

RELATION ENTRE LA TENEUR EN OXYDE DE FER ET LES PARAMETRES D'ETAT DANS LES SOLS LATÉRITIQUES NICKELIFERES D'AMBATOVY A MADAGASCAR

RELATIONSHIP BETWEEN THE IRON OXIDE CONTENT AND THE STATE PARAMETER OF AMBATOVY NICKEL LATERITIC SOIL IN MADAGASCAR

Fidiniavo Ravokatra et Lala Andrianaivo

Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Laboratoire de Géotechnologie, BP 1500 Antananarivo 101, Madagascar, e-mail : fidiniavo@yahoo.fr

Résumé

La méthode statistique descriptive Analyse en Composantes Principales permet d'explorer la relation entre la teneur en oxyde de fer et les paramètres d'état des sols latéritiques nickelifères d'Ambatovy à Madagascar.

Ces sols sont issus de l'altération des roches ultrabasiques type dunite. Les oxydes de fer sous différentes formes constituent le principal élément des oxydes majeurs de ses produits d'altération. Ils entrent dans la composition de ces sols et jouent un rôle prépondérant dans l'état hydrique et à l'importance des vides de ces sols.

Mots clés : sols latéritiques nickelifères, oxydes de fer, Analyse en Composantes Principales

Abstract

The principal component analysis allows us to explore the relationship between the iron oxide content and state parameter of Ambatovy nickel lateritic soil in Madagascar.

These soils are formed by the weathering of the ultrabasic rock dunite type. The iron oxide is the principle of major oxide of his weathering product. It enters to the composition of these soils and operates in their hydric state and void importance.

1. INTRODUCTION

La mise en dépôt des stériles miniers constitués des sols latéritiques issus de l'exploitation des mines de nickel à Ambatovy dans la région centrale de Madagascar est assujettie au problème de stabilité de talus.

Une caractérisation interdisciplinaire de ces sols permettrait de déterminer des propriétés plus précises, plus pertinentes et plus représentatives (Mahamadou, 2016).

L'observation à l'échelle microscopique de ces sols pourrait permettre de décrire l'état par rapport à la présence de l'eau et l'importance des vides des sols.

Ces sols sont issus de l'altération des roches ultrabasiques type dunite dont l'oxyde de fer est l'élément des oxydes majeurs dominant.

Cet article propose d'analyser la relation entre la teneur en oxyde de fer et la teneur en eau naturelle, le degré de saturation, l'indice de vide initial et la densité sèche apparente in situ.

Les résultats des analyses chimiques des échantillons géologiques (Mandimbiharison, 2012) et des essais mécaniques de l'investigation géotechnique (Boissé, 2015) sont les données traitées et exploitées dans cette étude.

L'Analyse en Composantes Principales est la méthode statistique descriptive choisie pour traiter ce tableau car elle est bien adaptée au grand nombre des données structurées sous forme de tableau avec des observations en ligne et des variables quantitatives en colonne. Elle se porte sur l'ensemble des corrélations de variables et la ressemblance des observations.

2. MATERIELS ET METHODES

Les analyses chimiques sont réalisées par la méthode spectrométrie de masse à plasma induit ICP “ *Inductively Coupled Plasma* ” et celle à Spectrométrie Emission Optique OES “ *Optical Emission Spectroscopy* ” du Projet Ambatovy (Mandimbiharison, 2012).

Tous les essais géotechniques sont réalisés selon les normes françaises et la classification des sols est selon le Guide des Terrassements Routiers et la réalisation des remblais et des couches de forme NF P 11 300 (SETRA et LCPC, 2000).

Les échantillons géologiques soumis aux analyses chimiques et aux essais mécaniques au laboratoire ne sont pas prélevés au même endroit. Un profil d’altération présentant les horizons des sols à stocker est reconstitué par la mise en relation de ces données chimiques et mécaniques que nous appelons dans la suite base des données. La clé primaire de cette base relève les coordonnées (X, Y) et la profondeur Z des points de prélèvement des échantillons. Ces données sont structurées sous forme de tableau avec 14 observations en ligne et 24 variables en colonnes ; elles sont ensuite analysées par la méthode statistique descriptive Analyse en Composante Principale. L’outil utilisé est le logiciel XLSTAT version 2017.

La première colonne des tableaux est la dénomination des échantillons de sol dont la signification en lettre indique l’horizon d’altération où on l’a prélevé et le chiffre est sa profondeur de prélèvement à savoir CF indique l’horizon d’altération cuirasse ferrugineuse, LR celui de la latérite rouge, et LJ décrit l’horizon d’altération de latérite jaune.

La deuxième colonne des tableaux indique la classification de l’échantillon de sols selon Guide des Terrassements Routiers notamment les dénominations ci-après :

- A₂th : Sables fins argileux peu plastique en état hydrique très humide
- A₂s : Sables fins argileux peu plastique en état hydrique sec
- A₃th : Argiles en état hydrique très humide
- A₃m : Argiles en état hydrique moyen
- A₃ts : Argiles en état hydrique très sec
- A₄ : Argiles très plastique

Les autres colonnes des tableaux sont les paramètres des résultats d’analyse chimique ou des essais mécaniques au laboratoire.

3. RESULTATS

Les données initiales objet de l’Analyse en Composantes Principales sont réparties dans les tableaux 1 à 4 dont chaque tableau représente les groupes des variables des 14 observations. Les principaux résultats sont divisés en deux (2) groupes à savoir les résultats de l’analyse chimique et ceux des essais mécaniques au laboratoire.

3.1- Résultats des analyses chimiques

Les teneurs en éléments des oxydes majeurs pour cette étude sont présentées dans le Tableau 1 :

Tableau 1: Résultats des analyses chimiques des sols latéritiques nickelifères

Echantillon	GTR	Teneur en élément des oxydes (%)						
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MgO
CF 2.5	A ₂ th	64,30	10,80	0,96	1,60	1,17	1,90	0,17
L R 3.0	A ₃ m	59,50	15,10	3,75	1,40	1,14	2,25	0,17

Echantillon	GTR	Teneur en élément des oxydes (%)						
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MgO
L R 3.3	A _{2s}	68,90	6,80	1,91	1,90	0,67	1,58	0,02
L R 3.4	A _{3m}	67,60	10,60	1,90	0,57	1,14	1,18	0,41
L R 3.6	A _{2th}	72,10	5,00	2,40	1,02	2,67	0,93	0,00
L J 6.3	A _{3ts}	65,50	9,30	18,40	1,70	1,46	3,64	0,02
L J 6.4	A _{2th}	68,90	7,70	2,20	0,88	1,71	0,75	0,02
L J 7.0	A _{3ts}	71,90	4,30	2,40	1,61	2,28	0,68	0,00
L J 7.1	A _{3ts}	67,20	7,90	14,30	1,70	2,37	2,17	0,02
L J 9.8	A _{2ts}	74,20	4,80	2,40	1,19	1,52	0,63	0,19
L J 9.9	A _{3ts}	63,50	11,30	3,20	1,70	5,26	0,42	0,02
L J 13.80	A _{3th}	69,90	7,70	2,30	1,10	1,51	0,97	0,17
L J 19.80	A _{3th}	73,60	4,90	2,40	1,21	1,43	1,37	0,08
L J 22.80	A ₄	68,30	9,20	2,20	1,28	1,18	1,13	0,25

(Mandimbarison, 2012)

3.2- Résultats des essais mécaniques au laboratoire

Les résultats des essais mécaniques au laboratoire sont subdivisés en trois (3) groupes :

- Les paramètres d'état
- Les paramètres de nature
- Les paramètres de comportement

3.2.1- Paramètres d'état

Les paramètres d'état (Tableau 2) caractérisent la compacité du squelette, la quantité d'eau et d'air contenues dans le sol. Ils ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Tableau 2: Paramètres d'état des sols latéritiques nickelifères

Echantillon	GTR	Paramètres d'état					
		γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	w (%)	Sr (%)	e ₀
CF 2.5	A _{2th}	20,8	15,3	34,5	35,8	98,4	1,255
L R 3.0	A _{3m}	21,8	17,2	33,1	27	96,3	0,923
L R 3.3	A _{2s}	15,3	11,9	32	28,1	53,2	1,69
L R 3.4	A _{3m}	15,2	11,6	31,1	30,9	56,9	1,633
L R 3.6	A _{2th}	20,4	15	35,4	36,3	94,5	1,36
L J 6.3	A _{3ts}	14,3	11,4	31,7	25,4	45,2	1,781
L J 6.4	A _{2th}	14,2	10,4	31,2	36,5	56,9	2,001
L J 7.0	A _{3ts}	18	12,8	29	41,2	94,5	1,264
L J 7.1	A _{3ts}	20,9	16	34,2	30,6	91,1	1,240

L J 9.8	A _{2ts}	19,3	13	38,1	48,9	96,4	1,931
L J 9.9	A _{3ts}	20,6	16,3	30,4	26,4	92,6	0,867
L J 13.80	A _{3th}	17,7	11,7	35,4	51	89,2	2,026
L J 19.80	A _{3th}	13,1	8,7	29,3	50,5	62,5	2,357
L J 22.80	A ₄	16,5	9,6	31,8	72,5	99,7	2,312

(Boissé, 2015)

Avec

- γ : Densité apparente
- γ_d : Densité sèche
- γ_s : Densité spécifique
- w : Teneur en eau naturelle
- Sr : Degré de saturation en eau

3.2.2- Paramètres de nature

Les paramètres de nature (Tableau 3) sont relatifs aux propriétés intrinsèques des sols c'est-à-dire qui ne varient pas ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Tableau 3: Paramètres de nature des sols latéritiques nickelifères

Echantillon	GTR	Granulométrie (% passant à)			Limites d'Atterberg		
		2mm	0,40mm	80 μ m	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)
CF 2.5	A _{2th}	79	70	62	48,9	27,6	21,3
L R 3.0	A _{3m}	86	79	74	57,3	30	27,3
L R 3.3	A _{2s}	100	91	64	59,4	34,6	24,8
L R 3.4	A _{3m}	99	93	82	62,7	31,4	31,3
L R 3.6	A _{2th}	95	88	85	52,5	33,6	18,9
L J 6.3	A _{3ts}	100	96	71	60,7	34,9	25,8
L J 6.4	A _{2th}	97	89	69	58	33,9	24,1
L J 7.0	A _{3ts}	95	82	69	92,3	53,6	38,7
L J 7.1	A _{3ts}	89	74	60	52,4	28,6	23,8
L J 9.8	A _{2ts}	88	83	79	66	39	27
L J 9.9	A _{3ts}	97	87	80	61,2	38,5	22,7
L J 13.80	A _{3th}	88	81	80	66,7	39	27,7
L J 19.80	A _{3th}	93	78	60	64,9	31,9	33
L J 22.80	A ₄	99	96	92	108,7	66,8	41,9

(Boissé, 2015)

Avec

- w_L : Limite de liquidité
- w_P : Limite de plasticité
- IP : Indice de plasticité

3.2.3- Paramètres de comportement

Les paramètres de comportement (Tableau 4) caractérisent la compressibilité et la résistance au cisaillement des sols.

Tableau 4 : Paramètres de comportement des sols latéritiques nickelifères

Echantillon	GTR	Compressibilité			Triaxial UU	
		50 - 100 - 200 - 400 (KPa)				
		σ'_c (KPa)	Cc	Cg	C_{uu} (KPa)	ϕ_{uu} (°)
CF 2.5	A _{2th}	90	0,220	0,009	25	10
L R 3.0	A _{3m}	62	0,326	0,025	18	18
L R 3.3	A _{2s}	86	0,193	0,043	24	5
L R 3.4	A _{3m}	62	0,327	0,035	100	14
L R 3.6	A _{2th}	60	0,330	0,020	18	15
L J 6.3	A _{3ts}	60	0,167	0,009	15	13
L J 6.4	A _{2th}	80	0,179	0,009	12	1
L J 7.0	A _{3ts}	86	0,372	0,011	27	11
L J 7.1	A _{3ts}	69	0,301	0,040	12	5
L J 9.8	A _{2ts}	69	0,313	0,011	24	2
L J 9.9	A _{3ts}	62	0,163	0,018	23	0
L J 13.80	A _{3th}	80	0,365	0,020	25	8
L J 19.80	A _{3th}	86	0,512	0,007	4	1
L J 22.80	A ₄	78	0,747	0,074	12	0

(Boissé, 2015)

Avec

- σ'_c (KPa) : Pression de pré-consolidation
- Cc : Indice de compression
- Cg : Coefficient de gonflement
- C_{uu} : Cohésion apparente
- ϕ_{uu} : Angle de frottement interne apparent

3.1- Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales sont divisés en deux (2) types :

- Résultats préliminaires
- Résultats sur les variables
- Résultats sur les observations

3.1.1- Résultats préliminaires

Les résultats préliminaires relatifs à cette étude sont :

- un extrait de la Matrice de corrélation Pearson qui met en exergue la corrélation entre les teneurs en élément des oxydes majeurs, en général, et en particulier la teneur en Fe_2O_3 et les paramètres d'état (Tableau 5) ;
- les valeurs propres et le pourcentage des inerties des axes factoriels appelé aussi variabilité (Tableau 6) qui nous conduisent au choix des axes à retenir pour l'interprétation.

Tableau 5: Extrait de la Matrice de corrélation Pearson

Groupe des variables	Variables	Paramètres d'état					
		γ (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	Sr (%)	e_0
Teneur En Eléments Des Oxydes Majeurs	Fe_2O_3	-0,391	0,118	-0,567	0,510	-0,073	0,608
	Al_2O_3	0,327	-0,067	0,454	-0,360	0,081	-0,462
	MgO	-0,056	0,169	-0,178	0,330	0,081	0,236
	MnO	0,266	-0,114	0,353	-0,295	0,109	-0,394
	Cr_2O_3	0,403	-0,160	0,452	-0,249	0,313	-0,513
	TiO_2	-0,085	0,001	0,095	-0,389	-0,361	-0,084
	SiO_2	-0,051	0,003	0,111	-0,368	-0,299	-0,098

Le Tableau 6 résume les treize (13) axes factoriels nécessaires pour la restitution de la totalité des informations. Chaque axe factoriel est caractérisé par la valeur propre et la variabilité

Tableau 6: Valeurs propres et Pourcentage d'inertie

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Valeur propre	7,171	3,892	3,420	2,648	2,273	1,581	0,992	0,737	0,575	0,424	0,132	0,127	0,027
Variabilité (%)	29,880	16,219	14,248	11,035	9,472	6,587	4,132	3,072	2,396	1,766	0,551	0,529	0,112
% cumulé	29,880	46,098	60,347	71,382	80,854	87,442	91,574	94,646	97,042	98,808	99,360	99,888	100,000

Le nombre des axes factoriels à retenir pour l'interprétation vise à obtenir un résumé suffisamment précis des données à explorer. Plusieurs critères sont à considérer pour choisir le nombre de ces axes tels que le critère de Kaiser, le critère du coude, le critère du Scree – test,...

Les cinq (5) premiers axes devraient être à retenir pour avoir un taux d'inertie expliqué à 80,85% dans l'interprétation de tous les résultats de cette Analyse en Composantes Principales. Nous retenons seulement les deux (2) premiers axes avec un taux d'inertie expliqué à 46,10% pour explorer la relation entre la teneur en Fe_2O_3 et les paramètres d'état.

3.1.2- Résultats sur l'étude des variables

Les tableaux 7 à 9 et la figure 1 représentent les résultats sur l'étude des variables lesquels ont rapport :

- aux coordonnées des variables sur les axes factoriels ou les coefficients de corrélation entre les variables centrées réduites et les axes factoriels (Tableau 7) ;
- à la contribution des variables à la formation des axes factoriels (Tableau 8) ;
- au cosinus carrés des variables sur les axes factoriels ou la qualité de représentation des variables (Tableau 9) ;
- au graphe de cercle de corrélation des variables dans les plans factoriels (Figure 1).

Tableau 7 : Coordonnées des variables

	F1	F2
Fe ₂ O ₃	-0,581	-0,129
γ(kN/m ³)	0,610	0,764
γ _s (kN/m ³)	0,274	0,428
γ _d (kN/m ³)	0,836	0,489
w (%)	-0,832	0,393
Sr (%)	0,099	0,948
e ₀	-0,797	-0,319

Tableau 8: Contribution des variables

	F1	F2
Fe ₂ O ₃	4,702	0,428
γ(kN/m ³)	5,192	15,012
γ _s (kN/m ³)	1,045	4,716
γ _d (kN/m ³)	9,755	6,142
w (%)	9,641	3,973
Sr (%)	0,136	23,082
e ₀	8,854	2,619

Tableau 9 : Cosinus carré des variables

	F1	F2
Fe ₂ O ₃	0,337	0,017
γ(kN/m ³)	0,372	0,584
γ _s (kN/m ³)	0,075	0,184
γ _d (kN/m ³)	0,700	0,239
w (%)	0,691	0,155
Sr (%)	0,010	0,898
e ₀	0,635	0,102

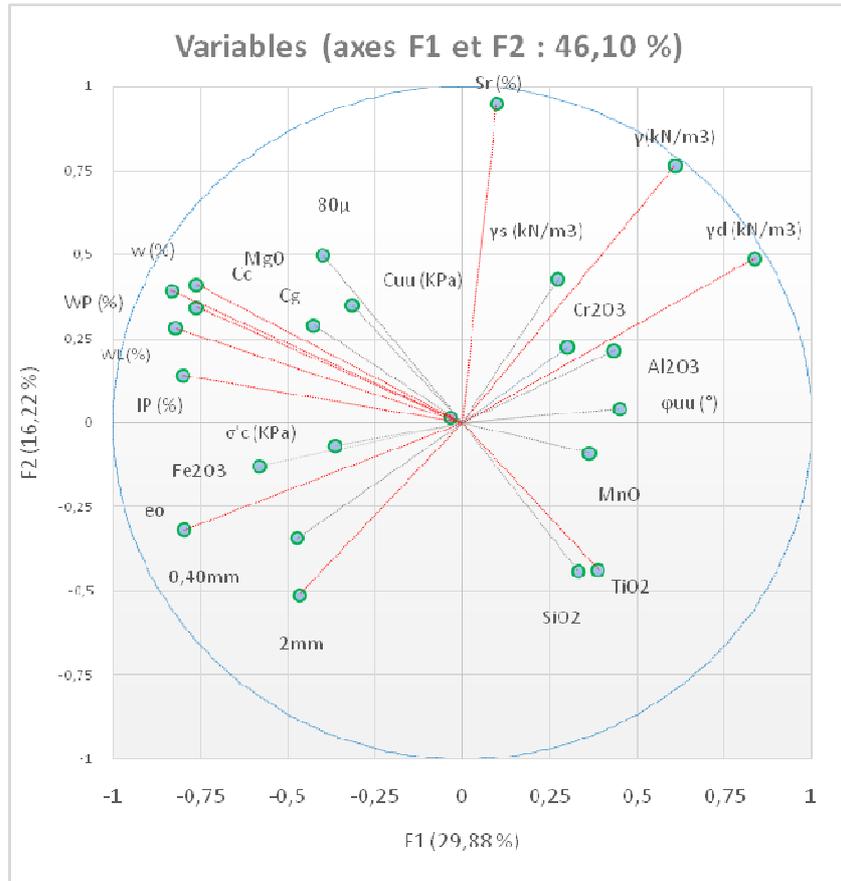


Figure 1 : Cercle de corrélation des variables (axes F1 et F2)

3.1.3-Résultats sur l'étude des observations

Les tableaux 10 à 12 représentent les résultats sur l'étude des observations qui se porte sur leur ressemblance du point de vue de l'ensemble des variables.

Les résultats concernent :

- Les coordonnées des observations suivant les axes factoriels (Tableau 10) ;
- La contribution des observations à la formation des axes factoriels (Tableau 11) ;
- Les cosinus carrés des observations suivant les axes factoriels ou la qualité de représentation des observations (Tableau 12) ;
- Le graphe des observations dans le plan factoriel (Figure 2).
-

Tableau 10: Coordonnées des observations

Observation	F1	F2
CF 2.5	3,284	1,452
L R 3.0	3,646	2,010

Observation	F1	F2
L R 3.3	-0,162	-2,555
L R 3.4	-1,151	-0,673
L R 3.6	1,263	1,121
L J 6.3	1,371	-4,172
L J 6.4	-0,799	-2,350
L J 7.0	-1,749	0,596
L J 7.1	3,001	0,231
L J 9.8	-0,820	1,631
L J 9.9	2,471	1,209
L J 13.80	-1,069	1,162
L J 19.80	-2,675	-2,201
L J 22.80	-6,611	2,541

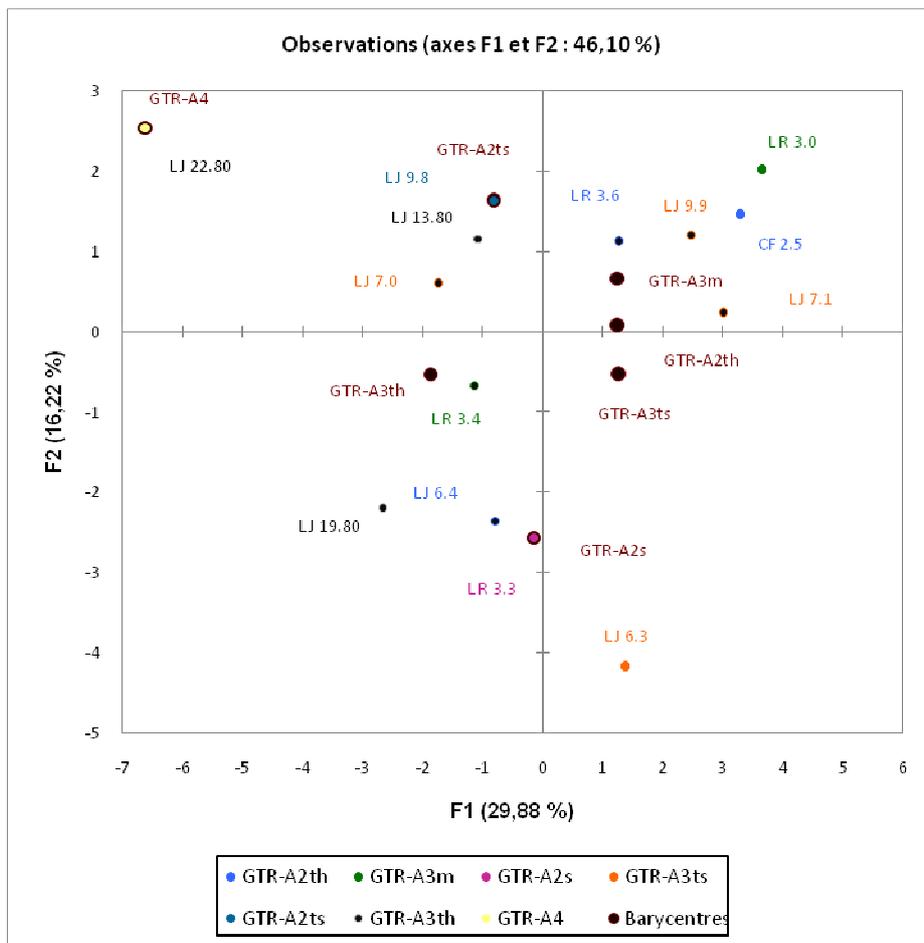
Tableau 11: Contribution des observations aux axes

Observation	F1	F2
CF 2.5	10,744	3,868
L R 3.0	13,238	7,410
L R 3.3	0,026	11,979
L R 3.4	1,321	0,832
L R 3.6	1,589	2,305
L J 6.3	1,872	31,946
L J 6.4	0,635	10,133
L J 7.0	3,047	0,653
L J 7.1	8,972	0,098
L J 9.8	0,670	4,879
L J 9.9	6,083	2,681
L J 13.80	1,139	2,477
L J 19.80	7,130	8,889
L J 22.80	43,534	11,851

Tableau 12 : Cosinus des observations

Observation	F1	F2
CF 2.5	0,433	0,085
L R 3.0	0,478	0,145
L R 3.3	0,002	0,441
L R 3.4	0,039	0,013
L R 3.6	0,097	0,077

L J 6.3	0,059	0,546
L J 6.4	0,049	0,423
L J 7.0	0,155	0,018
L J 7.1	0,480	0,003
L J 9.8	0,045	0,179
L J 9.9	0,214	0,051
L J 13.80	0,169	0,199
L J 19.80	0,292	0,198
L J 22.80	0,727	0,107



CF : Cuirasse Ferrugineuse LR : Latérite Rouge LJ : Latérite Jaune

Figure 2 : Plan des observations (axes F1 et F2)

3.1.4- Résultats sur les études des observations et variables

Le graphe biplot (Figure 3) présente simultanément les observations et les variables dans un même plan factoriel :

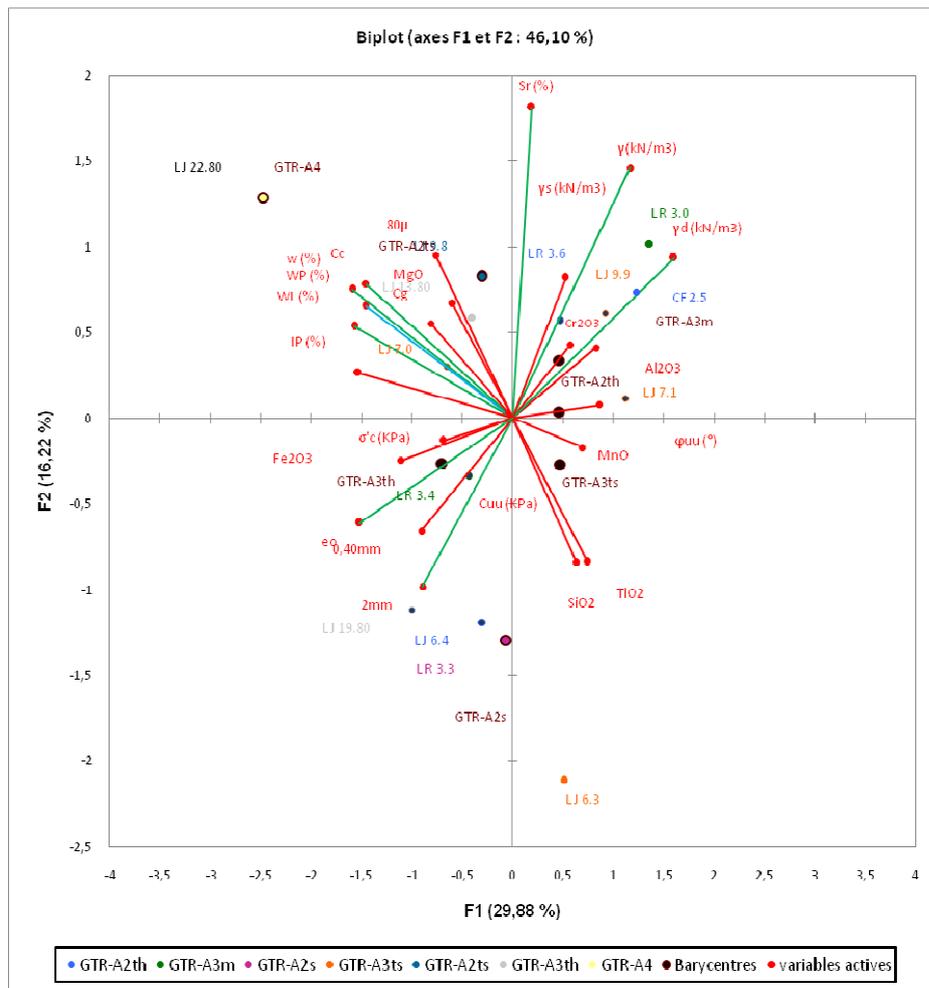


Figure 3 : Représentation graphique biplot

4. COMMENTAIRE ET DISCUSSION

4.1- Définition des axes factoriels

La définition des axes factoriels repose sur l'étude des variables et observations à contribution significative à la formation des axes. Trois (3) critères sont à considérer lors de la définition de l'axe factoriel :

- La comparaison de la coordonnée de la variable à la racine carrée de sa contribution à la formation de l'axe factoriel, ou la comparaison de la coordonnée de l'observation à la racine carrée de la n^{ième} valeur propre ;
- La contribution de la variable à l'explication de cet axe factoriel par rapport à celles des autres variables ;
- La qualité de représentation de la variable sur l'axe factoriel.

4.1.1-Signification de l'axe factoriel F1

- Variables à contribution significative à l'axe factoriel F1
Trois (3) critères sont à considérer :
 - Pour repérer les variables significatives à l'axe factoriel F1, on compare les valeurs de coordonnées du F1 à la racine carrée de la contribution $1/\sqrt{24}$ soit 20,41% ;
 - La contribution de la variable à l'explication de cet axe factoriel ;
 - La qualité de représentation.

Le tableau 13 résume la coordonnée, la contribution, et le cosinus carrés des variables significatives à la formation de l'axe factoriel F1.

Tableau 13: Variables significatives à la dénomination de l'axe factoriel F1

Variable	Coordonnée	Contribution	Cosinus carré
γ_d (kN/m ³)	0,836	9,755	0,700
Fe ₂ O ₃	-0,581	4,702	0,337
w(%)	-0,832	9,641	0,691
w _L (%)	-0,820	9,372	0,672
w _P (%)	-0,760	8,062	0,578
IP (%)	-0,801	8,939	0,641
Cc	-0,759	8,039	0,577
e ₀	-0,797	8,854	0,635

L'axe factoriel F₁ qui oppose la densité sèche γ_d à la consistance (w, w_L, w_P, IP) de sol, à leur compressibilité (e₀, Cc) et à la teneur en Fe₂O₃, il peut être défini comme axe des caractéristiques de déformation et de teneur en Fe₂O₃.

- Observations à contribution significative à l'axe factoriel F1
Trois (3) critères sont à considérer :
 - Pour repérer la contribution significative des observations à l'axe factoriel F1, on compare leur coordonnée à la racine carrée de la première valeur propre soit $\sqrt{7,171} = 2,677$;
 - La contribution de l'observation à l'explication de cet axe factoriel ;
 - La qualité de représentation de l'observation sur l'axe.

Le tableau 14 résume la coordonnée, la contribution, et la qualité de représentation (cosinus carrés) des observations significatives à la formation de l'axe factoriel F1.

Tableau 14: Observation à contribution significative à l'axe factoriel F1

	Coordonnée	Contribution	Cosinus carrés
CF 2.5	3,284	10,744	0,433
L R 3.0	3,646	13,238	0,478
L J 7.1	3,001	8,972	0,480

L J 22.80	-6,611	43,534	0,727
-----------	--------	--------	-------

L'axe factoriel F1 met en opposition les observations des sols aux différents niveaux d'horizon à la base (L J 22.80), à la médiane (L J 7.1) et au sommet (C F 2.5 et L R 3.0) du profil d'altération. Il décrit donc les observations dans l'ensemble du profil d'altération.

Général de ce fait, suivant les significations des variables et des observations suscitées, l'axe factoriel F1 explique les caractéristiques de consistance et compressibilité des sols et la teneur en Fe₂O₃ des sols latéritiques dans l'ensemble du profil d'altération.

4.1.2- Signification de l'axe factoriel F2

- Variables à contribution significative à la formation de l'axe factoriel F2

Le tableau 15 résume la coordonnée, la contribution, et le cosinus carrés des variables significatives à la formation de l'axe factoriel F2.

Tableau 15 : Variables à contribution significative à l'axe factoriel F2

Variable	Coordonnée	Contribution	Cosinus carrés
Sr (%)	0,948	23,082	0,898
γ (kN/m ³)	0,764	15,012	0,584

L'axe factoriel F2 caractérise l'état de saturation en eau des observations.

- Observations à contribution significative à l'axe factoriel F2

Le tableau 16 résume la coordonnée, la contribution, et la qualité de représentation (cosinus carrés) des observations significatives à la formation de l'axe factoriel F2.

Tableau 16: Observation à contribution significative à l'axe factoriel F2

	Coordonnée	Contribution	Cosinus carrés
L R 3.3	-2,555	11,979	0,441
L J 6.3	-4,172	31,946	0,5.46
L J 6.4	-2,350	10,133	0,423

L'axe factoriel F2 décrit les observations LR 3.3 et L J 6.3 et L J 6.4 de la zone limonitique (partie médiane du profil d'altération)

Suivant les significations des variables et des observations suscitées, l'axe factoriel F2 décrit la particularité des sols situés dans la zone limonitique (LR 3.3 et L J 6.3 et L J 6.4) située à la médiane du profil d'altération en leur état de saturation en eau et le poids volumique apparent.

4.2. Relations entre teneurs en Fe₂O₃ et paramètres d'état

Le taux d'inertie expliquée par les axes factoriels F1 (29,88%) et F2 (16,22%) est de 46,10%.

Le plan factoriel (F1, F2) permet d'analyser les caractéristiques de consistance et de compressibilité dans le profil d'altération suivant la teneur en Fe₂O₃ ainsi que le degré de saturation en eau Sr et le poids volumique apparent γ .

4.2.1- Sur les variables

De la matrice de corrélation (Cf. Tableau 5) et des représentations graphiques du cercle de corrélation des variables (Cf. Figure1), on constate que :

- la teneur en Fe_2O_3 et le degré de saturation en eau S_r ne sont pas corrélés avec leur faible coefficient de $-0,071$;
- la teneur en Fe_2O_3 et le poids volumique apparent γ sont moyennement corrélés négatifs avec un coefficient de corrélation $-0,391$;
- la teneur en Fe_2O_3 et la densité apparente sèche γ_d sont corrélés fortement négatives avec un coefficient de $-0,567$;
- La teneur en Fe_2O_3 varie 12,40% dont la variation par rapport à chaque observation n'est pas nettement visible. En revenant sur les données originales, la densité sèche décroît en profondeur au niveau de la zone « latérite rouge ». Elle passe de $17,2 \text{ kN/m}^3$ à $11,6 \text{ kN/m}^3$ correspondants respectivement à une teneur en Fe_2O_3 de 59,50% et 67,60%. Dans la zone latérite jaunâtre, elle s'accroît en prenant une valeur de $16,3 \text{ kN/m}^3$ avec une teneur en Fe_2O_3 de 63,50% ; puis elle décroît brusquement jusqu'à $8,7 \text{ kN/m}^3$ pour une teneur en Fe_2O_3 de 68,30%.
- la teneur en Fe_2O_3 et la teneur en eau w sont corrélés fortement positives avec un coefficient de $0,510$;
- la teneur en Fe_2O_3 et l'indice de vide initial e_0 ont de forte corrélation positive avec un coefficient de $0,608$;
- le degré de saturation en eau S_r ne présente une corrélation importante avec les limites d'Atterberg w_L et w_p , la teneur en eau naturelle w dont les coefficients de corrélation respectifs sont $0,354$; $0,237$; et $0,319$. Il n'a aucune corrélation avec l'Indice de plasticité IP indiqué par un coefficient de $0,070$;
- le degré de saturation en eau S_r et la densité apparente sèche γ_d sont corrélés fortement positives avec un coefficient de $0,554$;
- Pourtant, on remarque :
 - o une très forte corrélation positive entre le degré de saturation S_r et le poids volumique apparent γ avec un coefficient $0,826$;
 - o Une très forte corrélation positive entre le poids volumique apparent γ et la densité apparente sèche γ_d avec un coefficient $0,920$;
 - o Une très forte corrélation négative entre le poids volumique apparent γ et l'indice de vide initial e_0 avec un coefficient de $-0,761$;
 - o Une très forte corrélation négative entre la densité apparente sèche γ_d et l'indice de vide initial e_0 avec un coefficient $-0,925$;

Concernant les paramètres de compressibilité, on voit :

- Que l'indice de compression C_c a une très forte corrélation positive avec la teneur en eau naturelle w à un coefficient de $0,865$; et également avec les limites d'Atterberg w_L , w_p et l'indice de plasticité IP ayant respectivement de coefficient de corrélation $0,751$; $0,670$; et $0,776$. Il présente une moyenne corrélation positive avec le degré de saturation en eau S_r à un coefficient de $0,342$.
- Que l'indice de vide initial e_0 enregistre une forte corrélation positive avec la teneur en Fe_2O_3 à un coefficient de $0,608$; et une très forte corrélation positive avec la teneur en eau naturelle w à un coefficient de $0,702$. Néanmoins, il a une très forte corrélation négative avec le poids volumique apparent γ et la densité apparente sèche γ_d avec respectivement des coefficients $-0,761$ et $-0,925$.

4.2.2- Sur les observations

Les dissemblances des observations au sommet cuirasse ferrugineuse CF 2.5 et à la base latérite jaune LJ 22.80 du profil d'altération sont bien marquées par leur comportement avec les variables relatives à la plasticité. La cuirasse ferrugineuse qui est au sommet enregistre les valeurs minimum des limites de liquidité et de plasticité ainsi que l'indice de plasticité tandis que la latérite jaune à la base les valeurs maximum.

La ressemblance des observations latérites jaunes LJ 9.9 et LJ 22.80 au niveau de l'horizon de latérite jaune se dissocie quant à la compressibilité car la latérite jaune LJ 9.9 inscrit la valeur minimum de l'indice de compression C_c (0,163) et l'indice de vide initial e_0 (0,867) tandis que la latérite jaune LJ 22.80 la valeur maximum respective de 0,747 et 2,312.

De même pour les observations latérite jaune LJ 6.3 et L J 22.80, leur dissociation de l'appartenance au même horizon d'altération est au niveau du degré de saturation en eau S_r et la teneur en eau naturelle w . L'observation latérite jaune LJ 6.3 enregistre la valeur minimum du degré de saturation en eau S_r 45,2% contre la valeur maximum à celle de LJ 22.80 à 99,7%, et pareillement la teneur en eau naturelle 25,4% pour latérite jaune LJ 6.3 et 72,5% pour celle de LJ 22.80.

L'observation latérite rouge LR 3.0 qui se situent au sommet du profil et celle de latérite jaune L J 22.80 à la base présentent une nette opposition à la valeur de densité apparente sèche. L'observation latérite rouge LR 3.0 inscrit la valeur maximum 17,2 kN/m³ et celle de latérite jaune LJ 22.80 la valeur minimum 9,6 kN/m³.

L'observation latérite rouge LR 3.0 montre toujours la différence à celle de latérite jaune en relevant :

- la valeur minimum 59,5 %de teneur en Fe_2O_3 contre la valeur maximum 71,9% de L J 7.1 ;
- et la valeur maximum 21,8kN/m³ du poids volumique apparent γ contre la valeur minimum 14,2kN/m³ de L J 6.4.

4.2.3- Discussion des résultats du plan factoriel (F1, F2)

De la représentation graphique biplot (Cf. Figure 9), l'observation latérite rouge L R 3.0 permet de mieux expliquer les fortes corrélations négatives entre la teneur en Fe_2O_3 et les variables degré de saturation S_r , le poids volumique apparent γ , et la densité apparente sèche γ_d . Elle enregistre les valeurs max de γ et γ_d et une valeur très élevée du S_r d'une part (Cf. Tableau 2), et la valeur min de la teneur en Fe_2O_3 (Cf. Tableau 1).

L'horizon d'altération où se situe cette observation L R 3.0 se situe à la partie sommitale du profil d'altération ou à la zone limonitique. Elle est caractérisée par l'abondance en goethite. L'évolution géochimique des minéraux caractérisant la roche mère "péridotite ou dunite serpentinisée" d'Ambatovy (olivine, minéraux serpentineux, oxydes de fer et titane) se termine en goethite à la partie sommitale du profil d'altération.

De tous les éléments majeurs constitutifs des latérites, le fer est sans conteste l'élément le plus dense et le mieux même à résister aux contraintes, d'où son effet bénéfique sur les propriétés géomécaniques (Bagarre, 1992).

La teneur en fer a des conséquences sur ses qualités géotechniques (Fall, 1991).

La densité sèche γ_d est fonction de la teneur en fer (Bagarre, 1992).

Par rapport à la moyenne au niveau de chaque horizon, la teneur en Fe_2O_3 s'accroît en profondeur et la densité sèche γ_d s'accroît en surface.

La teneur en fer des latérites d'Ambatovy s'accroît avec la profondeur dans la zone « latérite rouge », Dans la zone « latérite jaunâtre » elle s'accroît aussi puis subit rapidement une diminution jusqu'à la base du profil (Cf. Tableau 1) (Mandimbiharison, 2012).

Fe est parmi les éléments les plus résiduels et s'accumule dans la partie superficielle du profil d'altération. Il est libéré sous forme Fe^{2+} qui rapidement se transforme en Fe^{3+} et devient insoluble. Il passe d'abord par l'état du gel puis sous forme de goethite (Besset, 1978 ; Mandimbiharison, 2012).

Cet horizon d'altération latéritique rouge est à structures nodulaires remplies par des goethites dont leurs grains possèdent une structure squelettique ou spongieuse constituée par des trous et pores abondants ainsi que de nombreuses fibres fines (Mandimbiharison, 2012).

Il se peut que l'abondance de ces goethites justifie la forte corrélation négative entre la teneur en Fe_2O_3 et le poids volumique apparent γ ainsi que la densité apparente sèche γ_d .

Aussi, selon (Bagarre, 1992), la densité sèche γ_d est fonction de leur teneur en fer et en silice. La roche mère riche en quartz donne des graveleux latéritiques à poids spécifique faible. Dans notre cas, si l'on admet que la roche mère est pauvre en quartz, ses produits d'altération pourraient avoir de poids spécifique élevé.

L'absence de corrélation entre la teneur en Fe_2O_3 et le degré de saturation en eau Sr dans notre cas rejoint l'hypothèse infirmée que les oxydes et hydroxydes de fer seraient responsables de la rétention d'eau par le sol (Segalen, 1964).

De la représentation graphique biplot (Cf. Figure 9), l'observation latérite jaune L J 22.80 permet de mieux expliquer la corrélation positive entre la teneur en Fe_2O_3 et l'indice de vide initial e_0 . Elle enregistre la valeur max de e_0 .

Cette observation latérite Jaune LJ 22.80 appartient à l'horizon d'altération appelée saprolite fine ou latérite jaune qui est sous-jacent de l'horizon de latérite rouge et la cuirasse ferrugineuse. Dans cet horizon d'altération, les silicates primaires sont totalement disparus tandis que les silicates néoformés (talc, amphibole) sont toujours présents. Les goethites sont déjà apparues mais à l'état de trace et avec un caractère mal cristallisé et comporte beaucoup d'impureté (Zeinssink, 1969 ; Trescases, 1975 ; Besset, 1978 ; Mandimbiharison, 2012). Lors de l'évolution du processus de latéritisation, il y a accumulation d'oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium avec comme conséquence la diminution de l'indice de vide (Mbuyi, 2016). On pourrait croire que l'appauvrissement en Fe_2O_3 à ce niveau d'horizon d'altération est la cause de l'indice de vide initial e_0 élevé. Elle est dans la classe sols fins A4 qui est caractérisé par Argile très plastique. Ces sols sont très cohérents et presque imperméables.

5. CONCLUSION

Les sols latéritiques nickelifères d'Ambatovy résultent de l'altération de la roche mère ultrabasique type dunite. Ils sont constitués de haut en bas la cuirasse ferrugineuse, la latérite rouge, la latérite jaune ou saprolite fine, la saprolite grossière, et la roche mère.

La recherche des relations entre les compositions chimique et les propriétés mécaniques des différents types de sols de ce profil d'altération permettrait d'avoir de meilleures conditions de leur mise en œuvre.

De par la composition minéralogique et pétrographique ainsi que l'abondance des goethites, la teneur en Fe_2O_3 semble avoir de forte corrélation positive avec l'indice de vide initial e_0 et la teneur en eau naturelle w tandis que de forte corrélation négative avec la densité sèche apparente γ_d . Elle ne présente aucune corrélation avec le degré de saturation en eau Sr.

L'évolution et le comportement géochimique de fer le long du profil d'altération permet à ses oxydes de contribuer à l'état hydrique et l'importance des vides dans les sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bagarre E. (1992). " Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière". Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics. 120p
- Bagarre E. (1992). « Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière ». Centre expérimental de recherche et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics. France.120p
- Bagarre E. (1992). « Utilisation des graveleux latéritiques en technique routière ». Centre expérimental de recherche et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics. France.120p
- BESSET F. (1978) « Localisation et répartition successives du nickel au cours de l'altération latéritique des péridotites de Nouvelle Calédonie. Mémoire C.E.R.G.E Montpellier Tome VX.
- Besset F. (1978) « Localisation et répartition successives du nickel au cours de l'altération latéritique des péridotites de Nouvelle Calédonie. Mémoire C.E.R.G.E Montpellier Tome VX.
- Boissé M. (2015). " Reconnaissances géotechniques de site de stockage de sols latéritiques nickelifères à basse teneur d'Ambatovy ". Rapport d'étude
- Fall M. (1991). « Les latérites et les sols latéritiques ». Rapport d'études, Institut National Polytechnique de Lorraine. 32p
- Mahamadou S. I.. (2016). « Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger ». Thèse de doctorat. Université de Bordeaux. 2016
- Mandimbiharison A.J (2012). « Evolution minéralogique, distribution et comportement géochimique de certains éléments au sein du profil latéritique nickelifère d'Ambatovy, Centre Est de Madagascar. Thèse de Doctorat
- Mandimbiharison A.J (2012). « Evolution minéralogique, distribution et comportement géochimique de certains éléments au sein du profil latéritique nickelifère d'Ambatovy, Centre Est de Madagascar. Thèse de Doctorat
- Mandimbiharison A.J. (2012). « Evolution minéralogique, distribution et comportement géochimique de certains éléments au sein du profil latéritique nickelifère d'Ambatovy, Centre Est de Madagascar ». Thèse de Doctorat. Université d'Antananarivo. Madagascar. 155p
- Mandimbiharison A.J. (2012). « Evolution minéralogique, distribution et comportement géochimique de certains éléments au sein du profil latéritique nickelifère d'Ambatovy, Centre Est de Madagascar ». Thèse de Doctorat. Université d'Antananarivo. Madagascar. 155p
- Mandimbiharison A.J. (2012). « Evolution minéralogique, distribution et comportement géochimique de certains éléments au sein du profil latéritique nickelifère d'Ambatovy, Centre Est de Madagascar ». Thèse de Doctorat. Université d'Antananarivo. Madagascar. p71. 155p
- Mandimbiharison A.J. (2012). « Evolution minéralogique, distribution et comportement géochimique de certains éléments au sein du profil latéritique nickelifère d'Ambatovy, Centre Est de Madagascar ». Thèse de Doctorat. Université d'Antananarivo. Madagascar. p71. 155p
- Mbuyi (2012). « Caractérisation et mise en œuvre des sols argileux destinés aux matériaux de construction cuits ».Thèse de doctorat. Université Catholique de Louvain.

Segalen P. (1964). "Le Fer dans le sol". Document technique. Tome XII. Fascicule 1. 1er trimestre. Section Pédologique. O.R.S.T.O.M.

SETRA, LCPC (2000). "Réalisation des remblais et des couches de forme ". Guide Technique. Fascicule I. 2^{ème} édition.

SETRA, LCPC (2000). "Réalisation des remblais et des couches de forme ". Guide Technique. Fascicule I. 2^{ème} édition.

Trescases J.J. (1975). « L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiqes en zone tropicale. Formations des gisements nickeliferes de Nouvelle Calédonie. Mémoire O.R.S.T.O.M 78, 259p.

Zeissik H.E. (1969). « The mineralogy and geochemistry of a nickeliferous laterite profile Greenvale, Queensland, Australia ». Mineral Deposita (Berl.)4, p 132-152.