

ÉTUDES DES CARACTÉRISTIQUES ET CLASSIFICATION DES TERMITIÈRES POUR ÊTRE VALORISÉES ET UTILISÉES COMME STABILISANTS DES MATÉRIAUX EN TERRE CRUE

Zolimboahangy RAKOTOMALALA (1), Hery Mikaela RATSIMBAZAFY (2), Velomanantsoa Gabriely RANAIVONIARIVO (1), Rijalalaina RAKOTOSAONA (1)

(1) Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Mention Science et Ingénierie des Matériaux. BP 1500 Antananarivo 101

(2) Centre National de Recherches Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie Civil. BP 6294 Antananarivo 101

(3) Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Mention Génie des Procédés et de Chimie Industrielle. BP 1500 Antananarivo 101

Adresse email de l'auteur correspondant: zoly.rakotomalala@polytechnique.mg

Résumé

Dans la pratique agricole, la partie centrale de la termitière peut être utilisée pour fertiliser le sol. Celle-ci est aussi utilisée par la médecine traditionnelle pour traiter les maladies respiratoires et digestives, selon les enquêtes que nous avons menées. Pour notre part, nous cherchons à utiliser la muraille des nids dans la stabilisation des matériaux en terre crue. Deux espèces ont été inventoriées dans cinq régions différentes. Dans la nature, il existe deux catégories de nids : les nids effondrés qui sont abandonnés ou détruites et les nids en activité. Les murailles des nids effondrés et en activité, qui sont compactes et résistantes aux intempéries seront alors analysées au laboratoire pour déterminer leurs caractéristiques et leurs classifications. Les analyses et caractérisations des sols environnants chaque type de nid ont été aussi réalisés pour faire la différence entre leurs constituants. La morphologie des nids diffère d'une espèce à l'autre. Les résultats obtenus au laboratoire montrent aussi que les caractéristiques chimiques, physiques et géotechniques des nids de différentes espèces présentent une multitude de valeurs. Les caractéristiques qu'ils ont en communs, sont la granularité fine, la faible teneur en Fe_2O_3 , la porosité élevée, la densité faible.

Mots clés : termitière, nid effondré, nid en activité, caractérisation, caractéristiques, terre crue, matériaux.

Abstract

In agricultural practice, the central part of the termite mound can be used to fertilize the soil. This is used by traditional medicine to treat respiratory and digestive diseases, according to surveys we have carried out. For our part, we seek to use the wall of the nests in the stabilization of raw earth materials. Two species have been inventoried in five different regions. In nature, there are two categories of nests: collapsed nests which are abandoned or destroyed and active nests. The collapsed and active nest walls, which are compact and resistant to bad weather, will then be analyzed in the laboratory to determine their characteristics and their classifications. Analyses and characterizations of the soils surrounding each type of nest were also carried out for the difference between the constituents between them. The morphology of the nests differs from one species to another. The results obtained in the laboratory also show that the chemical, physical and geotechnical characteristics of the nests of different species have a multitude of values. The common characteristics that they have are fine granularity, low Fe_2O_3 content, high porosity, light density.

Key words: termite mound, collapsed nest, active nest, characterization, characteristics, adobe, materials.

1- INTRODUCTION

Bien que la répartition géographique des termites ait intéressée les scientifiques dès le début de XIX^{ème} siècle, les premières caractérisations pédologiques des termitières ne sont apparues qu'à partir du siècle dernier. Elles ont pourtant été mentionnées dans plusieurs commentaires émis par certains scientifiques chercheurs ou par des explorateurs curieux. Il existe plus d'une vingtaine de revues bibliographiques décrivant le rôle des termites dans le fonctionnement des sols et des écosystèmes tropicaux. La majorité de ces synthèses présentent les principales caractéristiques de l'activité des termites sur l'ensemble de la zone où sont implantées les termitières, mais les rôles des termitières dans la zone n'ont jamais été évoqués concrètement. Diverses utilisations agricoles traditionnelles des termitières ont été mentionnées dans une trentaine de travaux scientifiques concernant plus d'une quinzaine de pays. Autant que par leur taille importante, leur densité qui peut atteindre jusqu'à 100 à 250 nids/ha, les termitières nous étonnent, non seulement par la complexité de leur architecture interne, mais aussi par les caractéristiques d'imperméabilités, les compacités rigides des murailles externes des nids. Nous pouvons estimer qu'en raison de leur forte teneur en argile, et leur architecture massive, les termitières édifiées par les termites limitent localement l'infiltration. Cette infiltration est particulièrement limitée à l'aplomb des nids. Même lors d'évènements pluvieux importants, l'humidité de la muraille du nid est peu affectée, qu'il soit en activité ou effondré. Les termites utilisent les matériaux locaux pour construire leurs nids. Ils digèrent certains minéraux qui vont subir des modifications chimiques et minéralogiques dans leurs tubes digestives. Les matières fécales et les salives servent de stabilisants et

liants pour construire les murailles et des murs de cloisonnement à l'intérieur des nids. Si la nature du sol environnant semble être un facteur important dans la détermination de la distribution spatiale des termitières, plusieurs études montrent que les relations existantes entre la densité des nids et caractéristiques pédologiques du milieu environnant ne sont pas toujours évidentes. Ceci va positionner notre analyse à l'échelle globale : les études sur les caractéristiques des termitières dans le domaine de la construction en terre. Ces réflexions sur lesquelles notre étude débouche, procèdent ainsi un point de vue bien particulier sur la valorisation de ces matériaux dans la stabilisation des matériaux en terre crue.

2- SITE D'ÉTUDE

Les termitières utilisées dans cette étude ont été prélevées dans cinq régions (Figure 1) qui se culminent aussi bien sur les basses que les hautes altitudes. Nous avons pris des échantillons de chaque type de nid, nid effondré et nid en activité. Les échantillons des sols environnants de chaque nid sont prélevés dans les rayons de 50 cm. Les coordonnées géographiques DMS des sites de prélèvement sont données dans le tableau 1.

Tableau 1 : Coordonnées géographiques GPS – GPS Geographic coordinates

N°	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5
Site	Analamanga	Vakinankaratra	Malaimbandy	Itasy	Bongolava
Latitude	-18.946736	-20.013533	-20.3477651	-18.948654	-18.553343
Longitude	47.435599	47.050456	45.587832	47.271209	46.172577
Altitude (m)	1262	1545	148	1223	816

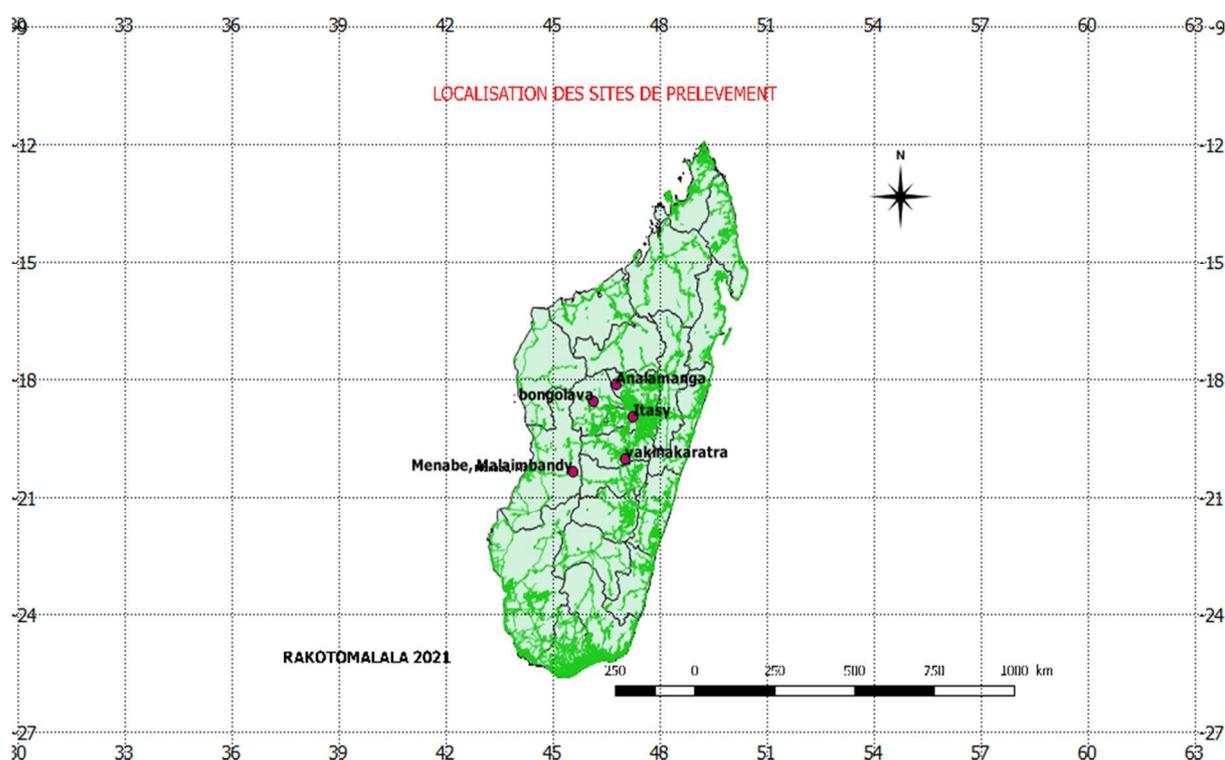


Figure 1 : Localisation des sites de prélèvement (Traitement QGIS par les auteurs)

3- MATÉRIELS ET MÉTHODES

3.1 Matériels

3.1.1 Echantillons de termitières et des sols environnants

Nous avons effectué différents échantillonnages (Figures 2 et 3) sur les nids en activités, les nids abandonnés ou effondrés et aussi les sols environnants sur un rayon de 50cm des nids.



Figure 2: Prélèvement des échantillons



Figure 3: Echantillons dans des sacs d'échantillonnage

3.1.2 Manipulation des outils SIG (Système d'information géographique)

QGIS ou QuantumGIS, c'est un logiciel qui fournit des bibliothèques qui peuvent être employées pour manipuler, gérer et stocker des données géographiques et spatiales et prendre des décisions sur des travaux de recherche. QGIS peut être adapté à multiplateforme (Linux, Windows, Mac DOS), gratuit et libre (open-source) publié sous la licence publique générale (GPL). Au démarrage, QGIS s'ouvre sur une interface comme l'indique la figure 4 suivante:

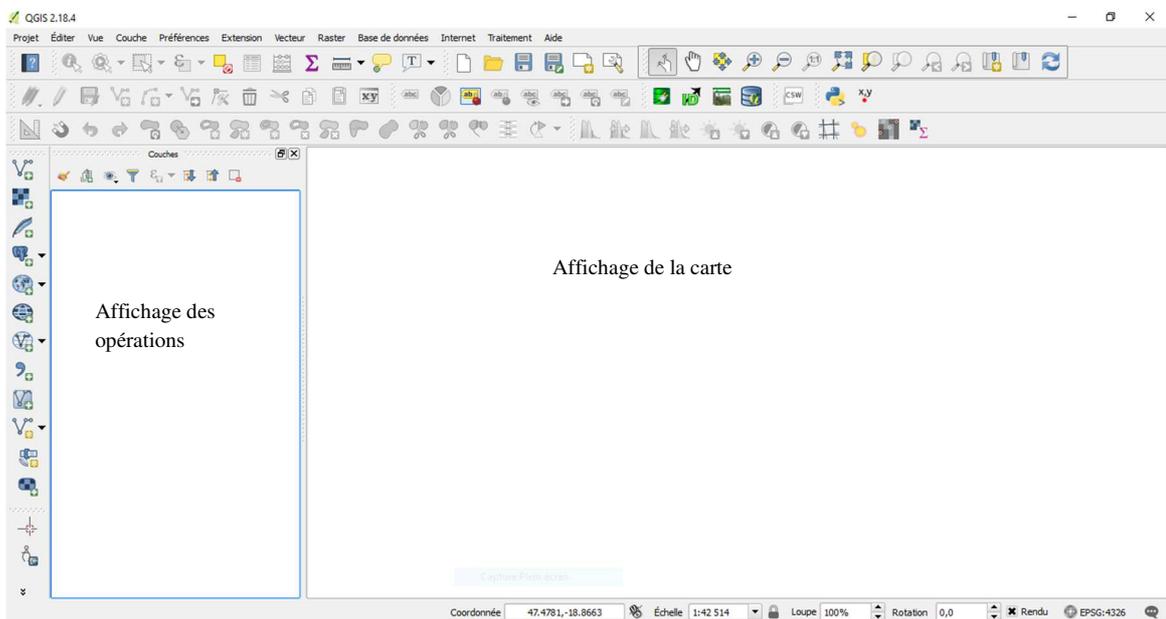


Figure 4: Interface du logiciel QGIS (Auteur)

3.2 Méthodes

3.2.1 Méthodes de caractérisation

L'analyse des sols constitue une étape majeure de la caractérisation des échantillons prélevés in-situ. Nous avons effectué des essais normalisés pour connaître toutes les caractéristiques physiques et chimiques, les paramètres de nature, les paramètres hydriques et la résistance à la compression simple des échantillons.

Pour la détermination de ces paramètres, nous avons suivi les protocoles opératoires données par les normes suivantes (Tableau 2) :

Tableau 2: liste des essais normalisés – list of standardized test

Essais et analyses		Normes
Paramètres physiques	Détermination des masses volumiques des sols fins	NF ISO 17892-2 : 2014
	Détermination de la porosité	NF P 94 410 : 3
Paramètres hydriques	Détermination de la teneur en eau pondérale	NF ISO 17892-1 : 2014
	Essai Proctor	NF P 94 093
	Limites d'Atterberg	NF ISO 17892-12 : 2018

Paramètres de nature	Analyses granulométriques	NF EN ISO 17892-4
	Module de finesse	NF P 18-540
	Valeur au bleu	NF P 94 068
Résistance	Essai de compression simple	NF ISO 17892-11 : 2014
Caractéristiques chimiques	Méthode courante de dosage	Méthode de dosage de Voinovitch A., 1971)
Analyse minéralogique	Diffractogramme au Rayon X	

3.2.2- Classification des sols

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.

- Classification selon la plasticité

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité (Figure 6). Selon la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit quatre grandes catégories principales : - les limons très plastiques - les limons peu plastiques - les argiles très plastiques - les argiles peu plastiques

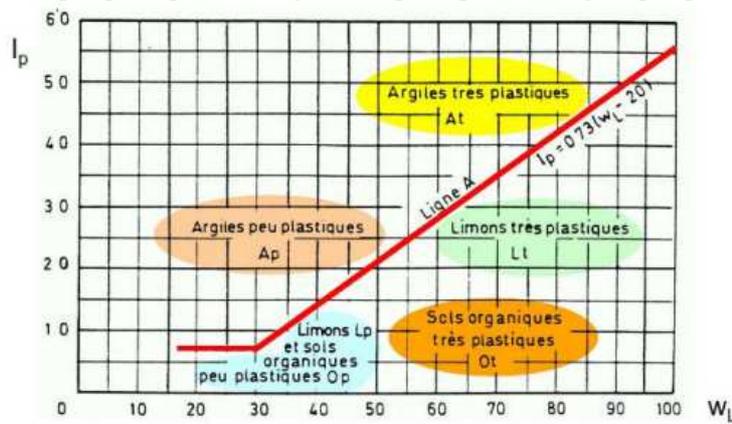


Figure 5: Classification des sols fins : Diagramme de plasticité (Casagrande, 1981)

- La classification GTR (Norme NF P 11 300 et GTR2000), permet de distinguer 3 familles suivant la distribution granulométrique et les paramètres d'état du sol :

- Les sols de classe : A, B, C et D (Classe A : sols fins Classe B : sols sableux et graveleux avec fines Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments Classe D : sols insensibles à l'eau) ;
- Les matériaux rocheux de classe : R ;
- Les sols organiques et sous-produits industriels de classe : F.

- La classification selon l'argilosité, qui exploite les valeurs obtenues lors des essais au bleu.

- La classification texturale qui utilise l'abaque triangle de texture des sols (Figure 6).

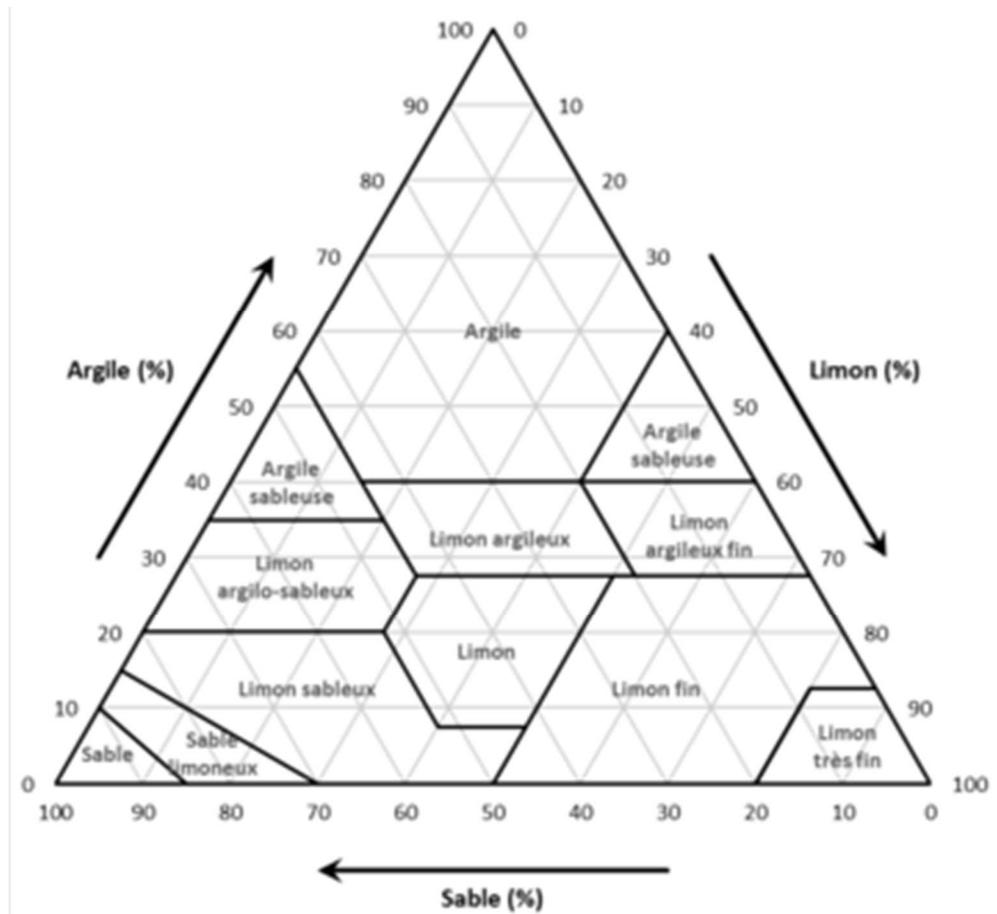


Figure 6: Triangle de texture des sols (CRaterre, 1995)

4- RÉSULTATS

4.1- Les occupants des termitières

Les termites, parfois surnommés fourmis blanches, sont des insectes. Plus précisément, ce sont des représentants de l'ordre des blattoptères (Blattodea), bien que l'on ait longtemps considéré qu'ils constituaient les seuls représentants de l'ordre des isoptères (Isoptera) qui compte environ 281 genres et 2 600 espèces. Ils existent au moins depuis le Jurassique (Cachan, 1949).

Dans notre étude, deux espèces dominantes de termites de la même famille ont été identifiées dans cinq régions où on avait effectué des échantillonnages. Ces espèces dominantes sont très répandues dans les régions et construisent leurs nids sur des vastes étendues. La classification taxonomique (Petit Michel, 1994) de ces espèces est la suivante :

- Règne Animal,
- Embranchement des Invertébrés,
- Sous embranchement des Hexapodes,
- Classe des Insectes,
- Sous classe des Ptérygotes,
- Ordre des Isoptères,
- Famille des Termitidae,
- Genre et espèce : *Microtermes kauderni* et *Coarcotermes clepsydra* (Figure 7).



Figure 7: espèce *Coarctotermes clepsydra*

4.2- Caractéristiques externes des nids

Les termitières des deux espèces sont en forme de cône avec un sommet pointu et arrondi. Les termitières dont les dimensions les plus grandes identifiées se trouvent dans la région Vakinankaratra, 230 cm de base et 153 cm de hauteur (Figures 8 à 10). La couleur varie de rouge brique à ocre roux et ocre jaune. La couleur des sols des termitières (Tableau 3) est déterminée par la couleur des sols environnants.

Tableau 3: Caractéristiques externes des termitières – external characteristics of termite mounds

Termitière	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5
Espèce	Microtermes kauderni	Coarctotermes clepsydra			
Dimensions moyennes = base*hauteur (cm)	110*128	230*153	92*120	90*110	73*100
Couleur	Rouge brique	Ocre jaune	Ocre roux	Ocre roux	Ocre roux
Forme	Conique - sommet arrondi	Conique - sommet arrondi	Conique - sommet pointu	Conique - sommet pointu	Conique - sommet arrondi



Figure 8: Nid des *Coarctotermes clepsydra*



Figure 9: Nid des *Microtermes kauderni*

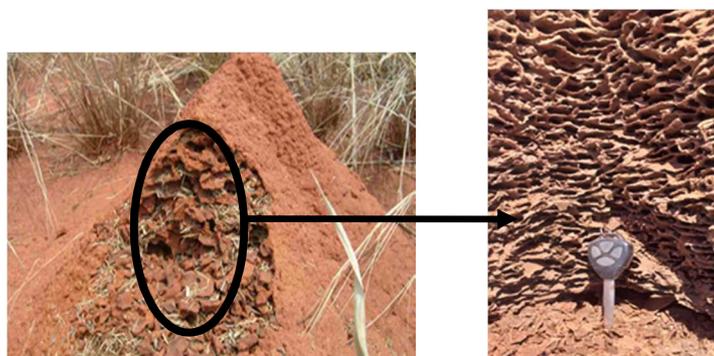


Figure 10 (a) et (b) : Coupe d'une termitière



A: trabécules ; B: plancher ; C : habitacle ; F: chambre à meules à champignons
 G : galerie souterraine ; PA: piliers argileux ; R : loge royale; S: chambre à sciure.
 Figure 11 : Schéma de la coupe d'une Termitière (Lee K et Wood T.J, 1971)

4.3- Caractéristiques chimiques des termitières

Nous notons par TA les nids termitières en activité ; et TE, les nids des termitières effondrées.

4.3.1- Les murailles

Le tableau 4 représente les résultats des analyses chimiques.

Tableau 4: Résultats des analyses chimiques des murailles des nids en activité et nids effondrés - Results of chemical analyzes of the walls of active and collapsed nests

	T.1		T.2		T.3		T.4		T.5	
	TE1	TA1	TE2	TA2	TE3	TA3	TE4	TA4	TE5	TA5
pH	7,9	7,1	7,3	7,1	7,8	7,1	7,9	7,2	7,6	7,1
SiO ₂	34,98	36,21	30,98	26,21	34,44	35,33	41,28	32,51	30,77	32,87
Fe ₂ O ₃	8,32	8,35	9,32	9,35	12,67	12,12	5,02	9,37	16,68	15,23
Al ₂ O ₃	30,52	29,75	28,52	23,72	24,45	26,37	19,89	25,9	23,35	24,08
CaO	13,4	13,63	13,7	14,43	13,43	14,63	13,85	14,48	12,81	13,9
MgO	1,68	1,87	1,68	2,4	2,52	2,75	2,68	3,91	2,34	2,41
K ₂ O	0,82	1,01	0,82	1,01	1,87	2,1	2,37	3,37	1,06	1,12
Na ₂ O	1,5	1,58	0,5	2,08	1,23	1,46	1,85	2,08	1,63	1,76
SO ₃	0,92	1	0,62	1,2	1,36	1,59	1,38	1,61	0,84	1,02
TiO ₂	0,54	0,62	0,54	0,62	1,23	1,46	0,87	1,1	0,72	0,84
PF	7,32	5,98	16,32	17,98	6,8	2,19	10,81	5,67	9,8	6,77
N (%)	0,98	1,02	0,98	1,02	0,25	0,66	0,22	0,67	1,54	2,37
C (%)	4,23	1,56	4,23	1,56	3,91	0,53	3,92	0,35	4,79	2,49

4.3.2 Centres des nids

Les centres des nids constituent les pièces d'assimilations nutritives des termites, appelées chambre à meules des champignons et réservoirs d'eau. Le tableau 4 représente les résultats de la composition chimique.

Tableau 5: Composition chimique du centre des termitières en activité - Chemical composition of the active termite mounds.

	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5
PF %	23,64	30,64	22,05	22,50	19,65
SiO ₂ %	25,59	25,59	25,51	27,34	29,41
Fe ₂ O ₃ %	9,67	7,67	8,90	6,54	7,45
Al ₂ O ₃ %	30,66	24,66	32,60	30,56	34,85

CaO%	2,34	2,34	3,16	3,77	2,56
MgO%	1,87	2,87	1,24	2,89	1,59
K ₂ O%	1,15	1,15	1,38	2,87	1,46
Na ₂ O%	2,04	2,04	2,16	1,03	1,52
SO ₃ %	2,01	2,01	1,82	1,85	1,06
TiO ₂ %	1,03	1,03	1,18	0,65	0,45

Nous donnons dans le tableau 6 suivant la composition chimique des sols environnants pour apercevoir les différences entre les caractéristiques intrinsèques des nids et celles des sols environnants.

Tableau 6: Composition chimique des sols environnants - Chemical composition of surrounding soils

	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5
PF %	12,5	19,55	10,3	17,3	15,4
SiO ₂ %	18,2	32,17	36,5	28,3	35,52
Fe ₂ O ₃ %	38,9	17,87	20,8	17,2	19,67
Al ₂ O ₃ %	26,6	26,61	28,6	31,8	24,55
CaO%	1,26	1,26	1,26	0,78	1,08
MgO%	0,61	0,61	0,61	1,28	0,63
K ₂ O%	0,38	0,38	0,38	1,41	0,45
Na ₂ O%	0,86	0,86	0,86	0,81	1,06
SO ₃ %	0,37	0,37	0,37	0,46	1,19
TiO ₂ %	0,32	0,32	0,32	0,52	0,45

4.4 Caractéristiques minéralogiques des termitières en activité (TA)

Nous avons réalisé uniquement la diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon du sol environnant et de l'échantillon TA pour déterminer les natures des minéraux argileux qui constituent le sol environnant et les murailles des termitières. Les diffractogrammes X correspondants sont montrés par la figure 11 suivante :

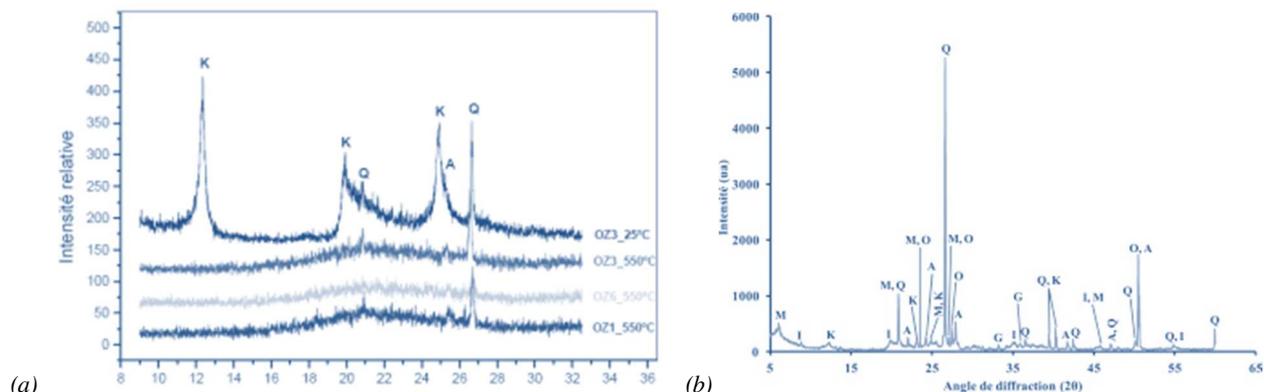


Figure 11 : Diffractogrammes X du sol environnant (a) et du nid de termitière en activité (b)
 K : kaolinite, Q : quartz, I : illite, G : goethite, A : Anatase/Albite, M : montmorillonite, A : Albite, et O : orthose.

4.5 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques (masses volumiques, teneur en eau, porosité) des échantillons de termitières et celles des sols environnants sont données dans les tableaux 7, 8 et 9. Nous avons utilisés des éprouvettes cylindriques de volume 196,34 cm³ pour la détermination des masses volumiques.

Tableau 7 : Valeurs des masses volumiques – Density values

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
MVA (g/cm ³)	1,61	0,82	0,64	1,61	0,82	0,64	1,67	1,02	0,66	1,51	1,01	0,67	1,43	0,86	0,66
MVS (g/cm ³)	2,51	1,2	0,84	2,51	1,2	0,84	2,62	1,23	0,92	2,53	1,28	0,86	2,44	1,12	0,87

Tableau 8 : Valeurs des teneurs en eau – water content values

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
ω % saison sèche	9,6	6,1	5,8	6,1	5,8	5,4	10	6,9	6,4	9,3	4,8	4,2	9,8	4,5	4,3
ω (%) saison humide	17	7,1	6,3	15,6 1	8,3	6,6	19	7,6	8,4	19	7,6	5,6	18	9,4	6,5

Tableau 9 : Valeurs des porosités n – Values of porosities n

n	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
	0,32	0,43	0,35	0,23	0,38	0,49	0,32	0,39	0,36	0,29	0,41	0,37	0,30	0,43	0,36

4.6 Propriétés géotechniques

4.6.1 Résultats des analyses granulométriques

L'analyse granulométrique par tamisage sur les fractions solides supérieures à 80 μm est complétée par la sédimentométrie (Tableau 10) avec les fines inférieures à 80 μm .

Tableau 10: Résultats des analyses granulométriques des échantillons TA et TE
- Results of the particle size analyzes of the TA and TE samples -

d(mm)	Module AFNOR	1		2		3		4		5	
		TE1	TA1	TE2	TA2	TE3	TA3	TE4	TA4	TE5	TA5
10	41	100	100						100		100
6,3	39	100	100						100		99
5	38	100	99	100				100	97		98
2	34	99	97	100	100			99	94		96
1,25	32	97	95	99	100		100	94	86	100	90
1	31	96	92	93	98	100	99	91	81	98	86
0,63	29	93	83	83	93	99	93	86	74	94	78
0,315	26	85	70	72	85	96	81	78	64	89	69
0,125	22	75	55	56	72	92	65	68	48	78	60
0,08	20	71	48	49	64	87	59	63	41	69	54
0,05	18	65	41	43	58	78	52	56	35	58	48
0,02	15	28	35	39	52	34	42,5	35	30	26	40
0,01	11	19	28	36	48	22	35	29	22	12	31
0,002	8	13	26	31	40	15	29	23	17	6	28

Tableau 11: Résultats de la sédimentométrie – sedimentometry results

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
A < 2 μm (%)	39,6	19	19,6	28	31,2	43,6	38,3	13	18,3	31,4	16	15,4	36,2	23	26,2
L: 2-50 μm (%)	17	28	17	23	11,5	15	28,1	24	28,1	42,2	28	28,2	10,5	26	20,5
S > 50 μm (%)	43,4	53	63,4	49	57,3	57,3	33,5	63	53,6	26,4	56	56,4	53,3	51	53,3

A : Argile / L : Limon / S : Sable

Les figures 12 et 13 représentent les courbes granulométriques.

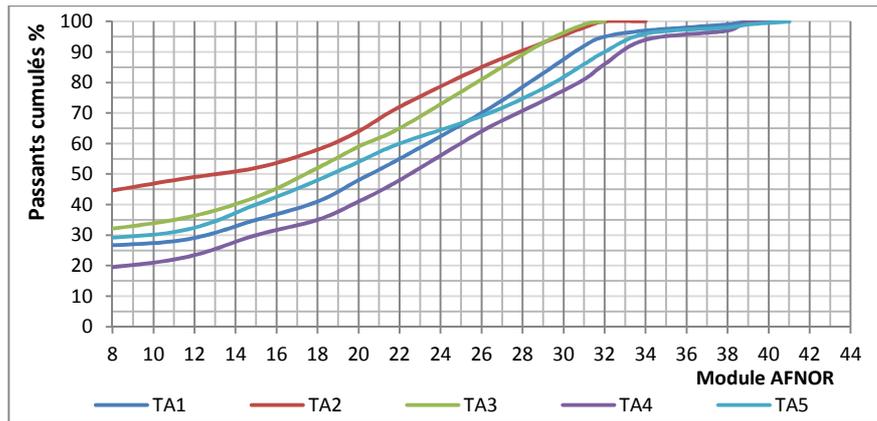


Figure 12: Courbes granulométriques des échantillons des nids en activité

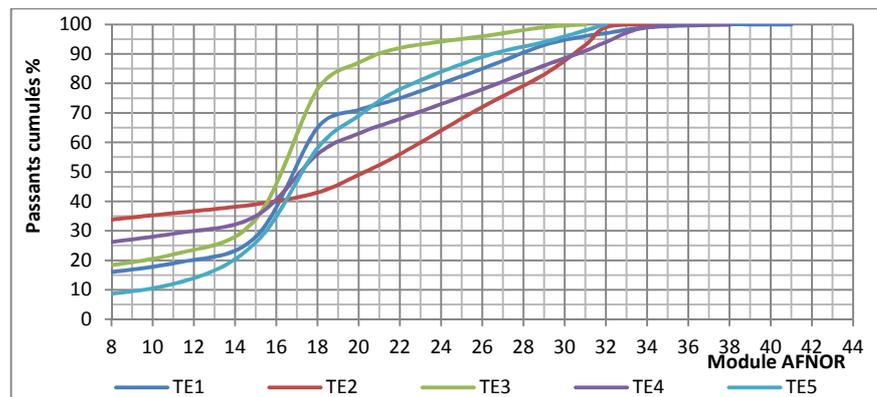


Figure 13: Courbes granulométriques des échantillons des nids effondrés

4.6.2 Plasticité et argilosité des échantillons

Les limites d'Atterberg et la valeur au bleu du sol permettent de définir l'état de plasticité et la consistance d'un sol argileux. L'étude de l'argilosité est basée soit sur la valeur de l'indice de plasticité (I_p) du sol, soit sur la valeur au bleu sec (VBS). Le GTR propose dans de nombreux cas de se référer à l'indice de plasticité, mais l'évolution des techniques d'essai conduit généralement à mesurer la valeur au bleu. Les résultats obtenus lors des essais correspondants sont donnés dans les tableaux 12 et 13.

Tableau 12 : Limites d'Atterberg – Limit Atterberg

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
$\omega_L\%$	28	48	53,2	28	48	53,2	30	42,8	52,6	28,4	51,3	29,8	21,7	23,8	47,4
$\omega_P\%$	42	71	82,2	42	71	82,2	41,5	65,8	80,4	41,9	77,3	56,6	36,3	43,6	75
$I_p\%$	14	23	29	14	23	29	11,5	23	27,8	13,5	26	26,8	14,6	19,8	27,6

Tableau 13: Résultats des essais valeur au bleu – Testy results at blue value

VBs	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
	1,8	3,2	2,9	3,8	5,2	5,6	1,8	4,62	3,86	1,8	5,93	3,87	2,87	4,66	2,87

4.6.3 Résultats des essais de compactage Proctor

Le tableau de variation de la densité sèche γ_d en fonction de la teneur en eau $\omega\%$ permet de tracer les courbes Proctor de chaque échantillon. Ces figures serviront dans la suite, à la détermination de la valeur de la densité sèche optimale Proctor γ_{dopt} ainsi que celle de la teneur en eau optimale Proctor $\omega_{opt}\%$. Les optimums Proctor déterminés graphiquement pour tous les échantillons sont résumés dans le tableau 14.

Tableau 14 : Les optimums Proctor –Proctor Optimum

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
ω_{opt} %	19,5	21,3	22,6	20	12,2	11,8	16,8	18,6	22,8	19,8	21,7	23,2	17,2	21,5	23,8
γ_d	2,65	1,32	1,04	2,79	1,32	1,04	2,78	1,36	1,12	2,62	1,31	0,92	2,52	1,24	0,91

4.6.4 Résultats des essais de compression sèche et humide

Les tests résistances des échantillons confectionnés dans des éprouvettes cylindriques d'élancement 1, dont les dimensions sont 4* 4cm, ont été réalisés avec une force de compression de 4400daN. Les mesures ont été réalisées à 7j et 28j d'âge.

Tableau 15 : Variation des résistances à la compression (sèche et humide)- Variation of compressive strengths (dry and wet)

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
Rcs (MPa)	0,35	0,14	0,55	0,33	0,14	0,64	0,32	0,16	0,81	0,33	0,17	0,76	0,36	0,16	0,57
Rch (Mpa)	0,12	0,03	0,18	0,13	0,02	0,18	0,1	0,03	0,15	0,09	0,02	0,11	0,13	0,04	0,21

5 DISCUSSIONS

5.1 Sur les compositions chimiques et minéralogiques

Les nids actifs et effondrés présentent des teneurs en oxydes relativement proches. Les teneurs en silice pour chaque site sont élevées de l'ordre de 35% en moyenne. Aucune différence significative n'est observée entre les teneurs en autres oxydes (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , Na_2O , MgO , K_2O , SO_3 , TiO_3). Cette remarque peut être expliquée par l'action directe des termites lors de la construction des nids. On observe la présence de chaux qui peut jouer le rôle de liant avec les sécrétions produites par les occupants. Ceci explique la forte cohésion entre les grains de solides et les murailles externes des termitières compacts au toucher.

Les nids actifs et effondrés présentent aussi des teneurs en carbone et azote relativement proches. Pour chacun des sites, on remarque une augmentation modérée en carbone dans les nids effondrés. Des teneurs plus fortes en azote sont observées dans les murailles des nids actifs par rapport aux nids effondrés. Ceci explique la baisse du rapport C/N dans les murailles des nids actifs

Le pH est légèrement plus élevé dans les murailles des nids effondrés par rapport aux nids en activité. Ce phénomène est sûrement dû à la dilution et lessivage des constituants à caractères acides par l'eau de pluie.

Les légères valeurs des pertes au feu dans les murailles s'expliquent par la faible teneur en matières organiques. Toutefois ces valeurs sont élevées dans le centre des termitières.

Les constituants minéralogiques déterminés qualitativement dans les nids en activité sont la kaolinite, Quartz, Gibbsite et Hématite. Et ceux du nid effondré sont la kaolinite, illite, quartz, montmorillonite, albite, goëthite et orthose.

D'après les figures 10 (a) et (b), on peut supposer que les termites sont capables de modifier la nature des minéraux argileux par la réaction de transit par leurs salives et produits fécaux.

La termitière en activité renferme de la montmorillonite alors que le sol environnant contient exclusivement de la Kaolinite. Plusieurs auteurs ont fait des constats similaires. Ces différences semblent avant tout, être la conséquence des apports d'argiles provenant des horizons de profondeur et dont la nature minéralogique diffère de celle des argiles des horizons de surface. Elles s'expliquent aussi selon certains auteurs, par des processus de neosynthèse survenant au sein du nid ou par la transformation des micas après leur trituration dans le cibarium des termites. Ce qui laisse supposer que les minéraux ingérés par les termites subissent d'importantes transformations physiques lors de leur transit dans le cibarium ou l'intestin des termites.

5.2 Sur les propriétés physiques

A première vue, les masses volumiques spécifiques des échantillons de termitières sont inférieures à celles des sols environnants. La termitière est légère par sa teneur en Fe_2O_3 très faible et par sa porosité importante qui occupe aux environs de 45% de son volume total.

Une très forte variabilité des teneurs en eau est observée dans les sols environnants pendant la saison humide. Les termitières en activité et effondrées sont moins affectées par l'eau de pluie pendant la saison humide. Une faible variation de la teneur en eau est observée dans les murailles des termitières. L'eau qui peut se trouver dans les nids pourra provenir des infiltrations d'eau par la fondation souterraine de la termitière et/ou par la respiration des termites. Les nids effondrés présentent des teneurs en eau équivalentes à celles des nids en activités aussi bien en saison sèche qu'en saison humide. Dans les sols environnants, les teneurs en eau doublent en saison humide.

La porosité des termitières est en moyenne 45%. Les indices des vides sont ainsi nettement supérieurs dans les termitières en activité et effondrées en comparaison du sol environnant. Ceci met en évidence la porosité plus élevée dans les agrégats prélevés par rapport à celles caractérisant les échantillons du sol environnant. Ces porosités n'affectent pas la perméabilité à l'eau des termitières. Les parois restent étanches, mais lorsque les termitières se fissurent sous l'action d'autres facteurs (coups, labour, secousse, ...), l'eau pénètre à travers les fissurations et/ou par infiltration d'eau sur la base des termitières. Ceci semble indiquer que les modifications de la rétention en eau dans le sol résultent plutôt de transformation d'ordre structural que textural.

5.3 Sur la granularité

Tous les échantillons de termitières sont constitués en pourcentage équivalent d'éléments fins (inférieurs à 80µm) et des éléments grossiers (supérieurs à 80 µm). Ce qui confirme l'homogénéité de la distribution granulométrique des échantillons. Sauf pour les échantillons T2 et T3, en provenance de Vakinankaratra et Malaimbandy

Les modules de finesse pour chaque échantillon montrent cette richesse en fine.

Le module de finesse (Tableau 16) est calculé par la relation : $Mf = 1/100 \sum Ri$. $\sum Ri$ est la somme des refus cumulés sur les tamis d'ouverture 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5mm. (NF P 18-540).

Tableau 16 : Valeurs des modules de finesse – fineness modulus values

Module de finesse Mf	T.1		T.2		T.3		T.4		T.5	
	TE1	TA1	TE2	TA2	TE3	TA3	TE4	TA4	TE5	TA5
	0,51	1,01	0,9	0,5	0,13	0,61	0,75	1,37	0,39	1,09

5.4 Sur la texture

La texture des sols (Tableau 17) est définie en utilisant l'abaque triangle de texture des sols. La projection des valeurs en pourcentage des grains constituant les échantillons montre une variété de texture.

Tableau 17 : Texture des échantillons- Sample texture

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
Texture	LA	LS	LS	LAS	LAS	AS	LA	LS	LS	LA	LS	LS	AS	LAS	LAS

5.5 Sur la plasticité et l'argilosité

Compte tenu de l'Indice de plasticité de Casagrande (Tableau 18), des échantillons sont classés parmi les matériaux faiblement argileux, d'autres sont moyennement argileux et certains sont argileux à très argileux. La richesse en fine dans les échantillons justifie ces disparités.

Tableau 18 : Plasticité des échantillons – Plasticity of samples

	T.1			T.2			T.3			T.4			T.5		
	SE1	TE1	TA1	SE2	TE2	TA2	SE3	TE3	TA3	SE4	TE4	TA4	SE5	TE5	TA5
Plasticité	Lp	Am	At	Lp	Am	At	Lp	Am	At	Lp	At	Ap	Lp	Lp	Am

Les échantillons qui renferment des pourcentages élevés en fines ont des I_p élevés. Ceci met en cohérence avec l'argilosité des échantillons qui sera définie par les essais des valeurs au bleu. Les échantillons avec une teneur en fine de nature argileuse élevée absorbe beaucoup de bleu de méthylène, d'où la valeur élevée en VB_s . Les calculs de l'activité A_c de chaque échantillon par la formule $A_c = VB_s / C_2$ donne des valeurs qui indiquent que les minéraux argileux qui peuvent se trouver dans les échantillons sont inactives. Toutes les valeurs de A_c calculées pour tous les échantillons sont inférieures à 3.

Indice de plasticité I_p : (Casagrande, 1981)

$I_p \leq 12$: sols faiblement argileux,

$12 \leq I_p \leq 25$: sols moyennement argileux,

$25 \leq I_p \leq 40$: sols argileux et très argileux.

Valeur au bleu VBS (NF P94-068)

$VBS \leq 0,1$: sol est insensible à l'eau

$0,1 < VBS \leq 0,2$: apparition de la sensibilité à l'eau.

$0,2 \leq VBS \leq 1,5$: seuil distinguant les sols sablo-limoneux.

$1,5 \leq VBS \leq 2,5$: sols limoneux de plasticité moyenne.

$2,5 \leq VBS \leq 6$: sols argileux.

$8 \leq VBS$: sols très argileux.

Activité argileuse (NF P94-068)

$0 \leq A_c < 3$: inactive

$3 \leq A_c < 5$: peu active

$5 \leq A_c < 13$: moyenne

$13 \leq A_c < 18$: active

$A_c > 18$ très active

5.6 Classification GTR (GTR, 2000; NF P 11 300)

Tous les échantillons analysés sont de classe A, c'est-à-dire classe des sols fins dont le diamètre maximal D_{max} est inférieur à 50 mm) et le tamisat à 80 μ m est supérieur à 35%.

Compte tenu des valeurs des I_p et VBS :

- tous les échantillons des termitières en activité TA appartiennent dans la sous classe fonction de nature A_3
- les échantillons des termitières effondrées TE à la sous classe A_2
- et les échantillons des sols environnants à la sous classe A_1 .

6 CONCLUSION

Le cadre de cette étude a été limité sur les caractérisations et classifications des termitières qui pourront être utilisées dans la stabilisation des matériaux en terre crue. Compte tenu des espèces de termites, les termitières se différencient non seulement par leur morphologie externe mais aussi par leurs caractéristiques intrinsèques. Les termitières en activité renferment un pourcentage plus élevé en fine que les termitières effondrées. La termitière est fabriquée par l'assemblage des matériaux solides grossiers, des éléments fins et des débris végétaux à fibres. Les termites utilisent leurs salives et produits fécaux qui jouent le rôle de liant dans la matrice. On peut dire que les termites sont capables d'effectuer une stabilisation des sols par un traitement biotechnologique par de la salive et un renforcement des sols par ajout de fibres végétales, ce qui permet d'obtenir un matériau à forte compacité surtout au niveau du dôme épigé des nids. La termitière en activité renferme de la montmorillonite alors que le sol environnant contient exclusivement de la Kaolinite. Plusieurs auteurs ont fait des constats similaires. Ces différences semblent avant tout, être la conséquence des apports d'argiles provenant des horizons de profondeur et dont la nature minéralogique diffère de celle des argiles des horizons de surface. Elles s'expliquent aussi, selon certains auteurs, par des processus de neosynthèse survenant au sein du nid ou par la transformation des micas après leur trituration dans le cibarium des termites. Ce qui laisse supposer que les minéraux ingérés par les termites subissent d'importantes transformations lors de leur transit dans le cibarium ou leur intestin.

BIBLIOGRAPHIE

- Cachan P., 1949: Les Termites de Madagascar. Mem. Insf. Scient. Madagascar: A, III, p. 157-275.
- Caillère S, Henin S., 1959, La classification des argiles. XX^{ème} congrès Géol. Internat., Mexico, pp. 1-8,.
- Casagrande, 1981 ; Centre de recherches routières. Classification des sols sur base de l'indice de plasticité, p.58
- Garnier-Sillam E., 1987: Biologie et rôle des termites dans les processus d'humification des sols tropicaux du Congo. Thèse d'état, Univ. Paris XII, 276p.
- Grassé P., 1984: Termitologia: nid, construction, reproduction. Masson edition, Fondation Singer-Polignac, Paris, 613p.
- Lee K. et Wood T.J., 1971: Termites and Soils. Academic Press. New York.
- Noirot Ch et Noirot-Timothee, 1962. Construction et reconstruction du nid chez *Cubitermes fungifaber* Sjöst. Symp. Genet Biol. Ital, 11. 180-188
- OMNIS, 2017: "Les méthodes d'analyses majeurs au laboratoire de l'OMNIS"
- Norme NF P 11 300 et GTR, 2000: Classification des sols
- Randrianofidina M. A, 2012: Les exopolysaccharides des bactéries associées au tube digestif des termites et leurs implications dans le phénomène d'agrégation du sol. Mémoire de DEA en sciences de la vie - option : biotechnologie- microbiologie, Faculté des Sciences - Université Antananarivo.
- Robinson J.B.D, 1958: Some chemical characteristics of « Termite soils » in Kenya coffee fields. J. Soil Sci ;, 9, 1. 58-65
- Ruelle J.E, 1964: L'architecture du nid de *Macrotermes natalensis* et son sens fonctionnel. In : « Etudes sur les termites africains ». (Coll. inter. UNESCO. Univ. Lovanium, Leopoldville, 11-16 mai 1964). Masson et Cie éd (Paris), 379-398.

- Stoops G, 1964: Application of some pedological methods to the analysis of termite mounds. In : « Etudes sur les termites africains ». (Coll. inter. UNESCO. Univ. Lovanium, Leopoldville, 11-19 mai 1964). Masson et Cie éd (Paris), 327-363
- Vincent E, 1996: Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux ORSTOM, UR 605, Station de Science du Sol, INRA, 78000 Versailles
- Voinovitch A., 1971: L'analyse minéralogique des sols argileux, Service des sols Eyrolles, pp 11-100
- Yakushev (V.M), 1968: Influence of termite activity on the development of laterite soil. Soviet Soil Sci ;, 1, 109-111.

WEBOGRAPHIE

- CRATerre (Centre de Recherche et d'Application de la Terre, 1995: Traité de la construction en terre, Grenoble, France, pp15-100. <http://craterre.org/>
- ISO 17892-7, 2017: Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 7: Essai de compression uniaxiale <https://www.iso.org/fr/standard/70789.html>
- NF EN ISO 17892-1, Décembre 2017: Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1 : détermination de la teneur en eau <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- NF EN ISO 17892-12, Juillet 2018: Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité - Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : Détermination des limites de liquidité et de plasticité <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- NF EN ISO 17892-2, Décembre 2014: Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 2 : détermination de la masse volumique d'un sol fin <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- NF EN ISO 17892-4, Janvier 2018: Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrique des particules <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- NF P 18-540: Essais de laboratoire sur les granulats – Partie 3 : module de finesse <https://documents.fr/document/nf-p-18-540-granulatspdf.html>
- NF P94-068, Octobre 1998: Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache. <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- NF P94-093, Octobre 2014: Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- NF P94-410-3 Mai 2018: Roches - Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches - Partie 3 : détermination de la porosité <https://www.boutique.afnor.org/norme>
- Petit Michel, 1994: Termites et termitières dans le sud-ouest malgache (Termites and termitaries in the south-west of Malagasy Island, some geographical aspects). In: Bulletin de l'Association de géographes français, 71e année, 1994-4. doi : <https://doi.org/10.3406/bagf.1994.1774> ; https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1994_num_71_4_1774