



LABORATOIRE NATIONAL DES TRAVAUX PUBLICS
ET DU BATIMENT
ALAROBIA - ANTANANARIVO



BULLETIN DE LIAISON N°4



2e Semestre 2025

LNTPB
020 78 421 88 / 020 22 432 12
lntpb@moov.mg
<https://lntpb-madagascar.com>



LABORATOIRE NATIONAL DES TRAVAUX PUBLICS ET DU BÂTIMENT (L.N.T.P.B)

Avec ses 70 ans d'expérience

Organisme certifié en ISO 9001 – Version 2015



NOS DOMAINES D'INTERVENTIONS

• *Domaine Géotechnique et Mécanique des Sols :*

- Etudes des caractéristiques mécaniques des sols pour les besoins de la construction :
 - **Etude de Fondation : Sondage et carottage jusqu'à 120 mètres de profondeur**
 - **Etude de Stabilité des remblais et mur de soutènement**
 - **Expertise**
- Etude géotechnique des routes et des aéroports (Chaussées Bitumées et/ou en terre) ;
- Recherche des matériaux pour chaussée

• *Routes, Ouvrages et Bâtiment :*

- Agréments des matériaux ;
- Exécution des planches d'essais ;
- Contrôle d'exécution des travaux : contrôle intérieur (interne et externe) et extérieure ;
- Vérification de l'application des spécifications exigées par le C.P.S ;
- Constitution des banques de données géotechniques ;
- Expertise ou contre-expertise ;
- Expertise des ouvrages en béton armé par les essais d'auscultation sonique.
- Effectue des Etalonnages pour les matériels de laboratoire dans le Secteur BTP.

• *Recherche, Développement et Matériaux :*

- Recherche et expérimentation sur les nouveaux matériaux ; (Recherche appliquée)
- Archivage et exploitation des patrimoines documentaires du laboratoire ;
- Conception et fabrication des matériels d'essais ;
- Mise en place des normes adaptées au contexte local ;
- Etudes, formulation des bétons hydrauliques et hydrocarbonés ;
- Essai d'agrément des matériaux de construction (fers, ciments, briques, bitumes peintures,)
- Agrément des Laboratoires Géotechniques privés.

• *Maîtrise d'œuvre :*

- Contrôle et Surveillance des travaux de construction.
- Contrôle Technique pour la garantie décennale auprès des assurances

• *Organisme Certificateur Technique des Laboratoires Géotechniques privés*



B.P 1151 – Alarobia Antananarivo 101

Tél. 020 78 421 88

E-mail: lntpb@moov.mg

Site web: lntpb-madagascar.com



« La Qualité c'est cher, mais la non qualité c'est encore plus cher. »

SOMMAIRE

La qualité au laboratoire : plus qu'une norme, un atout au quotidien.....	7
<i>par Monsieur RAOELIARIMANANA Andry Lala Glorys, Responsable Matériel et Qualité LNTPB</i>	
Valorisation d'un dérivé du CNSL (Cashew Nutt Shell Liquid), issu des coques de noix de cajou, en liant pour matériaux	8
<i>par Monsieur RANDRIATSARAZAKA Stephanoël, Ingénieur Chef Laboratoire Matériaux LNTPB et l'équipe du Laboratoire International Associé (LIA)</i>	
Essai et étude de fabrication d'une peinture imperméable à l'eau à base de Metakaolin.....	14
<i>par Dr. RANDRIAMALALA Tiana Richard, Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux du LNTPB, RANDRIAMIHAJASON Maminiaina Elisée, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et RANDRIAMIHAJA Tombotsoa Harena Frassatie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo</i>	
Effet de la température sur le béton, du béton frais au béton durci, son éclatement sous sollicitation thermique	25
<i>par Dr. RANDRIAMALALA Tiana Richard, Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux du LNTPB</i>	
Imperméabilisation des BTCS	34
<i>par Dr. RANDRIAMALALA Tiana Richard, Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux du LNTPB et Monsieur ANDRIAMBELOMANANA Tahiry Mandranto, Chef de Laboratoire Sols au LNTPB</i>	
Résilience d'une route en terre à Madagascar, selon les paramètres climatique, géologique et géotechnique : cas de la RN 10, RNT 23, RN 31 ET RIP 84.....	38
<i>Dr. RANDRIAMALALA Tiana Richard, Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux du LNTPB et Madame MANDIMBIARIMANGA Tsinjoniaina Helisoa, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo</i>	
Fabrication de bétons bitumineux drainants à base de granulats artificiels (laitiers cristallisés)	48
<i>par Dr. RANDRIAMALALA Tiana Richard, Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux du LNTPB et HAJALALAINA Stefano Aristide, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo</i>	
Etude métrologique basée sur la vérification et étalonnage des appareils de mesure suivant la norme pour l'accréditation ISO 17025 au sein du laboratoire LNTPB.....	52
<i>par Dr. RANDRIAMALALA Tiana Richard, Chef de Département de Recherche, Développement et Matériaux du LNTPB et RANDRIANTSOA Ny Arilivah Tongasoa, Université d'Antananarivo</i>	
Essai de perméabilité de roche par essai LUGEON.....	61
<i>Par Monsieur RAHERIMANANTSOA Lalanantenaina Nathanaël, Ingénieur Chef de Projet au LNTPB</i>	
Amélioration du sol avec ciment pour matériaux de couche fondation d'une chaussée.....	67
<i>Par Monsieur LALAHARIJAONA A. Patrick, Responsable du Département Routes, Ouvrages et Bâtiments et Monsieur RATRIMOMANANA Andrianabo Daniel, Ingénieur Chef de Projet au LNTPB</i>	



**Laboratoire National des Travaux Publics et du
Bâtiment (L.N.T.P.B)**

Sécurité - Qualité



Organisme certifié en ISO 9001 Version 2015

70 ans d'expérience



Pour tout étude et contrôle géotechniques dans les domaines suivants:

- ♦ **Bâtiments et murs de soutènements**
- ♦ **Routes**
- ♦ **Ouvrages d'Art**
- ♦ **Aéroports**
- ♦ **Ports fluviaux et maritimes**
- ♦ **Matériaux de construction (Bitume, ciment, fer, brique...)**
- ♦ **Expertise et contre-expertise**

**Contrôle Technique des Travaux de construction (Ouvrages, bâtiments ...)
pour garantie décennale auprès des assureurs.**

S'adresser au :

L.N.T.P.B

Tel: 020 78 421 88 — 020 22 432 12

<https://lntpb-madagascar.com/>

Mail: lntpb@moov.mg - Alarobia -Antananarivo

Faites confiance aux Vrais Professionnels



**« La qualité c'est cher mais la non
qualité c'est encore plus cher »**



Obtention par le LNTPB Madagascar du prix « The Quality Choice Prize 2025 in the DIAMOND CATEGORY » délivré par ESQR le 29 mai 2025 à Stockholm.

But du concours : reconnaissance et distinction des résultats sur la qualité des services, les meilleures pratiques, la conscience de la qualité et les réussites obtenues par les entreprises sur les **marchés régionaux et mondiaux**. Ce programme de reconnaissance est géré par l'organisation Européenne ESQR.

L'ESQR (European Society for Quality Research) ayant son siège en Suisse font des enquêtes sur la qualité dans diverses sociétés dans le monde entier. Ainsi, le LNTPB est parmi les 49 pays sélectionnés, et est **le seul Laboratoire Géotechnique retenu** et a obtenu « **The Quality Choice Prize 2025 in the DIAMOND CATEGORY** »

Ce trophée a été réceptionné à Stockholm par Monsieur SAMBISOLO Emile Joseph, Président du Conseil d'Administration du LNTPB et Dr. Ing. RAKOTOARISON Pierre Donat, Directeur Général du LNTPB.

Le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) créé en 1954, est un organisme rattaché au Ministère des Travaux Publics (MTP). Il est spécialisé pour **les études et contrôles géotechniques** pour l'Etat Malagasy dans les domaines ci-après :

- Travaux de construction routière et du bâtiment ;
- Travaux d'aménagement aéroportuaire ;
- Travaux maritimes et ports fluviaux ;
- Travaux d'aménagements hydro agricoles.

Etant certifié au « Système de Management de la Qualité ISO 9001 par AFAQ/AFNOR depuis 2014, le LNTPB vise une **amélioration continue** de ses engagements en matière de **Qualité**.

Il a déjà obtenu divers trophées dans les domaines de la Qualité, notamment par Business Initiative Direction Qualité (BID

QUALITY) :

- en 2015 : Trophée Quality Summit,
- en 2016 : Trophée Internationale Quality,
- en 2017 : Trophée Internationale Gold Star
- et en 2023, il a obtenu le Trophée International Diamond Prize for Excellence in Quality.

Ce prix obtenu en 2025 constitue la preuve de la **recherche permanente de la qualité** sur les activités du LNTPB tant au niveau national qu'international.



N° 2014/59139.7

AFNOR Certification certifie que le système de management mis en place par :
AFNOR Certification certifies that the management system implemented by:

Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB)

pour les activités suivantes :
for the following activities:

- MÉCANIQUE DES SOLS ET ÉTUDE DES FONDATIONS DES BÂTIMENTS ET D'OUVRAGES D'ART
- ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DES ROUTES ET AÉRODROMES
- ÉTUDE, AGRÉMENT ET MISE AU POINT DES PROCÉDÉS DE FABRICATION ET CONTRÔLE DE QUALITÉ DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION.
- CONTRÔLE GÉOTECHNIQUE ET SURVEILLANCE DES TRAVAUX.
- EXPERTISE ET/OU CONTRE-EXPERTISE DANS LE DOMAINE DE BTP.
- RECHERCHE APPLIQUÉE DANS LE DOMAINE DU GÉNIE CIVIL.
- MAITRISE D'ŒUVRE: ÉTUDE, CONTRÔLE ET SURVEILLANCE DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DANS LE SECTEUR DU BTP.
- CONTRÔLE TECHNIQUE DES CONSTRUCTIONS, DES OUVRAGES (PONTS) ET BÂTIMENTS SUR DES CHANTIERS POUR DES GARANTIES DÉCENNALES AUPRÈS DES ASSURANCES.

a été évalué et jugé conforme aux exigences requises par :
has been assessed and found to meet the requirements of:

ISO 9001 : 2015

et est déployé sur les sites suivants :
and is developed on the following locations:

ALAROBIA – BP 1151 – ANTANANARIVO 101 MADAGASCAR

Ce certificat est valable à compter du (année/mois/jour)
This certificate is valid from (year/month/day)

2023-11-14

Jusqu'au
Until

2026-02-25



Ce document est signé électroniquement. Il constitue un original électronique à valeur probatoire.
This document is electronically signed. It stands for an electronic original with probatory value.



Julien NIZRI
Directeur Général d'AFNOR Certification
Managing Director of AFNOR Certification

Seul le certificat électronique, consultable sur www.afnor.org, fait foi en temps réel de la certification de l'organisme. The electronic certificate only, available at www.afnor.org, attests in real-time that the company is certified. Accreditation COFRAC n° 4-0001, Certification de Systèmes de Management, Portée disponible sur www.cofrac.fr.
COFRAC accreditation n° 4-0001, Management Systems Certification, Scope available on www.cofrac.fr.
AFAQ est une marque déposée. AFAQ is a registered trademark - CERTI F 0956.9/07-2020

Flashez ce QR Code
pour vérifier la validité
du certificat



**RAOELIARIMANANA Andry
Lala Glorys**
*Responsable Maintenance et
Qualité LNTPB*

LA QUALITE AU LNTPB : PLUS QU'UNE NORME, UN ATOUT AU QUOTIDIEN

Depuis plusieurs années, notre laboratoire est engagé dans une démarche de management de la qualité selon la norme ISO 9001 : 2015. Aujourd'hui, alors que nous préparons notre accréditation selon la norme ISO/IEC 17025 : 2017, il me paraît utile de partager quelques réflexions sur la façon dont la qualité peut être perçue, non comme une contrainte documentaire, mais comme un véritable outil de travail.

UNE DEMARCHE STRUCTURANTE, PAS UNE PAPERASSE

On entend souvent que la qualité, c'est « beaucoup de papiers ». Cette perception est compréhensible, mais restrictive. Dans notre quotidien de laboratoire, la qualité se manifeste par des éléments simples mais essentiels :

- Une identification claire des échantillons,
- Des procédures précisant qui fait quoi et comment,
- Des enregistrements traçant ce qui a été fait et quand.

En réalité, ces outils permettent de **gagner en rigueur et en sécurité**. On évite les pertes d'informations, les confusions entre échantillons, les oublis de contrôles ou de vérifications.

DES EXEMPLES CONCRETS

Récemment, un technicien m'a confié que la fiche de préparation des échantillons, introduite depuis la mise en place du SMQ l'a aidé à ne plus rien oublier lors de la phase de préparation. Un autre collègue, nouvellement recruté, a pu réaliser des essais de manière autonome grâce à une procédure bien rédigée, sans devoir solliciter ses pairs à chaque étape.

Ce ne sont que deux petits exemples, mais ils illustrent comment la qualité, bien appliquée, **facilite le travail** au lieu de le compliquer.

UNE CULTURE EN CONSTRUCTION

Nous sommes nombreux à découvrir la qualité par la pratique. En tant que responsable qualité, je ne me présente pas comme un expert, mais plutôt comme un collègue qui explore, qui apprend, et qui cherche à améliorer les techniques et pratiques de travail avec les autres.

Notre objectif commun est de construire progressivement une **culture qualité** au laboratoire ; en commençant par des gestes simples : signaler un dysfonctionnement, proposer une idée d'amélioration, prendre le temps de noter une vérification effectuée.

VERS L'ISO 17025 : UNE EVOLUTION NATURELLE

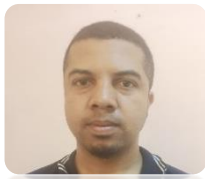
La démarche que nous avons engagée avec l'ISO 9001 nous prépare naturellement à l'ISO 17025. Cette dernière exigera de nous une meilleure maîtrise technique de nos essais, une traçabilité accrue, et une démonstration de nos compétences techniques.

Mais là encore, ce n'est pas une fin en soi : c'est un moyen de **mieux servir nos clients**, d'assurer la fiabilité de nos résultats, et de renforcer notre image de laboratoire de référence.

CONCLUSION

La qualité ne doit pas être perçue comme un monde à part, mais comme **un ensemble d'outils au service de notre mission technique**. En prenant le temps de s'y intéresser, chacun peut y trouver des bénéfices pour son propre travail.

VALORISATION D'UN DERIVE DU CNSL (CASHEW NUTT SHELL LIQUID), ISSU DES COQUES DE NOIX DE CAJOU, EN LIANT, POUR MATERIAUX



**RANDRIATSARAZAKA
Stephanoël**
*Ingénieur Chef Laboratoire
Matériaux LNTPB*



Pr Marc Lemaire
*Laboratoire International
Associé (LIA)*



Hermann Rafanoela
*Laboratoire International
Associé (LIA)*



Fenia Ramiharimanana
*Laboratoire International
Associé (LIA)*



Volana Mifelana
*Laboratoire International
Associé (LIA)*

INTRODUCTION

Les briques d'argile cuite sont généralement le matériau de construction utilisé à Madagascar. Selon les conditions climatiques et les lieux, les briques sont séchées puis cuites dans des fours, à ciel ouvert, pendant quelques jours à quelques semaines. La cuisson a lieu dans des fours alimentés au charbon de bois, aux balles de riz, à la tourbe ou au bois, pour atteindre des températures élevées (600 – 750 °C). Cette méthode de fabrication contribue significativement à l'épuisement des ressources essentielles par une consommation massive de combustibles ; et leur combustion produit divers types d'émissions de gaz, tels que le CO, le CO₂, les oxydes d'azote et les oxydes de soufre. Par conséquent, l'impact environnemental, en termes de demande de ressources, de consommation d'énergie et de génération de gaz à effet de serre, rend la fabrication traditionnelle de briques non durable. De nouvelles méthodes ont été développées pour fabriquer des briques alternatives, telles que celles à base de biomatériaux et de déchets industriels.

L'une des thématiques de recherche du Laboratoire International Associé (LIA), qui est un laboratoire de l'Université d'Antananarivo créé en 2011 par des chercheurs Malagasy et lyonnais mais associé avec l'université Claude Benard Lyon1 et qui est localisé dans l'enceinte de l'IST Institut Supérieur de Technologie, est la valorisation des déchets de l'agro-industrie : les coques de noix de cajou. Madagascar exporte 10 000 tonnes par an d'amandes de cajou, générant une grande quantité de coques de noix de cajou, généralement brûlées ou mises en décharge. Cependant, ces coques contiennent une huile visqueuse appelée CNSL, obtenue par extraction par solvant, d'acide anacardique (60 à 65 %), de cardol (15 à 20 %), de cardanol (10 %) et de méthylcardol (traces). Pour cette caractéristique structurale unique, ce liquide sombre est utilisé comme monomère naturel pour les réactions de polymérisation.

Dans ce cadre, le CNSL et ses composés peuvent être valorisés et utilisés comme matières premières pour développer de nouveaux matériaux fonctionnels écologiques avancés. Pour la première fois, notre étude propose un dérivé du CNSL comme liant potentiel pour les matériaux en terre. Les briques ont été fabriquées à partir de terre rouge de Madagascar et de dérivés oxyacétiques du CNSL ; afin d'améliorer leurs propriétés (résistances à la traction, à la compression et à l'eau) et de réduire leur empreinte environnementale (réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz).

MATERIELS ET METHODES

Matières premières

Les coques de noix de cajou sèches proviennent des opérateurs à Antsiranana. Les solvants et réactifs organiques ont été achetés auprès de distributeurs locaux et de distributeurs de produits chimiques, tels que SPCI, Chimidis et Sigma-Aldrich. Les solvants ont été purifiés par distillation avant chaque utilisation. Les autres réactifs ont été utilisés tels que reçus de l'entreprise chimique, sans purification.

Les moules utilisés pour la formulation des matériaux de construction ont été fabriqués par un artisan local. Ces moules, en fer galvanisé, avaient les dimensions d'un cylindre : 3,6 cm de diamètre × 2,2 cm de hauteur et d'un parallélépipède rectangle de 4 cm de largeur × 4 cm de hauteur × 16 cm de longueur.

Dans cette étude, la terre rouge a été collectée à Ampasampito, séchée au soleil pendant environ 7 h, puis broyée et tamisée avec un tamis à mailles carrées d'une ouverture de 1 mm. Un échantillon de brique traditionnelle malgache fabriquée avec de l'argile provenant d'Ambohitrimanjaka, a été utilisé comme

référence lors de l'évaluation des caractéristiques physico-mécaniques.

Synthèse du liant : acide oxyacétique du CNSL

Les coques broyées de noix de cajou ont été macérées à 90 °C dans l'hexane pour extraire le CNSL. La synthèse de l'acide oxyacétique a été réalisée en mélangeant le CNSL avec du KOH, du chloroacétate de sodium sous agitation à 80°C pendant 2h. Le dérivé oxyacétique du CNSL a été obtenu sous forme de pâte brune visqueuse après traitement du milieu réactionnel : acidification et extraction à l'acétate d'éthyle.

Formulation des matériaux

Des essais préliminaires de formulation ont été réalisés d'abord dans des moules métalliques cylindriques, de dimensions 3,6 cm de diamètre × 2,2 cm de hauteur, pour optimiser la masse de l'acide oxyacétique du CNSL nécessaire et la granulométrie de terre rouge.

Suite à ces essais, un protocole de formulation des matériaux a été développé puis transposé dans des moules parallélépipédiques rectangles de 4 cm de hauteur × 4 cm de largeur × 16 cm de longueur (brique). Les dimensions des moules ont été choisies selon la norme NF EN 196-1 pour l'évaluation des caractéristiques mécaniques.

Une suspension du mélange d'acide oxyacétique CNSL dans l'eau à une concentration de 1 g/mL, a été préparée et mélangée avec de la terre rouge pendant 25 min avec un agitateur mécanique (vitesse : 750 tr/min). De l'eau a été ajoutée progressivement sous agitation jusqu'à l'obtention d'une boue, qui a été introduite dans un moule métallique par moulage manuel. Les matériaux ont été exposés à l'air libre pendant trois heures pour sécher, puis chauffés dans un four à 60 °C pendant

24h à 48 h. Après refroidissement, les matériaux ont été démoulés.

Les différents essais de formulation réalisés avec les quantités de matières premières utilisées correspondaient au même volume et à la même masse globale : masse de terre rouge + masse de liant = 70 g pour les moules cylindriques et 440 g pour les moules parallélépipédiques rectangles.

Caractérisation physico-mécanique des matériaux de construction

La masse volumique apparente, la stabilité des matériaux dans l'eau et l'absorption d'eau des matériaux préparés ont été mesurées. Nous avons déterminé également le comportement mécanique des matériaux sous contraintes appliquées, notamment en traction, en utilisant les résistances à la flexion et à la compression selon la norme NF EN 196-1 en collaboration avec LNTPB Alarobia.

RESULTATS

CNSL et acide oxyacétique du CNSL

Le rendement en CNSL extrait des coques de noix de cajou était de 38,2 %, par rapport à la masse des coques. L'acide oxyacétique a été obtenu avec un rendement de 71 %.

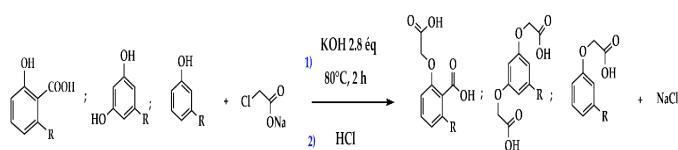


Figure 1. Synthesis of oxyacetic acid of CNSL.

Formulation des matériaux

Les premiers essais de formulation ont été réalisés dans l'eau avec un pourcentage massique d'acide oxyacétique allant de 0 à 15% en utilisant la terre rouge dans des moules cylindriques de 3,6 cm de diamètre × 2,2 cm de hauteur. Les essais avec 5 à 10 % de liant ont montré une meilleure stabilité dans l'eau (plus de 24 h) par rapport au matériau sans liant.

Ensuite, la formulation a été réalisée avec des moules de dimensions 4 cm de largeur × 4 cm de hauteur × 16 cm de longueur, conformément à la norme NF EN 196-1. Après démoulage, les matériaux ont été placés sur le plan de travail à l'abri du soleil. Des solides compacts ont été obtenus, à l'exception de l'échantillon A4^P (15 % de liant), qui a montré une fissure lors de la cuisson (Figure 2D, Tableau 1). Il est à noter que les matériaux à 10 % et 15 % de liant avaient deux phases légèrement différentes ; c'est-à-dire que la couleur rouge de la brique était légèrement plus foncée pour la phase supérieure et contenait probablement plus de liant coloré (brun foncé) (Figure 2C).

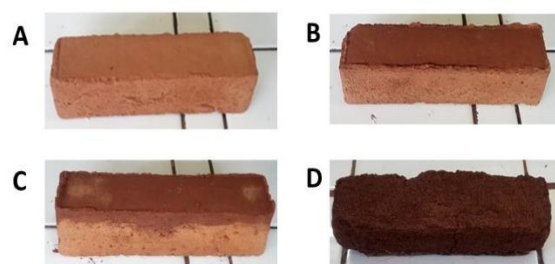


Figure 2. Matériaux formulés avec la terre rouge et de l'acide oxyacétique du CNSL comme liant : (A) 0 % de liant, (B) 5 % de liant, (C) 10 % de liant et (D) 15 % de liant.

Tableau 1. Formulation de matériaux dans des moules prismatiques de 4 cm de largeur × 4 cm de hauteur × 16 cm de longueur.

Essai	Proportion de liant (g; %)	Temps de séchage à 60°C (h)	Quantité d'eau (mL)	Aspect	Densité apparente (g/cm ³)
A1 ^P	0	24	140	Compact solid	2.07
A2 ^P	22; 5	24	140	Solid, compact and hard	2
A3 ^P	44; 10	24	120	Solid, compact and hard, two slightly coloured phases	2.14
A4	66; 15	48	100	Solid, two phases, crack, air bubbles	2.03

Les densités apparentes des matériaux variaient légèrement pour les quatre matériaux préparés. Cette variation était cohérente avec la différence entre leurs constituants. Une augmentation a été observée pour le matériau formulé avec 10 % de liant (Tableau 1). Cela peut s'expliquer par la différence de masse volumique entre le matériau inorganique ($> 2 \text{ g/cm}^3$) et l'acide oxyacétique CNSL ($0,9 \text{ g/cm}^3$) ; et le remplissage de l'espace entre les particules de latérite.

Il semble que le pourcentage de liant joue un rôle également dans le temps de cuisson des matériaux. Les matériaux avec 5 et 10 % de liant, étaient secs à 60 °C après 24 h au four. Alors que ceux avec 15% de liant n'étaient secs qu'après 48 h.

Caractérisation des matériaux

Les comportements des échantillons au contact de l'eau ont été évalués pendant 24 h à 2 mois d'immersion totale des briquettes dans l'eau. Des briques traditionnelles d'argile (A0) et de terre rouge (A1^P) sans ajout de liant ont servi de références.

Le matériau A1^P (terre rouge sans liant) n'était pas résistant à l'eau et s'est détérioré après 6 h (Tableau 2). Le matériau A4^P (avec 15 % de liant) étant fissuré, il s'est rompu après 8 h dans l'eau. Comparés au matériau traditionnel A0, les matériaux A2^P (5 % de liant) et A3^P (10 % de liant) étaient stables dans l'eau après 24 h d'immersion.

Le taux d'absorption d'eau des matériaux a été évalué avec les matériaux stables A0, A2^P et A3^P après immersion totale dans l'eau pendant 24 heures. Nous avons également mesuré le taux d'absorption d'eau de A0 et A3^P après 2 mois d'immersion dans l'eau. Les matériaux ont été séchés pendant 10 minutes, puis pesés. Les résultats montrent que le matériau de référence A0 a absorbé trois fois plus d'eau que le matériau A3^P, avec 10% d'acide oxyacétique CNSL, avec un taux d'absorption égal à 29,3 % après 24 h d'immersion (Tableau 3). Son taux d'absorption était également 3 fois plus élevé après 2 mois d'immersion dans l'eau (36,7 %), qui s'est transformée en boue à la surface, par rapport à notre matériau A3^P (12,6%), qui est resté beaucoup plus stable.

Tableau 2. Résistance temporelle à l'eau et taux d'absorption d'eau des briquettes.

Essai	Proportion de liant (%)	Temps de résistance dans l'eau	Taux d'absorption (après 24 h d'immersion)	Taux d'absorption (après 2 mois d'immersion)
A0 (Brique traditionnelle)	0	>2 mois	29,3%	36,7%
A1 ^P (red soil)	0	<6 h	-	-
A2 ^P (red soil)	5	>24 h	13,1%	-
A3 ^P (red soil)	10	>2 mois	9,3%	12,6%
A4 (red soil)	15	8 h	-	-

Caractéristiques mécaniques des matériaux

La résistance à la traction indique la force de traction maximale supportée par un matériau avant rupture définitive. Cette caractéristique mécanique a été évaluée sur des matériaux âgés de 28 jours. Deux échantillons ont été évalués pour chaque type de matériau.

Les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 2, avec une valeur de résistance à la traction de 0,6 à 2,1 MPa. Une valeur plus faible a été observée avec le matériau avec 15 % de liant (0,6 MPa) (Figure 2). Cela peut s'expliquer par la présence d'une fissure sur cette briquette. Cependant, les matériaux avec 5 et 10 % de liant ont montré des valeurs de résistance à la traction plus élevées (1,2 et 2,1 MPa, respectivement), par rapport au matériau de référence formulé à 60 °C avec de la terre rouge sans liant (0,8 MPa). Le matériau à 10 % de liant était encore plus résistant que le matériau traditionnel cuit à l'argile à 600–750 °C (1,6 MPa). L'ajout de 10 % de liant CNSL a amélioré la résistance à la traction des matériaux à base de terre rouge, les rendant 28 % plus résistants que les briques d'argile cuites traditionnelles.

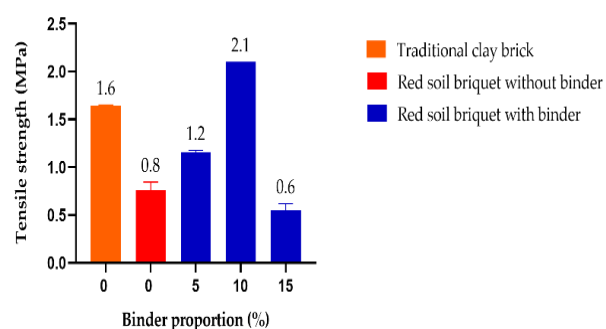


Figure 3. Résistance à la traction par flexion des matériaux

La résistance à la compression mesure la capacité d'un matériau à supporter des charges sans s'écraser, contrairement à la résistance à la traction, qui est une résistance à l'allongement (éclatement). Les valeurs de résistance à la compression sont présentées dans la figure 4 ci-dessous.

Les résultats ont montré que tous les matériaux formulés avec l'acide oxyacétique de CNSL étaient plus résistants à la compression que le matériau de référence préparé sans liant ou la brique traditionnelle (Figure 4). La valeur maximale de résistance à la compression a été obtenue avec le matériau contenant 10 % de liant (5,6 MPa). Cette valeur élevée pourrait être due à l'absence de vides entre les particules inorganiques et à une forte liaison entre les grains de terre rouge et les dérivés de l'acide oxyacétique de CNSL. Ce

matériau est cinq fois plus résistant (5,6 MPa) que le matériau de terre rouge sans liant (1,1 MPa) ; et plus de deux fois plus résistant que la brique traditionnelle (2,2 MPa). En effet, la résistance à la compression des briques traditionnelles dépend de la qualité de l'argile, de la température de cuisson et des combustibles utilisés. La valeur moyenne dans les autres pays est supérieure à 3,5 MPa. Au contraire, le matériau préparé avec 15% de liant était moins résistant que le matériau oxyacétique à 10%, conformément aux résultats précédents avec d'autres caractéristiques physiques et mécaniques.

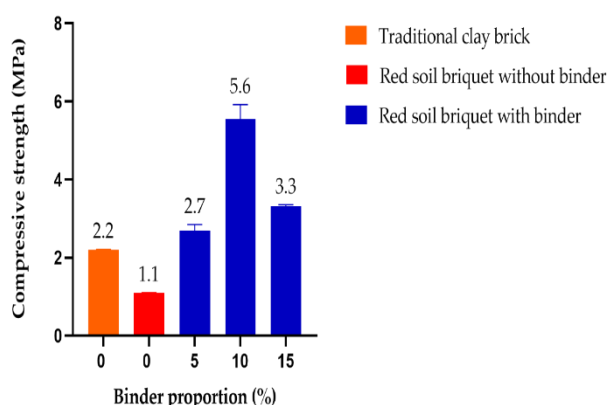


Figure 4. Compressive strengths of materials.

CONCLUSION

Cette étude met en évidence le potentiel du dérivé d'acide oxyacétique du CNSL comme liant dans la fabrication de briques. Le procédé de fabrication est plus respectueux de l'environnement car la température de cuisson est plus basse (60 °C) et le temps de séchage est plus court (24 h), par rapport aux briques traditionnelles en argile cuite (670 °C pendant plusieurs jours. De plus,

l'utilisation d'un dérivé du CNSL valorise les coques de noix de cajou, un déchet qui finirait autrement incinéré ou en décharge. Il a également été démontré que l'ajout de 10 % de liant améliore la résistance à la traction et à la compression des briquettes jusqu'à 28 % et 154 %, respectivement, par rapport aux briques traditionnelles. De même, son taux d'absorption d'eau est trois fois inférieur à celui des briques traditionnelles après deux mois d'immersion dans l'eau. Cela conduit à la conclusion que le matériau contenant 10 % de liant peut être utilisé comme matériau de construction en raison de sa stabilité à l'eau à long terme ; ainsi que de sa résistance élevée à la traction, et à la compression.

Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour optimiser la formulation des matériaux en fonction de divers paramètres, tels que la granulométrie des terres rouges (tailles inférieures ou supérieures à 1 mm) et la proportion d'acide oxyacétique à ajouter (environ 10%). Il convient également d'envisager la production de briquettes par pressage plutôt que par moulage. La stabilité à long terme doit encore être étudiée. En effet, de nombreuses autres études doivent être réalisées avant de proposer le remplacement de technologies vieilles de plusieurs siècles, mais la réduction de l'impact écologique et l'amélioration des propriétés physiques à l'aide de technologies nouvelles mais adaptées sont très demandées dans les pays en développement.

ESSAI ET ETUDE DE FABRICATION D'UNE PEINTURE IMPERMEABLE A L'EAU A

BASE DE METAKAOLIN



**Dr RANDRIAMALALA
Tiana Richard**

*Chef de Département de
Recherche, Développement
et Matériaux au LNTPB*



**RANDRIAMIHAJASON
Maminiaina Elisée**

*Ecole Supérieure
Polytechnique d'Antananarivo*



**RANDRIAMIHAJA Tombotsoa
Harena Frassatie**

*Ecole Supérieure
Polytechnique d'Antananarivo*

INTRODUCTION

Madagascar est un pays possédant des matières minérales comme la chaux, le kaolin, la dolomie. Elles tiennent une place importante pour la fabrication et la production de peinture à l'eau.

Des recherches et des expériences ont été menées dans différents pays pour élaborer des techniques de fabrication et production de peinture à l'eau ou à l'huile, à base des matières minérales, organiques, qui seront utilisées pour le procédé de la géopolymérisation à partir de la chaux, la dolomie, et le kaolin.

L'objectif principal de notre étude est d'utiliser et de valoriser le métakaolin, la chaux, la dolomie, le silicate de soude et l'oxyde de fer pour fabriquer et produire de la peinture à l'eau, offrant une très bonne résistance aux différents climats et intempéries (soleil, pluie, vent, ...), et présentant une caractéristique imperméable à l'eau, étanche, et hydrophobe, en utilisant le procédé de la géopolymérisation.

MATERIELS ET METHODES

Les matières premières utilisées sont :

- Le Silicate de soude (SPCI)
- Le Métakaolin
- La Dolomie (PROCHIMAD)
- L'Oxyde de fer (Pigment)

Identification des matériaux

Chaque matière première fait l'objet d'identification afin de déterminer ces constituants chimiques :

- Silicate de soude (Na_2SiO_3) :

Le silicate de soude employé est un produit de la société SPCI. Produit dont le pH est compris entre 11.5 et 12, basique.

- Métakaolin :

Le métakaolin est un produit amorphe issu de la déshydroxylation et de la destruction de la structure cristalline initiale d'argiles kaoliniques ou de kaolins par calcination à une température comprise entre 600°C et 950°C.

Le métakaolin est composé principalement de SiO_2 et de Al_2O_3 , d'après l'analyse chimique.

Les résultats d'analyse sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Composition minéralogique des métakaolins

Composants	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
% masse	53,87	0,95	38,57	1,4	0,01	0,96	0,04	0,04	2,68	0,1

Le kaolin utilisé est un produit de la société SPCI.

- Dolomie :

La dolomie, que l'on va utiliser, est un produit de la société PROCHIMAD. Elle offre une gamme de produits qui peut être

utilisée pour la fabrication de peinture, telle que la dolomie ultrafine de 8 μm .

Le tableau suivant montre la composition chimique moyenne de la dolomie.

Tableau 2 : Composition chimique moyenne de la dolomie

Eléments	CaO	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Humidité
Teneur en %	20,49	20,51	5,10	2,26	0,06	8,00

- Chaux

La chaux utilisée est la chaux commerciale BOUTSIK.

Dans notre étude, nous avons utilisé la chaux comme additif.

- Pigments

Les pigments utilisés sont des oxydes de fer de formule Fe_2O_3 .

- Eau de la JIRAMA

L'eau de la JIRAMA est utilisée à la fois comme solvant et diluant avec $\text{pH} = 7$ à température 25°C, mais elle est aussi utilisée lors de la formulation du liant géopolymère.

Les caractéristiques chimiques sont données dans le tableau 3 :

Tableau 3 : Caractéristiques de l'eau de la JIRAMA

Constituants	Caractéristiques
Insolubles [mg/l]	0
Matières dissoutes [mg/l]	0,0034 à 0,005
Carbonates + bicarbonates alcalins [%]	0,0028
Sulfates en SO ₃ [%]	0
Sulfates en S [%]	0
P ₂ O ₃ [%]	0
NO ₃ [%]	0
Acidité en pH à 25°C	7,20 à 8,50
Acidité humique	Aucune coloration brunâtre
Chlorures [mg/L]	3.55 à 8.50
Ions soufre [%]	0

Source : JIRAMA Mandroseza

Etude de formulation de la composition

Les proportions suivantes ont été étudiées :

Tableau 4 : Pourcentage de chaque composant

Eléments Essais	Dolomie (%)	Métakaolin (%)	Silicate de soude (%)	Oxyde de fer (%)	Eau (%)	Chaux (%)
N°25	34,72	6,9	12,5	4 ,16	41,66	-
N°31	27,7	6,9	12,5	4,16	44,66	6,94
N°32	33,75	6,75	12,16	6,75	40,54	-
N°33	32,46	10,38	11,68	6,49	38,96	-

Source : Auteur

Test physico-chimique

Les essais suivants ont été réalisés pour déterminer les caractéristiques physico-chimiques de la composition obtenue :

➤ Densité

Calcul la densité du produit de peinture conformément à l'une des méthodes spécifiées dans la série des normes ISO 2811-1, ISO2811-2, ISO 2811-3, ISO 2811-4.

Tableau 5 : Résultats de la densité

Essais	N°25	N°31	N°32	N°33
Densité	1,15	1,56	1,5	1,60

Source : Auteur



Photo 1 : mesure de la densité

➤ Viscosité :

C'est une méthode qui consiste à calculer le temps d'écoulement d'un liquide à une certaine température dans un petit récipient. L'instrument qui sert à mesurer la viscosité des fluides est le viscosimètre.

Chaque peinture, selon les matériaux qui la composent, possède une viscosité qui lui est propre. Plus la viscosité augmente, plus la capacité du fluide à s'écouler facilement diminue. En effet, la facilité d'application d'une peinture dépend donc de sa viscosité.

Tableau 6 : Résultats de la viscosité

Essais	N°25	N°31	N°32	N°33
Viscosité	+/-	+/-	++	++

Source : Auteur

➤ Pouvoir couvrant :

Pour mesurer le pouvoir couvrant, la peinture est appliquée sur un support (béton, mur non peint) incluant un rectangle de longueur et largeur de 15x20 cm². La masse de la peinture utilisée est déterminée par la différence entre la masse initiale de la peinture et la masse après l'application. Le pouvoir couvrant est

obtenu par le rapport entre la surface peinte et la masse de la peinture utilisée.

$$p = \frac{m_0 - m_f}{S}$$

avec m_0 : masse initiale

m_f : masse finale

S : Surface

Tableau 7 : Résultats du pouvoir couvrant

Essais	N°25	N°31	N°32	N°33
Pouvoir couvrant	10,5	10,5	9,5	9,5

Source : Auteur

➤ Adhérence

L'objectif de ce test de dureté destructif est de déterminer la résistance des revêtements. Dans le cadre des essais effectués, nous utilisons la méthode de quadrillage avec Scotch.

➤ Temps de séchage

Pour mesurer le temps de séchage, la peinture est appliquée sur un support non peint. Après l'application, le chronomètre est lancé. Lorsque la peinture est sèche au toucher, le chronomètre est arrêté et le temps de séchage noté.

➤ Test d'abrasion

La résistance à l'abrasion évalue la résistance du film de peinture à des lavages répétés.

➤ Test d'Imperméabilité

Le test imperméable à l'eau a pour but de démontrer si la peinture reste imperméable ou non après leur séchage.

➤ Test d'inflammabilité

Le test d'inflammabilité a pour but de montrer si la peinture est inflammable ou non. Pour cela, la surface peinte est brûlée à la flamme.



Photo 2 : Surface soumise à la flamme

➤ Résistance à l'U.V

Cet essai consiste à exposer la peinture qui est appliquée sur un support ou sur un mur non peint aux conditions climatiques de notre environnement (radiation solaire, pluie, vent,) pendant un certain temps (quelques mois), et ensuite on observe visuellement s'il y a dégradation de la peinture (résistance ou couleur, ...) et/ou perte de brillance.

➤ Test résistance à l'eau

Le principe de l'essai de résistance à l'eau est de plonger dans de l'eau la surface préalablement peinte jusqu'à ce que l'on observe une modification visuelle de la peinture.



Photo 3 : Test résistance à l'eau

Résultats et discussions

Résultats

Nous essayons de présenter les résultats des essais effectués par l'application de notre peinture sur des différents subjectiles, en variant sur les paramètres qui influent sur la qualité de notre produit.

Après ces essais, les résultats sont présentés à partir des observations et

contrôles visuels et nous adoptons 5 critères pour l'évaluation.

- : mauvais

+/- : moyen

+ : bon

++ : assez bon

+++ : Très bon

Tableau 8 : Résultats de la densité, viscosité, et pouvoir couvrant

Essais	N°25	N°31	N°32	N°33
Densité	1,15	1,56	1,5	1,60
Viscosité	+/-	+/-	++	++
Pouvoir couvrant (g/cm ²)	10,5	10,5	9,5	9,5

Tableau 9 : Résultats des essais

	Subjectiles Essais	Béton	Mortier	Brique	Bois	Pierre
Essai du quadrillage et d'adhérence	N°25	+++	+++	-	++	++
	N°31	+++	+++	-	++	++
	N°32	+++	+++	-	++	++
	N°33	+++	+++	-	++	++
Test d'abrasion	N°25	++	+	-	+/-	-
	N°31	++	+	-	++	++
	N°32	++	+	-	+/-	++
	N°33	++	+	-	++	++
Temps de séchage en minute (1re couche)	N°25	70	70	90	80	70
	N°31	70	70	60	60	60
	N°32	90	90	80	80	70
	N°33	80	80	70	80	70
Temps de séchage en minute (2e couche)	N°25	80	80	-	70	60
	N°31	70	80	-	70	60
	N°32	70	80	-	65	60
	N°33	70	80	-	65	60
Test UV	N°25	+/-	+/-	+/-	-	-
	N°31	+/-	+	+/-	-	-
	N°32	+/-	+	+/-	-	-
	N°33	+/-	+	+/-	-	-
	N°25	++	++	-	-	-
	N°31	++	++	-	-	-

Test imperméabilité	N°32	++	++	-	+/-	-
	N°33	++	++	-	+/-	-
Test résistance à l'eau	N°25	-	+/-	-	-	-
	N°31	-	-	-	-	-
	N°32	+/-	+/-	-	-	-
	N°33	+/-	+/-	-	-	-
Test d'inflammabilité	N°25	+/-	+/-	-	-	-
	N°31	+/-	+/-	-	-	-
	N°32	+/-	+	-	-	-
	N°33	+/-	+	-	-	-

Interprétation et discussion

Parmi les 5 types de subjectile testés avec la composition de peinture étudiée, les caractéristiques physico-chimiques de chaque composition varient de l'autre.

- Pour la composition N°25 :

➤ **Densité** : Le résultat de la densité est de 1,15. Cela est légèrement inférieure à la norme attendue. Une densité plus basse peut parfois indiquer une dilution excessive ou une concentration plus faible des solides dans la peinture.

➤ **Viscosité** : La viscosité est qualifiée de moyenne et pas encore optimale. Cela suggère que la peinture n'a peut-être pas la consistance idéale pour une application facile et uniforme.

➤ **Pouvoir couvrant** : Le pouvoir couvrant est de 10,5.

- Pour la composition N°31 :

➤ **Densité** : La densité obtenue est de 1,56. Ce chiffre se rapproche de la norme, ce qui est très bon signe pour la qualité

de la peinture.

➤ **Viscosité** : La viscosité est encore qualifiée de moyenne

➤ **Pouvoir couvrant** : Le pouvoir couvrant est de 10,5. C'est le même résultat que pour l'essai 25.

- Pour la composition N°32 :

➤ **Densité** : La densité est de 1,5. Elle est très proche de la norme idéale, ce qui est un indicateur de la bonne qualité et de la consistance de la peinture.

➤ **Viscosité** : La viscosité est assez bonne. Cela suggère que la peinture a une consistance qui devrait permettre une application agréable et uniforme, sans être liquide, ni trop épaisse.

➤ **Pouvoir couvrant** : Le pouvoir couvrant est de 9,5. C'est un bon résultat, même s'il est légèrement inférieur à l'essai 31. Il reste tout à fait acceptable et indique que la peinture couvre bien la surface.

- Pour la composition N°33 :

➤ **Densité** : La densité est de 1,60, elle est légèrement supérieure à l'essai 32, ce qui indique une bonne concentration des composants solides

dans la peinture.

➤ **Viscosité** : La viscosité est qualifiée assez bonne.

➤ **Pouvoir couvrant** : Le pouvoir couvrant est de 9,5, identique à celui de l'essai 32.

➤ **Test de quadrillage et d'adhérence**
Les 4 essais montrent la bonne d'adhérence pour appliquer aux quatre subjectiles comme béton, mortier, bois, et pierre mais mauvais pour la brique.



Photo 4 : Test de quadrillage et d'adhérence sur le béton

➤ **Temps de séchage**

Le temps de séchage des différents essais dépend du climat, du type de subjectiles. Etant donné que la peinture est imperméable à l'eau, elle n'adhère pas très bien à la 2^e couche. Ainsi, les autres subjectiles montrent une réduction du temps de séchage.



Photo 5 : Résultats des essais de détermination du temps de séchage

➤ **Test d'abrasion**

Après avoir effectué des tests d'abrasion sur plusieurs substrats, il a été constaté que les substrats contenant de la silice étaient difficiles à enlever, tandis que ceux

sans silice s'enlevaient facilement.

➤ **Test d'imperméabilité**

Lorsque la peinture appliquée sur les différents substrats est bien sèche et qu'on y verse de l'eau, celle-ci forme des gouttelettes sur la surface peinte des substrats contenant de silice, tandis que les substrats sans silice absorbent l'eau complètement.

Cette description indique que la peinture a des propriétés hydrophobes sur les substrats siliceux.



Photo 6 : Test d'imperméabilité à l'eau

➤ **Résistance à l'eau**

Après 3 jours de plongée dans l'eau, on n'observe aucune modification de couleur au niveau de la surface. Après séchage, des tests de résistance à l'abrasion de la peinture ont été effectués : l'immersion a entraîné une légère modification.



Photo 7 : après 3 jours de plongée dans l'eau

➤ **Test d'inflammabilité**

La surface n'a pas pris de feu mais la couleur de la peinture devient foncée.



Photo 8 : La couleur de la surface devenue foncée après passage à la flamme

➤ Résistance à l'U.V

Après un mois de résistance aux UV, la couleur est restée parfaitement inaltérée, démontrant ainsi une excellente adaptation aux conditions climatiques.



Photo 9 : après un mois

DISCUSSIONS

Après différents essais effectués pour connaître les paramètres optimaux à la formulation de la peinture, on conclut que sur les 4 types de supports, on a constaté qu'elle adhère mieux sur un support contenant de la silice comme le béton, mortier... Les essais nous montrent qu'elle résiste à l'eau. Les peintures appliquées sur le béton indiquent une bonne résistance aux différents tests effectués. L'aspect de notre film reflète bien aux murs qui sont peints à partir des peintures à l'eau de bonne qualité. De plus, nous avons le liant géopolymère, offrant une bonne résistance

aux différents tests effectués, ainsi qu'une viscosité correcte et une bonne adhérence. Prenons la quantité de pigment à 6,75%, nous remarquons que les aspects, les colorations, et le pouvoir couvrant des essais N° 32 et N°33 sont satisfaisants, efficacement imperméable à l'eau et résistant aux intempéries. L'essai de l'inflammabilité nous indique que notre film ne s'enflamme pas, mais commence à se détériorer au bout de 5 mn à plein feu. Pour l'essai N° 31, on remarque que la chaux provoque une réaction rapide qui nuit à la viscosité de la peinture. Par conséquent, la chaux, filtrant l'eau, attribue à la mauvaise viscosité. Mais, la peinture obtenue propose une bonne imperméabilité à l'eau.

Des éprouvettes sont jusqu'à présent soumises à des tests d'intempérie depuis un mois environ pour évaluer les effets à l'UV.

CONCLUSION

Pour conclure, cette étude a permis de valider avec succès la faisabilité et la pertinence de la fabrication d'une peinture imperméable à l'eau, en intégrant le métakaolin comme composant essentiel. Les essais menés ont démontré de manière concluante que l'incorporation du métakaolin est le facteur déterminant de l'imperméabilité de la peinture. Ce kaolin calciné, grâce à sa haute réactivité et sa structure amorphe, agit comme un précurseur géopolymère de choix. Au contact des activateurs alcalins, il génère une matrice inorganique dense et stable, dont la porosité est drastiquement réduite, conférant ainsi à la peinture ses propriétés hydrophobes exceptionnelles. C'est précisément cette densification de la microstructure, résultant de la réaction géopolymérisation, qui piège efficacement les molécules d'eau, empêchant leur pénétration.

Au-delà de la performance technique, ce travail ouvre des perspectives significatives

en matière de valorisation des minéraux locaux. L'utilisation du métakaolin, dérivé de ressources kaoliniques abondantes, notamment à Madagascar, s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire et de développement durable.

Enfin, cette étude a mis en lumière la robustesse et le potentiel du procédé de géopolymérisation appliqué aux peintures. Cette technique, basée sur la polymérisation d'aluminosilicates, offre une alternative écologique et performante aux liants traditionnels. Elle permet non seulement de conférer des propriétés

d'imperméabilité remarquables, mais aussi de proposer une solution durable face aux défis de l'humidité et de la dégradation des surfaces. Compte tenu de la réaction entre le silicate de soude et le métakaolin, il est important d'examiner l'adhérence, le processus de durcissement et d'évaluer la dureté de la peinture. En définitive, les résultats de cette étude positionnent cette peinture à base de métakaolin comme une innovation prometteuse, capable de répondre aux exigences techniques tout en participant à une gestion plus rationnelle et valorisante de nos ressources minérales.

EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE BETON, DU BETON FRAIS AU BETON DURCI, SON ECLATEMENT SOUS SOLLICITATION THERMIQUE



**Dr RANDRIAMALALA
Tiana Richard**

*Chef de Département de
Recherche, Développement
et Matériaux au LNTPB*

RESUME

Le développement actuel que connaissent les bétons dans le monde est lié à la meilleure connaissance, que nous avons de ce matériau, grâce aux développements de nombreuses recherches menées depuis plusieurs décennies. Mais, le comportement du béton n'est pas complètement maîtrisé lorsqu'il est soumis aux conditions extrêmes telle que l'exposition aux hautes ou aux basses températures. Ce qui entraîne la dégradation de l'ouvrage et nécessite l'évaluation de la sécurité de cet ouvrage vis-à-vis des incendies.

Le travail présenté est une recherche expérimentale. Nous avons déterminé le comportement au jeune âge et à maturité du béton, le bétonnage par temps chaud et temps froid, l'évolution du matériau béton avec la température, l'éclatement du béton sous sollicitation thermique et le phénomène d'incendie.

INTRODUCTION

L'instabilité thermique est un aspect important de la ruine éventuelle d'une structure ; mais il est également nécessaire de connaître l'évolution des caractéristiques mécaniques du matériau avec la variation de la température. La tenue à la température élevée ou au feu du béton dépend de certaines de ses caractéristiques comme la nature des composants utilisés pour sa formulation, la perméabilité, la teneur en eau et la résistance mécanique.

Dans des conditions extrêmes, un endommagement du béton de revêtement peut être observé dans un ouvrage. En effet, lorsque le béton est exposé à des hautes températures, le chargement thermique imposé conduit à des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton, induisant une évaporation ou condensation de l'eau et une augmentation de la pression dans les pores.

Nous présentons, dans cet article, les résultats expérimentaux sur l'étude de l'effet de la température sur différents caractéristiques physiques et mécaniques du béton.

De plus, la partie 1.2 de l'Eurocode 2 régit le calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil soumis au feu (température élevée). Il propose différentes méthodes de calcul permettant de déterminer la résistance d'un élément structural (poutre, poteau. . .) lors d'un incendie. La limitation de cette norme vient du fait que les bétons traités par les différentes méthodes sont de classe normale ou haute résistance.

COMPOSITION DU BETON

Le béton est un matériau composite, formé du ciment, des agrégats et de l'eau.

L'hétérogénéité de ce matériau est une des causes des particularités de son comportement mécanique.



Gravillons de nature granite et sable de rivière



Gravillons de nature calcaire et sable de rivière

Dans cette étude trois types de béton ont été testés. Il s'agit d'un béton ordinaire (B25), un béton de haute résistance (B50) et un béton de haute performance (B60). Le ciment utilisé pour les trois types de béton a été le CPA CEM I/A 42,5. Ainsi, trois classes granulaires ont été utilisées, un gravier concassé de classe 15/20mm, un gravillon concassé de classe 5/15 mm et un sable de classe 0/5 mm. On a également

employé un super plastifiant pour assurer une ouvrabilité satisfaisante pour le béton à haute performance (B60).

La formulation du béton ordinaire (B25) a été déterminée par la méthode de FAURY. A partir de cette formulation, la composition du béton, de haute résistance (B50) et du béton de haute performance (B60), a été déterminée en augmentant le dosage en ciment et en diminuant en conséquence le dosage en eau.

Composition des bétons étudiés

Dosage	W/C	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Agrégats (K/m ³)		Super plastifiant (Kg/m ³)
					25mm	15mm	
BO	0.60	325	200	690	735	390	-
BHR	0.50	390	195	665	720	385	-
BHP	0.30	520	175	580	710	378	3.06

COMPORTEMENT AU JEUNE AGE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Hydratation du ciment

Lorsque le ciment portland est mélangé avec de l'eau, il se produit plusieurs réactions chimiques qui sont plus ou moins rapides. Ces réactions font intervenir les différents constituants du ciment. Ce dernier est composé de quatre phases minéralogiques principales qui représentent 90% ou plus, de la masse du ciment : le C₃S (silicate tricalcique), le C₂S (silicate bicalcique), le C₃A (Aluminate tricalcique) et le C₄AF (Aluminoferrite

tetracalcique), qui contribuent à la résistance aux jeunes âges du béton.

Chaleur d'hydratation

La réaction chimique entre le ciment et l'eau est très exothermique, c'est-à-dire qu'elle dégage beaucoup de chaleur. Les deux phases minéralogiques, principalement responsables de la quantité de chaleur dégagée, sont le C₃A et le C₃S. La finesse, la teneur en ciment et la température de cure sont également d'autres facteurs qui peuvent influencer la quantité de chaleur produite. Même si la réaction chimique dure longtemps, la chaleur est principalement

libérée pendant les premières heures suivant le contact de l'eau avec les grains de ciment. La température que le béton peut atteindre dépend principalement de l'épaisseur de la pièce coulée ainsi que des conditions d'isolation.

Retrait chimique

Lors de l'hydratation du béton, il subit différentes variations volumétriques qui prennent la forme de retrait ou de gonflement. C'est durant les 24 premières heures après le contact E/C que le béton subit des changements volumétriques majeurs. Un des mécanismes qui est à l'origine du retrait dans le béton est le retrait chimique. Ce retrait est aussi appelé la contraction Le Chatelier. Ce retrait est inévitable puisqu'il est causé par les diverses réactions chimiques des quatre phases minéralogiques majeures du ciment.

Retrait endogène

Le retrait endogène est maintenant défini comme la diminution de volume apparent du béton lorsqu'il est sous condition scellée et en régime isotherme (sans variation de température).

La maturité du béton

La maturité du béton indique l'état de durcissement. Elle est la relation entre la température du béton, le temps et le gain en résistance. Elle est représentée par un indice mesurable en temps réel sur le terrain.

Le mûrissement joue un rôle extrêmement important dans le développement de la résistance du béton et permet d'en améliorer les caractéristiques et la durabilité.

La maturométrie est une méthode qui consiste à déterminer par calcul (à jeune âge), le degré d'avancement des réactions d'hydratation correspondant au durcissement du béton. Cette information est obtenue à partir du suivi de la température au sein de l'ouvrage.

- Influence de l'âge sur le durcissement du béton.

$$R_n = \frac{1,35n + 10}{n + 20}$$

R_{28} : Résistance du béton en compression à 28 jours en (MPa)

n : âge du béton en jours

- Facteur de maturité $f = J(10 + t)$

Pour une certaine température t_0 , un âge J_0 (jours) donne habituellement au béton le degré de résistance suffisant, il faudra obtenir une résistance analogue (ce qui correspond à un même facteur de maturité) J_1 pour une température t_1 .

$$J_1(10 + t_1) = J_0(10 + t_0) \Rightarrow J_1 = \frac{J_0(10 + t_0)}{10 + t_1}$$



La méthode de maturation du béton

CONSEQUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES BETONS

Les conditions climatiques ont une influence notable sur la qualité finale du béton. On doit s'en préoccuper dès sa fabrication et jusqu'à sa maturité en passant par son transport, sa mise en œuvre et sa cure.

Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures.

Conséquences de la température sur les matériaux du béton

Au cours du temps, l'évolution des propriétés (mécaniques, physico-chimiques, thermiques) est essentiellement liée à l'hydratation du ciment.

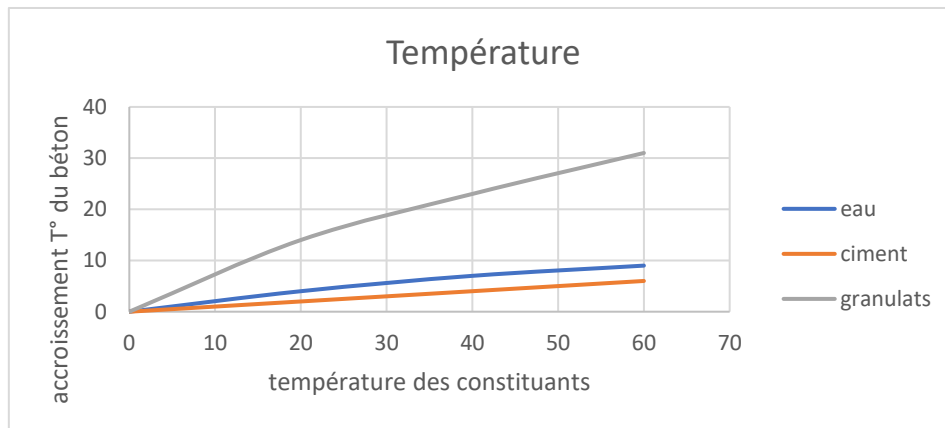


Figure 1 : Accroissement de la température du béton en fonction de la température des constituants

Dans le domaine courant :

- une augmentation de 10 °C du ciment élève de 1 °C la température du béton ;
- une augmentation de 10 °C de l'eau élève de 2 °C la température du béton ;
- une augmentation de 10 °C des granulats élève de 7 °C la température du béton (figure 1)

L'eau pour pallier cette perte d'ouvrabilité est interdite car elle entraîne une baisse de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les échéances. Cette perte d'ouvrabilité est plus remarquable dans le béton fabriqué avec des gravillons de nature calcaire qui est plus absorbant, dont l'absorption est plus importante quand la température est élevée

Conséquences de la température sur la pâte du béton frais

Le béton est sensible aux paramètres tels que la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur :

- la rhéologie du béton et son évolution ;
- la vitesse de prise ;
- la cinétique de durcissement ;
- l'évaporation et la dessiccation du béton

La rhéologie

Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité, caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams, évolue. Pour une élévation de la température du béton, il y a une importante perte de l'ouvrabilité qui, en outre, peut se

manifeste très rapidement après la préparation du béton (figure 2).

Résultats variation de l'ouvrabilité en fonction de la température

T (°C)	5	10	25	33	50	105
ST (cm)	16	14,5	10,5	8,5	6	3,3

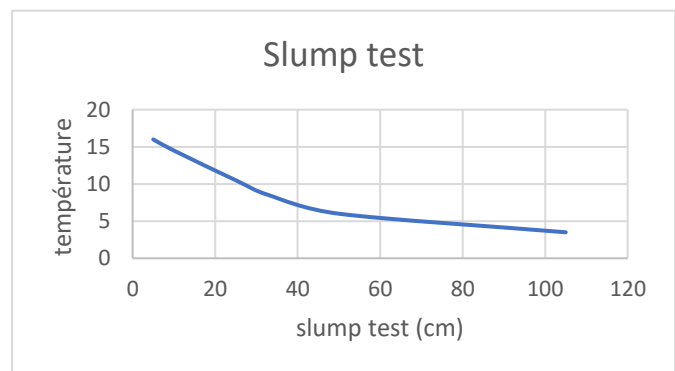


Figure 2 : variation ouvrabilité du béton en fonction de la température

Les temps de prise

L'augmentation de la température accélère les réactions.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

T (°C)	5	10	25	33	50	105
Temps de prise (mn)	245	240	215	194	55	32

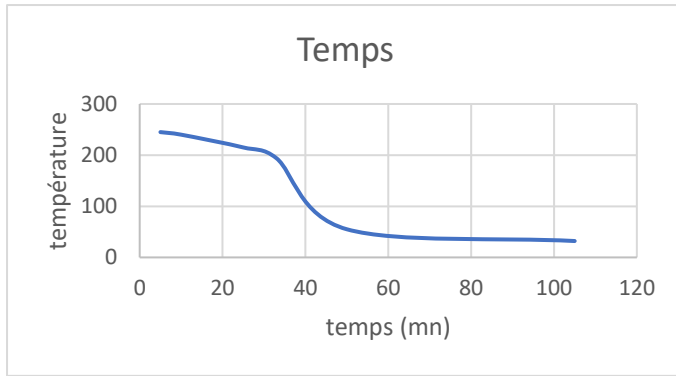


Figure3 : variation du temps de prise du béton en fonction de la température

La cinétique du durcissement

Une forte élévation de la température provoque, aux échéances précoces (2 jours), une augmentation de la résistance du béton. Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées

Le résultat de l'évolution, de la résistance mécanique à 2 jours en fonction de l'accroissement de la température, est présenté dans le tableau suivant :

T(°C)		5	10	25	33	50	105
RC à 2 jours (MPa)	B25	8,6	9,3	18,75	19,2	22,14	23,42
	B50	10,2	13,5	23,48	25,75	30,19	33,05
	B60	15,41	17,55	25,06	28,5	34,25	38,2

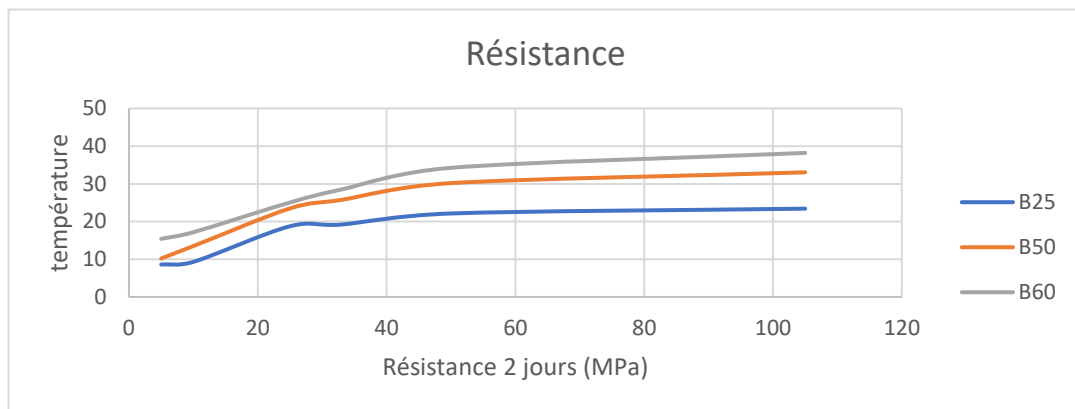


Figure 4 : Evolution de la résistance mécanique à 2 jours en fonction de la température

L'évaporation et la dessiccation du béton

Une évaporation trop rapide de l'eau du béton peut entraîner des fissures, de retrait plastique en quelques heures après le décoffrage.

- La température ambiante est élevée,
- La température du béton augmente,
- L'air est sec.

Sur le béton frais, la baisse de température, dans une plage n'atteignant pas le gel, ralentit les réactions exothermiques d'hydratation du ciment. On constate :

- un retard du début de prise
- un allongement du temps de durcissement.
- une augmentation du ressuage.



Photo 1 : Éprouvette de béton à la température de 5 °C



Photo 2 : Éprouvette de béton à la température de 25 °C

ÉVOLUTION DU MATERIAU BETON AVEC LA TEMPERATURE

Nous nous intéressons particulièrement à la composition de la pâte de ciment durcie et nous rassemblons quelques résultats concernant l'évolution de paramètres physico-chimiques et mécaniques du béton.

Cycles de chauffage-refroidissement

Pour étudier le comportement du béton à haute température, cinq cycles de chauffage-refroidissement ont été appliqués de 20 °C à différentes températures de palier : 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900 °C dans un four. Les éprouvettes ont été chauffées avec une vitesse de montée en température constante égale à 3°C/min jusqu'à la température d'essai. La durée du palier de stabilisation de température retenue est d'une heure. La dernière étape est une rampe de descente en température à environ 1°C/min jusqu'à la température ambiante. Le cycle d'échauffement est présenté dans la figure 1. La disposition des éprouvettes dans le four est faite de façon à avoir une répartition de chaleur bien homogène

L'eau chimiquement liée

C'est l'eau qui compose les hydrates créés au cours de la réaction d'hydratation.

On trouve aussi une autre classification qui prend en compte l'aptitude de l'eau à s'évaporer.

Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie

Au sein du matériau béton se déroulent de nombreuses réactions chimiques avec des cinétiques plus ou moins rapides. Celui-ci est sensible aux conditions d'humidité et de température de son environnement qui modifient ses caractéristiques macroscopiques (durabilité, résistance...).



Photo 3 : Cycle d'échauffement de l'éprouvette de béton gravillons de nature granite



Photo 4 : Cycle d'échauffement d'éprouvette de béton gravillons de nature calcaire

Les intervalles de température produisent des changements physico-chimiques.

L'élévation de la température entraîne les processus suivants :

- entre 30°C et 120°C : l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évaporent. Elle montre aussi une décomposition de l'ettringite et son élimination complète avant 100°C.
- entre 130°C et 170°C : le gypse se décompose
- en dessous de 100°C jusque à 400°C, d'après : le gel C-S-H se déshydrate

essentiellement en β - C_2S , β - CS et en eau.
– entre 450°C et 550°C : décomposition de la Portlandite selon l'équation : $Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$

- autour de 570°C : transformation des granulats quartzitiques de la phase α à la phase β . Ceci s'accompagne d'un gonflement.
– entre 600°C et 700°C : deuxième phase de déshydratation du gel C-S-H.
– à partir de 650°C : décomposition endothermique du calcaire selon l'équation : $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
– à partir de 1300°C : début de la fusion de la pâte et des granulats, éliminations des sulfates et évaporations des alcalins.

Évolution de la porosité avec la température

Le béton est un matériau hétérogène qui contient inévitablement de l'air. Il apparaît lors du malaxage (air entraîné) mais aussi, une fois qu'une partie de l'eau libre s'est évaporée ou qu'elle ait été consommée par l'hydratation une fois le squelette solide formé.

La porosité totale de l'eau est obtenue en saturant un échantillon en eau puis en le séchant à 105°C, jusqu'à ce que la masse se stabilise. On obtient alors une valeur de porosité totale, mais pas de répartition porale. L'ordre de grandeur, de la porosité rencontrée pour les bétons ordinaires, varie de 14 % à 20 % et pour les bétons à haute performance de 10 % à 13 %.

Évolution des propriétés thermiques avec la température

Dans un contexte de haute température, tous les modes d'échange de chaleur, rayonnement, convection et conduction sont sollicités. En ce qui concerne le matériau lui-même, le mode de transfert par conduction régi par la loi de Fourier est prépondérant. Les paramètres essentiels sont :

– la chaleur spécifique ou capacité calorifique (C en $J/(kg.K)$) qui est l'énergie

nécessaire à fournir pour élever d'un degré un kilo de béton.

– la conductivité thermique (λ en $W/(m.K)$) qui représente la capacité du matériau à conduire la chaleur. Plus elle est élevée, plus la température sera homogène au sein du matériau.

– absence de production de source interne émettant une énergie volumique P , (en $W.m^{-3}$)

– λ est considérée comme constante dans tout le matériau en première approximation.

Elle devient alors :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \Delta T$$

Avec $\alpha = \lambda / \rho.C$: la diffusivité thermique du béton exprimée en $(m^2.s^{-1})$.

Cette diffusivité représente la vitesse à laquelle se propage la chaleur dans le matériau.

Les valeurs à température ambiante couramment rencontrées pour les bétons ordinaires sont (d'après l'Eurocode 2) :

– $\lambda = 1.4 - 2 W/(m.K)$

– $C = 900 J/(kg.K)$

– $\alpha = 1 mm^2/s$

L'application de la température va entraîner une modification des composants du béton (pâte de ciment, granulats...) ainsi que de sa structure. D'un point de vue macroscopique, il en résulte une modification des propriétés thermiques.

ÉCLATEMENT DES BETONS SOUS SOLLICITATIONS THERMIQUES

Les différents types d'instabilités thermiques

Lorsque le béton est exposé à des hautes températures, le chargement thermique imposé, conduit à des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton induisant une évaporation de l'eau et une augmentation de la pression dans les pores. Ces mécanismes sont souvent considérés

comme les principales causes de la fissuration et de l'écaillage du béton soumis à des températures élevées. Donc, un incendie peut fortement modifier le comportement du béton et le mettre en péril.

La notion d'instabilité thermique est adaptée pour décrire le phénomène rencontré lorsqu'on chauffe certains bétons. Les plus courantes, et celles qui nous intéressent le plus, sont :

- l'écaillage : correspondant à un détachement local, plus ou moins rapide, de la surface du matériau. Ce phénomène se produit généralement dans la première phase de l'élévation de température. Ceci peut amener les armatures à être à nu et donc compromettre fortement la stabilité de la structure.

- l'éclatement, correspondant à un détachement violent de parties en général plus grosses que lors de l'écaillage. La caractéristique principale est l'énergie importante dégagée lorsque l'éclatement a lieu.

On rencontre plus souvent le phénomène d'éclatement dans les bétons à hautes performances que pour les bétons ordinaires.



Photo 5 : Ecrasement du béton à la température ambiante



Eclatement du béton à 500°C

LE PHENOMENE D'INCENDIE

Cependant, suivant le lieu d'apparition et de propagation de l'incendie, les paramètres (température atteinte, fumée ou durée) peuvent largement varier. On voit qu'il est difficile de trouver une caractérisation unique de l'incendie. Ainsi dans l'Eurocode.

NF EN 1991-1-2, on trouve plusieurs courbes de feux, qui permettent de caractériser différents incendies (dans chaque cas, t est exprimé en minutes) :

- La courbe température/temps normalisée (ISO 834) pour un incendie de bâtiment est définie par :

- Feu normale : $\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$ [°C]

- Feu extérieur : $\theta_g = 20 + 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t})$ [°C]

- Feu hydrocarbures : $\theta_g = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t})$ [°C]

- La courbe d'hydrocarbure majorée (HCM) pour un incendie de tunnel est définie par :

$$\theta_g = 20 + 1280(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t})$$
 [°C]

À titre de comparaison, nous pouvons regarder la température atteinte au bout de 20 minutes.

Elle est de 670°C et 800°C respectivement pour les courbes "feu extérieur" et "T°/temps normalisée", comparées à 1100°C et 1250°C respectivement pour les

courbes "HC" et "HCM". La différenciation dans le type de combustible (hydrocarbure ou non) influence fortement la vitesse de montée en température. Ces courbes permettent de calculer les niveaux de températures limites auxquels les matériaux doivent être testés pour répondre aux exigences des applications auxquelles ils sont destinés.

CONCLUSION

La température a un effet important sur le comportement chimique, physique et mécanique du béton et affecte la durabilité de l'ouvrage. Une étude particulière a été effectuée au LNTPB, pour prévoir ces effets et de tirer quelques recommandations.

Bien que le choix du type de ciment soit dicté par des considérations liées à l'ouvrage réalisé et aux conditions d'environnement, il peut être utile de rechercher un ciment faiblement exothermique.

Des modifications de la formulation du béton peuvent, dans les cas extrêmes, s'avérer nécessaires. La qualité et la durée de vie du béton se jouent aux tous premiers

âges, période où il est particulièrement sensible.

La composition du béton devra être soigneusement étudiée notamment sur le choix et le dosage du ciment, le choix des granulats en tenant compte de la minéralogie, le dosage en eau et l'adjuvantation.

Lorsque les transformations physico-chimiques se produisent dans les matériaux (le béton en l'occurrence), elles s'accompagnent de variations de masse ou de température suivant l'exothermie ou l'endothermie de la réaction. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$.

Une trop forte température peut provoquer pour les pièces massives des fissures liées au retrait d'origine thermique. Le béton doit demeurer constamment humide car l'alternance de cycles de mouillage/séchage altère la qualité de surface.

Les DTU et la norme NF EN 206-1, ainsi que les différentes études menées sur les caractéristiques du béton sont formelles ; le temps de séchage optimal est de 4 semaines. La stabilisation de la résistance mécanique du béton est de 28 jours au minimal.

IMPERMEABILISATION DES BTCS



**Dr RANDRIAMALALA
Tiana Richard**
*Chef de Département de
Recherche, Développement
et Matériaux au LNTPB*



**ANDRIAMBELOMANANA
Tahiry Mandranto**
Chef de Laboratoire Sols

RESUME

La BTC ou Brique de Terre Comprimée sont des briques confectionnées à partir des sols naturels étudiés préalablement dans le laboratoire. Une étude en laboratoire a été effectuée sur l'imperméabilité du BTCS en utilisant des produits d'imperméabilisation comme le SIKA, ZYCOSIL, avec différentes méthodes d'utilisation et le même mode de cure. Différents essais ont été réalisés pour apprécier l'imperméabilité de ces BTCS.

INTRODUCTION

L'utilisation des produits d'imperméabilisation sur les BTCS présente des avantages économiques, pratiques, et environnementaux à Madagascar. Le suivi de la norme et la méthodologie pour la fabrication des BTCS sont importants afin de bien réaliser la mise en œuvre et garantir la durabilité.

PARTIE EXPERIMENTALE

1. Les matériaux utilisés

- Sol argileux
- Ajout : sable moyen - ciment
- Produit d'imperméabilisation (poudre : SIKA et liquide : Hydrofuge, Zycosil)

2. Identifications des matériaux

- L'analyse granulométrique **NF EN 17892-4 Janvier 2018**
- Détermination de la limite d'Atterberg **NF EN ISO 17892-12, Juillet 2018**
- L'essai Proctor Modifié **NF P 94-093 Octobre 2014**



Photo 1 : Essai d'identification de sol (Granulométrie – Limite d'Atterberg – PROCTOR)

3. Etude de mélange Sol-Sable-Ciment-Produit d'imperméabilisation :

L'objectif est d'avoir une composition qui serait imperméable à l'eau. Les compositions étudiées sont :

- 10 V (Sol) + 1 V (sable) + 1 V (Ciment)
- 10 V (Sol) + 2 V (sable) + 1 V (Ciment)

avec SIKA (1 kg pour 50 kg de ciment) et autre produit ZYCOSIL (1 litre pour 45 litres d'eau) à pulvériser aux BTCS.

CONFECTION DES BTCS

Avant la confection du BTCS, la vérification de la machine de compression et le hangar de stockage sont primordiaux :

- Horizontalité (utilisation niveau)
- Taux de compressibilité (supérieur à 1.6)
- Hangar de stockage sous l'abri à 20°C – 25°C

Les étapes de confection des BTCS sont :

- Etaler et sécher des échantillons de sol et sable,
- Broyer et cribler les éléments grossiers (supérieur à 5mm),
- Mélanger sol + sable + ciment+ SIKA (1 kg pour 50 kg ciment) + eau (teneur en eau optimale) suivant la formule,
- Prendre une prise et le mettre dans le moule de la machine de compression,
- Comprimer la prise dans un moule avec un taux de compressibilité supérieur ou égal à 1.6,
- Démouler la BTCS soigneusement
- Envelopper de sachet polyéthylène pendant 03 jours
- Production des BTCS avec le produit d'imperméabilisation ZYCOSIL (1 litre de ZYCOSIL est dilué pour 45 litres d'eau) en deux couches :
 - ✓ BTCS démoulée (pour les 2 traitements)

RESULTATS

- ✓ Conserver et envelopper d'un sachet polyéthylène pendant 03 jours (pour assurer l'hydratation du ciment)

- Période de cure :

Sol traité avec le produit SIKA :

- ✓ Mettre sous l'abri à 20°C – 25°C pendant 7 jours
- ✓ Sécher à l'air libre dans le hangar de stockage pendant 18 jours

Sol traité avec le produit ZYCOSIL :

- ✓ Séchage de 4 jours pour les BTCS traitées au produit ZYCOSIL
- ✓ Pulvériser les faces du BTC (en 2 couches alternées de 30 min)
- ✓ Séchage à l'air libre dans le hangar de stockage pendant 18 jours.

Remarque : Pour déterminer la performance du Produit SIKA, la BTCS traitée avec le produit SIKA a été immergée dans l'eau après 7 jours de fabrication pendant 13 mois et ne s'écroule pas.



Photo 2 : Etapes de confection des BTCS

- Identification des matériaux à l'état initial

Tableau 1 : Résultats des essais en laboratoire du sol et du sable à l'état initial

Nature visuelle	Granulométrie		Limite d'Atterberg		Essai PROCTOR		Classification LCPC
	Dmax mm	% fine	WL%	IP%	γ_{dmax} KN/m ³	Wopt %	
Limon argileux rougeâtre	1.00	96	47	20	17.50	19.50	LP
Sable de rivière	5.00	2	-	-	*	*	Sm

- Etude des mélanges

L'objectif étant de diminuer le pourcentage des fines, la plasticité, et la perméabilité du sol.

Tableau 2 : Résultats des essais de laboratoire après le mélange

Composition (Volumétrique) V : volume gabarit bien défini	Granulométrie		Limite d'Atterberg		Essai PROCTOR	
	Dmax mm	% fine	WL%	IP%	γ_{dmax} KN/m ³	Wopt %
10V (sol)-1V (sable)-1V (ciment) + SIKA	5.00	84	45	19	17.72	18.50
10V (sol)-2V (sable)-1V (ciment) + SIKA	5.00	76	43	19	17.84	18.20

- Détermination de la résistance et de la perméabilité des BTCS

Tableau 3 : Résultats des essais sur les BTCS

Composition (Volumétrique) V : volume gabarit bien défini	Dimensions BTCS cm	Rc à 28 jours d'âge en MPa	Absorption %	Perméabilité Cm/heure
10V (sol)-1V (sable)-1V (ciment) + SIKA + ZYCOSIL	30*15*10	2.1	0.2	0.12
10V (sol)-2V (sable)-1V (ciment) + SIKA + ZYCOSIL	30*15*10	2.8	0.3	0.15



Photo 3 : Imperméabilisation des BTCS

COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS

L'identification du sol utilisé à l'état initial est très importante pour évaluer son comportement physique, mécanique et chimique. Cette identification mène à bien étudier la composition des mélanges pour atteindre l'objectif.

Les résultats obtenus montrent d'une part une augmentation de résistance, due à l'ajout de sable et de ciment. Et d'autre part, d'une forte diminution d'absorption d'eau et de la perméabilité d'eau des BTCS, due à l'utilisation des produits d'imperméabilisation.

L'étude en laboratoire et l'utilisation des produits d'imperméabilisation, pour les BTCS, sont très exigées pour les raisons suivantes :

- Diminuer les remontés capillaires,
- Garantir la durabilité des murs extérieurs,
- Protéger les murs contre les infections organiques causées par les humidités.

Il est conseillé de faire un choix « sans enduit » sur le mur en BTCS (esthétique et écologique)

RESILIENCE D'UNE ROUTE EN TERRE A MADAGASCAR, SELON LES PARAMETRES CLIMATIQUE, GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE : CAS DE LA RN 10, RNT 23, RN 31 ET RIP 84.



**Dr RANDRIAMALALA
Tiana Richard**
*Chef de Département de
Recherche, Développement et
Matériaux au LNTPB*



**MANDIMBIARIMANGA
Tsinjoniaina Helisoa**
*Ecole Supérieure
Polytechnique d'Antananarivo*

RESUME

La résilience des routes en terre est fortement influencée par les paramètres climatique, géologique et géotechnique spécifiques à chaque zone. Les aléas climatiques, étudiés en fonction de la température et la pluviométrie, affectent la stabilité et la durabilité des infrastructures. Aussi, les caractéristiques géologiques, notamment la nature des sols, leur structure et leur composant, jouent un rôle irréfutable dans la capacité à supporter les intempéries et le trafic. Enfin, les propriétés géotechniques comme la perméabilité, la cohésion et la portance, définissent également la réaction du sol face aux charges et variations hydriques.

L'étude consiste à intégrer ces paramètres dans la conception des routes en terre, surtout au niveau de la couche de fondation servant de support de la chaussée, selon les axes d'étude, à citer la RN 10, RNT 23, RN 31 et RIP 84. Géotechniquement, si les sols naturels ne sont astreints dans les conditions nécessaires, on effectuera des essais expérimentaux par correction granulaire ou rajout de produits stabilisants. Ceci étant, afin d'améliorer la résilience face aux contraintes environnementales, garantissant ainsi une meilleure durabilité et fonctionnalité de l'infrastructure.

INTRODUCTION

L'infrastructure routière joue un rôle fondamental dans le développement économique et social d'un lieu, particulièrement dans les zones rurales où les routes en terre sont souvent la seule liaison entre les communautés environnantes et les centres urbains. Malgré les défis posés par les aléas climatiques, les conditions géologiques et l'usage intensif, ces voies de communications font preuve d'une

résilience surprenante. Une résilience qui, non seulement caractérisée dans sa capacité à supporter les contraintes physiques, mais aussi dans son aptitude à s'adapter aux changements environnementaux et aux pratiques humains.

Notre étude se focalise surtout sur les mécanismes qui garantissent cette résilience, en explorant les facteurs climatique, géologique et géotechnique du milieu, cas de la RN 10, RNT 23, RN 31 et RIP 84. Ceci étant, afin de maintenir la fonctionnalité de ces voies et pour un

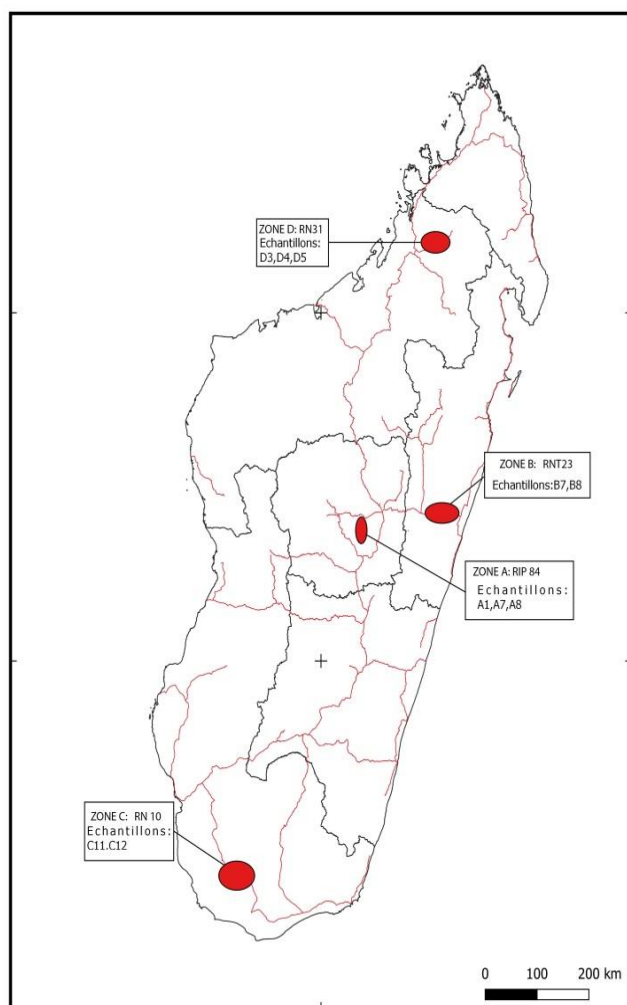
développement durable de la zone et du pays.

MATERIELS ET METHODOLOGIE

Présentation des zones d'études :

Nos zones d'étude sont plus ou moins réparties dans l'Ile, soient :

- Zone A : axe Arivonimamo - Manalalondo (RIP 84), Région Itasy ;
- Zone B : axe Mahanoro – Marolambo (RNT 23), Région Antsinanana ;
- Zone C : axe Tsihombe – Ambovombe (RN 10), Région Atsimo – Andrefana ;
- Zone D : axe Antsohihy - Bealanana (RN 31), Région Sofia.



Localisation des zones d'étude

Contexte climatique

Zone A

Pour la température :

- Dans l'Est et le Centre, la température moyenne est de 26,7°C en Janvier et 7,1°C en Août ;
- Dans l'Ouest par contre, cette température moyenne est beaucoup plus élevée, respectivement 28°C et 10°C.

Pour la pluviométrie :

- Dans l'Est et le Centre, la précipitation moyenne annuelle varie de 800 à 1 000 mm ;
- Dans l'Ouest, elle est comprise entre 900 et 1000 mm.

Zone B

On constate une variation de température dans les différentes zones :

- Dans la zone littorale, la température est plus élevée, supérieure à 22 °C ;
- A l'Est et falaise ombrophile, la température est supérieure à 21 °C ;
- La partie orientale qui est la plus fraîche avec une température supérieure à 16°C à 21 °C.

La pluviométrie varie également selon les zones :

- 1 200 mm dans la partie orientale ;
- Supérieure à 1 600 mm dans l'Est et falaise ombrophile ;
- Supérieur à 1 800 mm dans le littoral.

Zone C

On peut distinguer cinq sous régions climatiques avec leur température respective :

- Sub-humide à hiver très frais, d'altitude, la température est de 19°C à 22°C, mais l'hiver y est assez froid avec une température inférieure à 18°C ;
- Semi-humide et chaud, la température varie de 23°C à 28°C. L'hiver est bien moins chaud avec une température minimale de 10 à 13°C ;
- Semi-aride la température y varie de 23°C à 25°C avec un minima de 13°C à 16°C, l'hiver y est moins marqué.

En ce qui est de la pluviométrie :

- La zone de Toliara est caractérisée par une courte et tardive période pluvieuse de seulement de deux mois (de janvier à février) ;
- La zone de Betioky-Sud a une saison pluvieuse plus longue d'une durée de six mois (de novembre à avril) ;
- La zone de Morombe dont la saison de pluies y est moyenne par rapport aux deux autres zones car elle dure trois mois de décembre à février.

Zone D

La température varie suivant le climat et l'altitude. Elle est nettement élevée sur les zones côtières, où la température annuelle moyenne atteint 26 °C. En saison sèche, elle descend jusqu'à 13,7 °C à Bealanana. Elle est de 12,7 °C à Mangindrano, au pied du massif Tsaratanana. La température moyenne mensuelle la plus élevée est observée à Mampikony avec 33,6 °C.

La pluviométrie est caractérisée par une forte irrégularité. La saison humide commence en général au mois de Décembre. Dans l'ensemble, la variation des pluies est moins nette et la pluviométrie annuelle se situe entre 1 100 à 1 900 mm.

Contexte géologique

Zone A

Itasy est caractérisée par son volcanisme néogène à quaternaire. Sur ce sous-sol, des formations diverses se sont constituées, dont les cuvettes lacustres qui sont dues à des lavages volcaniques, des coulées de lave ayant obturées les vallées et retenus, ainsi que les eaux qui s'accumulaient en arrière. Ces zones d'alluvions lacustres, généralement fertiles, jouent un rôle important pour l'occupation humaine et l'agriculture. Les plaines alluviales, se trouvant le long des fleuves, sont généralement aménagées en rizières.

Zone B

La région d'Atsinanana est marquée par la juxtaposition de deux étalons de terrains :

- Les terrains sédimentaires qui couvrent la partie Nord-Est et Sud-Est, précisés par du volcanisme néogène à quaternaire et crétacé. Il s'agit d'alluvions, de sables, de sable limoneux à limon sableux, de dunes vives, de grès peu solidifiés, bordant la côte de Toamasina à Mahanoro ;
- Les terrains cristallins avec prédominance du type graphite dans la partie de Toamasina et de Vatomandry, Mahanoro, Marolambo et Antanambao Manampontsy.

Zone C

La structure géologique de la surface donne au bassin, l'image d'une sorte de glaciés inclinés vers l'ouest, entrecoupés de failles et s'ennoyant progressivement vers la mer. Le bassin comporte trois grandes unités structurales :

- Un secteur oriental qui correspond à la zone d'affleurement des séries stratigraphiques Karoo, Sakamena et Isalo ;
- Un secteur intermédiaire, lié à une phase de transgressions marines, constitué de séries calcaires (Jurassiques, Crétacé, Eocène, Oligocène-Miocène) et souvent coupé d'intercalations sédimentaires continentales (grès, argiles, sables entrecroisés et bois fossiles) ;
- Un secteur occidental résultant d'un effondrement dû à d'importantes fractures et renferment du grès, marnes, des sables et argile de profondeurs considérables.

Zone D

La région est formée essentiellement par deux types de terrains :

- Les terrains cristallins, qui caractérisent l'essentiel fond des paysages dans la région, à citer :
 - le système du Vohibory, dans les districts de Port-Bergé et de Mampikony ;

- le système de graphite, dans les districts de Bealanana, Befandriana Nord, Mandritsara et une partie d'Antsohihy ;
 - l'Infra-graphite, dans la partie de Bealanana, Befandriana Nord et Mandritsara ;
 - le granite, qui forme des collines rocheuses et se trouve surtout à Befandriana et Mandritsara et sur une partie de Bealanana.
- Les terrains sédimentaires, qui couvrent la zone côtière et s'avancent même à l'intérieur pour former des

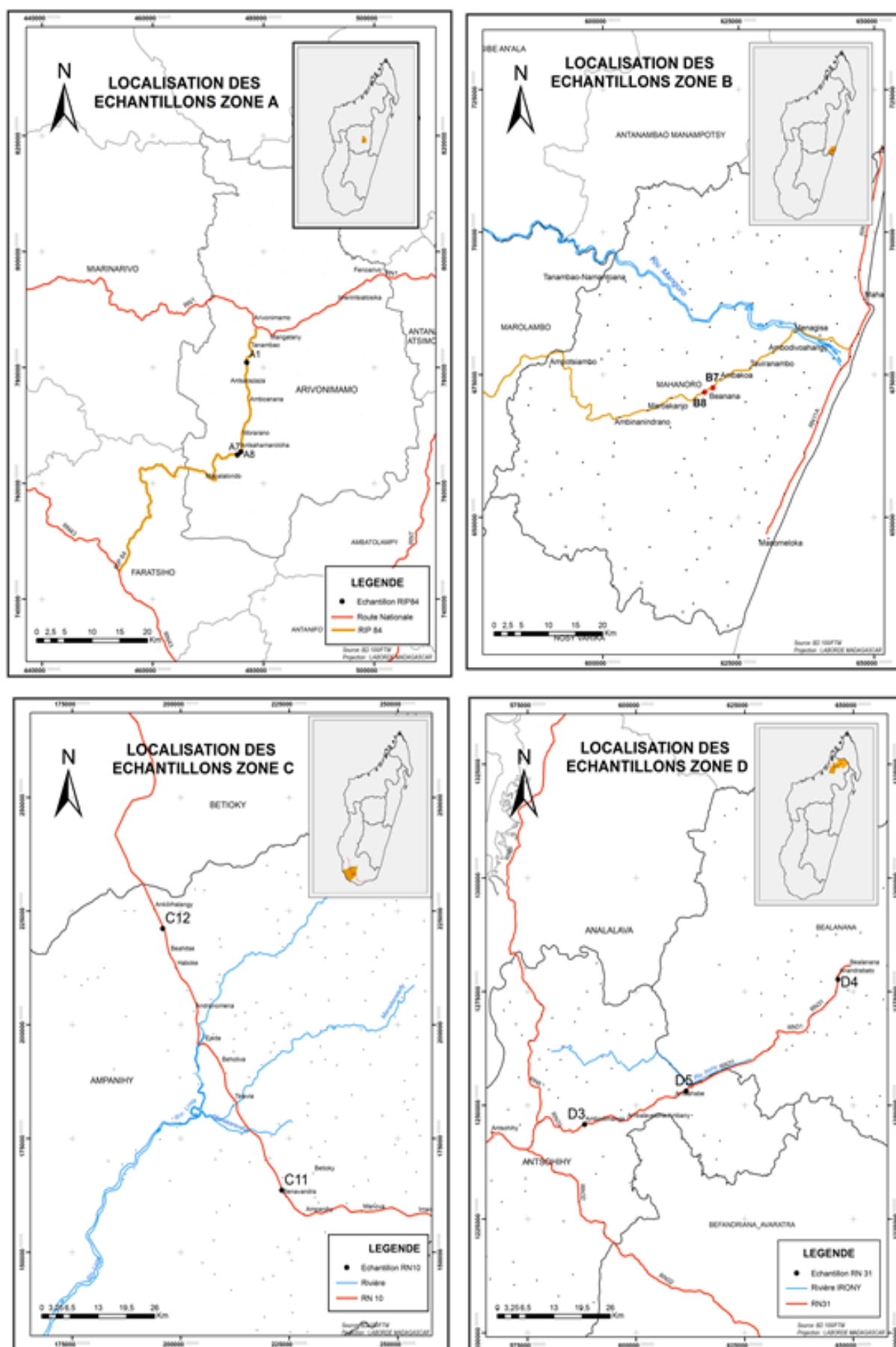
plateaux à faible altitude (plateaux de Manasamody).

Contexte géotechnique

On a prélevé 2 à 3 échantillons sur chaque zone d'étude ; puis effectué les essais nécessaires selon les conditions géotechniques d'une couche de fondation. Si un sol naturel n'atteint pas les conditions requises, on procède à divers essais expérimentaux afin d'améliorer la portance du sol naturel, notamment, le mélange avec du sable et des produits de stabilisations comme la Probase, le Zycobond et le Terrasil (étude comparative).

N°	N° Echantillon	RN	COORDONNEES
1	A1	RIP 84	E 43° 18' 19.02" / S 83° 1' 11.3"
2	A7		E 43° 8' 29.6" / S 83° 50' 15.3"
3	A8		E 43° 11' 27.3" / S 83° 50' 31.5"
4	B7	RNT 23	E 42° 32' 42.2" / S 20° 57' 36.0"
5	B8		E 42° 31' 50.4" / S 20° 57' 7.3"
6	C11	RN 10	E 44° 41' 40,1" / S 24° 38' 30,6"
7	C12		E 44° 25' 51" / S 24° 07' 09"
8	D3	RN 31	E 48°24' 13.0" / S 14° 47' 50.7"
9	D4		E 48°11' 16.1" / S 14° 51' 40.4"
10	D5		E 48°43' 28.7" / S 14° 34' 01.2"

Coordonnées géographiques des points de prélèvement des échantillons



Localisation des échantillonnages des zones d'étude

RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES ESSAIS

Zone A

Echantillon			Condition pour CF	A1				A7		A8			
Mélange				Naturel	E 7/10 + S 3/10	E 3/5 + S 2/5	E 3/5 + S 2/5 + P 2%	Naturel	E 3/5 + S 2/5	Naturel	E 3/5 + S 2/5	E 3/5 + S 2/5 + P 2%	
ESSAI PROCTOR			≥ 18										
Teneur optimale	wopt	%		25,2	14,7	13,2	15,5	32,0	16,9	25,0	17,6	12,9	
Densité optimale	γopt	kN/m3		13,90	17,92	19,86	20,62	13,70	18,00	15,60	19,45	19,65	
Densité humide	γh	kN/m3		16,57	19,56	17,54	17,85	17,26	19,99	18,54	21,78	21,13	
Densité sèche	γd	kN/m3		13,23	17,05	18,42	18,76	13,08	17,10	14,83	18,52	18,71	
Poids spécifique	γs	kN/m3		27,75	26,68	26,33	24,32	26,72	25,28	28,81	27,21	27,08	
Indice de compacité	IC	%		95,1	95,1	95,2	95,1	95,5	95,0	95,1	95,2	95,2	
ESSAI CBR			< 0,5										
Gonflement absolu	ΔH	mm		8,32	2,30	2,87	0,08	3,45	0,24	2,80	0,19	0,12	
Gonflement relatif	ΔH/H	mm		6,68	1,84	2,29	0,06	2,76	0,19	2,22	0,15	0,08	
CBR à 2,5mm				≥ 30	1	7	17	67	7	38	18	20	37
CBR à 5mm			≥ 30	1	8	18	62	8	35	16	25	31	
ESSAI LIMITE D'ATTERBERG			< 50										
Limite de liquidité	ωl	%		69,1	56,6	48,2	49,1	84,0	40,5	53,1	43,9	46,0	
Limite de plasticité	ωp	%		40,5	34,1	28,9	23,6	50,2	24,7	30,8	26,0	26,9	
Indice de plasticité	Ip	%	≤ 20	28,6	22,5	19,3	25,5	33,8	15,8	22,8	17,9	19,1	
ESSAI GRANULOMETRIE			≤ 35										
Cailloux	C	%		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Graviers	G	%		1	5	4	4	-	3	-	5	3	
Gros Sable	GS	%		18	40	51	42	10	56	0,40	45	39	
Sable fin	SF	%		12	11	9	5	11	6	0,60	2	3	
Limon	L	%		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Argile	A	%		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Fines	F	%			69	44	36	49	79	35	99	48	55

Interprétation	Echantillon	A1				A7		A8		
	Symbole	MH	SM	SM	SM	MH	SM	MH	SM	ML
	Appellation	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux	Sable silteux de forte plasticité	Sable silteux de faible plasticité	Sable silteux de faible plasticité	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux	Sable silteux de faible plasticité	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux	Sable silteux de faible plasticité	Silt inorganique et sable très fin

Zone B et Zone C

Echantillon	B7			B8					C11		C12		
ESSAI PROCTOR	Naturel	E 3/5 + S 2/5	E 3/5 + S 2/5 + P 2%	Naturel	S 25%	S 25% + P 2%	S 35%	S 40%	Naturel	E 3/5 + S 2/5 + P 2%	Naturel	S 30%	S 30% + P 4%
Teneur optimale	18,5	13,2	12,4	18,9	14,6	14,0	6,0	13,5	15,7	10,8	9,8	9,1	11,6
Densité optimale	17,05	18,69	19,52	17,90	19,06	19,34	20,65	18,78	17,76	20,43	18,80	20,00	19,94
Densité humide	19,23	20,13	20,88	20,27	20,75	20,98	20,82	20,33	19,50	21,53	19,68	20,82	21,17
Densité sèche	16,23	17,77	18,59	17,05	18,11	18,41	19,64	17,91	16,90	19,43	17,92	19,08	18,97
Poids spécifique	27,32	26,60	27,10	26,79	26,43	26,02	25,10	25,04	25,16	25,80	26,17	26,47	26,03
Indice de compacité	95,2	95,1	95,2	95,3	95,0	95,2	95,1	95,3	95,2	95,1	95,3	95,4	95,1
ESSAI CBR													
Gonflement absolu	1,04	0,37	0,10	1,75	0,72	0,37	0,40	0,34	1,91	0,07	3,72	3,22	0,10
Gonflement relatif	0,82	0,30	0,08	1,40	0,58	0,30	0,31	0,28	1,54	0,06	2,97	2,59	0,08
CBR à 2,5mm	17	35	118	14	24	38	29	30	7	75	3	17	135
CBR à 5mm	17	30	110	13	24	33	30	32	6	78	5	19	135
ESSAI LIMITES													
Limite de liquidité	48,5	45,2	46	52,6	41,9	34,9	45,6	43,8	40,7	41,9	31,2	32,3	26,5
Limite de plasticité	28,8	32,9	26,9	31,1	25,2	20,7	26,7	26,9	22,8	17,9	23,6	25,9	21,9
Indice de plasticité	19,7	12,3	19,1	19,2	16,7	14,1	18,9	16,9	17,9	24	7,5	6,4	4,6
GRANULOMETRIE													
Cailloux	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Graviers	3	4	5	5	4	6	3	4	-	5	5	7	2
Gros Sable	22	41	48	34	41	35	46	47	16	45	32	44	47
Sable fin	17	8	8	12	8	7	7	8	17	8	18	12	13
Limon	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argile	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fines	58	47	39	49	42	51	44	41	77	42	45	37	38

Interprétation	Echantillon	B7			B8				C11		C12		
	Symbole	ML	SM	SM	SM	SM	ML	SM	ML	SM	SM	SM	ML
	Appellation	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux	Sable silteux de faible plasticité	Sable silteux de faible plasticité	Sable silteux de forte plasticité	Sable silteux de faible plasticité	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux	Sable silteux de faible plasticité	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux	Sable silteux de faible plasticité	Sable silteux de forte plasticité	Sable silteux de faible plasticité	Silt inorganique, sol sableux très fin ou silteux

Zone D

Echantillon			D3		D4		D5	
Mélange			Naturel	E 3/5 + S 2/5	Naturel	E 3/5 + S 2/5 + P 2%	Naturel	S 40% + P 4%
ESSAI PROCTOR								
Teneur optimale	ω_{opt}	%	9,6	7,5	12,5	11,4	13,4	13,7
Densité optimale	γ_{opt}	kN/m ³	18,10	19,08	18,60	21,35	17,70	18,72
Densité humide	γ_h	kN/m ³	18,94	17,74	19,91	19,16	19,09	20,27
Densité sèche	γ_d	kN/m ³	17,28	18,66	17,70	20,13	16,83	17,83
Poids spécifique	γ_s	kN/m ³	26,17	26,11	26,45	26,52	26,20	25,73
Indice de compacité	IC	%	95,5	95,1	95,2	95,2	95,1	95,2
ESSAI CBR								
Gonflement absolu	ΔH	mm	1,73	0,20	2,48	0,09	4,12	0,10
Gonflement relatif	$\Delta H/H$	mm	1,39	0,16	2,01	0,07	3,29	0,08
CBR à 2,5mm			15	27	7	85	2	100
CBR à 5mm			16	26	10	90	3	98
ESSAI LIMITE D'ATTERBERG								
Limite de liquidité	ω_l	%	35,5	21,9	45,5	40,2	48,1	41,9
Limite de plasticité	ω_p	%	31,4	13,1	38,3	23,5	35,9	27,9
Indice de plasticité	I_p	%	4,3	8,8	7,2	16,7	12,2	14,0
ESSAI GRANULOMETRIE								
Cailloux	C	%	-	-	-	-	-	-
Graviers	G	%	-	2	-	4	-	-
Gros Sable	GS	%	58	31	44	32	34,25	19
Sable fin	SF	%		6		2		15
Limon	L	%	40	-	52	-	61,45	-
Argile	A	%	2	-	4	-	4,2	-
Fines	F	%	-	61	-	62	-	66

Echantillon	D3		D4		D5	
Symbole	LS	ML	LS	ML	SL	ML
Appellation	Limon sablonneux, zone perméable	Silt inorganique et sable très fin	Limon sablonneux, zone perméable	Silt inorganique et sable très fin	Silt limoneux, zone perméable	Silt inorganique et sable très fin

CONCLUSION

La résilience des routes en terre est un phénomène complexe jouant un rôle essentiel dans le développement et la connectivité des régions rurales. Bien que ces infrastructures soient négligées, ils résultent d'une capacité d'adaptation face aux environnements climatique, morphologique, géologique et à l'intensité de trafic. L'utilisation de matériaux adaptés, des techniques de mise en œuvre appropriées, et un bon entretien sont

d'autant plus des facteurs contribuant à leur durabilité.

Notre étude nous a démontré que la résilience de la route en piste est typique à une zone selon les paramètres climatique, géologique et géotechnique. Pour avoir des matériaux adéquats, nous avons eu recours à l'utilisation des produits favorisant le bon mécanisme des sols existants, comme le sable, le Probase, le Zycobond et Terrassil. Les résultats obtenus sont très concluants, surtout au niveau de la portance du sol.



Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (L.N.T.P.B)
Sécurité - Qualité
Organisme certifié en ISO 9001 Version 2015
70 ans d'expériences



Construire sur des bases solides commence par les études géotechniques !

Avant toute construction, il est crucial de réaliser des études géotechniques du sous-sol. Elles permettent d'analyser la nature du terrain, sa résistance, et ses caractéristiques pour concevoir des fondations sûres et adaptées. Sans ces études, les risques de tassements, fissures, voire d'effondrements augmentent, mettant en danger la stabilité des ouvrages et la sécurité des personnes.

Investir dans la géotechnique, c'est anticiper les problèmes, optimiser les coûts et garantir la pérennité de vos constructions.

N'hésitez plus de toujours faire une étude géotechnique avant votre construction une seule adresse :

L.N.T.P.B
Tel : 020 78 421 88 - 020 22 432 12
<https://Intpb-madagascar.com/>
Mail: Intpb@moov.mg - Alarobia - Antananarivo



FABRICATION DE BÉTONS BITUMINEUX DRAINANTS À BASE DE GRANULATS ARTIFICIELS (LAITIERS CRISTALLISÉS)



**Dr RANDRIAMALALA
Tiana Richard**
*Chef de Département de
Recherche,
Développement et
Matériaux au LNTPB*



**HAJALALAINA Stefano
Aristide**
*Ecole Supérieure
Polytechnique
d'Antananarivo*

INTRODUCTION

Le **béton bitumineux drainant** représente une solution innovante pour la gestion des eaux de ruissellement sur les chaussées. Grâce à sa **structure poreuse**, il permet l'infiltration de l'eau à travers le revêtement, réduisant ainsi le risque d'aquaplaning et améliorant la **sécurité routière en période de pluie**.

La performance de ce type de béton repose en grande partie sur la **qualité des granulats** utilisés. Dans cette optique, le **laitier cristallisé**, résidu issu de la fusion de scories métallurgiques, se présente comme une **alternative écologique et performante** aux granulats naturels. Il offre des propriétés mécaniques intéressantes tout en contribuant à la valorisation des déchets industriels.

Cet article se porte sur la conception de bétons bitumineux drainants formulés à partir de **laitiers cristallisés**, un granulat artificiel issu de sous-produits industriels. L'objectif est de mettre au point un matériau routier offrant de **bonnes performances mécaniques**, une durabilité accrue et un coût de production optimisé.

Le **Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (L.N.T.P.B.)**, sous tutelle du Ministère des Travaux Publics, est l'un des organismes habilités à effectuer les essais nécessaires pour évaluer l'efficacité des laitiers cristallisés dans les enrobés bitumineux.

La démarche expérimentale repose sur la caractérisation des matières premières utilisées, tant du côté des granulats que du liant bitumineux. Les essais permettent de vérifier leur conformité aux exigences techniques en vigueur.

Cependant, son intégration dans les enrobés bitumineux drainants nécessite une **évaluation rigoureuse** : compatibilité avec le liant, capacité de drainage, comportement mécanique à long terme, etc.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Matériaux utilisés :

➤ **Laitiers cristallisés :**

Provenant d'un site de traitement de ferrailles situé à **Ambalavao Ampangabe (RN7)**.

➤ **Bitume :**

Un bitume de grade 50/70 a été sélectionné pour ses performances adaptées aux climats tempérés.

Caractérisation des matériaux :

• **Laitiers cristallisés :**

Les opérations d'identification comprennent :

- **Préparation du matériau :**
concassage, broyage, tamisage ;
- **Densité apparente** – *NF EN 1097-3* (Août 1998)
- **Poids spécifique** – *NF EN 1097-6* (20 mai 2014)
- **Analyse granulométrique** – *NF EN 933-1* (10 février 2012)
- **Coefficient d'aplatissement (CA)** – *NF EN 933-3* (25 juillet 2012)
- **Essai Los Angeles (LA)** – *NF EN 1097-2* (1^{er} mars 2020)
- **Essai Micro-Deval à l'eau (MDE)** – *NF EN 1097-1* (1^{er} juillet 2011).

- **Bitume**

Les essais d'identification du liant bitumineux comprennent :

- **Densité apparente** – *NF EN 1097-3* (Août 1998) ;
- **Poids spécifique** – *NF EN 1097-6* (1^{er} janvier 2014) ;
- **Perte à la chaleur** – *NF EN 12607-1* (2007) ;
- **Pénétrabilité à l'aiguille** – *NF EN 1426* (Juillet 2015) ;
- **Point de ramollissement (Bille et Anneau)** – *NF EN 1427* (Janvier 2018) ;
- **Adhésivité passive** – *NF EN 16346* (Décembre 2023).

Fabrication des bétons bitumineux drainants :

- **Formulations étudiées :**

La formulation d'un béton bitumineux drainant s'appuie sur des critères stricts pour garantir à la fois une perméabilité à l'eau efficace et une stabilité mécanique durable.

- Détermination de la courbe granulométrique : répartition des différentes tailles de grains dans le mélange

- Séparation des éléments : classement des éléments selon la taille des grains
- Surface spécifique
- Teneur en liant

Tableau 16 : Composition des granulats étudiés [Auteur]

Formule	Formule Z	Formule V
LC 0/4	55%	45%
LC 4/6	15%	15%
LC 6/10	30%	40%

- **Confection des éprouvettes :**

C'est une étape essentielle permettant de reproduire en laboratoire les conditions réelles d'un enrobé mis en œuvre.

- Les constituants des éprouvettes sont : bitumes, granulats, additifs
- Composition du mélange : préparation des différents constituants de l'enrobé
- Mise en œuvre de l'enrobé : chauffage du mélange granulats et bitumes à 140°C, malaxage jusqu'à obtenir un mélange homogène,
- Moulage et compactage : pour former une éprouvette régulière, dense et sans vide excessif.
- Refroidissement : à l'air libre pendant 24 heures
- Démoulage : se fait à température ambiante

Caractérisation des bétons bitumineux drainants :

Pour évaluer les performances du matériau élaboré en laboratoire, les essais suivants ont été effectués : l'essai de perméabilité à l'eau, l'essai Marshall, et l'essai Duriez.

- **Perméabilité à l'eau : pour évaluer la capacité de drainage du béton bitumineux**

- Préparation du mélange dans un moule
- Mise en place dans l'eau : l'eau est introduite au-dessus de l'échantillon
- Mesure du volume d'eau qui traverse et la hauteur d'eau



Figure 1 : essai de perméabilité à l'eau

- **Essai Marshall : pour évaluer la stabilité ou résistance à la charge**

- Préparation du mélange : bitume et granulats (éprouvette)
- Compactage des éprouvettes : 50 coups par face
- Conditionnement thermique : dans un bain d'eau à 60°C pendant 30mn
- Essai de compression : sur les mâchoires de l'appareil Marshall et application de la charge verticale jusqu'à l'écrasement et enregistrement des valeurs



Figure 1 : Compactage de l'éprouvette Marshall



Figure 2 : Ecrasement de l'éprouvette

- **Essai Duriez : pour mesurer la sensibilité à l'eau du béton bitumineux et d'évaluer la résistance mécanique à la compression**

- Préparation des éprouvettes
- Conservation : une série à sec et l'autre à immerger dans l'eau à 18-20°C pendant 7 jours
- Mesure de la résistance à la compression des deux séries
- Détermination de l'indice de sensibilité à l'eau



Figure 3 : Eprouvette pour l'essai Duriez

COMMENTAIRE ET CONCLUSION

Les formulations Z et V ont été élaborées pour évaluer l'influence des granulométries spécifiques du laitier cristallisé sur les performances des bétons bitumineux drainants. La formulation Z utilise une répartition granulométrique orientée vers les fractions fines (principalement 0/4 mm), tandis que la formulation V intègre davantage des granulats plus grossiers (4/6 et 6/10 mm), ce qui permet de mieux structurer la texture du mélange.

Les résultats obtenus ont montré une amélioration notable de la perméabilité des mélanges contenant des proportions importantes de LC grossier (formulation V), traduisant une meilleure capacité de drainage. En revanche, la formulation Z, plus riche en fines, présente une densité plus élevée mais une perméabilité moindre, ce qui peut limiter son

utilisation dans des applications nécessitant une forte capacité d'infiltration de l'eau.

Au niveau de la stabilité Marshall, la formulation V offre également de bonnes performances mécaniques, prouvant que l'introduction de granulats artificiels issus du laitier n'altère pas significativement la résistance du mélange. La formulation Z, bien que dense, présente une résistance légèrement inférieure, probablement due à une compacité excessive qui réduit la cohésion entre les grains.

Enfin, l'observation de la macro texture a confirmé que la formulation V est plus adaptée pour assurer la rugosité nécessaire à la sécurité routière (grip), grâce à une granulométrie plus ouverte. Cela conforte l'idée que la combinaison, de LC 4/6 et 6/10 mm, favorise une structure drainante tout en conservant de bonnes caractéristiques mécaniques.

ETUDE METROLOGIQUE BASEE SUR LA VERIFICATION ET ETALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE SUIVANT LA NORME POUR L'ACCREDITATION ISO 17025 AU SEIN DU LABORATOIRE LNTPB



Dr RANDRIAMALALA Tiana Richard
*Chef de Département de Recherche,
Développement et Matériaux au LNTPB*



RANDRIANTSOA Ny Arilivah Tongasoa
Université d'Antananarivo

RESUME

Cette étude met en lumière l'importance de la métrologie dans le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB), notamment dans le cadre de la démarche d'accréditation ISO 17025. Il rappelle les exigences liées à la traçabilité des mesures, la fiabilité des résultats et la conformité des équipements de mesure.

La mise en œuvre rigoureuse des opérations de vérification et d'étalonnage des instruments de mesure est essentielle pour garantir la qualité des essais. Ces opérations doivent être effectuées selon des procédures normalisées internationales, afin d'assurer la cohérence des résultats.

Cette étude présente également les rôles des trois types de métrologie (scientifique, industrielle, légale) et leur application au sein du laboratoire. Il insiste sur l'importance de tenir à jour les documents de suivi métrologique, les certificats d'étalonnage, ainsi que les incertitudes de mesure associées, en conformité avec les exigences de l'ISO/IEC 17025.

OBJECTIFS

Ce bulletin de liaison a pour objectif de rappeler les principes fondamentaux de la métrologie appliquées au sein du laboratoire LNTPB, de détailler les différentes méthodes et types d'étalonnage mise en œuvre, les normes de référence utilisées, ainsi que la fréquence d'étalonnage appliquée aux instruments de mesure selon la procédure d'accréditation (ISO 17025) qui vise à démontrer la compétence du laboratoire, la capacité à produire des résultats valides et à renforcer la confiance dans ses opérations.

INTRODUCTION SUR LA METROLOGIE

La métrologie est la science qui étudie les mesures et les systèmes de mesure. Bien plus qu'un simple contrôle, elle englobe l'ensemble des moyens techniques, organisationnels et humains permettant d'obtenir des mesures fiables, précises et traçables.

Elle s'appuie sur des principes fondamentaux : la traçabilité (chaque mesure doit pouvoir être reliée à un étalon

(référence) reconnu, national ou international), l'exactitude (minimiser les incertitudes) et la reproductibilité (obtenir le même résultat dans les mêmes conditions).

Présente dans tous les secteurs industriels, recherche, santé, environnement, commerce ; La métrologie est essentielle pour garantir la qualité des produits et services, la conformité aux réglementations et le respect des normes internationales. Elle est aussi un élément clé de compétitivité et de confiance, car elle permet d'assurer que tous parlent le même « langage » de la mesure.

Ainsi, au-delà des instruments de mesure, la métrologie concerne également l'étalonnage, la vérification, la gestion des équipements, la formation des utilisateurs et l'amélioration continue des processus de mesure.

LES DIFFERENTS TYPES DE METROLOGIE ET LES CONDITIONS D'UTILISATION DES APPAREILS AU LABORATOIRE LNTPB

LES DIFFERENTS TYPES DE METROLOGIE

Dans notre laboratoire d'analyse de sol et matériaux, la métrologie occupe une place importante pour garantir la fiabilité et la précision des résultats obtenus. La métrologie, définie comme la science de la mesure, se décline en plusieurs types, chacun répondant à des besoins spécifiques et encadrant les activités de contrôle, d'essai et d'étalonnage des instruments de mesure.

En général, il y a trois grandes catégories :

La métrologie scientifique, qui développe les méthodes et maintient les étalons référence

La métrologie industrielle, qui veille à l'exactitude des mesures réalisés au

quotidien lors des analyses et essai (métrologie des masses et volumes ...)

La métrologie légale, qui encadre les instruments soumis à une réglementation pour protéger les intérêts publics et garantir la conformité aux normes en vigueur.

Dans le domaine des sols et matériaux, ces différents types de métrologie s'articulent pour assurer la traçabilité des mesures, la conformité aux exigences normatives (ISO, normes) et la crédibilité des résultats fournis aux clients. Ainsi, maîtriser ces aspects métrologiques est un enjeu essentiel pour maintenir la qualité et la performance du laboratoire.

Métrologie scientifique et industrielle

- **Masse et grandeurs apparentées :**
 - ✓ Mesure de masse
 - ✓ Force de pression
 - ✓ Volume et masse volumique
 - ✓ Viscosité
- **Longueur :**
 - ✓ Métrologie dimensionnelle (comparateur, cales étalons, règles)
- **Thermométrie :**
 - ✓ Mesure de température

CONDITIONS D'UTILISATION DES APPAREILS

QUELQUES APPAREILS UTILISES AU LNTPB :

Dans le laboratoire du LNTPB, l'utilisation des appareils de mesure précis et fiables est indispensable pour garantir la qualité des résultats. Ces instruments permettent de réaliser divers essais physiques et mécaniques selon des normes strictes. Voici quelques appareils de mesure et matériels couramment utilisés, chacun répondant à des besoins spécifiques liés à la caractérisation et essais :



Balance hydrostatique



Balance



Presse CBR



Anneau dynamométrique avec comparateurs



Thermomètre avec hygrométrie



Etuve



Presse à ciment



Presse béton



Presse à ciment manuel



Presse à béton



Pénétrromètre DOW



Appareil de Vicat



Série de tamis



Appareil Triaxial

VERIFICATION METROLOGIQUE DE MESURE

La vérification métrologique est une étape importante dans le domaine de la métrologie visant à garantir la conformité des capteurs ou des chaînes de mesure à des spécifications préétablies. La vérification se concentre sur la comparaison entre le capteur ou la chaîne de mesure et un étalon de référence, en évaluant leur conformité à une spécification particulière suivant leur erreur maximale tolérée ou EMT.

L'étalonnage consiste à déterminer l'erreur d'un instrument de mesure par rapport à une référence connue et à potentiellement ajuster l'instrument pour corriger cette erreur. La vérification, quant à elle, consiste

à s'assurer qu'un instrument fonctionne dans les limites de ses spécifications.

Dans tout processus de mesure, il est essentiel de garantir la fiabilité, la précision et la traçabilité des résultats. Pour cela, l'utilisation métrologique des appareils de mesure doit répondre à des exigences strictes en termes de conditions environnementales, de préparation, de respect des normes applicables et de vérification régulière de leur conformité. Chaque appareil doit être correctement préparé avant utilisation, utilisé dans un environnement maîtrisé et accompagné d'un certificat d'étalonnage valide attestant de sa traçabilité. Ces exigences permettent d'assurer la qualité des mesures et de maintenir la confiance dans les résultats.

obtenus, en conformité avec les référentiels normatifs.

Environnement de travail

Un appareil de mesure doit être utilisé dans des conditions environnementales conformes à celles des spécifiées par les fabricants et les normes applicables

- **Température** : Généralement une plage de températures définie (ex. 20 °C ± 5 °C)
- **Humidité** : Taux d'humidité relative contrôlé pour éviter la corrosion ou la dérive électronique
- **Vibrations et chocs** : Minimiser les vibrations et chocs pendant l'utilisation
- **Propreté** : Zone propre pour éviter la contamination ou l'obstruction de capteurs sensibles
- **Interférences électromagnétiques** : Respecter les exigences CEM (Compatibilité électromagnétique)
- **Classier les produits d'essai selon leurs natures** : produit chimiques volatiles, solvants

Préparation des appareils

Avant toute utilisation :

- L'appareil doit être préparé préalablement
- Vérifier l'état visuel de l'appareil (propreté, dommages)
- Vérifier la validité du certificat d'étalonnage (période de validité)
- Effectuer une mise à zéro si nécessaire
- Laisser l'appareil en conditionnement thermique pour qu'il s'adapte à la température ambiante
- Vérifier les accessoires (câbles, sondes, embouts)
- Positionnement (niveau)

Normes applicables

- ISO/IEC 17025 : Norme pour la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais
- ISO 9001 : Pour le management de la qualité incluant le contrôle métrologique
- Normes spécifiques selon l'instrument (ex. balances : OIML R76, manomètres : EN 837, thermomètres : ITS-90...)

Caractéristique de l'appareil

- Connaître la spécialité de l'appareil pour éviter d'endommager l'appareil ou faussée la mesure
- La résolution doit être suffisante par rapport à la tolérance de mesure.
- La règle courante : l'incertitude de lecture doit être au moins 10 fois plus petite que la tolérance mesurée.
- L'utilisateur doit connaître la limite de résolution pour éviter de donner une précision trompeuse.

Certificat d'étalonnage

L'appareil doit être fourni avec un certificat d'étalonnage valide, émis par un laboratoire accrédité ISO/IEC 17025 si possible.

Le certificat doit mentionner :

- Les résultats de mesure
- L'incertitude associée
- La traçabilité aux étalons nationaux ou internationaux
- La date de validité
- Toujours archiver les certificats pour les audits qualité.

Conformité et qualité de mesure

- Respecter la fréquence de vérification/étalonnage fixée dans le plan métrologique interne.
- Documenter chaque utilisation critique (fiches de suivi, carnet métrologique).
- Former le personnel pour éviter les mauvaises manipulations.

- Isoler tout appareil non conforme (hors tolérances) et le signaler.
- Tenir à jour les enregistrements de non-conformité et les actions correctives.

Calculs d'incertitudes

Calcul d'incertitude par application des méthodes mathématiques et statistique appliquées (incertitudes simples et incertitudes composées).

Utilisateurs formés

- L'opérateur doit maîtriser la méthode de mesure ;
- Respect stricte des procédures internes et des normes applicables.

ETALONNAGES DES INSTRUMENTS

C'est un ensemble d'opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur, indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée ou par un matériau de référence, et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisée par des étalons.

L'étalonnage est une opération métrologique qui consiste à déterminer, puis documenter la relation entre les valeurs indiquées par un instrument de mesure (une balance, un manomètre, une presse ou une étuve) et les valeurs connues d'une référence ou d'un étalon de précision.

L'objectif de l'étalonnage est de vérifier si l'instrument fournit des résultats exacts et fiables et de corriger, si nécessaire, les écarts constatés en ajustant l'instrument ou en appliquant un facteur de correction. Ce processus est essentiel dans les laboratoires de recherche et autres installations qui utilisent des instruments de mesure et d'essai. Comprendre son importance votre laboratoire plus précis et plus efficace.

En pratique, l'étalonnage permet de :

- Assurer la traçabilité des mesures aux étalons nationaux ou internationaux.
- Maintenir la précision des appareils utilisés dans les analyses et les essais.
- Répondre aux exigences des normes de qualité (par exemple ISO 17025)
- Garantir la crédibilité des résultats communiqués aux clients

NB : Pour faire l'étalonnage, le laboratoire LNTPB possède des étalons et des matériels de référence comme les poids étalons (balance), Thermocouple (étuve), balance manométrique (manomètre), afficheur DIGIMAX (presse), ciment étalon, eau distillée, étalonnage de l'aiguille de Le Chatelier....

ETALONNAGE DES BALANCES

Un poids étalon, aussi appelé masse étalon est un objet de masse précisément connue et certifiée, utilisée pour calibrer et vérifier la précision des balances et autres instruments de mesure.

ETALONNAGE D'UNE ETUVE

Un Thermocouple est un capteur de température composé de deux fils de métaux différents, soudés ensemble à une extrémité.

ETALONNAGE D'UN MANOMETRE

Pour faire l'étalonnage d'un manomètre, on a besoin d'une balance manométrique

ETALONNAGE D'UNE PRESSE

Un afficheur DIGIMAX est une unité d'acquisition de données et d'affichage tactile utilisée pour l'étalonnage notamment pour les presses.

ETALONNAGE DE CIMENT

L'étalonnage par aiguille de Le Chatelier est une méthode utilisée pour déterminer la stabilité volumique du ciment, notamment en mesurant son expansion. Cette méthode

permet de vérifier si le ciment présente une expansion anormale qui pourrait compromettre sa qualité et sa durabilité.



Poids étalons



Balance manométriques



Afficheur DIGIMAX



Etalonnage par l'aiguille de Le Chatelier



Thermocouple avec sonde

FREQUENCE D'ETALONNAGE D'UN APPAREIL

La fréquence d'étalonnage d'un appareil de mesure se définit en tenant compte de plusieurs facteurs clés, tels que les recommandations du fabricant, la fréquence d'utilisation de l'appareil, son environnement d'utilisation, et l'impact de la précision de la mesure sur le processus. Il est crucial d'établir une périodicité d'étalonnage qui assure la fiabilité des mesures sans pour autant effectuer des étalonnages trop fréquents qui pourraient être inutiles ou coûteux.

Voici les principaux éléments à considérer pour définir la fréquence d'étalonnage :

Recommandations du fabricant

Les fabricants d'instruments de mesure fournissent souvent des directives sur la fréquence d'étalonnage recommandée pour leurs produits. Ces recommandations sont basées sur des tests et des expériences, et peuvent servir de point de départ pour déterminer votre propre programme d'étalonnage.

Fréquence d'utilisation

Plus un instrument est utilisé fréquemment, plus il est susceptible de se dérégler ou de s'user, ce qui nécessite un étalonnage plus fréquent.

Inversement, un instrument peu utilisé peut ne pas nécessiter des étalonnages aussi fréquents.

Environnement d'utilisation

L'environnement dans lequel l'instrument est utilisé peut avoir un impact significatif sur sa précision.

Un environnement hostile, avec des températures extrêmes, des vibrations, ou une forte humidité, peut nécessiter un étalonnage plus fréquent.

Impact de la précision de la mesure

L'importance de la précision de la mesure pour le processus concerné est un facteur déterminant.

Si une erreur de mesure peut avoir des conséquences graves (par exemple, dans l'industrie pharmaceutique ou aérospatiale), un étalonnage plus fréquent est justifié.

Si l'impact de l'erreur est moins critique, un étalonnage moins fréquent peut être envisagé.

En résumé

La définition de la fréquence d'étalonnage est une démarche qui nécessite une analyse approfondie de divers facteurs. Il est recommandé de commencer par suivre les recommandations du fabricant, puis d'adapter la fréquence en fonction de l'utilisation réelle de l'instrument, de son environnement et de l'impact de la précision des mesures sur votre processus.

CONCLUSION

L'intégration de la métrologie dans les activités du laboratoire LNTPB permet d'assurer la fiabilité, la traçabilité et la conformité des résultats d'essais. Depuis 2024, le laboratoire a participé aux essais de comparaison inter laboratoire (C.I.L) suivant la norme 17025-17 pour l'accréditation organisé par SADCAS.

ESSAI DE PERMEABILITE DE ROCHE PAR ESSAI LUGEON



RAHERIMANANTSOA
Lalanantenaina
Nathanaël

*Ingénieur Chef de Projet
au LNTPB*

RESUME

Une étude approfondie est indispensable pour garantir la stabilité et la pérennité d'un ouvrage. Chaque type et chaque étape d'études fournissent des paramètres cruciaux pour le calcul de la stabilité d'un barrage. Par ailleurs, la compréhension du comportement de l'eau et de sa circulation souterraine, notamment en termes de quantités, est d'une importance majeure.

L'essai Lugeon a été créé afin de mieux comprendre la perméabilité d'une formation souterraine, notamment les formations rocheuses.

C'est pourquoi cet article a pour objectif de présenter l'importance, les principes et les objectifs de l'essai Lugeon.

Mots clés : Injecter, débits, pression d'eau, sous pression, paliers de pression, fissuration, cavité, forage, obturateur, charge hydraulique, volume injecté, Unité Lugeon.

INTRODUCTION

L'essai Lugeon est un essai permettant de mesurer la perméabilité des roches. Il est utilisé en géotechnique, notamment dans le cadre des études hydrauliques souterraines et est classé parmi les essais de l'eau.

La norme actuellement en vigueur décrivant la méthodologie de l'essai Lugeon est la NF EN ISO 22282-3.

L'essai est appelé aussi « LUGEOTEST ».

PRINCIPE D'ESSAI (ISO 22282-3:2012)

Les points importants à savoir sur l'essai sont :

Conditions d'application

L'essai Lugeon s'applique aux :

- Rocher
- Sols cohérents de résistance mécanique compatible avec la pression d'eau imposée pendant l'essai.

Objectifs spécifiques

- Evaluer la possibilité de circulation d'eau dans le sol
- Détecter des hétérogénéités ou de fissurations.

Objectifs principales

- Mesurer la quantité d'eau injectée dans le rocher/sol sur chaque palier de pression.

L'essai Lugeon consiste à injecter de l'eau sous pression dans une cavité du forage, de dimensions connues, afin de mesurer le débit d'injection en fonction de plusieurs paliers de pression, sur une durée prédéfinie.

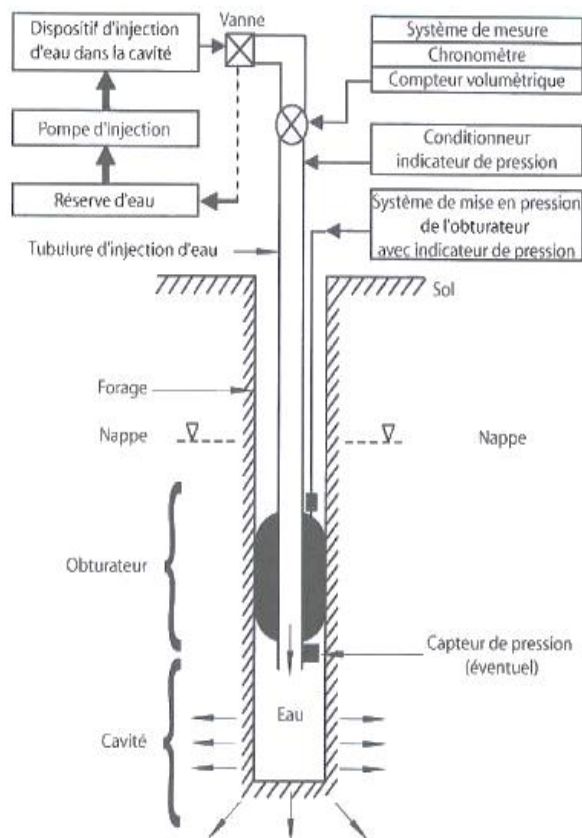


Figure 1 : Principe de l'essai Lugeon (MODE OPERATOIRE 2020 LUGEOTEST® N°44)

Cet essai présente des avantages en raison de sa relative simplicité de mise en œuvre, tout en permettant de mettre en évidence les hétérogénéités de perméabilité au sein des formations rocheuses.

DOMAINE D'APPLICATION (ISO 22282-3:2012)

L'essai Lugeon s'inscrit dans le domaine des investigations géotechniques appliquées aux massifs rocheux. Il sert pour l'évaluation :

- Des propriétés hydrauliques du massif rocheux, principalement influencées par la présence de discontinuité ;
- De la capacité d'absorption du massif ;
- De l'étanchéité du massif rocheux ;
- De l'efficacité de l'injection du coulis, ainsi que le comportement géomécanique, notamment la fracturation et le soulèvement hydraulique.

EXECUTION DE L'ESSAI

L'exécution de la mesure de perméabilité dans un rocher est décrite comme suit :

Préparation de l'essai

- Réaliser le forage servant comme avant trou ;



- Positionner l'obturateur pour isoler une cavité au-dessus du fond de forage, ou positionner deux obturateurs pour isoler une cavité loin du fond du forage (l'obturateur est relié à la surface par un tube d'injection)



- Obtention de cavité d'une portion de forage.

Mesure de perméabilité dans le rocher

- Produire une charge hydraulique à l'intérieur de la cavité en injectant de l'eau sous pression pendant un intervalle de temps donné ;



Photo 1 : Appareil de mise en pression de l'eau

- Mesurer le volume d'eau injecté dans la cavité en fonction du temps et des paliers de pression.



Photo 2 : Mesure de débit injecté

- Pressions croissantes (paires) : 2 – 4 – 6 – 8 – 10 bars
- Pressions décroissantes (impaires) : 7 – 5 – 3 – 1 bars

Lors de la réalisation de l'essai, les données brutes recueillies sur terrain sont les volumes d'eau injectés à chaque palier de pression.

Tableau 1 : Procès-verbal d'essai (MODE OPERATOIRE 2020 LUGEOTEST^R N°44)

N° Palier	Débit (l/min)	Temps (min)	Pression d'injection
		1	
		1	
		1	
		1	
		1	

DEPOUILLEMENT DE RESULTATS (Geovision, 2022)

Les résultats nets obtenus issus de l'essai Lugeon sont les suivants :

- Unité Lugeon ;
- Débit injecté (l/min)

Une unité LUGEON est le débit moyen injecté sous une pression de 1 MPa, exprimé en litres par minutes, et ramené à un mètre de forage.

RESULTATS TYPES DES ESSAIS

Dans le cadre du projet de construction d'un barrage à usage hydroélectrique à Androkabe Alaotra Mangoro, le LNTPB a mené l'étude géotechnique dudit barrage au mois d'août de l'année 2025.

L'étude a été menée à travers les interventions suivantes :

- **Réalisation d'un levé géologique** sur le site du barrage afin de décrire le contexte géologique et les contraintes associées. Cette étape s'est appuyée sur l'analyse cartographique ainsi que sur la collecte de données géomorphologiques, pétrographiques, et structurales au niveau de l'emprise prévu pour le barrage ;
- **Réalisation de forages carottés d'une profondeur de 11 mètres**, accompagnés de mesures de perméabilité effectuées à l'aide de l'essai Lugeon.

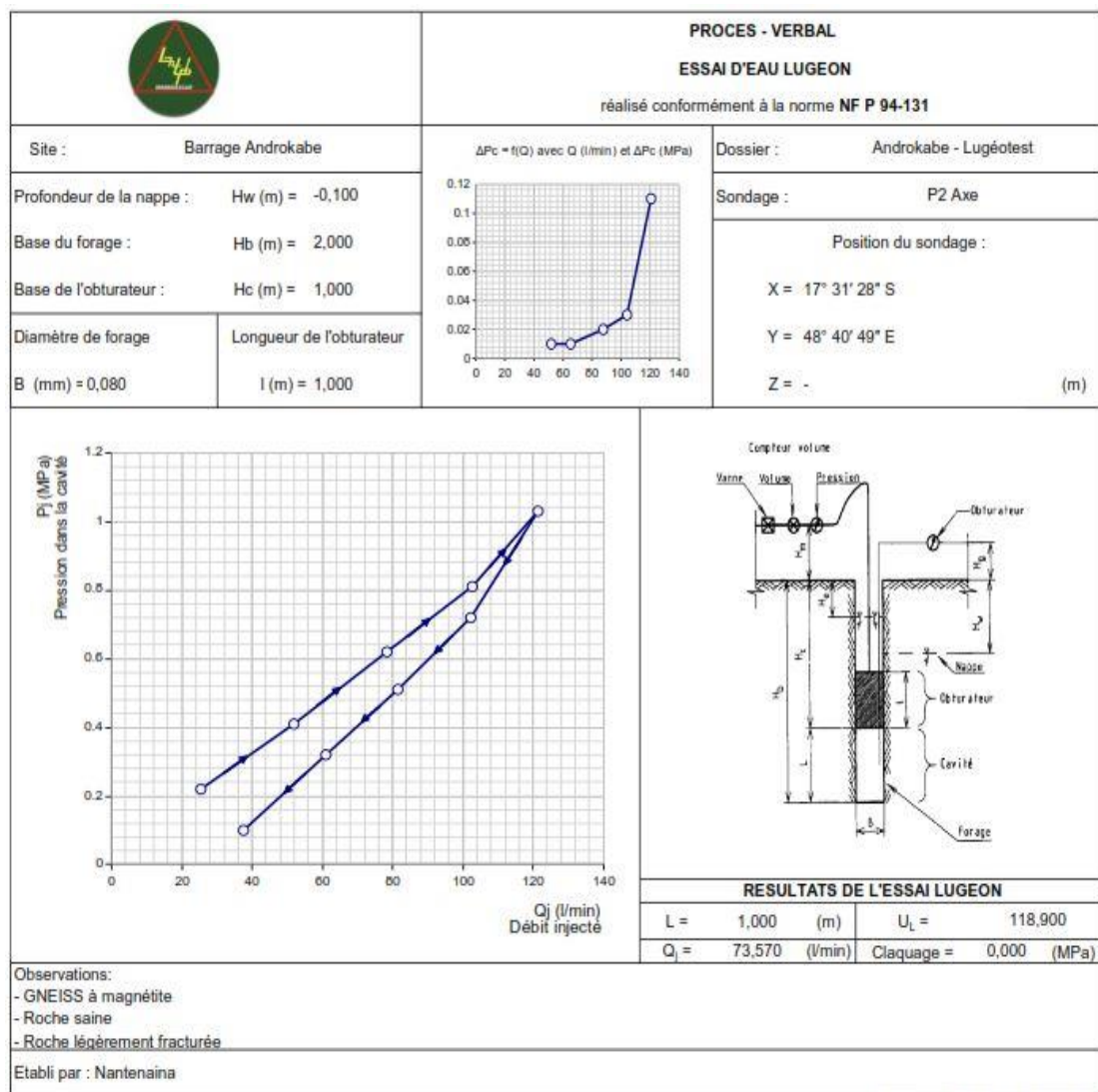
L'objectif principal de la mission est de caractériser la structure du terrain au niveau de l'emprise du barrage, notamment en ce qui concerne :

- La qualité des formations rocheuses sous-jacentes, ainsi que les éventuelles variations de faciès ;
- La perméabilité de la roche en profondeur.

Les résultats types sur un trou de sondage de 11 m de profondeur sont présentés ci-après :

Profondeur (m)	Unité Lugeon	Débit injecté (l/min)
2	118.900	73.570
3	0.000	0.000
4	13.440	4.060
5	0.000	0.000
6	0.000	0.000
7	0.574	0.322
8	0.000	0.000
9	0.263	0.097
10	0.000	0.000

Le dépouillement type des résultats sur une cavité de mesure a été effectué par le Logiciel Geovision 2022 est présenté ci-après :



INTERPRETATION DES RESULTATS TYPES

Sur la base des résultats mesurés dans le paragraphe VI, les analyses suivantes ont été réalisées :

➤ En termes de perméabilité

Les valeurs obtenues lors des essais Lugeon varient entre **0,000** et **118,900 unités Lugeon (UL)**, ce qui permet d'établir le classement suivant (ISRM, Lombardi, De Marsily) :

- Pour la valeur comprise entre **0,000** à **0,574 UL** : le massif rocheux est considéré comme **massif sain**, avec une **perméabilité très faible à négligeable** ;
- A **13,440 UL** : marque la présence de **fractures ouvertes** indique une **forte perméabilité**, avec un risque de **migration** significatif de l'eau ;
- A **118,900 UL** : le massif présente une **très forte perméabilité**, caractérisée par des **pertes d'eau importantes**, marquant un **massif très perméable**.

➤ En termes de régime d'écoulement d'eau

Le diagramme pression-débit montre que le régime d'écoulement de l'eau est de type « dilatation + remplissage » (ISO 22282-3:2012). (Figure 3 et 4).

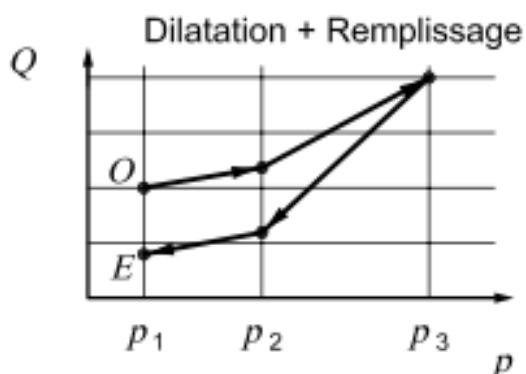


Figure 2 : Diagramme pression-débit
« dilatation+remplissage » (ISO 22282-3:2012)

Le comportement de la pression-débit (Figure 4) lors de palier croissant montre que le **débit augmente fortement de manière non linéaire, marquant une ouverture de fractures / décohésion, peu signifiant un risque d'instabilité, avec des fractures ouvertes** (selon Houlsby, ISRM).

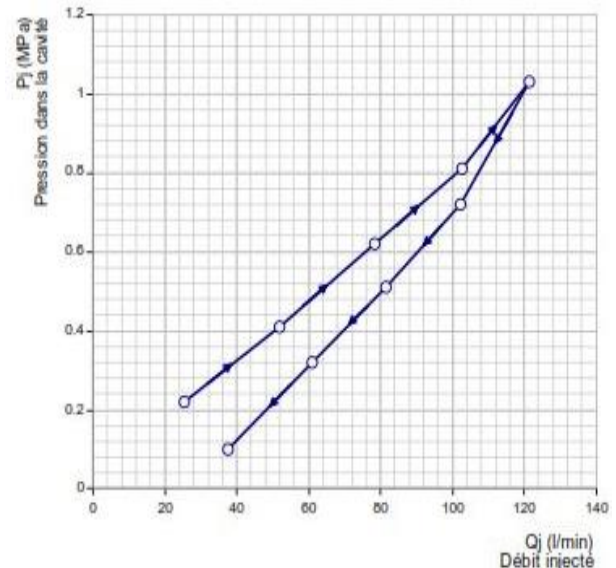


Figure 3 : Diagramme pression-débit avec
UL=118,900 et Qj=73,570

➤ En termes d'efficacité des injections de coulis (Houlsby, 1990)

Les valeurs Lugeon mesurées, allant de **0,000** à **118,90 LU**, permettent d'évaluer l'efficacité des injections de coulis selon le classement suivant :

- Pour la valeur comprise entre **0,000** à **0,574 UL** : le massif rocheux est considéré comme **faible perméabilité** et **peu ou pas de traitement nécessaire** parce que le coulis ne peut pas pénétrer ;
- Pour la valeur variante **13,440** à **118,900 UL** : le massif rocheux est considéré comme **très forte perméabilité**, dont il y a **risque de perte du coulis sans efficacité** et **nécessitant d'utiliser des coulis adaptés**.

DISCUSSIONS

La perméabilité d'une formation rocheuse peut être estimée par l'observation des fissurations sur les carottes issues du carottage. L'essai Lugeon est une méthode performante et indispensable pour la caractérisation de la propriété hydraulique des massifs rocheux en génie civil et en géotechnique. Il permet notamment :

- d'évaluer plus précisément la capacité d'une formation à laisser circuler l'eau, à l'absorber ou, au contraire, à s'y

opposer : **perméabilité** (ISRM, Lombardi, De Marsily) ;

- de définir le mode d'écoulement de l'eau au sein d'un massif rocheux (ISO 22282-3:2012) ;
- d'évaluer l'efficacité des injections de coulis, ainsi que le comportement géomécanique de la formation, notamment en ce qui concerne la fracturation et le soulèvement hydraulique (ISO 22282-3:2012).
- de définir la caractéristique des coulis pour les traitements de fissure en terme viscosité, étapes progressives, etc. (Houlsby, 1990).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

APAGEO, Cedarnet. *MODE OPERATOIRE 2020 LUGEOTEST^R N°44*, Menard matériels. ZA de Gomberville – 1 rue Salvador Allende – France.

APAGEO, Cedarnet. *Géovision – Essai d'eau Lugeon* – version 5.6.3.2 – 2022.

International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. *Suggested Methods for Water Pressure Tests (Lugeon Test) in Rock*. Oxford : Pergamon Press, 1981, pp. 319-368.

Houlsby, A. C. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting : A Guide to Grouting in Rock Foundations*. Wiley Series of Practical Construction Guides ; John Wiley & Sons, New York. xx i, 1990, 442 pages.

ISO. *Reconnaissance et essais géotechniques – Essais géohydrauliques* – NF EN ISO 22282-3:2012.

ISO. *Reconnaissance et essai – Essai d'eau Lugeon* – NF P94-131 – septembre 1994

Lombardi, G. *The role of permeability in the assessment of dam foundation conditions*, in: Proceedings of the International Symposium on Dam Foundations, 2002. A. C. Houlsby. *Routine Interpretation of the Lugeon Water-Test*. In : *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. Volume 9, 1976, pages 303-313.

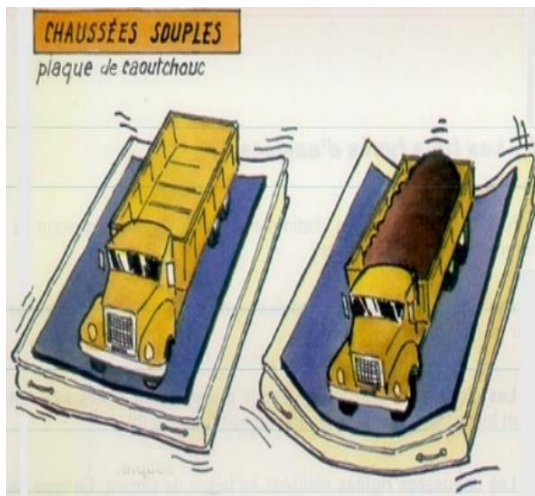
AMELIORATION DU SOL AVEC CIMENT POUR MATERIAUX DE COUCHE FONDATION D'UNE CHAUSSEE



LALAHERIJAONA A. D Patrick
*Responsable du Département
Routes, Ouvrages et
Bâtiments au LNTPB*



RATRIMOMANANA A. Daniel
Ingénieur Chef de Projet au LNTPB



Plusieurs matériaux pourraient entrer dans la composition d'une structure d'assise de la chaussée or leurs utilités dépendent des résultats physiques et mécaniques escomptés mais aussi conditionnés par le site d'emplacement du projet.

Dans le cadre du projet de construction de l'autoroute reliant Antananarivo –

INTRODUCTION

La plupart de la structure de la route nationale existante à Madagascar est une chaussée souple constituée par une superposition d'une couche de fondation en matériaux sélectionnés ou granulaire (GNT 0/60) ; d'une couche de base en matériaux granulaire de type GNT 0/31,5 et d'une couche de roulement en enrobé bitumineux BBSG 0/10 ou 0/14.

Elle est considérée comme souple à cause des matériaux granulaires qui se comportent semblablement à une plaque de caoutchouc, au-dessous d'une certaine charge, ils se déforment mais reprennent sa forme initiale.

Toamasina, les matériaux constituant la couche de fondation est réalisée en sol ciment, le présent article mis en évidence matériau amélioré par un liant hydraulique.

ETUDE AU LABORATOIRE

Avant de déterminer la composition optimale du sol ciment au laboratoire, il serait nécessaire de connaître la dimension de chaque couche élémentaire de la chaussée.

- **Dimensionnement de la structure de la chaussée par méthode AASHTO**

L'hypothèse de calcul pour le dimensionnement de la chaussée :

- Coefficient de couche a_i : 0,35 (surface) – 0,13 (base) – 0,22 (fondation)
- Nombre Structurale $SN = \sum_{i=1} a_i D_i$ ou $SN = 3,66$
- Durée de service : 20 ans

- Taux d'accroissement arithmétique annuel : 4 %
- Trafic MJA : 385

La dimension de la chaussée est récapitulée dans le tableau suivant :

STRUCTURE	EPAISSEUR COUCHE	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	
COUCHE DE ROULEMENT	BBSG 0/10 : 5cm	2750 MPa	400 000 Psi
COUCHE DE LIAISON	-	-	-
COUCHE DE BASE	GCNT 0/31,5 : 20 cm	500 MPa	72 500 Psi
COUCHE DE FONDATION	SOL CIMENT : 30 cm	1800 MPa	261 000 Psi
PLATEFORME	-	120 MPa	17 400 Psi

$$\log_{10} W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log_{10} M_R 8,07$$

d'où :

$$W_{18} = 2,12 \cdot 10^7 > 3,88 \cdot 10^6$$

Avec :

- $Z_R = -0,841$
- $PSI = 2,2$
- $S_0 = 0,45$

• Essai d'identification du sol à traité

A l'issu des prélèvements des échantillons de sol venant des gisements meubles répertoriés aux environs du projet autoroute reliant Antananarivo – Toamasina, un essai d'identification a été fait pour déterminer les paramètres physiques du sol.

Deux (02) types échantillons de sol ont été analysés au laboratoire de nature visuelle respectivement limon argileux légèrement sableux rougeâtre (N°01) et Argile limoneuse micacée violacée (N°02).

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

ECHANTILLONS	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	W (%)	γ _s (KN/m ³)	ESSAI PROCTOR		ESSAI DE PORTANCE	
						γ _{d max} (KN/m ³)	W _{opt} (%)	Indice CBR	%G
N°01	47	32	15	17	27,50	17,75	18	12	0,33
N°02	48	31	17	20	27,30	16,80	24	8	1,89

• Essais d'aptitude au traitement d'un sol au liant hydraulique

Selon la norme NF P 94-100, l'aptitude d'un sol a pour but de détecter le risque de gonflement ou de défaut de prise d'un

matériau traité au liant hydraulique. En effet, la réaction matériau / produit de traitement peut parfois être perturbée, voire inhibée, par des éléments minéralogiques ou chimiques présentes dans le matériau et rendre le traitement douteux ou inadapte.

Avec un apport du liant hydraulique de divers classe (CEM I 52,5 ; CEM II 22,5 – 32,5 – 52,5 ; CEM IV 42,5) variant de 2% à 4%. Les

résultats du mélange obtenu sont récapitulés dans le tableau suivant :

ECHANTILLONS	MELANGE SOL et CIMENT	CLASSE DU CIMENT	ESSAI PROCTOR		ESSAI DE PORTANCE	
			$\gamma_{d\ max}$ (KN/m ³)	Wopt (%)	Indice CBR	% G
N°01	SOL + 2% Ciment	CEM I 52,5	18,00	16	29	0,10
		CEM II 22,5	17,72	15	24	0,11
		CEM II 32,5	17,90	16	26	0,39
		CEM II 52,5	18,65	15	28	0,25
		CEM IV 42,5	17,90	16	29	0,19
	SOL + 3% Ciment	CEM I 52,5	18,10	16	40	0,12
		CEM II 22,5	17,78	15	31	0,10
		CEM II 32,5	18,00	16	34	0,25
		CEM II 52,5	18,60	15	37	0,18
		CEM IV 42,5	18,00	15	43	0,13
	SOL + 4% Ciment	CEM I 52,5	18,40	14	52	0,06
		CEM II 22,5	17,80	15	44	0,07
		CEM II 32,5	18,30	15	48	0,13
		CEM II 52,5	18,20	16	50	0,13
		CEM IV 42,5	18,30	15	60	0,10
N°02	SOL + 2% Ciment	CEM I 52,5	17,10	17	19	0,27
		CEM II 22,5	16,90	19	19	0,24
		CEM II 32,5	16,80	17	15	0,34
		CEM II 52,5	16,80	18	15	0,39
		CEM IV 42,5	16,70	19	19	0,26
	SOL + 3% Ciment	CEM I 52,5	17,10	17	30	0,22
		CEM II 22,5	16,88	19	28	0,20
		CEM II 32,5	16,85	17	27	0,27
		CEM II 52,5	16,85	19	26	0,28

ECHANTILLONS	MELANGE SOL et CIMENT	CLASSE DU CIMENT	ESSAI PROCTOR		ESSAI DE PORTANCE	
			$\gamma_{d\ max}$ (KN/m ³)	Wopt (%)	Indice CBR	% G
	SOL + 4% Ciment	CEM IV 42,5	16,75	19	25	0,21
		CEM I 52,5	17,00	17	42	0,05
		CEM II 22,5	17,00	19	38	0,07
		CEM II 32,5	17,00	17	35	0,16
		CEM II 52,5	16,70	19	38	0,10
		CEM IV 42,5	16,65	18	36	0,14

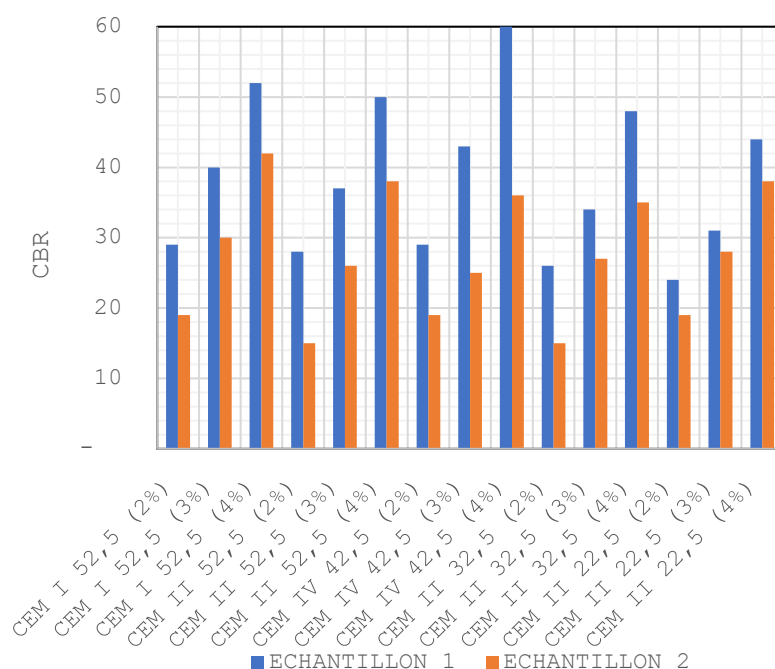
Suivant la spécification de la norme NF P 94-100, le sol analysé est adapté au traitement d'un liant hydraulique de classe CEM I - CEM II et CEM IV.

- **Analyse des résultats**

Compte tenu des résultats des essais sur les échantillons de sol obtenus, il a été constaté

que l'indice CBR varie de 15 à 60 avec une valeur moyenne de 33, cela signifie que l'indice de portance CBR varie en fonction de la teneur en ciment. Le taux d'amélioration de la portance du sol stabilisé avec du ciment varie de 88 à 95%.

La figure ci-après consigne l'histogramme du sol traité :



METHODOLOGIE DE MISE EN ŒUVRE DE LA COUCHE DE FONDATION EN SOL CIMENT

La méthodologie de mise œuvre de la couche de fondation en sol ciment est constitué par :

- Tri du matériaux ou enlèvement des matériaux organiques et des impuretés sur le sol à traiter ;
- Définition de la composition du mélange adoptée qui est de 3 % d'apport ciment CEM I par rapport au poids du sol à traité ;
- Humidification qui a pour objet d'amener le sol à une teneur en eau telle qu'après traitement au liant hydraulique le mélange atteigne la teneur en eau spécifiée par l'étude de formulation ;



Photo 3: Dépôt des sacs de ciment



Photo 4: Epannage ciment sur sol

- Dépôt d'un sac de ciment de 50 kg tous les 1,32m/2,33m sur la surface du matériau meuble constituant la couche de fondation ;
- Puis qu'il s'agit d'un traitement sur place, le malaxage est réalisé par un engin Wirtgen WR240 qui permet de disperser au sein de volume du matériau à traiter et d'atteindre la mouture recherchée. L'engin Wirtgen WR240 est lié avec un camion-citerne pour assurer la teneur en eau optimum (W_{opt}) du mélange. Il peut assurer l'homogénéisation du mélange (sol et ciment) pour une épaisseur allant jusqu'à 50 cm.
- Le mélange est ensuite compacté mécaniquement pour assurer une bonne liaison ;
- Le sol ciment est laissé à durcir pendant plusieurs jours, pendant lesquels il doit être maintenu humide pour permettre à une hydratation complète du ciment ;



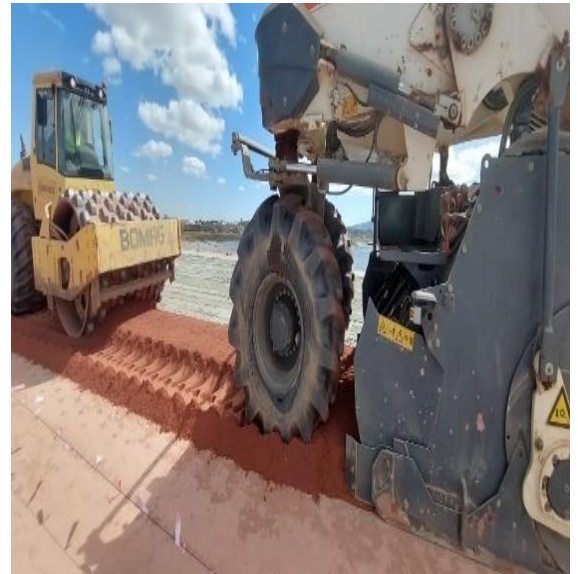
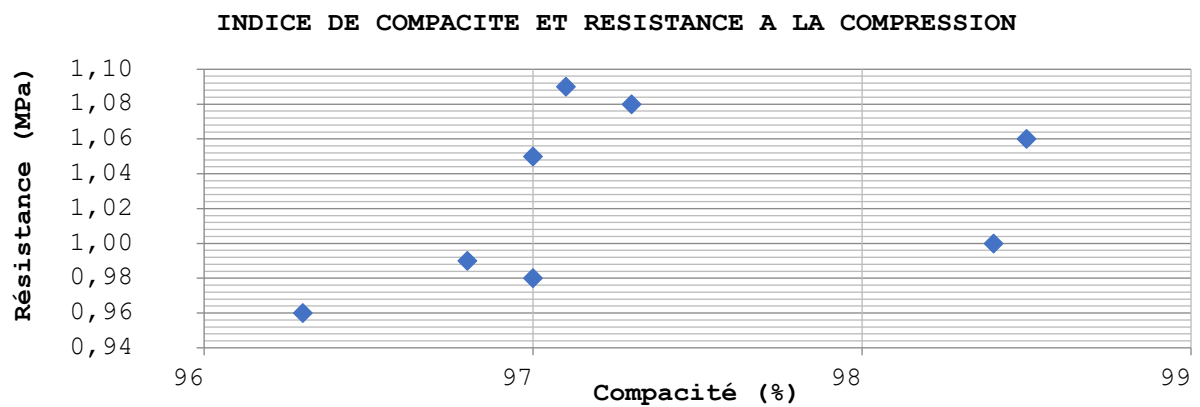


Photo 5: Mise en œuvre du sol ciment

RESULTATS DE LA PRATIQUE DU SOL CIMENT

Avec quatre (04) passes d'un compacteur à pied de mouton vibré et deux (02) passes lisse d'un compacteur à cylindre, on peut en déduire que la résistance à la compression du sol ciment n'est pas en fonction de la compacité du sol ciment. La figure suivante nous montre les résultats obtenus de la compacité et résistance à la compression.





Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment
L.N.T.P.B

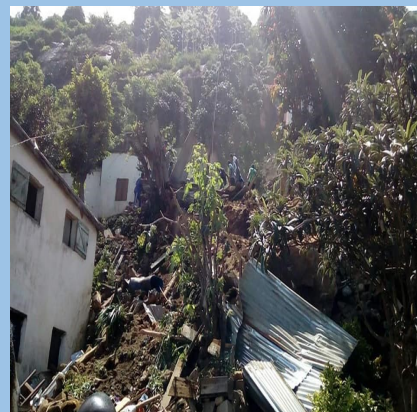
Tél. 020 78 421 88 - 020 22 432 12

E-mail: Intpb@moov.mg - Site web: Intpb-madagascar.com



Une bonne connaissance des risques, une meilleure
maîtrise du terrain pour des constructions viables et
sécuritaires

Le LNTPB vous accompagne dans vos projets



ETUDES GEOTECHNIQUES

de stabilité d'un site, des ouvrages de soutènement

ETUDES DE FONDATIONS

Pour une construction plus sûre face aux aléas extérieurs

*« La Qualité c'est cher; mais la Non-Qualité,
c'est encore plus cher »*