ANNALES DE L'UNIVERSITE MARIEN NGOUABI

Sciences et Techniques

VOL. 21 – Numéro spécial – ANNEES 2022

ISSN: 1815 – 4433 **www.annales-umng.org**

Indexation: Google Scholar

ANNALES
DE L'UNIVERSITE MARIEN NGOUABI
SCIENCES ET TECHNIQUES

VOLUME 21, NUMERO SPECIAL, ANNEES 2022 **www.annales-umng.org**

Directeur de publication :
G. ONDZOTTO

Rédacteur en chef :
J. GOMA-TCHIMBAKALA

Rédacteur en chef adjoint
B. M'PASSI-MABIALA

Comité de lecture
A.A. ABENA (Brazzaville)
JK. AFFIAN (Abidjan)
S. AKE (Abidjan)
M. BATCHI (Brazzaville)
C. BOUKA BIONA (Brazzaville)
M. DIATEWA (Brazzaville)
S. ENZONGA YOCA (Brazzaville)
F. HONTINFINDE (Cotonou)
K. KANGNI (Abidjan)
T. C. KOFANE (Yaoundé)
B. MABIALA (Brazzaville)
F. MASSAMBA (Kwazulu Natal)
F. MBEMBA (Brazzaville)
P. S. MOUSSOUNDA (Brazzaville)
V. NGOKA (Brazzaville)
J. M. B. NDJAKA (Yaoundé)
E. OKASSA (Brazzaville)
P. ONGOKA (Brazzaville)
J. M. OUAMBA (Brazzaville)
A. SAYA (Brazzaville)
J-W. TAO (Toulouse)

Comité de rédaction
F. BOUDZOUMOU (Brazzaville)
G. KISSITA (Brazzaville)
M. NZIKOU (Brazzaville)

Webmestre:
R. D. ANKY

Administration – Rédaction :
Université Marien NGOUABI
Direction de la Recherche
B.P. 69, Brazzaville – Congo
E-mail : annales@umng.cg

ISSN : 1815 - 4433

SOMMAIRE

1 **Action des radiations de la lumière visible dans l'amélioration de la résistance des bioplastiques à base de patates douces.**
A. H. W. NAKAVOUA, E. OUENADIO
.

8 **Désinfection de l'eau du fleuve Djoué par l'énergie solaire (SODIS : water solar disinfection) avec la mise en œuvre d'un dispositif amélioré**
G. M. DZONDO, E. P. MOUMBONDO KOUMBA, G. NGOMA, F. E. MOUTOULA BOULA

14 **Valorisation des sous-produits de cacao par la production d'engrais organiques**
L. NGAMPIKA, S. L. H. DJIMI, J-M. NZIKOU

21 **Variations saisonnières des paramètres hydrologiques des cours d'eau du bassin versant de la Loutete dans la Bouenza (République du Congo) : impacts climatiques sur le régime des cours d'eau**
G. BASSAKOUAHOU, U. GAMPIO MBILOU, H. OBAMI-ONDON, M. NGOUALA MABONZO

29 **Apport des systèmes d'informations géographiques dans la connaissance des aquifères du système précambrien inferieur au sud-ouest de la République du Congo**
M. NGOUALA MABONZO, H. OBAMI-ONDON

35 **Caractérisation hydrogéologique et approche d'un model conceptuel de l'aquifère de la cuvette congolaise, République du Congo**
N. J. LEBELA MOUAKOUMBAT, U. MBILOU GAMPIO, H. OBAMI-ONDON, G. MOUKANDI NKAYA, R. R. NIERE

43 **Antenne micro-ruban a ondes de fuite a substrat photonique**
C. G. L. NKOUKA MOUKENGUE, NZONZOLO, B. MAFOUNA KIMINOU, A. MANKITI FATI.

48 **Convergence entre la fibre optique et la technologie 5G**
A. MANKITI FATI, P. MOUKALA MPELE, A. PASI BENGI MASATA

55 **Interface d'électronique de puissance universelle (IEPU) pour les ressources de production décentralisée**
E. G. KOULAKOUMOUNA M.

66 **Caractérisation des agglomérats des fines particules par combinaison des techniques numériques de la géométrie algorithmique et la méthode de Monte-Carlo : détermination de la morphologie, de la compacité et de la porosité**
M. NGOMO, A. KIMBONGUILA

84 **Apport du formalisme des graphes conceptuels pour la sélection intelligente des matériaux de construction routière**
S. NDINGA OKINA, L. AHOUET, F. TAHILLANDIER, D. BREYSSE, P. LOUZOLO-KIMBEMBE

92 **A novel dispersed particle gel strengthened Alkali/Surfactant/Polymer combination flooding system for enhanced oil recovery**
V. FOUTOU TSIBA, AZIZULLAH SHAIKH, LI JIAMING, NING'S SUN, NING'S YANG, GUANG ZHAO, CAILI DAI

Conférence internationale
de la chaire Unesco en Sciences de l'Ingénieur de l'ENSP
CICUSI
Décembre 2022

Préface

La Conférence Internationale de la Chaire Unesco en Sciences de l'Ingénieur (CICUSI) de l'École Nationale Supérieure Polytechnique (ENSP) de Brazzaville a été organisée les 14 et 15 décembre à Brazzaville sur le thème « Environnement et Développement Durable ».

Elle a bénéficié du soutien de l'UNESCO à travers son Programme de participation dans les activités des États membres (2020-2021), de l'Université Marien Ngouabi, du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de l'Innovation Technologique ainsi que du Ministère de l'Énergie et de l'Hydraulique.

L'objectif de la Conférence était de réunir la communauté scientifique francophone émanant des programmes de recherche sur l'« Environnement et le développement durable » afin de permettre les échanges de points de vue et de tenter de proposer des solutions autour des cinq thèmes abordés, à savoir :

- Énergie et environnement ;
- Contrôle qualité des aliments ;
- Gestion des procédés Industriels ;
- Ponts et infrastructures.

Ce numéro spécial des Annales de l'Université Marien Ngouabi recueille 12 articles, sélectionnés parmi les communications livrées durant la conférence, qui a réuni 98 participants parmi lesquels 31 femmes et 67 hommes.
Les contraintes sur les conditions sanitaires liées à la pandémie du Covid-19 ont entrainé l'annulation de la venue des participants extérieurs. De même, la possibilité d'une participation virtuelle mise en place durant le déroulement des activités n'a pu bénéficier aux chercheurs de la sous-région. Un site web a été mis en place pour la promotion numérique de la CICUSI avec l'URL www.cicusi.umng.cg.

A l'issue des travaux, les participants se sont félicités du déroulement des activités ainsi que des échanges effectués. Ils ont, dans leur grande majorité, émis le vœu que l'évènement se perpétue et que la CICUSI soit érigée en une tribune qui permettra à la communauté scientifique de présenter ses travaux de façon périodique.

Le Comité d'organisation de la CICUSI prend acte de cette volonté des participants et espère œuvrer pour sa réalisation.

Le Comité d'organisation de la CICUSI

Comité d'organisation

1. **Coordination :**
   - Président : Pr NZIKOU Jean Mathurin, Responsable de la CUSI
   - Vice-Présidents :

     Pr LILONGA-BOYENGA Désiré, Responsable du laboratoire GEE

     Dr DZONDO GADET Michel, Responsable du laboratoire IMSA

     Dr EDOURA GAENA Roch Boris, Membre du laboratoire GPI

     Dr TATHY Christian, Responsable du laboratoire MEI
   - Rapporteur : Dr TATHY Christian
2. **Commission scientifique :**

   Pour le IMSA : Dr DZONDO GADET Michel, Responsable du laboratoire IMSA

   Pour le GPI : Pr NZIKOU Jean Mathurin, Responsable du laboratoire GPI

   Pour le MEI : Dr TATHY Christian, Responsable du laboratoire MEI

   Pour le MEI : Dr KIMBONGUILA Adolphe, membre du laboratoire MEI

   Pour le GEE : Dr NZONZOLO, Membre du laboratoire GEE

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 1-6
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

ACTION DES RADIATIONS DE LA LUMIÈRE VISIBLE DANS L'AMÉLIORATION DE LA RÉSISTANCE DES BIOPLASTIQUES À BASE DE PATATES DOUCES

A. H. W. NAKAVOUA[1], E. OUENADIO[2]

1.Laboratory of Natural Substances Chemistry (IRSEN),
BP 389, Brazzaville, Congo
2.Marien Ngouabi University, EcoleNormaleSuperieurePolitechnique (ENSP),
Laboratory for the Valorisation of Agri-resources,
Brazzaville, Congo

E-mail: a.nakavoua@lycee-saintexbrazza.org

RESUME

La solidité des bioplastiques à base d'amidon est un défit, nous avons essayé de vaincre cette limite par utilisation des rayonnements électromagnétiques dans le domaine du visible. Les bioplastiques rétrogrades obtenus par synthèse ont été soumis aux radiations d'une lampe à incandescence de type Edison. Un réseau réticulé est obtenu au sein de la matrice du bioplastique atténuant considérablement l'hygroscopie habituelle de l'amidon et augmentant la capacité à résister à la rupture. Après ce comportement positif, les bioplastiques ont été colorés afin d'optimiser l'action des radiations lumineuses. Les résultats montrent un bioplastique plus solide et compact. Les bioplastiques colorés en vert affichent les meilleures performances dans l'optimisation de la résistance.

Mots-clés : *vieillissement ; Bioplastique ; Ipomea batata ; Stress-photonique*

ABSTRACT

The strength of starch-based bioplastics is a challenge, we have tried to overcome this limit by using electromagnetic radiation in the visible range. The retrograde bioplastics obtained by synthesis were subjected to the radiations of an incandescent lamp of the Edison type. A crosslinked network is obtained within the matrix of the bioplastic, considerably reducing the usual hygroscopy of starch and increasing the capacity to resist breakage. After this positive behavior, the bioplastics were stained in order to optimize the action of light radiation. The results show a more solid and compact bioplastic. Bioplastics colored green show the best performance in optimizing strength

Mots-clés: *aging; Bioplastic; Ipomeabatata; Photonic stress.*

INTRODUCTION

Les plastiques offrent un large spectre de propriétés et d'applications et constituent aujourd'hui un matériau important voire incontournable pour de nombreuses branches industrielles [1]. La demande mondiale ne cesse d'augmenter, mais également, les exigences en terme de rendement et de qualité de ce groupe de matières.

La course vers les bioplastiques représente pour des pays ayant une forte diversité en agro-ressources un défi majeur dans la valorisation de leurs productions des produits amylasés [2], ceci est accentué par le désir d'un développement durable et d'une plus grande protection du climat.

Nos plastiques bio ont été obtenus a partir de l'amidon de patate douce, aliment saisonnier certes mais très apprécier des Congolais par son gout sucré très prononcé en comparaison avec les tubercules ou d'autres racines à amidon [3]. Cette racine très riche en sucre réducteur donne un amidon très peu étudié, ce qui confère à ce travail un léger caractère empirique notamment dans son aspect production de plastiques bio rétrogradés à base de patate douce.

Il faut cependant souligner que les résultats obtenus au cours de ces différents travaux nous ont édifié mais aussi confirment qu'une des débouchées de la filaire des patates douces peut être celle explorée par nos centres d'intérêts qui ont suscités ce travail.

1. Matériel et Méthodes :

1.1. Matériel végétal

Notre étude s'est faite sur des patates douces (ipomea batata) à peau jaune vendu sur le marché total de toute provenance. Les patates choisies bonne qualité organoleptique ; toutes celles qui étaient endommagées ont été écartées.

1.2. Extraction de l'amidon

L'amidon utilisé pour la synthèse de bioplastique a été extrait de la pulpe de patate douce (ipomea batata) à peau jaune, procurée sur la place du marché TOTAL de Brazzaville.

Après réception de la matière (patate douce), celle-ci est nettoyée et pelée avant d'être râpée. La pulpe râpée ainsi récupérée est placée dans un récipient dans lequel on ajoute de l'eau potable, le tout ayant été bien mélangé à l'aide d'une cuillère. Ce mélange a ensuite été filtré à l'aide d'une passoire. Le filtrat obtenu est soumis à une décantation et 2heures plus tard le surnageant est retiré à l'aide d'une pipette ; l'amidon obtenu sèche à l'air libre pendant deux jours [4].

1.3. Elaboration des bioplastiques

Pour élaborer nos films plastiques nous avons :

- Préparé dans une casserole, 300ml d'eau distillée, 10 ml de glycérol et 15 g d'amidon ;
- Mélangé puis porté le tout à ébullition jusqu'à ce qu'il devienne épais et translucide;
- Ajouté 2g de colorant alimentaire et poursuivi le chauffage pendant 10min sans arrêter de remuer à l'aide d'une spatule en bois [4] ;
- Disposé la plaque de verre sur la paillasse et versé le mélange encore chaud et liquide ;

laissé refroidir et 1h pour laisser s'échapper les bulles puis placer à l'étuve à 100°C pendant 24h.

1.4. Echantillonnage :

On a deux types d'échantillons : Type A ; bioplastique de forme circulaire 3,5 cm de diamètre. Type B ; bioplastique en forme de rectangle de dimensions 10cm de longueur et 2cm de largeur.

1.5. Resistance en fonction de la masse

Cette caractéristique nous permet de juger la résistance mécanique de nos films. Nous avons découpé le film plastique de dimension 10cm de longueur et 2cm de largeur. Puis découpé du papier de mêmes dimensions que l'on a fixé à l'échantillon de films à l'aide d'une colle, en laissant déborder quelques centimètres de plastique vers le haut qui sera accroché à une pince.

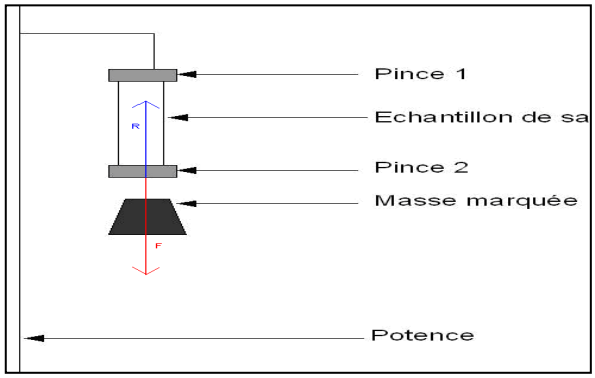


***Fig 1** : Dispositif ayant permis d'obtenir la tension de rupture, Thèse jbilou Fouzia 2011 [5]*

Aux centimètres de papier débordant vers le bas ont étés accrochées différentes masses. Toutes les 10 minutes une nouvelle masse a été accrochée (supérieure à la précédente) après mesure de la longueur du film plastique. Tout ceci a été réalisé selon le dispositif de la figure 1.

1.6. Comportement face aux radiations.

L'enceinte de vieillissement est un dispositif conçu spécialement pour modéliser le vieillissement (fig. 2) solaire sur nos échantillons de bioplastiques. C'est une caisse en bois de 15,6 m3 de volume dont l'intérieur est revêtu d'une nappe plastique noire. Sur la face supérieure est placée une lampe à incandescence à 15cm de l'échantillon reliée à un câble électrique branché à un régulateur de tension électrique de sorte que l'alimentation de la lampe soit indiquée tout au long de l'expérience.

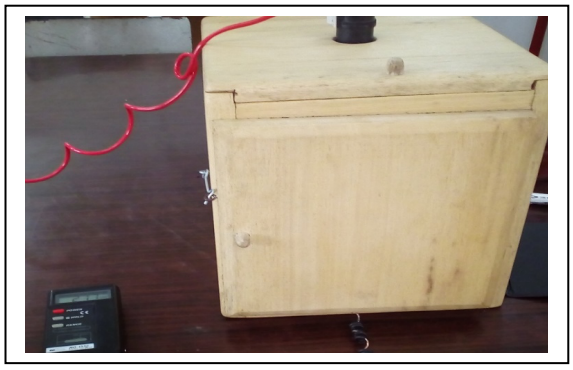


***Fig.2** : Enceinte de vieillissement laboratoire, LVAR, ENSP, juillet 2017*

Les différents échantillons ont été découpés en rondelles de 3.5 cm de diamètre à l'aide d'un cylindre de diamètre intérieur 3.5 cm. Le cercle obtenu est placé dans l'enceinte sur le morceau de vitre de NACO servant de portoir au sein de l'enceinte situé à 15 cm de la lampe Edison. On note la température interne Ti aussitôt après fermeture de l'enceinte. On ferme le circuit à l'aide d'un interrupteur placé en amont de la lampe celle-ci est laissée en fonctionnement pendant 20 min. On relève de nouveau la température interne Tf avant d'ouvrir l'enceinte afin de procéder à la mesure du diamètre de l'échantillon grâce à une règle de précision (lame métallique graduée en demi-millimètre). On reprend le processus jusqu'à ce que l'exposition aux radiations soit de 200 minutes. Au bout de 10 mesures, l'on fait la moyenne des températures afin de déterminer le λmax et déduire le domaine de longueur d'onde atteint grâce à la loi de Wien.

2. Résultats et discussion

2.1. Extraction de l'amidon

L'amidon est très facile à extraire. Le rendement obtenu est de : R = 9,5% Ce qui prouve que la patate douce est une racine riche en amidon. Il faut rappeler que

la patate douce est le plus souvent utilisée comme aliment complémentaire [6]. Ce rendement est plutôt faible par rapport à celui rendu par Tschizembe et al. [7] sur les tubercules de manioc.

2.2. Elaboration des films

Comme la plupart des produits issus d'une rétrogradation de l'amidon en présence d'un plastifiant le glycérol, les films obtenus ont un aspect caoutchouteux. La résistance au toucher nous a semblé convenable [8]. L'épaisseur choisie par aplatissement de deux verres reflète que des modifications sont survenues au sein de la matrice de la macromolécule.

L'incorporation des différents colorants apporte un éclat bien distingué sur la texture de nos sujets, bien que la texture n'ait pas subit de modification palpable.

Le glycérol a servi de plastifiant [9]. Il n'interagit pas chimiquement avec la matrice dans laquelle il est dispersé. Il permet simplement d'augmenter le volume libre entre deux chaînes de polymères pour en diminuer les interactions et ainsi favoriser le mouvement de l'une par rapport à l'autre. La présence de ce plastifiant permet de diminuer le chauffage car le plastifiant a déjà introduit du volume libre entre les chaînes. On passe donc d'un matériau rigide à un plastique. Le film fabriqué est ainsi plus résistant à la tension et à la flexion. De plus, l'ajout de glycérol rend le film plastique transparent, ce qui est bien pratique notamment dans le domaine de l'emballage.

Le chauffage sert à déstructurer l'amidon [10]. Une fois déstructuré, l'amidon mélangé au glycérol peut être mis en forme. Un amidon déstructuré est un amidon qui ne se trouve plus sous sa forme originelle de grain : les polymères le constituant (amylose et amylopectine) sont dispersés. Ainsi nous avons bien obtenu un film plastique.

2.3. Resistance à la rupture

La tension de rupture est une caractéristique importante pour les bioplastiques utilisés comme emballages.

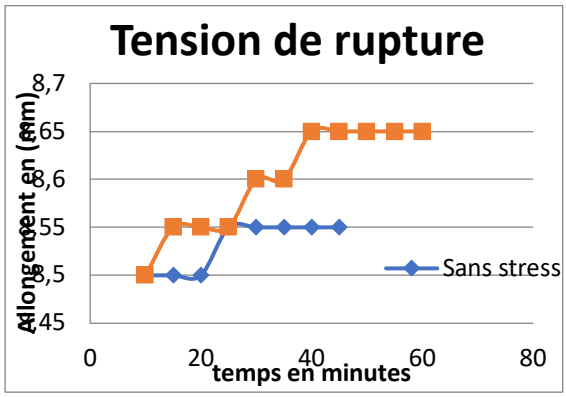


Fig.3 *: Comportement des bioplastiques en fonction de la tension de rupture*

En effet, les emballages se caractérisent entre autres par leur capacité à résister aux différentes contraintes telles que la torsion survenant lors du port de charge.

On remarque (fig. 3) que le bioplastique n'ayant subi aucun stress lumineux se rompt après deux paliers de résistance ; ce qui correspond à une masse de 50 g. Au vu de ce résultat, on peut affirmer que la structure cristalline du bioplastique à base d'amidon de patate douce est assez fragile. Avec cette masse, la rupture intervient au bout de 3 minutes de tension. Toutefois le jeu du stress lumineux améliore considérablement sa capacité de résistance. Cela se traduit par un palier de résistance plus important que celui d'un bioplastique n'ayant pas subi de stress. Le réseau cristallin ainsi amélioré atteint une valeur à la charge égale à 70 g, soit 20 g de plus que le bioplastique n'ayant pas subi de stress. Ceci s'exprime par une amélioration structurale de 40%. Avec une charge de 70g, la rupture intervient au bout de 5 minutes de tension.

Ce résultat permet d'attester que le bioplastique à base d'amidon de patate douce ayant subi une modification

structurale et texturale par stress lumineux peut être utilisé comme emballage.

2.4. Impact des radiations

L'action de la lumière de la lampe Watson cumulée à celle de la température produite par cette lampe produit une diminution du rayon de l'échantillon du bioplastique coupé en cercle, ce résultat est conforme à celui déjà obtenu lors de l'analyse de la tension de rupture. En effet la diminution de rayon constaté est très certainement le fruit de la formation des réticulations qui modifie la matrice du bioplastique [12].

Les courbes affichent deux paliers qui correspondent respectivement à une déshydratation et à une réorganisation structurale de la matrice du bioplastique. Cependant la figure n°4 montre que cette modification ne se réalise pas de façon identique pour les différents bioplastiques synthétisés.

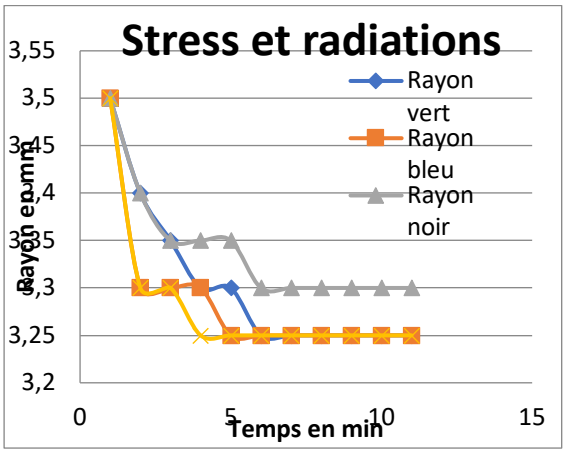


***Fig. 4** : Comportement des bioplastiques en fonction des radiations reçues*

En effet, le bioplastique teinté en noir est celui qui subit moins la réduction du rayon. Le premier palier intervient après une réduction de 0,15 mm. Ce résultat est en accord avec un certain nombre de principes physiques qui montrent qu'un corps noir absorbe de la chaleur. Cette chaleur absorbée est à l'origine de la déshydratation qui s'opère au sein du bioplastique [13]. Ainsi les espaces libérés par les molécules d'eau ont donc probablement facilité la réorganisation du réseau cristallin du bioplastique.

Ainsi la lumière est donc la cause de l'amélioration des propriétés du bioplastique notamment l'élasticité qui est la propriété qu'a un matériau solide à retrouver sa forme d'origine après avoir été déformé, c'est-à-dire que ses dimensions changent, mais il reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête. On peut ainsi conclure que l'absorption des radiations émises de la lampe Edison par le bioplastique noir crée un réarrangement de la position relative des atomes, ou plus généralement des éléments constitutifs du matériau [14].

L'application de la loi de Wien en la matière nous a permis de constater que la longueur d'onde maximale absorbée par le bioplastique est de λ max = 7982,78 nm ceci n'étant qu'une moyenne obtenue à partir des différentes températures récoltées lors de cette analyse.

Le bioplastique incolore est celui qui affiche la réduction la plus rapide et un premier palier très court. Ce résultat confirme les conclusions précédentes. En effet, le bioplastique ayant une couleur au départ beige absorbe très peu de chaleur ce qui ne favorise pas la déshydratation donc ne libère pas assez les molécules d'eau. Tout se passe comme si les molécules d'eau accumulent le peu de chaleur absorbée par le bioplastique et subissent une évaporation rapide d'où le court premier palier. D'autre part, le bioplastique diffuse toutes les radiations émises par la lampe Edison ce qui défavorise la formation des réticulations car les radiations responsables de cette action n'atteignent pas la matrice du bioplastique d'où le faible raccourcissement du rayon. La loi de Wien donne un λ_{max} de7982,78nm qui traduit en effet une faible absorption.

L'analyse des échantillons bleu et vert révèle un comportement divergent. En

effet, l'échantillon bleu a le même comportement que l'échantillon incolore, un raccourcissement lent mais cependant son premier palier est cohérent avec l'échantillon noir ce qui laisse penser qu'il absorbe beaucoup de chaleur comme l'échantillon noir. Ce résultat est en accord avec le spectre de la lampe Edison riche en radiation à forte longueur d'ondes, mais aussi avec la valeur du λ_{max} = 7897,80nm obtenue par la loi de Wien.

L'échantillon vert subit une lente cinétique de raccourcissement et affiche un comportement identique à celui de l'échantillon incolore avec un premier palier court comme celui de l'échantillon incolore, ce résultat en accord avec le spectre de la lampe Edison riche en radiations rouge confirme nos précédentes conclusions.

En effet, un objet de couleur verte absorbe de façon maximale les radiations rouges notamment magenta [15] ce qui explique un nombre croissant de réticulations formées dans le bioplastique de cette couleur.

En général ces résultats nous permettent de dire que dans le cas d'une utilisation industrielle, les bioplastiques à base de patates douces donneraient des meilleures performances en étant colorés notamment en vert car cet échantillon donne un comportement intermédiaire entre l'incolore et le noir.

3. Conclusion

L'objectif principale de notre travail a été d'élaborer des bios films à base d'amidon de patate douce ; respectueux de l'environnement et ayant des bonnes propriétés mécaniques et physiques. Pour cela, nous avons procéder à l'extraction de l'amidon de patate douce dont le rendement s'élevait à 9,5 %. Nous avons ensuite synthétisé le bio plastique à partir de cet amidon.

Les bio plastiques obtenue présentaient un aspect caoutchouteux et peu translucide. Après avoir mesuré certaines caractéristiques, nous avons constaté que les bioplastiques présentaient un caractère très hydrophile et de faibles propriétés mécaniques qui influent sur leur dégradation naturelle.

Pour améliorer les propriétés des bios films obtenus, nous avons étudiés leur comportement face aux radiations lumineuses. Ensuite, nous avons effectué une comparaison entre les bios films ayant subi le stress lumineux et ceux qui n'ont subi aucun stress. Ceci nous a permis de constater que la lumière et /ou la chaleur rendaient nos bio films plus résistants. Toutefois, des études plus approfondies sont nécessaires pour améliorer les propriétés mécaniques de ces bios films.

4. Références bibliographiques.

[1] Djetoui, Z. and Djerboua, F. (2012) Preparation d'un Polymere Thermoplastique Biodegradable a based'Amidon de Mais. In 3eme Conference Internationale sur le Soudage , le CND et l 'Industrie des Materiaux et Alliages (IC-NDT-MI'12).

[2] Mufeng, L.N.D., Batiango, J.N., Ndongala, C.M. and Ndyanabo, J.T.M. (2020) Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture. Revue Africaine d 'Environnement et d'Agriculture , 3, 121-128.

[3] Vodouhe-Egueh, S., Alidou, C., Aboudou, K. and Soumanou, M.M. (2017) Formulation de biscuits a base de farine de ble enrichie a la farine de patate douce a chair orange. Afrique Science , 13, 405-416.

[4] Belili, C.P. (2015) THESE elaboration et caracterisation des biofilms, 75-82.

[5] Fouzia, J. (2011) THESE Elaboration de materiaux a base de farine de mais: evaluation et comprehension des relations entre structure et cinetique de biodegradation,

50-80.

[6] Boula, E.F.M., Mananga, V., Elenga, M. and Kinkela, T. (2016) Etude des habitudes alimentaires des menages de Brazzaville en vue de la lutte contre la carence en vitamine

A. Journal of Applied Biosciences , 97, 9174-9186.

https://doi.org/10.4314/jab.v97i1.4

[7] Tshizembe, D.M., Jadika, C.T., Ngeleka, T.T., Mbaji, A.K.N., Bongali, A.B. and Mutombo, S.B. (2018) valuation des clones de manioc pulpe jaune pour leur teneur en carotene, rendements en tubercules frais et teneur en matire sche Ngandajika en Republique Democratique du Congo. Journal of Applied Biosciences, 124, 12497-12505.

https://doi.org/10.4314/jab.v124i1.11

[8] Merchat, M. and Foret, C. (2021) 9 Les biofilms dans les circuits de refroidissement industriels. In: Lors, C., Feugeas, F. and Tribollet, B., Eds., Interactions Materiaux -

Microorganismes, EDP Sciences, Les Ulis, 189-214.

https://doi.org/10.1051/978-2-7598-2112-9.c011

[9] Fouilloux, A. (2019) Formulations du glycerol pour l ’amelioration et l ’elargissement des proprietes de fonction du film de caseinate de sodium (Doctoral dissertation,

Lyon).

[10] Boumerdassi, K. (2016) Elaboration et Caracterisation de materiaux rigides a base d’amidon-g -bis acrylamide et renforts polysaccharides (Doctoral dissertation, Universite

M’hamed Bougara de Boumerdes, Departement de Gen).

[11] Podshivalov, A., Besson, F., Budtova, T. and Bronnikov, S. (2018) Morphology and Improved Impact Strength of Cellulose Acetate Butyrate Blended with Polyethylene Copolymer. Express Polymer Letters , 12, 856-866.

https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2018.74

[12] Hammache, Y., Serier, A. and Chaoui, S. (2020) The Effect of Thermoplastic Starch on the Properties of Polypropylene/High Density Polyethylene Blend Reinforced by Nano-Clay. Materials Research Expres s, 7, Article ID: 025308.

https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab7270

[13] Rivadeneira-Velasco, K.E., Utreras-Silva, C.A., Diaz-Barrios, A., Sommer-Marquez, A.E., Tafur, J.P. and Michell, R.M. (2021) Green Nanocomposites Based on Thermoplastic Starch: A Review. Polymers , 13, 3227.

https://doi.org/10.3390/polym13193227

[14] Dutta, N., Hazarika, S. and Maji, T.K. (2021) Study on the Role of Tannic Acid-

Calcium Oxide Adduct as a Green Heat Stabilizer as Well as Reinforcing Filler in

the Bio-Based Hybrid Polyvinyl Chloride-Thermoplastic Starch Polymer Composite.

Polymer Engineering & Science , 61, 2339-2348.

https://doi.org/10.1002/pen.25761

[15] Praud, R. (2021) La photoprotection, de la photosensibilite a la phototoxicite. Revue Francophone d’Orthoptie .
https://doi.org/10.1016/j.rfo.2020.10.001

1.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 8-13
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

DESINFECTION DE L'EAU DU FLEUVE DJOUE PAR L'ENERGIE SOLAIRE (SODIS : WATER SOLAR DISINFECTION) AVEC LA MISE EN ŒUVRE D'UN DISPOSITIF AMELIORE.

M. DZONDO-GADET [1], E. P. MOUMBONDO KOUMBA[1], G. NGOMA [2] , F. E. MOUTOULA BOULA [3]

1. *Laboratoire d'Ingénierie Moléculaire et Sensorielle des Aliments IMSA. ENSP/UMNG*
2. *Laboratoire des techniques industrielles et énergétiques à l'institut national en sciences de l'ingénieur, innovation et technologie INRSIIT*
3. *Laboratoire de la Congolaise des Eaux LCDE*

Brazzaville, Congo

E-mail: a.nakavoua@lycee-saintexbrazza.org

RESUME

L'accessibilité à l'eau potable reste un enjeu majeur pour les pays africains . La désinfection de l'eau est réalisée par ajout des hypochlorites ou par chauffage. Pour la première fois au CONGO, nous proposons un dispositif SODIS amélioré(recouvert de plexiglas)., plus efficace pour la désinfection de l'eau à moindre coût. L'étude permet d'évaluer l'efficacité du dispositif SODIS amélioré

L'eau fleuve du Djoué est exposée 2 à 4 heures suivant des contenants de 1L et de 10 L soit en plastique , soit en verre. L'eau traitée est filtrée sur membrane. L'ensemencement a lieur sur CAA (Chromogène coliforme agar). L'irradiation moyenne mesurée est de 750 W/m^2. Les Températures moyennes relevées sont de 43°C (dispositif usuel) et 66°C (dispositif amélioré). La charge initiale de coliformes est de 623.000 CFU/100 mL. Dans les récipients de 1 L , en 2 h elle passe à 116500 CFU/100 mL dans le plastiqué ; soit 81,3% d'élimination et à 62 colonies dans le récipient en verre soit 99,99%. Au bout de 4h, il reste 58. 250 CFU/100 mL dans le plastique soit une diminution de 91,1% et 0 colonie dans le verre soit 100% d'élimination. Dans les bouteilles à 10 L, en 4 h elle passe à 91900 CFU/100 mL dans le plastiqué ; soit 85,25 d'élimination et à 71.400 CFU/100 mL dans le volume en verre soit 88,5%. L'eau traitée puis reposée jusqu'à 3 jours ne redonne aucune colonie.

Mots-clés : *SODIS, désinfection, eau, coliformes*.

ABSTRACT

Accessibility to drinking water remains a major issue for African countries. Water disinfection is carried out by adding hypochlorites or by heating. For the first time in CONGO, we offer an improved SODIS device (covered with plexiglass), more effective for water disinfection at a lower cost. Study evaluates the effectiveness of the improved SODIS device

The river water of the Djoué is exposed 2 to 4 hours following containers of 1L and 10 L either plastic or glass. The treated water is filtered on a membrane. Bacteria culture was on CAA (Chromogenic coliform agar). The average measured irradiation is 750 W/m ^{2}. The temperatures ranged from 43°C (usual device) to 66°C (improved device) during the experiences. The initial coliform level was 623,000 CFU/100 mL (T0). In 1 L

containers, during 2 hours le level fall down to 116,500 CFU/ 100 mL in the plasticized; leading to 81.3% elimination. In the same time the coliform level shift to 62 colonies in the glass container leading to 99.99% of elimination. After 4 hours, there are 58,250 CFU/100 mL in plastic leading to 91.1% of elimination and 0 colony in glass container leading to total elimination (100%). For containers of 10 L, after 4 hours the level shift to 91,900 CFU / 100 mL in the plasticized; leading to 85.25 % of elimination and to 71,400 CFU/100 mL in the glass leading to 88.5% of elimination. The treated water stored up to 3 days does not restore any colony in culture.

Mots-clés: *SODIS, disinfection, water, coliform*

INTRODUCTION

L'accessibilité à l'eau potable reste un enjeu majeur pour les pays africains ou les pays pauvres de la planète. Quand bien même l'eau peut être obtenue dans des rivières ou par forage, il faut d'ores et déjà s'assurer de la qualité physico-chimique et microbiologique de celle-ci.

L'accessibilité à l'eau potable est encore une denrée rare car 66% en zone urbaine et 47% en zone rurale ont accès à l'eau potable (Byrne et al. 2011).

Ce système SODIS (water solar disinfection) commence à Londres en 1870, revisité par Acra et al. au Liban dans les années 1970. Il est connu pour détruire les bactéries et inactiver les virus (Wegelin et al. 1994).

Traditionnellement, la désinfection de l'eau est réalisée par ajout des hypochlorites ou par chauffage engendrant un coût pour les ménages fragiles. Pour la première fois au CONGO, nous proposons un dispositif SODIS amélioré, plus efficace pour la désinfection de l'eau à moindre coût. L'étude permet d'évaluer l'efficacité du dispositif SODIS au CONGO.

Matériel et méthodes

Le SODIS amélioré (recouvert de plexiglas) est conçu et réalisé à l'institut national de recherche en science de l'ingénieur INRSIIT (Fig. 1A)

Les mesures de radiation, hygrométrie et température sont réalisées sur un. Solarimètre, thermomètre, hygromètre multimètre Lafayete DT-8820.

L'eau est puisée au pont du Djoué directement dans le fleuve dans des bidons de 25 L ; puis conditionnée dans des récipients de 1 L et de 10 L (Fig. 1 B)

Nous disposons de 8 lots expérimentaux

Les Essais (4 lots) de 1 L et 10 L en plastique et en verre sur SODIS modifié pour 2 et 4 heures.

Les lots sont réalisés 6 fois et testés autant de fois.

La filtration de l'eau est réalisée par le système à pompe Kif LAB LABOFORT. L'ensemencement par disque est réalisé sur le milieu de culture CCA : Chromogène coliforme agar. Les colonies CFU (colony forming unit) sont dénombrées avec la loupe G X 10.

Fig. 1 *: A. Dispositif SODIS amélioré équipé d'un couvercle en plexiglas*

Fig. 1 *: B. Lots expérimentaux de 1 L et de 10L*

Résultats

1. L'irradiation moyenne mesurée par est de 750 W/m^2.
2. Les Températures moyennes relevées sont de 43°C (dispositif usuel) et 66°C (dispositif amélioré),
3. La charge initiale de coliformes est de 623.000 colonies. Dans les récipients de 1 L (Fig 2 A, B), en 2 h elle passe à 116500 colonies dans le plastiqué ; soit 81,3% d'élimination et à 62 colonies dans le récipient en verre soit 99,99%. Au bout de 4h, il reste 58. 250 colonies dans le plastique soit une diminution de 91,1% et 0 colonie dans le verre soit 100% d'élimination (Moumbondo, 2021).
4. Dans les bouteilles à 10 L L (Fig. 3 A, B), en 4 h elle passe à 91900 colonies dans le plastiqué ; soit 85,25 d'élimination et à 71.400 colonies dans le volume en verre soit 88,5%(Moumbondo, 2021).
   Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux de Keane et al. 1994 en terme d'élimination des bactéries.
5. L'eau traitée puis reposée jusqu'à 3 jours ne redonne aucune colonie.

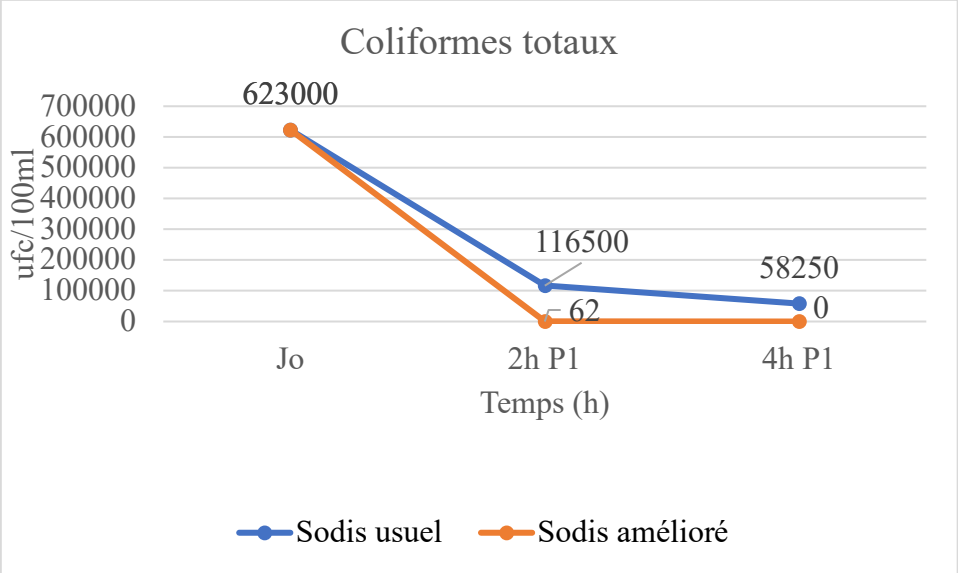


***Fig. 2. A**. Elimination des germes dans les matériaux plastiques, volume 1 L*

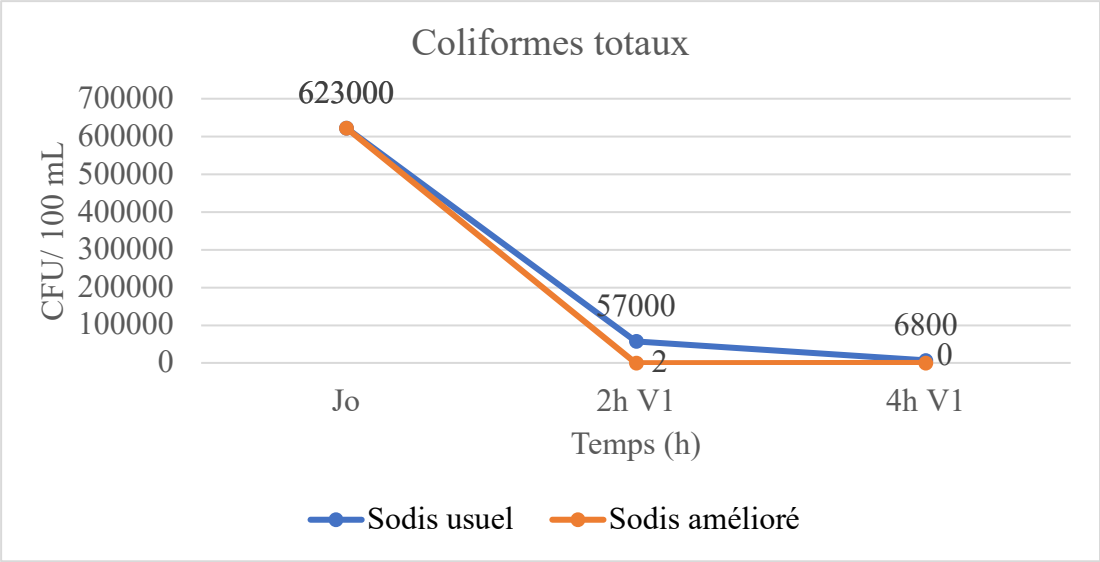


***Fig. 2. B**. Elimination des germes dans les matériaux verre, volume 1 L*

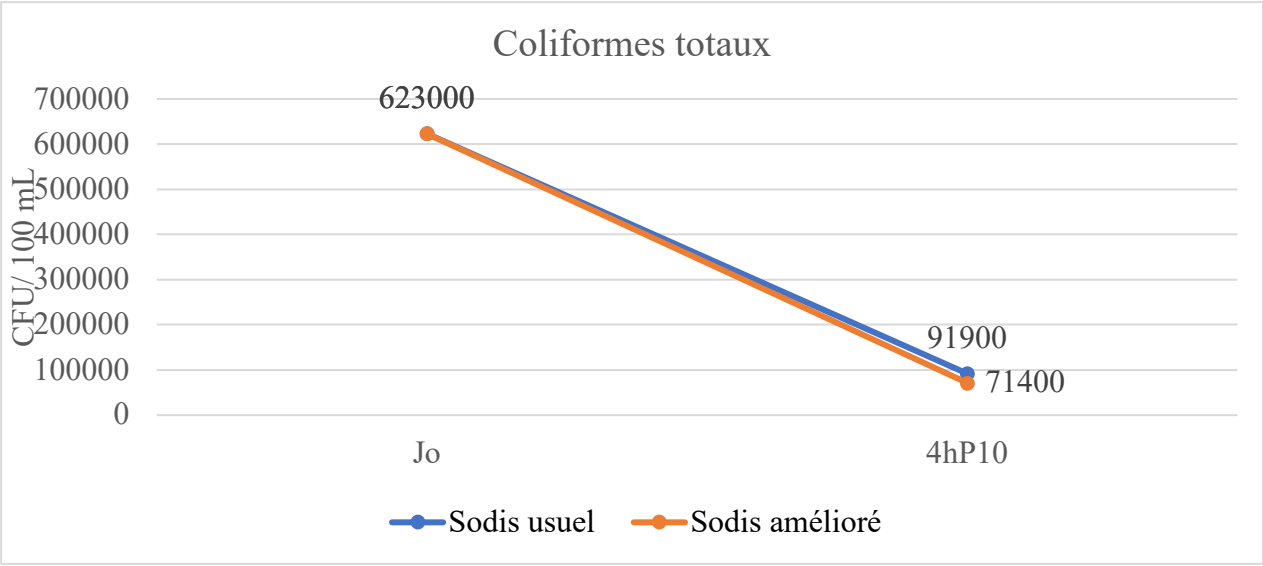


***Fig. 3. A**. Elimination des germes dans les matériaux plastiques, volume 10 L*

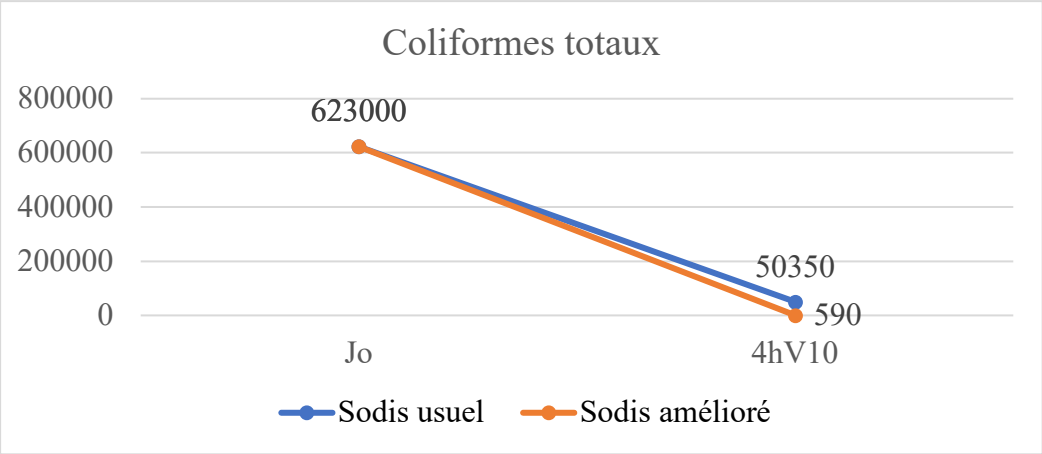


***Fig. 3. B**. Elimination des germes dans les matériaux en Verre, volume 10 L*

Conclusion

Le dispositif de SODIS amélioré facilite la désinfection de l'eau. Dans les récipients de volume réduit l'élimination des coliformes fécaux est totale. Les récipients en verre sont plus sensibles à l'agent destructeur et , est donc meilleur que le plastique dans la désinfection de l'eau.

Les germes détruits ne connaissent pas le phénomène de revivification.

L'expérimentation doit être poursuivie en milieu rural ave possibilité de dénombrement des spores et des virus.

Références bibliographiques

1. Byrne A, Pilar A. Fernandez-Ibañez, Patrick S. M. Dunlop, Dheaya M. A. Alrousan, Jeremy W. J. Hamilton. 2011. "Photocatalytic Enhancement for Solar Disinfection of Water: A Review", *International Journal of Photoenergy*, vol. 2011, Article ID 798051, 12 pages,. https://doi.org/10.1155/2011/798051

2. Wegelin M , Canonica S, Mechsner K, Fleischmann T, Pesaro F, Metzler A. 1994. Solar water disinfection : scope of process and analysis of radiation experiments. J. water SRT-aqua. Vol 43, N° 3, PP 154-169.

3. Keane A., Kevin . McGuigan G, Pilar Fernández Ibáñez , M. Inmaculada Polo-López, Anthony J. Byrne, Patrick S.M. Dunlop, Kevin O'Shea, Dionysios D. Dionysiouf, and Suresh C. Pillai. 2014. Solar photocatalysis for water disinfection: Materials and reactor design. Catalysis science and technology 4(5) 1211-1226.

4. Moumbondo Koumba P. E. 2021. Désinfection de l'eau par le solaire (SODIS : water solar disinfection) avec la mise en œuvre d'un dispositif amélioré. Mémoire I. I. A. ENSP , Université Marien Ngouabi. CONGO . PP 68.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 14-20
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

VALORISATION DES SOUS-PRODUITS DE CACAO PAR LA PRODUCTION D'ENGRAIS ORGANIQUES

L. NGAMPIKA[1], S. L. H. DJIMI[1], J-M. NZIKOU[1]

[1] Université Marien NGOUABI,
ENSP, LGPI, BP-69,
Brazzaville, République du Congo

E-mail:

RESUME

Nous traitons dans cet article de la valorisation des sous produits de cacao par la production d'engrais organiques. Nous proposons donc la valorisation des cabosses de cacao qui représentent environ 60% de la masse du fruit. Cette valorisation consiste en la proposition d'un procédé permettant de produire de l'engrais organique. La méthodologie employée a été celle de fabriquer l'engrais en passant par les opérations unitaires telles que le broyage de la cabosse, le séchage et le tamisage du broyat obtenu. Les résultats du broyage donnent un rendement de 92%. Les analyses sur le taux des cendres ont donné une valeur de 11,75. Les tests de « planting » sur les épinards et le cacao a montré qu'au bout de deux semaines, la reprise de croissance des produits était évidente après l'utilisation de ces engrais. Un panel de cultivateurs ayant fait des tests sur leurs produits et apprécié l'engrais sur sa présentation 4/5 a donné une note de 4, son efficacité 3/5 a donné une note supérieure à 4 et son utilisation qui a été noté à 4 et au-delà par les 5 utilisateurs..

Mots-clés : *: Engrais organiques, déchets, cacao, valorisation*

ABSTRACT

In this article, we deal with the valorization of cocoa by-products through the production of organic fertilizers. We therefore propose the valorization of cocoa pods, which represent about 60% of the fruit mass. This valorization consists of proposing a process for producing organic fertilizer. The methodology used was that of manufacturing the fertiliser by going through unitary operations such as grinding the pod, drying and sieving the crushed material obtained. The results of the crushing gave a yield of 92%. The analysis of the ash content gave a value of 11.75. Planting tests on spinach and cocoa showed that after two weeks, the growth of the products was evident after the use of these fertilizers. A panel of growers who tested their products and appreciated the fertilizer on its 4/5 presentation gave a score of 4, its 3/5 efficiency gave a score of more than 4 and its use was rated at 4 and above by the 5 users.

Mots-clés: *Organic fertilizer, waste, cocoa, valorization*

INTRODUCTION

De son nom scientifique *Theobroma cacao*, le cacao est très prisé pour la production du chocolat à partir de ses fèves, ainsi les autres parties de la plante comme les cabosses (qui renferment en moyenne 60% du poids du fruit) sont jetés et constitue les déchets. De manière générale, les auteurs signalent que les cabosses sont riches en azote, phosphore, potassium, des minéraux appelés éléments majeurs des plantes et donc importants pour la fertilisation des sols.

Dans le domaine agricole, l'un des principaux facteurs qui causent des dommages à l'environnement est de nos jours, la pollution causée par l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides pour la croissance des espèces, ainsi que pour le contrôle des insectes nuisibles et des microorganismes phytopathogènes. Cette utilisation a permis une amélioration des rendements agricoles. Au cours de ces dernières années, les pesticides chimiques et les engrais minéraux ont été l'objet de critiques substantielles en raison de leurs effets défavorables sur l'environnement. Leur application en agriculture, selon Biego et *al*. (2009), suscite de nombreuses inquiétudes liées à leur toxicité ainsi qu'à leur influence négative sur la santé humaine. Au regard de ce qui précède et relativement au sujet de la nocivité des substances chimiques et minérales, la conscience environnementale pose, aujourd'hui, avec une certaine acuité la question de la sécurité chimique (ou risque chimique). Elle préconise une approche de lutte intégrée associant différentes techniques et méthodes dans la gestion des ravageurs des cultures et des vecteurs de maladies. À cet égard, la lutte biologique utilisant les engrais organiques, notamment ceux à base de cabosses de cacao, constituera une alternative intéressante à la lutte chimique.

Les analyses antérieures ayant donc mis à nu, le problème sur l'utilisation des engrais chimiques et minéraux, c'est dans cette mesure que nous nous sommes proposé de mener une étude sur les engrais organiques. En effet, la valorisation des déchets est également aujourd'hui au cœur des soucis environnementaux, et agir sur les déchets est l'une des premières actions à mettre en œuvre dans une démarche environnementale. Nous avons alors abordé ce travail de la valorisation des sous-produits de cacao dans l'objectif principal de produire les engrais organiques à partir des cabosses de cacao. De manière spécifique, il s'agit entre autre de :

- Réaliser un séchage de broyat à partir des cabosses de cacao ;
- De caractériser l'engrais élaboré ;
- Tester l'efficacité du produit élaboré.

1. MATERIEL ET METHODE

1.1. Matériel

Le matériel végétal utilisé pour cette étude a été constitué des cabosses de cacao, connu sous le nom scientifique de *Théobroma cacao L*. achetés dans le département du Niari au Congo Brazzaville.

Figure 1 : Photo du cacao Théobroma cacao L

1.2. Méthode

La réalisation de cette étude s'est déroulée en trois phases :

- Production de l'engrais ;
- Caractérisation de l'engrais ;
- Test d'appréciation de l'engrais.

1.2.1. Production de l'engrais

La Production de l'engrais organique a consisté à réceptionner la matière première, à la traiter et la broyer suivant le diagramme présenté ci-dessous.

1.2.2 Caractérisation de l'engrais

La caractérisation a été effectuée principalement pour la détermination de la teneur en cendres. Le taux de cendres permet de faire l'appréciation sur la pureté du produit et d'évaluer la quantité des minéraux contenu dans l'échantillon. Cette opération a consisté à incinérer l'engrais à une température de 550°C dans un four à moufle à chauffage électrique jusqu'à obtention d'une masse constante. Ce qui a permis de déterminer la teneur en cendres par la formule suivante :

$$\text{Teneur en cendres (\%MS)} = \frac{M2 - M0}{M1 - M0} \times 100$$

Avec :

M0 : masse en gramme du creuset vide

M1 : masse en gramme du creuset chargé d'échantillon de farine

M2 : masse en gramme du creuset chargé en cendres.

1.2.3. Test d'appréciation de l'engrais

Le test d'appréciation des engrais organiques repose sur la réalisation d'analyses sensées attester la qualité de l'engrais conformément aux normes. Le but étant de booster le rendement agricole à l'aide d'engrais naturels, c'est-à-dire apporter aux plantes les nutriments essentiels naturels pour une bonne croissance.

Le principe repose sur rapport fertilisant-fertilisé, il s'agit d'établir les proportions optimales en tenant compte de la matière organique et la surface à fertiliser (le sol). Cinquante grammes d'engrais organique sont dilués dans dix litres d'eau. Cela pour arroser une surface d'environ un mètre carré. Ou encore on réalise une application directe, on applique donc directement l'engrais sur la parcelle à cultiver. Toutefois pour éviter les pertes de produits il est mieux de réaliser le dosage par arrosage. Nous pourrons ainsi, après l'observation des plants qui ont été traités, discuter de l'efficacité des engrais organiques.

- Evaluation de l'efficacité de l'engrais

L'évaluation de l'efficacité de l'engrais a consisté en la vérification analogique du rapport carence/apport. Cela a été rendu possible en créant une carence sur la parcelle et ensuite en faisant un planting. Après que les plantes ont régénéré, nous avions appliqué l'engrais et observé le résultat au bout de 14 jours.

2. RESULTATS

2.1. Elaboration de l'engrais organique

- Rendement de production de l'engrais

Une fois le broyat séché, nous avons obtenu la masse des broyats séchés qui nous a permis d'évaluer la quantité de l'engrais. Pour cela, nous avons déterminé le rendement sur la quantité de l'engrais obtenu présenté dans le tableau I ci-après :

Tableau I : Rendement de l'engrais

Partie du cacao selon le dispositif			**Masse (g)**		**Rendement (%)**
Test 1	Broyat	SH	233	329	93
		Etuve	47		
		Air libre	49		
	Engrais	SH	224	306	
		Etuve	39		
		Air libre	43		
Test 2	Broyat	SH	230	327	92,4
		Etuve	47		
		Air libre	50		
	Engrais	SH	221	302	
		Etuve	39		
		Air libre	42		
Test 3	Broyat	SH	229	326	92,3
		Etuve	49		
		Air libre	48		
	Engrais	SH	223	301	
		Etuve	41		
		Air libre	37		

En partant de la masse des broyats séchés de 329 g, 327 g et 326g, nous avons obtenu l'engrais dont la masse est de 306 g, 302 g et 301 g. La perte enregistrée varie entre de 23 et 25 g. Le rendement en engrais obtenu se situe autour de 92 %, rendement très élevé.

2.2. Caractérisation de l'engrais

Pour déterminer la teneur en cendre de l'engrais, nous avons réalisé deux (2) essais pour trois (3) échantillons, et les résultats sont donnés dans le tableau II.

Tableau II : Teneur en cendre de l'engrais organique

Paramètre \ Essais		1	2	Moyenne	
Teneur en cendre (%)	Echantillon 1	11,15	11,35	11,25	11,75
	Echantillon 2	11,2	11,95	11,575	
	Echantillon	12,75	12,10	12,425	

Ces résultats révèlent une moyenne en teneur en cendres de 11,75, permettant donc de dire que dans l'engrais organique fait à base de cabosse de cacao contient des minéraux, car cette teneur permet de vérifier la pureté du produit et sa contenance en sels minéraux.

- Evaluation de l'efficacité de l'engrais

Les figures 3, 4 et 5 traduisent l'action de l'engrais sur les différentes parcelles.

Figure 3 : Parcelle avant application de l'engrais (mauvaise évolution)

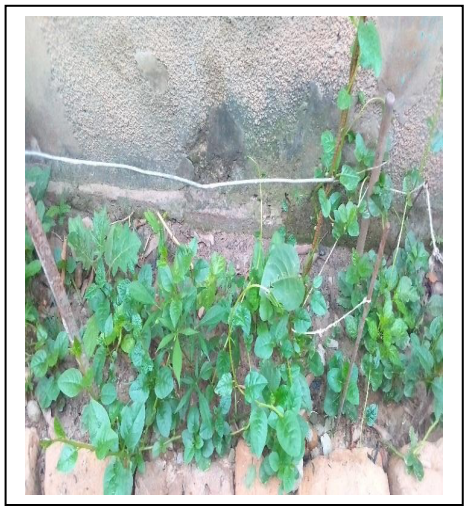


Figure 4 : Parcelle à 2 semaines après application de l'engrais

Figure 5 : Test sur les fèves avec carence et application de l'engrais (14 jours après)

Au niveau de la figure 3, nous observons que l'évolution des plants s'était arrêtée au bout d'un certain temps (plus de 2 semaines), et sur la figure 4 nous observons une reprise de croissance après application de

l'engrais. Cela permet de dire que l'engrais organique fait à partir de cabosses de cacao à pouvoir de fertilisation qu'il conviendrait d'évaluer en détail. Dans les parcelles contenant l'engrais les plants ont poussé et non pour celles des terres neutres, cela affirme que l'engrais nourrit le sol.

Le tableau III ci-dessous présente les résultats relatifs au niveau d'efficacité noté sur 5 de l'engrais.

Tableau III : Niveau d'efficacité de l'engrais

Valeur attribuée / Appréciation	r1	r2	r3	r4	r5
Présentation	4	4	3	4	4
Utilisation	5	4	4	5	5
Efficacité	3	4	2	4	4

Du point de vue de chaque maraicher, l'engrais proposé répond aux exigences maraichères de par sa présentation, son utilisation et son efficacité. Sur l'ensemble des répondants, un seul pense que l'engrais produit est moyennement efficace

CONCLUSION

Ce travail sur la valorisation des cabosses de cacao par l'élaboration de l'engrais en passant par les opérations unitaires telles que le broyage de la cabosse, le séchage et le tamisage du broyat obtenu a permis de se rendre compte que, l'utilisation des déchets donne des résultats intéressants pour 3 avantages :

- économique
- biologique
- utilisable en production agricole ;

La détermination de l'efficacité de l'engrais produit a été faite sur la base de test d'appréciations qualitative et cette efficacité en agriculture s'est avérée positive du fait de l'expérimentation sur terrain d'essai. Ce qui a montré que l'usage des engrais organiques pourra contribuer efficacement au développement d'une agriculture verte et rentable au Congo et ailleurs. La fabrication de ces engrais permettrait donc de réduire sinon éliminer à long terme l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides de synthèse par une production d'engrais organiques. Cette démarche s'enregistre bel et bien dans les actions menées sur la protection de l'environnement

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A.D.A.S., (1983). Les fertilisants organiques, Le courrier du livre, Paris.
2. Agridea ; (2011). Dossier fumure azotée des grandes cultures bio sans bétail.
3. Breune, I., L. Forest, P. Jobin, J. Petit, (2000). La structure du sol, un élément de sa fertilité, Centre de développement d'agrobiologie et Club du CDA, Québec.
4. Raynal-Lacroix C, E Patricia (CTIFL), (2005). Gestion pratique de l'azote, CULTURES LEGUMIERE ET FRAISIER. 80 pages
5. Fontaine L., Toupet A.-L. (2015), Optimiser l'azote en Grandes cultures Bio, AlterAgri. INAO, MAAF ; avril 2016. Guide de lecture des règlements communautaires européens n° 834/2007 et du RCE n° 889/2008.
6. Guillot, (1977), Problèmes de développement de la production cacaoyère dans les districts de Sembé et de Souanké (Congo), Cah.ORSTOM, sér. Sc. Hum, vol. XIV, n°2.
7. Guillot, Problèmes de développement de la production cacaoyère dans les districts de Sembé et

de Souanké, Congo, in Cahiers de I'ORSTOM, série SC. Hum., no 2, 1977, pp.
8. Hérody, Y., (1997). Connaissance du sol, tome 1, Le modèle de base, BRDA Éditions, Charency.
9. Houot S., M.-N. Pons, M. Pradel, E. Savini, A. Tibi; (2014). Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier
10. Jobin, P., Y. Douville, (1996). Engrais verts et cultures intercalaires, Centre de développement d'agrobiologie, Ste-Élisabeth-de-Warwick.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 21-28
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

VARIATIONS SAISONNIERES DES PARAMETRES HYDROLOGIQUES DES COURS D'EAU DU BASSIN VERSANT DE LA LOUTETE DANS LA BOUENZA (REPUBLIQUE DU CONGO) : IMPACTS CLIMATIQUE SUR LE REGIME DES COURS D'EAU

G. BASSAKOUAHOU[1], U. GAMPIO MBILOU[1], H. OBAMI-ONDON[2]
M. NGOUALA MABONZO[3],

[1]Département de géologie, Faculté des Sciences et Technique (Université Marien Ngouabi), BP 69-Brazzaville, République du Congo
[2] Laboratoire de mécanique, Energétique et Ingénierie, Ecole Nationale polytechnique, BP 69- Brazzaville, République du Congo
[3]Département de Géographie, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, BP 69-Brazzaville, République du Congo
E-mail: bassakouahougilbrt@gmail.com

RESUME

Le but visé par cette étude est de déterminer les variations saisonnières des paramètres hydrologiques des cours d'eau du bassin versant de la Loutété. Avec une superficie de 68,403 km², le bassin versant est drainé par la rivière principale, la Loutété et ses affluents. Les paramètres hydrologiques étudiés, à savoir, le débit, la profondeur ont montré quelques variations étroitement liées aux précipitations. Dans la période actuelle, les précipitations mensuelles (moyennes mensuelles) vont de 129,11mm à 302,54mm ce rythme de précipitation entraine une diminution des hauteurs d'eau et débits dans l'ensemble du bassin versant. Les cours d'eau subissent une période d'étiage très marquée pendant la saison sèche (juin-septembre) et moins marquée au mois de Janvier-février. Compte tenu de la croissance démographique dans la zone, les gestionnaires des ressources en eau devraient prendre des mesures adéquates pour permettre la pérennisation de cette ressource vitale.

Mots-clés : *Variation saisonnière, bassin versant de la Loutété, paramètres hydrologiques*

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the seasonal variations in the hydrological parameters of the rivers in the Loutété watershed. With an area of 68,403 km2, the watershed is drained by the main river, Loutété and its tributaries. The hydrological parameters studied, namely flow, depth showed some variations closely related to precipitation. In the current period, monthly rainfall (monthly averages) ranges from 129.11mm to 302.54mm this precipitation rate leads to a decrease in water levels and flows throughout the watershed. Rivers undergo a very marked low water period during the dry season (June-September) and less marked in January-February. Given the population growth in the area, water resource managers should take adequate measures to enable the sustainability of this vital resource.

Mots-clés: *Seasonal variation, Loutété watershed, hydrological parameters*

INTRODUCTION

La population mondiale augmente d'environ 80 millions de personnes par an (UNESCO 2008), cette augmentation entraine une augmentation de la demande en eau d'environ 64 milliards de mètre cube par an. De plus l'augmentation de température planétaire va intensifier ou accélérer le cycle hydrologique mondiale, ce qui aura une grande influence sur le régime pluviométrique (Bernard chocat, 2015), qui à son tour affecterait le régime des cours d'eau. Les cours d'eau constituent une importante ressource en eau douce facile à exploiter. Cependant, la pérennisation de cette ressource implique une bonne politique de gestion centrée sur la connaissance de régime de fonctionnement des cours d'eau. Malheureusement en République du Congo, malgré son réseau hydrographique dense, les données sur le fonctionnement hydrologique des cours d'eau sont très insignifiantes. Cette problématique a suscité l'intérêt de l'étude sur les variations saisonnières des cours d'eau du bassin versant de la Loutété. Situé au sud de la République du Congo entre 13°53'-13°45 longitude Est et 4°25'-4°15' latitude sud, avec une superficie de 68,403km^2 (figure 1) ce bassin représente la source d'alimentation en eau de la population. Le bassin versant de la Loutété est drainé par la rivière Loutété qui constitue les cours d'eau principal, avec ses affluents (Moukanda, confluent, Moubidi, chapelle, Mandzassi, Silowa, Loutété). Les majeures parties des affluents sont temporaires.

Le climat de type tropical humide qui règne dans la zone d'étude, influence largement le régime de fonctionnement des cours d'eau.

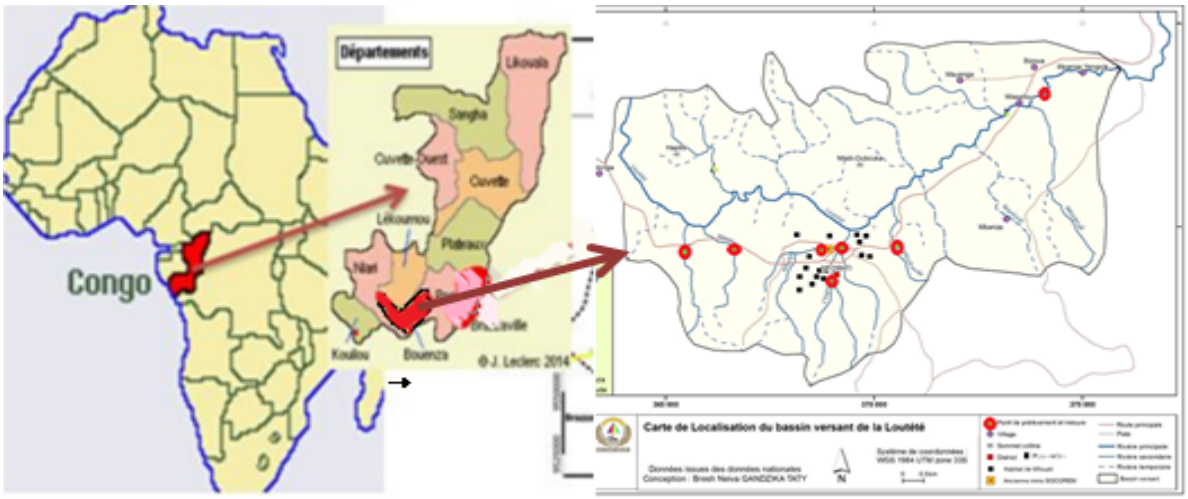


Figure 1. Localisation du bassin versant et points de mesures

2. Problématique

Le manque des structures de captage des eaux souterraines fait que la population de la zone d'étude se concentre sur l'exploitation des eaux de surface. Les exploitations agropastorales s'installent généralement à proximité des cours d'eau pour profiter de la facilité d'installation des dispositifs d'irrigation à partir du captage d'eau de surface Aquasta (2005). Les conditions géologiques et géomorphologiques malheureusement font que le bassin versant présente un réseau hydrographique constitué en majeur partie des cours d'eau temporaires. Les quelques cours d'eau permanentes subissent des variations importantes au cours des saisons. Cette étude se propose donc de voir l'impact climatique sur les variations saisonnières

des cours d'eau du bassin versant de la Loutété.

3. Méthodologie

Pour mener cette étude, un certain nombre d'outils ont été utilisé (tableau 1).

Tableau1. *Equipement de terrain.*

Équipement	Utilité
Corde et double décamètre	Délimiter les tronçons
Chronomètre	Déterminer le temps de déplacement du flotteur
Bouteille plastique (0,5 l)	Servant de flotteur
Machette	Aménager le site expérimental
Ordinateur et logiciels	Traitement des données
GPS	Localisation des stations

Après le choix des sites des mesures, des dispositifs ont été placé pour les lectures des hauteurs d'eau sur les échelles limnimétrique. Les débits par contre ont été déterminés par la méthode de jaugeage au flotteur lesté, une méthode choisie à cause des faibles profondeurs et des vitesses des cours. Car le moulinet serait inadapté. La méthode est simple, car elle n'exige pas beaucoup d'équipement. Un chronomètre, avec un flotteur suffissent pour déterminer le temps d'écoulement, en suite, calculer la vite de surface **Vs= L/t**, pour en déduire la vitesse

moyenne d'écoulement **Vms= Vs x 0,80.** La détermination de la vitesse moyenne permet de déduire le débit Q. le débit est le produit de la surface mouillée (**S= L x l**) par la vitesse moyenne : **Q(m^3/s) = Vms x S**. La méthode de jaugeage au flotteur donne des bons résultats (Cumps, 2008 ; Labord, 2009), lorsqu'elle est bien réalisée.

4. Résultats

4.1 Evolution des moyennes mensuelles annuelle de la pluviométrie entre Août 2018-septembre 2019.

Les données des hauteurs de la pluviométrie (figure 2) sont mesurées au sein du bassin à l'aide du pluviomètre installé au cours de l'étude. L'analyse de l'évolution de la pluviométrie montre les mêmes fluctuations avec les indices pluviométriques interannuelles enrégistrées dans d'autres stations synoptiques (stations de Mouyondzi et Dolisie) de 1989 à 2018 (ANAC, 2018). Les indices pluviométriques montrent une période pluvieuse de 7 mois (octobre–septembre) avec une diminution des pluies (janvier-février) et une saison sèche de 4 mois (juin-septembre).

La Fig.2 montre la variation des précipitations mensuelles au sein du bassin versant de la Loutété. Cette figure montre clairement une diminution des pluies entre juin et septembre, ce qui marque la saison sèche.

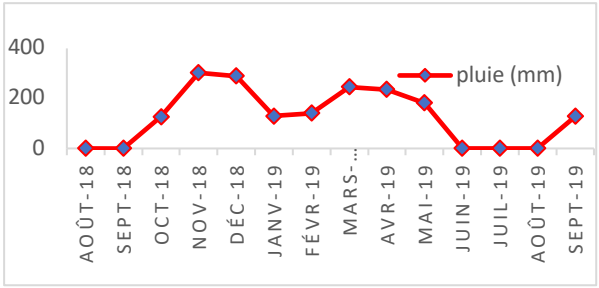


Figure 2. *Variation des précipitations mensuelles au sein du bassin versant de la Loutété (août 2018-sept 2019).*

4.2 Variations des hauteurs d'eau et débits des cours d'eau (août 2018-sept.2019)

4.2 Variations des hauteurs d'eau et débits des cours d'eau (août 2018-sept.2019)

La variation des hauteurs d'eau et débits mesurés et calculés sur les 8 stations est présentée sur les Fig. 3 et 4. L'analyse montre des variations saisonnières des paramètres hydrologiques (hauteurs et

débits) calquées sur le rythme du régime pluviométrique. Dans tout le bassin versant de la Loutété, les plans d'eau (Fig.3) varient d'une côte moyenne de 11cm (0,11m) à 156cm (1,56m), les débits varient d'une moyenne de 1,86 m^3/s à 116,4 m^3/s (Fig.4).

La remonté du niveau d'eau et débit commence généralement au début du mois d'octobre. Mais une particularité est observée en septembre 2019, où nous avons noté la remonté du plan d'eau au niveau du bassin versant. Cette particularité est bien occasionnée par la précocité des pluies qui ont commencé en mi-septembre pour s'installer définitivement au mois d'octobre 2019. Les cours d'eau n'ayant pas la même taille, ils montrent une évolution variant d'une station à une autre. Les côtes moyennes et débits maximales des cours d'eau sont enregistrés au mois de novembre et mars (saison de pluies). Les valeurs les plus faibles hauteurs d'eau et débits sont observées pendant la saison sèche (au mois d'août). Les mois de janvier et février enregistrent un ralentissement des hauteurs d'eau et débit.

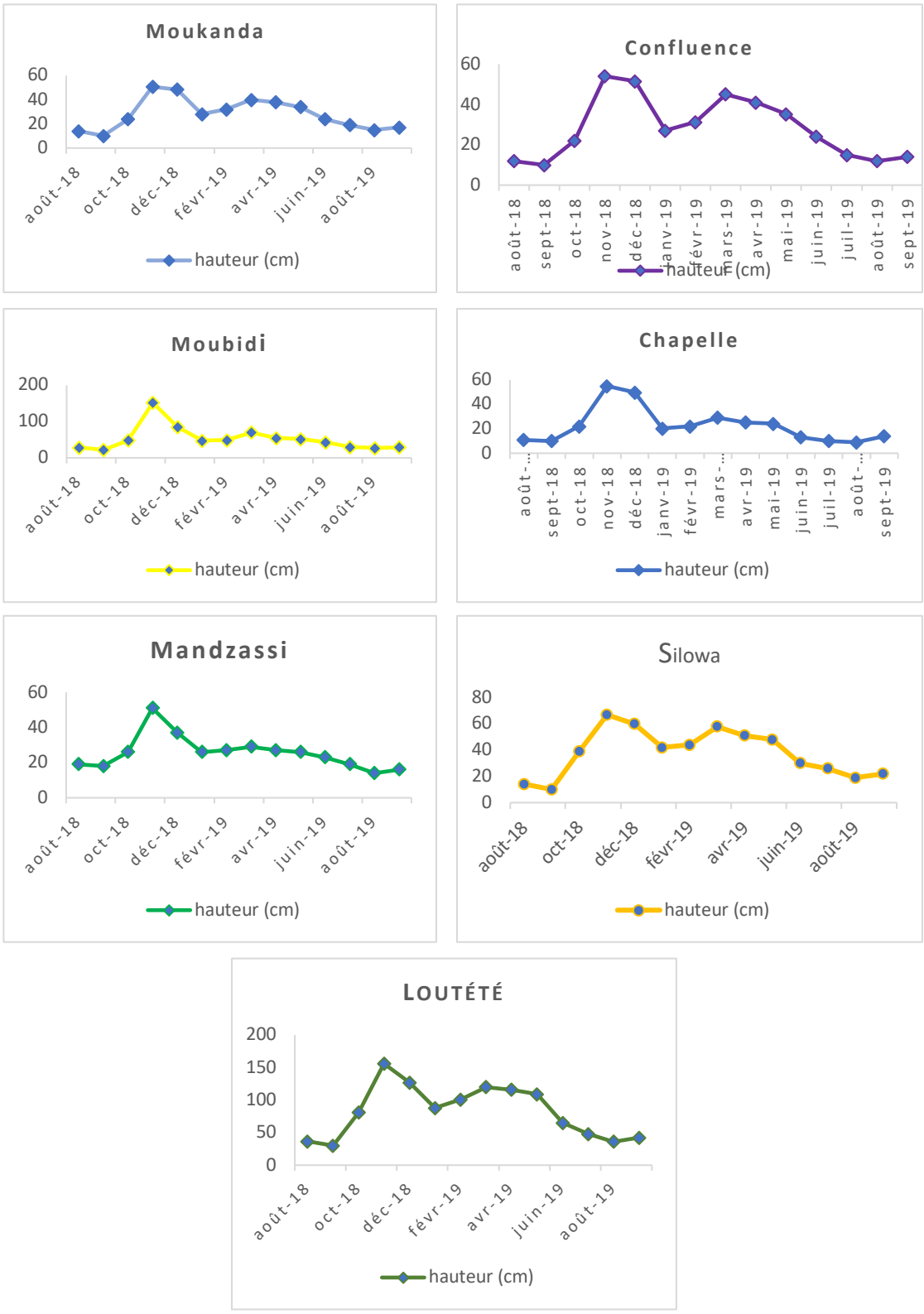


Figure 3. Variation des hauteurs d'eau au cours de l'année 2018-2019

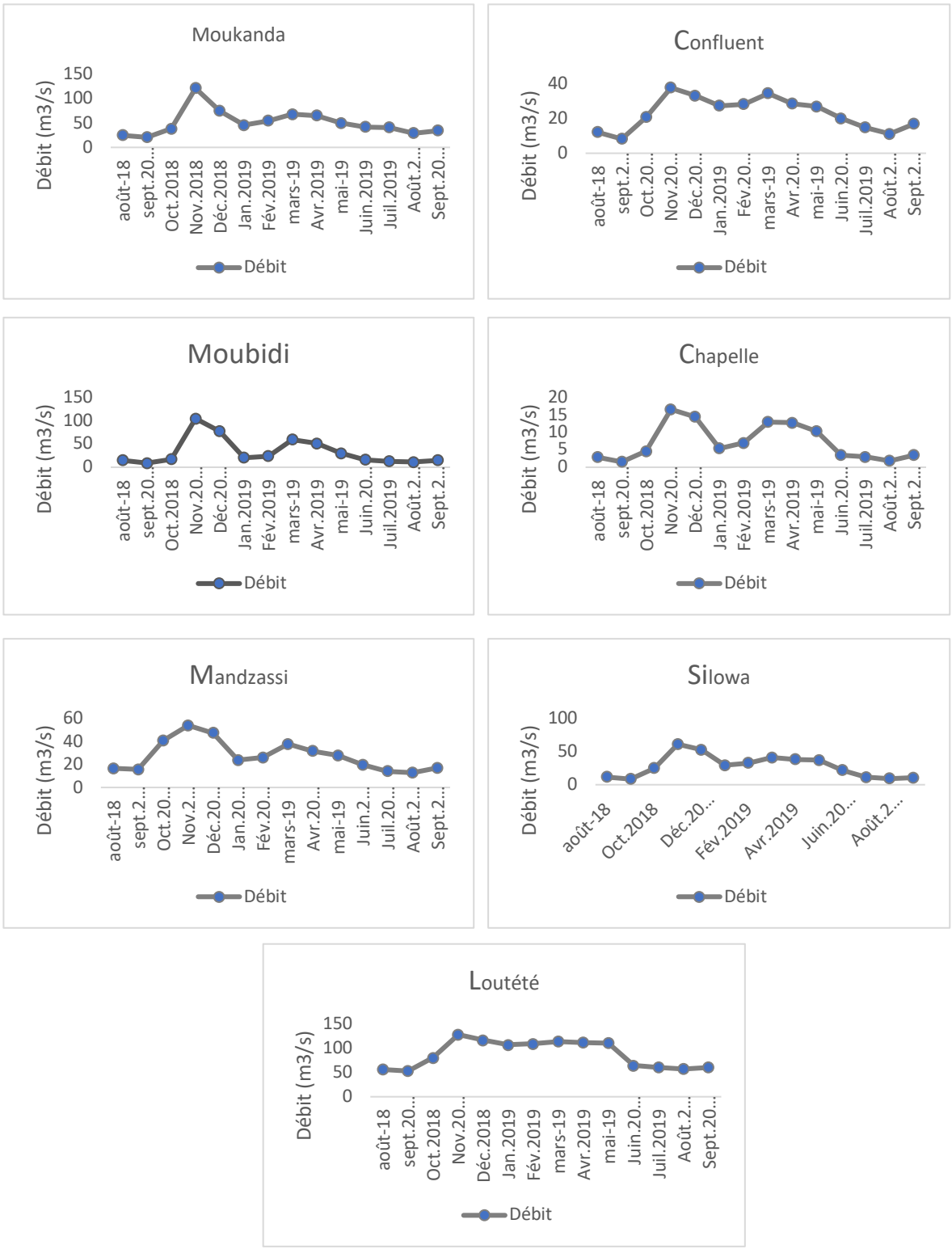


Figure 4. Variation des débits au cours de l'année 2018-2019

5. Discussion

Les variations des paramètres hydrologiques (hauteurs et débits), au rythme du régime des précipitations, montrent deux phases : une phase de hautes eaux et une phase de basses eaux ; entre les deux phases s'intercales une phase intermédiaire caractérisée par un fléchissement des pluies, conduisant ainsi à la diminution des hauteurs d'eau et débits dans tout le bassin versant.

La phase de hautes eaux débute au moins d'octobre avec des moyennes maximales des hauteurs d'eau et débits au mois de novembre. Les travaux de Hiez (1965) menés dans le bassin du Niari montrent que les côtes moyennes des plans d'eau et débits suivant des années, peuvent être observées au mois de décembre et mars voire avril. Toutefois les valeurs des hauteurs et débits de mars et avril restent inférieurs aux valeurs de novembre ou décembre qui caractérisent la grande saison de pluies.

La phase des basses eaux débute au mois de juin jusqu'au mois de septembre (grande saison sèche). Le fléchissement des hauteurs et débits (janvier-février) traduit la petite saison sèche occasionnée par un ralentissement des pluies. Les résultats de notre travail mais aussi des travaux menés par Hiez (1965), font remarqués deux périodes d'étiage ; une période plus sévère de juin à septembre, caractérisée par des hauteurs d'eau et débits très faibles et une période d'étiage moins marquée, de janvier à février. La comparaison des résultats avec ceux observés dans le plateau Batéké (Olivry, 1967 ; Mbilou et al, 2016) et dans le plateau de Mbé (Obami-Ondo, 2020), montrent que le régime d'écoulement des rivières du bassin versant de la Loutété est très irrégulier. Par contre les régimes des cours d'eau des plateaux Batéké et de plateau de Mbé sont réguliers. La différence se traduit à la nature des sols et des formations géologiques. Les rivières du bassin versant de la Loutété et de l'ensemble du bassin supérieur du Niari (dont fait partie le bassin de la Loutété) coulent sur les sols issus des formations du Schisto-calcaire. Tandis que les rivières des plateaux Batété et Mbé coulent sur les sols issus des sables.

La sévérité d'étiage observé au niveau du bassin versant de la Loutété montre qu'un prolongement de la saison sèche entrainerait le tarissement des cours d'eau (Hiez, 1965).

6. Conclusion

Au cours de notre étude, nous avons pu noter les variations des paramètres hydrologiques des cours d'eau du bassin versant de la Loutété, qui subissent une influence climatique.

Les variations saisonnières des hauteurs d'eau et débits font remarquées deux périodes : une période de hautes eau ou période des crus (d'octobre à décembre et mars à mai) et une période de basses eaux ou décrus traduisant l'étiage (de juin à septembre). Au niveau de la période de hautes eaux se trouve une période de ralentissement des hauteurs d'eau et débits (janvier- février). Le régime d'écoulement cours d'eau du bassin versant de la Loutété est irrégulier car le bassin connait des variations avec un étiage très marqué occasionné par l'absence totale des précipitations. Le tarissement des cours d'eau en période d'étiage est régulier. Les valeurs des hauteurs d'eau et débits sont très faibles au mois d'août (Hiez, 1965).

Références.

1. UNESCO., (2008) : L'eau dans un monde qui change. 3eme Rapport mondial des USA, 16p.
2. Bernard Chocat., (2015) : changement climatique, ça va changer quoi pour l'eau et que peut-on faire (LGCIE-INSALYON).

3. Freddy Cumps (FHR) (2008): Hydro-métrie, mesure de débits liquide et solide. Borgerhout, 87p.
4. J.P. Labord., (2009) : Eléments d'hydro-logie de surface. *Université de Nice-Sophia-Antipolis*, 209p.
5. G. Hiez, B. Billon, P. Touchebeauf et P. Chaupeeron (1965) : Quinze ans de travaux et recherches dans le pays du Niari *Hydrologie du bassin supérieur du Niari(en amont de Loudima).ORSTOM section hydrologie.* 167p.
6. J-C.Olivry,(1967) : Régime hydrogéo-logieque des rivières des plateaux Batéké, Léfini, Nkéni, Alima, Rapport ORSTOM Brazzaville-Annuaires hydrogéologiques.
7. G. Mbilou Urbain, A. Masdingam et D. Nganga (2016) : Variation spatio-temporelle des paramètres hydro-dynamiques de la rivière
8. N'djili à Djambala (République du Congo). Vol 3, n°007, 17p.
9. H. Obami-Ondo. (2020) : Etude du fonctionnement hydrodynamique et hydro-chimique de l'aquifère profond du plateau de Mbé au Pool-Nord, 150p.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 29-34
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

APPORT DES SYSTEMES D'INFORMATIONS GEOGRAPHIQUES DANS LA CONNAISSANCE DES AQUIFERES DU SYSTEME PRECAMBRIEN INFERIEUR AU SUD-OUEST DE LA REPUBLIQUE DU CONGO

M. NGOUALA MABONZO[1], H. OBAMI-ONDON[2]
,
[1]Laboratoire de Géographie, d'Environnement et d'Aménagement (LAGEA),
Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines
[2]Laboratoire Mécanique, Energétique et Ingénierie,
Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
Université Marien Ngouabi, B.P. 69 – Brazzaville

République du Congo
E-mail: medngouala@yahoo.fr

RESUME

Le système précambrien inférieur est situé au sud - ouest de la République du Congo. C'est une zone où existe des aquifères complexes dont la méconnaissance hydrodynamique rend délicate toute prévision sur l'impact de son exploitation. Cette étude qui a été nécessaire pour la constitution d'une base de données en hydrologie souterraine a utilisé des méthodes appropriées afin de modéliser les écoulements souterrains. L'utilisation des systèmes d'informations géographiques (S.I.G) a été orientée vers l'établissement de cartes montrant la morphologie de la surface piézométrique par rapport au relief et/ou la topographie et les sens de l'écoulement des eaux souterraines. Les méthodes utilisées ont consisté à confronter toutes les données existantes de ces aquifères, pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des nappes de ce système. La contribution des systèmes d'informations géographiques (S.I.G) a servi comme outil de synthèse des informations et des hypothèses de fonctionnement. Elle permet ainsi une visualisation globale du fonctionnement des aquifères du système précambrien inférieur.

Mots-clés : *Congo, précambrien inférieur, SIG, Aquifère*

ABSTRACT

The lower Precambrian system is located in the southwest of the Republic of Congo. It is an area where there are complex aquifers whose lack of hydrodynamic knowledge makes any forecast on the impact of its exploitation difficult. This study, which was necessary for the constitution of a database in underground hydrology, used appropriate methods to model underground flows. The use of geographic information systems (S.I.G) has been oriented towards the establishment of maps showing the morphology of the piezometric surface in relation to the relief and/or the topography and the directions of groundwater flow. The methods used consisted in comparing all the existing data of these aquifers, to understand the hydrodynamic functioning of the aquifers of this system. The contribution of geographic information systems (S.I.G) served as a tool for synthesizing information and operating hypotheses. It thus allows a global visualization of the functioning of the aquifers of the lower Precambrian system.

Mots-clés: *Congo, Lower Precambrian, GIS, Aquifer*

INTRODUCTION

Les réservoirs souterrains constituent d'immenses réserves d'eau à composante essentiellement ancienne (fossile). En plus des contraintes techniques, les conditions climatiques extrêmes qui y règnent ne facilitent pas les études s'intéressant aux questions en suspens concernant ces ressources (Adnane et *al.,* 2003). Les systèmes d'Informations Géographiques (SIG) présentent des avantages précieux car ils sont capables à la fois de mémoriser la totalité de l'information disponible et l'interprétation des données voire, faciliter la manipulation (Abourida, 2007).

Les aquifères du système précambrien inférieur constituent une ressource en eau de grande importance au sud-ouest de la République du Congo par la quantité de ses volumes en eaux pour l'ensemble du bassin côtier. Il est de plus en plus sollicité en aval vers la région de Pointe- Noire dans un but essentiellement agricole, industriel et d'alimentation en eau potable (AEP) (Moukandi N'kaya, 2012 ; Ngouala Mabonzo, 2008, Moukolo, 1992 ; Mott Mac Donald et al., 1991); le manque des connaissances sur le fonctionnement hydrodynamique et la baisse du niveau piézométrique dans cet espace géographique devient une situation préoccupante. Au regard de tous ces problèmes, il devenait nécessaire d'entreprendre des travaux de recherche dans l'ensemble des aquifères du système précambrien inférieur. L'acquisition et l'analyse des données de cette zone apportent des compléments d'informations pour la compréhension de l'ensemble du système précambrien inférieur. L'étude de la morphologie de la surface piézométrique de ce système permet de représenter la configuration, la structure et de schématiser les fonctions du réservoir et de son comportement hydrodynamique.

2. Matériel et méthodes

2.1. Cadre général d'étude

Le système précambrien inférieur est situé au sud-ouest de la République du Congo, entre les latitudes 4º13'20'' et 4º33'20''Sud et les longitudes 12º13'20''et 12º 38'20''Est (figure 1). Ce système couvre une superficie de 161, 568 ha et fait partie de deux unités orographiques que constitue la façade maritime du Congo à savoir la chaîne du Mayombe et la plaine côtière (Atlas, 2001).

Du point de vue géologique, le système précambrien inférieur est entièrement constitué de formations de soubassement ayant plusieurs orogenèses d'âge précambrien (Anonyme, 1989 ; Dadet, 1969). Les sols de ce système sont rangés dans la catégorie des sols ferralitiques. Ce système est couvert par une forêt dense humide de terre ferme (Anonyme, 1993 ; Brugiere, 1960).

Son climat est de type tropical humide caractérisé par une alternance de saisons : une saison des pluies d'octobre à mai avec un flétrissement en janvier ou février et une saison sèche presque totalement dépourvue des pluies le reste de l'année (Samba-Kimbata, 2002).

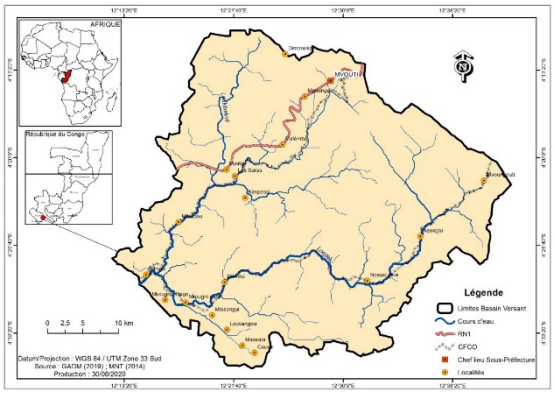


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2.2. Méthode d'étude

La méthodologie consiste à l'intégration et à la représentation des informations cartographiques et descriptives des composantes du milieu dans un SIG en vue d'étudier la morphologie de la nappe des aquifères du système précambrien inférieur.

Ainsi, nous avons créé une base de données à références spatiales contenant des informations qualitatives et quantitatives nécessaires pour ce système.

2.2.1. Collecte des données

Pour la réalisation de cette étude, les données SIG utilisées sont : les données géologiques (stratigraphie), les données topographiques et hydrogéologiques (régime d'exploitation, piézométrie) et les coordonnées géographiques. Ces données collectées sont mises sous forme de fichiers DBF.

2.2.2. Traitement des données

Le traitement des données consiste à les restaurer sous forme de table DBF afin de les rendre utilisables dans le logiciel (ArcGis). Cette informatisation s'effectue en trois phases :

- création de fichier DBF ;
- création d'une base de données cartographiques sous forme d'images et de fichier (shape files) ;
- importation des données par le logiciel ArcGis.

Le logiciel ArcGis a permis de créer les cartes de fond numérisées de la zone d'étude, tirer des images satellitaires et des données cartographiques scannées. Ces cartes numérisées sont superposées avec d'autres couvertures numérisées des différents paramètres hydrodynamiques et hydrogéologiques à l'aide de ce logiciel. Ce logiciel a permis de créer des cartes d'isovaleurs de différents paramètres étudiés.

3. Résultats et discussion

La méthodologie développée dans cette étude utilise des règles qualitatives, des évaluations et une hiérarchisation des paramètres intervenant dans le fonctionnement hydrodynamique de la nappe du système précambrien inférieur. L'ensemble de ces données est intégré dans un système d'informations géographiques pour une meilleure gestion de l'information.

Les données disponibles sur les aquifères, sont tirées des différents forages du système précambrien qui ont été réalisés.

Le contexte hydrogéologique concerne essentiellement tout le système précambrien inférieur, en extrapolant les résultats des forages et des puits pour la superposition dans le système d'informations géographiques, à savoir : l'indicateur disponibilité en eau, les champs captant, les profondeurs des ouvrages (puits d'eau et forages), le niveau piézométrique, altitude. La topographie des différentes couches géologiques du système précambrien inférieur, est reconstituée à partir des isohypses du substratum et du toit de l'aquifère.

3.1. Morphologie de la surface piézométrique de la nappe des aquifères du système précambrien inférieur

L'analyse morphologique de cette carte permet d'identifier deux zones hydrologiques liées à la topographie et/ou au relief du système précambrien inférieur :

- une zone de relief de montagnes et/ou de collines caractérisée par des courbes de niveau fermées qui peut être considérée comme la source d'alimentation de la nappe en eau souterraine des aquifères du système précambrien inférieur ;
- et des zones des plateaux caractérisées par des courbes de niveau espacées qui caractérisent une dépression.

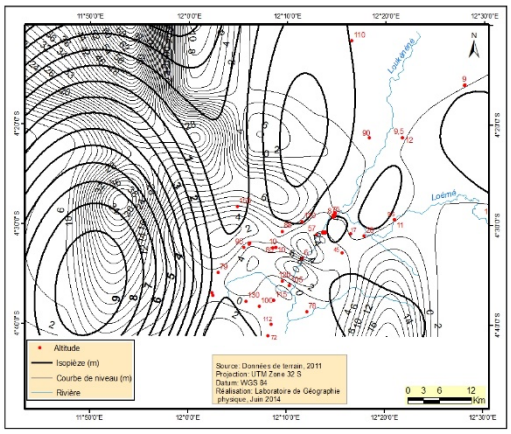


Figure 2 : Carte morphologique de la nappe du système précambrien inférieur

Les zones des reliefs de montagnes et collines traduisent des protubérances et une forte profondeur de la surface piézométrique. Le gradient hydraulique de 0,12 % est l'expression d'un débit d'écoulement important et d'une perméabilité moyenne qui traduit un drainage plus faible que l'alimentation. Cette structure hydrogéologique indique deux types de nappes : une nappe à filets convergents dans la partie amont qui se fait remarquer par la concentration des courbes de niveau et une nappe à filets divergents au sud du bassin versant (figure 2).

3.2. Sens des écoulements souterrains de la nappe du système précambrien inférieur

La figure 3 présente le tracé de la surface piézométrique des aquifères du système précambrien inférieur alimentant le captage de la nappe souterraine. La surface piézométrique est matérialisée par des courbes de niveau piézométrique (isopièzes). Cette région est caractérisée par l'existence des courbes isopièzes incurvées en arc de cercle de rayon et d'espacement variable dont l'ensemble dessine des croissants plus ou moins ouverts. La structure hydrogéologique de cette zone n'impose pas impérieusement le type d'horizon aquifère. Il est possible de tirer de ces dispositions des conclusions sur les caractéristiques de l'écoulement des eaux souterraines. Les courbes à concavité orientée vers l'amont traduisent un haut niveau piézométrique et une forte courbure de certaines courbes de niveau. Le faible gradient hydraulique est l'expression d'un débit important tandis que la faible perméabilité de la région d'étude ne permet pas une bonne recharge de l'aquifère. C'est une région favorable aux captages. C'est une zone de drainage intense.

L'eau des nappes souterraines de ce système circule dans des directions assez variées comme l'indique la figure 3, du fait de l'hétérogénéité du milieu et de la juxtaposition des nappes très localisées. Cela peut s'expliquer aussi par la présence d'un réseau hydrographique très dense bien que certains des niveaux renferment une nappe captive. Il ne s'agit pas d'un aquifère continu, car le comportement général du système est celui d'une nappe libre.

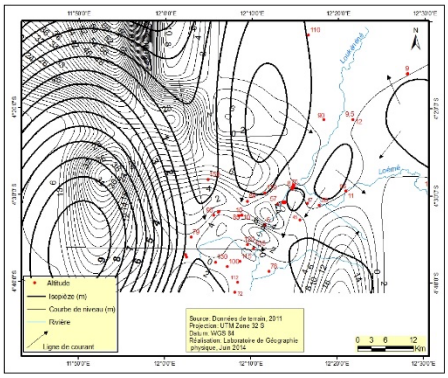


Figure 3 : Circulation générale des eaux souterraines de la nappe du système précambrien inférieur

En général les écoulements souterrains, qui sont gravitaires dans l'ensemble de ce système, suivent les lignes de plus grandes pentes (directions perpendiculaires aux courbes de niveau piézométriques) et indiquent à la figure 3 que la direction des écoulements souterrains se fait généralement de façon convergente ou divergente. On remarque en amont du

captage, un axe drainant très net, orienté approximativement nord-sud, aboutissant au captage ; encadré à l'ouest et l'est par deux arêtes (lignes de partage des eaux souterraines) également bien marquées et constituant les limites de l'aire d'alimentation recherchée. Toute l'eau qui s'écoule à l'intérieur de cette structure géomorphologique bien définie, converge vers le captage et à l'inverse, l'eau en dehors de l'axe peut ne pas y arriver.

Le système précambrien inférieur présente plusieurs aquifères avec des valeurs de transmissivité plus ou moins élevé et de faible coefficient de perméabilité (allant de 0, 001 à 0,02). Ceci laisse entrevoir que la recharge de ces aquifères s'effectue lentement limitant ainsi les ressources en eau souterraine dans ce système surtout dans sa partie nord.

Moukolo (1992) a qualifié le régime des petites rivières de ce système d'irrégulier dépendant en particulier du rythme des précipitations (basses eaux pendant la saison sèche et hautes eaux pendant la saison des pluies. Nos résultats obtenus le confirment.

Les profondeurs du substratum de ces aquifères complexe variant de 72 m à 155 m ont un rôle considérable pour la contribution à la protection de ces nappes contre les différentes sources de pollution au regard des faibles coefficients de perméabilité rencontrés dans la zone.

Conclusion

En conclusion, l'apport des systèmes d'informations géographiques dans la connaissance des aquifères du système précambrien inférieur nous a permis de mettre en évidence l'existence de deux zones hydrologiques liées à son relief. La présence des courbes de niveaux serrées dans sa moitié Ouest témoigne la présence d'une zone de forte pente exprimée par des collines (ou montagnes) d'où partent les sources d'eau ; et les courbes de niveaux écartées dans sa moitié Est exprimant des plateaux avec des bassins d'alimentation ou des dépressions car les écoulements y sont plus abondants dans cette zone.

L'importance des systèmes d'informations géographiques (SIG) dans cette étude s'avère indispensable car, sans ces derniers, il aurait été quasiment impossible de réaliser les analyses, ainsi que toutes les représentations spatiales des données concernant : les isobathes du substratum, les profondeurs du toit, la morphologie, la piézométrie et la circulation générale des eaux souterraines de la nappe des aquifères dans ce système précambrien inférieur. Cette étude nous renseigne que le milieu est hétérogène.

Références bibliographiques

1. Abourida A., (2007) : Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc) par télédétection, isotopie, SIG et modélisation. Thèse Univ. Cadi Ayyad, 146 p.

2. Adnane Moulla S., Abdelhamid Guendotjz, (2003) : Etude des ressources en eau souterraines en zones arides (Sahara Algérien) par les méthodes isotopiques. pp35-42.

3. Anonyme (1989) : Revue des connaissances sur le Mayombe en République Populaire du Congo. Ministère de la recherche scientifique et de l'environnement, UNESCO, PNUD, 343 p.

4. Atlas(2001) : République du Congo. Ed. J.A., Paris pp.12, 14-16, 18, pp. 22-25.

5. Brugiere J.M., (1960) : Examens de trois profils prélevés dans le Mayombe Occidental (Prospection banane de mai 1960). Brazzaville, ORSTOM, 31p.

6. Dadet P., (1969) : Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo Brazzaville au 1/500.000, mémoire du BRGM n°70, Congo Brazzaville, ORSTOM, pp.12-24.

7. Mott Mac Donald, BCEOM, SOGREAH, ORSTOM, (1991) : Évaluation hydrologique de l'Afrique subsaharienne, pays de l'Afrique de l'Ouest. Rapport du pays : Congo. Paris, pp. 30-31 ; 33-34 ; 60-62 ; 74-75.

8. Moukandi - N'Kaya G.D., (2012) : Etude hydrogéologique, hydrochimique in situ et modélisation hydrodynamique du système aquifère du bassin sédimentaire de la région de Pointe - Noire. Thèse de doctorat. Université Marien Ngouabi, Congo-Brazzaville, 132 p + annexe.

9. Moukolo N., (1992) : Hydrogéologie du Congo. Document du BRGM, No 210, éd. BRGM, Orléans, 128p.

10. Ngouala Mabonzo M., (2008) : Etude hydrogéologique de la nappe du bassin supérieur de la Loémé (Mayombe). Mémoire de Maitrise en géographie physique. Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo, 68p

11. Samba-Kimbata M. J., (2002) : Rythme bioclimatique et comportement phénologique de la végétation en République du Congo, in Annales de l'Université Marien Ngouabi, n°3, pp. 81-92.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 35-42
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE ET APPROCHE D'UN MODEL CONCEPTUEL DE L'AQUIFERE DE LA CUVETTE CONGOLAISE, REPUBLIQUE DU CONGO

N. J. LEBELA MOUAKOUMBAT [1], U. MBILOU GAMPIO [2]*, H. OBAMI-ONDON[1]*, G. MOUKANDI NKAYA[1]*, R. R. NIERE [1]**

,

1 Ecole Nationale Polythecnique, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo;
2 Département de Géologie, Facultés des Sciences et Techniques,
Université Marien Ngouabi, Brazzaville,

République du Congo
E-mail : noidalebela91@gmail. com

RESUME

Les aquifères continus du bassin congolais constituent le siège d'importantes nappes phréatiques alimentant de manière réversible le bassin du fleuve Congo ainsi que les nappes phréatiques qu'ils drainent. Ces aquifères contiennent des eaux souterraines qui constituent la principale source d'approvisionnement en eau potable des collectivités de ce secteur. Le besoin en eau étant de plus en plus aigu, ces aquifères ont fait l'objet d'opérations de forage afin de fournir de l'eau potable à ces populations. Les informations issues de ces opérations sont des données qui ont permis d'obtenir des informations relatives à la lithologie, aux paramètres hydrogéologiques de ces aquifères et des informations sur la profondeur et sur les variations latérales de la nappe phréatique. Le but de ce présent travail est de contribuer à la caractérisation hydrogéologique de l'aquifère du bassin de la Cuvette et de la Cuvette- Ouest au nord du Congo Brazzaville via les données issues de l'analyse des fiches techniques des forages réalisés par la Société ASPERBRAS, recueillies à le Ministère des Grands Travaux et de l'Aménagement du Territoire. Cette caractérisation a été réalisée à l'aide du logiciel Visual MODFLOW Flex 2015 couplé au logiciel Surfer 10 et au logiciel Rock Works 17. L'interprétation hydrogéologique des données montre que cet aquifère, constitué essentiellement de sables, de sables argileux et d'argile, est continu, poreux et libre. Cette composition confère à notre aquifère un caractère hétérogène. De plus, une carte piézométrique a été réalisée afin d'indiquer le sens des écoulements d'eau qui se sont avérés d'ouest en est vers les zones les plus basses occupées par les vallées des fleuves et rivières. Le modèle conceptuel montre que la profondeur de l'aquifère diminue considérablement de la Cuvette- Ouest vers la Cuvette.

Mots-clés : *Bassin, sables, hydrogéologie, aquifère alluvial, carte piézométrique*

ABSTRACT

The continuous aquifers of the Congolese basin constitute the seat of significant groundwater tables reversibly feeding the Congo River basin as well as the groundwater tables they drain. These aquifers contain groundwater which is the main source of drinking water for communities in this area. The need for water being more and more acute, these aquifers have been the subject of drilling operations in order to provide drinking water to these populations. The information resulting from these operations is data which made it possible to obtain information relating to the lithology, to the hydrogeological parameters of these aquifers and information on the depth and on the lateral variations of the water table. The purpose of this work is to contribute to the hydrogeological characterization of the aquifer of the basin of the Cuvette and the Cuvette-Ouest in the north of Congo Brazzaville via the data resulting from the analysis of the technical sheets of the drillings carried out by the Company.

ASPERBRAS, collected at the Ministry of Major Works and Regional Planning. This characterization was carried out using Visual MODFLOW Flex 2015 software coupled with Surfer 10 software and Rock Works 17 software. The hydrogeological interpretation of the data shows that this aquifer, consisting essentially of sands, clayey sands and clay , is continuous, porous and free. This composition gives our aquifer a heterogeneous character. In addition, a piezometric map was produced to indicate the direction of the water flows, which turned out to be from west to east towards the lowest areas occupied by the valleys of rivers and rivers. The conceptual model shows that the depth of the aquifer decreases considerably from the Cuvette-Ouest towards the Cuvette.

Mots-clés: *Basin, sands, hydrogeology, alluvial aquifer, piezometric map*

INTRODUCTION

Les récentes études faites au cours de cette dernière décennie, ont montré que l'Afrique disposerait de 9% des ressources renouvelables en eau douce du globe, soit près de 4000 km^3 d'eau par an [1]. Cette abondance trompeuse masque une très grande disparité des ressources et de sérieuses difficultés d'approvisionnement pour au moins 25 pays africains à l'horizon 2025 [1]. Ceci ne met pas en marge la république du Congo Brazzaville qui d'ailleurs se trouve dans cette situation de difficulté d'approvisionnement en eau potable et ce surtout dans les milieux ruraux. En outre des difficultés d'accès à l'eau potable qui se présentent dans notre pays, il y a aussi de nos jours l'aspect du développement des secteurs, économique, industriel et social qui constitue une menace à la qualité et la potabilité des eaux de surface. Cette menace fait de l'eau souterraine une conquête pour bon nombre de pays, voir des états. Elle devient un enjeu mondial. Comparativement aux eaux de surface, les eaux souterraines requièrent d'avantage d'effort d'investigation parce qu'elles obéissent à une structuration géologique donnée. Cette structuration constitue le moteur de la dynamique des écoulements d'eau, d'où l'importance de la connaître et de bien la définir pour une recherche aisée. Il a été prouvé aujourd'hui que dans la plupart des régions du monde, le recours aux ressources en eau souterraine est la voie par excellence pour l'obtention d'une eau exempte de toute pollution ou encore de qualité fiable parce que la qualité des eaux de surface est très souvent sujet à quotient à cause de leur dégradation due aux activités anthropiques. Ceci étant, la caractérisation hydrochimique est aussi une entité importante du domaine hydrique car la chimie des eaux constitue un complément indispensable à l'étude hydrogéologique des nappes et à la gestion des ressources en eau [2]. Il est donc d'une importance capitale d'avoir des connaissances scientifiques préalable du milieu avant la mise en œuvre de tout ouvrage. Les données disponibles sur la situation hydrique des départements de la cuvette et de la cuvette ouest (Figure 1) révèlent que l'aquifère de ce secteur est poreux et continu. Les données collectées à partir des fiches techniques résultant du projet « eau pour tous » du gouvernement congolais piloté par la société Asperbras, nous ont fourni des informations relatives à la lithologie, la piézométrie et la qualité de l'eau dans la zone. Fort de ces données, nous allons à travers cet article, mettre en place un modèle conceptuel de l'aquifère des départements de la cuvette et de la cuvette ouest, lequel sera un outil d'aide à la prospection hydrogéologique.

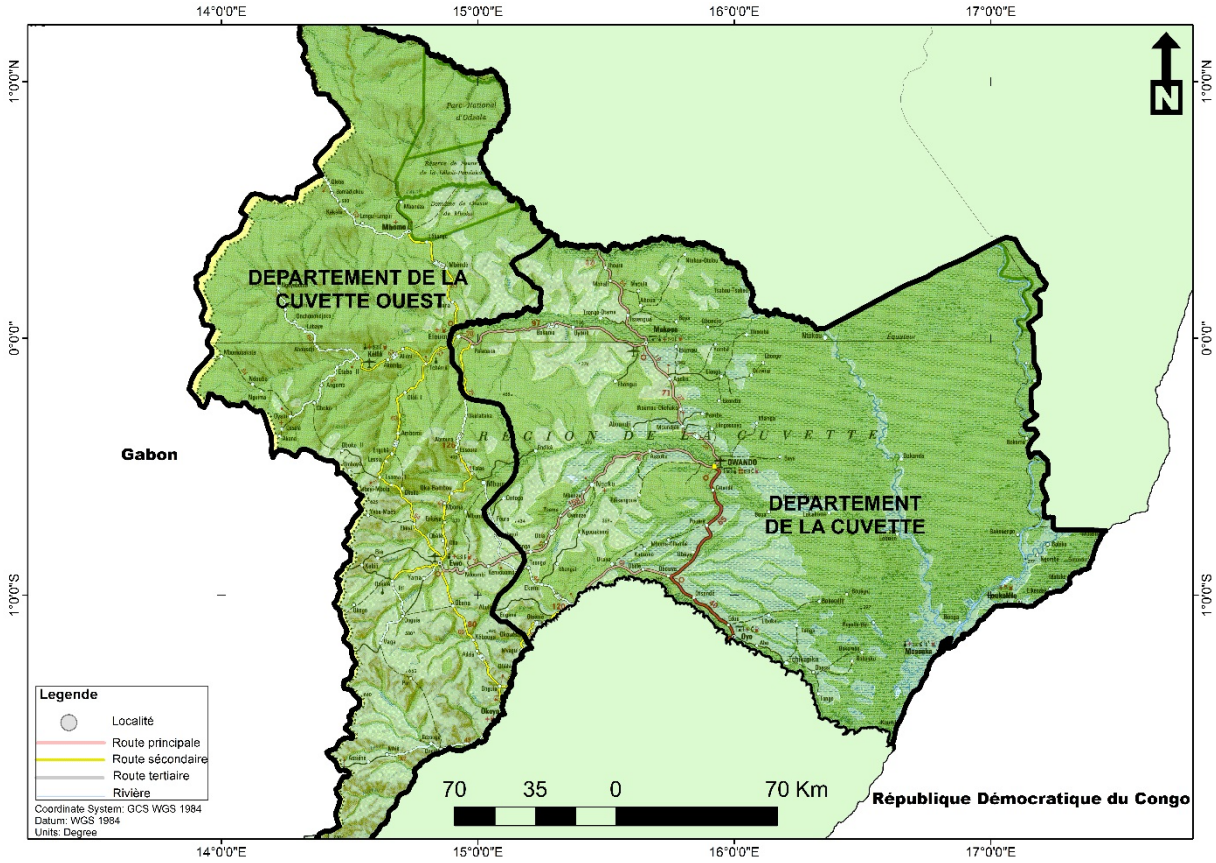


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

En réalité, jusqu'à ce jour, le Congo souffre d'un déficit énorme en matière de connaissances hydrogéologiques. Il se passe que les études disponibles n'ont pas fourni assez d'informations pour acquérir une maîtrise sur les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères des départements de la cuvette et de la cuvette ouest, lesquels nous auraient facilité la compréhension du fonctionnement de nos aquifères. Les progrès scientifiques ont démontré à maintes reprises que la modélisation est la manière simplifiée de représenter la réalité du terrain. C'est donc sur cette base que nous nous sommes proposés d'initier cette étude afin de contribuer à une meilleure connaissance des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères de la zone d'étude et mettre en place un modèle conceptuel pour ainsi, servir d'outil d'aide à la prise de décision lors de la recherche et de l'exploitation des ressources en eau souterraine (implantation des ouvrages hydrauliques adéquates et captation de la nappe d'eau souterraine).

Pour atteindre cet objectif, le logiciel Rockworks.17 couplé au logiciel Visual MODFLOW Flex 2015 est souvent utilisé dans les études axées sur les eaux souterraines.

1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe au Nord du pays, plus précisément dans le bassin du Congo qui se présente comme une immense cuvette de 196.689Km^2 où convergent plusieurs cours d'eau [3]. Dans ce vaste ensemble, notre étude n'a porté que sur les départements de la cuvette et de la cuvette ouest.

La géologie de la zone d'étude montre du bas vers le haut, la série du Stanley-Pool d'âge Jurassique supérieur à Crétacé constituée de formations argilo-sableuse d'âge plio-pleistocene, la série des

plateaux Batékés constituée de sables et grès tendres, grès polymorphes surmontés de limons sableux, puis les formations récentes du quaternaire constituées d'alluvions.

2. Résultats et discussions

2.1 Description lithologique et localisation de l'acquière (Coupe représentative du village Embouli)

Les données lithologiques du village Embouli 1, montrent de bas vers le haut sur une profondeur d'environ 100 m, une succession de couche de sable fin d'une épaisseur moyenne d'environ 63m, un sable moyen à grossier d'épaisseur moyenne d'environ 24m et enfin du sable fin vers le sommet d'une épaisseur moyenne de 24 m (Figure 2).

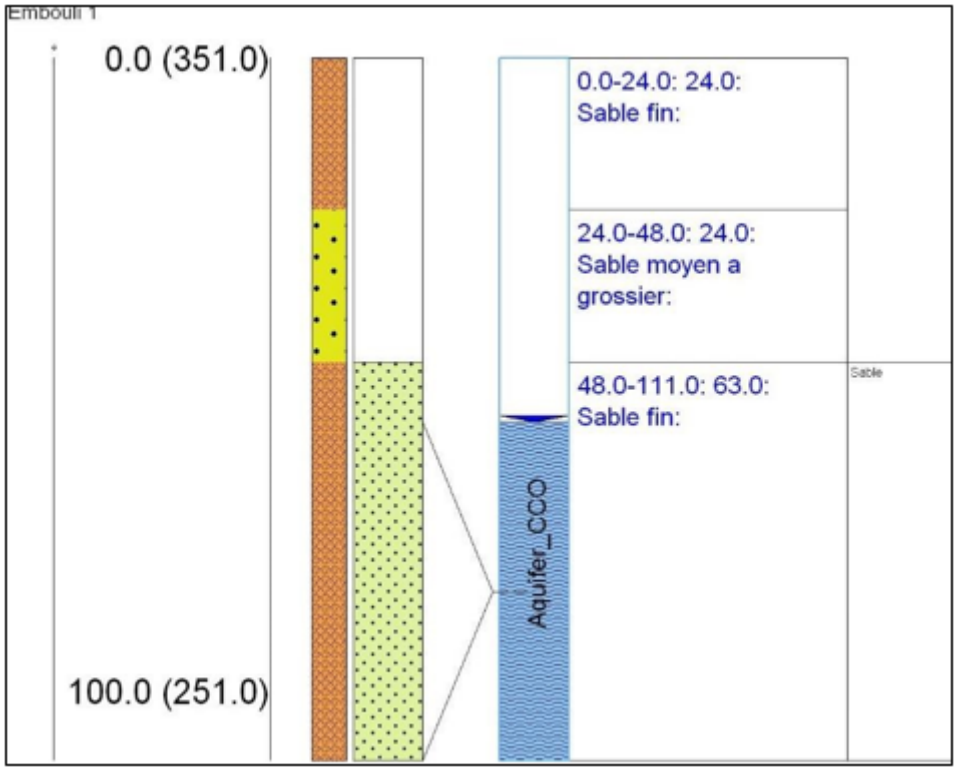


Figure 2 : Log stratigraphique du village Embouli 1

Le forage réalisé dans la localité d'Embouli 1 révèle que l'aquifère de cette localité se trouve dans la couche de sable fin et à une profondeur de 63m (Figure 2).

2.2.Géométrie de l'aquifère (cas de la ligne qui va d'Ololi 1 a Indinga)

Le profil de la coupe d'Ololi 1 à Indinga a subi une érosion importante au cours de la mise en place des niveaux sableux et latéritique. Par contre, le niveau sablo-argileux présente une continuité linéaire avec variation d'épaisseur. Cependant, selon la coupe lithostratigraphique, des lambeaux de niveaux gréseux et argilo-sableuse sont préservés respectivement sur les flancs des vallées alluviales et au sommet d'un petit anticlinal (Figure 3) lorsqu'ils ne sont pas érodés. Par ailleurs, le niveau argilo-sableuse, surplombe les niveaux sablo-argileux et latéritiques situé tout près

d'Ololi 1. L'aquifère du secteur d'Ololi 1 à Indinga (Figure 3) est hébergé par les couches sablo-argileuse et argilo-sableuse, où il est en forme d'anticlinale tout près du village Ololi 1 et en forme de synclinale tout le long de la coupe en allant vers le village Indinga. L'aquifère du secteur d'Ololi 1 à Indinga, malgré une proportion assez importante des argiles dans leur niveau, s'avère présenter de bonnes caractéristiques hydrodynamiques du fait de la présence d'une proportion très élevées de sable grossier qui rend ainsi très bonne la productivité et la perméabilité des ouvrages. A ces informations, s'ajoute également un niveau piézométrique d'une faible profondeur avoisinant les 60m par endroit.

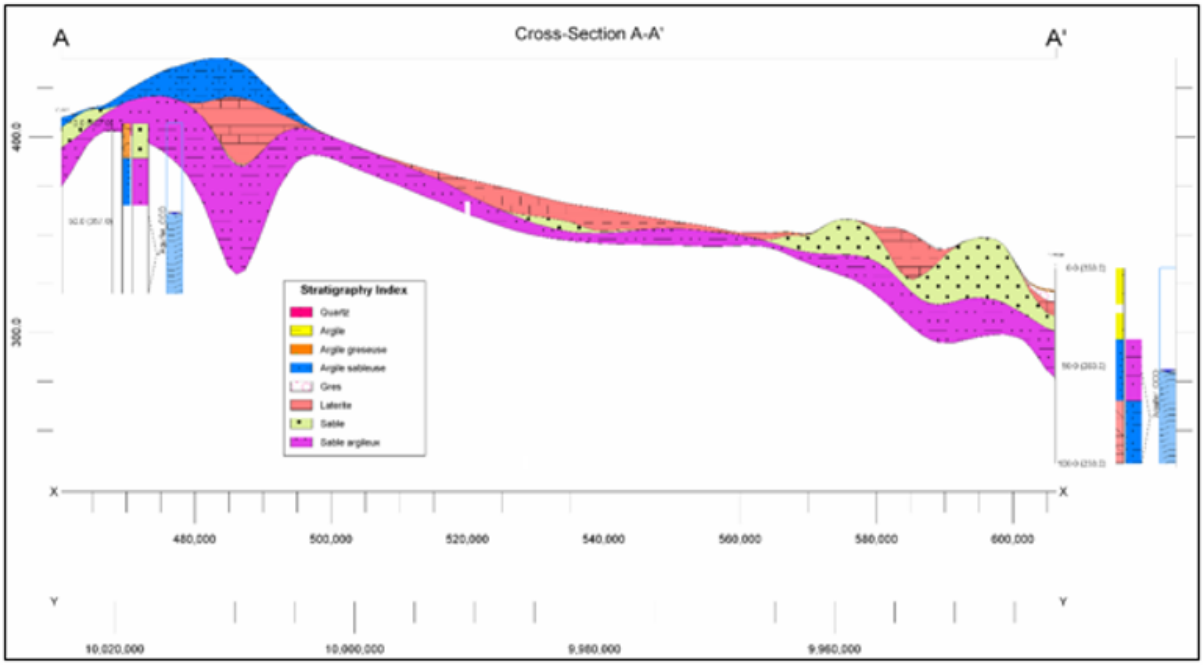


Figure 3 : Coupe lithostratigraphique Ololi 1-Indinga

2.3.Niveaux piézométriques de la zone d'étude

La carte piézométrique des départements de la Cuvette-Ouest et Cuvette, extraite du modèle géologique 3D, montre que l'épaisseur des formations qui y apparaissent varie entre 240 et 420m avec une majorité des valeurs comprise entre 300 et 320 m (Figure 4). L'épaisseur moyenne est d'environ 310 m à l'aplomb du département de la cuvette. La plus importante est essentiellement observée aux extrémités Est du département de la cuvette où elle atteint plus de 350 m (Figure 4). Le département de la Cuvette-Ouest enregistre quant à lui, des valeurs d'épaisseur supérieure à 400 m, parmi les plus fortes du modèle géologique.

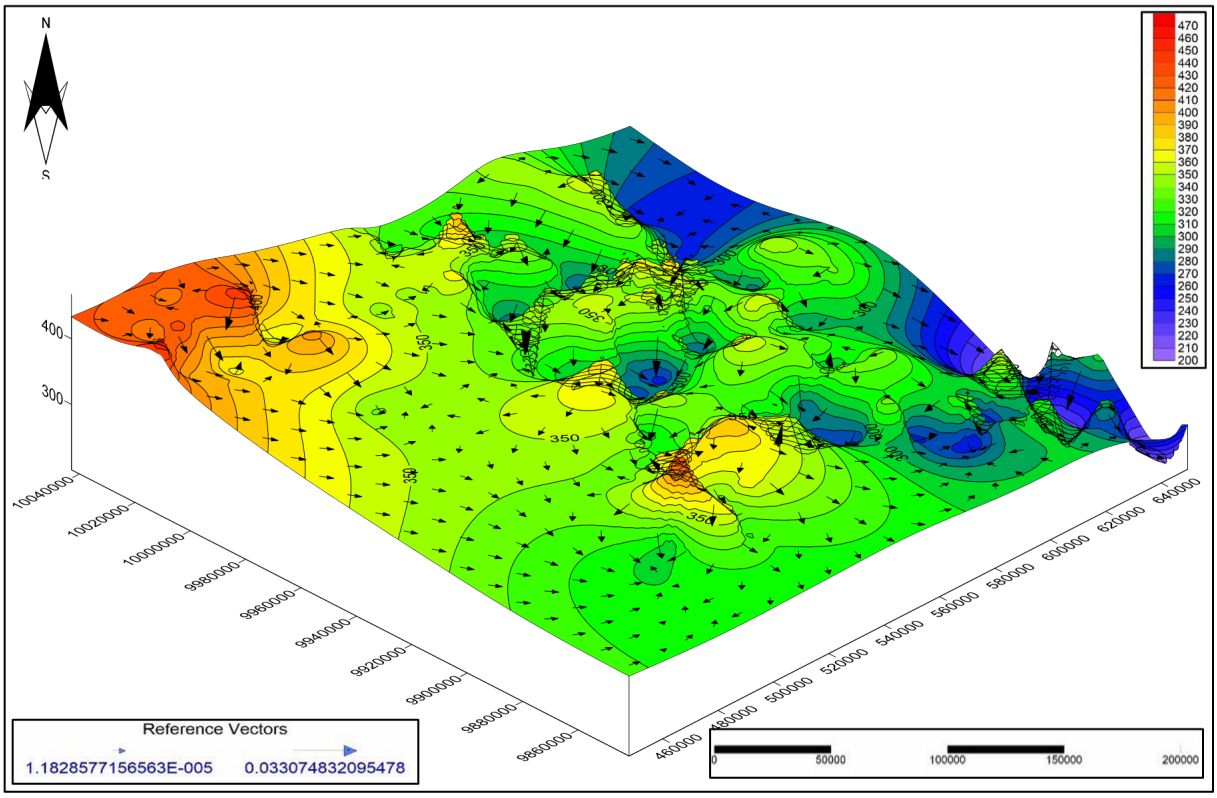


Figure 4 : Carte piézométrique de la zone d'étude

2.4. Approche du modèle hydrogéologique de l'aquifère de la cuvette congolaise

Le modèle géologique 3D des départements de la Cuvette-Ouest et Cuvette montre que cet aquifère forme un large synclinal asymétrique, moulé sur la morphologie profonde du bassin de la cuvette congolaise, dont la profondeur augmente d'Ouest en Est, c'est-à-dire que notre aquifère est beaucoup plus épais au niveau de la cuvette (170m) qu'au niveau de la cuvette Ouest (85m). Ce modèle montre que l'aquifère est continu et libre dans toute l'étendue de notre zone d'étude (Figure 5). Ceci est en conformité avec la géologie de cette zone d'étude et avec les résultats des travaux de [4]. Ce modèle montre que le niveau statique des puits se localise à une profondeur comprise entre 0 et 10m (Figure 5).

3. Conclusions

- L'analyse des données de forages réalisés dans la Cuvette congolaise (secteur Oyo-Boudji) montre une variation verticale des couches lithologiques selon la disposition suivante : du bas vers le haut : argile –Sable argileux – sable. Cette variation lithologique confère à l'aquifère un caractère hétérogène et montre en plus, que la zone d'étude se situe bien dans un domaine sédimentaire.
- La carte piézométrique nous montre que les eaux s'écoulent d'un endroit à gradient hydraulique élevé vers une zone à gradient hydraulique faible. On parlerait de l'écoulement des eaux en partance de la Cuvette Ouest vers la Cuvette.

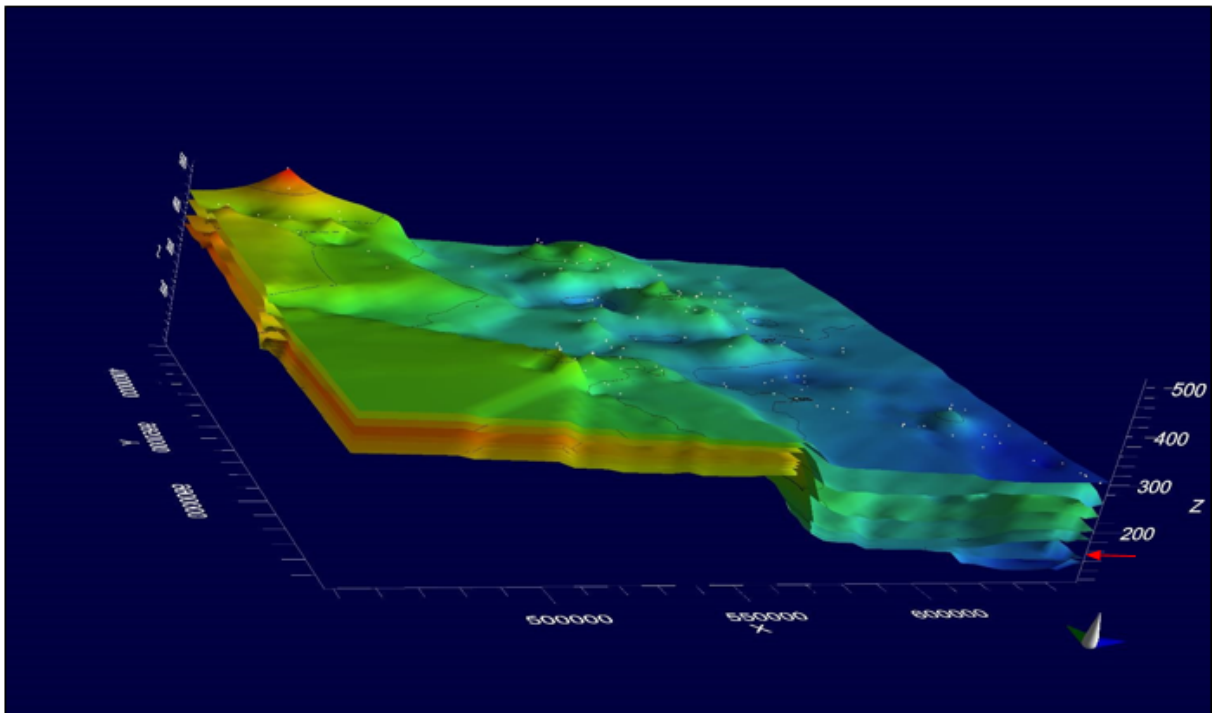


Figure 5 : Approche de modélisation hydrogéologique

- Les profils lithostratigraphiques ont montré que l'épaisseur des couches géologiques traversées lors des forages varie considérablement de la Cuvette Ouest à la Cuvette et que la nappe se localise généralement dans les formations sableuses à sablo argileuse qui constituent un ensemble aquifère généralisé et poreux.
- L'aquifère est plus profond dans la Cuvette Ouest et logiquement moins profond dans la cuvette. Cette explication serait attribuée à la morphologie du terrain.
- Les roches qui renferment ces nappes d'eau souterraine constituent un grand aquifère libre en communication constante avec les rivières et les fleuves comme l'indiquent les écoulements qui sont tous orientés vers les zones basses où coulent les rivières et les fleuves.

Bibliographie

1. SEGUIN, J.J and GUTIERREZ, A., 2016. Les ressources en eau du continent africain: rareté et abondance. Géosciences, 21. Structure, 3, p.5 ;

2. Rev. Ivoir. Sci. Technol., 33 (2019) 137 – 160 ; Kouamé Marcosse EHOUSSOU et al ;

3. Ngot Kongolo T.C., 1992. Carte géologique de la République du Congo (1/1000.000) ;

4. Anonyme., 1993. Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo au 1/1.000.000 Doc. Ministère des Mines et de la Géologie**,** Brazzaville.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 43-47
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

ANTENNE MICRO-RUBAN A ONDES DE FUITE A SUBSTRAT PHOTONIQUE

C. G. L. NKOUKA MOUKENGUE, NZONZOLO,
B. MAFOUNA KIMINOU, A. MANKITI FATI.
,
Laboratoire de Génie Electrique et Électronique de l'ENSP,
Université Marien Ngouabi,
Brazzaville

République du Congo
E-mail : 1n999kouka@gmail. com

RESUME

Dans cette communication, nous présentons une antenne micro-ruban à ondes de fuite à substrat photonique avec un plan de masse parfaitement conducteur. Sa conception est faite à l'aide du logiciel HFSS, basé sur la méthode des éléments finis. L'analyse des pertes par réflexion à la fréquence de fonctionnement montre que cette antenne améliore le coefficient de réflexion à l'entrée et permet d'obtenir et un déplacement du dépointage par rapport à celui de l'antenne initial, ce qui permet de réduire son poids tout en améliorant ses performances en termes du dépointage et du coefficient de réflexion.

Mots-clés : *antenne à ondes de fuite, micro-ruban, substrat photonique*

ABSTRACT

In this paper, we present a leaky-wave antenna in microstrip at photonic substrate with a perfectly conductive ground plane. Its design is made of using HFSS software, based on the finite element method. The analysis of reflection losses at the operating frequency shows that this antenna improve the reflection losses to the entry and permit to get displacement the scanning angle in relation to the initial antenna, what permits to reduce the antenna weight while improving its performances in terms of scanning angle and coefficient of reflection.

Mots-clés: *leaky-wave antenna, microstrip, photonic substrate*

INTRODUCTION

L'exposition environnementale aux champs électromagnétiques générés par l'activité humaine a augmenté régulièrement, parallèlement à la demande d'énergie électrique et les progrès ininterrompus de la technique de même que l'évolution des mœurs ont conduit à la production à ce jour d'appareils de plus en plus sophistiqués tels que : des téléphones portables ; d'antennes de relais ; d'appareils électriques domestiques (rasoir électrique ; télévision ; poste radio etc.). Ces appareils sont tous sources de pollution électromagnétiques [1].

L'utilisation des hautes fréquences, de l'ordre des dizaines de gigahertz et plus peuvent entraîner des effets non thermiques dommageables pour la santé d'un système biologique exposé. Ceci en fonction de la fréquence, de l'intensité de ces ondes et de la durée d'exposition à ces dernières [2].

Les développements remarquables des technologies en bande millimétrique, ont permis la conception de systèmes de communication de petites dimensions rigides et d'une meilleure résolution [3]. En plus la demande de radar à grande précision pour les applications militaires, le domaine de la surveillance, de la détection et pour les systèmes de communication mobiles a généré un besoin important pour des systèmes moins complexes, performants et à bas prix [4].

Les circuits haute fréquence, qui sont utilisés dans toutes les sphères des télécommunications, sont parfois lourds et imposants selon les technologies utilisées.

L'industrie de l'électronique tente de réduire au maximum les coûts de fabrication et les contraintes liées aux poids des circuits pour satisfaire le consommateur ainsi que pour être plus concurrentiel.

Dans la littérature, on trouve plusieurs approches pour la résolution des contraintes liées au poids et à la taille des circuits micro-ondes [5-12].

Un autre moyen de réduire le poids de l'antenne est de réaliser des trous (vias) sur le substrat. C'est dans cette optique que, nous nous proposons d'étudier l'influence de la forme de ces trous sur les performances de l'antenne.

I. Approche théorique

Des nombreuses contributions sur la conception des antennes à ondes de fuite (AOF) avec des performances intéressantes sont rapportées dans la littérature sur une portion de la bande millimétrique [4-2], [7-9], mais leur poids reste important.

Notre travail est d'exploiter d'autres voies afin de proposer à terme une antenne à faible poids et à faible coût répondant au cahier de charge suivant :

- Bande de fréquence de fonctionnement : 78 – 82 GHz ;
- Angle d'ouverture : -3°
- Niveau des lobes secondaires $<$ -10dB

Cette antenne est une antenne micro-ruban à ondes de fuite à substrat photonique avec un plan de masse parfaitement conducteur. Sur la face supérieure du substrat, des rubans métalliques rectangulaires ont été placés périodiquement avec une période p pour provoquer un rayonnement par ondes de fuite. Le substrat est percé de trous de forme cylindrique de rayon r ou de forme carrée de côté C, disposés périodiquement de période dy suivant la direction (oy) et symétriquement sur l'axe (oz) d'écart S entre eux comme le montre la figure1.

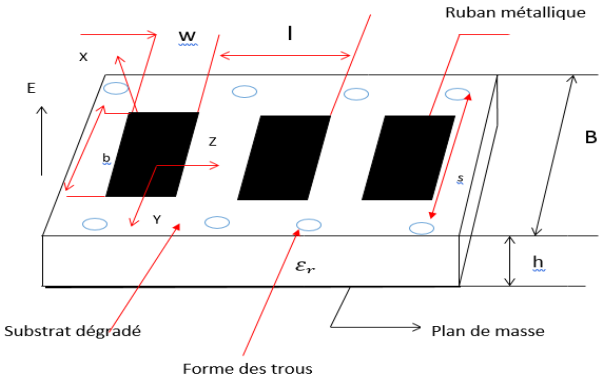


***Figure 1** : Antenne micro-ruban à ondes de fuite*

Pour réaliser la condition de rayonnement, les paramètres de l'AOF obéissent aux conditions suivantes [3-4] :

$$0{,}2\lambda_O \leq l \leq 0{,}4\lambda_O \quad (1)$$

$$b < \frac{\lambda_O}{(\varepsilon_{eff} - 1)^2} \quad (2)$$

où λ_o est la longueur d'onde dans le vide, β, la constante de phase de l'onde de fuite, $k_o = \frac{2\pi}{\lambda_O}$, le nombre d'onde et ε_{eff}, la constante diélectrique effective de la structure.

Les dimensions de l'antenne calculées à partir des formules (1) et (2) à la fréquence de fonctionnement de 80.1 GHz sont consignées dans le tableau 1.

***Tableau 1** : Dimensions de l'antenne*

Désignation	w	l	b	B	h	ε_r
Dimensions (mm)	1,27005	2,5	3,001	8 λ_O	1,45	2,46

II. Résultats et discussions

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'analyse du fonctionnement d'une AOF notamment l'influence des dimensions de l'antenne et celles des vias sur ses performances.

En effet, en utilisant le logiciel HFSS avec les dimensions de l'antenne du tableau 1, nous avons réalisé le layout de cette antenne sur un substrat d'épaisseur h=1,45mm et de permittivité $\varepsilon_r = 2{,}46$.

a) Influence des formes des trous sur le coefficient de réflexion

La figure 2 montre l'évolution du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence, de l'antenne avec des vias parallélépipédiques de côté C variable. Comme le montre cette courbe, on note une légère diminution du coefficient de réflexion quand C augmente.

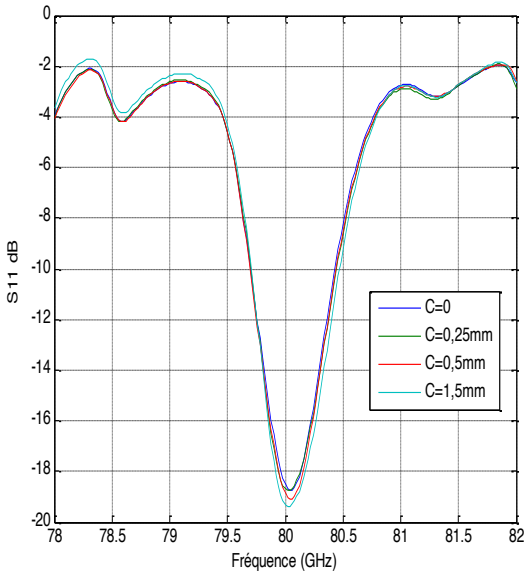


***Figure 2** : Coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence dz= 3mm , S=λ_o, N=11*

La figure 3 illustre la variation du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence pour une AOF à via cylindriques de rayon r. Nous notons un léger décalage de la fréquence de résonance. Les niveaux des pertes par réflexion s'améliorent quand r croît. Plus le rayon augmente, plus le coefficient de qualité diminue, plus la bande passante devient large.

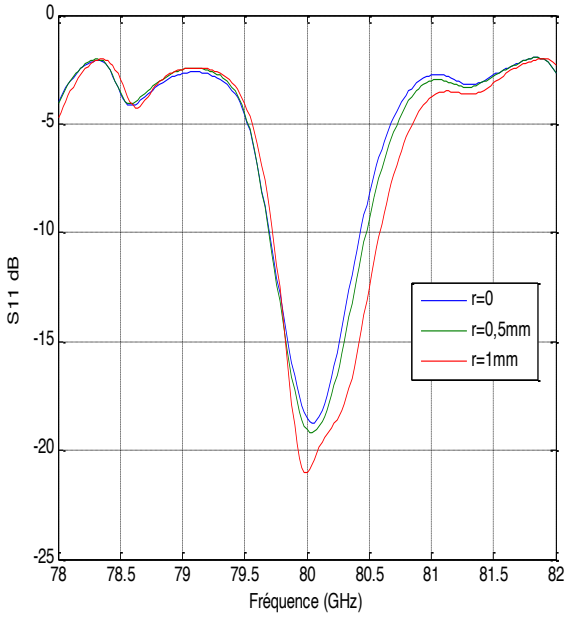


Figure 3 *: Coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence dz= 3mm, S=λ_o, N=11*

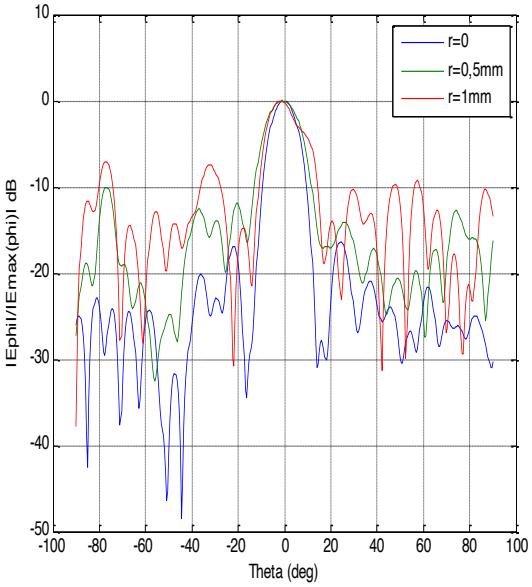


Figure 4 *: Diagramme de rayonnement d'une AOF dans le plan E S=dz=lambda mm, dy=3mm N=11*

b) Influence de r et C sur le diagramme de rayonnement

Sur les figures 4 et 5, une superposition des diagrammes de rayonnement dans le plan E (xoz) est représentée pour une antenne micro-ruban à ondes de fuite à substrat grillagé opérant en bande millimétrique à F=80 GHz. Sur la figure 4, on note qu'une augmentation du rayon entraine une augmentation des niveaux des lobes secondaires de -16,7dB, -12,05dB, et -7,98dB respectivement pour r=0 ; 0,5 et 1mm.

Le dépointage du diagramme de rayonnement a tendance à se déplacer légèrement vers la gauche jusqu'à stabiliser lorsque r=0,5mm. Par ailleurs, pour les trous de section carré figure 5, il y'a un déplacement net du dépointage vers la droite lorsque C augmente. On constate une asymétrie considérable des niveaux des lobes secondaires par rapport aux lobes principaux. La largeur du faisceau vaut 8.5° . Les niveaux des lobes secondaires augmentent lorsque r ou C augmentent.

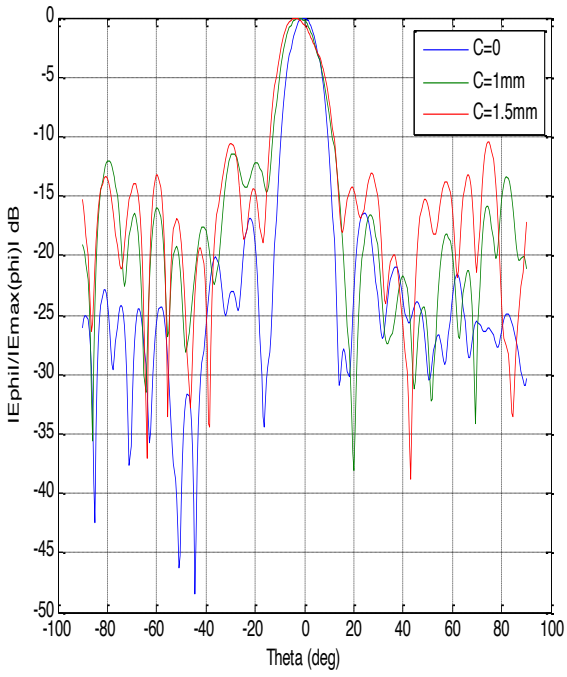


Figure 5 : Diagramme de rayonnement dans le plan E S=dz=lambda mm, dy=3mm N=11

Conclusion

Cette communication a permis d'étudier des antennes à ondes de fuite au substrat dégradé avec un plan de masse parfaitement conducteur. L'utilisation d'une antenne au substrat dégradé nous a permis de réduire des contraintes liées au poids tout en améliorant les performances de cette dernière.

Bibliographie

1. Tao Junwu, Cinato Mathieu, Lefeuvre Serge, Kunduzova Oksana '' Investigation de l'effet des champs electromagnetique sur des cellules cardiaques'' 19 ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Électromagnétique (CEM 2018)

2. T. B. Carlos KONLACK et Roger TCHUIDJAN '' Analyse de l'impact des ondes électromagnétiques sur l'homme'' Afrique SCIENCE 07(3) (2011) 1 - 14

3. Mekkioui Z., ''Analyse rigoureuse d'antennes diélectrique micro-ruban à ondes de fuite'', Thèse de Doctorat d'Etat Université de Tlemcen, 2004.

4. GHOMI M. " Contribution à l'étude des antennes micro-ruban à ondes de fuite ", Thèse de Doctorat INPT Toulouse, 1992

5. Juhua Liu Tang, al '' Substrate Integrated waveguide leaky-wave Antennas with H-shaped sots '' IEEE Transaction on Antennas and propagation vol 60, N° 8, August 2012

6. Juhua liu, David R Jackson, al '' Substate Integrated Waveguide SIW eaky-wave Antenna with Transverse slot'' IEEE Transactions on antennas and propagation, vol 60, N°1, January 2012

7. Charmolavy Goslavy Lionel Nkouka Moukengue, et al '' Analysis of a new leaky-wave antenna for w-band applications" Int. J. Adv. Res. 8(12), 358-363

8. Charmolavy G. L Nkouka Moukengue et al '' A 80 GHz Microstrip Leaky-Wave Antenna with Degraded Ground Plane Design '' Journal of Scientific and Engineering Research, 2019, 6(8):97-101

9. Souad Doucha, Mehadji Abri et al '' Leaky Wave Antenna Design based on SIW Technology for Millimeter Wave Applications'' WSEAS Transactions on Communications, volume 14, 2015

10. Vesna Radisic, al '' Novel 2-D Photonic Bandgap structure for Microstrip lines" IEEE Microwave and guided wave letters, vol 8 N°2, February 1998.

11. A Mahmoudian, H Dalili, al '' Planar Leaky-wave antennas with Aperture coupled Feed" PIERS Proceeding, Hangzhou, china, March, 24-28 2008

12. José Luis GOMEZ et al "Analysis and Design of Periodic Leaky-Wave Antennas for the Millimeter Waveband in Hybrid Waveguide-Planar Technology" IEEE, April 2005

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 48-54
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

CONVERGENCE ENTRE LA FIBRE OPTIQUE ET LA TECHNOLOGIE 5G

A. MANKITI FATI [1], P. MOUKALA MPELE [1], A. PASI BENGI MASATA [2],*

[1] Laboratoire de Génie Électrique et Électrotechnique, École Nationale Supérieure Polytechnique, Université Marien Ngouabi
BP 69 Brazzaville, Congo
[2] Laboratoire d'électronique et Télécommunication de l'Institut Supérieur de Techniques Appliquées
Laboratoire Traitement des Images
Avenue de l'aérodrome, Kinshasa, RD Congo
E-mail : arisfati4@gmail.com

RESUME

L'avènement de la 5G a suscité plusieurs débats dans la communauté scientifiques, plus précisément sur l'interaction entre le rayonnement électromagnétique généré par les antennes 5G et l'environnement (flore et faune). D'après l'Union Internationale des Télécommunications (UIT), la 5G est sensé utiliser les fréquences dans la bande millimétriques (30-300GHz). Ce qui implique les courtes portées sur les dispositions des antennes, et sous-entend une pollution électromagnétique sur tout l'espace habité. Dans cette communication, la convergence de la fibre optique avec la technologie 5G est présentée dans l'optique de réduire le nombre d'antennes dans le réseau. Les technologies radio sur fibre ou Radio over fiber (ROF) et MIMO optique ont été utilisées. Ces dernières procurent plusieurs avantages notamment, dans la réduction du rapport signal sur bruit. Les résultats des simulations montrent l'invariance de l'amplitude du signal de l'entrée à la sortie. Cela est encourageants dans la mesure où ils permettent de minimiser la pollution des ondes électromagnétiques en acheminant une partie du signal dans les fibres optiques.

Mots-clés : *5G, technologie radio sur fibre, MIMO optique.*

ABSTRACT

The advent of 5G has sparked several debates in the scientific community, more specifically on the interaction between the electromagnetic radiation generated by 5G antennas and the environment (flora and fauna). According to the International Telecommunications Union (ITU), 5G should use frequencies in the millimeter band (30-300GHz). This implies short ranges on the installation of the antennas, and the increase of electromagnetic pollution in all the inhabited space. In this communication, the convergence of optical fiber with 5G technology is presented with a view to reducing the number of antennas in the network. Radio over fiber (ROF) and optical MIMO technologies were used. The latter provide several advantages, particularly in reducing the signal-to-noise ratio. The simulation results indicate the invariance of the signal amplitude from input to output. This is encouraging insofar as they make it possible to minimize the electromagnetic waves' pollution by carrying a part of the signal through optical fibers.

Mots-clés: *5G, Radio over fiber technology, Optical MIMO*

INTRODUCTION

Les avancés de la téléphonie mobile et les nouvelles technologies de communication sans fil se sont développées de façon exponentielle à partir des années 90 ; jusqu'à nos jours les progrès dans ce secteur est toujours manifeste avec l'avènement des nouvelles générations, telle qu'actuellement la cinquième génération(5G) qui suscite des craintes et des débats concernant de possibles effets délétères des ondes électromagnétiques de type radiofréquences, sur la santé. Plusieurs avis diamétralement opposés sont émis autours de ce rayonnement électromagnétique sur la santé humaine. Pour les agences sanitaires, l'utilisation de ces ondes fait l'objet d'attention, mais ne parait pas poser de problème dans la mesure où leur usage est encadré [1,4]. Elles s'appuient sur des expertises collectives qui analysent en détail la littérature scientifique disponible pour évaluer le risque. La réglementation est fondée sur les bases scientifiques. Cependant, nombre d'articles de presse, d'émissions de radio ou télévision, de vidéos et de sites internet font régulièrement état de danger. Les radiofréquences seraient cancérogènes, dangereuses pour les enfants, pour la fertilité, pour l'immunité, etc. La 5G serait une nouvelle menace. Des témoignages de personnes dites « électrosensibles », ou « électro hypersensibles » (EHS), sont relayés. Les effets possibles des ondes utilisées préoccupent les gens et les chercheurs. Et face à l'abondance de ces étranges rayonnements venus de nos moyens de communication, une question qui se pose concernant leurs effets sur l'être humain et en particulier sur la tête []. Face à toutes ces observations et hypothèse plusieurs travaux confirment belle et bien de l'effet des ondes sur l'être humain [4], or la venue de la cinquième génération sous-entend un accru important en nombre d'antenne et plus le nombre d'antenne augmentent, plus l'environnement sera pollué en rayonnement électromagnétique. Mais au-delà de cette pollution des ondes, nous ne pouvons pas ignorer les bienfait que va offrir cette technologie, si bien' avec son arrivée les IOT(Internet Of Things) l'internet des objets connectés apportera beaucoup des bienfais dans plusieurs secteurs, telsque l'agriculture, la domotique, la sécurité à distance au niveau des frontières ou dans les zones des guère ou encore pour lutter contre le terrorisme ; une des solutions que nous proposons dans cet article est l'intégration de la fibre optique dans cette technologie(5G). Puisque la 5G fait appel à des très haute fréquences (24,25GHz-52,6GHz) ; cela implique des faibles portées sur la disposition des antennes ; nous proposons donc la réduction de quelques antennes pour faire passer le trafique dans la fibre optique, en faisant appel à la technologie ROF (Radio over Fiber) et la technologie MIMO optique.

1 Compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (EMC Electromagnetic Compatibility), est l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement [1].

Le modèle « Source/Couplage/Victime » est adopté pour l'étude ou la modélisation de la CEM, à savoir :

- Source : l'émetteur du signal perturbateur ou signal parasite
- Victime : le récepteur de ce signal
- Couplage : l'interaction entre la source et la victime telle qu'il est présenté dans la

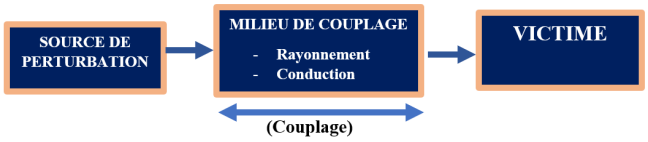


Figure 1: Modèle « Source/Victime/Couplage »[1].

1.1 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est l'ensemble des ondes de fréquences et de fonction différentes. La Figure (I.2) classifie les principaux groupes d'ondes. Nous nous s'intéressons aux fréquences utilisées dans la téléphonie mobile. Les Basses Fréquences s'étendent de 30 Hz à 30 KHz. Ces champs électromagnétiques basse fréquence ont été classés par le CIRC dans la catégorie des cancérigènes possibles. Les Radiofréquences s'étalent sur une bande de 30 KHz à 300 MHz. Cette

partie du spectre électromagnétique a la propriété d'être transmise à grandes distances (plus de 10000 km). Elles n'interagissent que faiblement avec la matière vivante. Les Hyperfréquences ou micro-ondes (0,3 GHz à 300 GHz), ces fréquences ne se réfléchissent pas sur l'ionosphère. Les hyperfréquences pulsées (relais de télévision, réseaux de téléphonie mobile (GSM, UMTS), systèmes de transferts de données (WIFI, WIMAX, Bluetooth), radars et répéteurs paraboliques, fours à micro-onde, etc.) ont été récemment classées dans la catégorie des fréquences probablement cancérigènes (Groupe 2B), associé à l'utilisation du téléphone portable. Ces ondes traversent la plupart des matériaux (sauf les métaux).

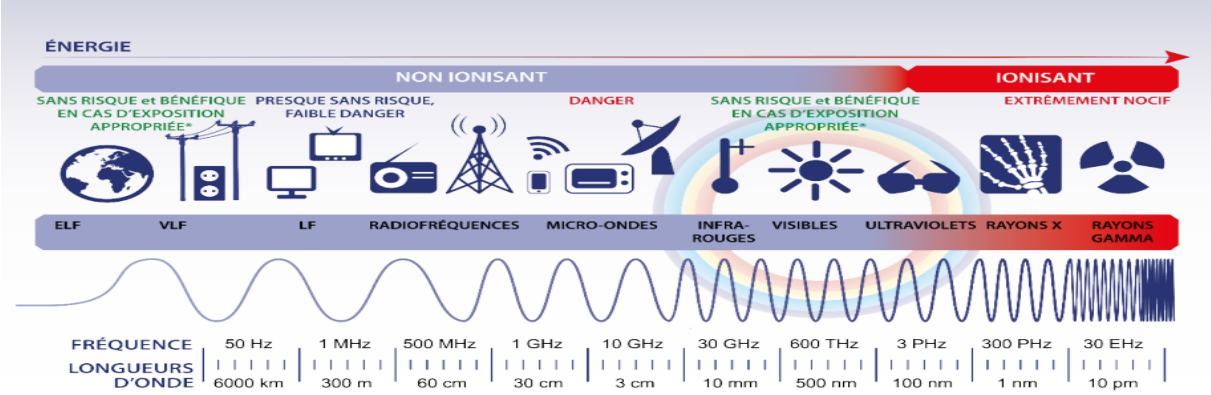


***Figure 2**: Le spectre électromagnétique [3]*

1.2 Modélisation de la propagation des ondes

Sachant que les ondes électromagnétiques résultent du couplage entre le champ électrique et le champ magnétique, cette propagation est modélisée par les équations traditionnelles de Maxwell, qui se présentent de la manière suivante.

$$\operatorname{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\text{Ú}_0} \qquad (1)$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \qquad (2)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad (3)$$

$$\operatorname{rot}\vec{B} = \mu_0\vec{J} + \mu_0\text{Ú}_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \qquad (4)$$

En l'absence de charge électrique et courant électrique, ces équations prennent la forme suivante :

$$\operatorname{div}\vec{E} = 0 \qquad (5)$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \qquad (6)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad (7)$$

$$\operatorname{rot}\vec{B} = \mu_0\text{Ú}_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \qquad (8)$$

La résolution de ces équations conduit à aux équations de propagation de Maxwell dans le vide :

$$\begin{cases} \Delta\vec{E} - \mu_0\text{Ú}_0\dfrac{\partial\vec{E}}{\partial t} = 0 \\ \Delta\vec{B} - \mu_0\text{Ú}_0\dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t} = 0 \end{cases} \qquad (9)$$

1.3 Interaction rayonnement électromagnétique sur le corps humain

Pour faire cette étude, nous allons nous focaliser sur le cas de la téléphonie cellulaire mobile ; Avec le développement de la téléphonie mobile, les seules fréquences disponibles restaient les fréquences supérieures à 800 MHz. Les stations relais GSM (900 et 1800 MHz) et UMTS (1900 - 2200 MHZ) ont une zone de

couverture limitée appelée "cellule", d'où l'appellation de "réseau cellulaire". L'ensemble du territoire à servir doit être couvert par un maillage continu.

1.3.1 Les niveaux d'exposition

Pour garder le contact en veille, le téléphone mobile émet régulièrement d'environ une impulsion par heure vers la station de base. Aussi, le niveau d'exposition des utilisateurs est susceptible de varier et de devenir de plus en plus puissant avec l'utilisation en mauvaises conditions de transmission (sous-sol, en mouvements, pluie ....), lors des communications longues durées et lors d'une conversation téléphonique dans un véhicule. La situation s'aggrave encore dans les zones mal desservies et sur les autoroutes où les champs atteignant des niveaux records. Le téléphone mobile est placé à très courte distance de la tête de l'usager (collé à la tête ou bien éloigné de quelques centimètres), ce qui engendre un niveau de champ électromagnétique élevé induit dans la tête qui sera réduit en s'éloignant. La polarisation du mobile et son orientation par rapport à la tête sont des points très importants qui sont mis en considération dans plusieurs études [4]. Les principales polarisations étudiées sont la polarisation verticale, la polarisation horizontale et la polarisation inclinée (due à la forme bombée de la joue). Encore, il faut tenir compte des effets possibles de doses cumulées d'ondes et des différents degrés d'absorption entre les divers tissus.

1.3.2 Puissance rayonnée absorbée par la tête humaine en téléphonie mobile

L'absorption de la puissance par le corps humain se fait de deux manières

Premièrement, la puissance rayonnée par l'antenne-relais, qui est plus faible par rapport aux radiations électromagnétiques produites par le mobile puisque la distance entre corps humain et antenne est plus grande. Deuxièmement, la puissance rayonnée par le mobile qui est plus intense puisque le mobile est à proximité de la tête donc les radiations incidentes sont plus intenses. La puissance rayonnée par l'antenne relais et le mobile et absorbée par le tissu biologique humain est donnée par les formules suivantes [4] :

$$\begin{cases} P_{\text{ray}_B\text{TS}} = \dfrac{P_{t_BTS}\cdot G_{BTS}\cdot S_{BTS}}{4\pi d_1} \\ P_{\text{ray}_G\text{SM}} = \dfrac{P_{t_GGSM}\cdot G_{GSM}\cdot S_{GSM}}{4\pi d_2} \end{cases} \quad (10)$$

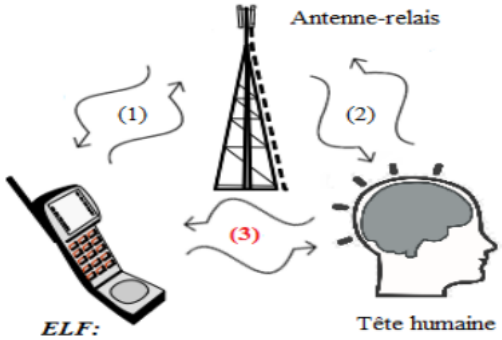


***Figure 3**: Interaction multiple entre antenne GSM et tête humaine [4]*

Cette figure représente l'illustration de l'interaction entre les ondes d'une BTS et l'onde que rayonne l'antenne du téléphone, traduisant un cas simple du mode de rayonnement sur l'humain. Au-delà des solutions proposées dans la littérature et les normes de rayonnement [4,5], nous proposons une solution simple et moins couteuse ; notamment l'usage de la fibre optique, en valorisant la technologie radio sur fibre (ROF) et la technologie MIMO optique.

1.4 Technologie radio sur fibre

1.4.1 Définition

Le concept de la radio-sur-fibre repose sur le transport de signaux radio analogiques sur une liaison optique. Le signal radio module l'onde lumineuse contrairement à la majorité des systèmes de

communications optiques existants où le signal modulant est en bande de base[6].

1.4.2 Architecture de radio sur fibre.

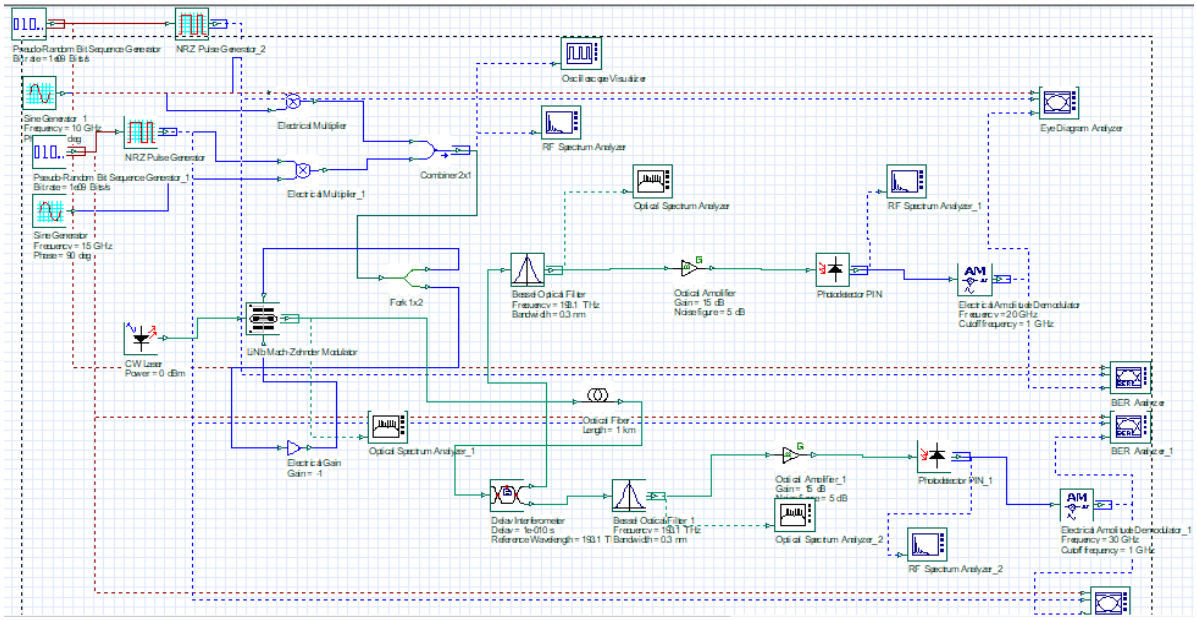


***Figure 4**: synoptique de la liaison radio sur fibre*

L'analyse de ce graphe de la figure 4, montre la chaine de la communication de la liaison radio sur fibre, réalisé à base du logiciel optisystem ; ce graphe est constitué de trois blocks, le block d'émission, contenant le train binaire, du format de modulation RZ, de la diode laser, d'un modulateur Machzender, des mélangeurs, d'un filtre passe-bas de Bessel, du block canal ; contenant deux amplificateur optique EDFA, et le dernier block constitué de la photo diode PIN, de l'antenne RF et un analyseur de puissance et un analyseur du diagramme de l'œil.

***Table 1**: Paramètres de simulations*

Input parameters	**Values and units**
Speed	10Gbps
Frequency or wavelength	1550nm; 850nm
Optical Fiber length	[1-5]km
Source width	0.15bit
Electric filter at the outlet	10GHZ, low pass filter,4th order
EDFA Optical amplier	1
Input power	0 dBm

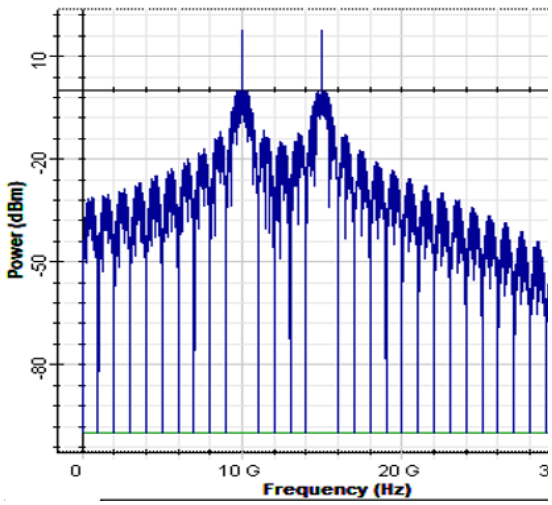


***Figure 5**: Spectre de puissance de la liaison point à point*

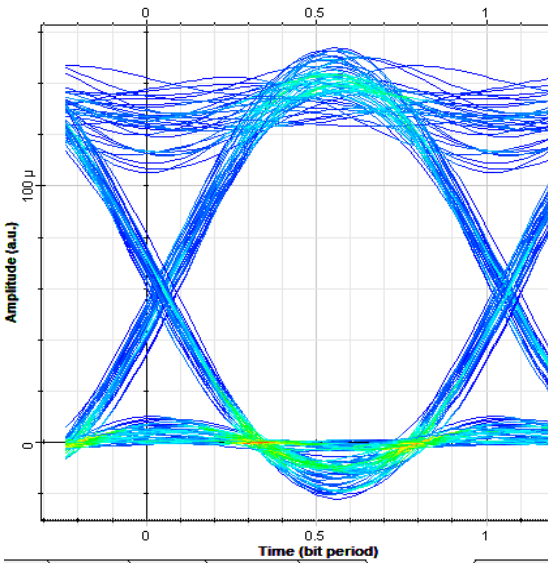


***Figure 6**: Diagramme de l'œil avant l'antenne*

L'analyse de ces graphes des figures 5 et 6 représente respectivement la variation de la puissance en fonction de la fréquence et la variation de l'amplitude de l'onde en fonction du temps, ce qui traduit le diagramme de l'œil, nous voyons que lorsqu'on supprime certaines antennes pour faire passer le signal dans la fibre optique, on réduit, premièrement l'interaction rayonnement électromagnétique sur le corps humain et donc on évite les maladies, on gagne en débit, en bande passante et la réduction des erreurs ; à titre illustratif le diagramme de l'œil de la figure 6 est étendu, ce qui justifie l'absence de bruit et sur la figure 5, nous voyons que le rapport signal sur bruit est faible et que les niveaux des impulsions n'est pas variable, ce qui justifie l'invariance du signal.

Conclusion

L'observation minutieuse et attentive de tout ce qui précède amène à souligner en dernier lieu que l'avènement de la cinquième génération (5G) ou bien d'autres génération n'est pas un problème majeur qui affecter le commun des mortels. Car, en associant la fibre optique aux systèmes de communications sans fil, notamment aux antennes radiofréquences et aux antennes relais par intégration des technologies radio sur fibre et MIMO optique, permet de minimiser les effets nocifs des ondes électromagnétiques sur les êtres vivants. Les résultats obtenus lors de cette étude illustrent que la transition des canaux radio-fibre optique ou fibre optique-radio, n'impacte pas la qualité du signal à la sortie. Dans la même perspective, cela permet la réduction de la pollution en onde électromagnétique.

Références

[1] – PERRIN Anne. « Radiofréquences et santé : où en sommes-nous ? » université Grenoble Alpes. 13-04-2021

[2]-P. Clayton, Introduction to electromagnetic compatibility. Vol. 184. John Wiley & Sons, 2006.

[3]. : Miroslava Karaboytcheva Service de recherche pour les députés PE 646.172 – février 2020. « Les effets de la communication sans fil 5G sur la santé humaine »

[4]. Messaoudi Hafawa « Modélisation Électromagnétique du Phénomène d'Interaction des Ondes GSM avec la Tête Humaine par la Méthode des Circuits Équivalents Généralisés (MoM-GEC) dans un milieu fermé ». 09.01.2017.

[5]. Exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie « 5G » « Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective Avril 2021 »

[6] Zakaria Tayq. Fronthaul integration and monitoring in 5G networks. These de doctorat, Université de Limoges, 2017.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 55-65
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

INTERFACE D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE UNIVERSELLE (IEPU) POUR LES RESSOURCES DE PRODUCTION DECENTRALISEE

E. G. KOULAKOUMOUNA M.

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique (ENSP)
Université Marien Ngouabi,
Brazzaville
République du Congo
E-mail : g7koulak@gmail.com

RESUME

De nombreux efforts ont récemment été observés pour améliorer l'efficacité, réduire les émissions de gaz à effet de serre et la transmission de particules à risque, avec l'augmentation de la population mondiale dont la demande énergétique n'arrête d'évoluer, ce qui a conduit au concept «plus électrique» de diverses industries, dont les transports; ainsi pour apporter une solution au problème et une transition en douceur vers un réseau électrique plus fiable, diversifié et efficace pour les applications futures, le concept d'interface d'électronique de puissance universelle (IEPU) est introduit.

Mots-clés : *Convertisseurs ; Génération distribuée ; Filtre LCL ; harmoniques ; énergie renouvelable, boucle à verrouillage de phase (PLL)*

ABSTRACT

Many efforts have recently been observed to improve efficiency, reduce the greenhouse gas and risky particle transmission leading to the urgency of the "more electric" concept from various industries including transportation; in other to bring a solution to the problem and a smooth transition unto a more reliable, diverse and efficient power grid for future applications the concept of universal power electronic interface (UPEI) is introduced.

Keywords : *Converters; Distributed generation; LCL filter; harmonics; renewable energy, Phase locked Loop (PLL).*

INTRODUCTION

Afin de réduire les impacts potentiels sur la génération de distribution (PD), des interfaces d'électroniques de puissance universelles (IEPU) sont introduites pour intégrer la production distribuée (PD) à un système électrique existant. Pour s'attaquer aux harmoniques supérieures de la PD, l'interface offre une capacité unique par rapport aux technologies d'interconnexion traditionnelles à développer comme lien entre toutes les unités de PD et les consommateurs, l'interface sépare toute unité PD et le réseau, elle fournit une puissance réactive. L'énergie renouvelable basée sur la PD peut être un soulagement de la centrale électrique conventionnelle; pourtant, cela augmentera la transmission des investissements dans les infrastructures. Beaucoup de production d'électricité localisée pourraient être une alternative pour centraliser le modèle de production qui offre la possibilité d'intégrer le stockage d'énergie pour les influences de puissance.

I. PRESENTATION DU SYSTEME

Le système à présenter pour ce document de recherche est d'étudier le principal avantage de l'utilisation d'interfaces électroniques de puissance universelles pour les systèmes de production distribuée en développant une nouvelle conception et en construisant une interface d'EP dans laquelle, si une énergie (DC) est connectée à l'interface il sera en mesure de contrôler et de fournir une tension et un courant de sortie fiables et requis au réseau ou à la charge, comme indiqué sur la figure ci-dessous. Un système de stockage d'énergie est également inclus dans le circuit afin de maintenir le système en marche lorsque les autres sources d'énergies ne seront pas en mesure de produire l'énergie requise pour faire fonctionner le système en raison des conditions météorologiques cas des énergies renouvelables ENR [1].

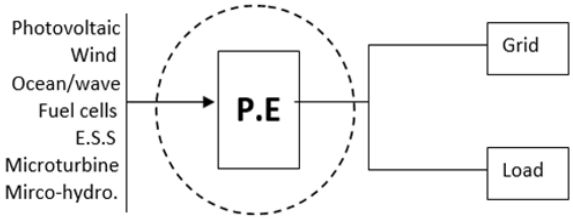


***Figure1**: Illustration de l'interface électronique de puissance.*

SOURCES D'ENTREE

Les sources de courant continu utilisées dans ce document de recherche sont des ressources énergétiques renouvelables généralement appelées systèmes de production distribuée, les configurations et les topologies des systèmes ont été discutées en détail par les auteurs suivants [2]; [3] & [4]. Pour mettre en œuvre ce projet, nous avons choisi de travailler avec quatre des systèmes de PD avec une source de tension d'entrée réglée pour être 200V pour chaque source : pile à combustible (V_{FC}); Photovoltaïque (V_{PV}); Batterie ($V_{Battery}$) et l'énergie éolienne (V_{Wind}). Fig. 2 ci-dessous présente comment le système est connecté au réseau / pour la production d'énergie électrique.

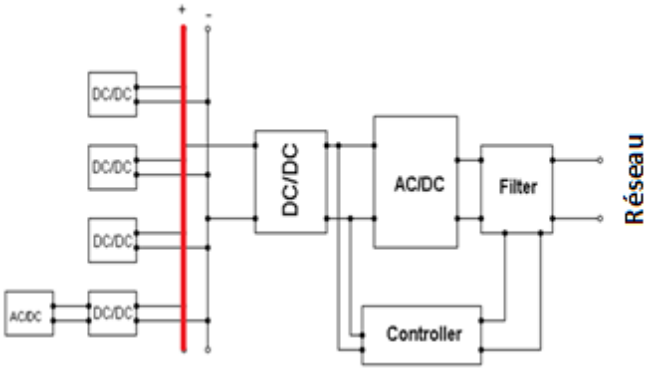


***Figure 2**: model d'étude*

La Fig.2 présente le modèle d'étude qui contient trois principaux composants: les sources CC, l'onduleur triphasé et le filtre connecté à la charge ou au réseau. La source CC intègre la source primaire comprenant: pile à combustible, photovoltaïque, batterie et éolienne qui sont tous connectés à l'onduleur via une liaison cc. Dans le cas

d'éoliennes ou d'une source d'entrée CA, un convertisseur redresseur CA / CC est réglé avant le jeu de barre d'alimentation. Et un convertisseur CC-CC (dans le cas des sources d'entrée CC) est connecté. L'onduleur qui fournit la conversion CC / CA est un inverseur de tension contrôlé en phase par une modulation de largeur d'impulsion (PWM) intéroceptive. Le filtre connecté, est un filtre LCL qui sert à minimiser les harmoniques de commutation.

Modélisation de l'onduleur

Une topologie d'onduleur triphasé à six commutateurs est utilisée dans cet article comme faisant partie de l'onduleur. La topologie est composée de six commutateurs disposés de manière à ce que trois branches parallèles soient connectées aux sources cc, elle est également disposée de manière à ce que deux commutateurs soient connectés en série sur chaque branche avec chaque cellule de commutateur composée d'un transistor et d'une diode connectée en antiparallèle avec une diode ajoutée en parallèle. Par conséquent, les sources d'entrée CC sont appliquées aux trois branches parallèles supérieure et inférieure de l'onduleur à travers deux condensateurs de liaison cc connectés en série avec la branche. Le résultat de la sortie triphasée ca a lieu entre les deux commutateurs de chaque branche, ce qui rend la configuration de l'onduleur très simple, largement utilisée et une bonne topologie pour intégrer plus de fonctionnalités de l'onduleur, ce qui le rend très souhaitable pour ce document de recherche.

La séquence de commutation de l'onduleur IGBT est représentée dans le tableau ci-dessous:

***Tableau 1**: Modèle de commutation de MLI-S*

IGBT	Tension d'onde sinusoïdale	Vs > Vo	Vs < Vo
S1	V_{Oa}	ON	OFF
S6		OFF	ON
S2	V_{Ob}	ON	OFF
S5		OFF	ON
S3	V_{Oc}	ON	OFF
S4		OFF	ON

Les interrupteurs IGBT connectés sur chaque branche de l'onduleur sont activés (on) / désactivés (off) alternativement, ce qui entraîne un flux de courant de sortie en continu. L'indice de modulation typique est réglé pour être compris entre 0 et 1, c'est pour limiter l'amplitude de la tension de l'onduleur du côté de la sortie CA, comme présenté sur la Fig.3. La magnitude et l'amplitude de la forme d'onde de la tension côté AC principale de l'onduleur lorsque la commutation de modulation a largeur d'impulsion (MLI) est appliquée et peuvent être déterminées à l'aide des équations suivantes [5].

$$\boldsymbol{V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_{dc} = 0.707\, V_{dc}} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{V_{rms} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times V_{dc} = 0.612 V_{dc}} \quad (2)$$

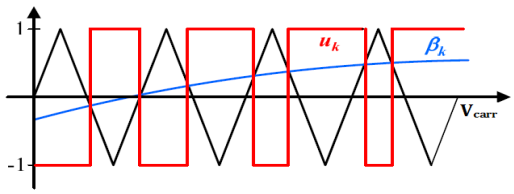


***Figure 3**: instants de commutation dans le cas d'un MLI interceptif*

u_k C'est la fonction de commutation qui prend la valeur 1 lorsque les interrupteurs supérieurs sont fermés (S1, S2 ou S3) et -1 lorsque les interrupteurs inférieurs sont fermés (S4, S5 ou S6). Cette fonction de commutation est obtenue lors de la comparaison de deux signaux (Fig.3), la modulation βk, qui est une représentation d'onde de référence de la tension de sortie souhaitée entre -1 et 1, et de la tension

porteuse V_{carr} qui est la fréquence d'onde MLI triangulaire beaucoup plus élevée que la fréquence de βk détermine donc la fréquence de commutation de l'onduleur.

Contrôle de la puissance de l'onduleur

En raison de la nature de l'énergie renouvelable, toutes les charges sont connectées au réseau par un onduleur de tension CC à CA qui est équipé d'un coupe-filtre désaccordé. Pour définir les contrôleurs locaux, les énergies renouvelables ont été considérées comme les sources d'énergie dynamiques. En effet, les onduleurs seront connectés au bus DC qui fournira en permanence suffisamment d'énergie pour assurer une réponse adéquate aux différents transitoires du système.

L'onduleur à étage de puissance conçu pour la recherche convertit la tension de sortie de 800 V CC du convertisseur triphasé en tension de réseau d'environ 400 V CA de tension de phase et 230 V de tension de la ligne à une fréquence de 50 Hz. Le but du choix d'une tension de circuit intermédiaire élevée dans cette étude est que sa tension ne sera jamais inférieure à la tension requise pour la tension du réseau de l'onduleur. Le contrôle du courant du réseau avec la chute de tension aux bornes des dispositifs semi-conducteurs et la tension du filtre n'est pas une tâche facile à utiliser.

Le modèle général basé sur un onduleur de tension considéré dans cette étude est une topologie d'onduleur triphasé bidirectionnel CC-CA avec une technique d'impulsion comme présenté sur la figure 4. Fondamentalement, cet onduleur triphasé à deux niveaux convertira la tension de sortie CC en tension alternative à une tension et une fréquence de sortie de charge souhaitées. Ceci peut être réalisé en utilisant différentes topologies d'onduleurs et schémas de contrôle ayant chacun leurs avantages et inconvénients.

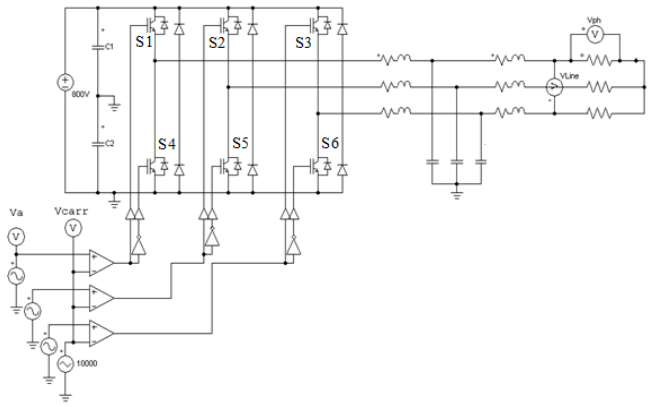


Figure 4: *Onduleur bidirectionnel CC vers CA*

La commutation de l'onduleur est contrôlée par la technique MLI dans d'autres pour générer une tension de sortie non filtrée. L'ensemble du système d'onduleur est amélioré en utilisant une approche de commutation MLI sinusoïdale. La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale (MLI-S) est utilisée pour générer les signaux de commutation pour l'onduleur à une amplitude et une fréquence de commutation souhaitées avec une comparaison d'une onde sinusoïdale triphasée et celle d'une onde triangulaire (porteuse V). La fréquence de l'onduleur est définie par la fréquence du signal triangulaire qui se traduit par des impulsions qui pilotent le signal de porte de l'IGBT.

La modélisation des formes d'onde sinusoïdales de référence est donnée à l'aide des équations suivantes :

$$v_{0a_ref} = A\ \sin(2\pi ft + \theta) \quad (3)$$

$$\boldsymbol{v_{0b_ref} = A\ \sin(2\pi ft + (\theta - 120°))} \quad (4)$$

$$v_{0c_ref} = A\sin(2\pi ft + (\theta + 120°)) \quad (5)$$

Modélisation et conception du filtre LCL

Le convertisseur MLI ayant une fréquence de commutation plus élevée se traduit généralement par une taille de filtre LC passe basse. Cependant, cette fréquence de découpage est principalement limitée aux

applications haute puissance pour deux raisons :

1. Il a une meilleure atténuation que le filtre LC avec la même taille.
2. Le filtre LCL fournit une sortie inductive au réseau (charge), il empêche le courant d'entrée comparant au filtre LC.

Le circuit équivalent du modèle de filtre LCL est représenté sur la figure 5 où L_1 représente le côté de l'onduleur et L_2 est le côté de l'inductance du réseau, C_1 est le condensateur avec une résistance d'amortissement R_f en série, R_1 et R_2 sont des résistances d'inductances, V_i est la tension de l'onduleur d'entrée et Vg est la tension de sortie de l'onduleur. Les courants i_i, i_c, i_g sont respectivement le courant de sortie de l'onduleur, le courant du condensateur et le courant du réseau. Le schéma fonctionnel de l'onduleur connecté au réseau avec filtre LCL est présenté à la figure 5. Plus d'informations sur la technique de modélisation et de conception du filtre LCL peuvent être trouvées dans [6]; [7] et [8].

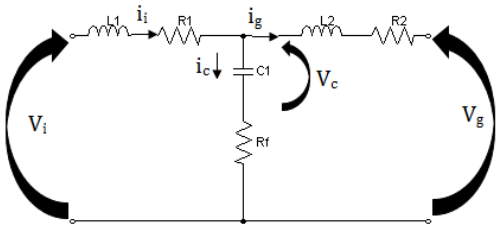


***Figure 5**: Modèle par phase du filtre LCL*

La première considération de conception lors de la conception d'un filtre LCL est de respecter les exigences de la norme IEEE 519. Par conséquent, l'onduleur injecte le courant d'ondulation dans le réseau en raison de la commutation MLI, la fréquence de commutation de l'onduleur est réglée à 10 KHz à un niveau de puissance donné de (15 kW) et les IGBT sont utilisés comme dispositifs de commutation d'électroniques de puissance. Dans le cas où l'onduleur de réseau est un équipement de production d'électricité, il est alors soumis à une limite de courant de 0,3%. Ce qui signifie que l'ondulation du courant à 10 KHz doit être inférieure à 0,3% du courant nominal [9].

Certains paramètres sont importants à prendre en compte lors de la sélection du filtre LCL, tels que la puissance nominale de l'onduleur, la fréquence du réseau et la fréquence de découpage [6]. L'organigramme qui résume la procédure de conception du filtre LCL est présenté dans [6] & [8].

Le tableau 2 ci-dessous montre les paramètres utilisés pour le calcul des composants du filtre, ces paramètres sont conçus pour gérer une puissance réactive et active d'environ 10KVA pour 15KW, les paramètres sont les valeurs nominales de l'étage de puissance de l'onduleur donc très importants pour la conception de l'onduleur.

***Tableau 2**: paramètres de conception du filtre LCL*

Paramètre	Intitulé	Valeurs
Valeur nominale de l'onduleur	P_n	15 kw, 3 phase
Tension CA de la ligne	V_{LL}	400V
Tension de phase CA	Vph	230V
Période	T_s	100µs
DC - tension de liaison	V_{Bus}	800V
Fréquence du réseau	f_g	50 HZ
Fréquence de commutation de l'onduleur	f_{sw}	10 KHZ
Intervalle de modulation	m_a	0 < ma <1

En utilisant les paramètres fournis dans le tableau 2, l'impédance et la capacité de base sont calculées comme suit :

$$Z_b = \frac{V_{LL}^2}{P_n} = \frac{400^2}{15\,000} = 10.667\ \Omega$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_n Z_b} = \frac{1}{2\,\pi 50 \times 10.667} = 298.406\mu F$$

$$avec\ \omega_n = 2\pi f$$

En minimisant les ondulations du courant de sortie du côté de l'onduleur, l'inductance est généralement de 10% à 20% du courant nominal. Et le choix de

l'inductance côté onduleur à 5% de l'impédance de base totale permet donc à l'ondulation de courant de répondre à l'exigence limite de 10% de la valeur du courant nominal.

Après avoir effectué les calculs, le résultat suivant est obtenu et présenté dans le tableau 3. Le processus de calcul est expliqué par [7] & [6].

***Tableau 3**: Valeurs des paramètres de conception du filtre LCL.*

Paramètres	Intitulé	Valeurs
Inductance du filtre LCL (côté onduleur)	L1	1.698m*H*
Capacité du filtre LCL	C1	14.9203µF
Inductance du filtre LCL (Côté réseau)	L2	1.358m*H*
La résistance de l'inducteur est approximative	r1	0.5Ω

Control du circuit

Le contrôle du circuit se fait selon la technique PLL, à partir des tensions de phase échantillonnées, on obtient les tensions de référence stationnaires VgA, VgB, VgC. Ces tensions sont ensuite transformées en tensions Vd et Vq (dans le cadre de référence synchronisé à la fréquence de service) en utilisant la transformation αβ et dq, plus d'informations sont trouvées dans [6]. Le circuit de la figure 6 présente comment l'ensemble du circuit est connecté à la commande PI directe.

La commande de l'onduleur connecté au réseau qui alimente le système avec le système de puissance active et réactive est mise en œuvre en utilisant l'approche de la technique de commande de courant. En utilisant la technique de contrôle du courant et le contrôle PI direct comme présenté sur la figure 6, le contrôle de l'onduleur connecté au réseau qui alimente le système en système de puissance active et réactive est mis en œuvre. Le bloc VSI représente l'onduleur connecté au réseau via le filtre et la charge (load).

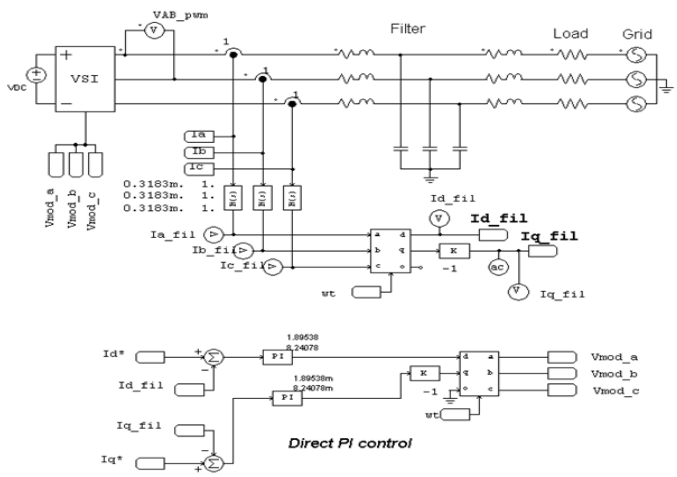


***Figure 6**: Modèle de contrôle du courant par le contrôle PI direct*

Réponse en fréquence et fonction de transfert

Une fonction de transfert importante dans laquelle la tension du réseau est considérée comme une source de tension idéale capable de déverser toutes les fréquences harmoniques est donnée par $H_{LLCL} = {}^{i_g}/_{v_i}$ extraite par la fonction de transfert ci-dessus. Si la tension du réseau est supposée être une source de tension idéale et représente un court-circuit pour les fréquences harmoniques, donc pour l'analyse du filtre, Vg est réglé à Vg = 0. Ainsi par exemple dans le cas des onduleurs à régulation de courant, la fonction de transfert LCL en négligeant l'amortissement sera :

$$\boldsymbol{H_{LCL}(S) = \frac{1}{L_1 C_f L_2 S^3 + (L_1 + L_2) S}} \qquad (6)$$

Après des manipulations de la fonction de transfert avec la résistance d'amortissement devient alors :

$$\boldsymbol{H_{LCL}(S)\ dampin = \frac{C_f s R_f + 1}{L_1 C_f L_2 S^3 + (L_1 + L_2) C_f R_f S^2 + S(L_1 + L_2)}} \qquad (7)$$

Des informations détaillées sur la réponse en fréquence sont présentées par les auteurs [5] & [6].

Les harmoniques

Les harmoniques de courant de sortie injectées au réseau électrique public par l'onduleur peuvent être diminuées avec un filtre LCL légitimement planifié par opposition à un filtre L ou LC de base. En gardant à l'esprit l'objectif final de présenter cela, la réponse en fréquence de ces filtres (LCL et L) est analysée. En acceptant des pièces sans perte et une bonne tension de grille sinusoïdale à la fréquence fondamentale, le modèle harmonique d'un filtre LCL peut être obtenu comme indiqué sur la figure 7 [10] & [11].

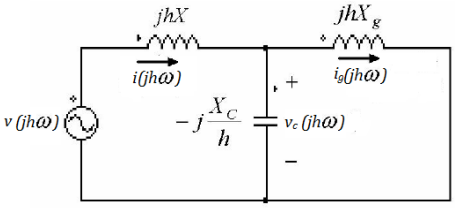


***Figure 7**: Modèle harmonique monophasé d'un filtre LCL pour h≠1.*

II. Conceptions de circuits

La conception de l'interface d'électronique de puissance universelle pour le mode des systèmes de génération distribuée a été développée et simulée à l'aide de la plateforme de simulation logicielle Psim.

A. Puissance d'alimentation

Le convertisseur d'entrée universel peut combiner plusieurs sources d'alimentation d'entrée où les niveaux de tension et / ou la capacité de puissance sont différents pour obtenir une tension de sortie régulée pour la charge. Par conséquent, le convertisseur peut contrôler le flux d'énergie entre les sources les unes avec les autres et la charge. Une entrée DC / AC universelle (sur le jeu de barre) d'alimentation remplace plusieurs nombres de connexions parallèles connectées à un seul convertisseur. À partir du bus d'alimentation, comme le montre la figure 8, les sources d'entrée de 1 à N source peuvent être composées de tout type de combinaisons de sources d'énergie sont toutes connectées à un jeu de barre d'alimentation.

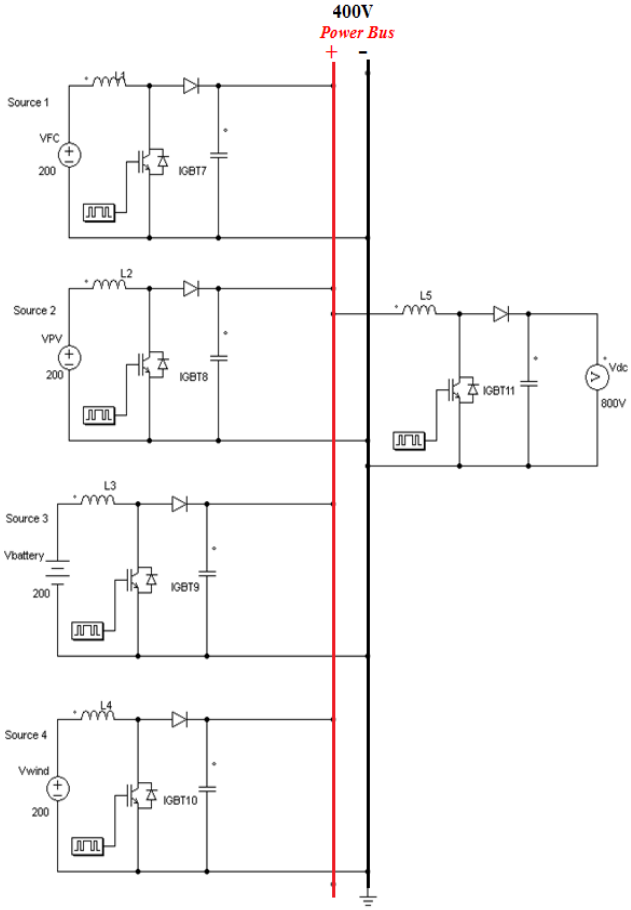


***Figure 8**: Convertisseur de tension d'entrée universel*

B. Connexion au réseau

Le réseau connecté est considéré comme idéal et la tension du circuit intermédiaire (V_{DC}) sert de tension d'entrée au système onduleur connecté au réseau. Il a également été considéré comme une source de tension idéale provenant des systèmes PD, comme illustré à la Fig. 9.

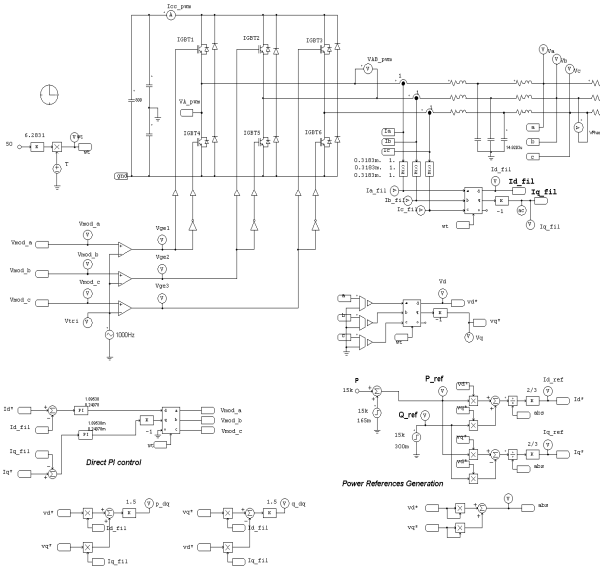


***Figure 9**: réseau connecté au modèle d'onduleur*

III. Resultats des Simulation

Différentes instances d'analyse et d'évaluation des performances du modèle d'onduleur connecté au réseau ont été réalisées. La tension de sortie et le courant de sortie de l'onduleur ainsi que la tension et la puissance côté réseau ont été étudiés. L'analyse harmonique du courant injecté dans le réseau a également été étudiée. En utilisant l'onduleur fonctionnant avec une impulsion avec modulation à une fréquence de commutation plus élevée d'environ 10 KHz par rapport à la fréquence nominale des signaux modulés, la conversion du courant continu en courant alternatif est effectuée. Par conséquent, les résultats mesurés de de la tension de sortie et le courant de l'onduleur Va et Ia sont présentés sur les figures 10 et 11.

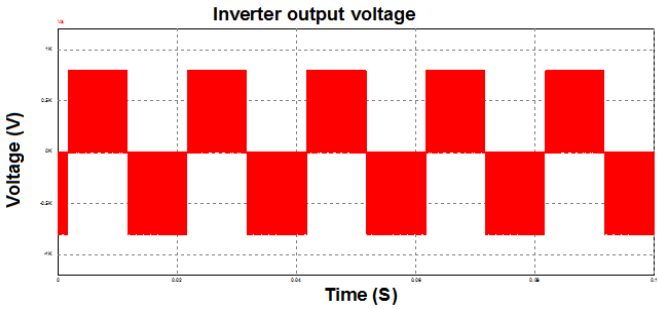


***Figure 10** : tension de sortie de l'onduleur avant le filtre LCL*

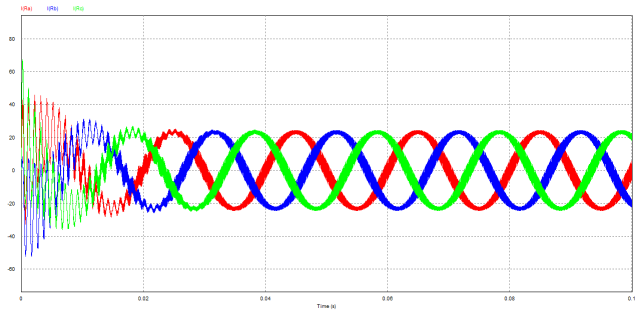


***Figure 11**: courant de sortie triphasé de l'onduleur avant le filtre LCL*

Maintenant, en utilisant le filtre LCL, les harmoniques présentes dans la sortie de l'onduleur ont été filtrées. La comparaison de ces formes d'onde signifiant la tension et le courant de sortie simulés de l'onduleur avant le filtre LCL d'un côté et le résultat simulé de la tension et du courant de sortie après le filtre de l'autre côté prouvent clairement l'importance du filtre qui doit être interconnecté à partir de l'onduleur à un réseau électrique public afin de filtrer les harmoniques qui sont produites par l'onduleur.

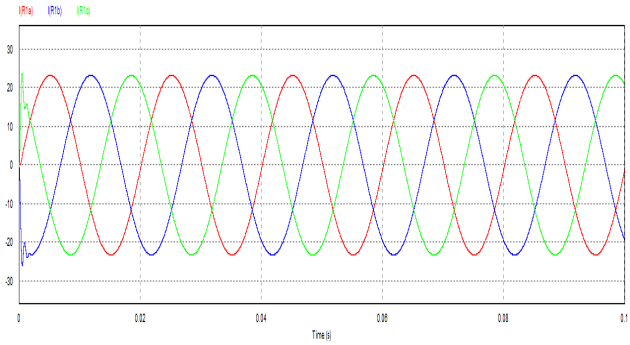


***Figure 12 :** courant de sortie de l'onduleur avant le filtre LCL*

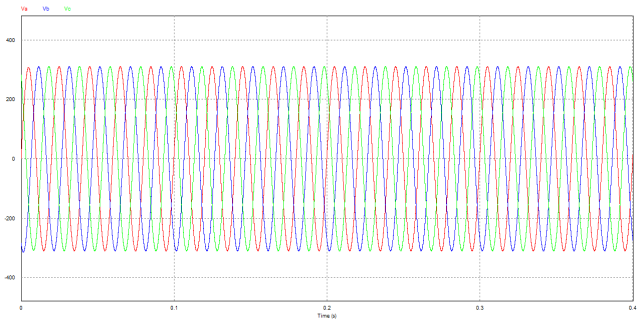


***Figure 12** : Tension de sortie filtrée de l'onduleur triphasé connecté au réseau*

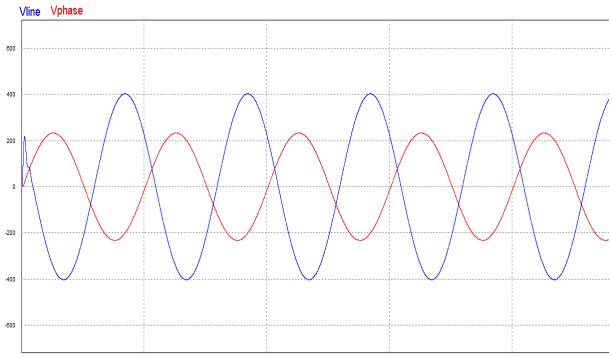


***Figure 13** : Tension de sortie de l'onduleur filtrée Vligne et Vphase.*

Les figures 14 et 15 montrent le flux de puissance active (KW) et de puissance réactive (KVAR) injectée dans le réseau qui est réglé à zéro au début, ces puissances sont fournies par l'onduleur connecté au réseau.

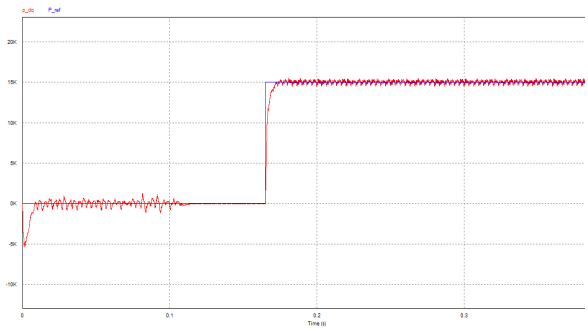


***Figure 14 :** Puissance active (KW) injectée dans le réseau*

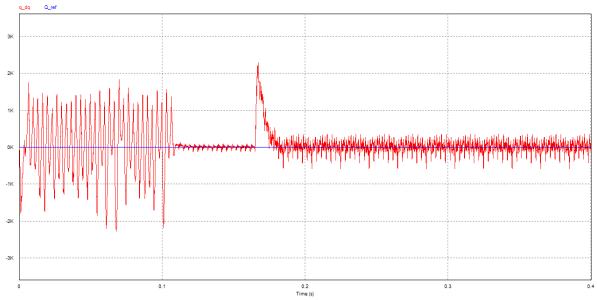


***Figure 15 :** Puissance réactive (KVAR) injectée sur le réseau*

La réponse de la composante de courant d est représentée sur la figure 16. Affichage de la capacité du contrôleur pour l'axe d à suivre décemment la puissance définie.

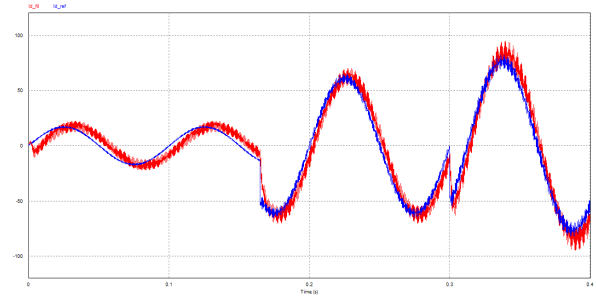


***Figure 16** : id réponse actuelle à la commande de référence*

La réponse de suivi de la composante de courant q a également été tracée sur la figure 17. Elle montre la capacité du contrôleur pour l'axe q de suivre décemment la puissance définie.

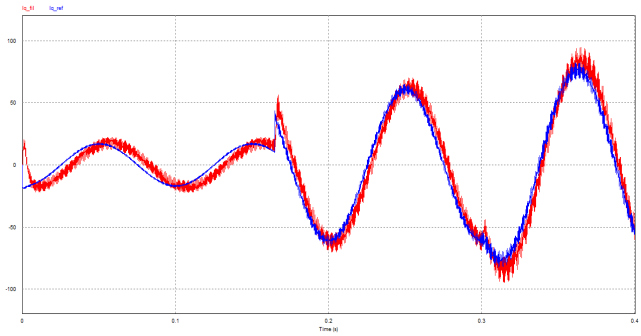


Figure 17 : réponse actuelle iq à la commande de référence

La réponse de suivi de la tension mesurée d et q est tracée sur la figure 18. Les axes d et q de la tension de l'onduleur sont régulés.

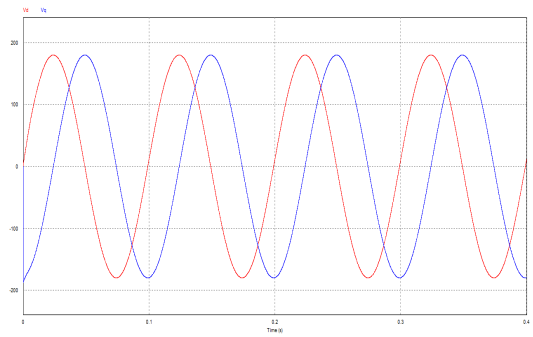


***Figure17** : la tension mesurée d et la q*

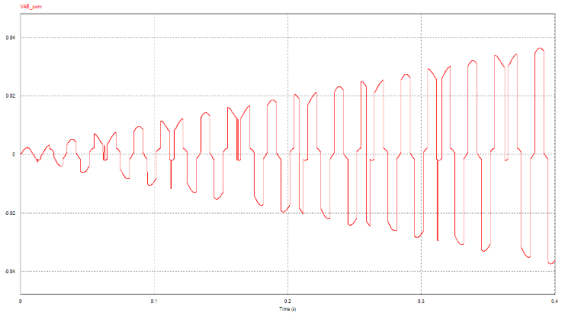


***Figure 18 :** Modulation des signaux dirigés vers la MLI*

Les figures 16 et 17 présentent le courant de suivi de référence de l'axe d et le courant de l'axe q en réponse aux références correspondantes, il est clairement observé la capacité du contrôleur pour l'axe q à suivre décemment la puissance définie.

À partir de la tension mesurée, les composants d et q sont également représentés sur la figure 18. Il est montré sur la figure 18 les signaux de modulation dirigés vers le générateur PWM.

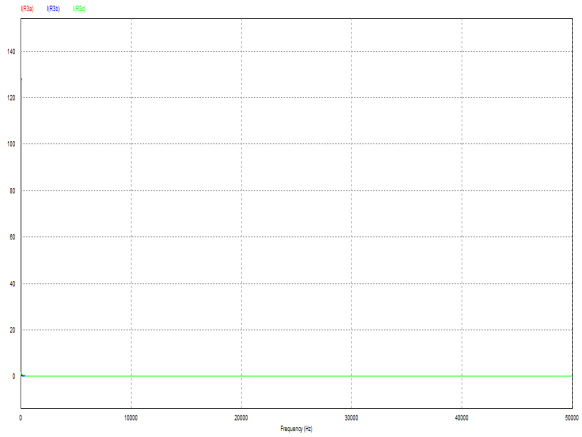


***Figure 19 :** Analyse FFT (Fast fourier transform) du THD (distorsion harmonique totale) sur le courant triphasé injecté dans le réseau*

La figure 19 présente l'analyse effectuée sur le courant injecté sur le réseau à une fréquence de 50HZ en effectuant l'analyse FFT (Transformée de Fourier Rapide) dans la plateforme logicielle de simulation, les résultats ci-dessus sont obtenus et on observe que les harmoniques sur le courant injecté sur le réseau sont très moins approximativement moins de 0,3% du courant nominal. L'analyse FFT convertit un signal en composantes spectrales individuelles et fournit ainsi des informations de fréquence sur le signal.

IV. CONCUSION

L'objectif de cet article est de proposer une méthode de contrôle d'une centrale électrique d'entrée universelle pour la production d'électricité composée de sources conventionnelles et de sources d'énergie renouvelables ainsi qu'un élément de stockage. Le développement et la conception d'un onduleur triphasé connecté au réseau ont été étudiés. La recherche a pu atteindre ses objectifs en concevant, modélisant, analysant et simulant le circuit à l'aide du progiciel Psim qui a permis de vérifier les performances du système de contrôle proposé. Au lieu d'un filtre L, un filtre LCL a été implémenté dans un autre pour éliminer les harmoniques hautes

fréquences qui sont imposés par le courant côté réseau à la suite de la commutation MLI des IGBT. L'efficacité du filtre LCL a été prouvé car les harmoniques de courant faible injectés dans le réseau pour remplir complètement les normes IEEE. La capacité de la commande de courant à fonctionner en mode connecté au réseau a été présentée à travers la réponse du système sur la capacité de suivi de diverses références actives et réactives.

V. References

1. Jiang, W. & Fahimi, B. 2011. *Multiport power electronic Interface—Concept, modeling, and design*. IEEE Transactions on Power Electronics, 26(7): 1890–1891.
2. Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D. & Strbac, G. 2000. *Embedded generation*. London: Institution of Engineering and Technology.
3. Kramer, W., Chakraborty, S., Kroposki, B. & Thomas, H. 2008. *Advanced power electronic interfaces for distributed energy systems; part 1: Systems and Topologies*. http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42672.pdf 20 January 2018.
4. Chen, Z. & Blaabjerg, F. 2009. *Wind farm—A power source in future power systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(6-7): 1288–1300.
5. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P. & Undel, T.M. 2003. *Power electronics: Converters, applications and design, media enhanced.* 3rd ed. United States: John Wiley and Sons (WIE).
6. Reznik, A., Simoes, M.G., Al-Durra, A. & Muyeen, S.M. 2014b. *Filter design and performance analysis for grid-interconnected systems.* IEEE Transactions on Industry Applications, 50(2): 1225–1232.
7. Reznik, A. 2012. *Analysis and Design of a Smart-inverter for Renewable Energy Interconnection to the Grid* (Masters Dissertation, Colorado School of Mines).
8. Mataifa, H., Raji, A. & Tzoneva, R., 2015. *Grid-mode Controller Design for a Dual-mode Inverter Interface for a Distributed Generation Source*. In Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), International Conference on the. IEEE,. pp. 317–324.
9. Liu, Z., Wu, H., Liu, Y., Ji, J., Wu, W. & Blaabjerg, F. 2017. *Modelling of the modified-LLCL-filter-based single-phase grid-tied Aalborg inverter*. IET Power Electronics, 10(2): 151-155.
10. Liu, Z., Wu, H., Liu, Y., Ji, J., Wu, W. & Blaabjerg, F. 2017. *Modelling of the modified-LLCL-filter-based single-phase grid-tied Aalborg inverter*. IET Power Electronics, 10(2): 151-155.
11. Xu, J., Xie, S. & Zhang, B. 2016. *Stability Analysis and Improvement of the Capacitor Current Active Damping of the LCL Filters in Grid-Connected Applications*. Journal of Power Electronics, 16(4): 1565-1577.
12. Karshenas, H.R. & Saghafi, H. 2013. *Basic criteria in designing LCL filters for grid connected converters.*1996–2000. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4078554 4 August 2016.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 66-83
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

CARACTERISATION DES AGGLOMERATS DES FINES PARTICULES PAR COMBINAISON DES TECHNIQUES NUMERIQUES DE LA GEOMETRIE ALGORITHMIQUE ET LA METHODE DE MONTE-CARLO : DETERMINATION DE LA MORPHOLOGIE, DE LA COMPACITE ET DE LA POROSITE

CHARACTERISATION OF FINE PARTICLE AGGLOMERATES USING A COMBINATION OF ALGORITHMIC GEOMETRY AND MONTE CARLO TECHNIQUES: DETERMINATION OF MORPHOLOGY, COMPACTNESS AND POROSITY

M. NGOMO[1,2], A. KIMBONGUILA[1]

[1] Laboratoire Mécanique – Energétique – Ingénierie (LMEI),
Chaire Unesco en Sciences de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
de l'Université Marien NGOUABI, Brazzaville, République du Congo.
[2] CM IT CONSEIL – Département Ingénierie, Recherche et Innovation – 32 rue Milford HAVEN 10100
Romilly sur Seine, France.
E-mail

RESUME

La valorisation des fines particules dans les bétons constitue un enjeu majeur pour la fabrication de matériaux de construction répondant aux exigences de développement durable. En effet, les additions minérales sont souvent des déchets ou des sous-produits industriels qui sont nettement moins coûteux que le ciment et permettent également de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO_2). Toutefois, leur incorporation en quantité massive dans les bétons, en remplacement ou en substitution du ciment, accroît de façon importante leur demande en eau pour le maintien de leur ouvrabilité. Malheureusement, cette augmentation de la demande en eau constitue un frein à leur valorisation. En effet, cet ajout d'eau se fait au détriment des résistances mécaniques du béton à l'état durci. Cette augmentation de la demande en eau est souvent imputée à l'agglomération des fines particules qui, d'une part, modifie la distribution granulométrique des particules en suspension et, d'autre part, emprisonne une partie de l'eau interstitielle ; ceci a pour conséquence l'augmentation de la fraction volumique effective pouvant conduire à une augmentation de la viscosité des suspensions et même à des situations de blocage de l'écoulement. La microstructure des agglomérats doit ainsi être étudiée en fonction des paramètres caractéristiques de la suspension pour pouvoir déterminer leur morphologie, quantifier leur taille et l'eau qu'ils renferment. La compréhension des mécanismes d'agglomération de ces fines est un enjeu majeur pour l'optimisation des mélanges contenant des quantités importantes de fines particules. Ce travail est une contribution à la caractérisation des agglomérats de fines particules dans le béton : estimation de la morphologie, de la compacité et de la porosité. Son objectif principal est de contribuer à l'amélioration des méthodes de caractérisation des agglomérats en se basant sur les techniques numériques éprouvées. Notre contribution dans cet article consiste à proposer des solutions alternatives pour pallier aux limites des méthodes actuelles. Nous appliquons les techniques numériques de la géométrie algorithmique combinées à la méthode de Monte Carlo. Plus précisément, nous considérons la population des fines particules (nuage de points) qui constituent l'agglomérat et nous déterminons la géométrie (morphologie) de l'agglomérat en considérant son enveloppe convexe enveloppante et son volume déterminé par la méthode de Monte Carlo. Le calcul du volume de l'enveloppe convexe enveloppante

de l'agglomérat nous permet ensuite de quantifier l'eau immobilisée dans les flocs et de déduire sa compacité et sa porosité. Dans cette étude, les fondamentaux de l'analyse fractale sont développés ainsi que les différents paramètres caractéristiques des agglomérats de fines particules. Les techniques de la géométrie algorithmique (convexité et enveloppe convexe notamment) sont aussi rappelées et appliquées sur des populations de fines particules. La compacité et la porosité de l'agglomérat sont estimées à l'aide de la méthode de Monte Carlo. Les résultats obtenus sont analysés et confrontés à ceux obtenus avec d'autres méthodes connues dans la littérature : méthode du cube digitalisée pour l'approximation du contour effectif de l'agglomérat et de sa compacité locale, méthodes d'estimation de la compacité des agglomérats à partir des volumes enveloppants (sphère enveloppante, cube enveloppant, méthode d'analyse des photographies hémisphériques des coupes de béton, ...), etc. Cette étude comparative met en évidence les gains de notre approche.

Mots-clés : *Agglomérat de fines particules, analyse des photographies hémisphériques, géométrie algorithmique, convexité, enveloppement convexe, méthode de Monte-Carlo, morphologie, compacité, porosité.*

ABSTRACT

The recovery of fine particles in concrete is a major challenge for the manufacture of construction materials that meet the requirements of sustainable development. Indeed, mineral additions are often waste products or industrial by-products which are much less expensive than cement and also make it possible to reduce greenhouse gas (CO2) emissions. However, their incorporation in massive quantities in concretes, as a replacement or substitution for cement, significantly increases their demand for water to maintain their workability. Unfortunately, this increase in water demand is a hindrance to their use. In fact, this addition of water is detrimental to the mechanical resistance of the concrete in the hardened state. This increase in water demand is often attributed to the agglomeration of fine particles which, on the one hand, modifies the particle size distribution of the particles in suspension and, on the other hand, traps part of the interstitial water; this results in an increase in the effective volume fraction which can lead to an increase in the viscosity of the suspensions and even to situations of blocking of the flow. The microstructure of the agglomerates must therefore be studied as a function of the characteristic parameters of the suspension in order to determine their morphology, quantify their size and the water they contain. Understanding the agglomeration mechanisms of these fines is a major challenge for the optimisation of mixtures containing large quantities of fine particles. This work is a contribution to the characterization of agglomerates of fine particles in concrete: estimation of morphology, compactness and porosity. Its main objective is to contribute to the improvement of methods for characterizing agglomerates based on proven digital techniques. Our contribution in this paper consists in proposing alternative solutions to overcome the limitations of current methods. We apply the numerical techniques of algorithmic geometry combined with the Monte-Carlo method. Specifically, we consider the population of fine particles (scatter plot) that constitute the agglomerate and determine the geometry (morphology) of the agglomerate by considering its enveloping convex envelope and its volume determined by the Monte Carlo method. The calculation of the volume of the convex envelope of the agglomerate then allows us to quantify the water immobilised in the flocs and to deduce its compactness and porosity. In this study, the fundamentals of fractal analysis are developed as well as the different characteristic parameters of fine particle agglomerates. The techniques of algorithmic geometry (convexity and convex envelope in particular) are also recalled and applied to populations of fine particles. The compactness and porosity of the agglomerate are estimated using the Monte-Carlo method. The results obtained are analysed and compared with those obtained with other methods known in the literature: digitised cube method for the approximation of the effective contour of the agglomerate and its local compactness, methods for estimating the compactness of agglomerates from enveloping volumes (enveloping sphere, enveloping cube, method of analysing hemispherical photographs of concrete sections, etc.). This comparative study highlights the gains of our approach.

Keywords : *Agglomerate of fine particles, analysis of hemispherical photographs, algorithmic geometry, convexity, convex envelopment, Monte-Carlo method, morphology, compactness, porosity.*

INTRODUCTION

L'agglomération est un phénomène très général qui intervient dans de nombreux contextes, qu'ils soient naturels ou industriels. La diversité des thématiques concernées en fait un phénomène très étudié. La valorisation des fines particules dans les bétons constitue assurément un enjeu majeur pour la fabrication de matériaux de construction répondant aux exigences de développement durable. En effet, les additions minérales sont souvent des déchets ou des sous-produits industriels qui sont nettement moins coûteux que le ciment et permettent également de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO_2). Dans le domaine du génie civil, l'agglomération des fines minérales (ciment, fillers, etc.) conditionne de manière déterminante le comportement rhéologique des suspensions cimentaires [Gallias 2000] [Bouzoubaâ & M.Lachemi 2001] [Bessa-Badreddine 2004] [Neville 2000] [Kara-Ali 2002] [LOOTENS 2004]. En effet, l'agglomération conduit à la formation de réseaux poreux de particules contenant une partie de l'eau libre de la suspension et modifie également la distribution et la taille des particules en suspension. *Déterminer la géométrie réelle des agglomérats est alors d'une grande importance afin de maitriser leur morphologie et d'appliquer des modèles rhéologiques permettant de prédire la viscosité de la suspension*. La microstructure des agglomérats doit ainsi être étudiée en fonction des paramètres *caractéristiques* de la suspension pour pouvoir quantifier leur taille et l'eau qu'ils renferment. La compréhension des mécanismes d'agglomération de ces fines devrait permettre à terme d'adapter les méthodes de formulation utilisées pour les bétons conventionnels et d'optimiser les mélanges contenant des quantités importantes de fines particules. Mais, comment accéder aux caractéristiques des agglomérats, particulièrement la part ou la proportion d'eau emprisonnée dans les flocs ? De cette problématique découle l'approche d'Analyse fractale comme outil mathématique d'analyse et de caractérisation des agglomérats [KIMBONGUILA 1993], particulièrement la détermination de la part d'eau emprisonnée dans les flocs. Les méthodes de caractérisation utilisées pour le calcul de la dimension fractale (méthode de comptage de cubes, méthode de volume enveloppante) ont montré quelques inconvénients. Il s'agit de l'importance des erreurs d'estimation et la limitation du domaine d'application [KIMBONGUILA 1993]. Pour pallier ces limites, nous utilisons dans cette étude les techniques de la géométrie algorithmique, notamment les algorithmes de détermination de l'enveloppement convexe d'un ensemble de points, appliquée aux particules fines d'un agglomérat ou d'une coupe d'agglomérat de béton pour déterminer sa géométrie. La détermination de la géométrie de l'agglomérat permet de déduire sa compacité et sa porosité.

Ce travail est une contribution à la caractérisation de la microstructure des agglomérats de fines particules dans le béton : estimation de la morphologie, de la compacité et de la porosité. Son objectif principal est de contribuer à l'amélioration des méthodes de caractérisation des agglomérats en se basant sur les techniques numériques éprouvées. Notre contribution dans cet article consiste à proposer des solutions alternatives pour réduire ces erreurs. Nous appliquons les techniques numériques de la géométrie algorithmique combinées à la méthode de Monte Carlo [Nicholas Metropolis 1987] [Nicholas Metropolis 1949] [Eric C. Anderson 1999]. Plus précisément, nous considérons la population des fines particules (nuage de points) qui constituent l'agglomérat et nous déterminons la géométrie (morphologie) de l'agglomérat en considérant son enveloppe convexe enveloppante et son volume déterminé par la méthode de Monte Carlo. Le calcul du volume de l'enveloppe convexe enveloppante de l'agglomérat nous

permet ensuite de quantifier l'eau immobilisée dans les flocs et de déduire sa compacité et sa porosité. Dans cette étude, les fondamentaux de l'analyse fractale sont développés ainsi que les différents paramètres caractéristiques des agglomérats de fines particules. Les techniques de la géométrie algorithmique (convexité et enveloppe convexe notamment) sont aussi rappelées et appliquées sur des populations de fines particules. La compacité et la porosité de l'agglomérat sont estimées à l'aide de la méthode de Monte Carlo. Les résultats obtenus sont analysés et confrontés à ceux obtenus avec d'autres méthodes connues dans la littérature : méthode du cube digitalisée pour l'approximation du contour effectif de l'agglomérat et de sa compacité locale, méthodes d'estimation de la compacité des agglomérats à partir des volumes enveloppants (sphère enveloppante, cube enveloppant, méthode d'analyse des photographies hémisphériques des coupes de béton, ...), etc. Cette étude comparative met en évidence les gains de notre approche.

II. ETAT DE L'ART

II.1 Agglomération des fines particules

La compréhension des mécanismes d'agglomération durant lesquels des particules initialement isolées s'associent entre elles pour former des agglomérats, est d'une importance capitale pour connaître la taille finale et la morphologie des agglomérats qui déterminent les propriétés du produit final. L'agglomération est un processus par lequel deux ou plusieurs particules initialement dispersées se rencontrent sous l'action des forces attractives et adhérent de manière définitive pour constituer un agglomérat dont la taille croit avec le temps. Les études numériques menées sur l'agglomération et la fragmentation disponibles dans la littérature peuvent être scindées en deux groupes : les unes qui s'intéressent à la formation des agglomérats et les autres qui mettent l'accent sur la caractérisation des agglomérats. Notre étude porte sur la caractérisation de la microstructure des agglomérats.

II.2 Caractérisation de la microstructure des agglomérats

II.2.1 Approche fractale appliquée aux agglomérats

Approche fractale

La théorie des fractales, développée par Mandelbrot [Mandelbrot 1983] [Mandelbrot 1998] [QUEIROS-CONDE & al. 2015], est un moyen de description des formes géométriques irrégulières (courbe, surface ou volume) qui se créent en suivant les règles déterministes. Les objets qui peuvent y être décrits doivent avoir des détails similaires à des échelles arbitrairement petites ou grandes et être exactement ou statistiquement auto-similaires, c'est-à-dire que le tout doit être semblable à une de ses parties. Le paramètre quantitatif le plus important est la dimension fractale (ou dimension de Hausdorff). En utilisant les notions introduites par Mandelbrot [Mandelbrot 1983] [Mandelbrot 1998], Weitz et Oliveria [Weitz & M.Olivera 1984] [BERKANI 2019] montré qu'il était possible de traiter les agglomérats comme des objets fractals ou précisément comme des objets « quasi-fractals ». De nombreux auteurs ont ensuite utilisés ce concept pour étudier le comportement des agglomérats. L'analyse fractale est l'outil utilisé pour caractériser les agglomérats.

Morphologie des agglomérats fractals

La morphologie des agglomérats dépend de la physico-chimie et des conditions hydrodynamiques de leur formation ainsi que de leurs propriétés mécaniques intrinsèques. Cependant, réciproquement, la dynamique de l'agglomération dépend aussi de la morphologie des particules rentrant en collision. Les objets obtenus lors de l'agglomération sont des agglomérats plus ou moins compacts contenant un nombre

variable de particules primaires. De nombreux auteurs les qualifient de fractals. Depuis que l'on peut décrire précisément des formes régulières par des équations mathématiques, les propriétés des corps irréguliers sont souvent exprimées en utilisant certaines caractéristiques des corps réguliers, comme le diamètre équivalent d'une sphère par exemple. Cependant, certaines structures, comme celles des agglomérats, sont trop irrégulières pour être décrites de cette manière. La géométrie fractale est donc arrivée comme un nouvel outil mathématique pour le traitement de systèmes désordonnés, quelle que soit leur échelle. Un grand progrès a pu être réalisé avec l'introduction de ces modèles qui, plus réalistes d'un point de vue géométrique, permettent aussi une représentation théorique plus satisfaisante du transport des agrégats par le fluide, de leurs interactions hydrodynamiques et physico-chimiques, de leur fragmentation, ainsi que de leurs propriétés optiques par exemple.

Loi fractale

La description de la morphologie complexe consiste à caractériser, au moins de façon statique, la façon dont les N_p particules primaires qui constituent l'agglomérat ou leur masse sont distribuées dans l'espace. Comme évoqué dans le paragraphe précédent, ceci a été possible dès l'introduction du concept de fractales par Mandelbrot [98], c'est à dire des objets qui conservent la même structure quelle que soit l'échelle d'observation. Un agglomérat est dit fractal si sa distribution de masse comporte une certaine forme d'invariance d'échelle. La forme la plus répandue qui associe la taille de l'agglomérat à son nombre de particules primaires est appelée « loi fractale » et s'exprime à l'aide du rayon de giration R_g[Forest & Witten 1979] [Filippov, Zurita &Rosner 2000] [Sorensen 2001].

$$\boldsymbol{N_p = k_f \left(\frac{Rg}{r}\right)^{Df}}$$

où r est le rayon de particules primaires, D_f la dimension fractale de l'agglomérat comprise entre 1 et 3 et $k_f$le facteur encore appelé pré-facteur fractal [Veerapaneni & Wiesner 1996] [Thill 2006].

Différentes caractéristiques peuvent être calculées pour ainsi mieux étudier les agglomérats formés.

Dimension fractale

L'une des caractéristiques les plus étudiées à propos des agglomérats est la dimension fractale, celle-ci étant très explicite quant à la représentation de l'agglomérat ainsi formé et nous donne une meilleure idée sur la distribution de la matière au sein de l'amas. Cette valeur ne suffit pas à décrire les caractéristiques topologiques d'un agglomérat, mais demeure un outil indispensable quant à la densité de la matière dans un amas.

De nombreuses techniques sont utilisées et largement discutées dans la littérature comme par exemple dans la revue bibliographique effectué par Bushell et al ou l'étude comparative réalisée par Secrieru. La diffusion angulaire [Freltoft & Sinha 1986] [Sorensen & al. 1992] [Link & al. 2011], la mesure de la densité effective [VanGulijk & al. 2004], la méthode de comptage des boites, connue sous le nom de « Box-Counting » en anglais [Freltoft & Sinha 1986] [Sorensen & al. 1992] [Link & al. 2011], la fonction de densité d'autocorrélation de pair [Forest & Witten 1979] [Julien & Botet 1987] [Friedlander 2000] [Eggersdorfer & al. 2010] sont quelques-unes des méthodes disponibles.

Parmi les méthodes les plus efficaces pour calculer la dimension fractale d'un objet, la méthode par comptage de boites est de loin la plus utilisée [Vicsek 19921] [DOYON 2011]. Cette méthode a l'avantage d'être simple, mais aussi rapide en donnant une valeur de dimension fractale

relativement bonne. Cette méthode présente cependant aussi des limitations, du fait qu'elle nécessite l'utilisation d'une image binaire. C'est aussi la plus utilisée et la plus abondamment documentée dans la littérature [Wozniak & al. 2012]. Elle est simple à implémenter et applicable pour des objets avec ou sans autosimilarité.

Principe de la méthode de comptage de boites (BCM)

La figure ci-dessous montre schématiquement quatre étapes de l'algorithme BCM. L'agglomérat est positionné au centre de la boîte qui servira de grille dont les dimensions sont maintenues fixes mais dont la taille de la maille ε varie progressivement par puissance de 2. Le raffinement se poursuit tant que la dimension linéaire de la maille est plus grande que la taille d'une particule primaire de l'agglomérat

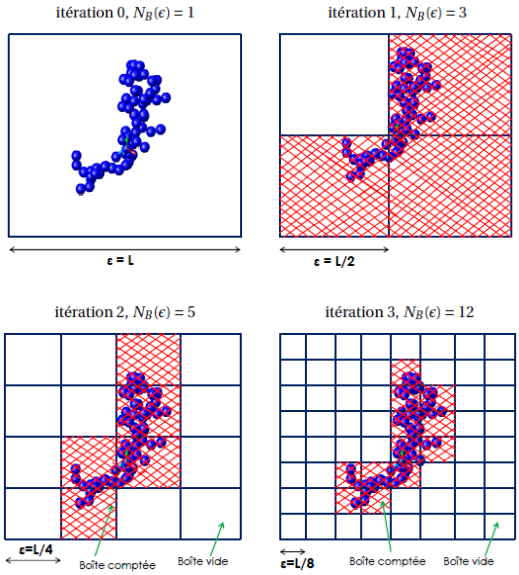


***Figure 1**. Illustration de la méthode de box-Counting en deux dimensions (2D) pour différentes tailles de mailles ε [KIMBONGUILA 1993].*

Les boîtes hachurées contiennent au moins une portion de l'agglomérat. L'itération 0 n'est pas prise en compte dans le calcul de la dimension fractale. A chaque étape de raffinement, le nombre de boîtes $N_B(\varepsilon)$ contenant au moins une portion de l'agglomérat est compté. Lorsque la taille de la maille ε diminue, $N_B(\varepsilon)$ augmente. Si l'agglomérat étudié est fractal, le nombre de boîtes $N_B(\varepsilon)$ nécessaire pour recouvrir entièrement l'agglomérat obéit à la loi de puissance : $N_B(\varepsilon) \approx (L/\varepsilon)^{D_b}$ où D_b est la dimension de box-counting.

La dimension de box-Counting ne diffère de la dimension fractale que dans des cas très particuliers (et alors $D_b > D_f$). Ainsi, on identifie D_b à la dimension fractale de l'agglomérat, D_f. La convergence de la dimension fractale est obtenue lorsque la taille de la maille tend vers la taille d'une particule élémentaire de l'agglomérat a_i et la dimension fractale obtenue est comprise entre 1 et 3.

$$D_f = \lim_{\epsilon \to a} \frac{\ln(N_B(\epsilon))}{\ln(L/\epsilon)}$$

De nombreux auteurs s'accordent sur le fait que seuls les agglomérats assez grands ($N_p > N_{p,lim}$) où N_p est le nombre de particules primaires dans l'agglomérat

peuvent être considérés comme ayant une structure fractale. Cependant la valeur de $N_{p,lim}$ est sujette à controverses : elle varie de 5 à 16 selon les auteurs [Eggersdorfer & al. 2010]. Cette méthode possède quelques limitations notamment pour de gros agglomérats [KIMBONGUILA 1993]. En effet, la méthode nécessite le maillage du domaine complet, tridimensionnel de l'agglomérat à chaque itération, ce qui a pour conséquence d'augmenter le coût de calcul et de stockage de données. Il n'est pas nécessaire de procéder par itération puisque l'on peut directement utiliser un maillage dont la taille de la maille correspond à la taille d'une particule.

Le facteur de structure

Le facteur de structure est un paramètre souvent considéré comme secondaire dans les études morphologiques au profit de la dimension fractale qui intervient comme un terme de puissance. Une des raisons est que ce paramètre varie beaucoup en fonction des conditions expérimentales et des méthodes utilisées pour extraire les informations morphologiques. Néanmoins, on trouve de plus en plus des travaux à ce sujet [Sorensen & Roberts 1997] [Brasil & al.2001] [Liu & al.2009] [Shapiro & al.2012].

II.2.2 Méthode de caractérisation des agglomérats fractals : estimation de la compacité et de la porosité

La compacité d'un agglomérat est le rapport entre le volume solide total occupé par les particules primaires, V_s et le volume total effectif de l'agglomérat, V_{eff}

$$\phi_f = \frac{V_s}{V_{eff}}$$

Le volume solide total occupé par les particules primaires de l'agglomérat, V_a ne dépend que du nombre de particules N_p dans l'agglomérat et de leur rayona_i . Nous verrons ci-dessous, comment est approché le volume effectif de l'agglomérat en fonction de l'approche utilisée. On peut d'ores et déjà constater que la compacité va dépendre de la méthode de calcul.

Méthode du cube digitalisée

Dans cette méthode, pour approcher le volume effectif de l'agglomérat, on utilise une subdivision uniforme en voxels du domaine contenant l'agglomérat. Nous l'appellerons « Méthode du Cube Digitalisée (MCD) ». La figure permet de d'illustrer en deux dimensions la subdivision du domaine de l'agglomérat.

Le volume effectif de l'agglomérat est donné par l'équation

$\boldsymbol{V_{eff}} = \sum_{k}^{N_{cut}} \boldsymbol{V_k}$, où N_{cut} est le nombre total de voxels contenant au moins une portion de l'agglomérat, $V_k = d^3$ est le volume d'un voxel et d est la dimension linéaire d'un voxel.

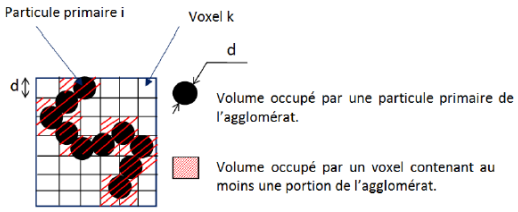


***Figure 2**. Approximation en deux dimensions du contour effectif de l'agglomérat et de sa compacité locale.*

La discrétisation utilisée permet à priori une description relativement réaliste de l'agglomérat. Toutefois, l'estimation du volume total effectif par cette méthode dépend étroitement du choix de la dimension des voxels.

• des voxels très petits devant la taille des particules ne permettent pas de tenir compte de la porosité « interne » de l'agglomérat (car ils risquent de n'être coupés par aucune particule, même s'ils sont situés à l'intérieur du floc).

• des voxels trop grands devant la taille des particules donneront en revanche

une description plus approximative du contour de l'agglomérat.

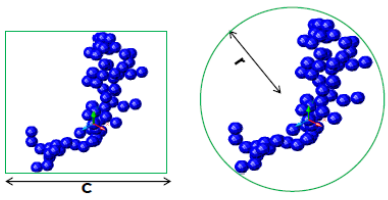
Ainsi, dans le cas des suspensions de particules polydisperses, la compacité calculée risque de dépendre de la taille des particules primaires dans l'agglomérat.

Méthodes des volumes enveloppants

La figure schématise les deux autres approches d'estimation du volume effectif de l'agglomérat. Elles sont certes différentes entre elles mais sont basées sur le même principe. La deuxième approche que nous nommerons « méthode du cube enveloppant » (Figure 4a)-) consiste à recouvrir le volume de l'agglomérat par un cube dont le côté c=l_{max} est donné par la relation suivante : $l_{max} = \max(d_{ij}) + a_i + a_j$

où d_{ij} est la distance entre les deux particules les plus éloignées de l'agglomérat

De même, dans la dernière approche, nommée « méthode de la sphère enveloppante » (Figure 4b), l'agglomérat est recouvert par une sphère enveloppante de rayon, r= $l_{max}/2$.



a) - Cube enveloppant b) - Sphere enveloppante

***Figure 3**. Estimation de la compacité des agglomérats à partir du cube et de la sphère enveloppante.*

III. Application des techniques de géométrie algorithmique pour la caractérisation de la microstructure des agglomérats fractals

III.1 Justification

Devant les limitations dans l'application de la méthode (approche du cube digitalisé) d'un côté et la surestimation des résultats des approches du volume enveloppant (du cube enveloppant et de la sphère enveloppante) de l'autre [KIMBONGUILA 1993], nous avons été amené à utiliser des méthodes numériques de la géométrie algorithmique pour améliorer les méthodes de caractérisation des agglomérats (estimation de la compacité, de la proportion d'eau, etc.). La géométrie algorithmique [Boissonnat 2017] [Boissonnat & Yvinec 1995] [Goodman & O'Rourke1995] est un domaine situé à l'interface entre les mathématiques et l'informatique, étant tout particulièrement en lien avec la géométrie et la topologie, la statistique, la combinatoire, l'algorithme et la théorie des graphes, et aussi motivée par les nombreux domaines d'applications qui demandent de traiter de manière efficace des objets ou des masses de données géométriques. La géométrie algorithmique est une discipline apparue dans les années 1970 [Graham 1972] [Preparata & Hong 1977] traitant de problèmes géométriques sous l'angle algorithmique. La géométrie algorithmique tire ses références et entretien des liens étroits avec de nombreux domaines tels que : les mathématiques discrètes et combinatoires, la théorie des polytopes, la recherche opérationnelle, la théorie des graphes et l'informatique en général.

III.1.1 Inconvénients de la méthode par volume enveloppant

Les inconvénients des méthodes basées sur le cube et la sphère enveloppante résident dans l'approximation du contour. En effet, elles surestiment clairement le volume poreux de l'agglomérat.

III.1.2 Inconvénients de la méthode du cube digitalisé de boites

Elle dépend de la taille des particules.

- des voxels très petits devant la taille des particules ne permettent pas de tenir compte de la

porosité « interne » de l'agglomérat.
- des voxels trop grands devant la taille des particules donnent en revanche une description plus approximative du contour de l'agglomérat.

III.2. Convexité et enveloppe convexe en géométrie algorithmique

III.2.1. Convexité et enveloppe convexe

III.2.1.1. Ensembles convexes en 2D

Un ensemble A $\subset \mathbb{R}^2$est convexe lorsque pour tous points *p, q* $\in$ A, le segment est inclus dans [*p, q*] . Par exemple, $\mathbb{R}^2$ et Ø sont convexes, un segment est convexe, un triangle, un disque (avec leur intérieur cela va de soi) sont convexes, etc.

III.2.1.2. Enveloppe convexe

Le calcul des enveloppes convexes constitue l'un des problèmes plus importants et étudiés de la géométrie algorithmique dès ses origines ; ceci explique le vaste nombre de stratégies développées dans ce contexte dans la littérature. Les algorithmes d'enveloppe les plus populaires sont l'algorithme « Graham scan » [Graham 1972] et l'algorithme de « diviser-et-régner » [Preparata & Hong 1977] [Preparata & Shamos 1984] [Preparata & Shamos 1985]. Les implémentations de ces deux algorithmes sont facilement disponibles (voir [O'Rourke 1998]). Les deux sont des algorithmes en temps *O* (n log n), mais le Graham a une constante d'exécution faible en 2D et s'exécute très rapidement. Cependant, l'algorithme de Graham ne se généralise pas à la 3D et aux dimensions supérieures alors que l'algorithme de diviser-et-régner a une extension naturelle. Il existe de nombreuses applications pour les enveloppes convexes : la prévention des collisions, la détermination de l'objet caché et l'analyse de la forme pour n'en nommer que quelques-unes. L'enveloppe convexe C(A) d'un ensemble A de points du plan est la plus petite partie convexe du plan contenant A. Lorsque l'ensemble A est fini, l'ensemble C(A) peut être "calculé " par un certain nombre d'algorithmes [O'Rourke 1998] [Graham 1972] [Preparata & Hong 1977].

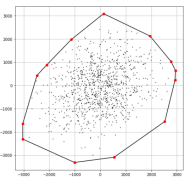


Figure 4. *Convexité et enveloppe convexe*

Dans un plan, l'enveloppe convexe peut être comparée à la région limitée par un élastique qui englobe tous les points qu'on relâche jusqu'à ce qu'il se contracte au maximum. L'idée serait la même dans l'espace avec un ballon qui se dégonflerait jusqu'à être en contact avec tous les points qui sont à la surface de l'enveloppe convexe. L'enveloppe convexe de A est la plus petite partie convexe de E qui contient A. Développé de façon plus détaillée, ce résultat caractérise l'enveloppe convexe Conv(A) comme l'unique sous-ensemble de E qui vérifie les trois conditions suivantes :

- Conv(A) est convexe ;
- A est inclus dans Conv(A) ;
- Si *C* est un sous-ensemble convexe de E contenant A, alors Conv(A) est inclus dans *C*.

Par exemple, Conv(∅)=∅

L'enveloppe convexe de A est l'ensemble des combinaisons convexes c'est-à-dire des barycentres à coefficients positifs ou nuls de familles de points de A. Autrement dit : les éléments de l'enveloppe convexe de A sont exactement les points x de E qu'on peut écrire sous la forme : $x=\sum_{i=1}^{p} \lambda_i a_i$, expression dans laquelle, les a_i représentent les agglomérats qui sont dans A, les coefficients λ_i sont réels positifs et de somme $\sum_{i=1}^{p} \lambda_i = 1$.

III.2.2 Aspects algorithmiques : algorithmes et complexité

Le calcul de l'enveloppe convexe d'un ensemble de points est un problème classique en géométrie algorithmique. Il constitue l'un des problèmes plus importants et étudiés de la géométrie algorithmique dès ses origines : ce qui explique le vaste nombre de stratégies développées dans ce contexte. La conception d'une stratégie efficace pour le calcul des enveloppes convexes nécessite à la fois la compréhension du problème géométrique, ainsi que la maîtrise de structures de données et techniques algorithmiques [O'Rourke 1998] [Graham 1972] [Preparata & Hong 1977]. Plusieurs algorithmes ont été inventés pour résoudre ce problème, leur complexité varie :

En 2D	- Gift wrapping (1970) & Jarvis march ou marche de Jarvis (1973): O(h . n), étant le nombre de points ou d'agglomérats de l'enveloppe convexe ; - Graham scan/ Parcours de Graham (19972): O(n . log(n)) - Heuristique de AKL-Toussaint ; - Quickhull (1977): O(n . log(n)) - Divide and conquer (1977): O(n . log(n)) - Monotone chain (1979) O(n) quand les points sont tries - Incremental covex hull (1984) : O(n . log(n)) - Ultimate planer convex hull (1986): O(n . log(h)) - Algorithme de Chan's / Nielsen's algorithm (1996) : O(n . log(h)) - Utilisation du diagramme de Voronoi en O (n log(n)) : les points de l'enveloppe convexe définissent des cellules de Voronoi ouvertes, il suffit de détecter ces cellules et de relier les germes des cellules adjacentes.
En 3D	- Algorithme de Chan's en 3D

Les algorithmes d'enveloppe les plus populaires sont l'algorithme « Graham scan » [Graham 1972] et l'algorithme de « diviser-et-régner » [Preparata & Hong 1977] [Preparata & Shamos 1984] [Preparata & Shamos 1985]. Les implémentations de ces deux algorithmes sont facilement disponibles (voir [O'Rourke 1998]). Les deux sont des algorithmes en temps *O* (n log n), mais le Graham a une constante d'exécution faible en 2D et s'exécute très rapidement. Cependant, l'algorithme de Graham ne se généralise pas à la 3D et aux dimensions supérieures alors que l'algorithme de diviser-et-régner a une extension naturelle. Nous ne considérons pas les algorithmes 3D ici (voir [O'Rourke 1998] pour plus d'informations).

III.3 Caractérisation des agglomérats par l'application des techniques de la géométrie algorithmique

III.3.1. Calcul de l'enveloppe convexe enveloppante d'un agglomérat

Soit P un ensemble de n points correspondant aux fines particules constituant un agglomérat. L'étude consiste en la caractérisation de la structure / la géométrie de l'agglomérat par l'utilisation des technique de la géométrie algorithmique, notamment les techniques de détermination de l'enveloppe convexe d'un ensemble de points. Les principaux paramètres à déterminer sont la compacité et la porosité.

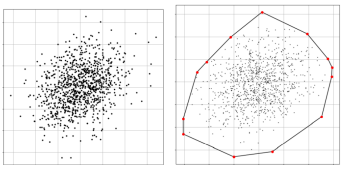


***Figure 5**. Convexité et enveloppe convexe*

Les fines particules étant de très petite taille, nous faisons l'hypothèse que chaque particule est ramenée à la taille d'un point du nuage de points constituant l'agglomérat. Etant donné un ensemble de points ou de fines particules d'un agglomérat, par application d'un algorithme de calcul d'enveloppe convexe nous obtenons ainsi l'enveloppe convexe enveloppante de l'agglomérat. Dans le cas où la taille des fines particules n'est pas négligeable, nous pouvons procéder à la digitalisation du contour des particules primaires en et ainsi obtenir un autre nuage de points.

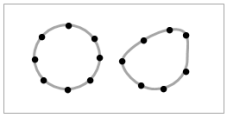


***Figure 6**. Exemple d'échantillons des points des contours d'une particule primaire*

On obtient ainsi un autre nuage de points enveloppant totalement les fines particules et permettant d'obtenir l'enveloppe convexe enveloppante. Ce traitement évite une perte du volume de l'enveloppe et permet d'envelopper la totalité des fines particules. Autrement, cet écart peut être important surtout si la taille (ou taille moyenne) des agglomérats est importante.

Une fois l'enveloppe convexe enveloppante obtenue, nous utilisant la méthode de Monte Carlo pour estimer le volume de l'enveloppe convexe enveloppante. Nous pouvons constater que le volume du cube ou du cercle enveloppant est plus grand que celui de l'enveloppe convexe enveloppante de l'agglomérat.

III.3.2. Estimation du volume de l'enveloppe convexe enveloppante

Pour déterminer le volume de l'enveloppe convexe enveloppante de l'agglomérat, nous utilisons la méthode de Monte Carlo pour l'estimation d'aires. En particulier, il s'agira d'utiliser la méthode de Monte Carlo pour calculer une valeur approchée de l'aire d'un polygone. La méthode de Monte Carlo [Nicholas Metropolis 1987] [Nicholas Metropolis 1949] [Eric C. Anderson 1999] pour le calcul de l'aire d'un polygone nécessite de trouver une forme géométrique rectangulaire contenant le polygone, dont on sait calculer l'aire, et dans laquelle on est capable de tirer des points uniformément au hasard. La valeur approchée de l'aire du polygone est donnée en fonction de la proportion du nombre de points qui sont dans le polygone, et de l'aire de la boîte

rectangulaire contenant le polygone. Soit donc une zone rectangulaire dont les côtés sont de longueurs connues. Au sein de cette aire se trouve l'enveloppe convexe dont la superficie est inconnue. Grâce aux mesures des côtés de la zone, on connaît l'aire du carré ou du rectangle. Pour trouver l'aire de l'enveloppe convexe, on génère N particules de manière aléatoire sur cette zone rectangulaire. On compte ensuite le nombre n de particules à l'intérieur de l'enveloppe ; on peut ainsi déterminer le nombre particules k=N-n qui sont générées dans l'enveloppe convexe. Il suffit ensuite d'établir un rapport entre les valeurs :

$$\frac{\text{air de l'enveloppe convexe}}{\text{air du rectangle}} = \frac{k}{N}$$

$$\Rightarrow \text{air de l'enveloppe convexe} = \frac{k}{N} \text{ x air du rectangle}$$

Avec

$$\begin{cases} k = N - n \text{ , nombre de particules} \\ n = \text{nombres de particules restant sur le rectangle} \\ N = \text{nombre de particules générées} \end{cases}$$

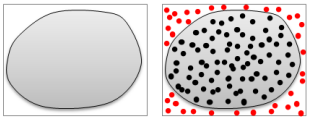


Figure 7*. Application de la méthode de Monte Carlo pour le calcul du volume de l'enveloppe convexe*

La qualité de l'estimation s'améliore (lentement) en augmentant le nombre de tirs et en s'assurant que générateur aléatoire ne génère pas toujours le même point mais couvrent bien la zone rectangulaire, de manière uniforme. La qualité du générateur aléatoire est primordiale pour avoir de bons résultats dans la méthode de Monte Carlo. Le volume obtenu représente le *volume total effectif de l'agglomérat*, V_{eff}. Le le *volume solide total occupé par les particules primaires étant connu*, V_s, il nous reste à déterminer la compacité et la porosité de l'agglomérat.

IV. 2.3 Déduction de la compacité et de la porosité

Comme nous l'avons vu précédemment (section II.2.2), la compacité d'un agglomérat est le rapport entre le *volume solide total occupé par les particules primaires*, V_s et le *volume total effectif de l'agglomérat*, V_{eff} :

$$\boldsymbol{\phi_f = \frac{V_s}{V_{eff}}}$$

Suivant la relation donnée $\phi_f = \frac{V_S}{V_{eff}}$, on estime la compacité de l'agglomérat.

Le volume solide total occupé par les particules primaires de l'agglomérat, V_s ne dépend que du nombre de particules N_p dans l'agglomérat et de leur rayon r_i . Le volume des vides intra-flocs représente le volume occupé par une partie de l'eau interstitielle. Connaissant la compacité de l'agglomérat, sa porosité est déduite au travers d'une relation univoque entre la compacité et la proportion d'eau.

IV. 2.4 Synthèse de la méthode

L'approche adoptée consister donc en :

- la détermination des points de contour selon le cas et à disposer d'un échantillon de points permettant d'effectuer le calcul de l'enveloppe convexe enveloppante de l'agglomérat,
- la détermination de l'enveloppe convexe de l'agglomérat (plus petite enveloppe convexe enveloppante),
- la détermination de la surface intérieure de l'enveloppe convexe enveloppante Sec par la méthode de Monte Carlo.
- une fois la surface de l'enveloppe convexe obtenue nous pouvons déduire la surface des poches d'eau en enlevant la surface totale des particules (zone en noire).
- nous pouvons alors déduire la compacité (resp. la porosité) de l'agglomérat en calculant la proportion de la surface totale des particules (resp. de la surface des poches d'eau) par

rapport à la surface de l'enveloppe convexe enveloppante.

IV. 2.5 Analyse des résultats

Le calcul de l'enveloppe convexe enveloppante est un résultat intéressant puisqu'il permet d'approcher de manière fine la morphologie de l'agglomérat de fines particules. Elle permet à la fois d'estimer la morphologie de l'agglomérat mais également de déterminer les paramètres de caractérisation des agglomérats qui sont le volume effectif de l'agglomérat, la compacité et la porosité de l'agglomérat.

IV. 2.6 Comparaison avec les méthodes actuelles

Le calcul de l'enveloppe convexe enveloppante est un résultat intéressant puisqu'il permet d'approcher de manière fine la morphologie de l'agglomérat de fines particules. Et donc d'approcher le volume effectif de l'agglomérat. Comparé au cercle ou cube enveloppant, nous obtenons un résultat plus

Les méthodes des volumes enveloppants

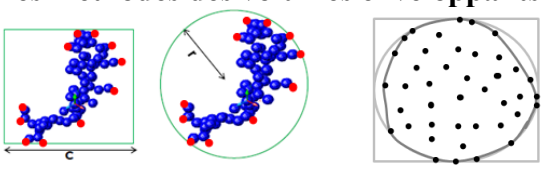


Figure 8. *Comparaison cube enveloppant / sphère enveloppante et enveloppe convexe enveloppante*

En reprenant l'exemple précédent d'estimation de la compacité des agglomérats à partir du cube et de la sphère enveloppante, nous pouvons constater l'importance de l'écart avec le cercle enveloppant (la partie blanche entre le cercle et l'enveloppe convexe). Cet écart montre bien que l'enveloppe convexe enveloppante obtenue est un meilleur candidat que le cercle enveloppant [Kimbonguila 1993]. Comparé à la différence de surfaces entre la surface du cercle enveloppant et la surface totale des particules, nous obtenant un résultat meilleur que celui avec le cercle enveloppant.

La méthode du cube digitalisée

Dans la méthode du cube digitalisé, la discrétisation utilisée permet à priori une description relativement réaliste de l'agglomérat. Pour approcher le volume effectif de l'agglomérat, on utilise une subdivision uniforme en voxels du domaine contenant l'agglomérat. Une comparaison avec l'enveloppe convexe montre que notre approche ne donne pas de meilleurs résultats que ceux de la méthode du cube digitalisé comme le montre la figure ci-dessous.

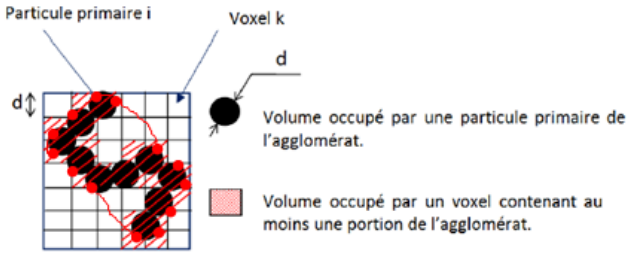


Figure 9*. Approximation en deux dimensions du contour effectif de l'agglomérat et de sa compacité* locale.

En revanche, l'approximation du volume de l'agglomérat avec la méthode du cube digitalisé peut être améliorée en considérant, non pas le volume des voxels qui touchent les particules, mais la proportion des particules dans chaque voxel, permettant ainsi de déterminer le volume occupé par les particules dans chaque voxel. Une fois de plus, ce résultat peut être obtenu en utilisant par Monte Carlo appliquée à chaque voxel ou par analyse d'image de la structure du cube digitalisé.

Méthode d'analyse d'images avec les logiciels GLA et CANOPEO

La compacité et la porosité obtenues ici peuvent être comparables avec celles obtenues avec l'analyse des photographies avec le logiciel GLA [BECKER 1971] [BONHOMME 1993] [Bréda & al. 2002] [Ducrey 1975a] [Ducrey 1975b] [GOND 2002] [GRANGEON 2006] [Ligot & Makels 2011] [Moutou 2020] [NGOMO 1991] [ROSS 1981] [Soudani & al. 2006] ou avec le logiciel CANOPEO, deux logiciels de calcul de l'indice foliaire d'un couvert végétal par photographie hémisphériques. Cependant,

l'analyse des photographies avec le logiciel GLA ou CANOPEO ne nous a permis que le calcul de la compacité et de la porosité. Cette méthode ne permet pas de déterminer la morphologie de l'agglomérat.

VI Conclusion et perspectives

Une méthode de caractérisation de la microstructure des agglomérats basée sur des techniques de la géométrie algorithmique combinées avec la méthode de Monte Carlo a été présentée dans ce travail. Elle permet à l'équilibre du système, non seulement d'approcher la morphologie d'un agglomérat, mais également son volume, sa compacité et sa porosité. Comparée aux méthodes actuelles de caractérisation de la microstructure des agglomérats, notre approche donne des résultats meilleurs que ceux obtenus avec les méthodes de la sphère enveloppante et du cube enveloppant. Cependant, la méthode du cube digitalisé donne des meilleurs résultats d'approximation du contour (et par conséquent de la morphologie) et du volume de l'agglomérat. En revanche, l'approximation du volume de l'agglomérat avec la méthode du cube digitalisé peut être améliorée en considérant, non pas le volume des voxels qui touchent les particules, mais la proportion des particules dans chaque voxel, permettant ainsi de déterminer le volume occupé par les particules dans chaque voxels. Une fois de plus, ce résultat peut être obtenu en utilisant par Monte Carlo appliquée à chaque voxel ou par analyse d'image de la structure du cube digitalisé. L'approximation de la morphologie et du volume d'un agglomérat par son enveloppe convexe enveloppante (au lieu de la sphère enveloppante ou du cube enveloppant) est une approche qui nécessite une profonde analyse, notamment dans le cas des structures complexes.

Perspectives

Détermination de l'enveloppe enveloppante en étoile

Les résultats pour certaines formes d'agglomérats, l'enveloppe convexe enveloppante ne donne pas la vraie morphologie de l'agglomérat. Pour affiner le résultat en partant de cette enveloppe convexe enveloppante, on détermine les parties extérieures à l'agglomérat pour aboutir à une enveloppe en étoile plus proche de la morphologie de l'agglomérat et donc à une meilleure approximation des paramètres de caractérisation (Volume, compacité, porosité).

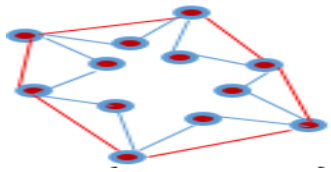


***Figure 10**. Enveloppe enveloppante en étoile pour affiner les résultats.*

Cette approche permet de se rapprocher au plus près de la morphologie de l'agglomérat et par conséquent d'améliorer les résultats obtenus avec l'enveloppe convexe. Le calcul de l'enveloppe convexe enveloppante devient alors une étape intermédiaire du processus de détermination de l'enveloppe enveloppante en étoile.

Généralisation de la méthode en 3D

En 3D, l'approche est la même, moyennant une complexité plus élevée de calcul. Nous pouvons déterminer ici l'enveloppe convexe enveloppante avec un calcul du volume intérieur de l'enveloppe convexe comme le montre les figures ci-dessous.

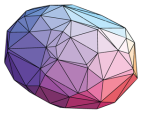


***Figure 10.a**. Enveloppant convexe enveloppante en 3D*

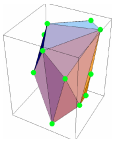


***Figure 10.b**. Cube enveloppant*

(Calcul de l'enveloppe convexe 3D par l'algorithme de Division-Fusion)

En 3D, l'algorithme de Chain peut être utilisé pour le calcul de l'enveloppe convexe avec une complexité plus élevée qu'en 2D. Pour plus d'informations sur les algorithmes 3D, le lecteur peut se reporter à [O'Rourke 1998].

Bibliographie

1. [BECKER 1971] BECKER M., 1971. Une technique nouvelle d'utilisation des photographies hémisphériques pour la mesure du climat lumineux en forêt Ann. Sci. For., 28, 425-442. 1971

2. [BERKANI 2019] BERKANI SOUAD, les fractales et les systèmes complexes, Mémoire de Master, Faculté des Sciences exactes, Université de Béjaîa, 2018-2019.

3. [Bessa-Badreddine 2004] A.Bessa-Badreddine. Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2004.

4. [Boissonnat & Yvinec 1995] Jean-Daniel Boissonnat et Mariette Yvinec. Géométrie algorithmique. Ediscience international, Paris, 1995. Version anglaise : Algorithmic geometry. Cambridge University Press, 1998.

5. [Boissonnat 2017] Jean Daniel Boissonnat. Géométrie algorithmique : des données géométriques à la géométrie des données, Collège de France - Leçon inaugurale prononcée le jeudi 23 mars 2017.

6. [BONHOMME 1993] BONHOMME R., 1993 The solar radiation: caracterization and distribution in the canopy in: VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., SINOQUET H.(Eds.), Crop structure and light microclimate: characterization and applications, Sciences Update, INRA Editions, Paris, 1993, pp. 17-28

7. [Bouzoubaâ & M.Lachemi 2001] N.Bouzoubaâ and M.Lachemi. Self compacting concrete incorporating high volume of class fly ash: Preliminary results. Cement and Concrete Research, 31(3):413-420, 2001.

8. [Brasil & al.2001] A.M.Brasil, T.L.Farias, M.G.Carvalho and U.O.KOYLU. Numerical characterization of morphology of aggregated particles. Journal of Aerosol, 32(4):489-508, 2001.

9. [Bréda & al. 2002] Nathalie Bréda, Kamel Soudani, Jean –Claude Bergonzini. Mesure de l'indice foliaire en forêt, ECOFOR 2002 ; ISBN 2-914770-02-2.

10. [DOYON 2011] Julien DOYON, Simulation Numérique D'agrégats fractals en Milieu de Microgravité, Mémoire de Maitrise en physique, Université de Laval, QUEBEC 2011.

11. [Ducrey 1975] M. Ducrey, Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement : I. Analyse théorique de l'interception. Annales des sciences forestières, INRA/EDP sciences, 1975, 32 (2), pp. 73-92

12. [DUCREY 1975b] DUCREY M, 1975 Utilisation des photographies hémisphériques pour le calcul de la perméabilité des couverts forestiers au rayonnement solaire. II. Etude expérimentale Annales des sciences forestières, INRA/EDP sciences,, 32, 205-221. 1975b

13. [Eggersdorfer & al. 2010] M.l.Eggersdorfer, D.Kadau,H.J.Hermann,andS.E.Pratsim is. Fragmentation and restructuring of soft-agglomerates under shear. Journal

of Colloid and Interface Science, 342(2):261-268, 2010.

14. [Eric C. Anderson 1999] Eric C. Anderson, « Monte Carlo Methods and Importance Sampling », Lecture Notes for Stat 578C Statistical Genetics, 20 octobre 1999, p. 1 (moyenne empirique).

15. [Filippov, Zurita &Rosner 2000] A.V.Filippov, M.Zurita and D.E.Rosner. Fractal-like aggregates: Relation between morphology and properties. Journal of colloid and interface science, 229(1):261-273, 2000.

16. [Forest & Witten 1979] S.R.ForestandT.A.Witten. Long-range correlation in smoke-particle aggregates.J.PhysicsA: Math, Gen, 12:109,1979.

17. [Freltoft & Sinha 1986] T.Freltoft, J.K. K. Sinha. Power-law correlations and finite-size effects in silica particles aggregates studied by small-angle neutron scattering. Physical Review B,33(1):269-275,1986.

18. [Friedlander 2000] S.Friedlander. Smoke, dust, and haze. Second Edition ,Oxford University Pr Sec, New York,2000.

19. [Gallias 2000] J.L.Gallias, R Kara-Ali,and J.P Bigas. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. Cement and Concrete Research, 30(10):1543-1549, 2000.

20. [GOND 2002] Valéry GOND, Frédéric BARET, Boris RUELLE, Sacha WEBER. Utilisation de photographies hémisphériques sous le couvert forestier guyanais, Bois et Forêts Des Tropiques, 2002, N°274(4) PHOTOGRAPHIE/NOTE DE RECHERCHE

21. [Goodman & O'Rourke1995] Goodman and O'Rourke. Handbook of Discrete and Computational Geometry. Edited by Goodman and O'Rourke. CRC PRESS, 1997 (L'état de l'art. Complet et pointu. Idéal pour chercher un résultat).

22. [Graham 1972] R. L. Graham, An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Planar Set' [archive], Information Processing Letters 1, 1972, p. 132-133.

23. [GRANGEON 2006] Romain GRANGEON, Mesure de l'indice foliaire de la canne à sucre par deux méthodes indirectes (Stage au CIRAD), Master1 Université Montpellier 2(2005-2006)

24. [Julien & Botet 1987] R.julien and R. Botet. Aggregation and Fractal Aggregates,1987. ISBN 9971-50-248-8

25. [Kara-Ali 2002] R. Kara-Ali. Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires. Thèse de doctorat. Université de Cergy-Pontoise, 2002.

26. [Kimbonguila 1993] Adolphe KIMBONGUILA MANOUNOU, Modélisation discrète de la microstructure des agglomérats de particules fines en suspension, thèse de doctorat de L'Ecole Nationale Supérieure des Mines DOUAI et l'Université de Lille 1,2013.

27. [KIMBONGUILA 1993] Adolphe KIMBONGUILA MANOUNOU, Modélisation discrète de la microstructure des agglomérats de particules fines en suspension, thèse de doctorat de L'Ecole Nationale Supérieure des Mines DOUAI et l'Université de Lille 1,2013.

28. [Ligot & Makels 2011] Gauthier Ligot et Benoit Makels, ULG ; Photographies hémisphériques, 28 novembre 2011

29. [Link & al. 2011] O.Link, D.R.Snelling, K.A. Thomson, and G.J.

Smallwood.Development of absolute intensity multi-angle light scattering for the determination of polydisperse soot aggregate properties. In Proceedings of the Combustion Institute, volume 33, pages 847-854,2011.

30. [Liu & al.2009] F.Liu, D.R.Snelling, and G.J.Smallwood. Effects of the fractal prefactor on the optical properties of fractal soot aggregates. In ASME Conference Proceedings, number n°43901, pages 363-371.2009.

31. [LOOTENS 2004] Didier LOOTENS, Ciments et suspensions concentrées modèles. Ecoulement, encombrement et floculation. Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie Paris VI, octobre 2004.

32. [Mandelbrot 1983] B.B. Mandelbrot ; The fractal geometrie of nature.In Witt. Freemam, New York, 1983.(cite pages 7,25, 29, et 83)

33. [Mandelbrot 1998] B.B. Mandelbrot, les objets fractals : forme ,hasard et dimension, Flammarion, France 1989.

34. [Moutou 2020] MEMOIRE MASTER RECHERCHE MEI, Moutou Roger, 2020.

35. [Neville 2000] A-M. Neville. Propriétés des Bétons, traduction CRIB. Sherbrooke, canada, 2000.

36. [NGOMO 1991] NGOMO Macaire. Détermination de l'indice foliaire et de l'inclinaison moyenne des feuilles d'un couvert végétal par les méthodes des photographies hémisphériques de Bonhomme et de Ondock. Memoire de fin d'études de Maitrise (Master) d'ingénierie mathématiques.Département de Mathématiques et informatique, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 1991.

37. [Nicholas Metropolis 1949] Nicholas Metropolis et Stanislaw Ulam, « The Monte Carlo Method », Journal of the American Statistical Association, vol. 44, no 247, September 1949, p. 335-341 (DOI 10.2307/2280232).

38. [Nicholas Metropolis 1987] Nicholas Metropolis, « The Beginning of the Monte Carlo Method », Los Alamos Science, no 15, 1987, p. 125-130.

39. [O'Rourke 1998] Joseph O'Rourke, Olin Professor of Computer Science Joseph O'Rourke, Associate Professor of Computer Science Joseph O'Rourke. Computational Geometry in C. Cambridge University Press, 13 oct. 1998 - 376 pages. ISBN 0 521 64010 5 hardback, ISBN 0 521 64976 5 paperback

40. [Preparata & Hong 1977] F. P. Preparata ; S. J. Hong, « Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions » [archive], 1977

41. [Preparata & Shamos 1984] F. Preparata and M. Shamos. Computational Geometry. Springer 1985. (Un des premiers ouvrages sur le sujet, un peu daté). (cf. Preparata et Shamos, 1984, pp 101-104)

42. [Preparata & Shamos 1985] F. Preparata and M. Shamos. Computational Geometry. Springer 1985. (Un des premiers ouvrages sur le sujet, un peu daté).

43. [QUEIROS-CONDE & al. 2015] DIAGO QUEIROS-CONDE, JEAN CHALINE, JACQUES DUBOIS, « Le monde des fractales », ellipses, 2015.

44. [ROSS 1981] ROSS J., 1981 The radiation regime and architecture of plantstandsDr Junk W, The Hague, The Netherlands

45. [Shapiro & al.2012] M.Shapiro, P.Vainshtein, D.Dutcher, M.Emery, M.Stolzenburg, D.Kittelson, and P.McMurry.Characterization of agglomerates by simultaneous

measurement of mobility, vacuum aerodynamic diameter and mass. Journal of Aerosol Science,44:24-45,2012.

46. [Sorensen & al. 1992] C.M.Sorensen, J. Cai, and N.Lu. Light-Scattering measurements of monomer size, monomers per aggregate, and fractal dimension for soot aggregates in flames. Appl. Opt., 31(30):6547-6557, 1992.

47. [Sorensen & Roberts 1997] C.M.Sorensen and G.C.Roberts. The prefactor of fractal aggregates. Journal of colloid and interface science, 186(2):447-452,1997.

48. [Sorensen 2001] C.M.Sorensen.Light. Scattering by fractal aggregates: A review, Aerosol Science and Technology, 35(2):648-687, 2001.(cite page 25).

49. [Soudani, Trautmann & Walter 2006] Kamel Soudani, Jean Trautmann, Jean-Michel Walter. Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue, C.R.Acad.Sci. Paris, Science de la vie/Life Sciences 324(2001) 381-392

50. [Thill 2006] A.Thill. Aggregation des particules: structure, dynamique et simulation. Application au cas d'un écoulement stratifié : l'estuaire du Rhone , thèse de doctorat, Université de droit, d'économie et des sciences-Aix-Marseille III, 2006

51. [VanGulijk & al. 2004] C.VanGulijk, J.C.M. Marijnissen, M. Makkee,J.A. Moulijn, and A. Schmidt-Ott. Measuring diesel soot with a scanning monbilityparticlesizer and an electrical low-pressure imimpact:Performance assessment with a model for fractal-like agglomerates. Journal of Aerosol Science,35(5):633-655, 2004.

52. [Veerapaneni & Wiesner 1996] S. Veerapaneni and M.R. Wiesner. Hydrodynamics of fractal aggregates with radially varying permeability. Journal of colloid and interface science, 177(1): 45-57,1996.

53. [Vicsek 19921] Vicsek,T. Fractal Growth phenomena, World Scientific, 1992,488p.(Cite pages 26 et 29)

54. [Weitz & M.Olivera 1984] D.A .Weitz and M.Olivera. Fractal structures formed by kinetic aggregation of aqueous gold colloids.Physical Review Letters.52(16):1433-1436,1984.

55. [Wozniak & al. 2012] M. Wozniak,F.R.A. Onofi, S.Barbosa, J. Yon, and J.Mrczka. Comparaison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal Samples of particle aggregates from tem images .Journal of Aerosol Science,47(0):12-26,2012.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 84-91
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

APPORT DU FORMALISME DES GRAPHES CONCEPTUELS POUR LA SELECTION INTELLIGENTE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ROUTIERE

S. NDINGA OKINA [1], L. AHOUET [1, 2,3], F. TAHILLANDIER[4], D. BREYSSE[5], P. LOUZOLO-KIMBEMBE [1]

[1] Univ. Marien Ngouabi, ENSP, BP.69, Brazzaville, Congo
[2] Univ. Denis Sassou Nguesso, ISAUBTP, Kintelé Congo.
[3] Bureau de Contrôle du Bâtiment et Travaux Publics (BCBTP), Brazzaville, Congo
[4] INARE, Univ. Aix Marseille, RECOVER, Aix -en-Provence, France
[5] Univ. Bordeaux, I2M, UMR 5295, F-33405 Talence, France

E-mail : sylvain.ndingaokina@umng.cg

RESUME

L'aménagement des routes et des pistes rurales requière l'usage des matériaux qui répondent aux exigences des normes en la matière. Cela implique une bonne connaissance des matériaux meubles des gisements. Le choix approprié des matériaux après leur caractérisation au laboratoire doit contribuer à la réduction des coûts de construction et des temps d'interprétation des études. Les études géotechniques des matériaux génèrent souvent de grands volumes de données hétérogènes (ex., propriétés des sols) qui doivent être interprétés de manière pertinente en accord avec les exigences normatives. La modélisation numérique incluant des algorithmes mathématiques peut faciliter la sélection intelligente des données sur les matériaux d'emprunt. La méthode des graphes conceptuels est une des approches de l'intelligence artificielle qui semble pertinente pour traiter et exploiter de grandes masses de données disparates. Cette approche consiste à la modélisation graphique et permet un apprentissage automatique sur la base des données d'essais géotechniques et de la connaissance experte, ce qui réduit les temps d'analyses ainsi que les coûts associés. Cet article présente le travail de formalisation et d'unification des données géotechniques disponibles sur les sols routiers au Congo pour une sélection intelligente des gisements étudiés et la capitalisation de leurs connaissances. L'intérêt de l'approche est illustré sur les sols de construction routière de la route Obouya-Boundji-Okoyo.

Mots-clés : *Modélisation graphique, Inférence graphique, Construction routière, Essais géotechniques, Modèle de connaissance*

ABSTRACT

The construction of roads and rural tracks requires the use of materials that meet the requirements of current standards. This implies a good knowledge of loose materials of borrow. The appropriate choice of materials after their characterization in the laboratory should contribute to the reduction of construction costs and the time required for the interpretation of the studies. Geotechnical materials investigations often generate large volumes of heterogeneous data (e.g. soil properties) that need to be interpreted in a meaningful way according to normative requirements. The numerical modelling including mathematical algorithms can facilitate the intelligent selection the data on the borrow materials. The conceptual graph method is one of the approaches of artificial intelligence, which seems to be relevant to process and exploit large masses of disparate data. This approach consists of graphical modelling and allows automatic learning on the basis of geotechnical test data and expert knowledge,

which reduces analysis times and associated costs. This article presents the work of formalizing and unifying the geotechnical data available on road soils in Congo for an intelligent selection of the deposits studied and the capitalization of their knowledge. The interest of the approach is illustrated on the road construction soils of the Obouya-Boundji-Okoyo road.

Keywords : *Graphic modelling, Graphic inference, Road construction, Geotechnical testing, Knowledge model*

INTRODUCTION

La construction et l'entretien d'infrastructure routière sont un défi pour tout Maître d'ouvrage soucieux de contribuer au développement économique et social durable d'un pays. Le sol est le principal matériau local utilisé en construction routière après une étude géotechnique préalable des gisements identifiés. Le choix de matériaux "sols" pour la structure de chaussée repose sur l'analyse des propriétés des échantillons de matériaux suivant les normes [1-2]. Ces études de matériaux mobilisent des ressources humaines et financières importantes qui ont un impact sur le coût global du projet. Les contraintes budgétaires et les coûts élevés pour la recherche des gisements de matériaux d'une part, et d'autre part, les lacunes de compréhension des normes, peuvent freiner la réalisation des projets routiers dans certains contextes (cas du Congo). De plus, lors de la réhabilitation ou la réparation d'une route existante, l'étude géotechnique des gisements de matériaux locaux est toujours exigée. Dans un contexte de développement et d'entretien continuels du réseau routier, avec des délais d'exécution courts, il est essentiel de disposer de la connaissance utile sur les propriétés des matériaux dans les gisements disponibles. Alors que la gestion des infrastructures et de parc d'ouvrages de génie civil est souvent compliquée d'une part par la perte des données d'études (rapports), et d'autre part par les grands volumes de données disparates (format, moyen de stockage) [3]. La formalisation et la fusion des connaissances d'un domaine tel que l'ingénierie des matériaux routiers sont une voie intéressante pour la sélection intelligente des matériaux appropriés. Cette approche de l'intelligence artificielle appliquée en génie civil doit ouvrir à divers avantages pour l'ingénieur de l'étude ou de contrôle : a) un apprentissage automatique basé sur l'inférence des règles expertes, b) une meilleure compréhension des exigences de satisfaction de sécurité et de durabilité des structures de chaussée, c) la réduction des incertitudes liées aux erreurs de sélection de matériaux, d) meilleure exploitation des gisements de matériaux locaux. L'objectif principal de ce travail est de présenter les prémices d'un cadre conceptuel d'aide à la sélection intelligente des sols routiers à l'aide de la formalisation et l'unification graphique des connaissances [4]. On s'intéresse à une démarche systémique mettant en évidence une description logique des informations du terrain et de laboratoire pour l'unification des connaissances sur les sols routiers.

1. Identification des gisements de sols

La recherche des emprunts de matériaux meubles vise à identifier par la réalisation des sondages et des essais nécessaires à l'étude des sols ou granulats disponibles. Généralement, les sondages sont exécutés sous forme de puits manuels et de forages à la tarière manuelle à des profondeurs variables, ce qui permet d'avoir des informations sur la nature des couches de sol traversées [1]. Dans le cas de l'étude de matériaux pour la construction du tronçon de la route Obouya-Boundji, 10 emprunts de matériaux ont été localisés tous les 5Km (Fig.1). L'exploitation de ces emprunts situés dans un périmètre très rapproché du tracé de la route offre un avantage économique significatif par rapport aux distances de transport de matériaux. Dans chaque emprunt identifié, quatre sondages, dont deux à travers deux tarières et de deux puits manuelles ont été réalisés à des profondeurs de 2,50m à 6,50m. Après analyse sur les échantillons testés au laboratoire, sept emprunts sur les dix ont été retenus (Fig.1).Ces tests ont permis de confirmer que le sol dans ces gisements est du sable limoneux jaune comme montré sur la coupe lithologique. Pour une meilleure exploitation des gisements, la quantité de sols exploitable dans chaque emprunt a été déterminée à partir d'une équation mathématique, qui intègre les différents coefficients de terrassement de sols (coefficients de

foisonnement = 1,20; de tassement =0,80; et de rendement=0,85).

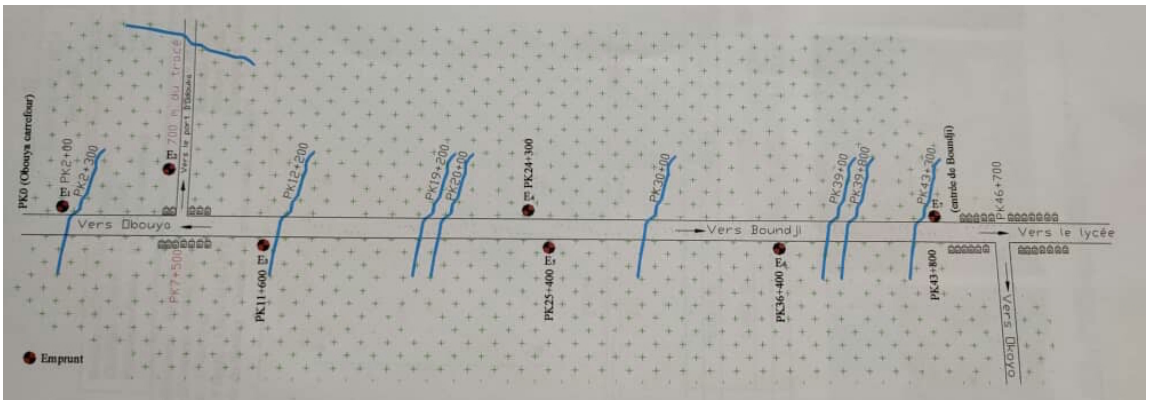


Figure 1. Linéaire de localisation des emprunts de sols, route Obouya-Boundji.

Les échantillons de matériaux prélevés dans chaque emprunt ont été testés au laboratoire BCBTP à Brazzaville (Bureau de Contrôle du Bâtiment et Travaux Publics), pour déterminer leurs propriétés. La caractérisation géotechnique sur les échantillons de sols à effectuer à partir des essais de laboratoire (Teneur en eau, Analyse granulométrique, Limites d'Atterberg, Equivalent de sable, Proctor, CBR, etc.) et par rapport aux normes en vigueurs [5-6]. Le tableau 1 présente un extrait de résultat obtenu (emprunt 2, Pk2+00 ; emprunt 6, Pk 25+400).

Tableau 1. Extrait de classification des sols

Emprunt	Propriétés de sol				Classification		
	P % (<80µm)	γd_{max} (kg/cm3)	ω_{opt} (%)	I CBR (95%OPM)	HRB	RTR	LCPC
E2	19	20,1	7,80	32	A-2-4	B5	S.L.J
E6	16	20,3	6,84	36	A-2-4	B5	S.L.J

Du tableau 2, les sols des emprunts E2 et E6 ont un pourcentage de passants au tamis de 0.075 mm, supérieur à 35%. Ces sols sont de la classe des argiles sableuses, limoneuses jaunes d'après les 3 types de classification appliqués. La section présente la méthode de formalisation graphique des connaissances géotechniques sous forme de graphe unifié pour permettre une meilleure description de la formation granulaire de sol.

2. Méthodologie pour la formalisation graphique des connaissances

Les graphes conceptuels (CGs) sont un formalisme de représentation de connaissances qui permet de réaliser des raisonnements basés sur des règles expertes et un graphe de base du domaine [7]. Ils s'appuient sur un ensemble de graphes ordonnés de connaissance du domaine pour décrire et exprimer les faits spécifiques. La connaissance du domaine est formalisée sous des concepts et des relations à travers des graphes labélisés (modèle de connaissance). Un concept représente un

terme ou une classe d'objets (par exemple, Matériau) avec ses attributs (par exemple, indice de plasticité de sol). Une relation représente un lien qui unit des concepts entre eux dans le graphe de faits (modèle de connaissance). Un modèle de connaissance structuré sous forme de fait est exploité au moyen des règles par des inférences logiques. Une règle est un raisonnement d'expert exprimé sous forme d'hypothèse-conclusion, Si (hypothèse), alors (conclusion) ; et permet de générer de nouvelle connaissance (inférences sur des graphes-faits cibles) [8]. Pour la formalisation à l'aide des graphes conceptuels appliquée à la caractérisation géotechnique des sols, la méthodologie adoptée est présentée à la figure 2. Elle comporte 4 étapes essentielles.

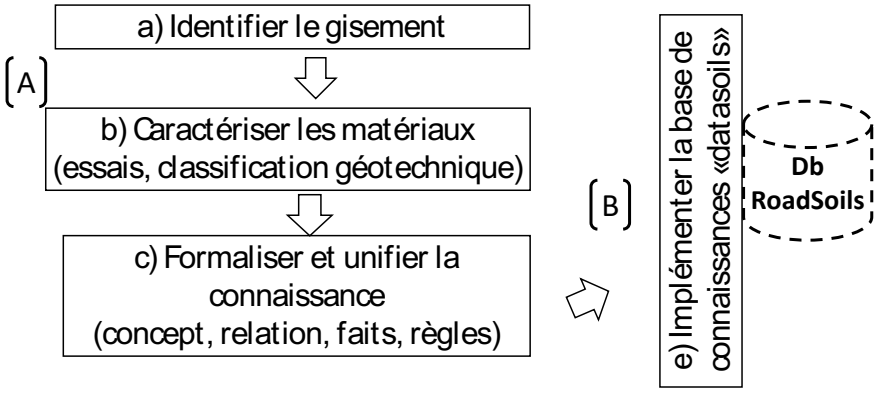


Figure2. Méthodologie pour la formalisation des connaissances suivant la méthode de graphes conceptuels.

3. Résultats et discussion

3.1 Modèle de connaissance géotechnique des sols d'emprunt

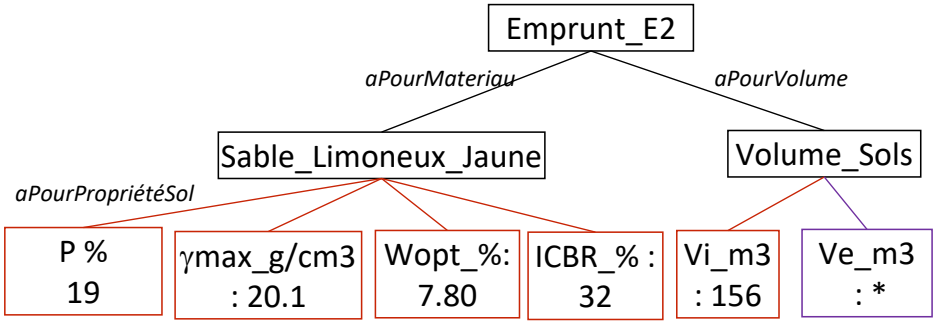


Figure 3. Graphe de fait spécifique, connaissances formalisées de l'emprunt 2, pk2+00

De la Figure 3 est formalisé un graphe de fait regroupant l'ensemble de connaissances qui décrit un gisement de sol pour usage en construction routière. Le graphe de fait de l'emprunt est modélisé par 3 concepts spécifiques de base (nom de l'emprunt, nature du matériau, volume des matériaux). Chaque concept est décrit par des propriétés quantitatives et mesurables ; matériau (sable limoneux jaune) est décrit par le pourcentage de fines passant au tamis 0,80µm (19%), densité sèche maximale de l'optimum Proctor modifié γdmax (20,1g/cm3), teneur en eau optimale ω_{opt}

(7,80%), indice portant CBR après immersion ICBR (32%) et volume initial des sols Vi(156 m3). Afin d'interpréter et d'exploiter le graphe de fait (Fig.3), des règles expertes sont construites pour permettre l'inférence de la connaissance d'une partie de graphe à une autre.

3.2 Règles expertes pour l'identification automatique de gisement de sols

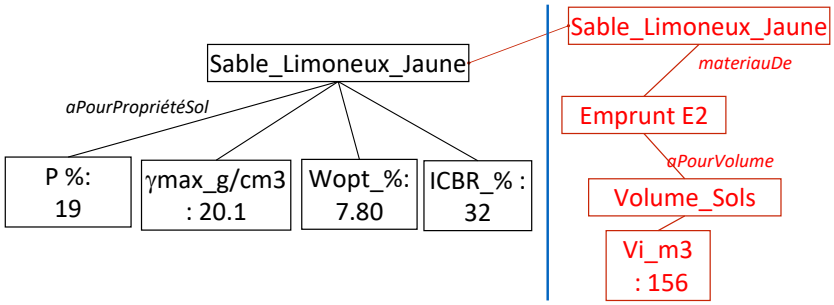


Figure 4. Graphe, règle experte pour l'exploitation du graphe de fait de la figure 3.

De la Figure 4, sont formalisées, à gauche les connaissances intrinsèques de sol de l'emprunt E2 (hypothèse vraie) et à droite la connaissance déduite de l'hypothèse (quantité de sols dans l'emprunt E2). Ainsi, l'inférence de cette règle à travers le graphe de fait (Fig.3) donne son explication pratique des propriétés techniques de l'emprunt E2.

Les deux illustrations de résultats de modélisation graphique formalisée (Fig.3 ; 4) peuvent justifier l'intérêt de la méthode des graphes conceptuels dans la gestion et l'exploitation de la connaissance géotechnique des matériaux, notamment de construction routière. L'extrait de graphe de fait présenté (Fig.3) est un modèle en cours de construction. Un travail important consiste à construire une base de connaissances suffisamment solide pour être en mesure de représenter une grande diversité des connaissances géotechniques des sols d'emprunts, et de pouvoir faire des inférences (i.e. suffisamment de règles apprises à partir de la base de faits). Réaliser une telle base pour l'ensemble des régions du Congo serait très fastidieux tant le domaine de construction routière est riche et varié. Pour cela, dans cet article on s'est limité à des illustrations plus simplifiées de l'application de la modélisation basée sur les graphes conceptuels. La Figure 5 montre de quelle manière faire une sélection logique de sol pour la couche de fondation d'une route. La règle construite repose sur les exigences des normes pour les matériaux de couche de fondation [1-2], en les comparants avec les propriétés obtenues des sols testés au laboratoire. Suite à l'inférence de cette règle (Fig.5), il s'avère que les sols de l'emprunt E2 sont acceptables en couche de fondation de la chaussée.

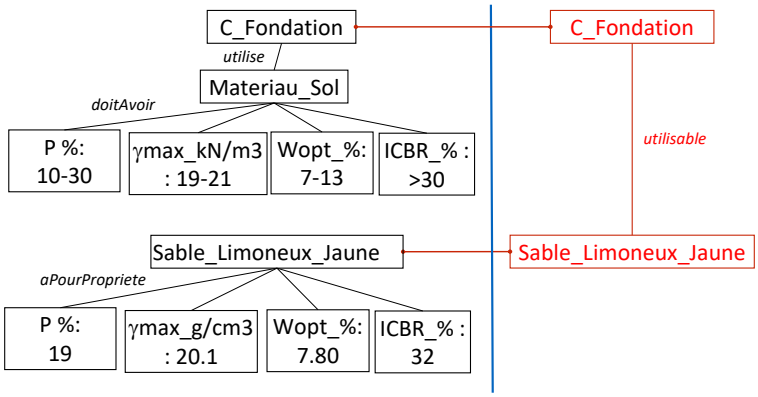


Figure 5. Graphe, règle pour la sélection de sol de couche de fondation

Le modèle actuel, est déterministe et basé pour les inférences sur la logique du premier ordre, il n'est pas possible de donner une vraisemblance aux différentes hypothèses : soit l'utilisateur choisit l'hypothèse la plus probable, soit il renseigne les différents faits possibles. Cela pourrait donner lieu à une amélioration du modèle et à un traitement par des modèles probabilistes (réseaux bayésiens…).

4. Conclusion

L'objectif de cet article était de montrer la possibilité d'utiliser les graphes conceptuels pour la modélisation et l'exploitation des connaissances géotechniques des sols en construction routière. Les connaissances mises en forme (formalisation) ont permis de construire le modèle de fait sur les propriétés des sols et des emprunts le long de la route Obouya-Boundji-Okoyo. L'inférence des règles formalisées a permis d'illustrer l'exploitation du modèle sur la sélection logique des matériaux. Ce travail à mis en évidence deux avantages particuliers du formalisme de graphes conceptuels en génie civil, qui sont de fournir : (a) une représentation graphique qui est utilisée à la fois pour construire la base de connaissances (modèle de connaissance) et pour l'exploiter, et (b) un cadre de raisonnement explicite sur la base des inférences de règles expertes pour interroger et gérer les bases de connaissances (support de vocabulaire, base de faits spécifiques). En raison de la diversité des gisements identifiés ou à rechercher, ce travail doit se poursuivre par le développement approfondi de la base de connaissances géotechniques des sols pour la construction routière au Congo. L'enjeu final étant de réduire les coûts liés à la recherche des matériaux de construction.

Références

[1] Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, 155p, 1980

[2] Guide des Terrassements Routiers, SETRA-LCPC, 1992

[3] Ndinga Okina S., Taillandie F., .Breysse D., Baudrit C., .Ahouet l. Modeling of alteration process in bridges: application at local context of Congo, *RAMRcS*, Vol.2 (1),pp.32-41, 2020.

[4] Chein M., Mugnier M.L. Graph-based knowledge Representation and Reasoning. Computational Foundations of Conceptual Graphs. Springer, *Advanced Information and Knowledge Processing* Series (London), 2009

[5] NF P94-051. Soils: Reconnaissance and testing. Determination of Atterberg limits; Limit of liquidity at coupelle – Limit of plasticity at Rouleau, Marth 1993

[6] NF P94-056. Soil: investigation and testing – Granulometric analysis. Dry sieving method after washing, Marth 1996.

[7] Sowa J.F. Conceptual Structures: Information Proc. in Mind and Machine. Addison–Wesley, 1984

[8] Boissier D., Henry E., Boulémia C. Help with building foundation design: expertise model. *French Journal of Civil Engineering,* Vol.3, No.5, 1999.

Annales de l'Université Marien N'GOUABI, 2022 ; Numéro spécial : 92-96
Sciences et Techniques
ISSN : 1815 – 4433
www.annalesumng.org

A NOVEL DISPERSED PARTICLE GEL STRENGTHENED ALKALI/SURFACTANT/POLYMER COMBINATION FLOODING SYSTEM FOR ENHANCED OIL RECOVERY.

V. FOUTOU TSIBA, AZIZULLAH SHAIKH*, LI JIAMING*, NING'S SUN*, NING'S YANG*, GUANG ZHAO*, CAILI DAI**

China University of Petroleum (East China), School of Petroleum Engineering, Qingdao 266580, Shandong, P. R. China
E-mail : varelfoutou@yahoo.com

RESUME

Au cours des ces dernières années, un nouveau gel des particules dispersées (DPG) a attiré beaucoup d'attention en raison de ses excellentes propriétés et de ses bonnes perspectives d'application dans un processus de récupération assistée du pétrole. La méthode de préparation est pratique et facile à mettre à l'échelle pour l'application sur le terrain. Le gel des particules dispersées, dont la taille varie du submicron au micron, peut bloquer les couches à haute perméabilité en s'accumulant dans les grands espaces de pores ou en bouchant directement les petites gorges des pores dans un réservoir. En outre, les gels des particules dispersées peuvent permettre un contrôle du profil en profondeur grâce à la déformation élastique et à la migration dans le milieu poreux du réservoir. Ces caractéristiques ont démontrés le grand potentiel des gels de particules dispersées pour renforcer le système d'injection combiné des alcalins/surfactants/polymères.

Mots-clés : *Agglomérat de fines particules, analyse des photographies hémisphériques, géométrie algorithmique, convexité, enveloppement convexe, méthode de Monte-Carlo, morphologie, compacité, porosité.*

ABSTRACT

In recent years, a newly developed dispersed particle gel (DPG) has attracted significant attention because of its excellent properties and a good application prospect in an enhanced oil recovery process. The preparation method is convenient and easy to scale up for the field application. The dispersed particle gel with sizes ranging from submicron to micron can block the high permeability layers by accumulating in large pore spaces or directly plugging small pore throats. Furthermore, the dispersed particle gels can achieve in-depth profile control due to the elastic deformation and migration into the reservoir's porous media. These characteristics have demonstrated great potential for the dispersed particle gels to strengthen the alkali/surfactant/polymer combination flooding system.

Keywords : *Chromatography separation; novel dispersed particle gel; interfacial tension (IFT); displacement mechanism; enhanced oil recovery; interaction; Adsorption.*

INTRODUCTION

With rising energy consumption in the world, it is essential to improve oil recovery production. Depending on reservoir behavior, the oil recovery operation has been subdivided into three phases [1]. However, during the long-term water flooding stage, oil recovery maintenance becomes more difficult due to the reservoirs' permeability, which increases considerably during the oil field development process. In general, due to the oil/water viscosity proportion, this leads to lower the water injection phase ratio, which permits an easier channeling of water injected into the injection to production wells. The swept volume of water injected can be reduced by the reservoir's homogeneity and the change in water/oil ratio. However, in oil fields, the reduction in heterogeneity formation and the water/oil ratio improvement become a significant problem for oil recovery [2-3]. Therefore, to improve the enhanced oil recovery conditions, the displacement efficiency and sweep efficiency of the displacement agents need to be improved. So far, the chemical ASP combination is a practical method for enhanced oil recovery [4-7]. The chemical flooding technology with polymer, surfactant, and alkali as the principal agent can improve oil recovery by 8% - 15%; it plays an essential role in the efficient development of conventional reservoirs [8-11]. There are two methods to enhance oil recovery: the sweep efficiency improvement and the displacement efficiency improvement. The basic method is to transform the displacement agent's mobility and (or) oil to enhance the sweep efficiency. The mobility measures the capability of fluid to flow through the porous media. The fundamental method to enhanced oil recovery is to modify the rock surfaces wettability and decrease the capillary effect contrary impact. The chemical displacement flooding technology can be divided into Polymer flooding, Surfactant flooding, Alkali flooding, and the alkali/surfactant/polymer (ASP) combination flooding system. Chemical combination flooding system is one of the main most commonly used for EOR processes, which have joined in many kinds of research and pilot testing techniques for the mature oilfield's high water cut. China is one of the countries in the world, which develops chemical EOR technology vigorously. ASP flooding pilot tests have achieved good oil recovery results in Daqing, Xinjiang, Shengli oilfield. In the chemical flooding system, the polymer plays a prominent role because of a viscoelastic characteristic to improve the mobility ratio. When the polymer system flows in a porous medium, the injection pressure decrease, which leads to a low-profile control due to the low water-oil ratio, and makes the system challenging to obtain a good yield for an extended period of enhanced oil recovery. The surfactant reduces the interfacial tension, the remaining oil saturation and increases the displacement efficiency. The alkali forms the in-situ surfactant by reacting with the crude oil; this reaction significantly affects the system's viscosity and the IFT of the system. However, in porous medium, the dilution effect and shear deterioration affected the alkaline-surfactant-polymer combination flooding system's viscosity. With the increase of reservoir temperature and salinity, the temperature and salt tolerance of polymer, surfactant, and alkali are facing significant challenges, which has become technical difficult for the application in medium-high temperature and medium-high salt reservoirs. Some problems have been exposed in the pilot field experiments in medium-high temperature and medium-high salt reservoirs. When the reservoir temperature and salinity are higher than 80˚C, and 5×104mg/L salinity, polymer thermal viscosity reduction and salt sensitivity are significant, and the viscosity reduction rate can reach more than 60%. The alkali has poor salt tolerance and large consumption. The ASP combination flooding system's effect is reduced, so applying the chemical combination flooding system containing polymer and alkali in high temperature and high salt reservoirs is severely restricted.

2 Experimental procedures.

2.1 Materials

The polymer partial hydrolysis polyacrylamide used in the experiment was bought fro Gaoyuan Co. Ltd. Dongying. China with 18,000,000 molecular weight average and 30% hydrolysis degree. The alkylbenzene

sulfonate used has abbreviated Haitai with 50% active content, and the sodium carbonate used with 98% active content was bought from Beijing chemistry. The viscosity of the simulated crude oil used in the tests was 25mPa.s at 60°C with a density of 0.91g/cm3 and an acid value of 0.45mg/g bought from China Daqing oilfield. The simulated water used has a salinity of 4000mg/L. The average temperature used was 60°C for all experiments.

2.2. PREPARATION METHODE OF THE DISPERSED PARTICLE GELS (DPG).

In general, there are two methods to prepare the DPG particles after the preparation of the bulk gel: the shearing cross-linking and the highspeed shearing method. Despite the difference, both methods implicate shearing forces in the preparation mechanism. For this experiment, we diluted first the concentration mass of 0.3% polymer in 400 mg/L of brine salinity; then, we dropped 0.9% phenolic resin cross-linking agent to form the uniform gelation solution placed in the oven at 90°C for 6 hours. After, a colloid mill with the rotation speed of 45 Hz was used for 15min to milling 200g of water and 200g of bulk gel simultaneously. Finally, the DPG products were obtained, as shown in Fig 1-1. It can be seen that the particle size of the dispersion is different depending on the shear rate, and the particle size is distributed between nm ~ mm. The higher the shear rate, the greater the shear force exerted by the colloid mill on the bulk gel, and the easier it is to break the bulk gel into smaller DPG particles. Fig 1-2 further shows that the particle size distribution curve of the DPG particles formed under high shear rate conditions is narrow, indicating that the DPG particles prepared by the mechanical method are relatively uniform. The particles are mainly spherical; the SEM technique was used to characterize the particles' size distribution about 2μm Fig 1-3. The viscosity of DPG particles was measured using a viscometer (Brookfield DV−2 Pro, Middleboro, MA, USA) was 6.4mPa·s with a shear rate of 71s−1.

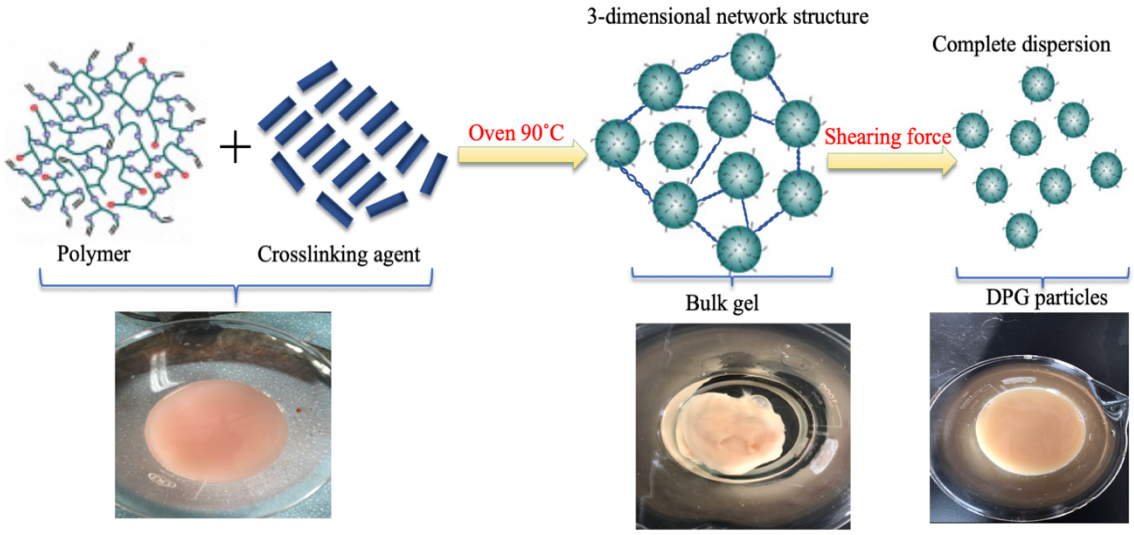


Fig.1-1 The Formation Mechanism of DPG Particles.

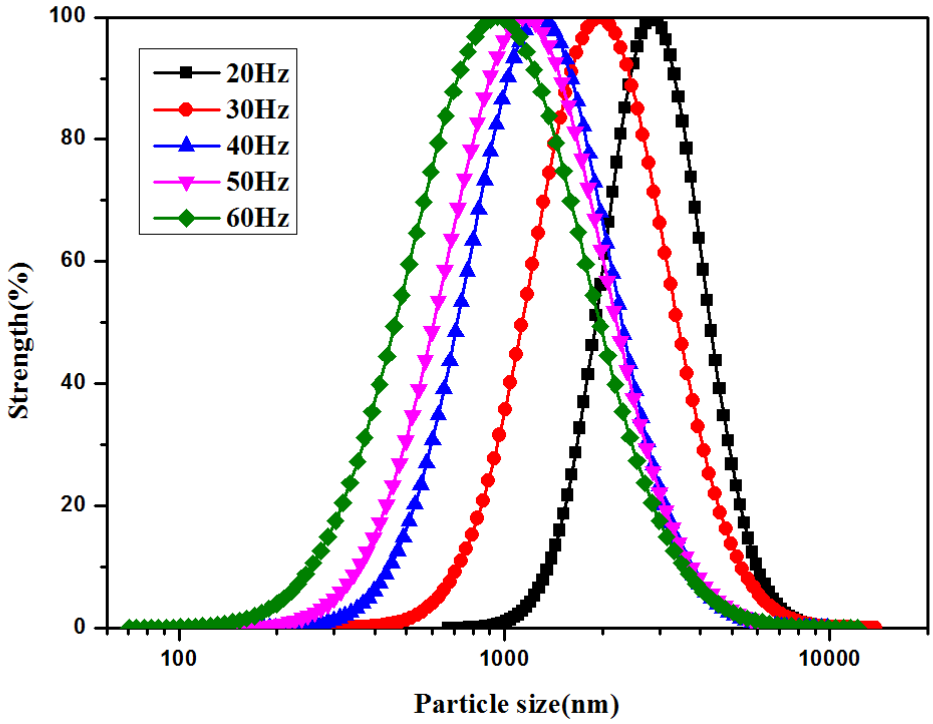


Fig.1-2 Effect of Shearing Rate on the Size Distribution of the DPG Particles

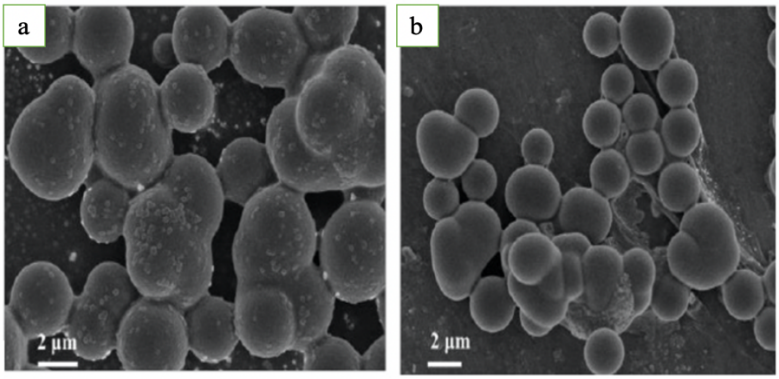


Fig 1-3. DPG Particles Morphology and Size Distribution.

Conclusion

In this paper, the dispersed particle gel strengthened alkali/surfactant/polymer combination flooding system has been prepared successfully as a novel combination flooding system for the enhanced oil recovery process. The major conclusions are summarized as follows. A small number of hydrophobic groups of DPG particles absorbed the surfactant on the interface, reduced the diffusion rate, and improved the surfactant's fluidity ratio. The alkali reacts with the crude oil acidity to form the in-situ surfactant. Therefore, the action mechanism of the system's synergistic effect makes the remaining oil emulsification ability enhanced until it broke into small oil droplets. Thus, action improves the DASP combination profile control capacity for enhanced oil recovery processes.

References

[1] J.J. Sheng, in: Modern Chemical Enhanced Oil Recovery, Elsevier lnc., Burlington (2011).

[2] Aalund, L.R., 1988. Annual Production Report. Oil & Gas Journal, April 18.

[3] Vargo Jay, Turner Jim, Vergnani Bob, et al. Alkaline-surfactant-polymer flooding of the Cambridge Minnelusa Field, SPE 68285, 2000.

[4] Alvarado, V.; Manrique, E. Enhanced oil recovery: An update review, Energies 2010, 9, 1529-1575.

[5] Seright, R.S.; Lane, R.H.; Sydansk, R.D. A strategy for attacking excess water production.SPE. Prod. Facil. 2003, 18, 158-169.

[6] Zhao, F.L.; Dai, C.L.; Wang, Y.F.; Feng, D.C.; Chen, K. Comprehension of water shutoff in oil wells and its technical keys. Acta. Petrolei. Sinica. 2006, 27, 71 -78.

[7] Qin JS, Li AF (2003) Reservoir Physics. China Petroleum University Press: 265–269.

[8] Zhao FL (2001) Oilfield Chemistry. China Petroleum University Press. pp. 308-323.

[9] Wang Demin. Some new developments in enhanced oil extraction. Journal of DaqingPetroleum College, 2010, 34: 19-26.

[10] Wang Demin, Cheng Jiecheng, Wu Zheng, etc. The application of polymer oil removal technology in Daqing oilfield. Journal of Petroleum, 200626: 74-78.

[11] Zhao, H.; Zhao, P.; Bai, B.; et al. Using Associated Polymer Gels to Control Conformance for High Temperature and High Salinity Reservoirs [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology,2006, DOI: 10.2118/06-05-04