)

des longueurs de 274,76 km et 297,85 km (graphique b). Les projets de priorité « faible » comptent pour 52% de projets de construction et 48% de projets de préservation avec des longueurs de 393,36 km et 452,82 km (graphique c) et pour les projets de priorité « très faibles », 50% sont des projets de construction et 50 % des projets de préservation (graphique d). Il est important de préciser que l'IPFR est un outil d'aide à la prise de décision et que son but n'est pas de décider à la place des décideurs. Cependant, les administrations routières des pays en développement et les bailleurs finançant la majorité des projets routiers dans ces pays peuvent faire un tri préliminaire des projets routiers qu'ils considèrent de « haute priorité », dépendamment de leurs politiques et objectifs de financement des projets routiers en se basant sur un outil mathématique fiable qui n'est autre que l'IPFR. Le choix des projets admissibles au financement n'est qu'une phase préliminaire de sélection des projets de « haute priorité » de financement qui feront l'objet d'investigations plus approfondies pour l'analyse technico-économique avec HDM-4. Cette sélection à l'aide de l'IPFR permet de réduire considérablement le temps des évaluations préliminaires des chaussées et d'économiser des montants colossaux nécessaires pour des évaluations détaillées des chaussées. Les résultats de cette approche s'éloignent de l'approche traditionnelle des administrations des pays en développement, qui était de financer prioritairement les projets de construction sans aucune preuve palpable, souvent pour des prestiges politiques, délaissant ainsi les projets de préservation, ou les considèrent comme derniers recours.

Comme présenté dans la figure 8, les dix (10) premiers projets ont été assumés comme étant des projets de « haute priorité ».

Les dix (10) projets ont une longueur totale de 322,63 m dont six (6) projets de préservation d'une longueur de 240,73 km et quatre (4) de construction d'une longueur de 81,9 km. En prenant comme hypothèses que le coût de reclassement d'une route en graveleux latéritique en enduit superficiel bicouche (projet de construction) est de 288 102 \$USD/km et que le coût de préservation des routes en enduit superficiel est d'environ 5 580 \$USD/km, le budget pour la réalisation des projets de hautes priorités est environ de 24 938 827,2 \$USD dont 23 595 553,8 \$USD pour les projets de construction et de 1 343 273,4 \$USD pour les travaux d'interventions préventifs. Les coûts sont issus de la base des données sur les coûts des projets routiers en Afrique de la Banque mondiale (Bank, 2008). Les chaussées ou l'emprise des dix (10) projets routiers de « hautes priorités » sélectionnés feront l'objet ultérieurement d'études de trafic et de géotechnique plus détaillées et d'évaluations fonctionnelles et structurales exhaustives pour la détermination des intrants de conception et de programmation des travaux d'entretien. En effet, les intrants des chaussées non revêtues des projets de construction « haute priorité » seront utilisés dans le dimensionnement des chaussées en vue d'un reclassement en routes revêtues et dans l'analyse économique de cycle de vie pour vérifier si le reclassement est rentable, et aussi pour trouver le moment opportun de reclassement. En ce qui concerne les intrants des projets de préservation, ils serviront à l'établissement d'un programme pluriannuel ou de cycle de vie d'entretien sous contrainte budgétaire. Toutes ces analyses techniques et économiques seront réalisées avec le logiciel de la Banque mondiale HDM-4 comme déjà spécifié ci-dessus et feront probablement l'objet de deux prochains articles.



a) Répartition des projets par niveau de priorité
 b) Répartition des projets de priorité « très élevée à moyenne » par type

c) Répartition des projets de priorité « faible » par type
 d) Répartition des projets de priorité « très faible » par type

Figure 7 : Répartition des projets par niveau de priorité et par type

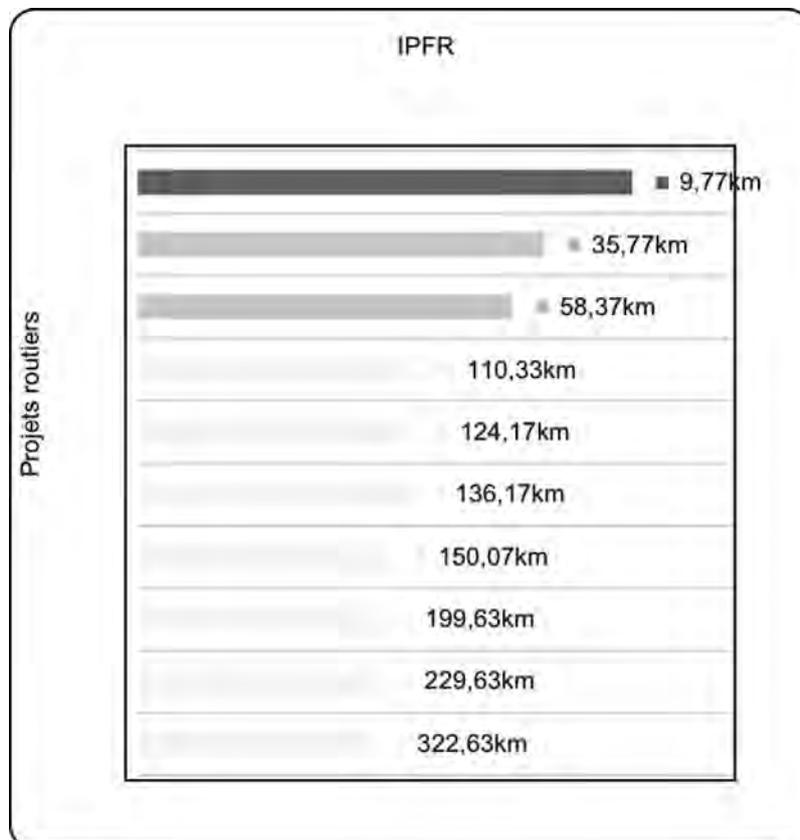


Figure 8 : Projets de « haute priorité »

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'évaluation des projets routiers en considérant les aspects techniques, économiques, sociaux, environnementaux est un phénomène multidimensionnel. L'IPFR développé dans cet article est basé sur les étapes de construction des indices composites et utilise l'ACP pour la pondération des indicateurs. L'IPFR, qui est un outil d'aide à la décision, a pour principal but la sélection des projets routiers (construction et préservation) de *haute priorité* d'une administration routière en l'Afrique de l'Ouest. Bien que l'ACP permette de déterminer les poids des indicateurs initiaux indispensables au développement de l'IPFR, les analystes doivent porter une attention particulière aux hypothèses fondamentales requises. L'indice d'adéquation KMO et le test de sphéricité de Barlett ont permis de justifier l'applicabilité de l'ACP et l'interprétation de ces résultats. Les résultats de l'ACP ont prouvé la nature multidimensionnelle du phénomène mesuré : 5 composantes principales expliquant 73,635 % de la variance ont été retenues, bien que le nombre de composantes principales diffère du nombre de dimensions. Le nombre de composantes principales peut être égal au nombre de dimensions, mais ces cas sont très rares, car leurs processus de détermination ou de sélection sont différents. Néanmoins, en fonction des loadings, les composantes 1 et 4 peuvent être qualifiées de techniques, la composante 2 d'environnementale et les composantes 3 et 5 de sociales. Les poids des indicateurs déterminés en se basant sur les indicateurs explicatifs et les contributions à la variance totale des cinq (5) composantes principales ont montré que les scores totaux des indicateurs sont plus influencés par les poids des trafics (TJMA-VL, TJMA-PL), de la population (POP), des coûts d'exploitation des véhicules (CPCVEV) et de la longueur (L), ce qui justifie l'importance des indicateurs de performances techniques et économiques dans la priorisation des projets routiers. Les valeurs des indices de priorité de financement ont permis la sélection des 10 premiers projets comme étant les projets de *haute priorité*, dont les niveaux de priorité varient entre très élevé et moyen. Ces projets routiers dits de *haute priorité* sont composés de 6 projets de préservation (P1, P2, P7, P16, P17, P18) et 4 projets de construction (A5, A10, A11 et A16). Le projet de préservation P1 est le plus prioritaire avec un IPFR de 100.

Les résultats indiquent qu'il est important de préserver les routes, mais aussi de construire de nouvelles routes à condition qu'elles soient justifiées par des IPFR élevés. Le projet de préservation P1 étant le projet le plus prioritaire avec IPFR égal à 100, il est important de mentionner la pertinence de la préservation des routes existantes, qui est l'un des problèmes majeurs chroniques des administrations routières des pays en développement et plus précisément de l'Afrique de l'Ouest. Cet article montre qu'il faut préserver d'abord le patrimoine routier, mais qu'il ne faut pas négliger la construction des routes surtout si elles ont des IPFR élevés. Donc, il y a aussi un grand besoin de construction de nouvelles routes ou de reclassement des routes en terre ou en graveleux latéritiques parce que la densité des routes et la proportion des routes non revêtues en Afrique subsaharienne restent faibles par rapport au reste du monde. En outre, si les bailleurs des fonds et les administrations routières font face à des budgets limités, ce qui est toujours le cas, il est

recommandé d'utiliser l'outil développé dans cet article pour la sélection des tronçons ou projets routiers de *haute priorité* en utilisant les données disponibles et accessibles de l'administration routière concernée avant de poursuivre avec des investigations plus approfondies sur ces tronçons ou projets réduits pour l'obtention des informations plus détaillées. Cette étude ne tenant pas compte de l'analyse de sensibilité et d'incertitude, il est très important de l'effectuer pour déterminer l'intervalle de variation du rang de chaque projet. Cependant, si les différentes parties prenantes parviennent à un consensus des méthodes de sélection, de normalisation et pondération, l'outil développé sera robuste. Les avantages de l'implémentation de l'IPFR seront d'autant plus énormes si les administrations routières ou les gouvernements des pays de l'Afrique de l'Ouest remplacent le cycle chronique de construire-négliger-reconstruire par une vision plus innovatrice, qui est de construire-entretenir-réhabiliter-entretenir. Peut-être qu'en plus des outils d'aide à la décision, l'approche de PDIA (Problem-Driven-Iterative-Approach) devrait être explorée pour permettre de renforcer la capacité de gestion des administrations routières des pays en développement.

RÉFÉRENCES

- [1] AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. 2012. « Pavement Management Guide Chapter Six : Project and Treatment Selection ». p. 30.
- [2] ADB. 2003. *Integrated environmental and social impact assesment guidelines*. Abidjan, Côte d'Ivoire: African Development Bank, 11 p.
- [3] Amiril, Assa, Abdul Hadi Nawawi, Roshana Takim et Siti Nur Farhana Ab Latif. 2014. « Transportation Infrastructure Project Sustainability Factors and Performance ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 153, p. 90-98.
- [4] Antony, G. M., et K. V. Rao. 2007. « A composite index to explain variations in poverty, health, nutritional status and standard of living: use of multivariate statistical methods ». *Public Health*, vol. 121, n° 8, p. 578-87.
- [5] Archondo-Callao, Rodrigo 2004. *Roads economic decision model : Softwareuser and case studies*. Washington, DC: Sub-Saharan Africa Transport Policy Program (SSATP), 118 p.
- [6] BAFD. 2015. *Procédures d'Évaluation Environnementale et Sociale (PEES)*. Abidjan, Côte d'Ivoire: Banque Africaine de Développement, 100 p.
- [7] Bandura, Romina 2008. *A Survey of Composite Indices Measuring Country Performance: 2008 Update*. New York: United Nations Development Programme, 96 p.
- [8] Bank, World. 2008. « Road costs knowledge system (ROCKS) ». < <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTROADSHIGHWAYS/0,,contentMDK:20485235~menuPK:1097394~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:338661,00.html> >. Consulté le 2018/0.7/25.
- [9] Beria, Paolo, Ila Maltese et Ilaria Mariotti. 2012. « Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: a comparative perspective in the assessment of sustainable

- mobility ». *European Transport Research Review*, vol. 4, n° 3, p. 137-152.
- [10] Bhandari, Sahadev Bahadur, Padma Bahadur Shahi et Rabindra Nath Shrestha. 2016. « Ranking rural road projects: weighting different evaluation criteria with a focus on the case of nepal ». *International Journal of Engineering Research and Science & Technology (IJERST)* vol. 5, n° 1, p. 24.
- [11] BOAD. 2015. Étude sur l'entretien routier dans les pays de l'union économique et monétaire Ouest Africaine (UEMOA) : bilan des 50 dernières années et perspectives. Ouagadougou, Burkina Faso: Union Economique et Monetaire Ouest Africaine, 318 p.
- [12] Burningham, Sally, et Natalya Stankevich. 2005. *Why road maintenance is important and how to get it done*. Transport Note No. TRN-4. Washington, DC: THE WORLD BANK, 10 p.
- [13] Cafiso, Salvatore, Alessandro Di Graziano, Henry R Kerali et J. B. Odoki. 2002. « Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management ». *Transportation Research Record 1*, n° 02, p. 12.
- [14] Cattell, Raymond B, et S Vogelmann. 1977. « Comprehensive Trial Of The Scree And Kg Criteria For Determining The Number Of Factors ». *Multivariate Behavioral Research*, vol. 12, n° 3, p. 289-325.
- [15] COST. 2007. *Selection and assessment of individual performance indicators*. United Kingdom: European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (COST).
- [16] Costello, Anna B, et Jason W Osborne. 2005. « Best Practices in Exploratory Factor Analysis: Four Recommendations for Getting the Most From Your Analysis ». *Practical Assessment, Research and Evaluation*, vol. 10, n° 7, p. 9.
- [17] DFID. 2002. *The Value of Time in Least Developed Countries*. United Kingdom: Department for International Development (DFID), 113 p.
- [18] DFID, Ministère britannique de développement international. 2016. *La préservation des routes nationales comme moteur du développement*. 2016R07FR. Paris: Association mondiale de la Route, 46 p.
- [19] Doukas, Haris, Alexandra Papadopoulou, Nikolaos Savvakis, Theocharis Tsoutsos et John Psarras. 2012. « Assessing energy sustainability of rural communities using Principal Component Analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n° 4, p. 1949-1957.
- [20] FAD. 2001. *Deuxième programme routier république du Burkina Faso*. Abidjan, Cote d'Ivoire: Fonds Africain de développement, 50 p.
- [21] Farhan, J., et T. Fwa. 2009. « Pavement Maintenance Prioritization Using Analytic Hierarchy Process ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2093, p. 12-24.
- [22] Farhan, Yahya, Ali Anbar, Nisrin Al-Shaikh et Rami Mousa. 2017. « Prioritization of Semi-Arid Agricultural Watershed Using Morphometric and Principal Component Analysis, Remote Sensing, and GIS Techniques, the Zerqa River Watershed, Northern Jordan ». *Agricultural Sciences*, vol. 08, n° 01, p. 113-148.
- [23] Freudenberg, Michael. 2003. « Composite Indicators of Country Performance ».
- [24] Friesen, C. E., P. Seliske et A. Papadopoulos. 2016. « Using Principal Component Analysis to Identify Priority Neighbourhoods for Health Services Delivery by Ranking Socioeconomic Status ». *Online J Public Health Inform*, vol. 8, n° 2, p. e192.
- [25] Fuquan, Pan, Jian John Lu et Qiaojun Xiang. 2008. « Influencing factors for safety level of service and its principal component analysis ». *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, p. 6.
- [26] Gitelman, Victoria, Etti Doveh et Shalom Hakkert. 2010. « Designing a composite indicator for road safety ». *Safety Science*, vol. 48, n° 9, p. 1212-1224.
- [27] Haas, Ralph, Guy Felio, Zoubir Lounis et Lynne Cowe Falls. 2009. « Mesurables performance indicators for road: Measurable Performance Indicators for Roads: canadian and international practice ». In *Best practices in urban transportation planning: measuring change*. (Vancouver, British Columbia), p. 22. Transportation Association of Canada.
- [28] Haas, Ralph, W. R. Hudson et J. P. Zaniewski. 1994a. « Modern Pavement Management ». In., p. 300. Malibar, FL: Krieger Publishing Company.
- [29] Haas, Ralph, W. Ronald Hudson et John Zaniewski (76). 1994b. *Modern Pavement Management* Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 579 p.
- [30] Healy, Leyden K, D Douthwaite, I Lumley, M Gibbons, A Murray, K. Farrell, B Guckian et P Johnston. 2007. *A sustainability assessment process for road-building and other development in Ireland*. Ireland: The foundation for economics sustainability, 71 p.
- [31] Jambu, Michel. 1991. *Exploratory and Multivariate Data Analysis*. San Diego, USA: Academic Press, Inc, 471 p.
- [32] Javed, Farhan. 2011. « Integrated prioritization and optimization approach for pavement management ». Phd. Singapore, National university of singapore, 215 p.
- [33] Kaan, Ozbay, Jawad Dima, A. Parker Neville et Hussain Sajjad. 2004. « Life-Cycle Cost Analysis State of the Practice Versus State of the Art ».
- [34] Keeley, R. J., et R. J. McDonald. 2015. « Part III: Principal component analysis: bridging the gap between strain, sex and drug effects ». *Behav Brain Res*, vol. 288, p. 153-61.
- [35] Kerali, Henry G.R, et J.B Odoki. 2006. *Analytical Framework and Model Descriptions*. United Kingdom: World Road Association (PIARC), 15 p.
- [36] Krishnan, Vijaya 2010. « Constructing an Area-based Socioeconomic Index: A Principal Components Analysis Approach ». In *Early Childhood Intervention Australia*. (Australia), p. 26.
- [37] Kumar, R. Srinivasa (12). 2014. *Pavement evaluation and Maintenance Management system*. India: Universities Press (India) Private Limited, 560 p.
- [38] Lantran, Jean Marie, Jacques Baillon et Jean-Marc Pagès. 1994. *Road Maintenance and the Environment*. Washington, DC: World Bank, 168 p.
- [39] Li, Tao, Hongchao Zhang, Chris Yuan, Zhichao Liu et Chengcheng Fan. 2012. « A PCA-based method for construction of composite sustainability indicators ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, n° 5, p. 593-603.

- [40] Mainali, Brijesh, et Semida Silveira. 2015. « Using a sustainability index to assess energy technologies for rural electrification ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, p. 1351-1365.
- [41] Malhotra, Naresh (197). 2011. *Marketing research : An applied orientation*, 6. Upper Saddle River, NJ USA: Prentice Hall, Inc, 711 p.
- [42] Marcelo, Darwin, Cledan Mandri-Perrott, Schuyler House et Jordan Schwartz. 2016. *Prioritizing Infrastructure Investment: A Framework for Government Decision Making*. 7674. Washington DC: World Bank Group, 41 p.
- [43] Mata, Teresa M., Nídia S. Caetano, Carlos A. V. Costa, Subhas K. Sikdar et António A. Martins. 2013. « Sustainability analysis of biofuels through the supply chain using indicators ». *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 3, p. 53-60.
- [44] Mazziotta, Matteo, et Adriano Pareto. 2013. « Methods for constructing composite indices : one for all or all for one? ». *Italian Journal of Economics, Demography and Statistics*, vol. 17, n° 1, p. 14.
- [45] MCC. 2007. *Guidelines for Environment and Social Assessment*. Washington, DC: Millennium Challenge Corporation, 19 p.
- [46] OECD. 2008. *Handbook on Constructing Composite Indicators : Methodology and User Guide*. Organization for Economic Cooperation and Development, 162 p.
- [47] Osborne, Jason W, et Anna B Costello. 2004. « Sample size and subject to item ratio in principal components analysis ». *North Carolina State University*, vol. 9, n° 11, p. 9.
- [48] Ouyang, Y., P. Nkedi-Kizza, Q. T. Wu, D. Shinde et C. H. Huang. 2006. « Assessment of seasonal variations in surface water quality ». *Water Res*, vol. 40, n° 20, p. 3800-10.
- [49] PIARC. 2004. *The framework for performance indicators*. Paris, France: World Road Association, 128 p.
- [50] PIARC. 2012. *High level indicators management*. Paris, France: World Road Association, 59 p.
- [51] PIARC. 2013. *Best practices for the sustainable maintenance of rural roads in developing countries*. France: World Road Association, 47 p.
- [52] Pituch, A. Keenan, et P. James Stevens. 2016. *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences*, 6. New York: Routledge, 814 p.
- [53] Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, NY.
- [54] Saisana, Michaela, et Stefano Tarantola. 2002. *State-of-the-art Report on current methodologies and practices for composite indicator development*. Ispra: Joint Research Center, 72 p.
- [55] Shen, Liyin, Yuzhe Wu et Xiaoling Zhang. 2011. « Key assessment indicators for the sustainability of infrastructure projects ». *American Society of Civil Engineers*, vol. 137, n° 6, p. 11.
- [56] Shrestha, S., et F. Kazama. 2007. « Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan ». *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, n° 4, p. 464-475.
- [57] Tsamboulas, D, G. S Yiotis et K. D Panou. 1999. « Use of multicriteria methods for assessment of transport projects ». *Journal of Transportation Engineering*, vol. 125, n° 5, p. 8.
- [58] USAID. 2014. *Sector environmental guidelines : Rural roads*. Washington, DC: United States Agency for International Development 44 p.
- [59] Wirehn, L., A. Danielsson et T. S. Neset. 2015. « Assessment of composite index methods for agricultural vulnerability to climate change ». *J Environ Manage*, vol. 156, p. 70-80.
- [60] World Bank. 2006. « Road software tools ». < <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTROADSHIGHWAYS> >. Consulté le 25/06.
- [61] World Bank. 2017. *The world bank environmental and social framework*. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 121 p.
- [62] World Bank Group. 2010. *Cost-benefit analysis in world bank projects*. Washington, D.C.: World Bank, 82 p.

RÉTRO ANALYSE DE L'INSTABILITÉ DU VERSANT « PETIT D15 » SITUÉ SUR L'AUTOROUTE MARRAKECH – AGADIR AU MAROC

RETRO ANALYSIS OF THE INSTABILITY OF THE "PETIT D15" SLOPE LOCATED ON THE MARRAKECH - AGADIR HIGHWAY IN MOROCCO

Hakim AHMARI, Gabriel J. ASSAF

hakim_ahm@hotmail.ca

gabriel.assaf@etsmtl.ca

Département de génie de la construction, École de technologie supérieure
1100, Notre-Dame Ouest Montréal Québec, Canada H3C 1K3

1. INTRODUCTION

L'autoroute Marrakech/Agadir, d'une longueur de 233 km, se développe dans un contexte géologique difficile, avec un relief accidenté, entraînant des déblais et remblais de grande hauteur. L'excavation des déblais lors des travaux a fait apparaître des désordres et des instabilités de talus, dont le plus important est celui du déblai D15 dans les sections montagneuses du Haut Atlas. Il s'agit de l'un des points les plus difficiles du projet de l'autoroute Marrakech-Agadir avec un volume à excaver de l'ordre de 3,5 millions de m³ dans un terrain principalement rocheux. Les expertises réalisées sur le déblai D15 ont permis de distinguer trois zones (figure1) : zone 1, zone 2 et

zone 3 selon le mécanisme du glissement, la taille des masses instables ainsi que le type de sol.

- La zone 1 qui se situe dans l'extrême nord du D15 et qui a subi un glissement profond est caractérisé par la prédominance d'un sol argileux.
- La zone 2 : Constituée d'une alternance de grès et d'argilites.
- La zone 3: Constituée d'éboulis d'épaisseur importante et reposant sur les mêmes formations que la zone 2, elle était le siège de glissements plans des terrains superficiels.

Cette étude a pour objet d'effectuer une rétro analyse de l'instabilité de la pente «petit D15» située dans la zone 1 et de proposer une solution pour son confortement. Nous présentons d'abord une description sommaire du site étudié ainsi que les désordres

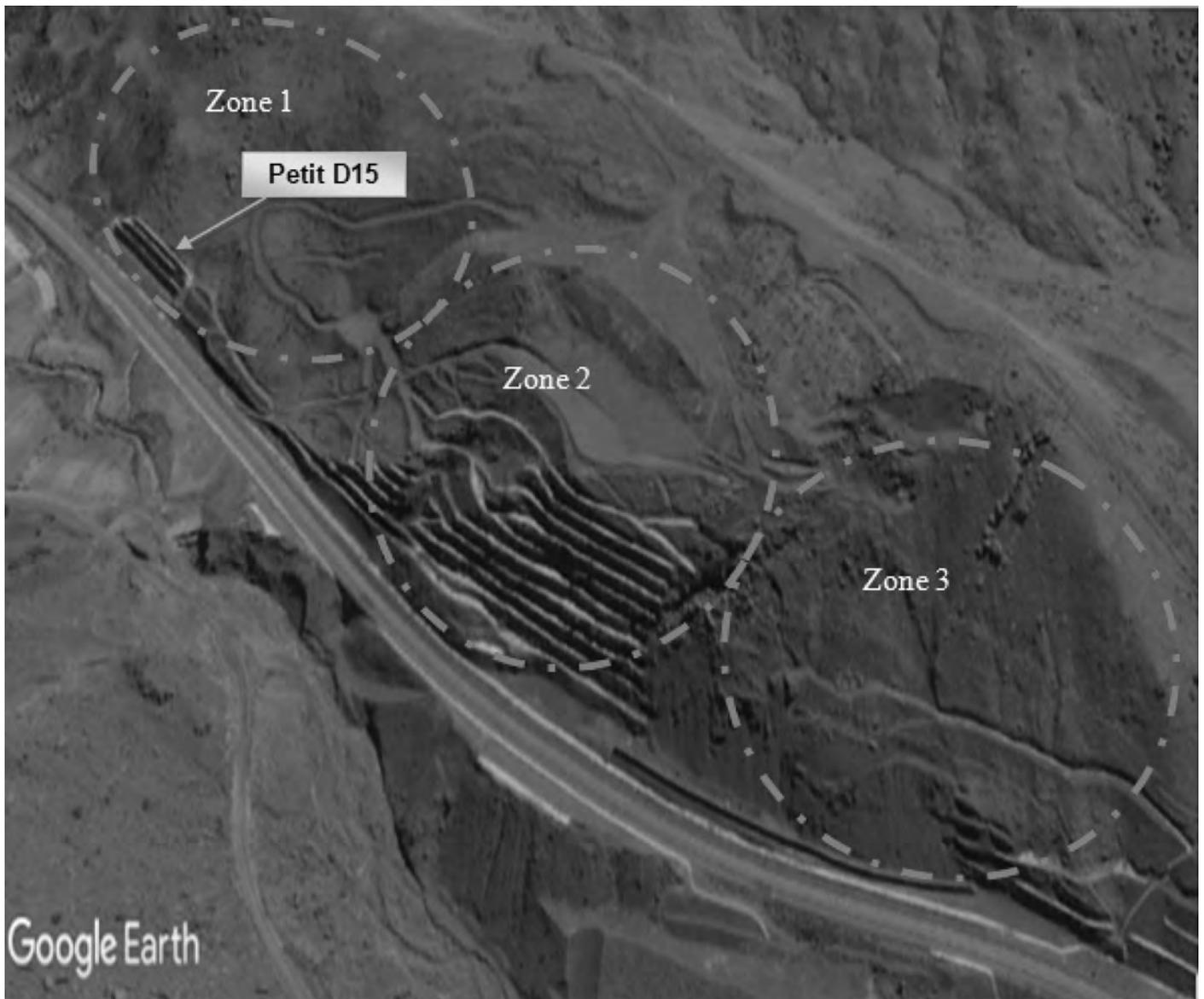


Figure 1 : Localisation du petit D15 par rapport au déblai D15

survenus dans le passé, par la suite nous allons effectuer une rétro analyse de l'instabilité de cette pente en utilisant premièrement la méthode des équilibres limites sur le logiciel Slide et deuxièmement la méthode des différences finies par le logiciel Flac. Nous discuterons enfin quelques solutions de confortement du versant permettant de parer à d'éventuelles instabilités.

1.1. Présentation du site et historique des désordres

Le « petit D15 » est un talus de 20 m de hauteur et d'une pente 1H/2V dans une argilite compacte à bloc, il a subi un glissement profond en phase d'exploitation (fin décembre 2010). Au moment de la rupture, la pente n'était pas instrumentée, il n'y a donc pas de mesures de déplacements disponibles avant la rupture. Mise à part la chute de blocs de roches observée quelques minutes avant l'effondrement global, peu de signes peuvent être associés à la rupture. Pour cette raison, la rupture analysée dans le cas d'étude est considérée comme étant

relativement soudaine. Le glissement s'est produit au niveau de formation d'argile, vraisemblablement du fait d'une surestimation de la résistance au cisaillement à long terme. Ceci illustre les difficultés d'appréciation de la résistance au cisaillement dans les formations argileuses à long terme, et notamment des variations de pressions interstitielles générées par l'excavation, qui augmentent les contraintes effectives à court terme, mais se dissipent sur de longues périodes du fait de la très faible perméabilité des argilites.

2. RÉTRO ANALYSE DE LA RUPTURE DU PETIT D15

La rétro analyse de l'événement met l'accent sur les différents aspects entourant la dégradation de cette pente. Elle présente en premier lieu les résultats d'analyses en utilisant la méthode des équilibres limites sur le logiciel SLIDE et numérique des différences finies par le logiciel FLAC.

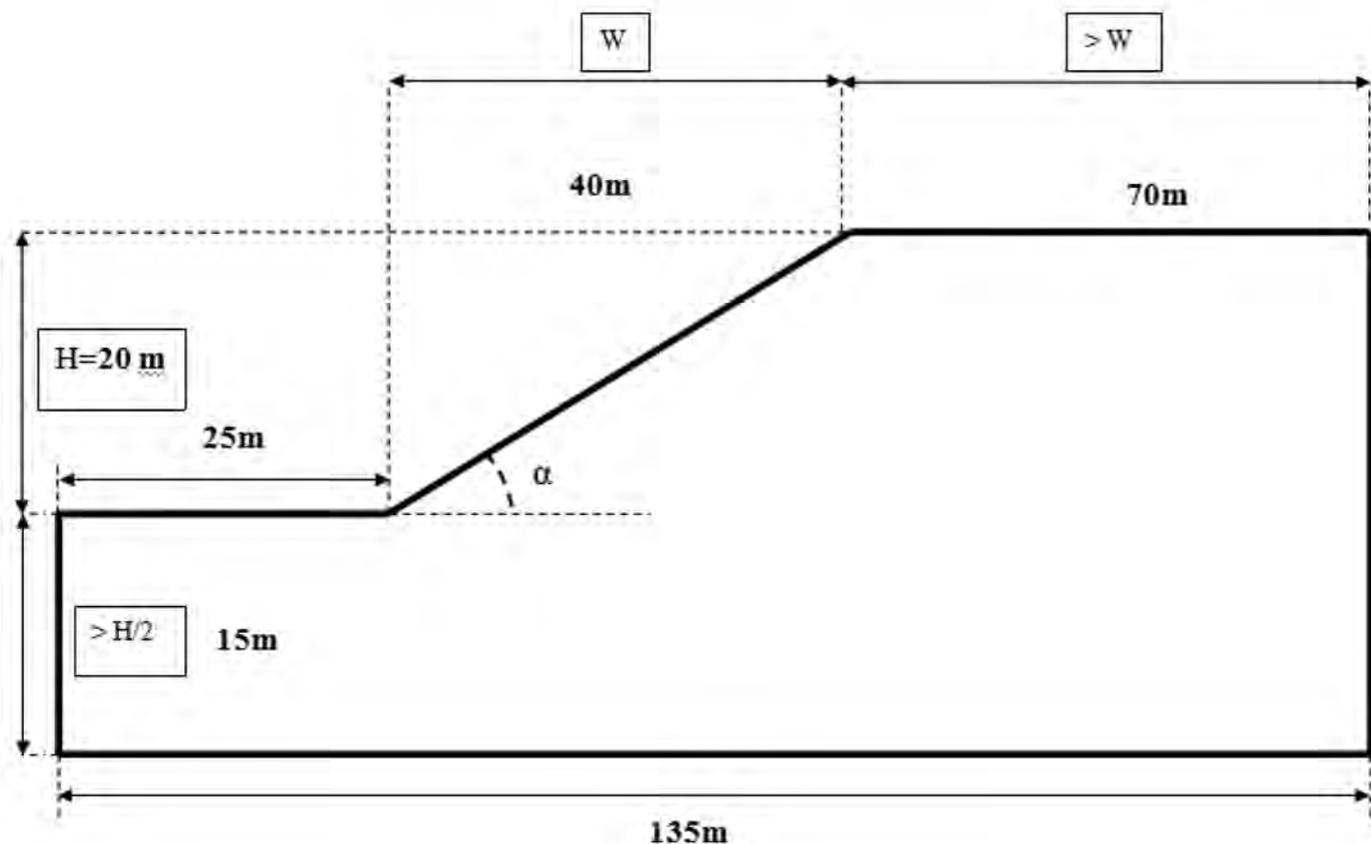


Figure 2 : Dimensions minimales pour un modèle en deux dimensions

2.1. Construction du modèle

La conception d'un modèle numérique requiert la définition de la géométrie et des limites physiques de la zone d'analyse. Elle correspond à la partie du talus qui sera l'objet d'une modélisation. Ceci nous incite à ne considérer qu'une partie de la structure, car la modélisation de la totalité du massif entraînerait d'une part des temps de calcul trop longs et d'autre part nécessiterait une mémoire informatique importante (plus la dimension d'un modèle sera importante, plus le temps de simulation sera long, Starfield et Cundall (1988)). Il est donc nécessaire de trouver un compromis et de se donner des critères pour déterminer les dimensions du volume à modéliser. Il s'agit d'un facteur important à considérer lors du dimensionnement de la zone d'analyse.

2.1.1. Définition de la zone d'analyse et position du problème

Les limites du modèle sont fonction des dimensions de la zone d'instabilité. Elles sont sélectionnées selon des considérations typiques de dimensionnement de modèle, Lorig (2000). Selon une coupe longitudinale (Figure 2), la hauteur de la base du modèle est plus élevée que la moitié de la hauteur de la projection de la pente selon la verticale (H). De plus, la longueur à l'arrière du sommet de la pente est plus élevée que la longueur de la projection de la pente selon l'horizontale (W). Ces règles de dimensionnement sont proposées pour des modèles numériques utilisant la méthode de résolution des différences finies.

Selon la figure 2, la hauteur de la projection de la pente selon la verticale (H) est 20 mètres alors que la hauteur déterminée de la base est d'environ de 15 mètres. De plus, la longueur de la projection de la pente selon l'horizontale (W) est de 40 mètres tandis que la longueur déterminée à l'arrière du sommet de la pente est d'environ 70 mètres. La largeur globale du modèle d'environ 135 mètres.

2.1.2. Localisation de la ligne de rupture

La nature du sol, les résultats de l'étude géotechnique ainsi que les constatations visuelles du site nous confirment que ce glissement est du type rotationnel qui se produit généralement dans la formation argileuse. De même, les calculs effectués en équilibre limite à l'aide du logiciel Slide (figure 3 (1)) et ceux effectués en différences finies à l'aide du logiciel Flac (figure 3 (2)) s'accordent avec les observations faites sur le terrain et confirment l'hypothèse d'une rupture circulaire. Notre étude sera basée sur l'hypothèse d'une rupture circulaire qui se développe au pied du talus.

2.2. Outils numériques utilisés

Les calculs ont été effectués à l'aide des deux logiciels suivants :

- Le logiciel Slide de calcul de stabilité des pentes rocheuses en ruptures circulaires et non circulaires par la méthode des tranches ;
- Le code de calcul FLAC en différences finies des ouvrages géotechniques par la méthode de réduction des paramètres de cisaillement.

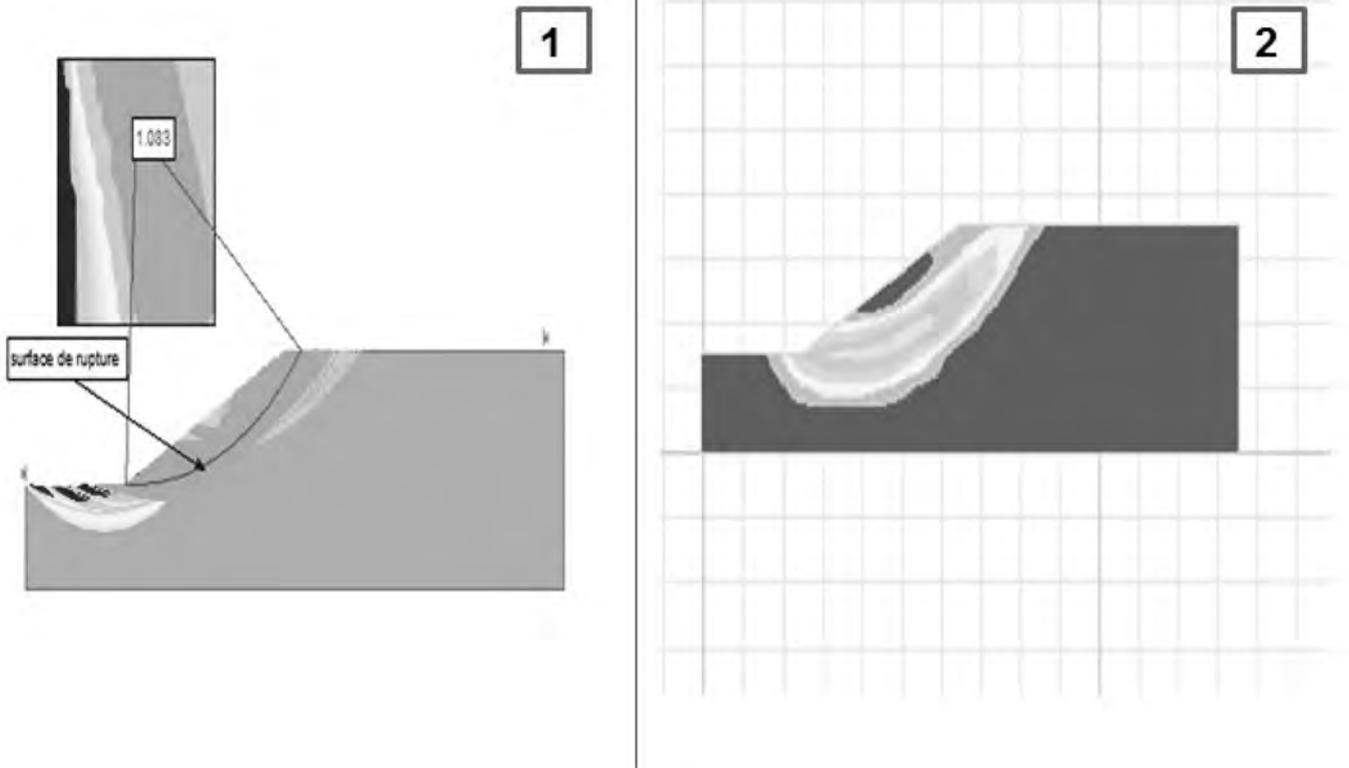


Figure 3 : Localisation de la ligne de rupture potentielle du talus à l'aide du logiciel slide (1) et à l'aide du logiciel Flac (2)

2.3. Analyse avec la méthode des équilibres limites (utilisation du logiciel SLIDE)

Le logiciel Slide, développé par Roc science inc. Toronto Canada est fréquemment utilisé pour l'analyse de la stabilité des talus rocheux. Ce logiciel est basé sur la méthode d'équilibre limite, qui peut être appliquée pour évaluer la stabilité des talus selon une surface de rupture circulaire ou non circulaire.

Une étude de stabilité statique et pseudo statique par le code de calcul Roc Slide a été menée sur le petit D15 dans le but d'étudier les causes qui ont conduit au déclenchement de cette instabilité. Les coefficients de sécurité ont été calculés en utilisant les méthodes de : Bishop simplifié, Fellenius, Spencer, Janbu simplifiée et Morgenstern-Price en considérant des surfaces de rupture circulaires.

Deux types d'analyse de stabilité ont été faits. Le premier est une analyse statique et le second une analyse pseudo-statique.

Le logiciel Slide ne permet pas d'introduire le schéma d'ondes dynamiques pour faire des analyses précises du comportement du massif lors d'un évènement sismique. Une analyse pseudo-dynamique doit donc être conduite avec une accélération sismique du site étudié. Par la suite, le facteur de sécurité est déterminé.

2.3.1. Caractéristiques mécaniques et hydrauliques du sol

Les caractéristiques mécaniques (tableau 1) et hydrauliques (tableau2) du sol ont été fixées à partir des données disponibles dans la littérature et des discussions avec des professionnels et des chercheurs qui ont participé au symposium international de la stabilité des talus rocheux fracturés qui s'est déroulé le mois d'avril 2014 à Marrakech, auquel j'ai eu l'occasion d'assister. Les résultats présentés dans cet article sont donc à prendre avec précaution, car ils sont largement dépendants des paramètres utilisés. Ils donnent des indications sur la stabilité de la pente étudiée.

Tableau 1 : Propriétés du sol formant le versant (petit D15)

Type de sol	Poids volumique (KN/m ³)	Angle de frottement (°)	Cohésion (kPa)	Bulkmodulus (Pa)	Shearmodulus (Pa)
Argile	18	29	10	10 ⁸	3*10 ⁷

Tableau 2 : Propriétés hydrauliques

Porosité	Perméabilité (m ² /Pa*s)	Water Bulk (Pa)	Water densité (kg/m ³)
0.3	10 ⁻¹⁰	10 ⁹	1000

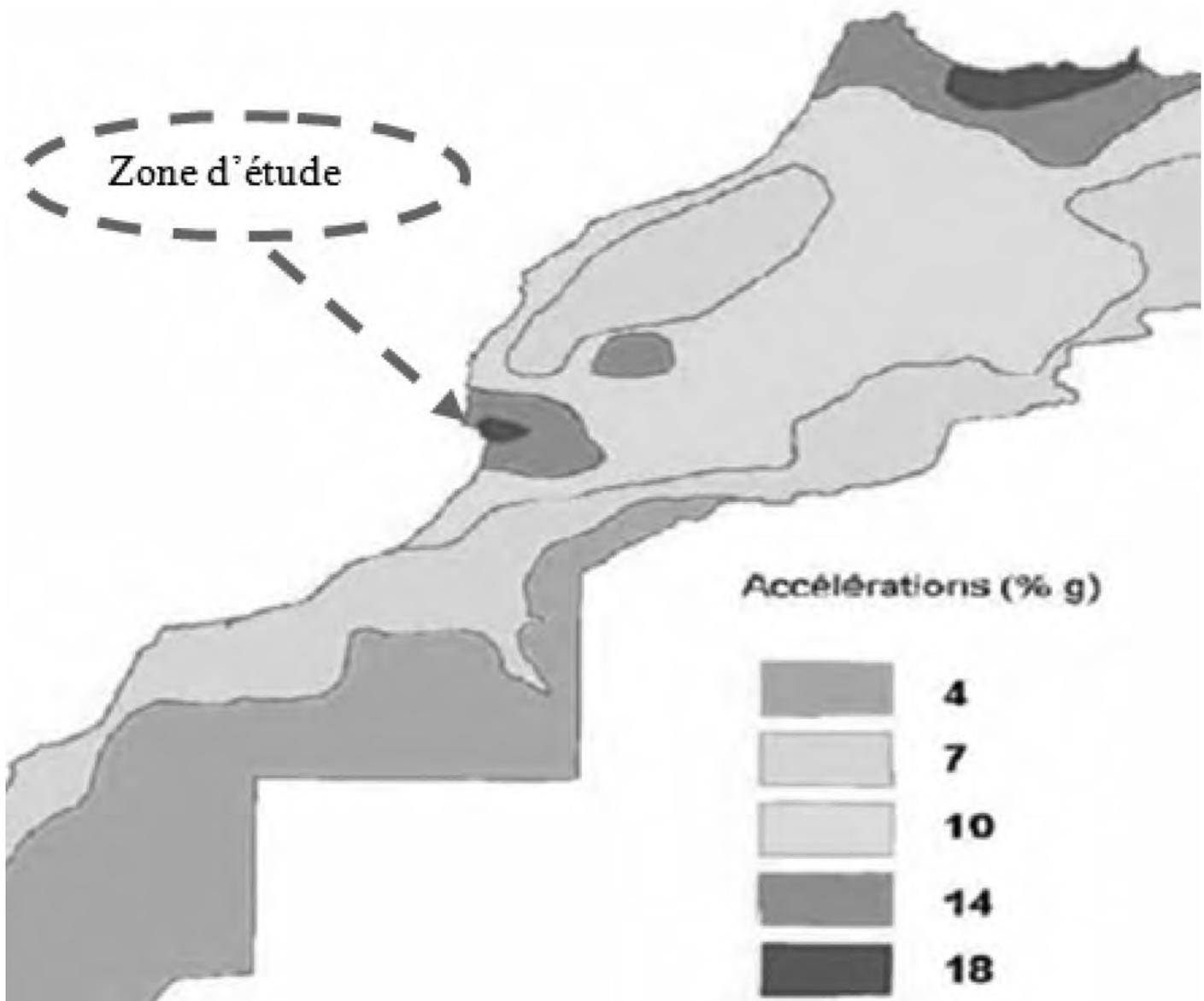


Figure 4 : Localisation du site selon la carte sismique marocaine

2.3.2. Caractéristiques sismiques du site d'étude

La zone du site (zone 5) est classée selon le règlement de construction parasismique marocain (RPS 2000-version 2011) comme une zone de sismicité élevée (figure 4).

Le tableau 3 ci-dessous donne les valeurs des coefficients pseudo-statiques horizontaux K_H et verticaux K_V pris en compte dans les calculs de stabilité sismique du versant.

2.3.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées pour l'ensemble des analyses sauf les analyses dynamiques sont choisies par défaut (les limites

verticales sont fixées horizontalement et la limite horizontale à la base du modèle est fixée horizontalement et verticalement. Pour l'analyse dynamique, la condition «free field» est utilisée.

2.3.4. Étude statique de stabilité du petit D15

2.3.4.1. L'effet du poids propre seul

Les résultats des analyses de la stabilité statique du petit D15 sous l'effet du poids propre seul en utilisant les différentes méthodes classiques utilisant la méthode des équilibres limites sont présentés dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 3 : Valeurs des coefficients sismiques K_H et K_V

Valeur de PGA (Peak Ground Acceleration)	0	0.06	0.12	0.18
Valeur de K_H	0	0.054	0.108	0.162
Valeur de K_V	0	0.0162	0.0324	0.0486

Tableau 4 : Résultats des différentes méthodes classiques

Méthode	Facteur de sécurité
• Bishop simplifié	1.590
• Fellenius	1.521
• Spencer	1.587
• Janbu simplifiée	1.505
• Morgenstern-Price	1.587
• Moyenne	1.558

Après calcul du coefficient de sécurité du versant par logiciel Slide sous l'effet de la charge gravitaire seule du talus, nous avons trouvé ($FS_{moy} = 1.558$), cette valeur montre clairement que le talus est stable sous l'effet du poids seul en l'absence de la nappe. Nous allons analyser par la suite sa stabilité sous l'effet combiné du poids et de l'eau.

2.3.4.2. Effet de la nappe

Dans notre cas d'étude, l'eau semble a priori avoir joué un rôle déterminant dans le déclenchement de cette instabilité dans la mesure où les mesures de résistivité électriques et les observations réalisées sur le site ont permis de mettre en évidence la présence d'un écoulement d'eau au niveau de couronnement de la montagne sur laquelle a été effectué le déblai D15.

Dans cette analyse, nous allons mener une analyse paramétrique avec quatre profondeurs de nappe différentes (H=5; 10; 15 et 20 m), ce qui permet d'une part de tenir compte des effets de l'eau sur la stabilité du talus, et d'autre part de savoir si le rabattement de la nappe pourrait être une solution de stabilisation. Cette analyse paramétrique est réalisée avec les différentes méthodes classiques pour les quatre profondeurs envisagées. Les différents résultats obtenus sont illustrés dans le graphique de la figure 5 ci-dessous.

D'après les résultats du graphique ci-dessous, nous remarquons que le facteur de sécurité diminue avec l'augmentation du niveau de la nappe, nous pouvons donc penser que l'eau a joué un rôle non négligeable dans le déclenchement de cette instabilité, d'autant plus que le déblai est constitué en son sommet d'un replat qui permet en cas de pluie de recueillir les eaux qui ne peuvent que s'infiltrer dans la masse en direction des couches les plus profondes. Ceci va faciliter l'affaiblissement des paramètres mécaniques et aussi l'apparition des pressions interstitielles agissant comme forces déstabilisatrices sur la zone en équilibre limite. Nous pensons donc que le rabattement de la nappe est une solution envisageable et recommandée pour la stabilité du talus petit D15.

2.3.5. Étude sismique de la stabilité du petit D15

L'analyse de stabilité sismique du versant a été effectuée par l'approche pseudo statique. Dans un premier temps nous allons calculer le facteur de sécurité sous l'effet du poids propre et du séisme, et par la suite nous allons analyser la réponse du talus à l'effet combiné à la fois du poids propre, du séisme et de l'eau. Le calcul du coefficient de sécurité pseudo-statique du versant repose sur les règles (RPS 2000, version 2011) qui permettent de définir les valeurs des coefficients pseudo-statiques horizontales et verticales à prendre en compte dans un calcul de stabilité.

2.3.5.1. Effet du poids propre et d'un séisme

Nous allons étudier le comportement sismique de notre talus afin de tenir compte du mécanisme des actions d'un séisme. Dans cette analyse de stabilité du talus sous sollicitation sismique, la méthode pseudo-statique avec le logiciel Slide est utilisée. Le tableau 5 ci-dessous regroupe les coefficients de sécurité (FS) calculés par cette méthode selon la variation des facteurs sismiques. Ces calculs ont été réalisés en supposant que les pressions d'eau sont nulles dans le talus.

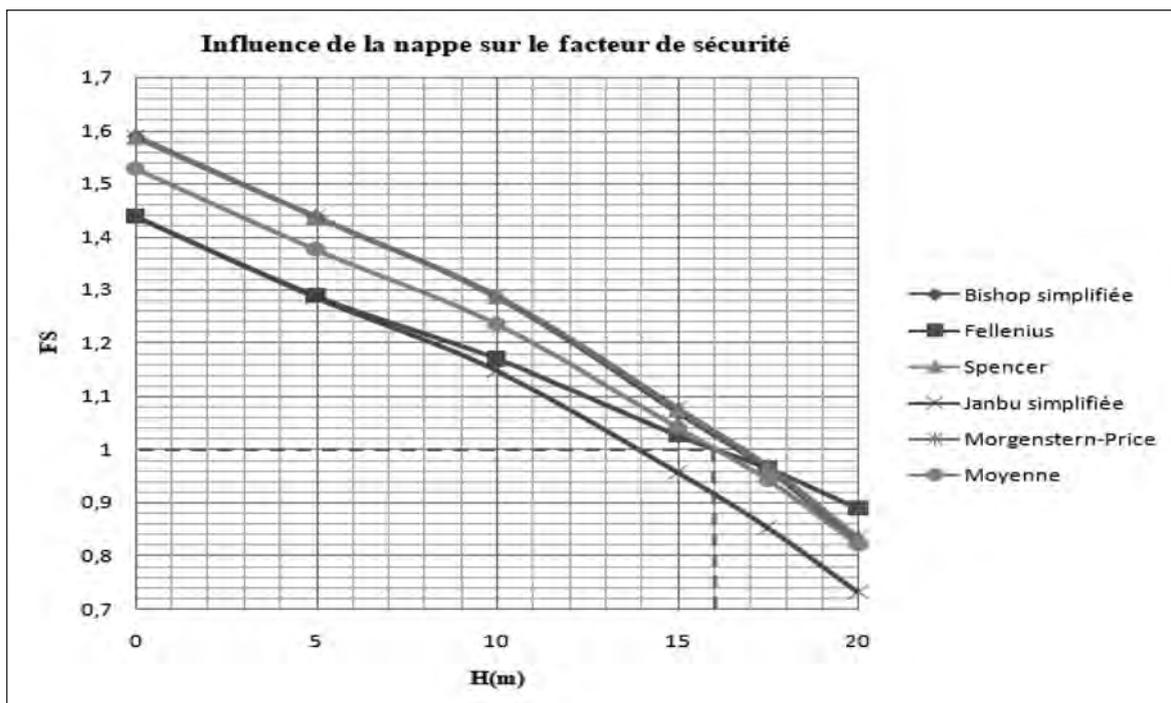


Figure 5 : Variation du FS par rapport au niveau de la nappe

Tableau 5 : Facteurs de sécurité en cas de séisme et sous l'effet du poids propre

Méthodes	Bishop simplifiée	Fellenius	Spencer	Janbu simplifiée	Morengstern-Price	Moyenne
PGA=0,06						
FS	1,406	1,343	1,402	1,328	1,401	1,376
PGA=0,12						
FS	1,258	1,201	1,255	1,187	1,257	1,231
PGA=0,18						
FS	1,137	1,083	1,136	1,071	1,14	1,113

Selon les résultats du tableau 5 ci-dessus, nous constatons que le facteur de sécurité est toujours supérieur à 1, par conséquent, le talus reste encore stable en cas du séisme. Nous pouvons donc penser que seule l'eau pourrait donner lieu à une déstabilisation du talus. Et c'est ce que nous allons prouver dans la section suivante.

2.3.5.2. Effet combiné du poids propre, d'un séisme, et de la nappe

La prise en compte des effets du séisme par la méthode pseudo-statique en présence des pressions interstitielles peut avoir un effet dramatique sur la stabilité du talus. Même relativement

faibles, les coefficients sismiques K_H et K_V peuvent engendrer des modifications de condition d'équilibre géotechnique et abaisser considérablement le facteur de sécurité. Le logiciel Slide offre la possibilité de prendre en compte l'effet des coefficients sismiques pour déterminer le facteur de sécurité.

Dans cette partie, nous avons considéré les effets combinés des profondeurs des nappes envisagées ($H=5m$, $H=10m$, $H=15m$ et $H=17.5m$) et des coefficients sismiques K_H (0 à 0.162) dans le modèle pseudo-statique par équilibre limite dans le logiciel Slide. Les résultats de ces analyses sont donnés dans le tableau 6 et la figure 6 représente graphiquement la tendance observée dans ce tableau.

Tableau 6 : Variation du FS en fonction de H et PGA

PGA	K_H	FS				
		H=0m	H=5m	H=10 m	H=15m	H=17,5m
0	0	1,5278	1,3766	1,2352	1,0404	0,9428
0,06	0,054	1,346	1,2138	1,0908	0,9194	0,833
0,12	0,108	1,201	1,0852	0,9766	0,8234	0,7448
0,18	0,162	1,084	0,9796	0,8846	0,7464	0,6742

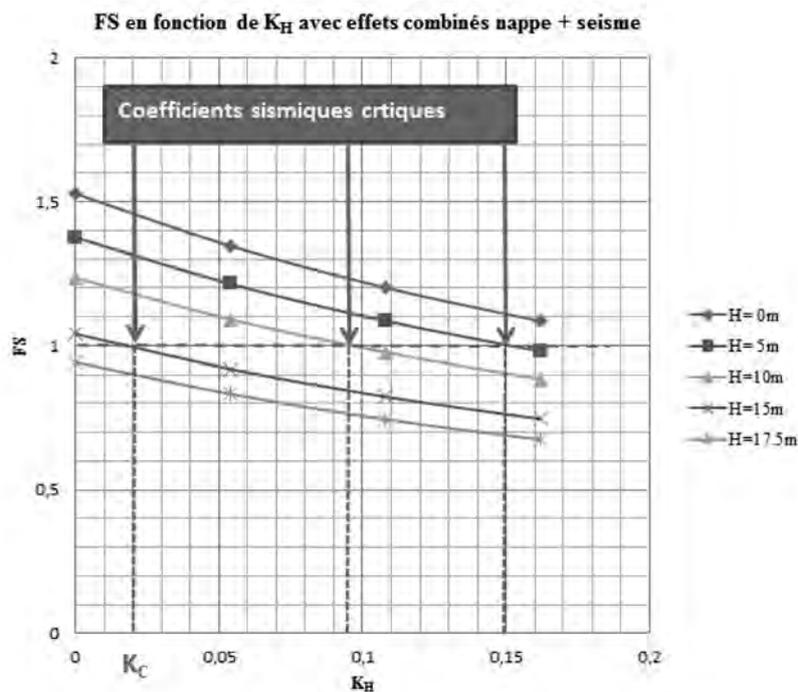


Figure 6 : Facteur de sécurité en fonction du paramètre sismique KH et variation de la nappe

Nous constatons que le coefficient sismique critique K_c (figure 6) change selon les cas considérés. Il passe de $K_c=0.15$ (Séisme + nappe avec $H=5m$) à $K_c=0.095$ (Séisme + nappe avec $H=10m$) et ensuite à $K_c=0.02$ (Séisme avec $H=15 m$). Les coefficients sismiques supérieurs à ces valeurs critiques présentent un facteur de sécurité inférieur à 1. Dans le cas des effets combinés de séisme plus la nappe avec $H=17.5 m$, tous les facteurs de sécurité sont inférieurs à 1, en dessous de la ligne critique. Ces observations montrent que les effets combinés de nappe et de séisme peuvent affecter considérablement le facteur de sécurité. Elles révèlent en fonction des cas examinés (nappe avec $H=17.5$ et nappe avec $H=15m$ – cas les plus probables sur notre site), que la stabilité du talus (petit d15) peut ne pas être assurée pour un séisme non perceptible par l'homme ou faible ($K_H=0$ à 0.02).

2.3.6. Causes probables de glissement

Sous l'effet du chargement gravitaire seul, la valeur du facteur de sécurité obtenue est égale à $F=1,558$. Nous pouvons alors penser que le versant est stable. Toutefois, sa rupture a déjà eu lieu. Pour la justifier, nous allons donc examiner, pour différentes accélérations sismiques plausibles comprises entre $PGA=0$ (sans séisme) et $PGA=0,18g$ (caractéristique sismique du site), les effets réels d'une chute de résistance des sols et d'une variation éventuelle du niveau de la nappe.

2.3.6.1. Effets d'une chute de résistance du sol

Une analyse de sensibilité est menée afin de déterminer l'influence de la variation des paramètres mécaniques (angle de friction et la cohésion) sur la stabilité du petit D15 et à quelles valeurs de ces paramètres, la pente est en état limite de stabilité ($FS > 1$). En effet et comme illustré dans les figures 7 et 8 respectivement, la variation de la cohésion d'une valeur de plus ou moins 25 %, fait varier le facteur de sécurité (FS) d'une valeur de 4 à 5 % et la variation de l'angle de frottement interne effectif d'une valeur de plus ou moins 25 %, fait varier le facteur de sécurité d'une valeur de 20 à 21%. Par conséquent l'influence de la variation de l'angle de frottement sur la stabilité du talus petit D15 est plus importante que celle de la variation de la cohésion.

Nous remarquons également qu'un angle de frottement de 17° équivaut à un FS à l'unité pour un $PGA=0$, et au fur et à mesure que PGA augmente, la stabilité du talus nécessite un angle de frottement plus grand : pour un $PGA=0.12g$ il faut un angle de frottement de 23° pour que le talus reste stable. Et pour un $PGA=0.18g$ le talus est stable pour un angle de frottement de 26° . En revanche l'influence de la variation de la cohésion reste limitée, en effet, le versant reste stable, même pour une valeur maximale de l'accélération maximale du séisme caractérisant le site.

Variation du FS selon la variation de la cohésion

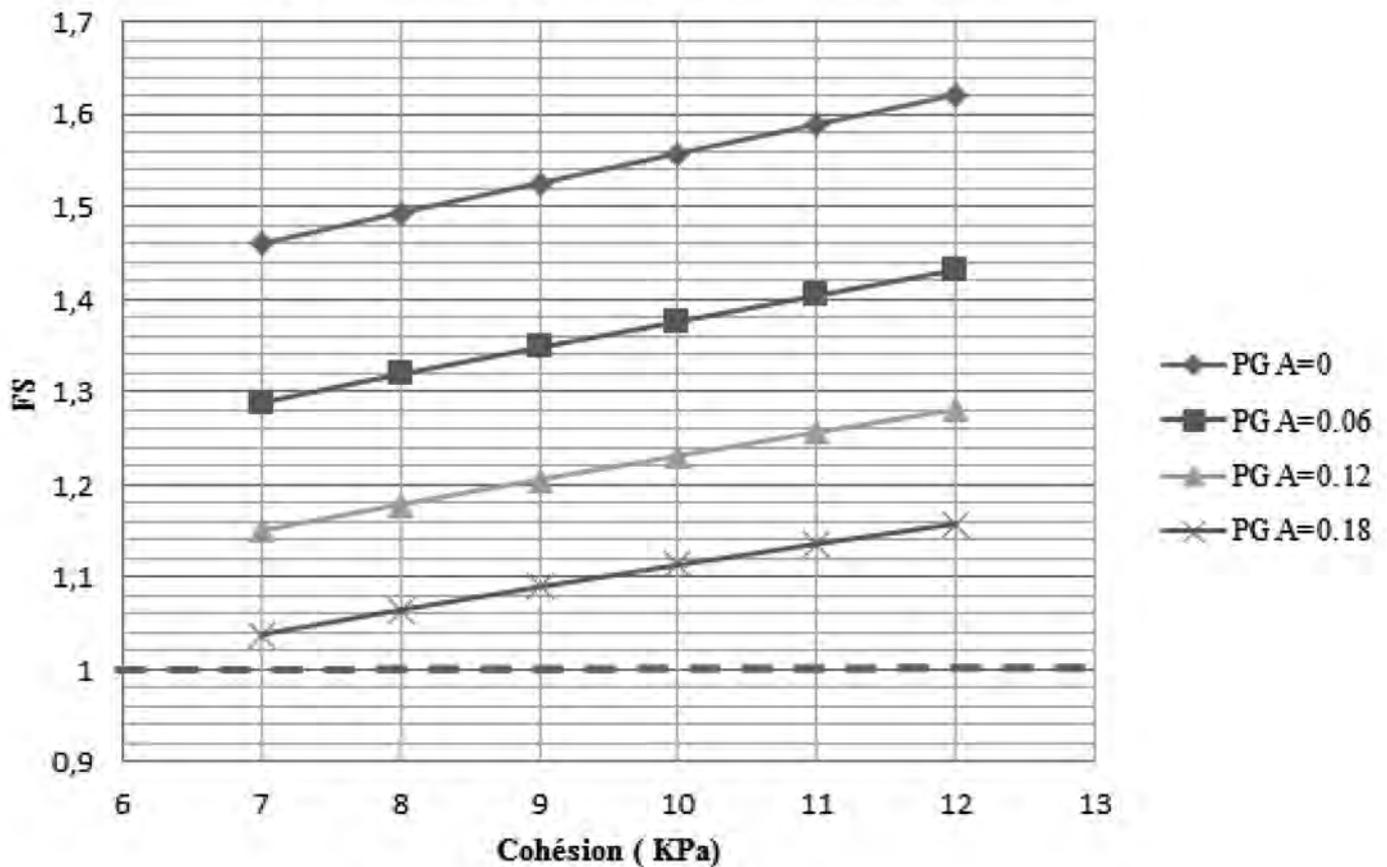


Figure 7 : Influence de la cohésion sur FS

Variation du facteur de securite en fonctionde l'angle de frottement

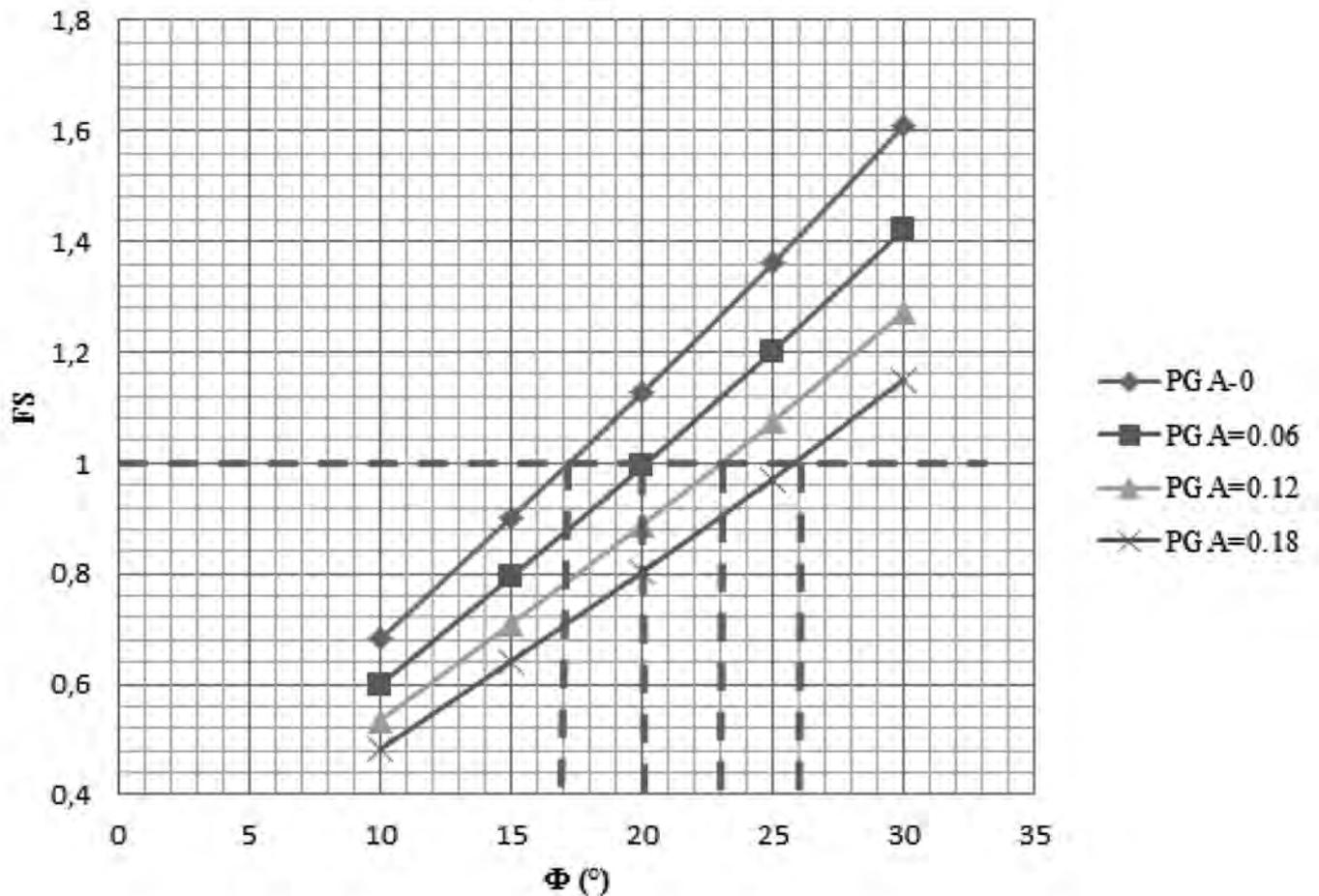


Figure 8 : Influence de l'angle de frottement sur FS

2.3.6.2. Effets d'éventuelles surpressions interstitielles

En raison des variations saisonnières dues à des phénomènes superficiels d'évapotranspiration et à un drainage par infiltration vers le contrebas du talus, des calculs ont été effectués dans l'hypothèse de fluctuations de la nappe entre l'état sec ($H=0$) et l'état saturé ($H=20$ m). A sec, le versant est stable même en cas de séisme. En présence de nappes, il devient instable et s'effondre sous l'action d'une faible secousse sismique ($PGA=0.06$ g) lorsque le niveau de l'eau atteint presque 13m de hauteur. Pour $PGA= 0.18g$, le talus s'écroule dès que le niveau de la nappe atteint 4 m environs (figure 9).

2.4. Analyse avec la méthode des différences finies

Les limitations de la méthode d'analyse des équilibres limites ne permettent pas d'expliquer complètement le phénomène et il a été jugé nécessaire d'approfondir l'étude des différentes

causes potentielles de l'instabilité. Dans ce qui suit, différents scénarios ont été analysés à l'aide du modèle FLAC de façon à mieux comprendre les mécanismes de ruptures.

2.4.1. Présentation du modèle FLAC

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group Inc., 1995) est un logiciel de modélisation mécanique de problèmes géotechniques qui utilise la méthode des différences finies.

La méthode des différences finies exploitée par le logiciel FLAC traite le problème comme un milieu continu, dont les caractéristiques mécaniques sont une moyenne établie sur un élément du maillage. Elle permet aussi d'introduire, en nombre limité, des discontinuités, mais la réponse globale du massif est cependant dominée par la déformation de la roche.

L'avantage de l'approche par milieu continu est qu'elle permet de simplifier considérablement la description géométrique du milieu, ce qui facilite la mise en œuvre informatique du modèle (petit nombre de nœuds, automatisation du maillage, convergence

Influence de la nappe sur le facteur de sécurité

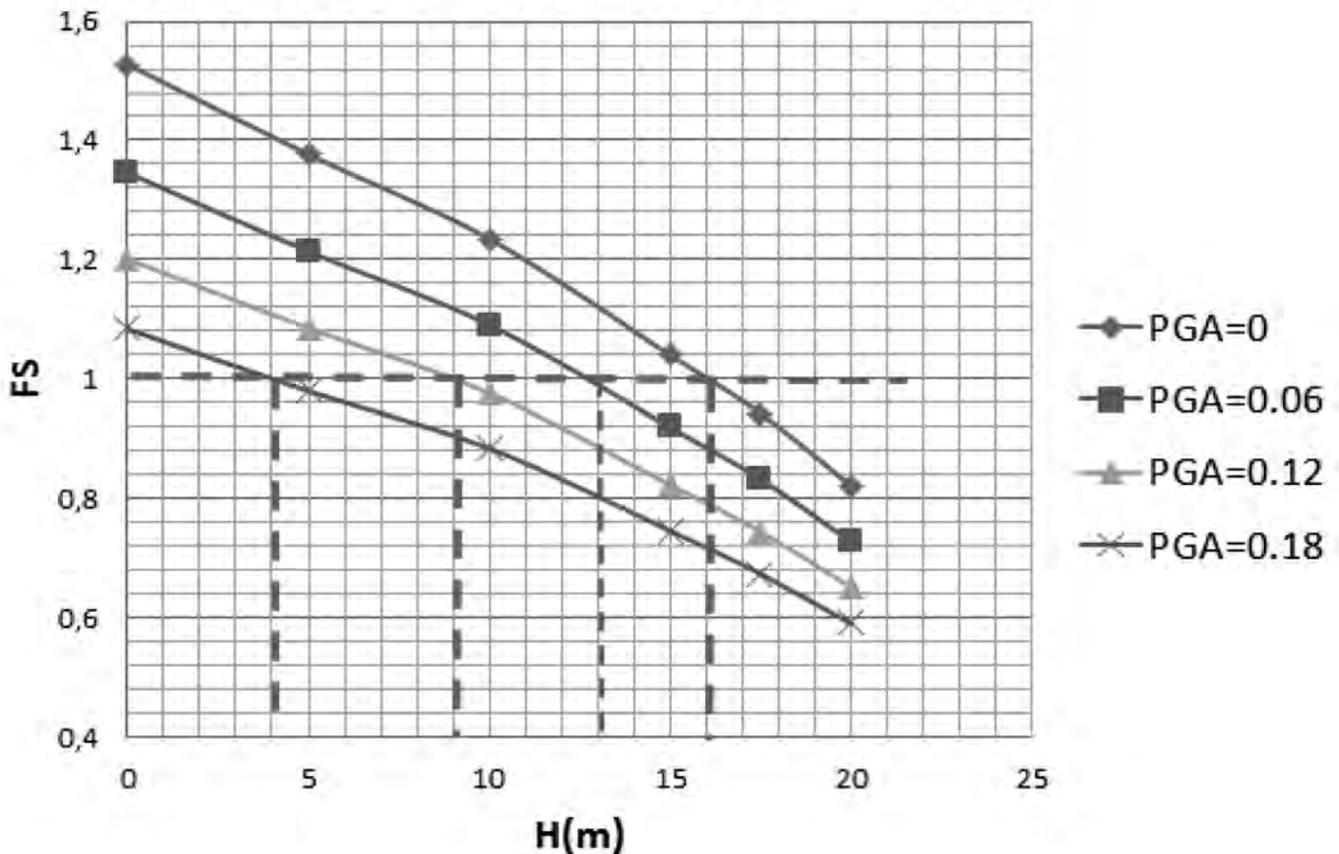


Figure 9 : Influence des fluctuations de la nappe sur le facteur de sécurité

rapide). La difficulté est de déterminer son domaine d'application, en particulier le taux de fracturation à partir duquel on peut admettre que le comportement d'un massif rocheux est assimilable à celui d'un milieu continu.

2.4.2. Étude de stabilité de petit D15 en condition statique et dynamique par le code de calcul FLAC 2D

Un modèle pratiquement identique à celui créé par la méthode d'équilibre limite est généré dans le logiciel FLAC qui utilise la méthode des différences finies. Les facteurs de sécurité et les déplacements pour différents scénarios (cas sec, humide, avec ou sans ancrages) sont à nouveau calculés.

2.4.2.1. Stabilité statique du petit D15

2.4.2.1.1. Condition sèche

L'analyse de la stabilité statique du versant (petit D15) en conditions sèches avec le logiciel FLAC 2D, conduit à une valeur de coefficient de sécurité minimum de 1.64 (figure 10). Cette valeur qui est presque la même que celle calculée avec la méthode d'équilibre limite (1.56) indique que la pente est stable. Nous remarquons également une concentration des contraintes maximales enregistrées le long de la surface de rupture circulaire.

Le calcul des déformations constitue le facteur le plus important pour évaluer le niveau de sécurité de n'importe quelle structure, notamment celle des versants rocheux. Les mesures des déformations avec le logiciel FLAC version 08 basée sur la méthode des différences finies, fournissent l'information sur les effets des perturbations entre les différents blocs constituant le talus du petit D15.

Les résultats montrent que les déplacements horizontaux maximaux sont enregistrés dans la partie centrale et superficielle du versant instable. Ils sont faibles et de l'ordre de 16 cm (figure 11 A). Dans la partie centrale profonde du versant est, les déplacements horizontaux maximums montrent une intensité très faible d'environ 4 cm, mais affectent une plus grande zone. L'observation des déplacements verticaux du modèle montre que ces derniers sont enregistrés dans la tête du talus avec une valeur de 19 cm (figure 11 B). Ces déplacements sont jugés très petits, d'où nous pouvons conclure que le comportement du versant petit D15 vis-à-vis déplacement est acceptable.

2.4.2.1.2. Condition humide

Pour prendre en compte l'effet de l'eau dans les analyses de stabilité du petit D15, nous utilisons souvent le niveau de la nappe phréatique critique (le plus élevé durant l'année). Pour cela, nous considérons un cas de saturation totale avec un écoulement d'eau en surface.

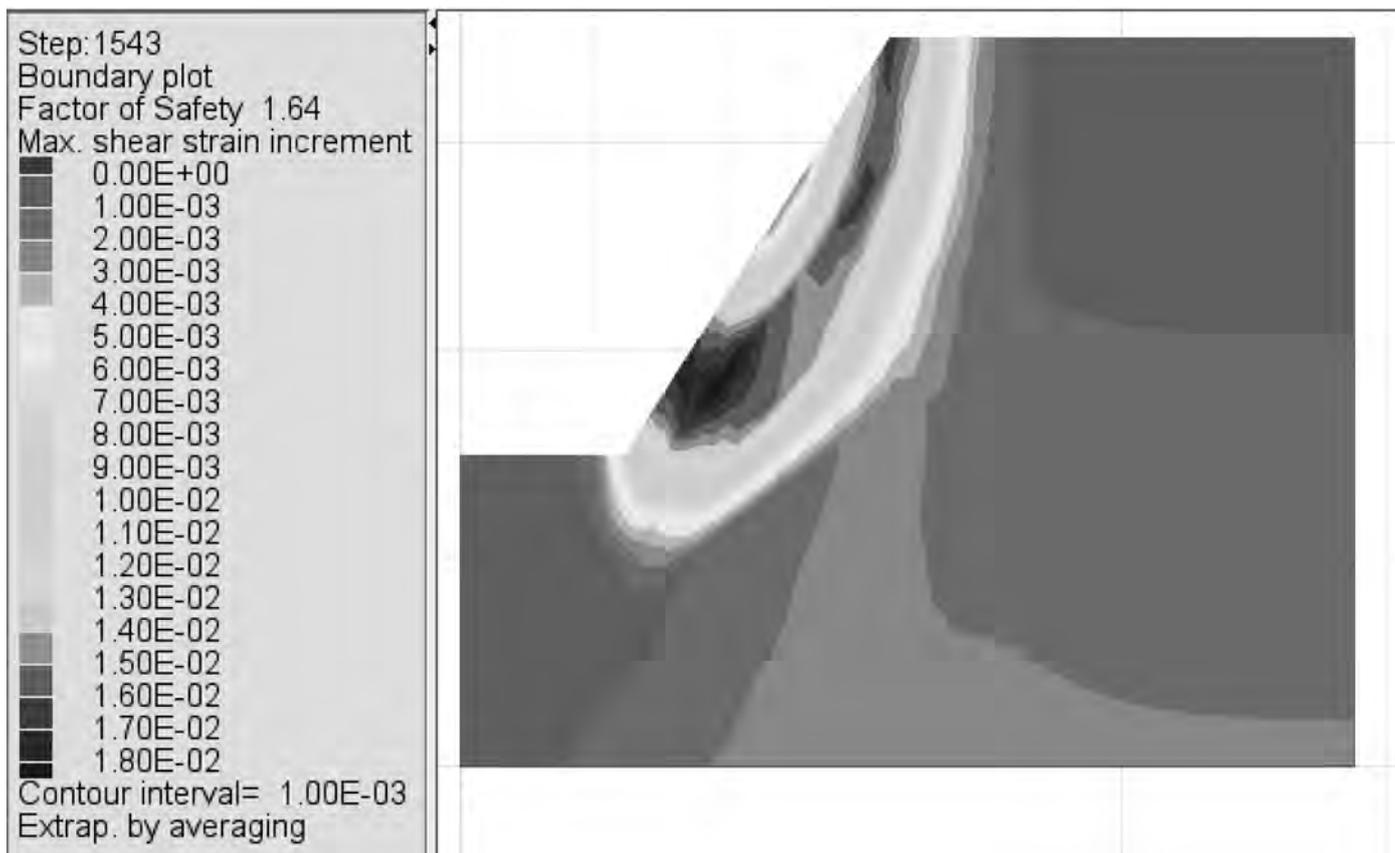


Figure 10 : Surface critique obtenue de l'étude de petit D15 lors de l'analyse statique

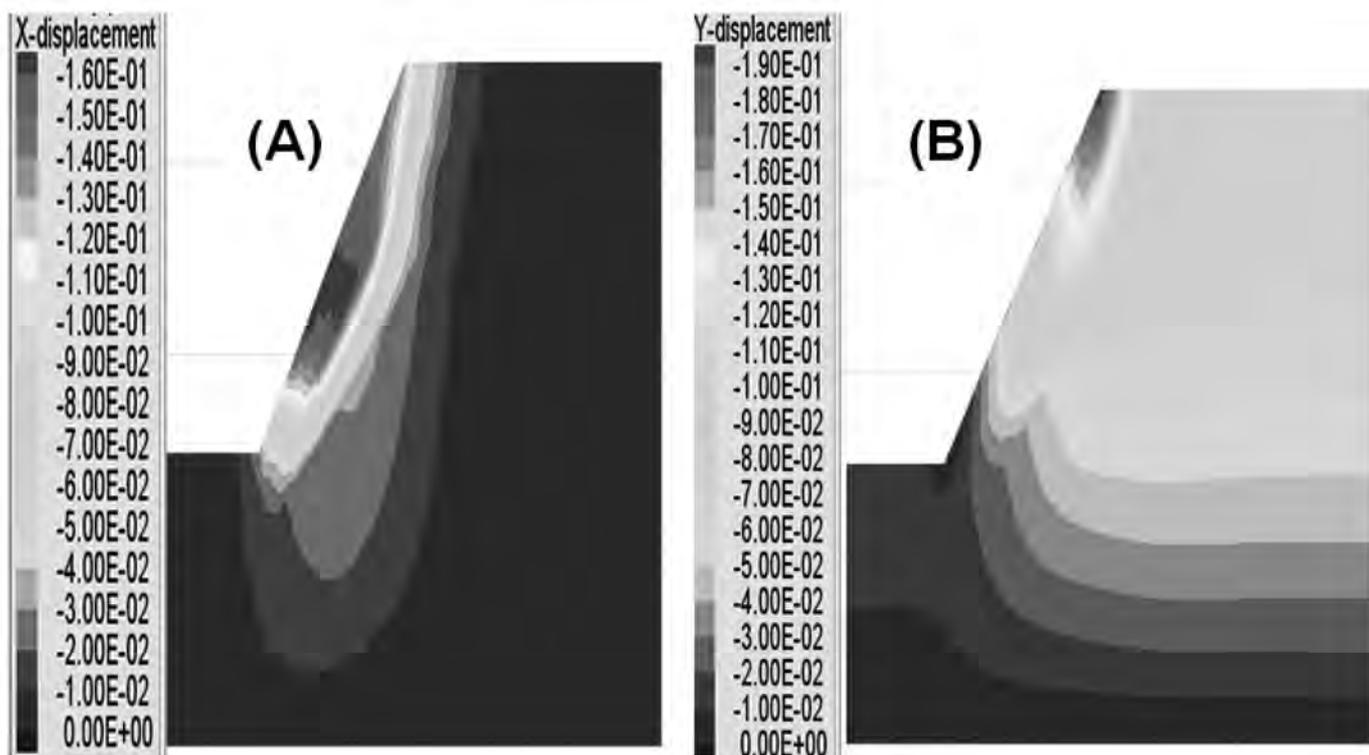


Figure 11 : Répartition des déplacements horizontaux (A) et verticaux (B) du modèle sous sollicitation statique

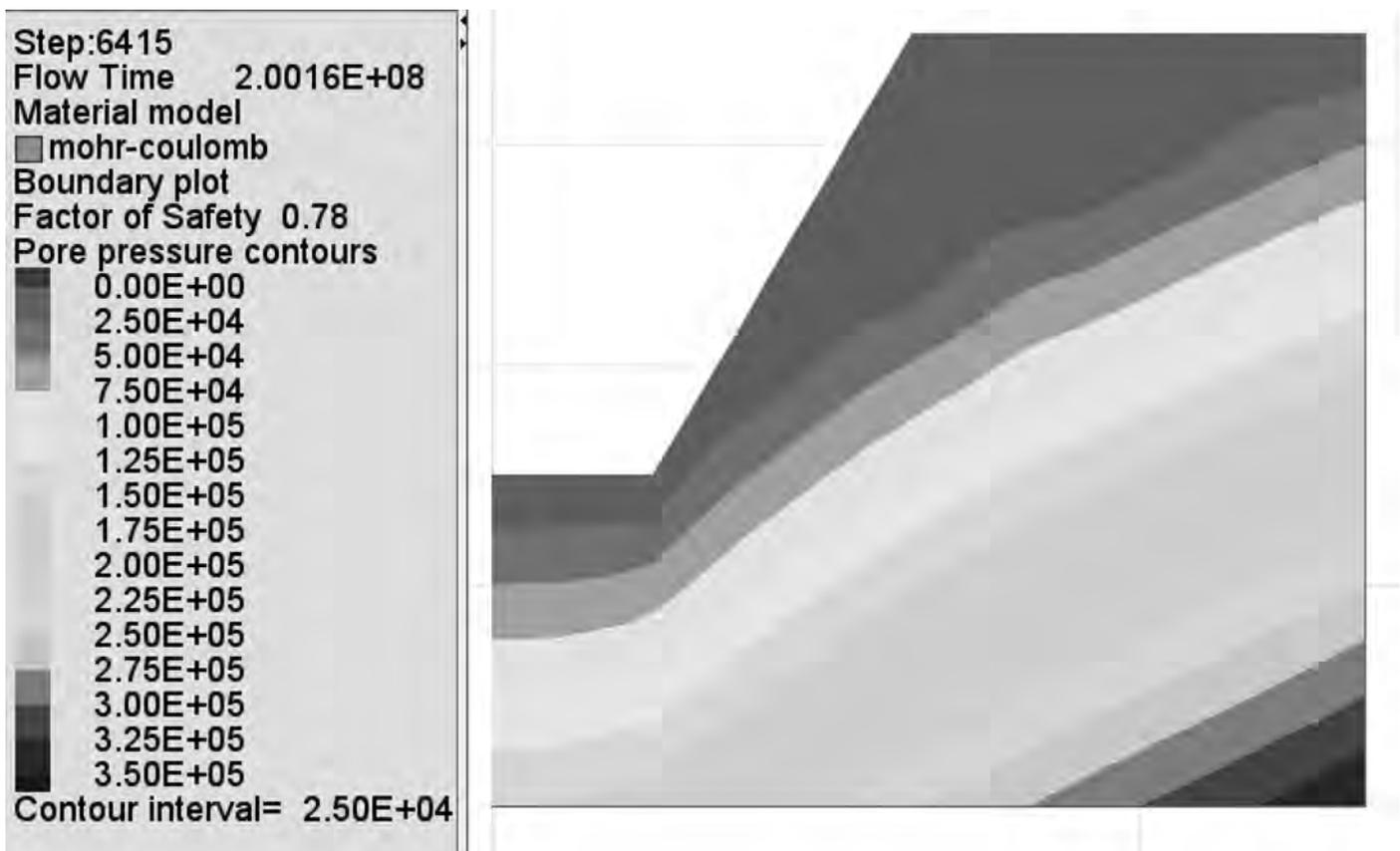


Figure 12 : Pressions interstitielles obtenues en fixant la nappe phréatique

Comme illustré dans la figure 12 ci-dessus, la valeur du coefficient de sécurité trouvé en conditions hydrauliques considérées (FS=0.78) indique que le talus est instable. Cette analyse vient de démontrer l'effet déstabilisateur provoqué par la nappe phréatique et approuve également les résultats trouvés en utilisant la méthode d'équilibre

limite. Le déplacement horizontal maximal enregistré a une valeur de 42.5 cm (figure 13 C), ce qui correspond à un accroissement de près de 165 %. Nous remarquons également une augmentation dans le déplacement vertical maximal (figure 13 D) d'une valeur de 97 % par rapport au cas du talus sans nappe d'eau.

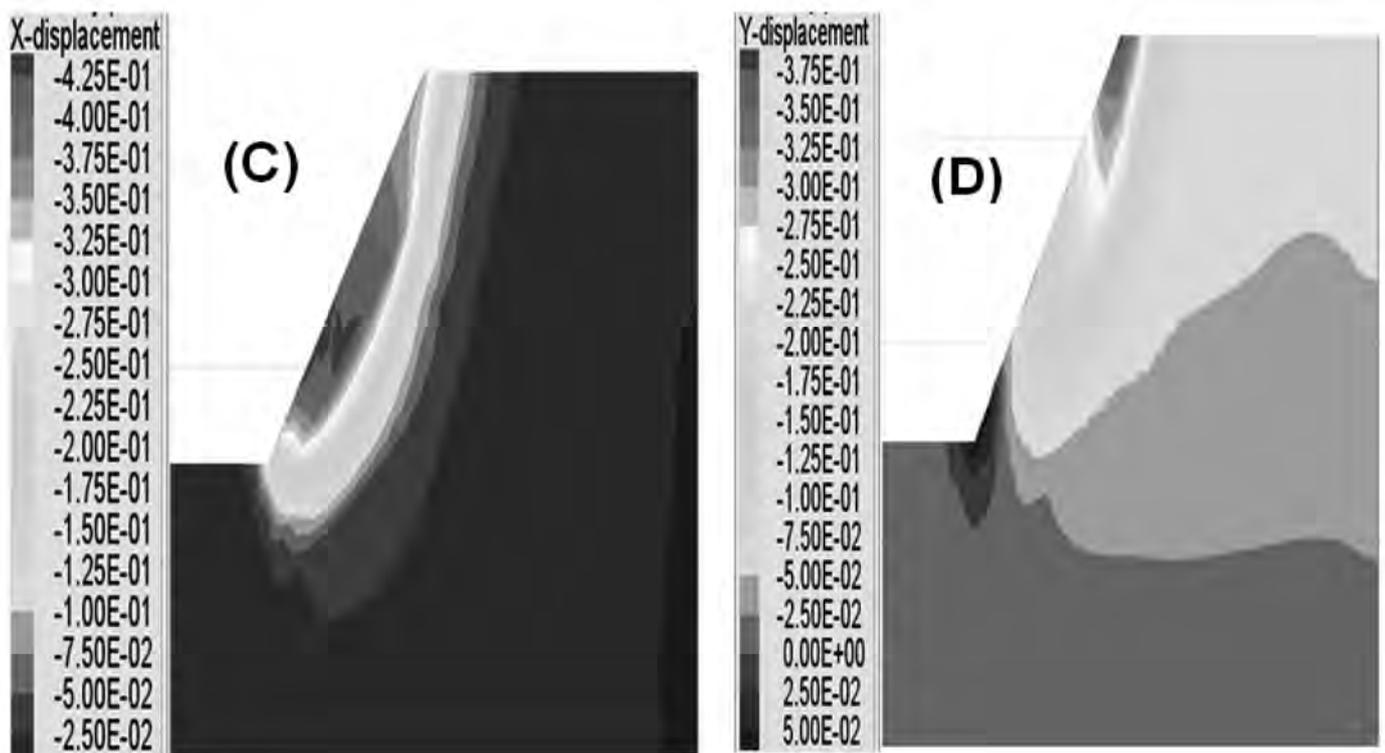


Figure 13 : Répartition des déplacements horizontaux (C) et verticaux (D) du modèle sous sollicitation statique avec présence d'eau

2.4.2.2. Stabilité dynamique du petit D15

Pour prendre en compte l'effet du séisme sur la stabilité du petit D15, une sollicitation dynamique est appliquée au modèle. À l'instar de ce que préconise Itasca pour les conditions aux limites dynamiques, un signal sismique est introduit sous forme d'une contrainte de cisaillement sinusoïdale (ou bien sous forme d'excitation en vitesse) sur toute la longueur de la base du modèle. Afin de simuler l'amortissement naturel de l'amplitude des

oscillations sous l'effet du frottement interne, un facteur d'amortissement de type Rayleigh, indépendant de la fréquence, est imposé de manière homogène à l'ensemble du modèle. Les propriétés de l'onde simulée se situent dans les gammes des paramètres correspondant au site d'étude et qui sont généralement indiquées dans la carte sismique marocaine conformément au règlement parasismique marocain (RPS 2000, version 2011). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure ci-dessous.

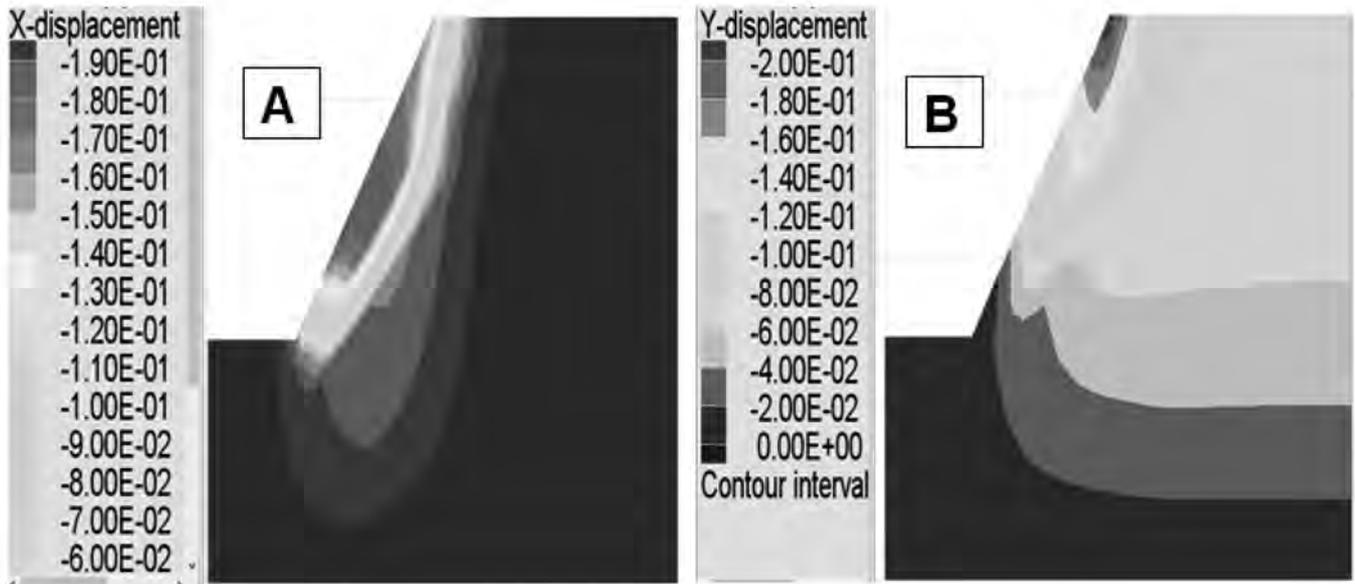


Figure 14 : Répartition des déplacements horizontaux (A) et verticaux (B) du modèle sous sollicitation dynamique (sans nappe d'eau)

Nous remarquons que les déplacements horizontaux de la partie centrale et superficielle du versant sont affectés de manière faible par l'onde de cisaillement, avec une valeur maximale de l'ordre de 19 cm (figure 14 A). Dans la partie centrale profonde du versant est, les déplacements horizontaux maximums montrent toujours une intensité d'environ 5 cm, mais affectent une plus grande zone. L'observation des déplacements verticaux du modèle montre que le versant est toujours stable. Le déplacement vertical maximal calculé est presque identique à celui enregistré dans le cas statique avec une valeur de presque 20cm (figure 14 B), Ceci correspond à un accroissement de près de 5 %, qui est relativement très faible. Ces déplacements faibles enregistrés sont loin d'être à l'origine de l'instabilité du petit D15. Nous pouvons donc conclure que l'action de secousses sismiques n'a pas eu vraiment beaucoup d'influences sur la stabilité du petit D15. Ceci coïncide avec les résultats obtenus avec la méthode d'équilibre limite d'où nous pouvons conclure que les conditions hydrauliques défavorables sont à la base du déclenchement de la rupture du petit D15.

2.4.2.3. Confortements utilisés pour assurer la stabilité du petit D15

Pour donner suite aux études de stabilité effectuées sur le versant petit D15 et qui ont montré que ce dernier est instable en présence de la nappe phréatique, le recours à une méthode de

confortement adéquate et sécuritaire est indispensable afin de garantir sa stabilité à long terme. Pour cela la solution de stabilisation par clouage s'est avérée comme la plus judicieuse. Le but est de déterminer un schéma de renforcement optimum garantissant un facteur de sécurité satisfaisant (≥ 1) et des coûts matériels minimisés.

2.4.2.3.1. Étapes de stabilisation de petit D15

2.4.2.3.1.1. Étape 1 : Mettre une risberme de 5m de largeur à mi-hauteur du talus

Après la mise en place d'une risberme de 5 m de largeur à mi-hauteur du talus, nous avons calculé le facteur de sécurité et les déplacements horizontaux et verticaux en état statique, premièrement sans présence d'eau et par la suite avec une nappe phréatique en surface.

En ce qui concerne le premier cas (cas sec) et comme illustré dans la figure 15 ci-dessous, la valeur du coefficient de sécurité obtenue est 1.74 avec une augmentation de presque 6% par rapport au cas du talus sans risberme. Le déplacement horizontal maximal enregistre une valeur de 27.5 cm (figure 16 G), ce qui correspond à un accroissement de près de 72 %. Nous constatons également une augmentation dans le déplacement vertical maximal (figure 16 H) d'une valeur de 58 % par rapport au cas du talus sans risberme.

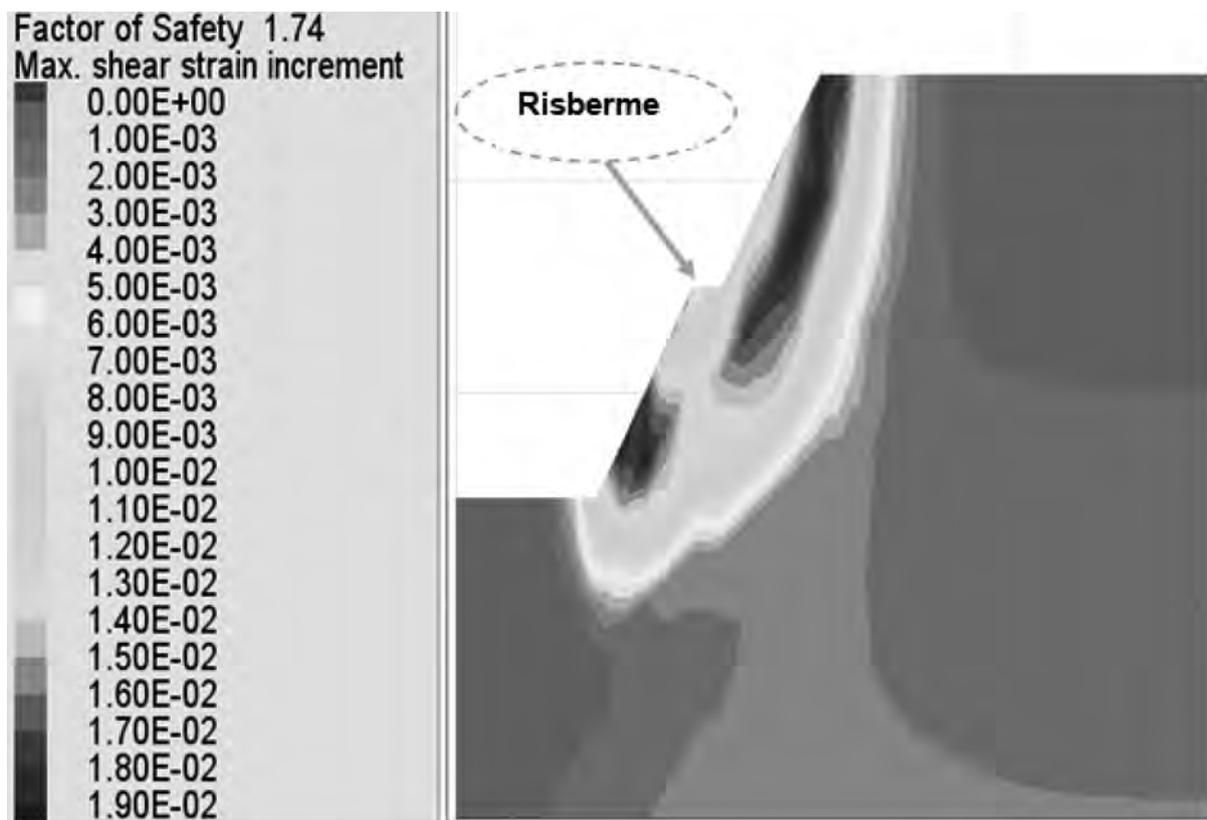


Figure 15 : Facteur de sécurité en état statique (sans eau)

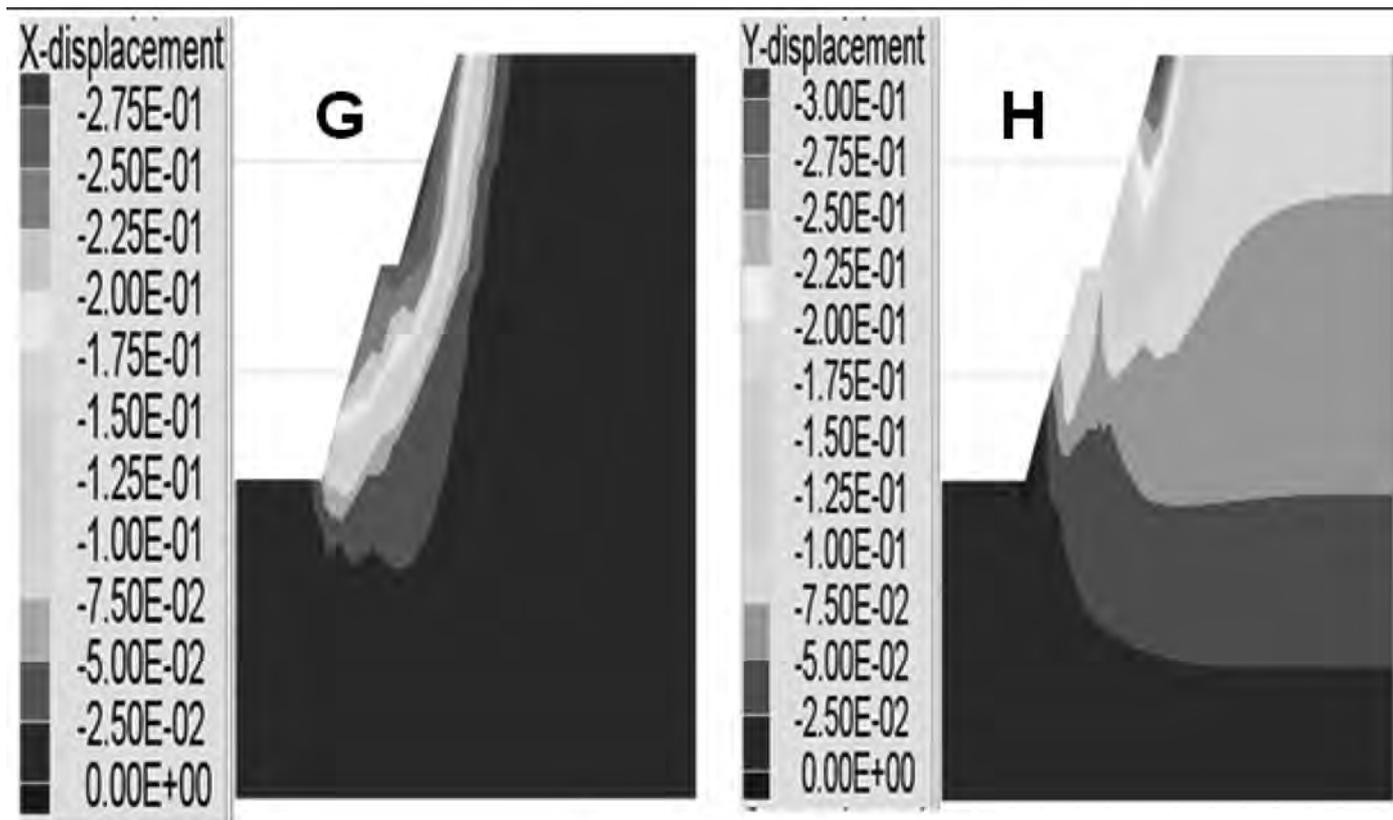


Figure 16 : Répartition des déplacements horizontaux (G) et verticaux (H)

Cependant pour le deuxième cas (cas avec une nappe en surface), nous remarquons que le facteur de sécurité est presque le même, avec une valeur de 0.77 (figure 17). Les déplacements

horizontaux (figure 18 K) et verticaux (figure 18 L) quant à eux ont connu une légère augmentation d'environ 7 % par rapport au cas d'un talus sans risberme.

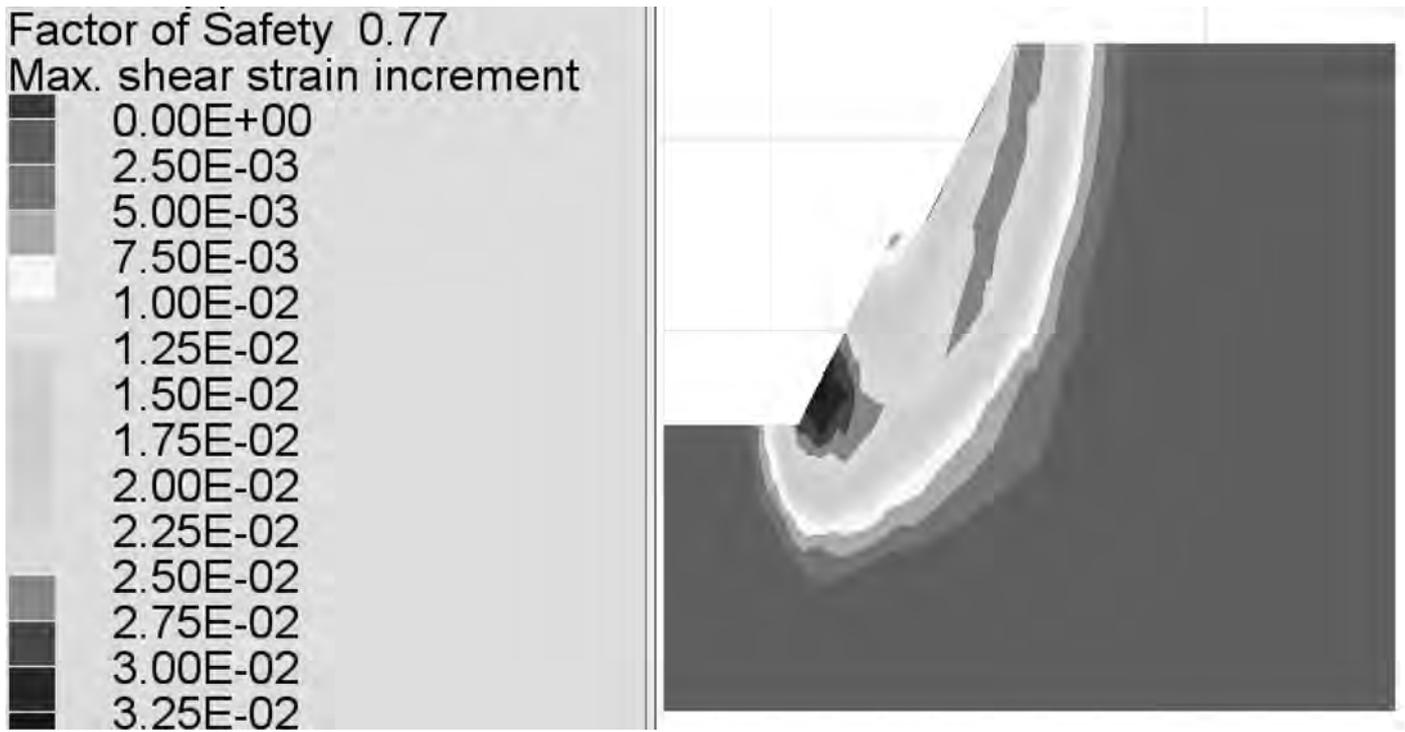


Figure 17 : Facteur de sécurité en état statique (avec eau)

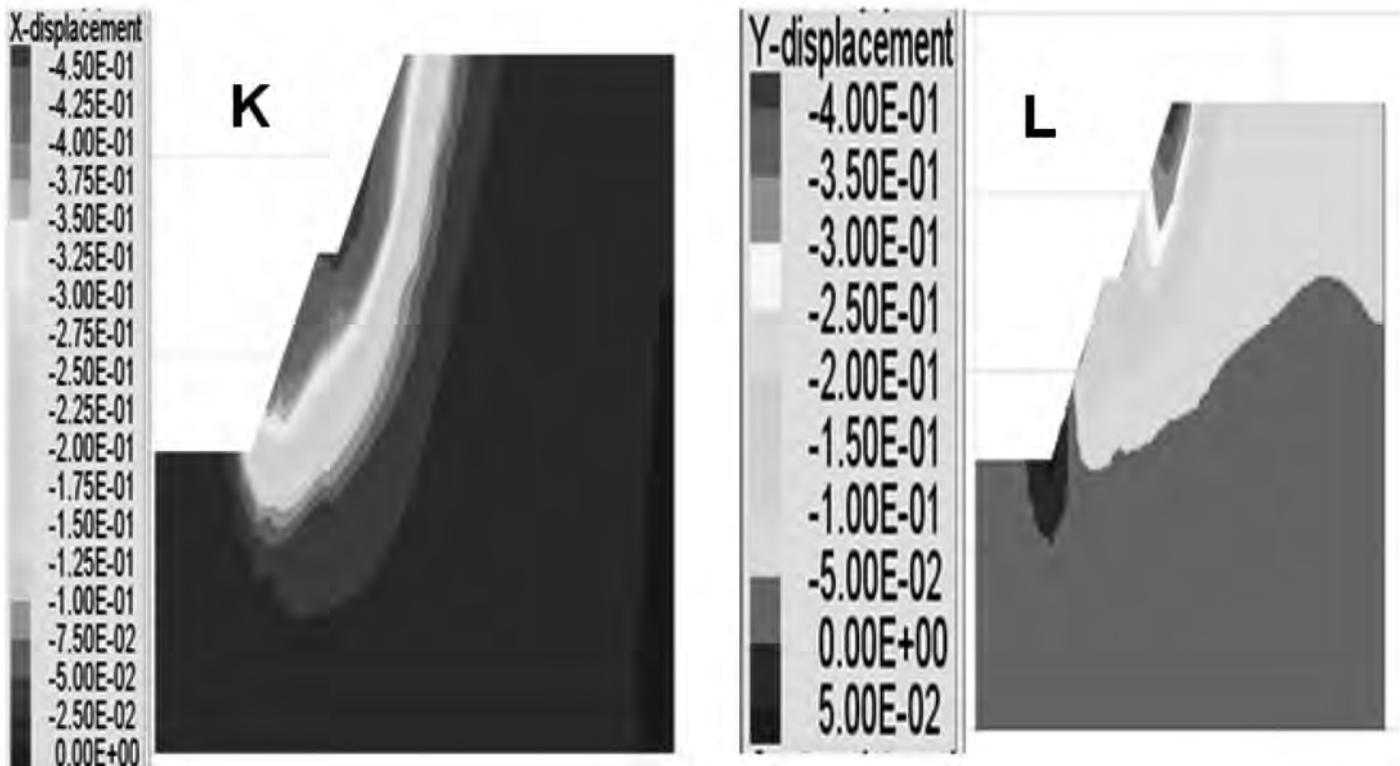


Figure 18 : Répartition des déplacements horizontaux (K) et verticaux (L) (avec eau)

De ce qui précède, nous pouvons conclure que la mise en place d'une risberme d'une largeur 5m à mi-hauteur du talus a permis d'améliorer la stabilité du talus en cas sec. Par contre en cas d'une nappe phréatique en surface, l'influence de cette

technique reste très modeste d'où la nécessité de penser à une autre technique de stabilisation. C'est l'objet de la deuxième étape qui consiste à clouer la surface amont de notre talus en plus de la mise en place d'une risberme (figure 19).

2.4.2.3.1.2. Étape 2 : clouage du petit D15

Le schéma de renforcement adopté pour le confortement du petit D15, qui est illustré dans la figure 19 ci-dessous est assuré par 8 rangs de clous de longueur de 14m. Ces clous

sont disposés selon une maille rectangulaire, avec un espacement vertical de 2m et un espacement horizontal de 2m. Les barres sont inclinées par rapport à l'horizontale d'un angle 15°.

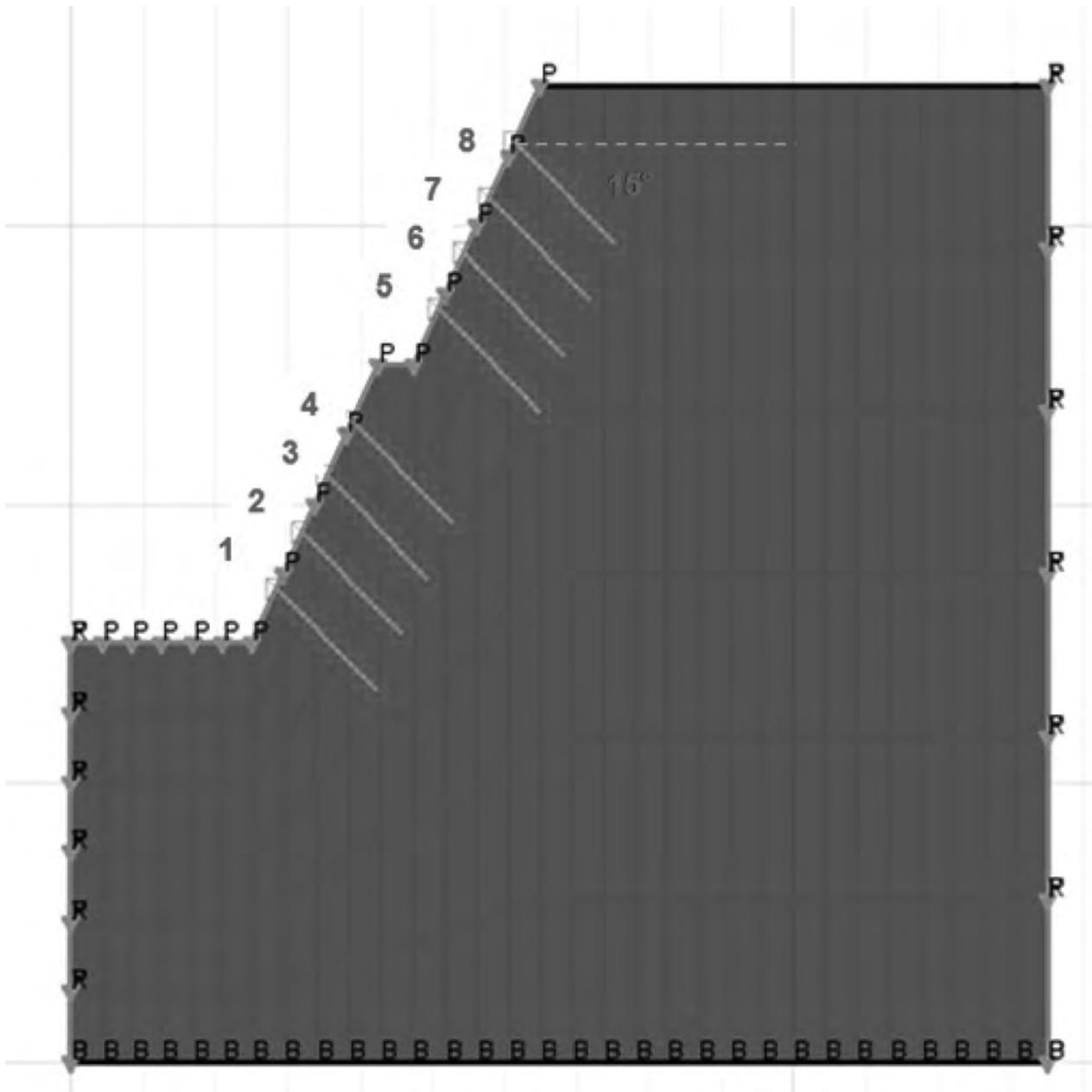


Figure 19 : Schéma de renforcement du petit D15

Les caractéristiques retenues des clous (représentés par les éléments-barres) et des parois constituées de béton projeté et de

treillis d'armature (représentées par des éléments poutre) sont données dans le tableau 7 ci-dessous :

Tableau 7 : Caractéristiques des clous

Paramètre	Valeur
Module d'Young (Pa)	$1e^{11}$
Aire (m ²)	$3e^{-3}$
Bond stiffnes (N/m ²)	$1.7e^{10}$
Bond strength (N/m)	$8e^5$
Tensile (N)	$1e^{10}$

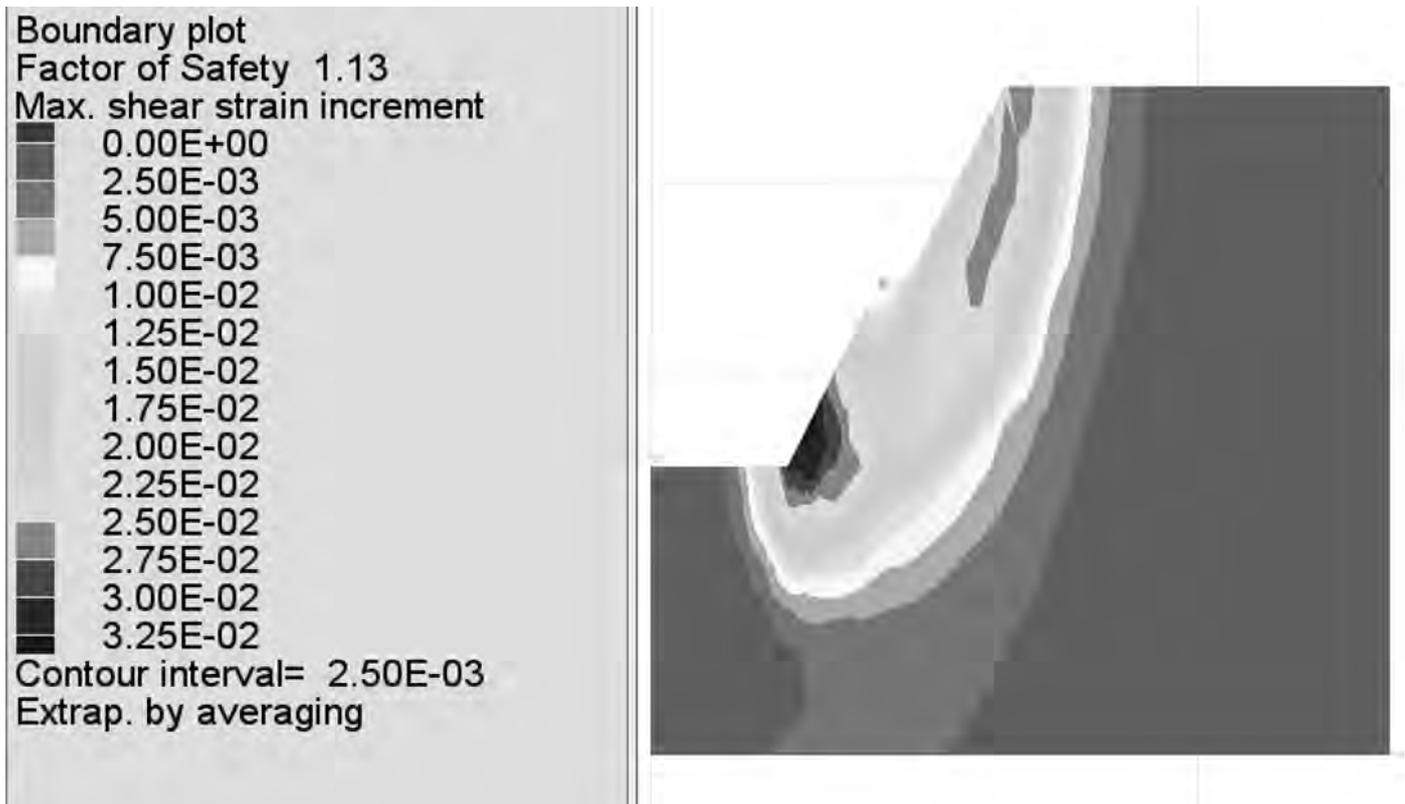


Figure 20 : Facteur de sécurité pour le petit D15 cloué avec une nappe en surface

Nous pouvons remarquer selon la figure 20 ci-dessus que le facteur de sécurité (FS=1.13) pour le petit D15 après le renforcement par les clous est considérablement amélioré avec une augmentation de presque 47 % par rapport au cas où le talus n'est pas cloué (FS=0.77). Ainsi, les barres de renforcement (1 et 2) situées dans la partie inférieure du talus et les barres 5,

6, 7 et 8 situées plus proche de la crête du talus sont celles qui contribuent plus à sa stabilité (figure 21). C'est le long de ces barres que se développent les plus forts efforts de traction, par contre l'ancrage le plus proche de la riserme (barres 3 et 4) est quant à lui peu sollicité.

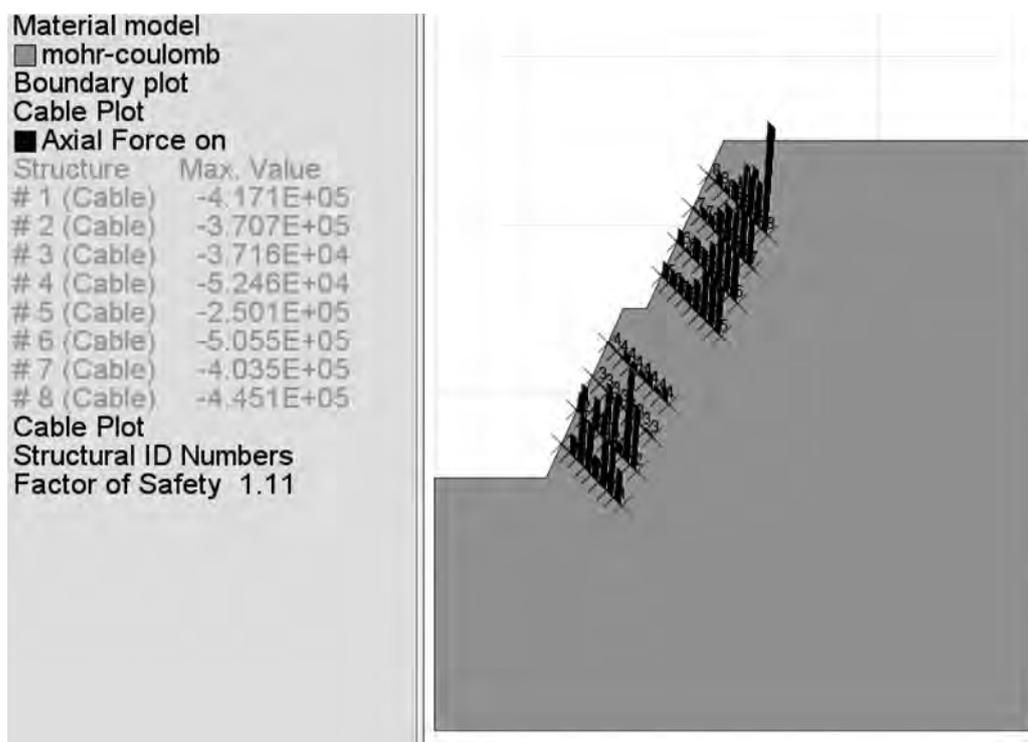


Figure 21 : Distribution des charges axiales le long des éléments de renforcement

2.4.3. Sensibilité par rapport à l'angle de frottement

Dans cette section, nous avons étudié l'influence de l'angle de frottement (Φ) sur le déplacement des blocs (formant le talus), et nous allons essayer de trouver à partir de quel angle de frottement Φ_c (angle de frottement critique) ; nous pouvons avoir un glissement des blocs. Pour cela nous avons fait varier l'angle de frottement en partant de 35° et en diminuant jusqu'à la valeur 15° ; et en cherchant la valeur de déplacement en cisaillement maximal qui correspond à chaque valeur de Φ . Le tableau 8 suivant englobe les valeurs obtenues par le logiciel FLAC et le graphique de la figure 22 ci-dessous montre l'allure du graphique

(déplacement des blocs versus l'angle de frottement). Selon ce dernier nous pouvons remarquer que le glissement aura lieu dès que l'angle de frottement est inférieur à 16° . Et c'est pratiquement les mêmes résultats obtenus lorsque nous avons étudié la variation du facteur de sécurité en fonction de l'angle de frottement (figure 23).

3. CONCLUSION

Après cette analyse de stabilité effectuée sur le versant petit D15 nous pouvons penser que la rupture provienne d'une modification

Tableau 8 : Déplacement des blocs en fonction de Φ

Φ°	15	16	17	18	19	20	22	24	25	30	35
Shir disp max (cm)	15.57	9.807	9.082	8.573	8.168	8.15	8.15	8.15	8.149	8.149	8.148

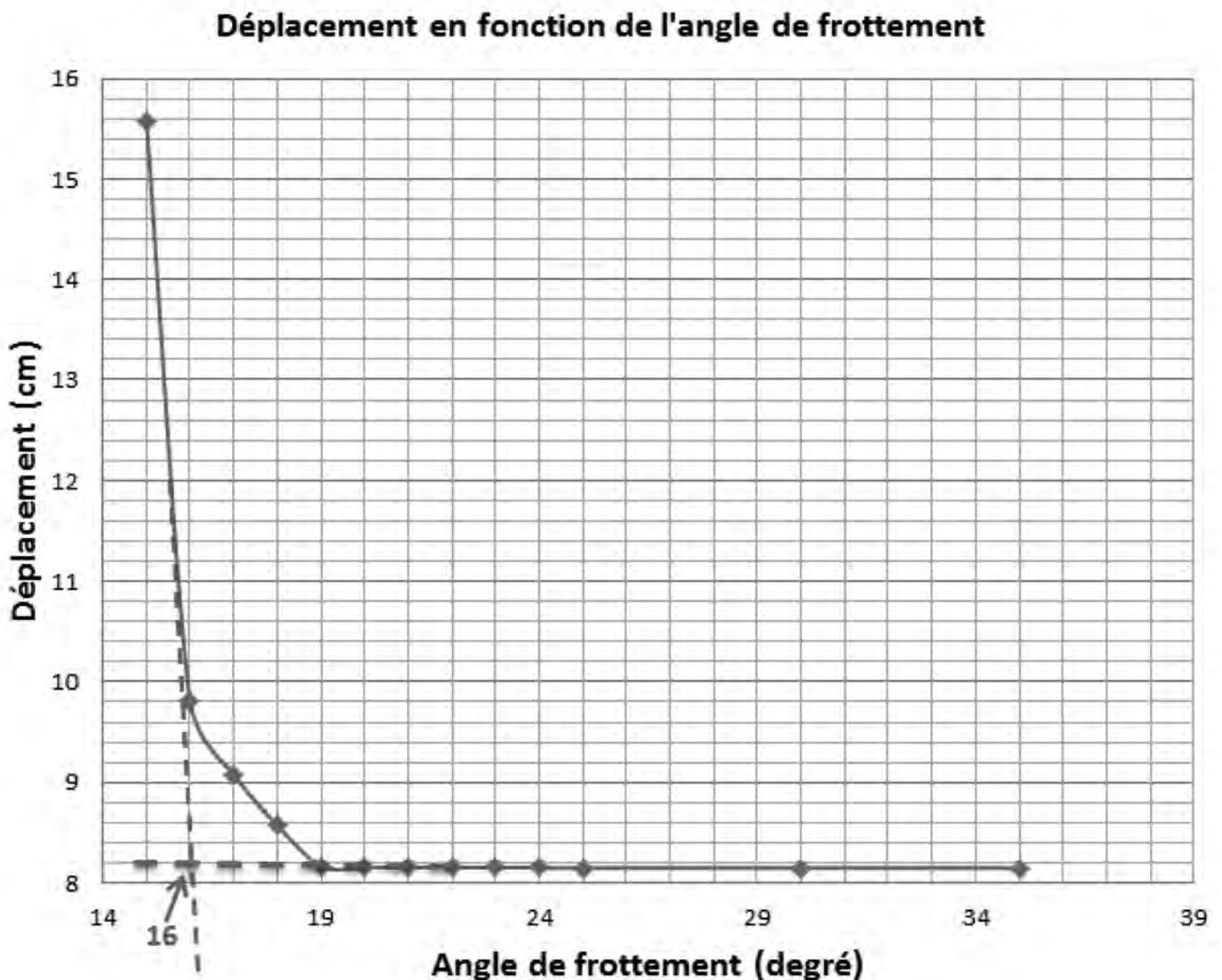


Figure 22 : Influence de Φ sur le déplacement des blocs

Variation du facteur de sécurité en fonction de l'angle de frottement

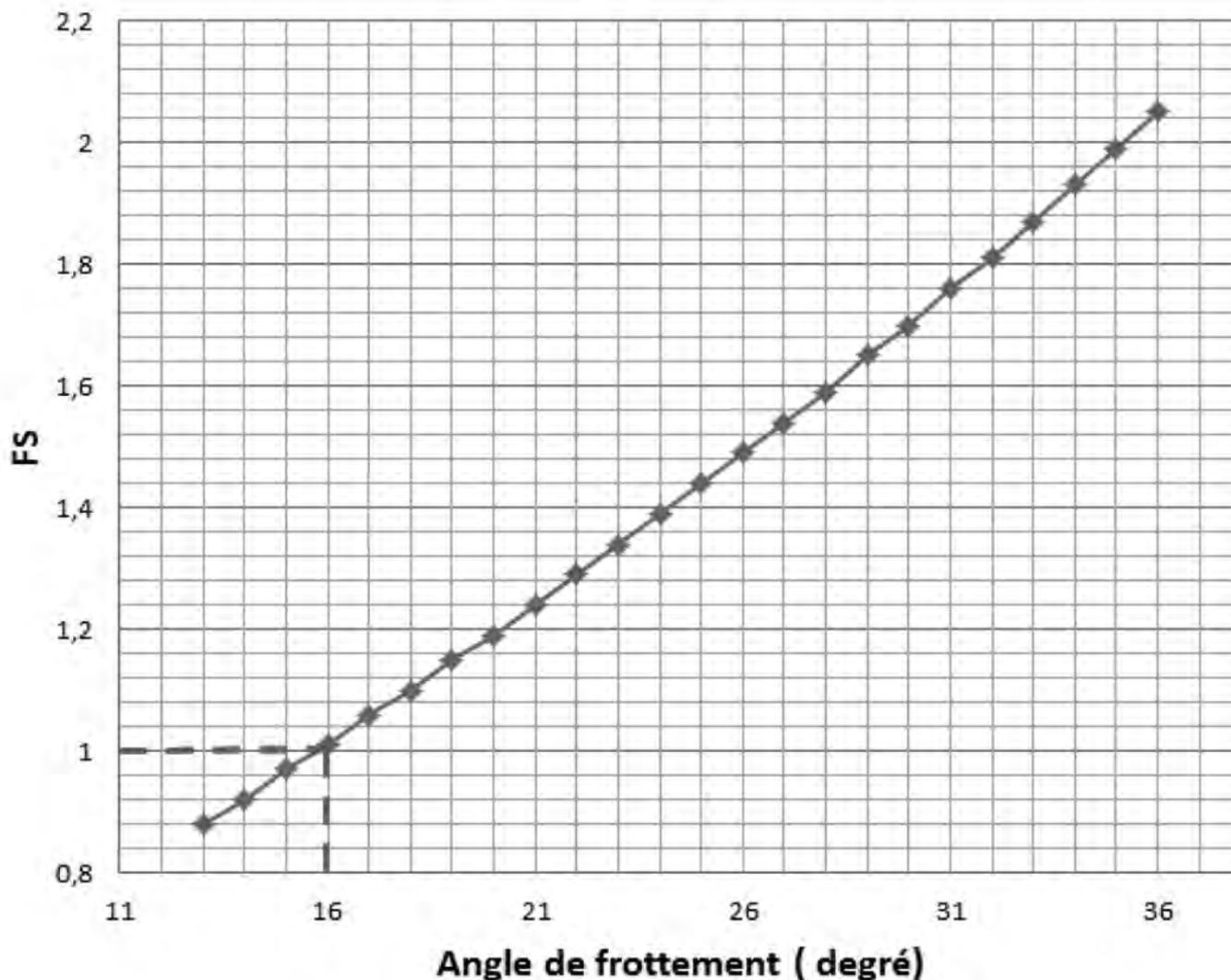


Figure 23 : Influence de l'angle de frottement sur le facteur de sécurité

notable des caractéristiques mécaniques du sol (perte de résistance au cisaillement). Cependant, il va de soi que, dans tous les cas, la rupture provient pour l'essentiel de la nature minéralogique du sol. Les argiles étant des roches évolutives, leurs comportements changent en présence d'eau et deviennent très plastiques. La rupture du versant peut donc être attribuée à une perte de résistance au cisaillement sans oublier bien sûr des conditions hydrauliques et probablement sismiques défavorables.

Pour prévenir les désordres liés au glissement du petit D15, le renforcement par ancrages s'avère être une solution adéquate. La méthode de réduction de la résistance implantée dans le logiciel FLAC a été utilisée pour produire un schéma de renforcement optimal par barre d'ancrage en faisant varier le nombre des ancrages, leur position le long de la pente, leur inclinaison, leur diamètre et leur longueur.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bourdeau, C. (2005). Effets de site et mouvements de versant en zones sismiques: apport de la modélisation numérique, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [2] Caumartin, R. (2008). "Rétroanalyse de l'instabilité d'une pente dans une mine à ciel ouvert assistée de la modélisation numérique utilisant la méthode des éléments distincts."
- [3] Cherkaoui, T.-E. and A. El Hassani (2015). "Évaluation et atténuation de l'aléa sismique au Maroc." Actes de la session plénière solennelle, 24-26 février 2015, Hassan II Academy of Sciences and Technology: 157-173.
- [4] Règlement Parasismique Marocain : RPS 2000-version 2011.
- [5] Yahiaoui, M. (2014). Contribution à l'analyse dynamique des terrains en pentes sous séisme par logiciel Plaxis.

INFLUENCE DU MODE DE RÉPARATION DES FISSURES PAR LES MATÉRIAUX COMPOSITES SUR LES PERFORMANCES DES BÉTONS ORDINAIRE, FIBRÉ, HAUTE PERFORMANCE ET HAUTE PERFORMANCE FIBRÉ

INFLUENCE OF THE MODE OF REPAIR OF CRACKS BY COMPOSITE MATERIALS ON THE PERFORMANCES OF ORDINARY, FIBROUS, HIGH-PERFORMANCE AND HIGH- PERFORMANCE FIBROUS CONCRETE

Bachir REDJEL, Ghania MIROUZI, Khaoula AZZOUZ, Bachir KEBAILI

bredjel@yahoo.fr

Laboratoire de Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba,
BP 12, Annaba, 23000, Algérie

1. INTRODUCTION

Les ouvrages de Génie Civil sont en grande majorité conçus pour durer longtemps. Mais les structures en béton et en béton armé ont généralement tendance à se dégrader et à se détériorer au cours du temps en raison de leur vieillissement ou des endommagements qu'elles subissent au cours de leur durée de vie suite aux multiples sollicitations agressives dont elles sont l'objet. Environ 30% des ouvrages nécessitent des interventions

de réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile. En raison de leur coût relativement élevé, il est donc important de pouvoir les réparer et de les réhabiliter afin de préserver leurs performances et d'augmenter leur durée de vie [1-2-3]. La réparation et la réhabilitation des structures en béton deviennent alors des solutions très utilisées qui répondent surtout aux préoccupations du besoin instantané du moment. Ainsi, la recherche des matériaux les plus appropriés doit nécessairement prendre en compte aussi bien la

disponibilité des ressources en quantité que les solutions fonctionnelles visées ainsi que les contraintes esthétiques qu'il faut impérativement satisfaire.

Les secteurs de la construction en général ainsi que ceux du bâtiment et des travaux publics aujourd'hui en pleine mutation sont en mesure de proposer des solutions innovantes répondant aux nouvelles exigences des réglementations, lesquelles sont devenues de plus en plus rigoureuses et exigeantes, et aux besoins des usagers en termes d'impact environnemental, sécuritaire et sanitaire. Dans ce cadre, le développement de nouveaux matériaux de construction innovants passe nécessairement par le respect des normes sanitaires, par l'économie des ressources et par la maîtrise des risques sur l'environnement. Ainsi une nouvelle variété de matériaux économiques et écologiques commence à faire son apparition dans la gamme des matériaux de construction de grande diffusion. Ces éco-matériaux compatibles avec les critères de développement durable et qui présentent des performances comparables à celles des produits concurrents remplissant des fonctions équivalentes sont des produits manufacturés destinés à être intégrés dans les ouvrages du bâtiment tout en répondant à des critères spécifiques de performances techniques, de qualité architecturale, de durabilité et de facilité d'entretien. Ainsi les mortiers de résine et les bétons de résine ou bétons de polymère sont une nouvelle variété de produits écologiques qui peut faire partie de cette famille de matériaux. Ce type de matériau peut constituer une alternative pour des travaux de réparation par injection des structures endommagées, pour la décoration des murs et des planchers ainsi que pour de nombreuses autres utilisations.

Le principe du renforcement ou de la réparation consiste généralement en une adjonction de matière dans les zones où les sections se trouvent souvent trop sollicitées ou dégradées. Pour des ouvrages destinés à assurer des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, il devient également nécessaire de faire intervenir la notion de protection. Celle-ci doit viser à restituer en général les caractéristiques initiales de portance telles que la rigidité et la résistance des ouvrages concernés. La notion de renforcement tend surtout à améliorer les performances de la structure vis-à-vis des conditions d'exploitations modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage.

En particulier les silos en béton armé, utilisés pour le stockage de matériaux granulaires ou poudreux comme les céréales, les sables, les ciments, etc., sont des structures constamment exposées à des variations de température et à des contraintes variables survenant pendant les opérations de remplissage et de vidange. Les contraintes qui en découlent induisent des fissures verticales, généralisées ou localisées dans les parois, ce qui affecte la durée de vie des ouvrages [4, 5, 6]. Ces fissures apparaissent souvent au tiers de la hauteur des silos [6]. Ce phénomène a surtout été constaté sur des silos de stockage de blé construits durant les années 50 à 70 [6, 7]. Afin de remédier aux fissures verticales qui apparaissent sur la partie cylindrique de la paroi de ces silos, les techniques traditionnelles de réparation telles que l'injection de coulis ou du béton sont des solutions fréquemment utilisées. Néanmoins, ces techniques ne permettent pas en général de stopper l'initiation et la propagation des fissures [8].

Ainsi différentes techniques de réparation et de maintenance des ouvrages se sont développées ces dernières années. Entre autres des méthodes de réparation des fissures ont ainsi fait

l'objet d'utilisation et d'application avec succès dans le domaine de la construction [3-9-10]. Certaines sont spécifiquement conçues pour réparer des fissures actives, tandis que d'autres restent mieux adaptées à la réparation des fissures stables. Ces méthodes permettent de restaurer la capacité portante de l'élément en améliorant sa résistance mécanique. Par ailleurs, le renforcement traditionnel est de plus en plus remplacé par celui s'articulant sur des techniques utilisant les matériaux composites relativement inertes à l'oxydation de type tissu de fibres de verre ou tissu de fibres de carbone collés extérieurement. Cette technique rapide et efficace qui permet de concevoir des réparations économiques et durables commence à avoir des applications très répandues dans les domaines du génie civil et du génie militaire [11-12]. Elle permet notamment d'améliorer la capacité, la rigidité et la durabilité de nombreux éléments comme les colonnes, les poutres et les dalles soumises aux agressions du milieu [13-14-15-16]. Les comportements observés avec ce type de renforcement des poutres par les matériaux composites se présentent en général sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalablement fabriquées. Elles sont plus performantes que celles des poutres renforcées par des tôles en acier ou en alliage. Ces matériaux qui ont l'avantage de pouvoir être fabriqués en même temps que la structure permettent une conception du renfort dont les directions sont complètement paramétrables, plus adaptées au besoin de la structure grâce à divers procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation.

Ce travail se propose d'étudier l'influence du mode de réparation des fissures et de la nature des matériaux composites utilisés pour le recouvrement des fissures sur les performances mécaniques de quatre types de béton : ordinaire, fibré, haute performance et haute performance fibré.

2. PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

2.1. Matériaux et méthode de réparation

Dans cette étude il a été adopté une démarche utilisant de la résine polyester seule, du mortier de résine pour injection et un bandage par des toiles en matériaux composites en fibre de verre TFV (figure 1) ainsi que la toile en fibre de carbone TFC (figure 2) utilisées pour la réparation d'éprouvettes complètement endommagées et rompues en flexion.

Les constituants utilisés pour la formulation du béton synthétique à matrice polymère sont un sable de dune fin, un sable de dune moyen, un gravier de fraction 3/8 et un liant sous forme de résine polyester. Celle-ci fournie sous forme liquide dans des bidons étanches est de couleur rouge foncé, inflammable et insoluble dans l'eau. Elle a une masse volumique de $1,11 \text{ g/cm}^3$ à la température ambiante de $23 \text{ }^\circ\text{C}$, une viscosité de $20 \text{ dPa}\cdot\text{s}$, une résistance à la traction de 45 MPa et à la compression comprise entre 50 et 150 MPa . Les additifs qui sont un accélérateur et un durcisseur ont été fournis sous forme liquide dans des flacons hermétiques. Une huile servant d'isolant a été utilisée pour éviter le collage entre la résine et le moule.

Le tableau 1 résume les caractéristiques physiques des constituants.

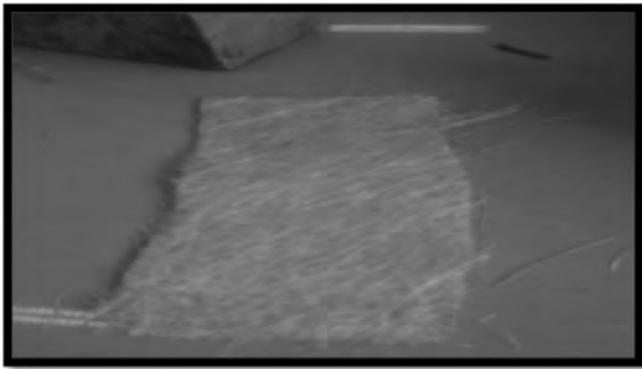


Figure 1 : Tissu de fibre de verre

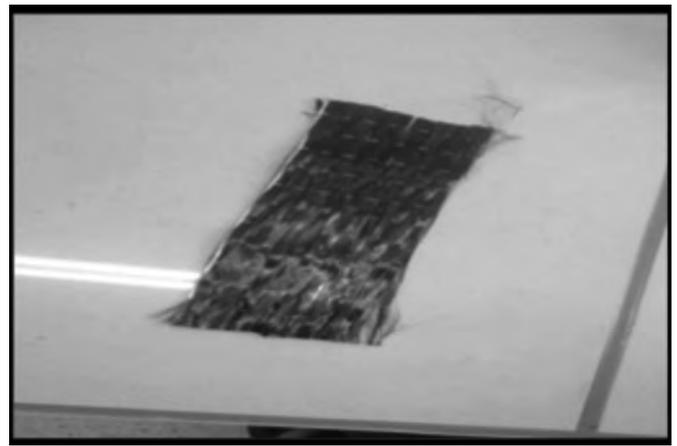


Figure 2 : Tissu de fibre de carbone

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des constituants

	Sable fin	Sable moyen	Gravier 3/8
Module de finesse (sans unité)	1,67	2,10	---
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,33	1,32	1,25
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,39	1,32	2,50
Porosité (%)	44,50	42,60	50
Propreté ES (%)	87,32	89,78	---

Il est à remarquer que le module de finesse du sable moyen est plus grand que celui du sable fin ; le sable moyen possédant la meilleure granulométrie. La masse volumique absolue du sable moyen est inférieure à celle du sable fin et à celle du

gravier. Par ailleurs, les valeurs moyennes des équivalents de sable qui sont supérieures à 80 indiquent que les sables utilisés sont très propres.

Afin de concevoir des réparations à la fois durable et économique, un pourcentage de 35% de résine par rapport au poids total est apparu comme étant la quantité optimale à prendre comme référence dans la formulation des mortiers de résine servant à la réparation avec deux types de sable. Il est à signaler que la vitesse de durcissement de la résine est très sensible à la température ambiante ce qui oblige à préparer des quantités peu importantes de mortier. Ainsi chaque gâchée est préparée avec une quantité de 600g de sable. Les différents pourcentages massiques des constituants sont 80% de sable fin, 20% de sable moyen, 35% de résine et 1,5% de durcisseur.

Les techniques et les étapes de réparation adoptées sur les quatre types de béton formulés (BO, BFM, BHP, BHPF) sont illustrées sur la figure 3 et peuvent être résumées comme suit :

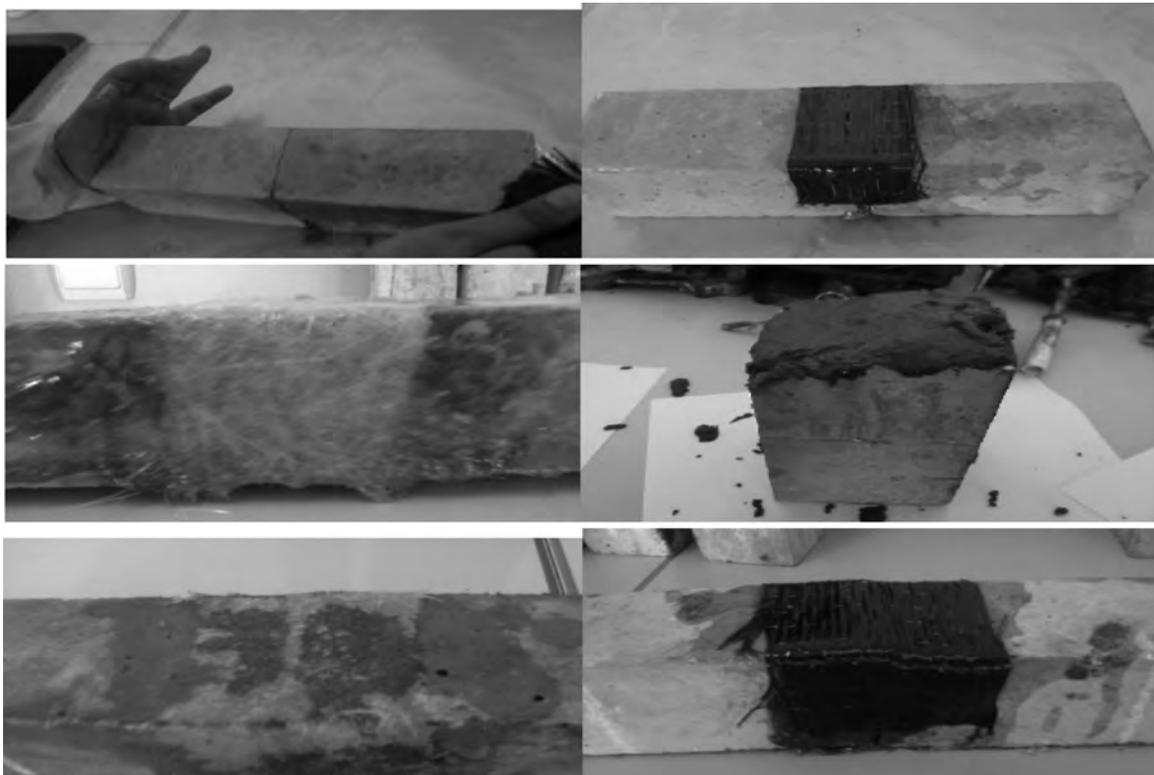


Figure 3 : Étapes de réparation.

1. Etape A

- injection de la résine seule dans la zone fissurée (dans notre cas après rupture) ;
- après l'injection de la résine, une bande de fibre de carbone de forme en U est placée et collée dans la zone tendue ;
- la même procédure est utilisée avec une bande de tissu en fibres de verre.

2. Etape B

- l'injection de la résine polyester seule est remplacée par l'injection de mortier de résine polyester ;
- injection de mortier de résine polyester + bandage par TFV (tissu de fibre de verre) ;
- injection de mortier de résine polyester + bandage par TFC (tissu de fibre de carbone).

La figure 4 montre un exemple des éprouvettes réparées

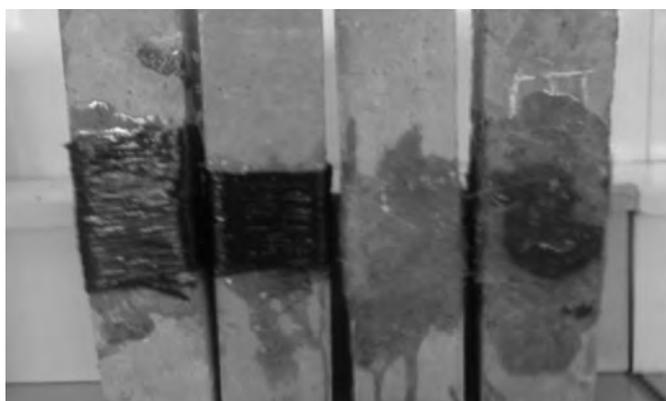


Figure 4 : Éprouvettes après l'épreuve de la réparation

2.2. Bétons à réparer étudiés, corps d'épreuves et dispositif de flexion

Quatre formulations de béton ont été étudiées et expérimentées : un béton ordinaire (BO), un béton à fibres métalliques courtes injectées de façon aléatoire dans le volume de l'éprouvette (BFM), un béton à haute performance (BHP) et un béton à

haute performance fibré (BHPF). Les éprouvettes pour chaque type de béton sont de forme prismatique de 7x7x28 cm³. Cette géométrie est imposée par la capacité de la machine d'essai. Pour les éprouvettes de mortier, des prismes de 4x4x16 cm³ ont été utilisés. Les essais ont d'abord été effectués sur les éprouvettes vierges et saines jusqu'à la rupture totale puis sur ces mêmes éprouvettes reconstituées après réparation en collant les deux morceaux rompus, en flexion 3 points. Ces essais de flexion ont été menés sur une machine de flexion Controlab dotée d'un montage de flexion trois points à chargement manuel de capacité 30kN (figure 5). La distance entre les appuis est prise égale à 21 cm. Les échantillons sont testés à l'âge de 28 jours. Les figures 5 et 6 montrent respectivement le montage à rouleaux 3 points adopté et le dispositif expérimental d'essai utilisé en flexion. Les essais sont conduits jusqu'à la ruine totale de l'échantillon

3. RÉSULTATS ET ANALYSES

Durant les essais sur les éprouvettes réparées il a été observé une adhésion parfaite entre le mortier de réparation et le béton juste avant le décollement c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rupture prématurée des éprouvettes due au décollement du mortier de résine polyester.

Les valeurs des résistances mesurées sur les éprouvettes avant et après les étapes de réparation pour les différents bétons formulés sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Résistances R_t pour les 4 types de bétons sur les éprouvettes avant et après la réparation

	Rt avant réparation en (MPa)	Rt après réparation en (MPa)			
		Résine + TFC	Résine + TFV	Mortier + TFC	Mortier + TFV
BO	4.6	1.37	7.34	5.51	7.34
BF	5.5	2.29	5.51	5.96	5.96
BHP	6.9	2.29	7.80	3.21	7.80
BHPF	7.80	2.29	8.26	3.67	8.72

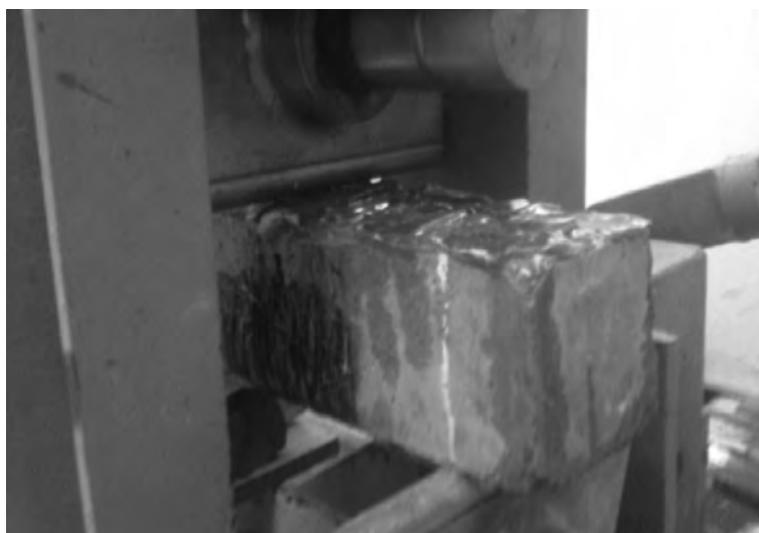


Figure 5 : Montage de l'éprouvette dans le dispositif de flexion à rouleaux en acier utilisé



Figure 6 : Dispositif de flexion

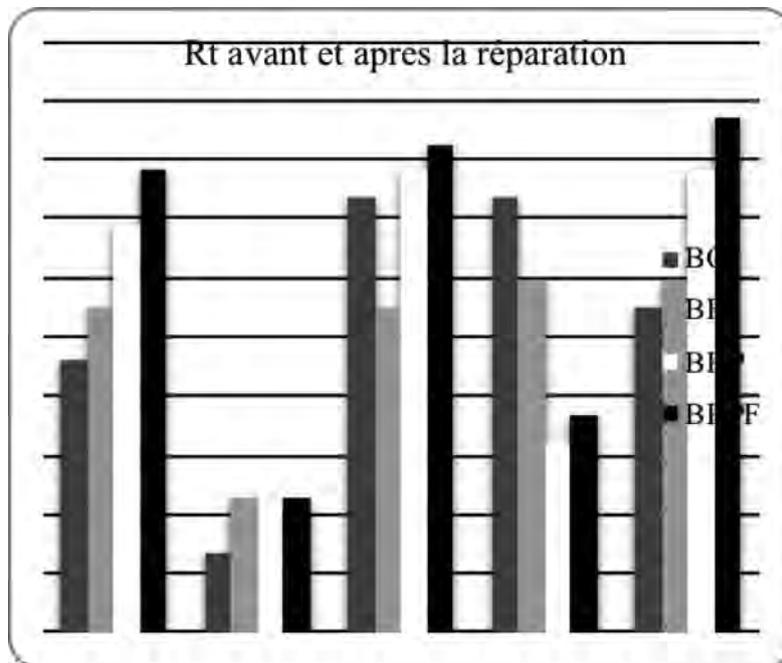


Figure 7 : Résistance à la traction par flexion avant et après la réparation des 4 types de béton

Ces résultats sont illustrés sur l'histogramme de la figure 7. Il apparaît que la géométrie du TFC qui est unidirectionnelle et parallèle à la fissure n'a pas d'influence significative sur la résistance. Cependant le TFV se distingue par une bonne adhérence avec le béton. Ce dernier engendre une augmentation de la résistance. Le TFV tissé sous forme bidirectionnelle en chaîne et trame aboutit ainsi à un processus de réparation efficace.

Par ailleurs la réparation par le mortier s'avère meilleure et plus efficace que celle par la résine toute seule.

Les images des figures 8 et 9 montrent un exemple d'illustration du mode de rupture des éprouvettes en flexion après la réparation. La détérioration des éprouvettes est produite par une nouvelle rupture espacée (2) proportionnellement à l'ancienne (1). Ces fissures naissent à un des appuis en continuant un chemin vers le point central où la charge est concentrée et appliquée.

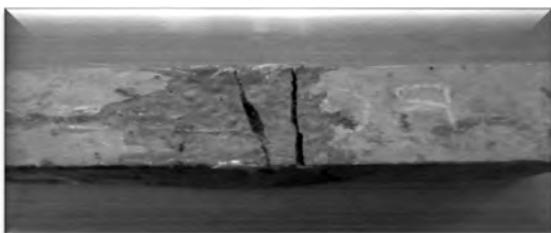


Figure 8 : Ancienne (1) et nouvelle rupture (2)



Figure 9 : Exemple de mode de rupture en flexion

4. CONCLUSIONS

La réparation ou le renforcement des structures existantes, leur adaptation à des contraintes d'exploitation évolutives sont autant d'aspects susceptibles de s'inscrire aujourd'hui dans les démarches de construction durable. Avec le temps les constructions endommagées nécessitent une réparation pour améliorer leur durée de vie. Ceci implique ainsi la recherche et le développement de nouvelles méthodes innovantes parmi lesquelles la technique de renforcement des structures par ajout de résines de polyester renforcées de tissus de fibre de verre ou de tissu de fibres de carbone. Ces techniques constituent une solution rapide, économique et durable de réparation. Cependant les gains de résistance ou de rigidité obtenus par ces techniques s'accompagnent de l'apparition de nouveaux modes de rupture. Ainsi du fait de leur caractère fragile, ces modes de rupture doivent être pris en compte de manière particulièrement attentive lors du choix et de la justification du renforcement.

Par ailleurs cette étude montre que les tissus de verre sont plus performants en tant que matériaux de réparation que ceux des fibres de carbone utilisés.

Le mortier de résine s'est avéré un produit de réparation meilleur que la résine seule.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Croston T., « *Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites : approche probabiliste* » thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Bordeaux, France, 20 Juin 2006.
- [2] Backeland A., « *Etude des mécanismes d'adhésion à l'interface résine/ciment en vue de la réparation des ouvrages en génie civil* » thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 31 Mai 2005.
- [3] Nguyen T.H., « *Durabilité des réparations à base cimentaire : analyse comparée de l'influence des propriétés mécaniques du matériau de réparation* », thèse de Doctorat Université Paul Sabatier Toulouse III, 12 Juillet 2010.
- [4] Reimbert M., Reimbert A., (1982). « *Silos, Théorie et pratique* ». Éditions Eyrolles. Paris.
- [5] Rotter J.M., *Silo and hopper design for strength*, 2008: Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation Edited by Don McGlinchey Blackwell Publishing Ltd. ISBN: 978-1-405-15825-1
- [6] Dutta A.B., (2013). *Study of type of failure in silo*, GRA global reserch analysis, Engineering, volume 2, issue :11, ISSN No 2277-8160
- [7] Ding Y., Wang J., Wa X. & Fen W. *Performance Analysis of Concrete Silo Structure Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate* Advanced Materials Research, 2011, V 243-249, p 5501-5505
- [8] *Concrete durability and repair technology*, Proceeding of the international conference, University of Dundee, Scotland, 8-10 september 1999, edited by Ravindra Dhir and Michaul J, p 166
- [9] Allout N., Debbar I., « *Elaboration et comportement d'un mortier de résine polyester : applications aux réparations* », mémoire de Master 2, Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, Juin 2012.
- [10] Kermiche S., « *Analyse expérimentale du comportement mécanique de poutres en béton armé préfissurées renforcées de matériaux composites de type textile polymère en toile de fibres de carbone* » mémoire de Magister, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2 Juillet 2007.
- [11] Lacroix R., Doghri K., « *Renforcement et réparation des structures par collage de composites : le TFC*, Annales du bâtiment et des travaux publics, N° 2, Avril-Mai 1999.
- [12] Triantafillou T.C., « *Strengthening of masonry structures using epoxy bonded FRP laminates* », Journal of Composites for Construction, May 1998, pp. 96-104.
- [13] Diagana C., « *Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures en béton armé renforcées à l'effort tranchant par collage de composites à matrice organique* », thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne (2001), France.
- [14] Assih T., « *Contribution à l'étude du renforcement et de la réparation de poutres en béton armé par collage de plaques composites en fibres de carbone* », thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, (1998), France.
- [15] Mosallam A.S., Mosallam K.M., « *Stengthening of two-way concrete slabs with FRP composite laminate* », Construction and building material, Vol. 17, 2003, pp. 43-54.
- [16] Djelal C. « *Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : étude expérimentale – pré dimensionnement* », Annales du bâtiment et des travaux publics, Février 1998.

Le Génie Civil au cœur des mutations technologiques et numériques

20 et 21 mars 2019
ESTP - CACHAN

Nom : Prénom :
Société :
Fonction :
Adresse :
.....
Tél :
E-mail :

Je suis intéressé(e) par les Journées GC'2019 et je souhaite des informations concernant :

- le programme
- l'inscription
- l'exposition technique
- J'ai l'intention de répondre à l'appel à communications
- J'ai l'intention de présenter un poster

Calendrier

Envoi des résumés	15 octobre 2018
Acceptation des résumés	31 octobre 2018
Envoi des articles	18 janvier 2019
Envoi des présentations	22 février 2019

INFORMATIONS PRATIQUES

La manifestation aura lieu dans les locaux de l'ESTP à Cachan, le mercredi 20 mars et jeudi 21 mars 2019.

Proposition de communications

Si vous souhaitez présenter une communication, votre résumé (300 mots) doit parvenir au secrétariat de l'AFGC (afgc@afgc.asso.fr) avant le **14 septembre 2018** en précisant le ou les thèmes de votre conférence.

Exposition technique

Un espace d'exposition technique est proposé aux entreprises et industriels intéressés par la promotion de leur savoir-faire et de leurs produits.

Espace poster

Un espace poster est mis à disposition des chercheurs et des universitaires souhaitant présenter les résultats de leurs travaux en rapport avec le thème des conférences.

Comité technique et d'organisation

Président : Emmanuel Ferrier
Vice-président : Bruno Godart
Membres : Nadjet Daoud, Sophie Burns, Ludovic Casabiel, Patrick Guiraud, Jocelyne Jacob, Gaël Le Bloa, Claude Le Quéré, Bernard Quénée, Christophe Rault, Noël Richet, Michel Royer-Muller, Alain Simon.

Droits d'inscription aux deux journées

Membres AFGC	500 € TTC
Non Membres AFGC	600 € TTC
Universitaires	250 € TTC

Ces tarifs comprennent l'accès à l'ensemble des conférences, les documents, les déjeuners et les pauses café, la soirée de gala et les transferts en car.

CONTACTS

AFGC - 42 rue Boissière - 75116 PARIS
Nadjet Daoud
Tel: +33 1 85 34 33 18
e-mail : afgc@afgc.asso.fr



GC'2019

Invitation préliminaire
Appel à communications

Le Génie Civil au cœur des mutations technologiques et numériques

20 et 21 mars 2019

ESTP - CACHAN



OBJECTIFS

Les progrès du numérique ces dernières années ont conduit différentes industries à s'orienter vers la troisième révolution industrielle et une industrie de plus en plus prononcée de la robotisation, de l'impression 3D, de l'intelligence artificielle et d'un processus de modélisation intégré de la conception à la production.

Même si ces innovations parviennent plus tardivement dans le domaine de la construction, de nombreux exemples en France ou à l'étranger démontrent l'importance de la mutation technologique et numérique en Génie Civil.

Les projets de construction sont confrontés à de nombreux défis et difficultés, tels que l'hygiène, la santé et la sécurité sur les chantiers de construction, la gestion de la main d'œuvre et la maîtrise des coûts, les difficultés de conception et de planification ou la gestion des plans et des interfaces, ainsi qu'une parfaite coordination des différents acteurs. L'avenir de l'industrie de la construction est numérique et construit sur une approche holistique qui associe toutes les parties impliquées. Le résultat : des structures fonctionnelles et pérennes, des processus efficaces, des coûts inférieurs, moins de temps de construction et une qualité supérieure dans tout le cycle de vie des ouvrages.

Cela nécessite de créer une mutation numérique et technologique, de développer le numérique à chaque étape de la construction, d'accompagner l'action humaine dans l'acte de construire en réduisant les tâches ingrates et en assurant la maintenance, l'entretien et le suivi du comportement des ouvrages au cours du temps.

La croissance démographique et urbaine, la transformation des modes de vie et de consommations, la raréfaction des ressources, les menaces environnementales, le déclin de la biodiversité, les tensions économiques et sociales, la révolution digitale, rendent la mutation numérique plus prégnante et rendent cette mutation indispensable pour l'industrie de la construction.

Les journées GC'2019 vont permettre d'analyser les réponses apportées par notre profession en démontrant son intelligence et sa capacité à relever les défis face à ces enjeux majeurs du numérique dans la construction et à catalyser une nouvelle dynamique. Ces journées se concentrent sur l'environnement et la motivation pour la mise en œuvre de la robotique et du numérique. Elles visent à identifier les principaux vecteurs de développement, à identifier les différences régionales et à décrire les progrès dans les domaines clés. L'objectif est de retracer également l'émergence et le changement des stratégies de développement au fil du temps. Ces journées identifieront les réalisations pratiques, et décriront les innovations, les développements clés pour l'avenir et la mobilisation de la recherche pour développer le numérique dans toutes les composantes de l'acte de construire. Il s'agira de valoriser les bonnes pratiques, d'analyser comment les nouvelles technologies vont impacter la conception des ouvrages et la réalisation des chantiers, de faire le bilan des progrès significatifs qui ont été réalisés et des changements importants qui vont permettre de construire l'avenir.

THÈMES DES CONFÉRENCES

Les trois premières demi-journées seront consacrées aux conférences.

La 4^{ème} demi-journée sera consacrée à la visite de réalisations d'ouvrages en Ile-de-France, illustrant le thème des journées GC'2019.

Les thèmes potentiels sont les suivants :

- Structures hybrides
- Robotisation
- Impression 3D
- Intelligence artificielle
- Maquette numérique et BIM
- Gestion des données : Big Data
- Drones
- Exosquelettes
- Scanners 3D
- Matériau et structure connectés
- Numérique, maintenance et gestion du patrimoine
- Innovation technologique et numérique en génie civil
- Optimisation des infrastructures
- Modélisations numériques 3D innovantes
- Apport du numérique dans les structures complexes
- Capteurs
- Reconnaissance automatique d'image
- Cyber-chantier
- Objets connectés
- Instrumentation sans fil
- Réalité augmentée
- Ergonomie

Secrétariat de l'AFGC

42 rue Boissière
75116 PARIS

www.afgc.asso.fr



LES ÉDITIONS ESKA-MA AU SERVICE DES ENTREPRISES, DES UNIVERSITAIRES ET DES CHERCHEURS

LES REVUES : LES RÉDACTEURS / LES SOCIÉTÉS

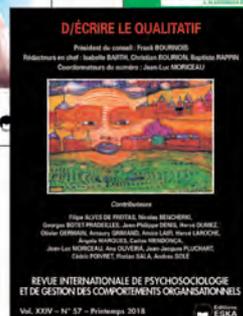
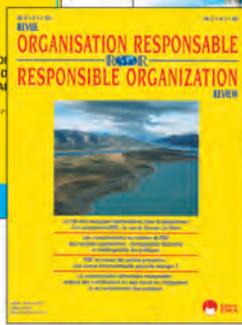
Jean-François Boulier
Philippe Bertrand
Af2i - Affi

Denis Benoit, Erick Leroux
Jérôme Méric

Laurence Jégouzo
Master Paris 1

Patrick Fridenson
Gabriel Calvez-Behart
Nadège Sougi, Silvan Lense
Philippe Lefebvre
EHESS - AHMO

Alice Le Flanchec
Astrid Mullenbach
Fondateurs : Frank Bournois,
Jacques Igalens, Jacques Rojot
AGRH



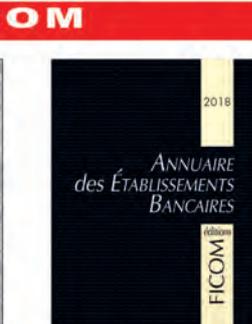
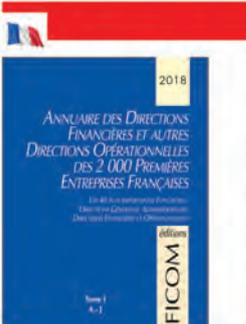
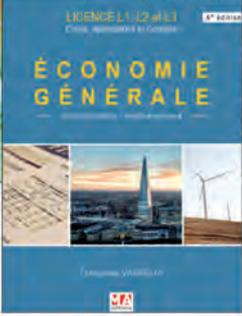
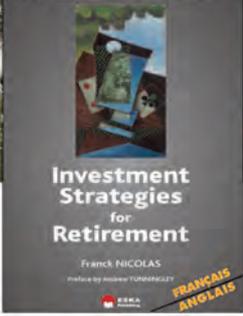
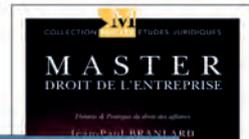
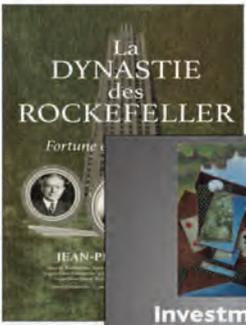
Catherine Quantin, Jérôme Wittwer,
Jean-Paul Domin, Etienne Minvielle, Robert Launois
CES - ARAMOS

Frédérique Déjean
Elise Penalva-Icher
Nicolas Postel
André Sobczak
Sylvia Cheminel
RIODD

Baptiste Rappin, Christian Bourion
Isabelle Barth, Frank Bournois
AGRH

Régis Meissonier
François de Corbière, Isabelle Walsh
AIM

LES LIVRES : BACHELOR-MASTER-RECHERCHE



LES CONGRÈS



Éditions ESKA et MA-Éditions au service des Sociétés savantes
 Association d'information et management
 Association de recherche appliquée au management des organisations de santé
 Association française des investisseurs institutionnels
 Association française de finance
 Association francophone de gestion des ressources humaines
 Association pour l'Histoire du Management et des Organisations
 Collège des Économistes de la Santé
 École des hautes études en sciences sociales
 Réseau international de recherche sur les organisations et le développement durable



Depuis 1993, au fil de ses éditions successives, *Toxicologie médicale professionnelle et environnementale* s'est imposé comme l'ouvrage de référence pour les professionnels de santé impliqués dans l'évaluation, la prévention et la surveillance des risques chimiques. Cette 5^e édition a été augmentée et totalement actualisée : elle présente une synthèse des données toxicologiques portant sur les principales substances manipulées en milieu de travail, auxquelles la population peut aussi être confrontée dans l'environnement domestique et général. Elle traite de manière extensive des intoxications aiguës et chroniques professionnelles, et aborde pour chaque toxique les problématiques rencontrées en population générale, du saturnisme infantile aux intoxications domestiques par le monoxyde de carbone ou à la toxicomanie aux solvants.

Face à une molécule ou à une famille de substances donnée, un index de plus de 2 800 termes permet de se reporter au chapitre correspondant et de retrouver rapidement les pathologies établies qu'elle(s) sont susceptibles de provoquer.

Dans une approche résolument médicale, le livre apporte des informations claires, validées et utiles pour la pratique, et offre une mise en perspective des thématiques toxicologiques actuelles. Le praticien disposera d'une information fiable, reposant sur l'analyse critique de la littérature internationale, intégrant les principes de la médecine fondée sur les preuves, effectuée à la lumière des 30 ans d'expérience en toxicologie médicale de l'auteur, libre de tout conflit d'intérêt.

Ce livre s'adresse aux médecins du travail impliqués dans l'évaluation, la prévention et la surveillance du risque toxique professionnel, aux cliniciens (urgentistes, praticiens des CAPTV, médecins spécialistes, légistes, analystes) confrontés aux intoxications aiguës et chroniques par les produits chimiques industriels, aux personnels des services de Santé au travail (hygiénistes, IPRP...), et à l'ensemble des professionnels intervenant en santé publique et en charge de la veille sanitaire.

TOXICOLOGIE MÉDICALE PROFESSIONNELLE ET ENVIRONNEMENTALE

François TESTUD



TOXICOLOGIE MÉDICALE PROFESSIONNELLE ET ENVIRONNEMENTALE

François TESTUD

Préface du Dr Robert GARNIER

698 pages

190 € + 3,51 € de frais de port

François TESTUD est médecin toxicologue et médecin du travail. Après 25 ans en CHU au centre de toxicovigilance et centre antipoison de Lyon, il exerce actuellement en service de Santé au travail dans le BTP. Il est membre du conseil scientifique des *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement* ainsi que du traité « Pathologie professionnelle et de l'environnement » de l'*Encyclopédie médico-chirurgicale*.

ÉDITIONS ESKA

12, rue du Quatre-Septembre
75002 Paris

Tél. : 01 42 86 55 79 - Fax : 01 42 60 45 35

Pour toutes commandes :
<http://eska-publishing.com>

Contact :
adv@eska.fr