

Etude biogéochimique de l'oxyde de fer dans les latérites

Nambinina Richard Randriana*(1), Haritiana Jeannelle Rakotoniriana (1), Jean de Dieu Ramarason (2), Frédéric Randrianarivelo(1), Tiana Richard Randriamalala(3), Lala Andrianaivo (1)

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar

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

(3) Laboratoire National des Travaux Publics et des Bâtiments, Département Recherche et Matériaux, B.P. 1151, Antananarivo 101 Madagascar.

*auteur correspondant, email : richardrandriana@yahoo.fr

Résumé

Le présent travail consolide la réduction des métaux par voie microbienne, notamment la transformation de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) en FeO . Étant donné que la quantité de fer réduite Fe (II) est notable dans le premier lot de latérite ou lot témoin n'ayant subi aucun traitement, parce que pendant une durée d'incubation de vingt et huit jours, le pourcentage en Fe (II) s'élève de 6,5 à 95% (résultat du suivi de D.O.). Alors que dans le deuxième lot de latérite stérilisée initialement, pendant la même durée d'incubation de vingt et huit jours, le pourcentage en Fe (II) est stationnaire à 6,5%. Ces deux faits contradictoires mettent en exergue que la réduction du fer des latérites est l'apanage exclusif des microorganismes vivants en leur sein. Les avantages de cette technique sont multiples, en effet la réduction par voie microbiologique s'effectue à température de 30°C proche de la température ambiante, elle est donc non énergétivore et non fumigène, comparée à la réduction par voie chimique et industrielle de l'ordre de 1500°C , voire même plus et fumigène. Cette dernière induit alors des nuisances à l'environnement. Nous avons optimisé aussi l'échéance ou la durée de réduction microbienne, la durée minimale est de 16 jours pour que la réduction soit achevée.

Mots clés : Latérite, réduction microbienne du fer, non énergétivore, non fumigène.

Abstract

This work consolidates the reduction of metal microbial, especially the transformation of the iron oxide (Fe_2O_3) FeO . Since The amount of reduced iron Fe (II) is notable in the first batch of laterite or control group having undergone no treatment, because during an incubation period of twenty eight days, the percentage of Fe (II) s pupil of 6.5 to 95% (result of monitoring DO). While in the second batch of laterite initially sterilized during the same incubation period of twenty eight days, the percentage of Fe (II) is stationary to 6.5%. These two contradictory facts highlight that the reduction of iron laterites is the exclusive prerogative of live microorganisms within them. The advantages of this technique are numerous, indeed the reduction is carried out microbiologically at a temperature of 30°C near room temperature, it is not energy intensive and smokeless, compared to the reduction by chemical and industrial way of order of 1500°C , and even more smoke. The latter cause a nuisance to the environment. We also optimized the maturity or microbial reduction time, the minimum period is 16 days for the reduction is complete.

Keywords: Laterite, microbial iron reduction, not energy intensive, smokeless.

1. INTRODUCTION

Les réactions de réduction par voie chimique et industrielle des métaux sont souvent très énergétivores et fumigènes. En effet, elles s'effectuent à des températures très élevées de l'ordre de 1500°C , il est indéniable alors qu'elles pourraient générer des nuisances et pollutions pour l'environnement. Par ailleurs, diverses considérations fondées sur la bibliographie (Morin D., 2013) et les propres observations de notre équipe sur le terrain pendant plusieurs années, ont conduit à l'hypothèse que les microorganismes peuvent effectuer une réduction des métaux, cas des murs traditionnels des hauts plateaux de Madagascar (tambohon'ny Ntaolo), nodules sous-marins, pourtant nous n'avons pas encore une compréhension technique suffisante (Randriana, 1994). Tous ces faits évoqués nous ont poussés à apporter notre modeste contribution à la résolution des problèmes susvisés, par le biais de cette recherche sur l'étude de la réduction microbienne de l'oxyde de fer dans les latérites. Ainsi, dans le présent travail nous nous sommes fixés aux objectifs suivants :

- Mettre en évidence la réduction microbienne du fer dans les latérites par dosage du Fe(II) formé
- Optimiser la durée de la réduction microbienne.

2. MATERIELS

2.1. L'étuve biologique

C'est une enceinte thermostatée de laboratoires (salle de culture cellulaire). Elle est généralement réglée à 37 °C et équipée d'une arrivée de CO₂ et d'un bac d'eau pour obtenir une atmosphère à 5 % de CO₂ et environ 80 à 85 % d'humidité. L'enceinte est faite en acier inoxydable et équipée d'une double porte. L'incubateur est muni de divers boutons de réglage. Certains, outre la température, sont capables de réguler d'autres paramètres, tels l'hygrométrie, la composition gazeuse de la chambre, etc.

2.2. Le spectrophotomètre UV. Visible

Le spectrophotomètre UV. Visible de Modèle KFK-3 que nous avons utilisé est destiné à une analyse clinique et chimique des solutions.

Il sert à mesurer l'absorbance ou la densité optique (D.O) d'une substance chimique donnée en solution. Plus cette espèce est concentrée, plus elle absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert. La densité optique est déterminée par un spectrophotomètre préalablement étalonné sur la longueur d'onde d'absorption de l'espèce chimique à étudier (ENCPB, 2002).

3. METHODES

3.1. Réalisation de la composition chimique de l'échantillon de latérite

La composition chimique de l'échantillon de latérite (tableau 1) sur lequel l'étude de l'influence de la réduction a été réalisée.

Tableau 01 : Composition chimique de l'échantillon de latérite de l'expérimentation

Oxyde	Composition (%)
Humidité	0,7
Perte au feu	12,0
Si O ₂	40,6
Al ₂ O ₃	24,3
Fe ₂ O ₃	20
TiO ₂	2,3
CaO	Traces
MgO	Traces
Total	99,9

3.2. Mise en évidence de la réduction microbienne.

L'étude de la réduction microbienne a été effectuée au LME/CNRE (laboratoire Microbiologique de l'Environnement /Centre National de Recherche sur l'Environnement), pour ce faire, nous avons utilisé 2 méthodes : l'utilisation de la chaleur et l'utilisation d'antibiotique (eau oxygénée).

3.2.1. Utilisation de la chaleur

Lot 1: latérite normale n'ayant subi aucun traitement (Témoin).

Lot 2: latérite stérilisée à la chaleur pendant 1 heure et à une température de 180°C

L'intérêt de cette méthode réside dans la rapidité de l'éradication des germes présents dans l'échantillon, ainsi au cas où la réduction biologique ne se manifesterait plus dans cet échantillon après stérilisation, il sera prouvé que ladite réduction est bien l'action des micro-organismes.

Néanmoins, cette méthode thermique présente un inconvénient. En effet, certains constituants du sol seraient modifiés par la cuisson et il est probable que ces modifications auraient des impacts directs sur la réduction biologique du fer (Munch et Ottow, 2010).

3.2.2. Utilisation d'antibiotique (eau oxygénée)

Lot 1: latérite normale n'ayant subi aucun traitement (lot témoin).

Lot 2: latérite, ayant subi une stérilisation à l'eau oxygénée 5 % pendant 72 heures

Ces deux lots sont ensuite placés dans une étuve à 30°C pendant 28 jours, mais à des intervalles réguliers, des prélèvements sont effectués et la densité optique (D.O.) est lue au spectrophotomètre.

L'intérêt de cette méthode consiste à conserver la texture et la structure du sol. Toujours est-il que cette méthode est longue.

3.3. Etude quantitative de la réduction biologique du fer

En vue de déterminer le pourcentage du fer réduit en fonction de la durée d'incubation, et ce, dans un souci de fiabilité des résultats, nous avons choisi d'utiliser parallèlement deux méthodes par analyse colorimétrique :

- La méthode de Kazarinova-Oknina, modification Kopteva au moyen de α -dipyridile ($C_{10}H_8N_2$).
- La méthode de suivi de la densité optique (D.O.) en fonction de la durée d'incubation moyennant un spectrophotomètre K.F.K.3. La longueur d'onde utilisée est $\lambda = 400$ nm.

3.3.1. Evaluation du fer sous oxydé Fe(II) et oxydé Fe(III) dans les extraits d'échantillon de latérite selon la méthode de Kazarinova-Oknina, modification Kopteva(AFES, 2008) (Méthode 1)

Description de la méthode

Dans les limites de pH=3,5-8,5, l' α -dipyridile ($C_{10}H_8N_2$) produit avec Fe^{2+} un complexe soluble de couleur rouge, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration du fer dans la solution. Le complexe ferrodipyridilique $2 [Fe^{2+} (C_{10}H_8N_2)_3]$ formé résiste à l'oxydation et peut être exploité pour les analyses colorimétriques.

Conditions expérimentales

- L'échantillon de latérite dont l'oxyde de fer est ramené à 20 %, est complètement immergé dans une solution de saccharose 5%, l'ensemble est fermé hermétiquement en anaérobiose à 30°C pendant 28 jours dans une étuve biologique de TypeTettyFisherband.
- En vue d'une analyse colorimétrique, des prélèvements ont été effectués régulièrement tous les 4 jours pendant 28 jours.

Mode opératoire

- Nous avons préparé un extrait, en prenant 5g de latérite et 50ml de solution 0,1N H_2SO_4 (l'humidité de cet échantillon de latérite est de 15 %, d'où le coefficient pour convertir en sol sec est égal à 1,15) ;
- Mettre l'ensemble dans une fiole conique de 100ml, l'agiter pendant 5mn puis filtrer ;
- Verser dans l'éprouvette 5ml de filtrat, ce qui correspond à 0,5 g de latérite, ainsi 1ml de la solution analysée correspond à $C_1 = 0,5 / 5 = 0,1$ g ;
- Comparer la couleur de la solution analysée dans l'éprouvette avec le tube à essai des solutions étalons.

La teneur en fer sous-oxydé Fe (II) de l'éprouvette est calculée d'après la formule :

$$\frac{a_1}{c_1} \cdot 100 \cdot K_{H_2O} = FeO \text{ g pour } 100\text{g de latérite} \quad (\text{équation 01})$$

a_1 : est la concentration de FeO(en mg par ml) dans le tube à essai de l'échelle des étalons avec lequel a coïncidé la coloration de la solution analysée dans l'éprouvette.

c_1 : est la charge de la latérite correspondant à 1 ml de la solution analysée dans l'éprouvette ($C_1 = 0,1$ g)

100 : est le coefficient de réduction en sol sec, humidité
15 %, c'est à dire que $K_{H_2O} = 1,15$

Préparation de l'échelle des solutions étalons

Nous avons pesé sur une balance d'analyse 0,5462 gde sel de Mohr recristallisé $FeSO_4 \cdot (NH_4)_2 SO_4 \cdot 6H_2O$, le mettre dans un ballon jaugé, le dissoudre en eau distillée bouillie acidifiée par 10 à 15 ml de solution à 10 % de H_2SO_4 et y ajouter de l'eau distillée de telle sorte qu'on obtienne les concentrations voulues (Comtes, 2005 ; Kaouritchev, 2010) résumées dans le tableau 2.

Tableau n° 02 : Concentration des solutions étalons d'oxyde de fer (II)

N° tube à essai	a ₁ : concentration FeO en (mg / ml)	N° tube à essai	a ₁ : concentration FeO (en mg / ml)
1	0,1	10	1,0
2	0,2	11	1,1
3	0,3	12	1,2
4	0,4	13	1,3
5	0,5	14	1,4
6	0,6	15	1,5
7	0,7	16	1,6
8	0,8	17	1,7

La teneur de la latérite d'Ambohidratrimo en fer oxydée Fe (III) est obtenue par soustraction :

$$\% Fe (total) = \% Fe (II) + \% Fe (III)$$



$$\% Fe (III) = \% Fe (total) - \% Fe (II) \quad (\text{équation 02})$$

3.3.2. Evaluation du fer sous-oxydé Fe(II) et oxydé Fe(III) dans les extraits de latérite selon la méthode de suivi de densité optique (D.O.) à l'aide d'un spectrophotomètre KFK3 (Méthode 2).

Description de la méthode

En supposant que la réduction biologique du fer est la conséquence de l'activité des micro-organismes. Ainsi la croissance bactérienne sera proportionnelle à la quantité du fer ferreux produite. Il en découle que le suivi de l'enrichissement du milieu en Fe (II) en fonction de la croissance bactérienne sera une méthode fiable pour étudier la réduction biologique du fer (Oshiki, 2013 ; Bo Thamdrup, 2000)

Conditions expérimentales

- L'échantillon de latérite est complètement immergé dans une solution de saccharose 5%, l'ensemble est fermé hermétiquement en anaérobiose à 30°C pendant 28 jours dans une étuve bactériologique de type Tetty Fisherband.
- La longueur d'onde utilisée est $\lambda = 400 \text{ nm}$
- Des prélèvements sont faits régulièrement tous les 4 jours, les densités optiques *D.O* sont mesurées et exploitées

Principe

Si *C* exprime la concentration d'une solution (Nombre de grammes par millilitre). Quand un rayon lumineux de longueur d'onde donnée et d'intensité I_0 traverse cette solution sur une longueur *l* (ou trajet optique = 1 cm), l'intensité du rayon transmis I_1 est tel que :

$$D.O = \text{Log} \frac{I_0}{I_1} = \epsilon \cdot C \cdot l \quad (\text{loi de Beer - Lambert})$$

A : est appelée absorbance de la solution ou extinction E ou encore densité optique (D.O.)

Mesure de densité optique (D.O.) ou absorbance

- Placer la solution X dans une cuve, mettre l'ensemble dans la chambre de mesure, fermer le volet, l'appareil mesure la densité optique de l'échantillon X, soit D_{O_X} cette valeur.
- Pour calculer la concentration de la solution X, il faut mesurer d'abord la densité optique d'une solution étalon E.
- Ecrivons 2 fois la loi de Beer-Lambert, l'une avec la solution étalon E et l'autre avec la solution X de concentration à déterminer (Lafont R., 2005) :

$$D.O.E = \text{Log} \frac{I_0}{I_1} = \epsilon \cdot [E] \cdot L \quad (1)$$

$$D.O.X = \text{Log} \frac{I_0}{I_2} = \epsilon \cdot [X] \cdot L \quad (2)$$

$$\frac{(1)}{(2)} = \frac{D.O.E}{D.O.X} = \frac{[E]}{[X]}$$

$$\rightarrow [X] = [E] \times \frac{D.O.X}{D.O.E}$$

4. RESULTATS

4.1. Résultats de la réduction biologique obtenus avec la méthode de Kazarinova-Oknina, modification Kopteva.

Lot 1 (lot Témoin) : Il s'agit de latérite n'ayant subi aucun traitement et contenant 20% d'oxyde de fer, immergée dans une solution de saccharose 5%. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.

Tableau n°03: Pourcentage de réduction en Fe(II) du lot 1 à l'échéance de 28 jours, évalué selon la méthode de Kazarinova-Oknina, modification Kopteva

Durée d'incubation (en jour)	n° du tube à essai étalon	$\frac{a_1}{c_1} \cdot 100 \cdot K_{H_2O} = FeO \text{ g}$ pour 100g de latérite	% de réduct° en Fe (II)
0j	1	$0,1 \times 100 \times 1,15 / 0,01 = 1,15$	5,75
4j	2	$0,2 \times 100 \times 1,15 / 0,01 = 2,30$	11,5
8j	2	$0,2 \times 100 \times 2,30 / 0,01 = 2,30$	11,5
12j	13	$1,3 \times 100 \times 1,15 / 0,01 = 15$	75
16j	16	$1,6 \times 100 \times 1,15 / 0,01 = 18,4$	92
20j	16	idem	92
24j	16	idem	92
28j	16	idem	92

Lot 2: Il s'agit de latérite à 20% d'oxyde de fer, stérilisée initialement à l'eau oxygénée pendant 72 heures. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.

Tableau n°04: Pourcentage de réduction en Fe(II) du lot 2 à l'échéance de 28 jours, évalué selon la méthode de Kazarinova-Oknina, modification Kopteva

Durée d'incubation (en jour)	n° du tube à essai étalon	$\frac{a_1}{c_1} \cdot 100 \cdot K_{H_2O} = FeO \text{ g}$ pour 100g de latérite	% de réduct° en Fe(II)
0j	1	$0,1 \times 100 \times 1,15 / 0,01 = 1,15$	5,75
4j	1	idem	5,75
8j	1	idem	5,75
12j	1	idem	5,75
16j	1	idem	5,75
20j	1	idem	5,75
24j	1	idem	5,75
28j	1	Idem	5,75

a_1 : est la concentration de FeO (en mg par ml) dans le tube à essai de l'échelle des étalons avec lequel a coïncidé la coloration de la solution analysée dans l'éprouvette.

c_1 : est la charge de la latérite correspondant à 1 ml de la solution analysée dans l'éprouvette ($C_1 = 0,1$ g)

100 : est le coefficient de réduction en sol sec, humidité 15 %, c'est à dire que $K_{H_2O} = 1,15$

Remarques

Ces résultats affichés aux tableaux n°03 et 04 sont les moyennes des résultats de l'expérience de réduction répétées au moins trois fois avec le même mode opératoire.

(Ces deux lots de latérite, ont été soumis aux mêmes conditions d'étuvage : anaérobie par immersion dans une solution de saccharose 5%, $T^\circ = 30^\circ\text{C}$, pendant 28j).

4.2. Résultats obtenus avec la méthode de suivi de densité optique (D.O.)

Lot 1 (lot témoin) : Il s'agit de latérite n'ayant subi aucun traitement de stérilisation et contenant 20% d'oxyde de fer, immergée dans une solution de saccharose 5%. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.

Tableau n°05: Pourcentage de réduction en Fe(II) du lot 1 à l'échéance de 28 jours, évalué selon la méthode de suivi de D.O.

Durée d'incubation	n° du tube à essai étalon	$[FeO] = [E] \times \frac{(D.O)_{FeO}}{(D.O)_E}$ (en mg/ml)	% de réduct° en Fe (II)
0j	1	[FeO]=[0,1] [0,014]/ [0,011]= 0,13	6,5
4j	2	[FeO]= [0,2] [0,068]/ [0,052]=0,26	13
8j	2	idem	13
12j	13	[FeO]= [1,3] [0,250]/ [0,210]=1,55	77,5
16j	16	[FeO]= [1,6] [0,297]/ [0,250]=1,9	95
20j	16	idem	95
24j	16	idem	95
28j	16	idem	95

[E] : Concentration de la solution étalon E

(D.O.) FeO: Densité optique de la solution X de concentration inconnue

(D.O.) E : Densité optique de la solution étalon E

Lot 2 : Il s'agit de latérite à 20% d'oxyde de fer, stérilisée initialement à l'eau oxygénée pendant 72 heures. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 06: Pourcentage de réduction en Fe(II) du lot 2 à l'échéance de 28 jours, évalué selon la méthode de suivi de D.O.

Durée d'incubation	n° du tube à essai étalon	$[FeO] = [E] \times \frac{(D.O)_{FeO}}{(D.O)_E}$ (en mg/ml)	% de réduction en Fe (II)
0j	1	[FeO]= [0,1] [0,04]/ [0,014]= 0,13	6,5
4j	1	idem	6,5
8j	1	idem	6,5
12j	1	idem	6,5
16j	1	idem	6,5
20j	1	idem	6,5
24j	1	idem	6,5
28j	1	idem	6,5

Remarques

Ces résultats affichés aux tableaux 05 et 06 sont les moyennes des résultats de l'expérience de réduction répétées au moins trois fois avec le même mode opératoire.

Ces deux lots de latérite, ont été soumis aux mêmes conditions d'étuvage : anaérobie par immersion dans une solution de saccharose 5%, T° = 30°C, pendant 28j. Les résultats sont présentés dan les figures 1 et 2.

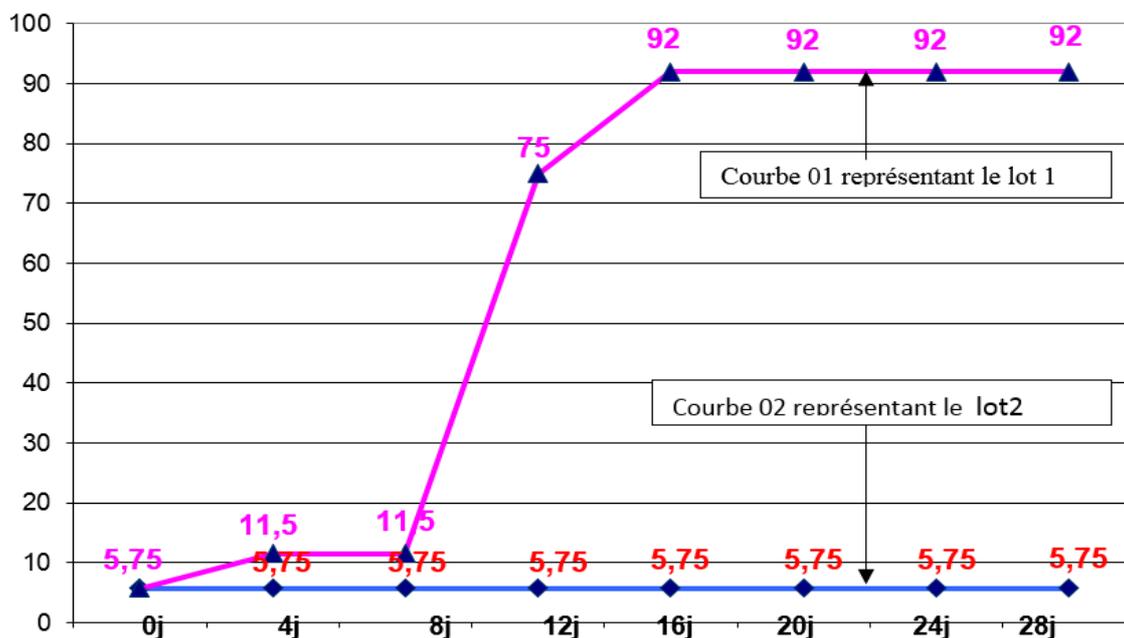


Figure 1 : Pourcentage de réduction des lots 1 (lot témoin) et 2, en fonction de l'échéance d'incubation, selon méthode de Kazarinova-Oknina modification Kopteva

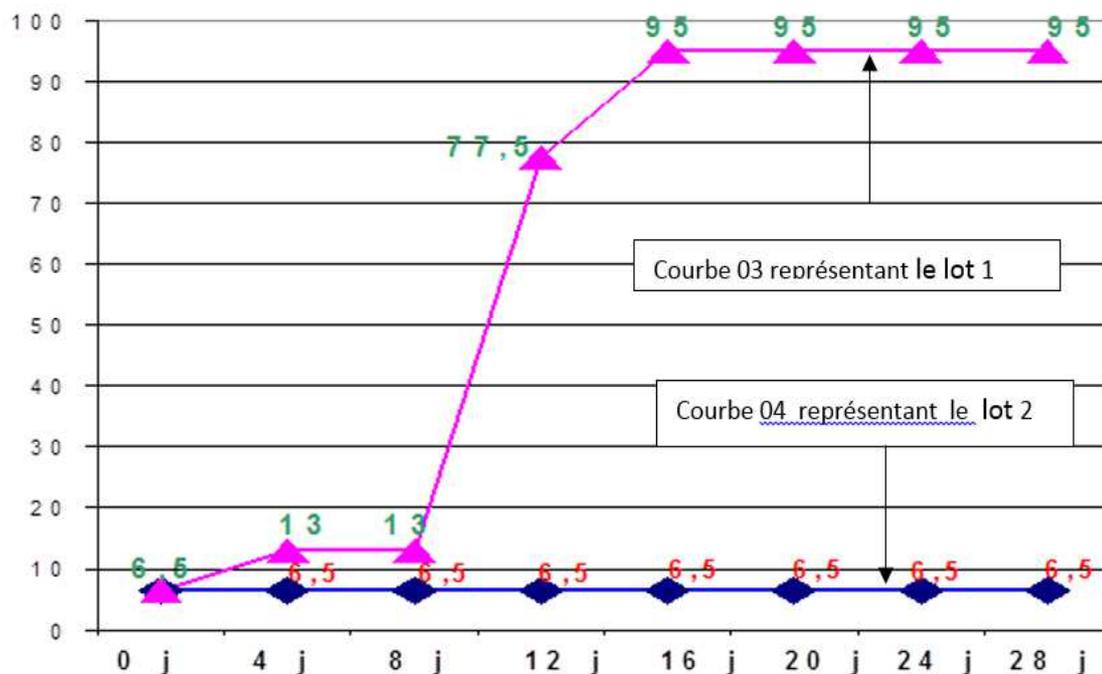


Figure 2 : Pourcentages de réduction des lots 1 (lot témoin) et 2, en fonction de l'échéance d'incubation, selon la méthode de suivi de densité optique (D.O.)

5. ANALYSES ET INTERPRETATIONS

La quantité de fer réduite Fe (II) est notable dans le 1^{er} lot de latérite ou lot témoin n'ayant subi aucun traitement de stérilisation, parce que pendant une durée d'incubation de 28 jours, la quantité en Fe (II) s'élève de 6,5 à 95% (résultat du suivi de D.O.)

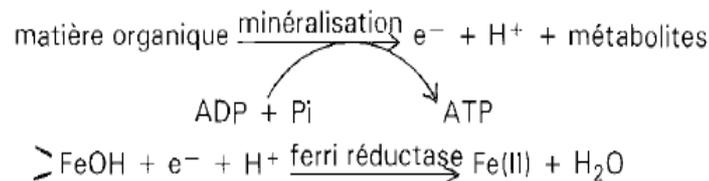
Tandis que le 2^{ème} lot de latérite stérilisé initialement est insensible au phénomène de réduction ; en effet, pratiquement il ne réagit plus à ce phénomène, durant les 28 jours d'incubation, la quantité en Fe (II) est stationnaire à 6,5 %. La séparation des cellules bactériennes et de l'oxyde ferrique empêche presque complètement la formation de Fe (II).

Ces deux faits contradictoires nous montrent que la réduction du fer des latérites est l'apanage exclusif des microorganismes vivants en leur sein (Berthelin et Kogblevi, 1974).

Bien que les pourcentages de réduction obtenus avec les deux méthodes ne soient pas identiques, les courbes présentent la même allure : croissante de 0 à 16 jours, formation de pallier après cette échéance (Kaouritchev, 2010). Ce fait nous conduit à admettre que le délai de 16 jours est minimum et exigible pour que la réduction des latérites soit à terme.

Les résultats issus de la méthode de suivi de densité optique (D.O.) sont légèrement supérieurs par rapport à ceux de la méthode de Kazarinova-Oknina, modification Kopteva. Cette légère différence pourrait être attribuée à la précision de la méthode de suivi de densité optique (D.O.), faudrait-il rappeler que cette dernière est basée sur la mesure de la longueur d'onde du milieu.

Cette action réductrice des microorganismes sur les oxydes ferriques peut s'expliquer de deux façons. D'une part, une action indirecte s'exercerait, soit par des métabolites à caractère réducteur, soit par une accumulation d'électrons dans le milieu, due à la croissance bactérienne en absence d'oxygène, c'est-à-dire par un potentiel redox très bas. D'autre part, un transfert de ces électrons et protons par l'intermédiaire d'enzymes bactériennes (« ferriréductase ») à partir des substrats organiques donneurs sur les oxydes ferriques est possible en tant que mécanisme énergétique bactérien (formation d'ATP), les réactions chimiques ci-dessous résument ces interprétations (Munch et Ottow, 2010).



La couleur noirâtre de latérite réduite peut être expliquée par la réaction suivante (Morin D., 2013).



Cette dernière réaction chimique représente un avantage écologique considérable, les composés ferriques étant présents dans pratiquement tous les sols et sédiments.

En définitive, la réduction bactérienne du fer dans les latérites et les microsites saturés est une réduction enzymatique et qui nécessite un contact direct oxydes-bactéries en vue du transfert de l'hydrogène, issu du métabolisme, sur les oxydes ferriques accepteurs. De plus, le potentiel redox (Eh) d'un sol n'est que l'expression de l'activité et des réactions métaboliques de la population microbienne. Les Eh mesurés sont la conséquence, et non la cause des changements redox (Grabow, 2001; Munch et Ottow, 2010).

6. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié la réduction microbienne en milieu anaérobie du fer contenu dans les latérites. Ladite réduction existe et elle est essentiellement l'activité des microorganismes vivants en leur sein.

Dans les conditions (anaérobies par immersion dans une solution de saccharose de 5% et T°= 30°C), le délai ou échéance de 16 jours s'avère minimum pour que la réduction soit à terme. Cette réduction par voie microbiologique

permet d'économiser de l'énergie, car elle s'effectue à une température voisine de la température ambiante, elle n'est pas aussi fumigène de ce fait elle génère moins de pollutions et nuisances à l'environnement (Haramato et al., 2001). Néanmoins son inconvénient est sa vitesse de réaction est lente. En somme, ces résultats sont promoteurs mais nous souhaitons qu'il y ait des études complémentaires à celle-ci pour identifier les souches microbiennes qui effectuent cette réduction.

BIBLIOGRAPHIE

1. AFES, 2008. Référentiel pédologique. Quae, Versailles, 432 p, 155-325.
2. Berthelin J. et al (1974) : Influence de l'engorgement sur l'altération microbienne des minéraux dans les sols. Rev. Ecol Biol. Sol 11, 11-29.
3. Berthelin J., 1971. - Altération microbienne d'une arène. Note préliminaire. Sel. Soil, 11-29.
4. Biau D, (1990):Terre et Tiers-Monde, Programme de Recherches Expérimentales en Coopération (REXCOOP) Programme interministériel, pp8-105.
5. Bo Thamdrup, (2000): Bacterial Manganese and Iron Reduction in Aquatic Sediments, Volume 16 of the series Advances in Microbial Ecology pp 41-84
6. Cailleres et al (1982) : Minéralogie des argiles, classification et nomenclature. Edition Masson. Paris, pp 9-115.
7. Grabow W.O.K. (2001) Bacteriophages: Update on application as models for viruses in water. Water SA 27 (2) 251-268.
8. Haramoto E. et al. (2001) Detection of Noroviruses in tapwater in Japan by means of a new method for concentrating enteric viruses in large volumes of freshwater. Applied and Environmental Microbiology 70 (4) 2154-2160.
9. Kreefel (1980): Use of Pedology in the Engineering of Some Fine Graded Soils of Senegal, Bulletin of The International of Engineering Geology ° 22, pp 233-249.
10. Laboratoire des Ponts et Chaussées (L.P.C.) (1979): Bilan Décennal 1968 – 1978. Bulletin de Liaison (Mars – Avril 1979), pp 8-29
11. Lefebvre-Drouet E. et al. (1993): Mobilisation du fer et d'autres éléments minéraux majeurs d'un sol en présence d'acide lactique, Science du sol - 1993 - Vol. 31,1/2,47-58
12. O.R.S.T.O.M., (1986), Séminaire Régional sur les Latérites: Sols, Matériaux, Minéraux, session 1 et 3. Actes du séminaire 21 –27 Janvier, Douala, pp12-90.
13. Randriana N. R. F., (1994):Etude Technico-Economique pour la Production de Briques Stabilisées dans la Réserve de la Biosphère de Mananara – Nord, pp 5-70.
14. Segalen P., (1995): Les sols ferralitiques et leur répartition géographiques et leur répartition géographique. Edition ORSTOM, Collection Etudes et Thèses Paris, tome 3 Chapitre 38 Madagascar, pp 13-98
15. UNESCO, (1983), 25, 26, 27, Janvier 1983, Matériaux Techniques, Composants pour l'habitat Economiques. pp 9-95
16. Vizier J.F, (1983): Etude des phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales à saisons contrastées, Dynamique du fer et différenciation des profils.278p, pp40-158.

WEBOGRAPHIE

17. Baron A., (2015), Application de la spectrométrie infrarouge à l'étude des argiles et ciments hydratés. Les collections du LCPC, Rapports de recherche, www.ifsttar.fr/.../CatalogueRRLCPC.pdf, pp3-32, consulté le 3 mars 2015.
18. Comtes, (2005): Études pédologiques | Irda, www.irda.qc.ca/fr/outils-et.../etudes-pedologiques/, consulté le 24 Janvier 2014
19. ENCPB, 2002:Spectrophotométrie UV-Visible eduscol.education.fr/rnchimie/chi_gen/.../2_uv.pdf, consulté le 04 Avril 2015.
20. Kaouritchev. (2010):Manuel Pratique de Pedologie - Livronauta, [www.livronauta.com.br/livro-I_Kaouritchev-Manuel_...editora Editions Mir seboLivrariaOsorioem Curitiba](http://www.livronauta.com.br/livro-I_Kaouritchev-Manuel_...editora%20Educa%20Mir%20seboLivrariaOsorioemCuritiba), consulté le 10 janvier 2014
21. Lafont R., (2005) : Techniques spectroscopiques, Spectromètre UV-Visible, Biologie et Multimédia- Université Pierre et Marie Curie-UFR de Biologie, www.snv.jussieu.fr/bmedia/lafont/spectro/C1.html, consulté le 10 janvier 2015.
22. Morin D., (2013) : Biotechnologies dans la métallurgie extractive – Microbiologie et extraction des métaux, www.techniques-ingenieur.fr/.../métallurgie-extractive..., Référence M2238, consulté 03 Mars 2014.

23. Munch J.C. et Ottow J.C.G.(2010): Réduction bactérienne des oxydes ferriques amorphes et cristallisés, Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr – 2010, consulté le 12 janvier 2015.
24. Oshiki, (2013): Nitrate-Dependent Ferrous Iron Oxidation by Anaerobic ..., National Center for biotechnology Information. www.ncbi.nlm.nih.gov/..., consulté le 13 décembre 2014.