



VIII^{ème} Colloque des Sciences, Cultures et Technologies



ACTES DU COLLOQUE



VALORISATION DES SAVOIRS ENDOGÈNES,
GAGE D'UN DÉVELOPPEMENT DURABLE

Actes du Colloque

**ATELIER : SCIENCES EXACTES
ET SCIENCES DE L'INGENIEUR**





MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
RÉPUBLIQUE DU BÉNIN



VIII^{ème} colloque des Sciences, Cultures et Technologies



Valorisation des savoirs endogènes
gage d'un développement durable



ACTES DU COLLOQUE

Atelier | Sciences Exactes et Sciences de l'Ingénieur

Campus universitaire d'Abomey-Calavi, Benin, 25 au 29 Septembre 2023

"Les auteurs sont seuls propriétaires des droits et responsables du contenu des articles"

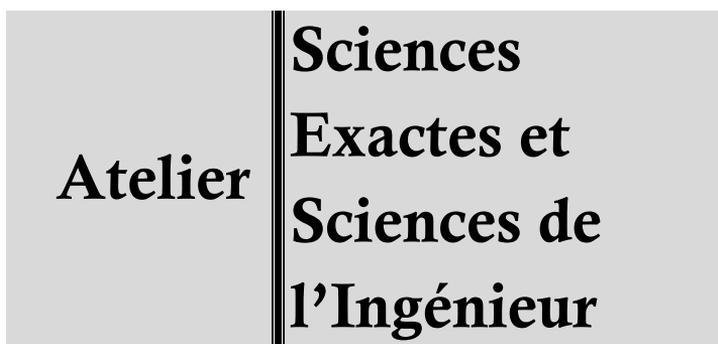
© Université d'Abomey-Calavi

ISSN : 1840-5851-Editions décembre 2019

www.colloque.uac. bj

VIII^{ème} colloque des Sciences, Cultures et Technologies :
Valorisation des savoirs endogènes gage d'un développement durable

ACTES DU COLLOQUE



Campus universitaire d'Abomey-Calavi, Benin, 25 au 29 Septembre 2023

Le Recteur de l'Université d'Abomey-Calavi, Président du Conseil Scientifique exprime toute sa reconnaissance

A tous les Enseignants-Chercheurs et chercheurs de l'UAC, des universités publiques et privées nationales et internationales, qui ont activement participé aux travaux d'évaluation des résumés, des communications en atelier, des posters, et des manuscrits du VIII^{ème} colloque de l'UAC des Sciences, Cultures et Technologies

A tous les partenaires et sponsors pour leur soutien à maints égards à l'organisation du VIII^{ème} colloque de l'UAC des Sciences, Cultures et Technologies.

Professeur Félicien Aulesi

EDITEUR :

Conseil Scientifique de l'Université d'Abomey-Calavi

Téléphone : (+229) 21 36 00 74 ; Fax. : (+229) 21 36 00 28 ; Email : conseil.scientifique@uac.bj

COMITÉ EDITORIAL

Directeur de publication :

Professeur Aliou SAIDOU

Secrétariat scientifique :

Professeure Nadia FANOU FOGNY

Professeur Sylvain KPENAVOUN CHOGOU,

Professeur Adéola Zouri-Kifouli ADEOTI

Dr (MA) Hospice G. DASSOU

Monsieur Charles Yves TOSSOU

Monsieur Denis HOUNGNIMON

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Président :

Professeur Lamine Saïd BABA-MOUSSA

Rapporteur :

Professeur Sylvain KPENAVOUN CHOGOU

Responsable section SESI :

Professeur HONTINFINDE Félix

Membres

Professeur FAGBEMI Latif

Professeur KPROVIESSI Salomé

Dr (MC) AGBANGNAN DOSSA Cokou Pascal

Dr (MC) BEDE épouse BAGAYOKO Affoué Lucie

Dr (MC) BOGNINOUE Gbédossou Sophie Reine

Dr (MC) GLINMA Bienvenu

Dr (MC) KPOTIN Gaston

Dr (MC) YETE KPODO Pélagie

Dr (MC) HOUNGUE Pélagie

Dr (MA) DJOGBE Léopold

Dr (MA) CAKPO Romuald Arthur

Dr (MA) CHETANGNY Patrice

SOMMAIRE

Caractérisation chimique et évaluation de l'activité coagulante des graines de <i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum & Nakai dans la clarification des eaux <i>NTALANI Hermeline, TCHIKOUE Chrisosga Divine Berjeanie, NGOUANOU Ravelle Duclérine</i>	7
Implémentation de la TNT dans le réseau national de fibre optique pour une offre future de service Triple Play <i>SANYA M.F.O., SOULEMANE A. Djafarou</i>	19
Implémentation du multiplexage temporel dans une liaison optique par cosimulation Matlab/Opti-system <i>AHANDESSI Maxime Joël, SANYA Max Fréjus O.</i>	30
Etude QSAR/Docking Moléculaire de quelques séries de molécules bioactives et l'activité inhibitrice de l'enzyme α -Amylase dans le traitement du diabète de type 2 <i>AMOUSSOU Maounou Boris, KANHOUNNON Wilfried Gbèdodé, KPOTIN A. Gaston, KPOTA Alice T. M., KUEVI Urbain Amah, ATOHOUN Guy Sylvain Y.</i>	40
Impact de l'incorporation de fibres de coco brutes sur les propriétés mécaniques des sols argileux : cas des sols de la localité d'Igana, commune de Pobè/Bénin <i>AGBELELE Koffi Judicaël, HOUEHANOU Ernesto C., MISSEKO Appolinaire Jean Paul, HOUNGAN Aristide. C.</i>	52
Réalisation d'un système de synthèse vocale des langues GBE, basé sur les réseaux de neurones <i>BOCO Charbel A., DAGBA Théophile K.</i>	62
Controllability of an integro-differential system governing the evolution of a viscoelastic body <i>ZINSOU Pascal H., DEGLA Guy</i>	73

Caractérisation chimique et évaluation de l'activité coagulante des graines de *Citrullus lanatus* (Thunb.)**Matsum & Nakai dans la clarification des eaux**

NTALANI Hermeline*, TCHIKOUE Chrisosga Divine Berjeanie, NGOUANOU Ravelle Duclérine

Unité de Chimie du Végétal et de la Vie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien NGOUABI BP 69, Brazzaville, Congo

* Auteur correspondant : tabunahermeline@gmail.com / (00 242) 05 555 93 11

chrisosgatchikoue@gmail.com; ravellengouanou3@gmail.com

Résumé

Dans les régions rurales des pays en développement, 97% de la population n'a pas accès à un approvisionnement en eau par canalisation. La recherche sur les techniques endogènes de traitement des eaux, est une alternative aux problèmes de l'eau en milieu rural. Dans cette optique, nous menons des investigations sur la recherche des coagulants naturels d'origine végétale, pour apporter une contribution à l'objectif N°6, du développement durable des Nations Unies. Cette étude a pour but de caractériser les acides aminés dans les graines et les protéines dans les solutions coagulantes des poudres des graines de *Citrullus lanatus*. Les acides aminés ont été séparés par chromatographie sur échangeur d'ions et déterminés par réaction à la ninhydrine avec détection photométrique. Les protéines ont été caractérisées par chromatographie liquide haute performance à exclusion stérique (SE-HPLC) sur une colonne Superdex dans la plage de 10 à 500 kDa et sur une colonne Shodex dans la plage de 204 à 35000 Da. Les résultats obtenus ont montré que les acides aminés les plus abondants dans les graines de *Citrullus lanatus* sont l'arginine (5090 mg/100g) et l'acide glutamique (6150 mg/100 g). Dans les solutions coagulantes des poudres des graines de cette plante, le pourcentage des constituants protéiques ayant une masse moléculaire inférieure à 10 kDa est de 87,3 %. On note également un pourcentage de constituants protéiques de 29,2 % entre 1000 et 1500 Da. L'évaluation de l'activité coagulante sur des échantillons d'eaux brutes de turbidité 95,42 NTU et 77,46 NTU a mis en évidence des pourcentages de réduction des turbidités supérieurs à 85%. Les résultats de cette étude mettent en évidence l'activité coagulante des graines de *Citrullus lanatus*. Les graines de cette plante peuvent être utilisées au niveau des ménages pour la clarification des eaux de surface dans les régions rurales des pays en développement.

Mots clés : *Citrullus lanatus*, Graines, Caractérisation chimique, Coagulant, Eaux

Chemical characterisation and assessment of the coagulant activity of *Citrullus lanatus* seeds (Thunb.)

Matsum & Nakai in water clarification

Abstract

In rural areas of developing countries, 97% of the population has no access to a piped water supply. Research into endogenous water treatment techniques, is an alternative solution to the problem of water in rural areas. With this in mind, we are investigating research into natural coagulants of plant origin, to make a contribution to the United Nations' sustainable development goal No. 6. The aim of this study is to characterise the amino acids in the seeds and the proteins in the coagulating solutions of *Citrullus lanatus* seed powders. The amino acids were separated by ion exchange chromatography and determined by reaction with ninhydrin with photometric detection. Proteins were characterised by steric exclusion high exclusion high performance liquid chromatography (SE-HPLC) on a Superdex column in the 10 to 500 kDa range and on a Shodex column in the 204 to 35,000 Da range. The results obtained showed that the amino acids most abundant in *Citrullus lanatus* seeds are arginine (5090 mg/100g) and glutamic acid (6150 mg/100g). In coagulating solutions of *Citrullus lanatus* seed powders, the percentage of protein

constituents with a molecular mass of less than 10 kDa was 87.3%. There is also a percentage of protein constituents of 29.2% between 1000 and 1500 Da. Evaluation of coagulant activity on raw water samples with turbidities of 95.42 NTU and 77.46 NTU showed percentages of turbidity reduction rates of over 85%. The results of this study highlight the coagulant activity of *Citrullus lanatus* seeds. The seeds of this plant can be used in households for the clarification of surface water in rural areas of developing countries.

Keywords : *Citrullus lanatus*, Seeds, Chemical characterisation, Coagulant, Water

1. INTRODUCTION

Dans les zones rurales des pays en développement, se pose le problème d'approvisionnement en eau (1,2) et 97 % de la population ne dispose pas de l'approvisionnement en eau par canalisation (3,4). Ces populations utilisent parfois, pour les tâches ménagères, des eaux pouvant provenir des rivières, des ruisseaux, des mares d'eaux et des puits. La qualité de ces eaux peut être améliorée par un traitement à domicile avec les substances naturelles d'origine végétale ayant une activité coagulante (5-7). L'objectif n° 6, un des 17 Objectifs du Développement Durable adopté en 2015 dans le cadre de l'agenda 2030 des Nations Unies, suggère « d'assurer la disponibilité et la gestion durable de l'eau et de l'assainissement pour tous » (8). Dans le cadre de la mise en œuvre de cet objectif, nous entreprenons des investigations sur la recherche des coagulants naturels d'origine végétale. Les données scientifiques qui en découleront permettront d'élargir la gamme des coagulants naturels d'origine végétale et de contribuer ainsi à l'amélioration de la qualité de l'eau pour les populations des zones rurales des pays en développement (9-12). Nos travaux antérieurs ont montré l'activité coagulante des solutions aqueuses des poudres des graines de *Arachis hypogaea* et de *Cucumeropsis manni* dans la clarification des échantillons d'eaux de surface (13,14). Ils ont également permis de caractériser les protéines dans les solutions coagulantes des poudres de ces graines (15). La présente étude vise à caractériser au plan chimique, les graines de *Citrullus lanatus*, à identifier les protéines de la solution aqueuse obtenue à partir des poudres de ces graines puis à évaluer l'activité coagulante des dites graines dans la clarification des eaux de surface. *Moringa oleifera*, a été utilisée comme référence dans cette étude du fait de son activité coagulante avérée dans la clarification des eaux de surface, due à sa teneur en polyélectrolytes cationiques de type polypeptide (16, 17). Le sulfate d'aluminium, coagulant minéral le plus utilisé pour le traitement des eaux de consommation a également servi de référence dans cette étude (18).

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Matériel végétal

Les graines de *Citrullus lanatus* ont été obtenues à partir des fruits frais de *Citrullus lanatus* achetés au marché Total situé dans l'arrondissement N° 1 de la ville de Brazzaville, en République du Congo.

2.2. Caractérisation chimique

2.2.1. Caractérisation chimique des graines de *Citrullus lanatus*

La caractérisation chimique des graines de *Citrullus lanatus* a porté sur la détermination des teneurs en lipides totaux, protéines totales, acides aminés, glucides totaux, amidon total, cendres brutes et humidité. Trois traitements ont été effectués et la prise d'essai pour chaque traitement est de 100 grammes.

2.2.1.1. Teneurs en protéines totales et en acides aminés

La teneur en protéines brutes a été obtenue à partir de la teneur en azote total déterminée par la méthode Kjeldhal et celle des acides aminés selon les normes NF EN ISO 13903 et NF EN ISO 13904. Les acides aminés libres ont été extraits avec de l'acide chlorhydrique dilué. Les macromolécules azotées co-extraites ont été précipitées et éliminées par filtration. Les acides aminés ont ensuite été séparés par chromatographie sur échangeur d'ions et déterminés par réaction avec la ninhydrine avec détection photométrique.

2.2.1.2. Teneur en lipides totaux

La teneur en lipides a été obtenue par extraction au Soxhlet à l'éther de pétrole pendant 6 heures (19).

2.2.1.3. Teneur en cendres brutes et taux d'humidité

La teneur en cendres brutes a été obtenue après incinération de la matière organique et pesée du résidu. Pour l'humidité, une prise d'essai de 100 g a été soumise à la dessiccation à 70°C et la perte de masse a été déterminée par pesée.

2.2.1.4. Teneurs en glucides totaux et en amidon total

Les glucides totaux ont été obtenus par calcul, selon la formule $100 - [(\% \text{ humidité}) + (\% \text{ protéine}) + (\% \text{ lipides totaux}) + (\% \text{ cendres brutes})]$. La teneur en amidon a été déterminée selon la norme NF EN ISO 10520.

2.2.2. Caractérisation chimique des solutions aqueuses des poudres des graines de *Citrullus lanatus*

2.2.2.1. Caractérisation des protéines et des peptides par Chromatographie Liquide Haute Performance à Exclusion Stérique (SE-HPLC) dans la plage 10 kDa à 500 kDa et 204 Da à 35 000 Da

Le profil de chromatographie liquide haute performance à exclusion stérique (SE-HPLC) des solutions coagulantes des poudres des graines de *Citrullus lanatus* a été déterminé avec une HPLC Alliance (Waters) équipée d'un détecteur à barette de diode UV. 2 colonnes ont été utilisées : une colonne Superdex 200 avec une plage inférieure de 10 kDa et une plage supérieure de 500 kDa ; et une colonne INTERCHIM Shodex Asahipak GF-310HQ avec une plage inférieure de 204 Da et une plage supérieure de 35 000 Da. Après solubilisation, 30 µL de solution ont été injectés. La séparation a été réalisée à un débit de 0,4 mL / min. La détection a été effectuée à 214 nm. Une courbe d'étalonnage a été réalisée dans les mêmes conditions en utilisant des étalons de poids moléculaires connus. Les résultats sont ensuite exprimés en pourcentages relatifs de protéines de chaque gamme de poids moléculaires.

2.2.2.2. Caractérisation des protéines par électrophorèse SDS PAGE

Une électrophorèse sur gel de polyacrylamide contenant du dodécylsulfate de sodium (SDS PAGE) a été réalisée pour caractériser les protéines des solutions coagulantes des poudres des graines de *Citrullus lanatus*. Des gels d'acrylamide à 12% de polyacrylamide pré-coulé BioRad dans des conditions dénaturantes, par ajout du dodécylsulfate de sodium ont été utilisés. Les extraits ont été dilués dans un tampon d'échantillon selon la méthode de LAEMMLI (277 mM Tris - HCl, pH 6,8). La migration a été réalisée dans le tampon Tris-Glycine-SDS à un pH de 8,3, sous une tension de 180 volts pendant environ 45 minutes. Le standard de masse moléculaire BioRad, conditionné Tris-Tricine 10-20 %, de 10 kDa à 250 kDa a été utilisé pour l'identification des protéines. La coloration a été réalisée à l'aide de bleu de Coomassie et les analyses ont été effectuées en duplicat.

2.3. Etude de l'activité coagulante

L'étude de l'activité coagulante a consisté à évaluer l'activité coagulante des solutions des poudres des graines de *Citrullus lanatus* sur des échantillons d'eaux brutes de turbidités respectives 77,46 NTU et 95,42 NTU.

2.3.1. Description de la zone d'échantillonnage

Les deux échantillons d'eaux brutes de cette étude ont été prélevés dans la rivière Djoué, un affluent du fleuve Congo, situé au sud de Brazzaville. Les coordonnées géographiques indiquent : 04°18' 34" de latitude Sud, 015°13' 36" de longitude Est et 270 m d'altitude au-dessus de la mer.

2.3.2. Préparation des solutions

Les graines de *Citrullus lanatus* ont été décortiquées, séchées et broyées. 100 g de produit obtenu ont été dispersés dans 1000 mL d'eau distillée.

2.3.3. Essais de clarification des échantillons d'eaux brutes de 95,42 NTU et 77,46 NTU

Les essais de clarification des échantillons d'eaux brutes de turbidité 95,42 NTU et 77,46 NTU ont été effectués par Jar-Test (16). Pour la réalisation du Jar-Test, 1000 mL d'échantillon d'eau brute ont été introduit dans les béchers d'un flocculateur Lovibond ET 740, suivi de l'ajout de différents volumes croissants (40, 45, 50, 55 et 60 mL) des solutions de poudre des graines de *Citrullus lanatus*. Après une agitation rapide de 180 tours par seconde pendant 3 minutes et une agitation lente de 18 tours par seconde pendant 20 minutes, les échantillons d'eaux traités ont été soumis à la décantation puis à la filtration. Après 30 minutes de décantation, la turbidité a été mesurée avant et après filtration. Trois traitements Jar-Tests ont été effectués pour chaque échantillon d'eau brute traité avec les différents volumes des solutions de *Citrullus lanatus*.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Composition chimique et teneurs en acides aminés des graines de *Citrullus lanatus*

Les résultats de l'étude de la composition chimique des graines de *Citrullus lanatus* sont présentés dans les tableaux 1 et 2. Les valeurs moyennes des teneurs en protéines brutes, lipides totaux, glucides totaux, amidon total, humidité et cendres brutes sont présentés dans le tableau 1; celles des teneurs en acides aminés dans le tableau 2. L'observation du tableau 1 révèle que les graines de *Citrullus lanatus* ont une teneur en protéines brutes de 32,64 g/100 g; une teneur en lipides totaux de 50,06 g/100 g et une teneur en amidon inférieure à 0,2 g/100 g. Ces résultats corroborent les données de la littérature qui indiquent que les lipides totaux et les protéines brutes sont les constituants majoritaires des graines de *Citrullus lanatus* (20).

Tableau 1. Composition chimique des graines de *Citrullus lanatus*

Paramètres (g/100 g)	Protéines brutes	Lipides totaux	Glucides totaux	Amidon total	Cendres brutes	Humidité
<i>C. lanatus</i>	32,64	50,06	10,26	< 0,2	3,87	3,17

L'observation du tableau 2 montre que les acides aminés les plus abondants dans les graines de *Citrullus lanatus* sont l'acide glutamique et l'arginine avec des teneurs respectives de 6150 mg/100 g et 5090 mg/100g. L'acide aspartique, a été identifié à une teneur de 2810 mg/100 g. Les résultats sur les teneurs en acides aminés dans les graines de *Citrullus lanatus* sont similaires à ceux obtenus par Ketevi et al (21) où l'arginine (15,69 %) ; le glutamate (13,10 %) et l'aspartate (9,41 %) sont les acides aminés les plus abondants. Les travaux de Ntalani et al (13) ont montré que l'arginine (4850 mg/100 g) et l'acide glutamique (6840 mg/100 g) sont également les acides aminés les plus abondants dans les graines de *Moringa oleifera* Lam., qui est un coagulant naturel avéré au plan scientifique.

Tableau 2. Teneurs en acides aminés des graines de *Citrullus lanatus*

Acides aminés (mg/100g)	Histidine	Lysine	Arginine	Acide aspartique	Acide glutamique	Serine	Thréonine + cystine	Asparagine	Glutamine
<i>C. lanatus</i>	835	963	5090	2810	6150	1630	1460	503	1030
Acides aminés (mg/100g)	Glycine	Alanine	Valine	Leucine	Isoleucine	Méthionine	Proline	Phénylalanine	Tryptophane
<i>C. lanatus</i>	1970	1510	1390	2180	1220	872	1160	1720	518

3.2. Masses molaires des protéines et peptides des solutions aqueuses des poudres des graines de

Citrullus lanatus

Les résultats des analyses par chromatographie liquide haute performance à exclusion stérique (SE-HPLC) de la solution aqueuse des poudres des graines de *Citrullus lanatus* sont présentés par les figures 1 et 2. L'observation de la figure 1 montre que le pourcentage des constituants protéiques ayant une masse moléculaire inférieure à 10 kDa est de 87,3 %. La figure 2 montre que le pourcentage des constituants protéiques ayant une masse moléculaire comprise entre 1000 Da et 1500 Da est de 29,2 %. On note également un pourcentage des constituants protéiques de 25,8 %, entre 800 et 1000 Da et de 19,0 % entre 500 et 800 Da. Les travaux de Ntalani et al (15) ont montré que le pourcentage des constituants protéiques ayant une masse moléculaire inférieure à 10 kDa est de 94,4 % dans les solutions aqueuses des poudres des graines de *Moringa oleifera* Lam.

Dans la littérature, les travaux de certains auteurs ont montré l'activité coagulante des protéines extraites des espèces végétales, dans la clarification des eaux de surface (22, 23). Bodlund et al (24), ont mis en évidence des protéines coagulantes de masses moléculaires 6,5 kDa et 9 kDa dans les extraits des graines de Moutarde. Arunkumar et al (25), ont isolé une protéine à activité coagulante de 12 kDa dans les graines de *Strychnos potatorum*.

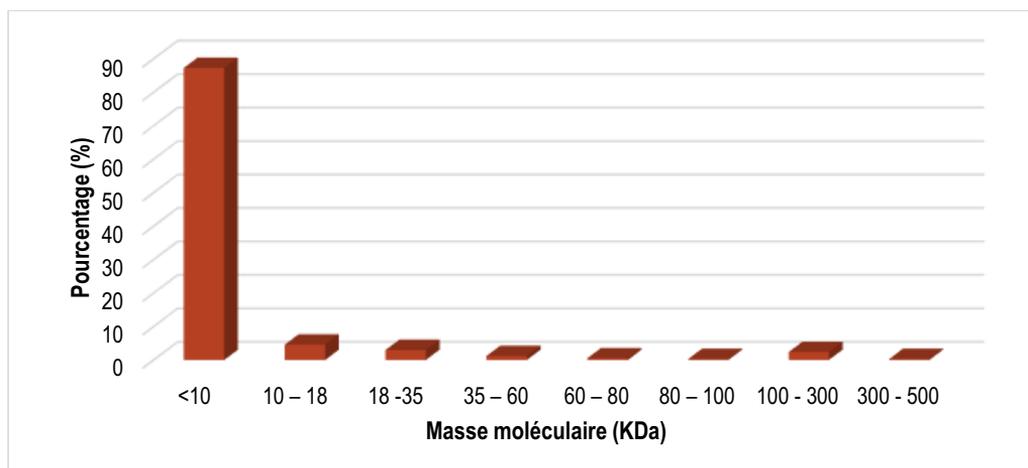


Figure 1. Répartition relative (%) des masses moléculaires des protéines entre 10 kDa et 500 kDa

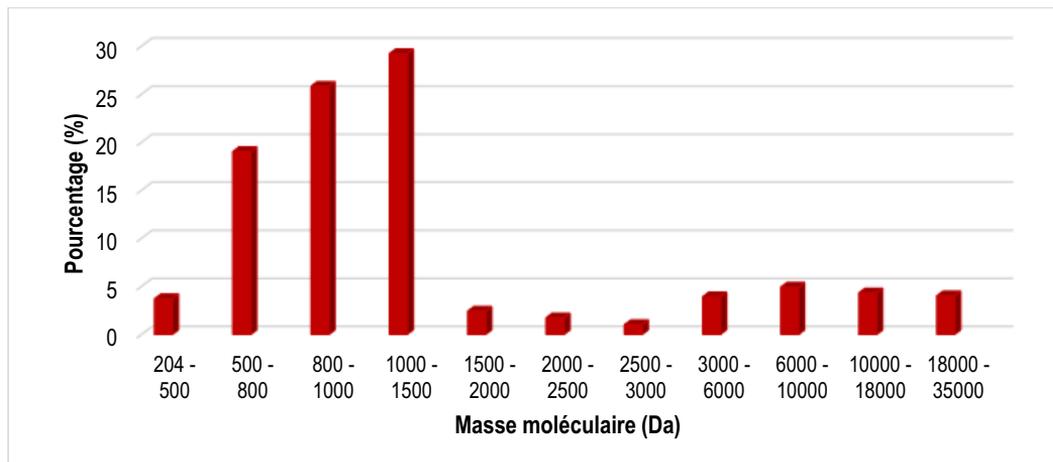


Figure 2. Répartition relative (%) des masses moléculaires des peptides entre 204 et 35 000 Da

3.3. Profils protéiques des graines et des solutions aqueuses des poudres des graines de *Citrullus lanatus* par électrophorèse SDS PAGE

Les résultats de la SE-HPLC sont en accord avec ceux de l'électrophorèse SDS PAGE des graines de *Citrullus lanatus* et de l'extrait aqueux des graines de cette plante présentés par la figure 3. Le profil SDS PAGE des graines de *Citrullus lanatus* montre des sous-unités protéiques présentes autour de 45 kDa, 35 kDa, 20 - 25 kDa et une large proportion de petites protéines et peptides de masses moléculaires inférieures à 10 kDa. Les sous-unités de grandes tailles sont peu présentes dans l'extraits aqueux.

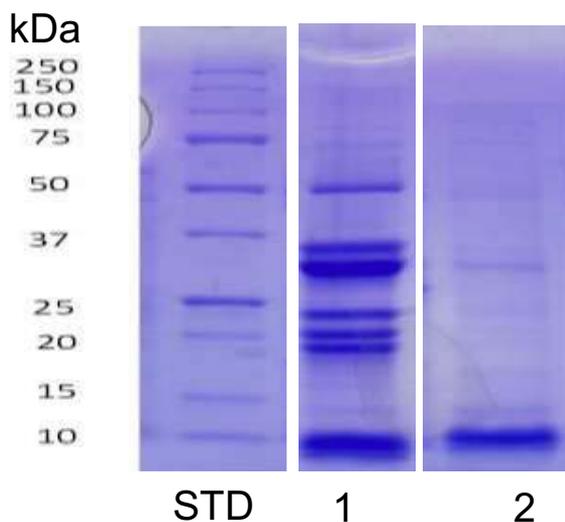


Figure 3. Profils SDS PAGE des graines (1) et de la solution aqueuse des poudres des graines (2) de *Citrullus lanatus*

3.4. Etude de l'activité coagulante

Les échantillons d'eaux brutes de turbidité 95,42 NTU et 77,46 NTU prélevés dans la rivière Djoué ont été traités avec la solution aqueuse des poudres des graines de *Citrullus lanatus*, et la turbidité a été mesurée avant et après traitement. Les résultats des essais de clarification de ces échantillons d'eaux brutes avec les différents volumes de la solution coagulante des poudres des graines de *Citrullus lanatus* sont présentés par les figures 4 et 5. L'efficacité du traitement est déterminée par la valeur de la turbidité résiduelle. Le volume optimal du coagulant pour chaque échantillon d'eau brute traité correspond au minimum de chacune des courbes obtenues. Les figures 4 et 5, montrent la variation de la turbidité en fonction des différentes doses des solutions coagulantes. L'observation de ces courbes montre que l'addition des différents volumes des solutions coagulantes a provoqué une diminution notable de la valeur de la turbidité pour chaque traitement qui a été effectué. Pour l'échantillon d'eau brute de 77,46 NTU, la diminution de la turbidité est de 77,46 NTU à 8,36 NTU, soit une élimination de la turbidité de 89,21 % (Figure 4). Pour l'échantillon d'eau brute de 95,42 NTU, on note une réduction de la turbidité de 92,55% (Figure 5). Ces résultats corroborent les travaux réalisés par Pratham et al (26) rapportant une réduction de la turbidité de 81 %, puis par Muhammad et al (27), rapportant une réduction de la turbidité de 86 % avec les graines de *Citrullus lanatus*. Les traitements de ces 2 échantillons d'eaux brutes avec la solution coagulante de la poudre des graines de *Moringa oleifera* et la solution du sulfate d'aluminium ont mis en évidence des pourcentages de réduction de turbidité supérieurs à 90%.

Les résultats de cette étude ont montré une élimination de la turbidité de l'eau par les solutions de poudre de graines de *Citrullus lanatus*. Cette élimination de la turbidité, peut être expliquée par le fait que la solution aqueuse des poudres des graines de cette plante a provoqué la coagulation, qui est la neutralisation des particules colloïdales, responsables de la turbidité de l'eau (28, 29). Ces résultats mettent donc en évidence l'activité coagulante des graines de *Citrullus lanatus* dans la clarification des eaux de surface.

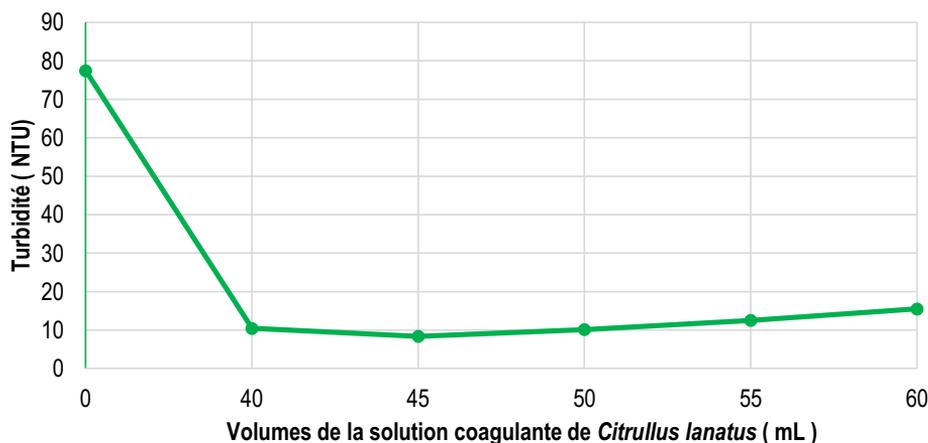


Figure 4. Variation de la turbidité de l'échantillon d'eau brute de 77,46 NTU en fonction du volume de la solution coagulante de *Citrullus lanatus*

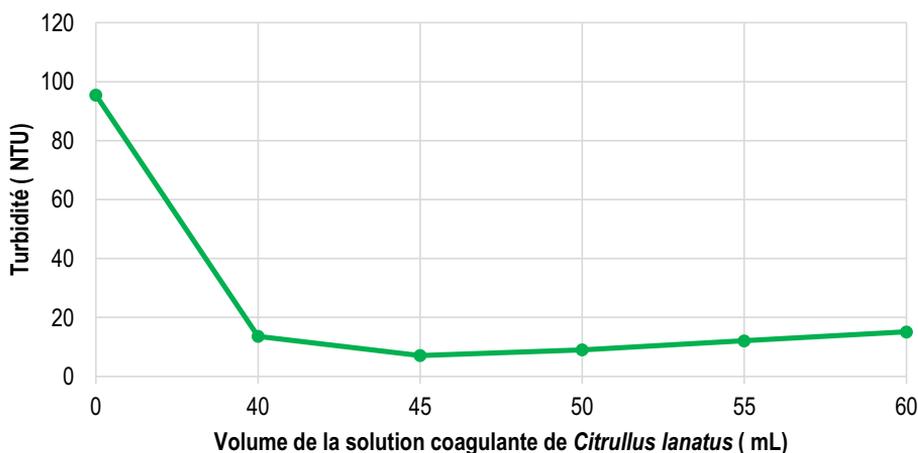


Figure 5. Variation de la turbidité de l'échantillon d'eau brute de 95,42 NTU en fonction du volume de la solution coagulante de *Citrullus lanatus*

4. Conclusion

Les résultats de cette étude ont montré que les acides aminés les plus abondants dans les graines de *Citrullus lanatus* sont l'acide glutamique et l'arginine avec des teneurs respectives de 6150 mg/100 g et 5090 mg/100 g. Dans la solution aqueuse des poudres des graines de *Citrullus lanatus*, 87,3 % des constituants protéiques ont une masse moléculaire inférieure à 10 kDa. L'évaluation de l'activité coagulante sur des échantillons d'eaux brutes de turbidité 95,42 NTU et 77,46 NTU avec la solution aqueuse des poudres des graines de *Citrullus lanatus* a mis en évidence des pourcentages de réduction des turbidités supérieurs à 85%. Les résultats de cette étude mettent en évidence l'activité coagulante des graines de *Citrullus lanatus* dans la clarification des eaux. Les graines de cette plante peuvent être utilisées au niveau des ménages pour la clarification des eaux de surface dans les régions rurales des pays en développement, après des études de toxicité sur ces graines.

Références bibliographiques

1. Linangelo SB, Kamango JB, Mokili JKE, Monama TO, Ulyel JAP, Kazada Z-AM. (2018). Problématique d'accès à l'eau potable en milieu rural en RDC: cas de la ville urbano-rurale de Bumba. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 37(2): 130-138.
2. Ofoueme Berton Y. (2010). L'approvisionnement en eau des populations rurales au Congo Brazzaville. *Les Cahiers d'Outre-mer*, n°249 : 7-30.
3. OMS (2012). Objectifs du millénaire pour le développement. Aide-mémoire n°290
4. OMS (2017). 2,1 milliards de personnes n'ont pas d'eau potable à domicile et plus du double ne disposent pas d'assainissement sûr. [https:// www.who.int](https://www.who.int)
5. Babu R, Chaudhuri M. (2005). Home water treatment by direct filtration with natural coagulant. *Journal of Water and Health*, 3 (1): 27-30.
6. Kabore A, Zongo I, Sawadogo J, Savadogo B, Doumounia A, Kima SA (2020). Efficacité du traitement de l'eau des puits avec les tourteaux de *Moringa oleifera* par coagulation et filtration sur sable dans les ménages ruraux au Burkina Faso. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 4 (1): 307-314.
7. Lugo-Arias J, Burgos-Vergara J, Lugo-Arias E, Gould A, Ovallos-Gazabon D. (2019). Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande. *Heliyon*, 6(1): 1-11.
8. PNUD (2019). Eau propre et assainissement. <https://www.undp.org>.
9. Shukla P. (2016). Natural coagulants for water purification: an ecofriendly approach. *Word Journal of Pharmaceutical Research*, 5(5): 1177-1185.
10. Jayalakshmi G, Saritha V, Dwarapureddi B K. (2017). A review on native plant based coagulants for water purification. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 12 (3): 469-481

11. Sasikala S and Muthuraman G. (2017). Turbidity removal from surface water by natural coagulants and its potential application. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 8(1): 61-66.
12. Muthuraman G., Sasikala S. (2014). Removal of turbidity from drinking water using natural coagulants. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (4): 1727-1731
13. Ntalani H, Ngouanou RD, Makomo H, Elouma Ndinga AM, Boungou Tsona G, Loumouamou AN et al. (2020). Etudes comparatives de la composition chimique et de l'activité coagulante des graines de *Cucumeropsis mannii* Naud., *Arachis hypogaea* L. et *Moringa oleifera* Lam. dans la clarification des eaux de surface. *Journal of Applied Biosciences*, 145 : 14974-14984.
14. Ntalani H, Ngouanou RD, Bassinga Moussounda LM. (2021). Optimization of protein extraction from *Arachis hypogaea* L. and *Cucumeropsis mannii* Naud. seeds for use as natural coagulants in surface water clarification. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(28): 38-47.
15. Ntalani H, Ngouanou RD, Makomo H, Loumouamou AN, Mouloungui Z, Ouamba J-M. (2021). Chemical characterization of the coagulating solutions of the powders of the seeds of *Arachis hypogaea* L., *Cucumeropsis mannii* Naud. and *Moringa oleifera* Lam. *Research Journal of Chemical Sciences*, 11(3): 14-23.
16. Bichi M. H. (2013). A review of the applications of *Moringa oleifera* seeds extract in water treatment. *Civil and Environmental Research*, 3(8): 1-11.
17. Sulaiman M., Zhigila D. A., Mohammed K., Umar D. M., Aliyu B., Manan F. A. (2019). *Moringa oleifera* seed as potential application in water treatment: a review. *Journal of Advanced Research in Material Sciences*, 56 (1): 11-21.
18. Cardot C. (2010). Les traitements de l'eau pour l'ingénieur. Procédés physico-chimiques et biologiques. Ellipes Editions Marketing S.A. Paris, 302 p.
19. Greenfield H., Southgate D.A.T. (2007). Données sur la composition des aliments. FAO, 308 p.
20. Prota (2007). Ressources végétales de l'Afrique tropicale 14. Oleagineux. Backhuys Publishers, Wageningen, Pays-Bas, 261 p.
21. Ketevi A, Osseyi E, Bilabina I, Creppy-Togodoe A, Batalia Y, Lamboni C. (2015). Caractéristiques chimiques et physico-chimiques des graines de cucurbitacées du Togo : concombre amer (*Cucumeropsis edulis* Hook.f.) et melon à pistache (*Citrullus lanatus* var). *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 040, 1-7.
22. Muthuraman G, Sasikala S, Prakash N. (2013). Proteins from natural coagulant for potential application of turbidity removal in water. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 3(1): 278-283.
23. Yongabi KA. (2010). Biocoagulants for Water and Waste Water Purification: A Review. *International Review of Chemical Engineering*, 2(3): 444-458.
24. Bodlund I, Pavankumar AR, Chelliah R, Kasi S, Sankaran K, Rajarao G K. (2014). Coagulant protein identified in Mustard: a potential water treatment agent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11:873-880.

25. Arunkumar P, Sadish Kumar V, Saran S, Bindun H, Devipriya S P. (2019). Isolation of active coagulant protein from the seeds of *Strychnos potatorum*: a potential water treatment agent. *Environmental Technology*, 40(12) :1624–1632.
26. Pratham S., Isha S. (2020) Treatment of water from the Yamuna River with a coagulant from the seeds of *Citrullus lanatus*. *World Scientific News*, 149: 52-63.
27. Muhammad I.M., Abdulsalam S., Abdulkarim A., Bello A.A. (2015). Water melon seed as a potential coagulant for water treatment. *Journal of Research in Engineering*, 15 (1): 16-23
28. Degremont S. (2005). *Memento technique de l'eau*. Lavoisier SAS, 10^e édition, Tome 2, 1718 p.
29. Lugube B. (2015). *Production d'eau potable. Filières et procédés de traitement*. Dunod, Paris, 296 P

Implémentation de la TNT dans le réseau national de fibre optique pour une offre future de service Triple Play

Implementation of DTT in the national fiber optic network for future triple play services

Sanya MFO^{1,2}(Co-auteur), *Djafarou SOULEMANE A.¹(Auteur)
frejus.sanya@uac.bj, soulemanedjafarou@gmail.com

¹Departement de Génie Informatique et Télécommunications / Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi/
Université d'Abomey-Calavi(UAC), Benin

²UF-RFT/LETIA, Ecole Doctorale Sciences de l'Ingénieur ED-SDI, Université d'Abomey-Calavi(UAC), Benin,

Résumé

Les résultats de cet article permettent de proposer aux abonnés béninois du réseau fibre optique bénéficiant déjà de la téléphonie et /ou d'Internet, un autre service additionnel : la télévision numérique terrestre (TNT ou DVB-T2 : Digital Video Broadcasting- Terrestrial Second Génération). Il s'agit de la notion de service Triple Play (téléphonie, Internet, Vidéo). Pour ce faire, une proposition de lien TNT sur fibre basé sur la technologie RoF (Radio over Fiber) a été conçue via cosimulation Matlab/Optisystem15 pour relier le site de diffusion TNT au central de l'Opérateur SBIN (Société Béninois d'Infrastructures Numériques). De là, une architecture FTTH a été modélisée pour raccorder les centres de données des différents FAI (Fournisseurs d'accès à Internet) pour desservir les utilisateurs finaux en triple play. L'étude de cette proposition a nécessité l'implémentation de la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) en ses variantes les plus utilisées pour la modélisation de la TNT avec le logiciel Matlab et la modélisation d'une liaison optique avec le logiciel Optisystem.

Il ressort de l'étude, qu'une transmission de service triple play de 8MHz de bande passante est possible sur une distance d'au moins 300 km à 15,91 Mbps sur fibre optique. Ceci constitue un réel potentiel de déploiement rapide de la TNT sur le territoire via la fibre en plus de constituer un système de diffusion secours de la TNT en cas de dysfonctionnement du réseau dédié. Au niveau académique nous avons pu modéliser la TNT sous 04 différentes variantes, spécialement la nouvelle variante THO-OFDM ce qui constitue une valeur ajoutée.

Mots-clés : RoF DVB-T2, Service Triple Play, TNT.

Abstract

The results of this article will allow to offer Beninese subscribers to fiber optic network who already benefit from telephony and/or Internet, another additional service: digital terrestrial television (DTT or DVB-T2: Digital Video Broadcasting-Terrestrial Second Generation). This is known as Triple Play (telephony, Internet, video).

To achieve this, a proposed DTT link over fiber based on RoF (Radio over Fiber) technology was designed via Matlab/Optisystem15 cosimulation to link the DTT broadcast site to the central office of the operator SBIN (Société Béninoise d'Infrastructures Numériques). From there, an FTTH architecture was modeled to connect the data centers of the various ISPs (Internet Service Providers) to serve triple-play end-users. The study of this proposal required the implementation of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulation in its most commonly used variants for modeling DTT with Matlab software and modeling an optical link with Optisystem software.

The study shows that a triple-play service with 8 MHz bandwidth can be transmitted over a distance of at least 300 km at 15.91 Mbps over optical fiber. This represents a real potential for the rapid deployment of DTT across the country via fiber, as well as providing a backup DTT broadcasting system in the event of a failure of the dedicated network. At the academic level, we were able to model DTT under 04 different variants, especially the new THO-OFDM variant, which represents an added value.

Keywords: BER, DTT, DVB-T2, OFDM, QAM, RoF, Triple Play.

Introduction

Le développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) a connu, ces dernières années, avec l'avènement du numérique, un développement considérable et a progressivement transformé les modes de fabrication, de transmission et de réception des informations, ainsi que les supports eux-mêmes[1]. C'est ainsi que l'émergence de nouvelles technologies, en particulier les technologies de numérisation, crée les conditions d'une possible convergence de secteurs traditionnellement distincts : l'informatique, les médias et les télécoms adaptés à des usages interactifs dématérialisés. Ces services réunis apparaissent souvent sur le marché sous la forme d'offres tri- ou quadri-services combinant données, télévision et téléphonie fixe et ou mobile. Au Bénin, les Fournisseurs d'Accès à l'internet fournissent l'internet et la téléphonie fixe sur le support fibre optique[2] [10]. Toutefois la télévision Numérique Terrestre (TNT), déployé depuis 2016[7] [14] n'est toujours pas fonctionnel à cause de problème d'ordre regulationnel et technique. Face à l'opportunité que représente la fibre optique au Bénin, il serait intéressant d'étudier la possibilité d'intégrer la TNT sur le réseau fibre optique afin de proposer le service triple play aux abonnés fibre optique d'une part et d'autre part de constituer un système secours de diffusion de TNT[8].

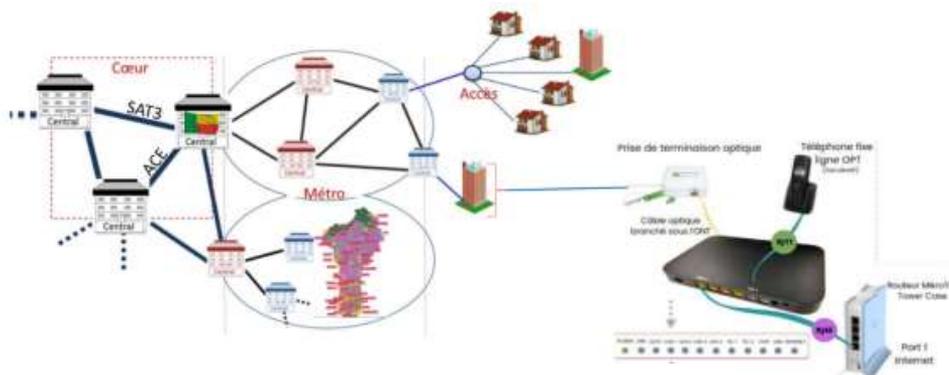


Figure 1: Services d'accès numérique au Bénin[1]

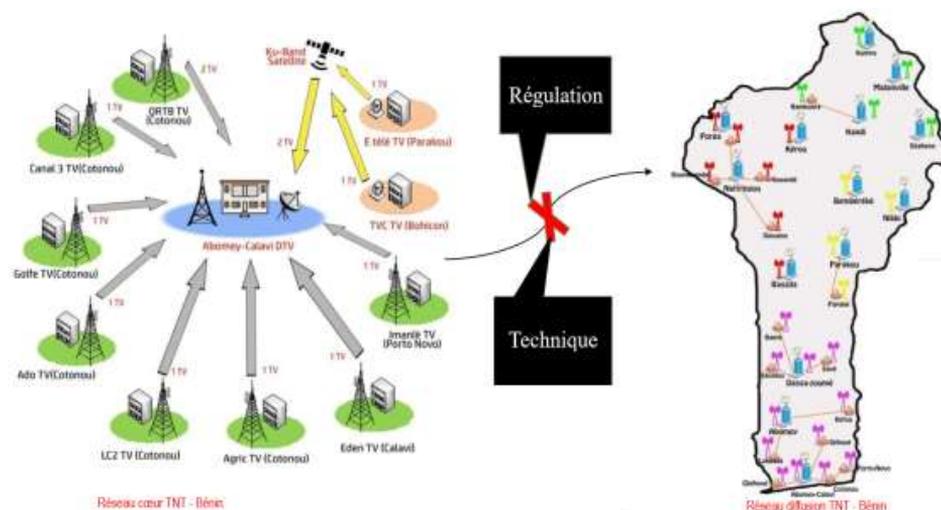


Figure 2- Réseau TNT-Bénin [5]

Figure 2: Réseau TNT-Bénin [1]

Objectives :

L'objectif générale est de mener des études sur les deux réseaux de TNT et de fibre optique du Benin afin de fournir du service triplay (Video, Internet et Voix) aux abonnés de fibre optique béninois. De façon spécifique il s'agit de :

- Implémenter la TNT (DVB-T2) sur fibre optique sous différentes variantes de l'OFDM : IQ, ACO, DCO, THO ;
- Transmettre le triple play (Téléphonie, Internet et DVB-T2) sur fibre optique.

Matériels et méthodes

En résumé, nous avons :

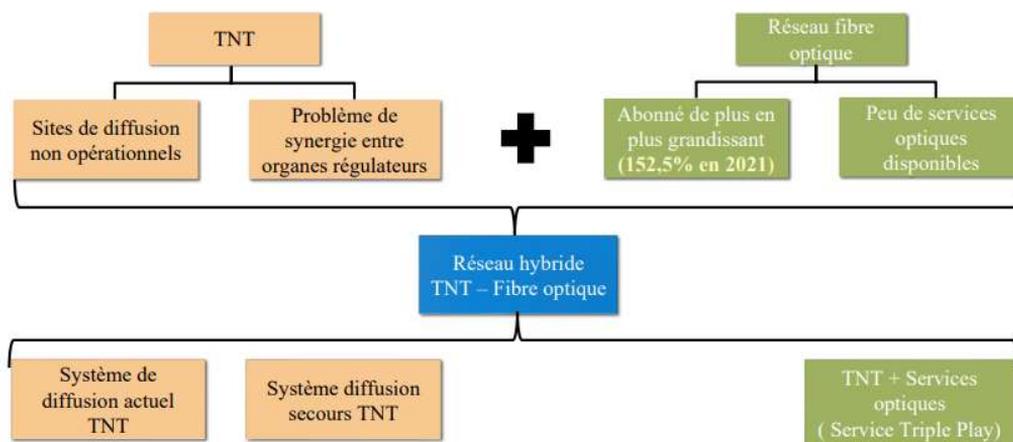


Figure 3: Convergence des réseaux TNT et optique du Bénin[2]

- **Architecture d'implémentation du triple play :**

L'implémentation du triple play se fera en deux phases. Un choix du meilleur modèle de TNT sera effectué lors de la simulation des différents modèles TNT sur la première liaison (transport du signal de la tête du réseau TNT à la tête de réseau optique sur la fibre) et le modèle présentant de meilleure performance sera associé aux signaux téléphonie et internet afin de simuler la performance du signal triple play sur fibre optique sur la deuxième liaison (de la tête du réseau optique aux différents centres de service des FAI).

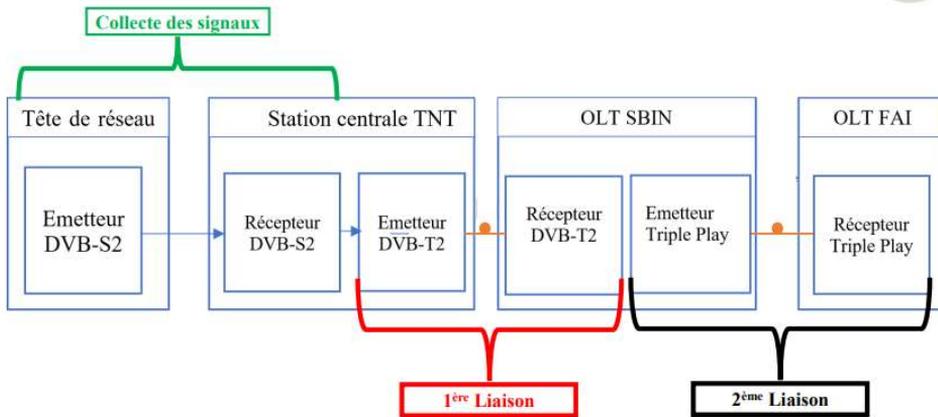


Figure 4: Architecture implémentée(1)[2] [3]

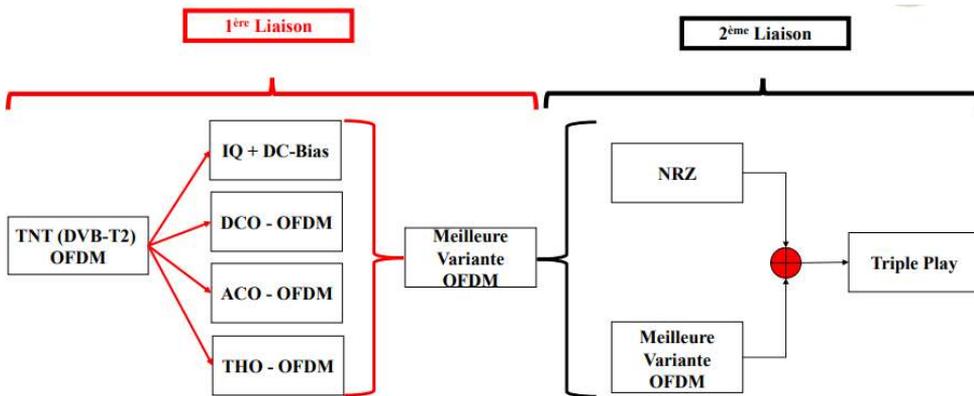


Figure 5: Architecture implémentée (1)[2] [3]

Les matériaux utilisés lors de nos travaux sont illustres ci-dessous. Le logiciel Matlab nous a permis de modéliser la TNT sous 04 variantes et OptiSystem version 15 nous a permis de simuler la liaison optique.



Figure 6: Logiciels de simulation utilisés

Ci-dessous la présentation des liaisons simulées sur Optisystem, respectivement la première liaison et la deuxième (triple play).

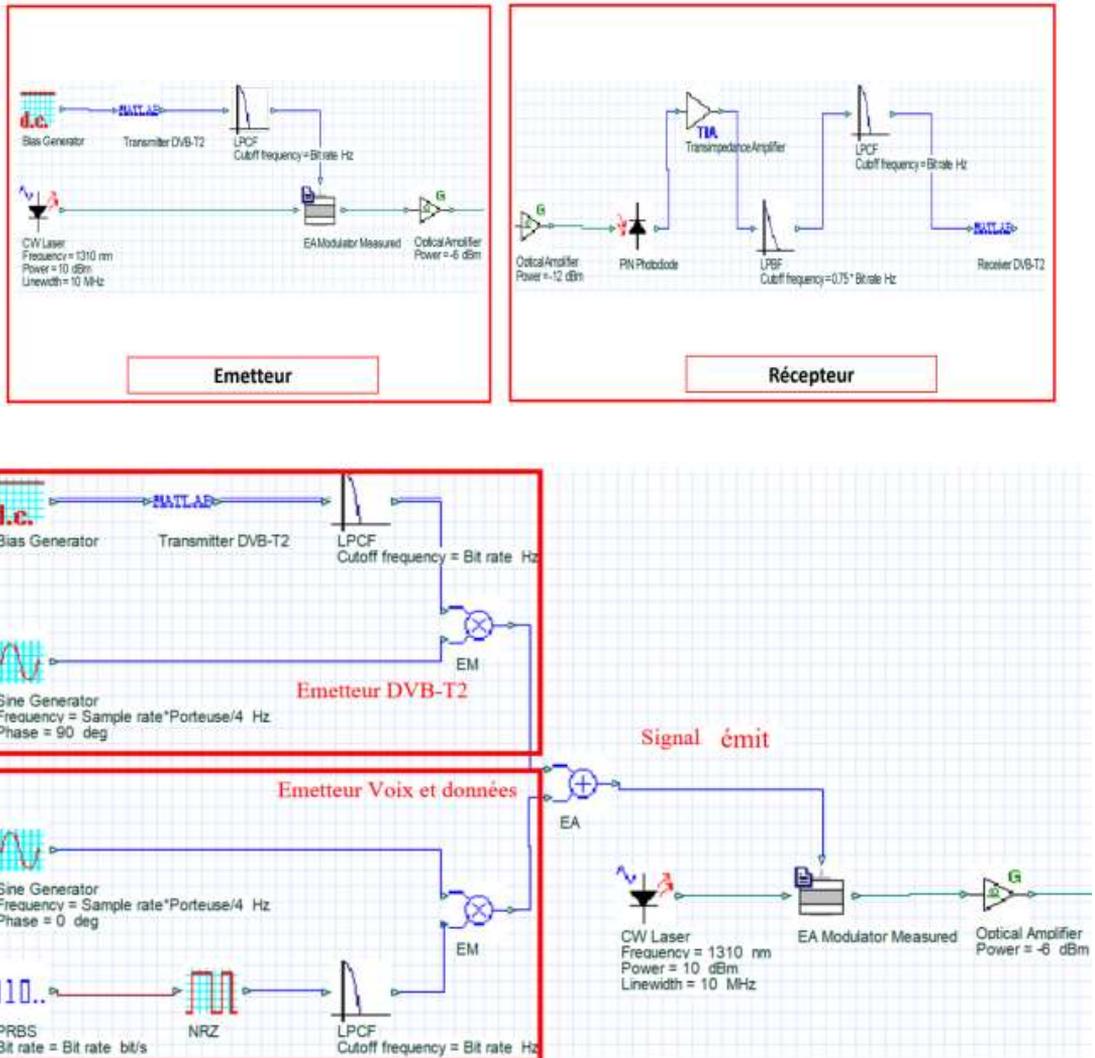


Figure 7: Architecture d'implémentation de la première liaison[2] [4]

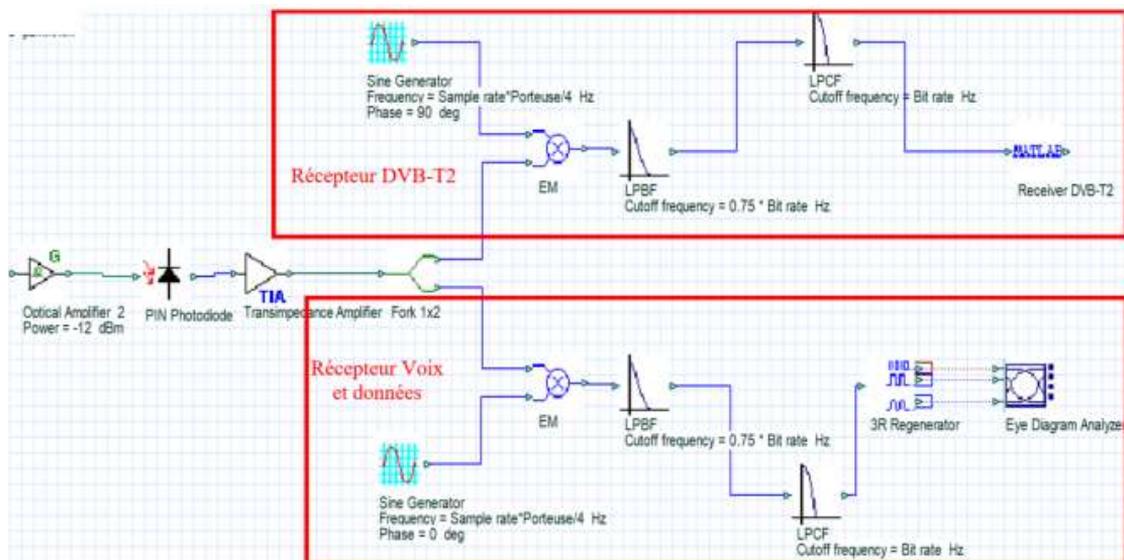


Figure 9: Chaîne Récepteur du triple play[2]

Résultat de simulation

- **Etude la performance dans un canal AWG**

Afin de valider le modèle de TNT sous les 04 différentes variantes, nous avons utilisé les paramètres ci-dessous et comparé les résultats aux études antérieures. Nos modèles sont validés [8] [9] [10], [11], [21].

Tableau 1: Paramètres de simulation

Paramètres	Valeurs [2]
Format de modulation QAM	4 - 16 - 64 256
Taille de l'IFFT	512
Nombre de symbole OFDM	1024
Nombre de symbole pilotes	30
Taille du préfixe cyclique	16
Puissance optique	1W

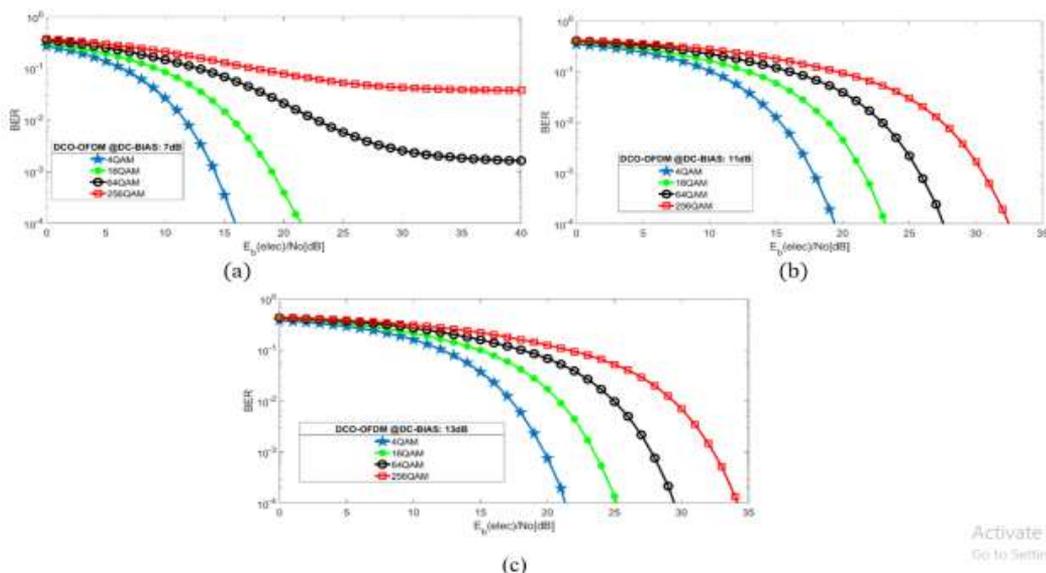


Figure 10: Performance de DCO-OFDM dans le canal AWGN: (a)7dB,(b)11dB,(c)13dB[2] [6] [7] [8]

- **Etude de performance de la liaison RoF :**

Ci-dessous les paramètres de simulation utilisés issus des données relevées sur le terrain [14] [21] :

Tableau 2: Paramètres de simulation [2]

Paramètre	Description	Valeurs
Paramètre globaux	Nombres de bits simulés	524288
	Nombre d'échantillons par bit	4
	Débit binaire	1,25 Gbps
Emetteur (MEA + Laser + TIA)	RIN	-160 dB/Hz
	Puissance d'émission	-6 dBm
	Largeur de raie	10 Mhz
Canal (Fibre optique)	Longueur d'onde	1310 nm
	Longueur variable	0 Km à 400 Km
	Indice n2	$26e21 \text{ m}^2/\text{W}$
	Atténuation	0,35 dB/Km
	Dispersion chromatique	0,092 ps/nm/km
Récepteur (PIN + TIA)	Rendement	0,9 A/W
	Courant d'obscurité	5 nA
	Bruit thermique	$10E-21 \text{ W/Hz}$
	Sensibilité de la photodiode	-12 dBm
	Gain TIA	20 dB

- **Performance de la RoF (DVB-T2) avec différentes variantes de l'OFDM :**

Ci-dessous les résultats obtenus lors de la simulation de la première liaison. Il ressort de ce tableau que la TNT basé sur le modèle 4QAM IQ-OFDM offre une meilleure performance pour une distance de 340Km avec un débit de 7.91Mbps pour un TEB(Taux d'Erreur binaire) de 0 et elle est d'ailleurs le modèle de TNT implémenté actuellement sur le réseau TNT BENIN[20],[21].

- **Performance de la transmission du triple play**

La technique OFDM IQ actuellement implémentée sur le réseau TNT-Bénin(Tableau 4) [2] offre de meilleure performance avec la modulation 4QAM, soit 340 Km à 7,91 Mbps pour un TEB égal à zéro. Ajouté aux signaux de Voix et de données, le signal triple play issu offre une performance d'au moins 300 Km pour un TEB de l'ordre de 10⁻⁸[2] a 15.91Mbps.

Tableau 3: Résultats de simulation [2]

Distance (Km)	4QAM, BER				16QAM, BER			
	IQ (7.91Mbps)	DCO (3.96Mbps)	THO (2.97Mbps)	ACO (1.98Mbps)	IQ (15.82Mbps)	DCO (7.91Mbps)	THO (6.92Mbps)	ACO (3.96Mbps)
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.106	0.000	0.095	0.000
50	0.000	0.000	0.000	0.000	0.106	0.000	0.095	0.000
100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.101	0.000	0.095	0.000
150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.106	0.000	0.095	0.000
200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.107	0.000	0.095	0.000
250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.106	0.000	0.095	0.000
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.108	0.000	0.095	0.000
320	0.000	0.000	0.000	0.000	0.132	0.000	0.098	0.000
340	0.000	0.000	0.225	0.000	0.245	0.045	0.258	0.000
360	0.501	0.331	0.426	0.000	0.500	0.501	0.437	0.267
380	0.501	0.500	0.482	0.499	0.500	0.501	0.490	0.500
400	0.501	0.500	0.483	0.499	0.500	0.501	0.491	0.500
420	0.501	0.500	0.485	0.499	0.500	0.501	0.492	0.500
440	0.501	0.500	0.487	0.499	0.500	0.501	0.494	0.500
460	0.501	0.500	0.483	0.499	0.500	0.501	0.494	0.500

Tableau 4: Résultats de simulation [2]

Débit: 15,91 Mbps
Bande: 8Mhz

Distance (Km)	Triple play (4QAM IQ + NRZ)
0	2,45E-08
50	3,55E-08
100	4,10E-08
150	8,66E-08
200	8,60E-08
250	8,62E-08
300	9,48E-08
320	4,12E-07
340	0.174
360	0.501
380	0.501
400	0.501

- Bilan des équipements intégrant le DVB-T2 jusqu'au FAI

Le tableau 5 présente les équipements nécessaires pour l'implémentation du triple play au Bénin en tenant compte des équipements déjà existantes.

Tableau 5: Liste des équipements [2]

N°	Désignation
	Canal de transmission
	Fibre optique (1310 nm)
	TNT
01	Convertisseur électrique optique
	SBIN
01	Convertisseur électrique optique
02	Filtre
03	Oscillateur local
04	Convertisseur électrique optique
	FAI
01	Convertisseur optique électrique
02	IRD (Pro View 7001)
03	T2 – Edge
04	Modulateur DVB -T2
05	Amplificateur de signal RF (THU 09/Rhode & Shartz)
06	Filtre d'émission
07	Charge fictive
08	Déshydrateur
09	Convertisseur de signal optique - électrique

Conclusion

Notre étude a consisté à intégrer les signaux TNT – Bénin sur le réseau national de fibre optique afin de fournir le service Triple Play. Dans ce contexte, nous avons dans un premier temps fait l'état de l'art du réseau de fibre optique et du réseau de TNT de façon générale puis de façon spécifique au Bénin. Nous avons ensuite proposé une architecture d'implémentation des 03 services sur le réseau de fibre, qui a été implantée, simulée et dont les résultats ont fait l'objet d'une analyse.

Les différentes simulations réalisées dans ce contexte se sont basées sur 04 variantes de la modulation OFDM intégrée dans le DVB-T2 (Vidéo) et du NRZ-OOK (Voix et données) pour modéliser la liaison triple play. Les différents résultats nous ont permis de connaître la distance maximale que peut parcourir le signal pour une bonne réception entre l'OLT de la SBIN et les FAIs (pour un TEB égale à 0). La variante 4QAM THO – OFDM intégrée dans le DVB-T2 permet de parcourir une distance de 320 Km à 2,97Mbps pour un TEB égale à 0. De toutes les variantes intégrées, la modulation 4QAM OFDM IQ présente la meilleure performance : 340Km à 15,91Mbps sur 8Mhz pour un TEB égal à 0.

Il ressort qu'une fois le signal TNT intégrant la modulation OFDM IQ déporté à l'OLT de la SBIN, la distance maximale que peut parcourir le signal triple play en sortie est d'au moins 300Km pour un TEB de l'ordre de 10^{-8} . Les différents FAIs pourront plus tard choisir la technique de leur choix dans le réseau d'accès pour desservir leurs abonnés : par FTTH, IP ou par l'implémentation de technique de multiplexage adéquat.

En guise de perspective, nous proposons qu'une étude soit faite sur les différentes techniques d'accès que peut implémenter les FAIs afin de fournir de la Vidéo sur demande, la Voix et les données à la population à moindre cout. De plus, il serait intéressant d'envisager l'apport d'autres variante de modulations OFDM, en intégrant l'utilisation de méthodes adaptatives et de réduction de PAPR.

Bibliographie

- [1] « J.-B. Gougnon, « ETUDE DE L'OFDM EN RADIO SUR FIBRE POUR LES RESEAUX PON DESCENDANTS »
- [2] Djafarou SOULEMANE« Implémentation de la TNT dans le réseau national de fibre optique pour une offre future de service triple play ».
- [3] « african-undersea-cables ». Consulté le: 3 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://manypossibilities.net/african-undersea-cables/>
- [4] M. F. O. Sanya, « Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans des métropoles de pays en développement: proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM », p. 225.
- [5] J.-L. Verneuil, « Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s », p. 297.
- [6] H. L. Bras, « Étude des réseaux radio sur fibre dans le contexte des réseaux d'accès et privés », p. 276.
- [7] Md. S. Ahsan, M. S. Lee, S. H. S. Newaz, et S. Md. Asif, « Migration to the Next Generation Optical Access Networks Using Hybrid WDM/TDM-PON », *J. Netw.*, vol. 6, n° 1, p. 18-25, janv. 2011, doi: 10.4304/jnw.6.1.18-25.
- [8] « technologies ». Consulté le: 31 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://fibre.guide/deploiement/technologies>
- [9] « COMPRENDRE_LA_FIBRE_OPTIQUE.pdf ».
- [10] « ofdm.vs.pam.trans.com.pdf ».
- [11] « Spectrum-EfficientTriple-LayerOpticalOFDMforIMDD-basedOpticalWirelessCommunications-1.pdf ».
- [12] « 8986609(triple play).pdf ».
- [13] « Memoire_ETEKA_RoF_TNT_Benin.pdf ».
- [14] « notice%20.pdf ».
- [15] « DECISION-2021-035-PORTANT-APPROBATION-DU-CATALOGUE-DE-SBIN-1.pdf ».
- [16] « Offres Pro & B 2 B », *SBIN*. <https://sbin.bj/index.php/offre-pro-et-b-to-b/> (consulté le 19 décembre 2021).
- [17] « Offres grand public », *SBIN*. <https://sbin.bj/index.php/offre-grand-public/> (consulté le 22 décembre 2021).

[18] « television-numerique-terrestre-le-benin-opte-pour-le-mode-free-to-air ». Consulté le: 4 août 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://gaskiyani.info/en/television-numerique-terrestre-le-benin-opte-pour-le-mode-free-to-air/>

[19] « en_302755v010401a.pdf ».

[20] « Visions et missions », *ARCEP BENIN*. <https://arcep.bj/visions-et-missions/> (consulté le 19 décembre 2021).

[21] « IJERT_Comparison_of_ACO_OFDM_and_DCO_OFD (1).pdf ».

Implémentation du multiplexage temporel dans une liaison optique par cosimulation Matlab/Optisystem

AHANDESSI Maxime Joël¹, Max Fréjus O. Sanya^{1,2}

¹ Département de Génie Informatique et Télécommunications (GIT/EPAC) / Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin
m.ahandessi1@gmail.com

² UR-RFT /LETIA, Ecole Doctorale Sciences de l'ingénieur ED-SDI, Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin
frejus.sanya@uac.bj

RESUME

Le flux de données dans les réseaux d'accès a explosé avec l'avènement de nouvelles applications (IoT, Transmission IP, 4G, etc.), de l'internet et du CLOUD. Actuellement les acteurs télécoms ont opté pour des solutions PON (Passive Optical Network) « bas coûts » et très hauts débits capables de satisfaire la demande de plus en plus accrue des utilisateurs en termes de débit et de services riches. Le multiplexage par répartition dans le temps (TDM) peut permettre d'augmenter le débit de données au niveau réseau de transport. Il est déjà réalisé de manière électrique (ETDM : Electrical TDM). L'augmentation de la bande passante des systèmes PON avec un aspect « bas coûts » est un challenge qui peut être réalisé par OTDM (Optical TDM). C'est un moyen robuste permettant de surmonter la limitation de bande passante des composants électroniques et optoélectroniques utilisés en ETDM et d'augmenter considérablement le débit binaire du signal émis ayant des valeurs de l'ordre du Tb/s.

Cette étude présente les résultats d'implémentation du TDM optique dans une liaison optique d'un débit global de 10 Gbps sur une distance de 20 km de fibre pour quatre utilisateurs. Pour ce faire, deux logiciels de simulation ont été utilisés : Matlab et Optisystem 15. Ainsi, nous montrons de meilleures performances pour l'OTDM comparé à l'ETDM avec de meilleurs taux d'erreur binaire en codant les données utilisateurs en RZ (Return to Zero) avec une modulation de source optique pulsée, codée NRZ (Non RZ).

Mots-clés : ETDM, Multiplexage, OTDM, TDM

ABSTRACT

Data flow in access networks has exploded with the advent of new applications (IoT, IP transmission, 4G, etc.), the Internet and the CLOUD. Today's telecoms players have opted for "low-cost", very high-speed PON (Passive Optical Network) solutions capable of satisfying users' ever-increasing demand for higher speeds and richer services. Time-division multiplexing (TDM) can increase data throughput at the transport network level. This is already done electrically (ETDM: Electrical TDM). Increasing the bandwidth of PON systems at low cost is a challenge that can be met by OTDM (Optical TDM). It is a robust means of overcoming the bandwidth limitations of the electronic and optoelectronic components used in ETDM and considerably increasing the bit rate of the transmitted signal to values in the Tb/s range.

This study presents the results of implementing optical TDM in an optical link with an overall data rate of 10 Gbps over a distance of 20 km of fiber for four users. Two simulation software packages were used: Matlab and Optisystem 15. As a result, we show better performance for OTDM compared to ETDM with better bit error rates by encoding user data in RZ (Return to Zero) with pulsed optical source modulation, encoded NRZ (Non RZ).

Key words: ETDM, Multiplexing, OTDM, TDM

INTRODUCTION GENERALE

Le TDM (Time Division Multiplexing) est couramment réalisé dans le domaine électrique pour obtenir des hiérarchies numériques pour les systèmes de télécommunication. En ce sens, même les systèmes à ondes lumineuses à canal unique transportent plusieurs canaux TDM. Le TDM électrique (Electrical Time Division Multiplexing ou ETDM) devient difficile à mettre en œuvre à des débits supérieurs à 10 Gb/s en raison des limitations imposées par l'électronique à grande vitesse. Une solution offerte par le TDM optique est l'OTDM (Optical Time Division Multiplexing), qui peut augmenter le débit binaire d'une seule porteuse optique à des valeurs supérieures à 1 Tb/s [1]. La technique OTDM a fait l'objet d'études approfondies au cours des années 90, et des recherches plus poussées se sont poursuivies ces dernières années dans le contexte des systèmes WDM (Wavelength Division Multiplexing) avec des débits binaires de canal de 100 Gb/s ou plus. Son déploiement nécessite de nouveaux types d'émetteurs et de récepteurs optiques basés sur des techniques de multiplexage et de démultiplexage tout optique.

Le flux de données dans les réseaux d'accès a explosé avec l'avènement de nouvelles applications (Migration analogique-numérique, IoT, Transmission IP, 4G, etc.), de l'internet et du CLOUD. Actuellement les acteurs télécoms ont opté pour des solutions PON (Passive Optical Network) « bas coûts » et très-hauts débits capables de satisfaire la demande de plus en plus accrue des utilisateurs en termes de débit et de services riches. La solution PON est une architecture point à multipoint basée sur la fibre optique [2][6].

Le transport des données en réseaux sur fibre, peut se présenter soit par multiplexage par répartition dans le temps (TDM) ou en longueur d'onde (WDM). Or le TDM peut être réalisé de manière électrique (ETDM : Electrical TDM) ou optique (OTDM : Optical TDM) [3][5][9]. L'augmentation de la bande passante des systèmes PON (Passive Optical Network) avec un aspect « bas coûts » est un challenge qui peut être réalisé par OTDM. C'est un moyen robuste permettant de surmonter la limitation de la bande passante des composants électroniques et optoélectroniques et d'augmenter considérablement le débit binaire du signal émis.

Ce document traite principalement de l'implémentation du multiplexage temporel TDM dans une liaison optique pour quatre utilisateurs pour un débit total de 10 Gbps sur une distance de 20 km de fibre optique. De façon spécifique, nous avons implémenté et confirmé l'ETDM dans une liaison optique. Ensuite, nous avons implémenté l'OTDM et étudié ses performances selon les codages RZ et NRZ pour les données utilisateurs et de la source optique pulsée.

MATERIEL ET METHODES UTILISES

1. Matériel utilisé

Pour faire cette étude théorique, nous avons utilisé deux logiciels de simulation : Matlab R2021a et Optisystem 15. Matlab est un logiciel de programmation utilisé pour des fins de calculs numériques en général, de traitements

de données, de tracés de courbes. OptiSystem15, quant à lui est un logiciel de conception et de simulation des systèmes de transmission optique permettant des tests d'optimisation de liaisons optiques.

2. Méthodes utilisées

Pour réussir cette étude, il sera question d'implémenter et d'évaluer les performances de l'OTDM présenté à l'aide du logiciel OptiSystem15 en cosimulation avec Matlab R2021a. Optisystem nous a permis de concevoir et de simuler le système optique et d'analyser les résultats. Matlab quant à lui est utilisé pour coder les calculs mathématiques caractéristiques des signaux, modulations, codages ... utilisés.

Ne pouvant pas faire l'OTDM sans savoir faire l'ETDM, nous avons implémenté dans un premier temps, l'ETDM par cosimulation Optisystem15 /Matlab. Ensuite, nous avons étudié par cosimulation Optisystem15/Matlab, une liaison optique basée sur l'OTDM et une étude de performance est faite pour les formats de modulation NRZ et RZ.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Implémentation de l'ETDM (Electrical TDM)

La figure 1.1 est celle de la liaison ETDM simulée à l'aide du logiciel Optisystem en cosimulation avec Matlab.

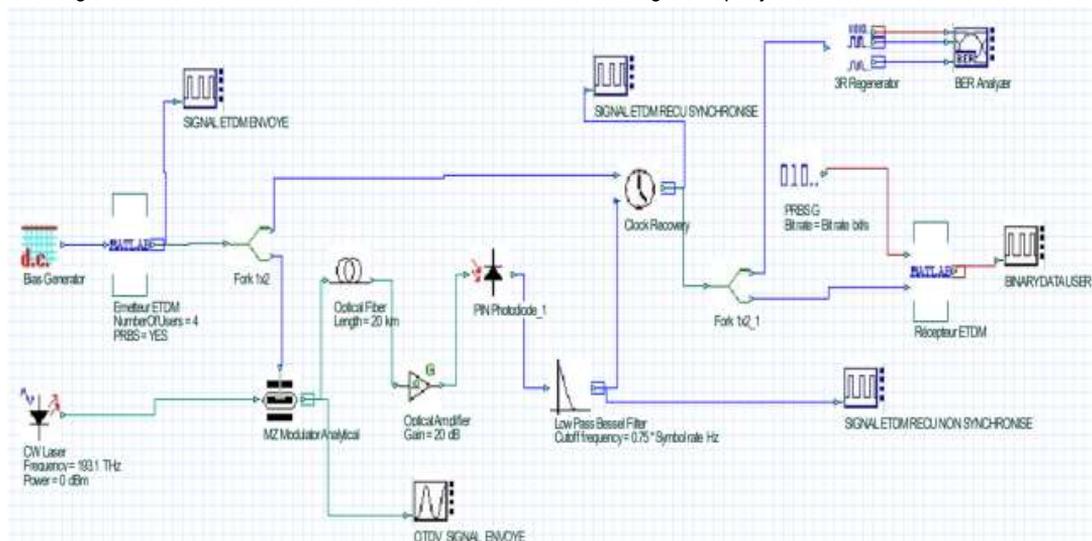


Figure 1. 1 : Schéma bloc ETDM cosimulé sous Optisystem / Matlab

Les résultats après simulation sont présentés sur les figures 1.2 et 1.3

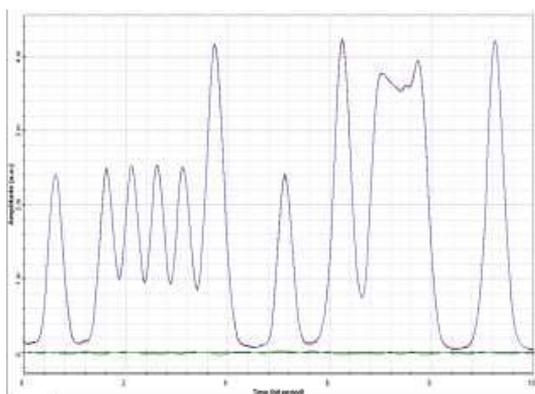


Figure 1. 2 : Signal ETDM reçu après synchronisation

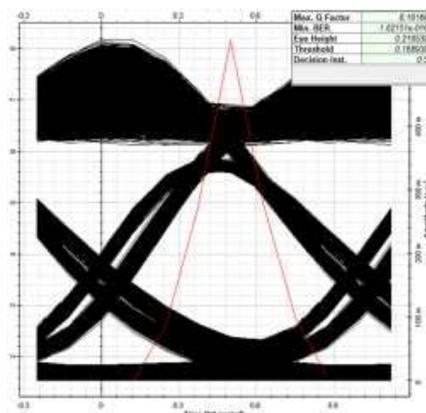


Figure 1. 3 : Diagramme de l'œil du signal ETDM

Le taux d'erreur binaire de cette transmission est évalué à $1,62 \times 10^{-16}$. Cette valeur est bien inférieure au seuil requis en télécommunication (10^{-9}). Il s'agit d'une bonne transmission télécommunication. Dans la partie suivante, nous allons implémenter l'OTDM dans les mêmes conditions et évaluer ses performances.

2. Implémentation de l'OTDM (Optical TDM)

Les figures 2.1 et 2.2 représentent respectivement les liaisons optiques simulées avec Optisystem seul et avec Optisystem en cosimulation avec Matlab.

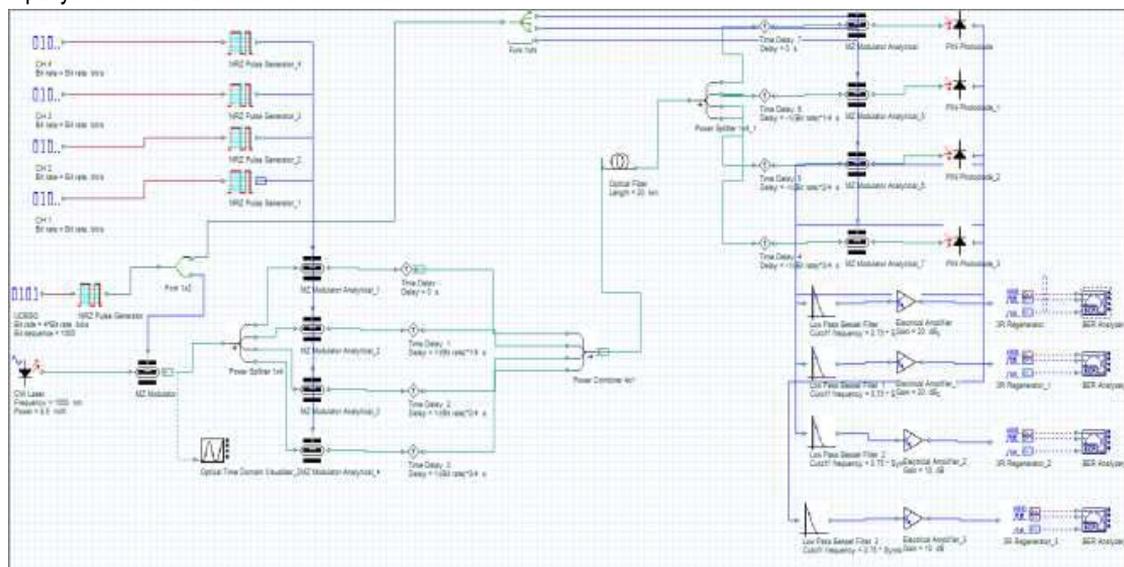


Figure 2. 1 : Schéma de la liaison OTDM réalisé sous Optisystem 15 pour quatre utilisateur

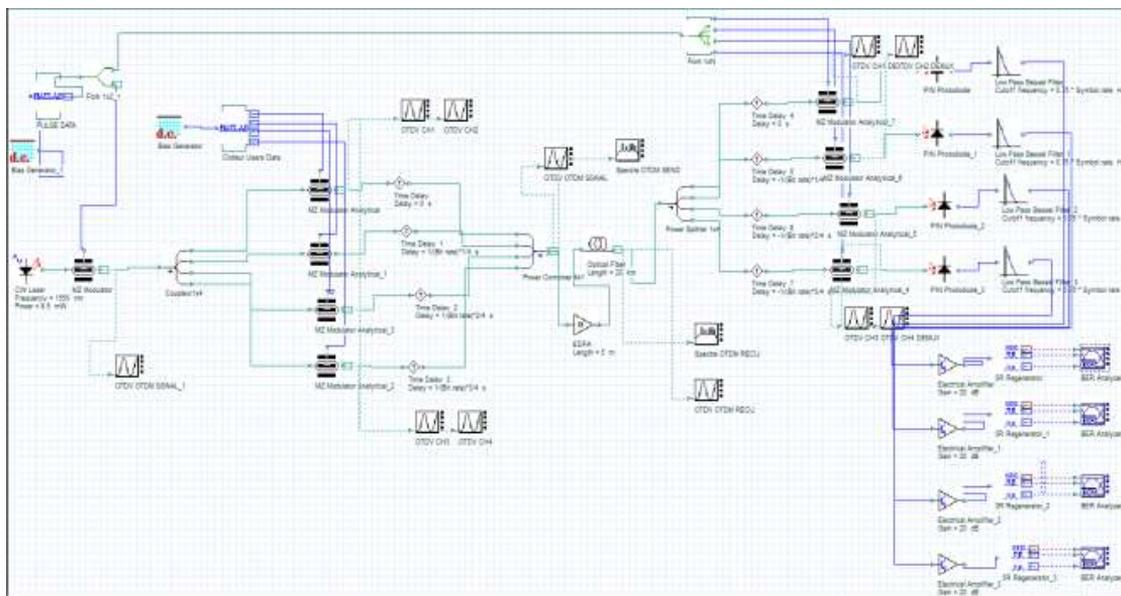


Figure 2. 2 : Schéma de la liaison OTDM cosimulé Optisystem/Matlab pour quatre utilisateurs

Quelques paramètres de simulation :

Emetteur :

Source optique pulsée :

- La source optique continue est représentée par une source laser CW (Continuous Wave), délivrant une puissance de 8.5 mW ;
- Le modulateur MZ est commandé par le train d'impulsions, obtenu grâce à un signal binaire de la forme {1, 0, 0, 0}, codé NRZ à un débit de 10Gbps. La sortie du modulateur représente le signal source optique pulsée ;

Modulations :

- Le signal optique pulsé est partagé en quatre par un coupleur 1×4 pour chaque canal. Les signaux électriques (codés NRZ) des données des utilisateurs, générées par le module PRBS (1024 Bits) à 2.5 Gb/s, modulent le signal pulsé à l'aide des modulateurs externes MZ ;

Multiplexage :

- Les lignes à retard sont modélisées par le module 'Time delay'. Les retards sont calculés à l'aide de la formule du chapitre 2. Le temps pulse est $T_p=100$ ps.

$\Delta t_1 = 0$ ps, $\Delta t_2 = 100$ ps, $\Delta t_3 = 200$ ps et $\Delta t_4 = 300$ ps. Les signaux sont ensuite combinés par un coupleur 4×1 .

Canal de transmission :

Le canal de transmission est une fibre optique monomode SMF (Single Mode Fiber) dont les caractéristiques sont dans le tableau 3.5 ci-après :

Tableau 1. 1 : Paramètres de la fibre optique

Paramètres	Valeurs
Distance	20km
Longueur d'onde	1550 nm
Atténuation	0,2 dB/km
Dispersion	16,75 ps/nm/Km

Récepteur :

A la réception,

- un coupleur 1×4 reçoit le signal OTDM et le répartit sur quatre lignes avancées les unes par rapport aux autres comme c'est fait à l'émission ;
- Un signal d'horloge au même rythme que le signal optique pulsé est utilisé pour moduler les quatre lignes retardées à l'aide des modulateurs MZ : c'est le démultiplexage ;
- Chaque signal optique est donc converti en signal électrique grâce à des photodiodes PIN dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau 1.2.

Tableau 1. 2 : Paramètres de la photodiode PIN

Paramètres	Valeurs
Sensibilité	1 A/W
Courant d'obscurité	10 nA
Bruit thermique	10^{-22} W/Hz

- Les signaux sont filtrés par un filtre passe-bas de Bessel et amplifiés avec des amplificateurs dans le domaine électrique à 20dB puis visualisés par le module 'BER analyser'.

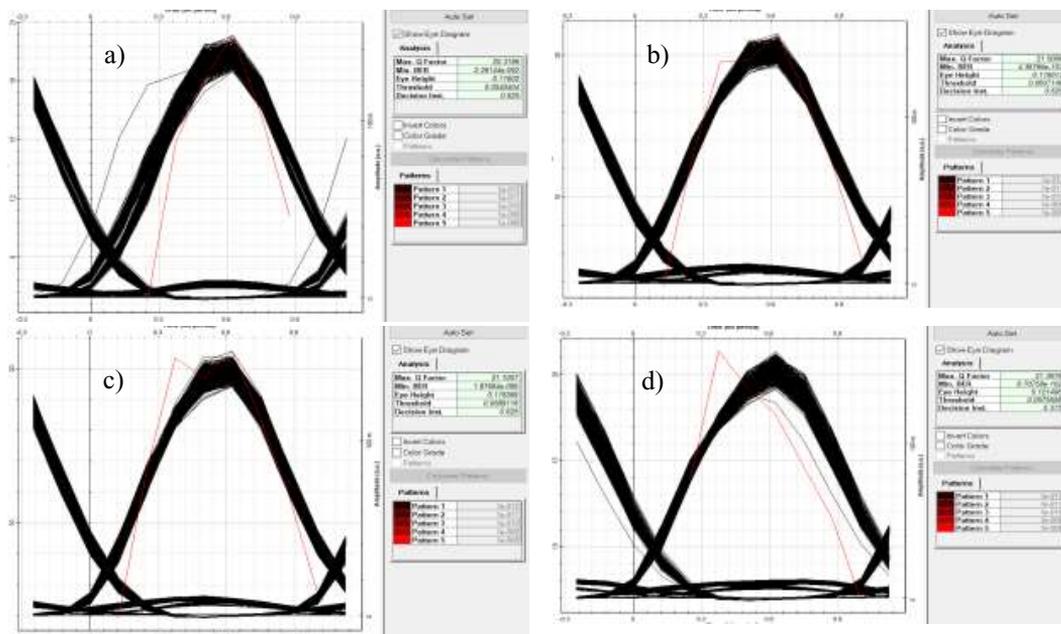


Figure 2.3 : Diagrammes de l'œil de la transmission (a) Canal 1 ; (b) Canal 2 ; (c) Canal 3 ; (d) Canal 4 – Cosimulation Optisystem/Matlab

Les figures 2.4 à 2.7 montrent les superpositions des données envoyées et récupérées pour chaque canal après démultiplexage du signal OTDM reçu.

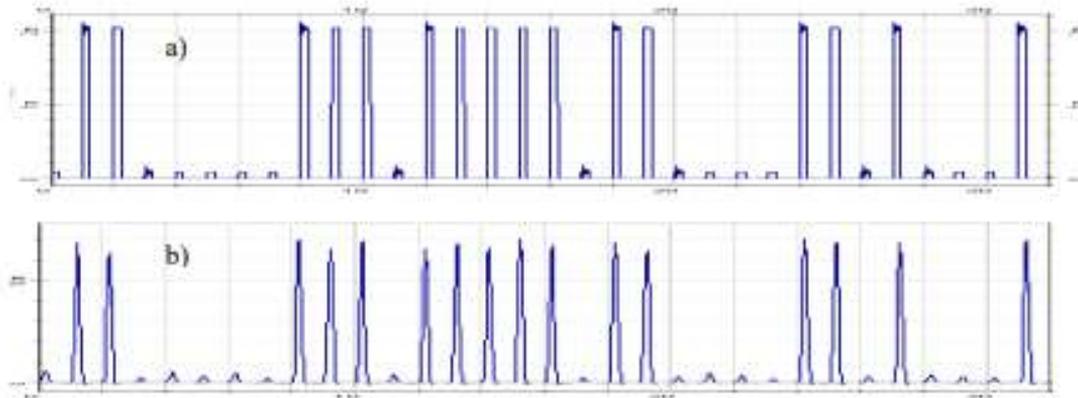


Figure 2.4 : Données de canal 1 a) Envoyées b) Reçues

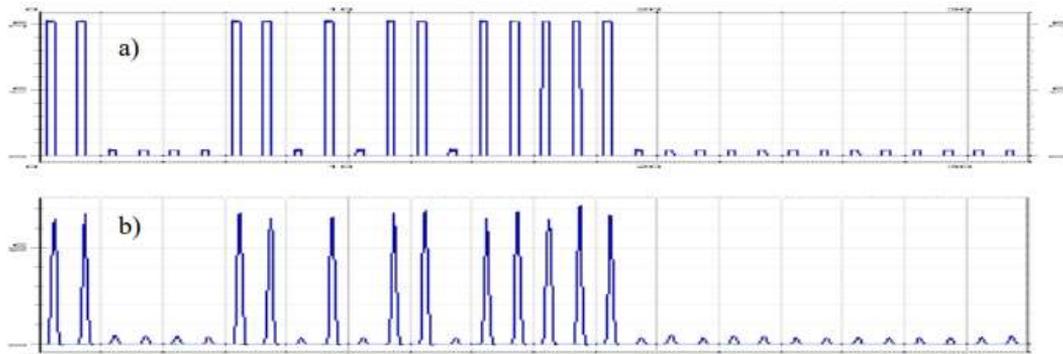


Figure 2.5: Données de canal 2 a) Envoyées b) Reçues

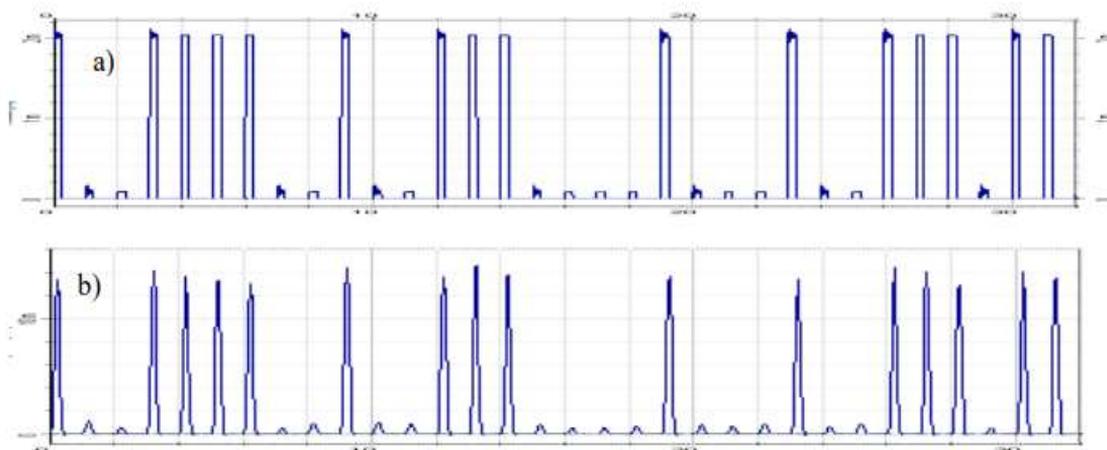


Figure 2.6: Données de canal 3 a) Envoyées b) Reçues

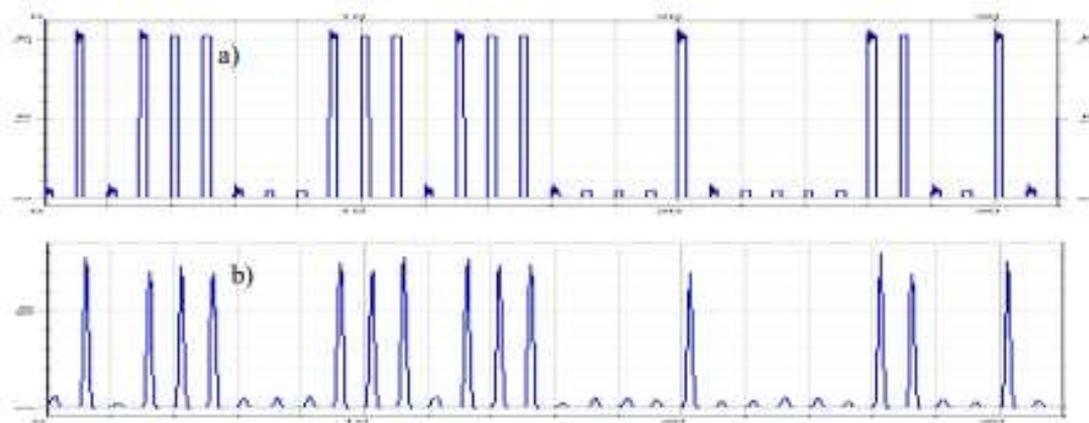


Figure 2.7 : Données de canal 4 a) Envoyées b) Reçues

L'analyse montre que l'on arrive à restituer les données de chaque utilisateur à la réception. Ces résultats confirment les diagrammes de l'œil de la figure 2.3.

Etude de comparative entre les formats NRZ et RZ des utilisateurs

Les tableaux 1.3 et 1.4 résument les résultats issus de l'étude comparative effectuée entre les formats NRZ et RZ tant au niveau de la source optique pulsée tant au niveau des canaux multiplexés.

L'analyse du tableau 3.9 montre que les taux d'erreur binaire pour le codage RZ sont inférieurs à ceux du codage NRZ avec des facteurs de qualité de 29,07 ; 31,35 ; 32,07 et 22,03 en codage RZ contre 17,80 ; 21,50 ; 21,11 et 21,37 en codage NRZ, pour les quatre utilisateurs respectivement. Nous pouvons donc conclure que le codage RZ offre de meilleures performances par rapport au codage NRZ.

Tableau 1. 3 : Tableau comparatif du BER et du facteur Q pour les codages NRZ et RZ avec une source pulsée codée NRZ

Canal	NRZ		RZ	
	BER	Facteur Q	BER	Facteur Q
1	$1,85 \times 10^{-71}$	17,80	$2,95 \times 10^{-186}$	29,07
2	$4,37 \times 10^{-103}$	21,50	$8,78 \times 10^{-215}$	31,35
3	$1,88 \times 10^{-99}$	21,11	$4,56 \times 10^{-226}$	32,07
4	$8,71 \times 10^{-102}$	21,37	$4,41 \times 10^{-108}$	22,03

Tableau 1. 4: Tableau comparatif du BER et du facteur Q pour les codages NRZ et RZ avec une source pulsée codée RZ

Canal	NRZ		RZ	
	BER	Facteur Q	BER	Facteur Q
1	$1,87 \times 10^{-57}$	15,87	$5,2 \times 10^{-201}$	30,2
2	$7,8 \times 10^{-128}$	23,99	$1,94 \times 10^{-169}$	27,7
3	$4,56 \times 10^{-128}$	24,04	$1,38 \times 10^{-177}$	28,37
4	$1,86 \times 10^{-136}$	24,83	$5,1 \times 10^{-175}$	28,16

L'analyse du tableau 1.3 montre que les taux d'erreur binaire pour le codage RZ sont inférieurs à ceux du codage NRZ avec des facteurs de qualité de 30,2 ; 27,7 ; 28,37 et 28,16 en codage RZ contre 15,87 ; 23,99 ; 24,04 et 24,83 en codage NRZ, pour les quatre utilisateurs respectivement. Le codage RZ offre aussi de meilleures performances par rapport au codage NRZ.

Par ailleurs, l'analyse simultanée des tableaux 1.3 et 1.4 montre que pour cette transmission est beaucoup meilleure lorsqu'on utilise une source optique pulsée avec le codage NRZ avec des données utilisateurs codées RZ.

CONCLUSION

Dans un système de transmission optique, le TDM peut être implémenté de deux manières : On parle de l'ETDM lorsque le multiplexage est effectué dans le domaine électrique avant de moduler une source lumineuse. Par contre, lorsque le multiplexage est fait dans le domaine optique, on parle de l'OTDM. L'OTDM permet d'augmenter le débit binaire d'une seule porteuse optique à des valeurs supérieures à 1 Tb/s.

A l'aide des logiciels Optisystem15 et Matlab 2021b, nous avons fait les simulations des liaisons optiques en implémentant l'ETDM et l'OTDM dans le cadre de notre travail. Toutes les liaisons sont simulées pour quatre utilisateurs avec un débit de 2,5Gbps chacun, sur une longueur de 20km de fibre optique. Nous avons vu que le multiplexage OTDM offre de meilleures performances que l'ETDM. Un système de transmission OTDM étant dépendant d'une source optique pulsée, une étude de performance avec différents codages (RZ et NRZ) est faite pour la source optique utilisée et pour les canaux multiplexés. Les résultats obtenus permettent de conclure dans un premier temps que le codage RZ offre de meilleures performances par rapport au codage NRZ et dans un second temps, qu'une meilleure performance de cette transmission est obtenue lorsqu'on utilise une source optique pulsée avec le codage NRZ et des données utilisateurs codées RZ.

En guise de perspectives, nous proposons une étude théorique et approfondie sur les différentes sources optiques pulsées afin de mieux générer des impulsions de durée de plus en plus courte pour faire une transmission très haut débit [4][10]. Aussi, il serait possible d'étudier la possibilité de pouvoir multiplexer plusieurs canaux WDM pour non seulement accroître le débit au niveau réseau de transport mais aussi desservir plusieurs utilisateurs dans un réseau d'accès PON.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. MERZOUK, «Etude d'un système bas cout de transmission optique par multiplexage temporel», Thèse de Doctorat, Institution Polytechnique de Grenoble, Avril 2008.
- [2] Max Fréjus O. SANYA, «Déploiement de réseaux optiques d'accès NGPON dans les métropoles de pays en développement : proposition de nouvelles techniques d'implémentation de l'OFDM»,Thèse de Doctorat, Université de Limoges, Université d'Abomey-Calavi, Octobre 2015.
- [3] C. KHERICI, «Etude comparative des différentes méthodes de multiplexage optique pour les télécommunications», Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi- Bel-Abbes, Janvier 2021.

- [4] O. BEDOUI et M. A. HORRI, «Régénération tout-optique par similariton du signal OTDM à très haut débit», Université 8 Mai 1945, Juillet 2019.
- [5] W. BENAMMAR et . A. MILOUDI, «Etude d'une liaison optique WDM Radio sur Fibre», Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, Juin 2017.
- [6] D. SAMIA, «Contribution à l'étude du système hybride SCM SAC-OCDMA», Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi- Bel-Abbes, Juin 2018.
- [8] O. BEDOUI et M. A. HORRI, «Régénération tout-optique par similariton du signal OTDM à très haut débit», Université 8 Mai 1945, Juillet 2019.
- [9] J. L. VERNEUIL, «Simulation de systèmes de télécommunication par fibre optique à 40 Gbits/s. Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes» Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes, Novembre 2003.
- [10] G. B. de Farias, «Etude de solutions OFDM en technologie "Photonique Silicium" pour les futures générations de réseaux optiques passifs» PhD thesis, Signal, Image, Parole et Télécom/ Université de Grenoble, Septembre 2014.

Etude QSAR/Docking Moléculaire de quelques séries de molécules bioactives et l'activité inhibitrice de l'enzyme α -Amylase dans le traitement du diabète de type 2

Maounou Boris AMOUSSOU*, Wilfried Gbèdodé KANHOUNNON, KPOTIN A. Gaston, Alice T. M. KPOTA, Urbain Amah KUEVI, Guy Sylvain Y. ATOHOUN

Laboratoire de Chimie Physique, Matériaux et Modélisation Moléculaire (LCP3M)-Unité de Chimie Théorique et de Modélisation Moléculaire (UCT2M), Université d'Abomey-Calavi, Bénin.

[*borisamoussou01@gmail.com](mailto:borisamoussou01@gmail.com)

Résumé

Le diabète de type 2 est une maladie chronique caractérisée par une hyperglycémie, accompagnée d'une perturbation des métabolismes glucidiques, lipidiques et protéiques, résultant d'un défaut de sécrétion et/ou d'action de l'insuline (une glycémie à jeun supérieure à 1,26 g/L (7 mmol/L)). Divers moyens thérapeutiques et préventifs sont proposés. Cependant, force est de constater que les médicaments antidiabétiques utilisés de nos jours deviennent de plus en plus inefficaces. C'est dans ce cadre que cette étude de la relation entre la structure électronique et l'activité inhibitrice/Docking Moléculaire de quelques séries de molécules est réalisée afin de proposer de nouvelles structures moléculaires qui seraient plus efficaces. Cette étude QSAR de l'activité inhibitrice des dérivés du 4-amino-1,2,4-triazole sur l'enzymes α -Amylase a été réalisée suivant l'approche Klopman-Peradejordi-Gomez (KPG). La Théorie de la Fonctionnelle de Densité (DFT) sous la fonctionnelle B3LYP et la base 6-31G (d,p) implémentée dans le logiciel GAUSSIAN a été utilisée comme méthode de calcul. Le logiciel Statistica.10 a permis d'obtenir une équation par régression linéaire multiple. L'analyse de cette équation nous a permis de proposer un pharmacophore 2D à partir duquel quatre nouvelles molécules plus actives ont été proposées. Elles ont ensuite fait objet de docking moléculaire afin d'élucider les interactions ligand-protéine probantes. L'analyse des résultats obtenus de cette dernière étape de notre étude a permis de confirmer que les quatre molécules sont plus actives avec le récepteur α -Amylase et respectent la règle de Lipinski. Donc les difficultés de taux élevé de glucose dans le sang, les dysfonctionnements de l'organisme liés à hyperglycémie peuvent être remédiés après la synthèse et la mise en application de ces nouvelles molécules médicamenteuses. Nous prévoyons par ailleurs la synthèse de ces composés en collaboration avec les laboratoires de synthèses organique et pharmaceutiques à nos services.

Mots clés : Diabète, QSAR, docking, enzyme α -Amylase, triazole.

Abstract

Diabetes is a chronic disease characterized by hyperglycemia, accompanied by a disruption of carbohydrate, lipid and protein metabolisms, resulting from a lack of secretion and/ or action of insulin (fasting glucose greater than 1.26 g/ L (7 mmol/ L)). Various therapeutic and preventive means are proposed. However, it is clear that the antidiabetic drugs used today are becoming increasingly ineffective. It is in this context that this study of the relationship between the electronic structure and the inhibitory/Molecular Docking activity of some series of molecules is carried out in order to propose new molecular structures that would be more effective. This QSAR study of the inhibitory activity of 4-amino-1,2,4-triazole derivatives on α -Amylase enzymes was carried out using the Klopman-Peradejordi-Gomez (KPG) approach. The Density Functional Theory (DFT) under the B3LYP functional and the 6-31G (d,p) base implemented in the GAUSSIAN software was used as calculation method. The software Statistica.10 allowed to obtain an equation by multiple linear regression. The analysis of this equation allowed us to propose a 2D pharmacophore from which four new more active molecules were proposed. They were then subjected to molecular docking to elucidate ligand-protein interactions. The analysis of the results obtained from this last step of our study confirmed that the four molecules are more active with the receptor α -Amylase and

respect the Lipinski rule. So the difficulties of high blood glucose levels, dysfunctions of the body related to hyperglycemia can be remedied after the synthesis and application of these new drug molecules. We also plan the synthesis of these compounds in collaboration with organic and pharmaceutical synthesis laboratories at our services.

Keys word : Diabetes, QSAR, docking, enzyme α -Amylase, triazole.

1- Introduction

Chez l'homme, les activités enzymatiques de la glucosidase et de l'amylase sont impliquées dans la dégradation des amidons et des sucres alimentaires en glucose[1].

L' α -Amylase pancréatique transforme les amidons complexes en oligosaccharides dans la lumière de l'intestin grêle [2]. Le taux élevé du glucose, issu de ces transformations dans le sang, est l'une des causes primordiales de nombreuses maladies dont le diabète.

En effet, le diabète est un problème de santé publique potentiellement mortel qui intéresse le monde entier[3], de par sa fréquence, ses conséquences à long terme, ainsi que le coût du traitement[4].

La recherche de nouvelles molécules capables d'inhiber l'action de ces enzymes dans l'organisme semble être la meilleure solution pour lutter contre le diabète et est aujourd'hui l'une des préoccupations majeures [5]. Pour proposer de nouveau pharmacophore et de puissants composés antidiabétiques en ciblant l'enzyme 3BAJ (α -Amylase), nous avons étudié dans ce travail la relation quantitative structure-activité et l'amarrage moléculaire de quelques séries de molécules, dérivées du 4-amino-1,2,4-triazole.

2- Matériels et méthodes

2.1- Sélection des molécules

Pour ce qui concerne la sélection des molécules et les activités biologiques dans ce cas, les dérivés de la 4-amino-1,2,4-triazole et leurs activités biologiques sont sélectionnés à partir d'une étude récente[6]. La formule générale de ces molécules est illustrée à travers la figure 1 et les valeurs logarithmiques calculées de leurs activités biologiques à partir de la littérature sont rapportées dans le tableau 1 ci-dessous. Il faut noter que les données expérimentales utilisées dans cette partie du travail sont l'activité inhibitrice *in vitro* sur l'enzyme α -Amylase (α -A) quantifiées comme IC_{50} .

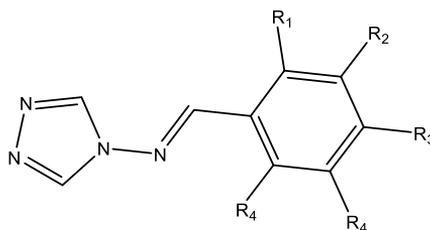


Figure 1: Structure générale des dérivés de la 4-amino-1,2,4-triazole

Le tableau 1 ci-dessous renseigne sur les activités biologiques des dérivées de cette molécule sur les enzymes α -glucosidase et α -amylase.

Tableau 1: Dérivés de la 4-amino-1,2,4-triazole et leurs concentrations inhibitrices expérimentales sur α -Amylase (α -A) [6].

Mol	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	log(IC ₅₀) α -A
1	H	H	OH	H	H	0,48
2	OH	OH	H	H	H	0,76
3	OH	H	OH	H	H	0,77
4	H	OH	H	H	OH	0,72
5	OH	OH	OH	H	H	0,77
6	OCH ₃	H	OCH ₃	H	H	0,64
7	OCH ₃	H	H	H	OCH ₃	0,64
8	H	OCH ₃	OCH ₃	OCH ₃	H	0,71
9	H	H	OC ₂ H ₅	OCH ₃	H	0,72
10	H	H	OCH ₃	OC ₂ H ₅	H	0,72
11	H	H	CH ₃	H	CH ₃	0,64
12	H	H	tBu	H	H	0,81
13	H	H	Cl	H	H	0,64
14	Cl	H	Cl	H	H	0,34
15	H	H	H	NO ₂	H	0,78
16	H	H	NO ₂	H	H	0,37
17	isopropyl	H	OH	tBu	H	0,79
18	H	OCH ₃	OH	H	H	0,77
19	H	OCH ₃	OH	OCH ₃	H	0,52
20	H	OCH ₃	Br	OCH ₃	H	0,35
21	H	Br	OH	H	H	0,36
22	OH	OCH ₃	H	H	Br	0,72

23	OCH ₃	H	H	Br	H	0,52
24	F	H	OCH ₃	H	H	0,46
25	H	OCH ₃	F	H	H	0,37
26	Cl	H	H	NO ₂	H	0,65
27	H	NO ₂	H	H	OH	0,38
28	H	H	OCH ₂ PH	H	H	0,70
29	H	H	OCH ₃	OCH ₂ PH	H	0,79
Standard		Acarbose				0,28

La numérotation commune du squelette commun de ces molécules est illustrée à la figure ci-dessous :

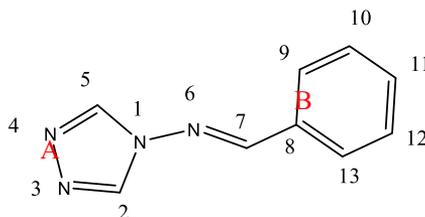


Figure 2 : Squelette commun des dérivés du 4-amino-1, 2,4-triazole

2.2- Relation Structure-Activité Quantitative (QSAR)

La méthode QSAR de Klopman-Peradejordi-Gómez (KPG) a été revue en détail dans diverses publications. Elle consiste en une équation linéaire reliant le logarithme d'une activité biologique (IC_{50}), mesurée *in vivo* ou *in vitro* avec un groupe d'indices de réactivité atomique locaux (LARI) d'un ensemble d'atomes de la molécule : $\log(IC_{50}) = a + f(LARIs)$ (1) où a est une constante. Les LARIs sont associés à des interactions électrostatiques atome-atome, donneur d'électrons et propriétés accepteur d'électrons, charge maximale qu'un atome peut recevoir, etc.

La formule générale de cette équation s'écrit comme suit :

$$\log(IC_{50}) = a + b * \log(M_D) + \sum_{o=1}^{subs} \rho_o + \sum_{i=1}^Z [e_i Q_i + f_i S_i^E + S_i S_i^N] + \sum_{i=1}^Z \sum_{m=(HOMO-2)^*,i}^{(HOMO)^*,i} [h_i(m) F_i(m^*) + j_i(m) S_i^E(m^*)] + \sum_{i=1}^Z \sum_{m'=(LUMO-2)^*,i}^{(LUMO+2)^*,i} [r_i(m') F_i(m'^*) + t_i(m') S_i^N(m'^*)] + \sum_{i=1}^Z [g_i \mu_i^* + k_i \eta_i^* + o_i \omega_i^* + Z_i \zeta_i^* + W_i Q_i^{*,max}]$$

où M_D est la masse du médicament, ρ_o est le paramètre d'orientation du *o*-ème substituant, Q_i est la charge nette de l'atome i . S_i^E , S_i^N sont respectivement la superdélocalisabilité électrophilique et nucléophilique atomique totale pour l'atome i , $F_i(m^*)$ est l'indice de Fukui (population d'électrons) de l'atome i dans une OM occupée (vide) m^* (m^*). $S_i^E(m^*)$, est la superdélocalisabilité électrophilique de l'OM m^* occupée de l'atome i et $S_i^N(m'^*)$ est la superdélocalisabilité nucléophilique de l'OM m'^* de l'atome i . μ_i^* , η_i^* , ω_i^* , ζ_i^* , $Q_i^{*,max}$, sont, respectivement, le potentiel chimique, la dureté atomique locale, l'électrophilie atomique locale, la mollesse atomique locale et la quantité de charge électronique que l'atome i peut accepter [7],[8].

En effet, le programme D-CENT-QSAR personnalisé a été utilisé afin de générer les valeurs numériques des indices de réactivité atomiques locaux à partir des fichiers résultats output de GAUSSIAN. Le logiciel Statistica.10 a été employé pour les analyses de régression linéaires multiples (LMRA).

2.3- Docking Moléculaire

Nous avons utilisé la protéine alpha-Amylase pancréatique humaine complexée avec l'arabose de PDB ID 3BAJ. Tous les résidus manquants ont été ajoutés à la protéine grâce au logiciel GOLD afin de favoriser les interactions possibles. Les ligands cristaux ont été ensuite extraits de même que les molécules d'eau existantes. Les hydrogènes ont été ajoutés puis nous avons convertis la structure protéique en format Mol2. Pour valider notre méthode de docking, nous avons réalisé l'auto-amarrage de la pose la mieux notée avec un RMSD inférieur ou égal à 2 Å dans le site actif de la protéine de départ.

3- Modèle de prédiction de l'activité inhibitrice des dérivés du 4-amino-1, 2,4-triazole l'enzyme α -Amylase.

3.1- Résultats

En ce qui concerne l'activité inhibitrice des dérivés du 4-amino-1,2,4-triazole sur l'enzyme α -Amylase, l'étude QSAR menée nous a permis d'obtenir de l'équation de régression ci-après :

$$\log(IC_{50}) = 2,80 - 1,86Q_4^{max} + 2,34F_5(HOMO)^* + 0,77F_9(HOMO)^* + 0,41F_9(HOMO - 1)^* - 7,15\zeta_{13} - 0,27F_4(HOMO - 2)^* + 0,37F_{13}(LUMO + 2)^* - 0,12S_{11}^E - 0,29Q_{13}$$

Avec : $n=29$; $R=0,93$; $R^2=0,87$; R^2 ajusté=0,81 ; $F(9,19)=14,444$; $p < 0,00000$; Erreur-type d'estimation : 0,07.

Des vingt-neuf cas de molécules étudiés, aucun aberrant n'est détecté et aucun résidu en dehors de la limite $\pm 2\sigma$. Dans cette équation, Q_4^{max} est la charge électronique maximale que l'atome 4 peut recevoir d'un site donneur d'électrons, $F_5(HOMO)^*$ est l'indice de Fukui (la population électronique) de l'orbitale moléculaire la plus haute occupée localisée sur l'atome 5, $F_9(HOMO - 1)^*$ est l'indice de Fukui (la population électronique) de la deuxième orbitale moléculaire la plus haute occupée localisée sur l'atome 9, $F_9(HOMO)^*$ est l'indice de Fukui (la population électronique) de l'orbitale moléculaire la plus haute occupée localisée sur l'atome 9, ζ_{13} est la facilité de l'atome 13 à échanger un électron avec un site donneur d'électrons, $F_4(HOMO - 2)^*$ est l'indice de Fukui (la population électronique) de la troisième orbitale moléculaire la plus haute occupée localisée sur l'atome 4, $F_{13}(LUMO + 2)^*$ est l'indice de Fukui (la population électronique) de la troisième orbitale moléculaire la plus basse vacante localisée sur l'atome 13, S_{11}^E est la superdélocalisabilité totale (capacité atomique totale) de l'atome 11, Q_{13} est la charge nette de l'atome 13.

Dans cette dernière partie du travail, pour ce qui concerne les variables indépendantes, le tableau 3 montre que la corrélation interne la plus importante est $r^2(F_9(HOMO - 1)^* F_9(HOMO)^*) = 0.36$. La figure 3 montre le graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs calculées de $\log(IC_{50})$. Les paramètres statistiques associés à l'équation obtenue montrent qu'elle est statistiquement significative et que la variation des valeurs numériques de

neuf (09) indices de réactivité atomique locaux explique environ 95% de confiance de la variation de l'activité biologique.

Tableau 2 : Coefficients beta et t-test des coefficients dans l'équation obtenue

Variables	Beta coefficients	t(19)	p-Value
Q_4^{\max}	-0,96	-8,82	0,000000
$F_5(\text{HOMO})^*$	0,49	4,44	0,000280
$F_9(\text{HOMO})^*$	0,40	2,72	0,013489
$F_9(\text{HOMO} - 1)^*$	0,45	3,90	0,000965
ζ_{13}	-0,40	-3,82	0,001156
$F_4(\text{HOMO} - 2)^*$	-0,34	-3,31	0,003668
$F_{13}(\text{LUMO} + 2)^*$	0,41	3,76	0,002697
S_{11}^E	-0,43	-3,09	0,006064
Q_{13}	-0,27	-2,31	0,032071

Tableau 3: Coefficients de corrélation pour les variables apparaissant dans l'équation obtenue

variables	$F_4(\text{HOMO} - 2)^*$	Q_4^{\max}	$F_5(\text{HOMO})^*$	$F_9(\text{HOMO} - 1)^*$	$F_9(\text{HOMO})^*$	S_{11}^E	Q_{13}	$F_{13}(\text{LUMO} + 2)^*$
Q_4^{\max}	0.01	1.00						
$F_5(\text{HOMO})^*$	0.00	0.32	1.00					
$F_9(\text{HOMO} - 1)^*$	0.01	0.06	0.05	1.00				
$F_9(\text{HOMO})^*$	0.13	0.00	0.00	0.36	1.00			
S_{11}^E	0.20	0.02	0.02	0.01	0.18	1.00		
Q_{13}	0.01	0.00	0.04	0.00	0.03	0.21	1.00	
$F_{13}(\text{LUMO} + 2)^*$	0.13	0.24	0.23	0.00	0.04	0.02	0.03	1.00
ζ_{13}	0.03	0.13	0.15	0.08	0.02	0.09	0.02	0.13

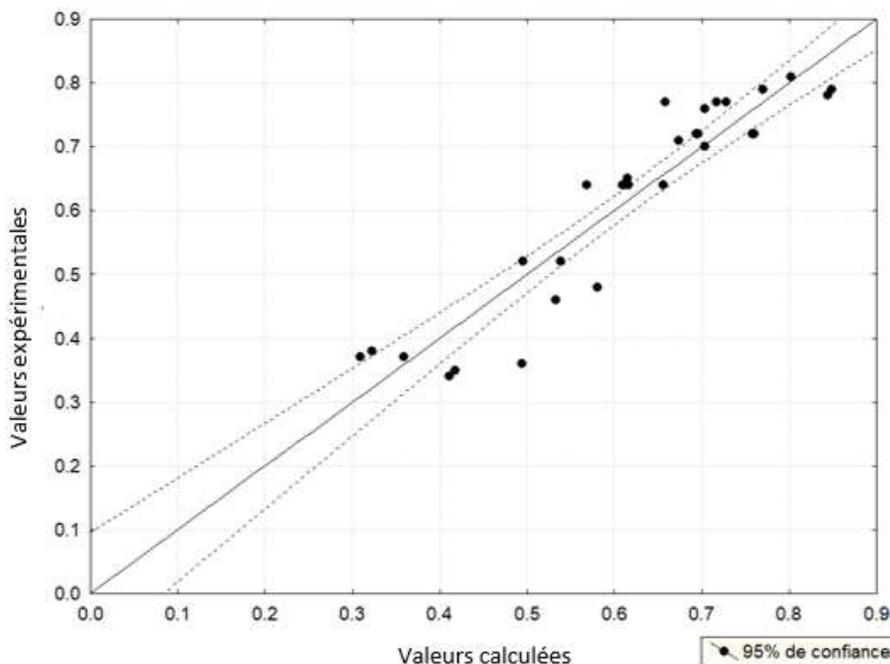


Figure 3 : Graphique des valeurs expérimentales en fonction des valeurs calculées de $\log(IC_{50})$. Les lignes en pointillés indiquent l'intervalle de 95% de confiance dans la corrélation.

Afin de suggérer le type d'interaction moléculaire qu'implique la présence des atomes dans l'équation obtenue, nous avons déterminé la nature de leurs deux orbitales moléculaires : les plus basses vacantes et les plus hautes occupées (HOMO)*, (LUMO)* (figure 8).

3.2-Discussion

, les valeurs du tableau 2 montrent que l'importance des variables diminue dans l'ordre suivant : $Q_{14}^{max} > S_{11}^E \approx \zeta_{13} > F_4(HOMO - 2)^* > Q_{13} > F_9(HOMO)^* \approx F_{13}(LUMO + 2)^* > F_9(HOMO - 1)^* > F_5(HOMO)^*$. Ce même tableau 2 nous montre que les indices $F_9(HOMO)^*$, $F_9(HOMO - 1)^*$, Q_{13} ont une faible signification dans l'équation obtenue à cause de leur p-Value supérieur à la limite 0,005, cependant, l'analyse de cette équation statistique se fera seulement sur les six (06) autres indices de réactivité atomique locaux. Mais, vue la nature des indices mis en jeu, le processus semble être une analyse basée sur le contrôle des charges et des interactions orbitales.

Dans cette partie du travail, les résultats obtenus indiquent que l'activité inhibitrice des 29 molécules étudiées dans cette série est associée à une variation simultanée d'un ensemble de neuf indices de réactivité atomique locaux du squelette commun. La méthode d'analyse variable par variable (VpV) est employée pour cette étude. Par ailleurs, les indices de Fukui sont toujours positifs, la superdélocalisabilité électrophilique totale et celle partielle sont négatives, la superdélocalisabilité nucléophile est généralement positive sauf cas exceptionnel, le potentiel

chimique électronique est négatif. Toutefois, cette analyse VpV nous montre qu'une bonne activité biologique serait liée à de valeurs positives élevées pour les indices tels que $F_4(\text{HOMO} - 2)^*$, ζ_{13} , Q_4^{max} , et à de faibles valeurs positives des indices de Fukui $F_{13}(\text{LUMO} + 2)^*$, $F_9(\text{HOMO})^*$, $F_5(\text{HOMO})^*$.

A l'échelle moléculaire, l'atome 4 est un atome d'azote du cycle A. La présence de l'orbitale $(\text{HOMO}-2)_4^*$ implique que les OM $(\text{HOMO}-1)_4^*$ et $(\text{HOMO})_4^*$ participent au processus. Une valeur élevée de l'énergie de la $(\text{HOMO}-2)_4^*$ induit une diminution de la population électronique au sein de cette orbitale. Une valeur positive élevée de $F_4(\text{HOMO} - 2)^*$ est favorable à une meilleure activité biologique, ce qui implique que l'atome 4 devrait interagir avec un centre déficitaire en électrons. Cette conclusion contredit la valeur positive élevée en valeur absolue de l'indice Q_4^{max} . Mais d'après le tableau 2, on constate que Q_4^{max} a un coefficient bêta plus grand que celui de l'indice $F_4(\text{HOMO} - 2)^*$, ce qui justifie son importance au détriment de $F_4(\text{HOMO} - 2)^*$. D'où l'atome 4 semble être impliqué dans une interaction avec un centre riche en électrons du site actif du récepteur. L'atome 13 est un atome de carbone du cycle B. La présence de la troisième orbitale la plus basse vacante $(\text{LUMO}+2)_{13}^*$ implique que les OM $(\text{LUMO}+1)_{13}^*$ et $(\text{LUMO})_{13}^*$ participent au processus. Le signe positif du coefficient affecté à $F_{13}(\text{LUMO} + 2)^*$ impose une faible valeur positive de $F_{13}(\text{LUMO} + 2)^*$ et induit que l'atome 13 interagit avec un centre déficitaire en électrons. Il peut s'agir d'une interaction de type π - π ou π - σ , ce qui confirme la valeur positive élevée de l'indice ζ_{13} . L'atome 9 est un atome de carbone du cycle B. Une valeur positive faible de $F_9(\text{HOMO})^*$ implique que l'atome 9 interagit avec un centre riche en électrons. L'atome 5 est un atome de carbone du cycle A. Une faible valeur positive de $F_5(\text{HOMO})^*$ implique que l'atome 5 interagit avec un centre du récepteur riche en électrons.

De toutes ces analyses nous proposons le pharmacophore 2D partiel ci-dessous :

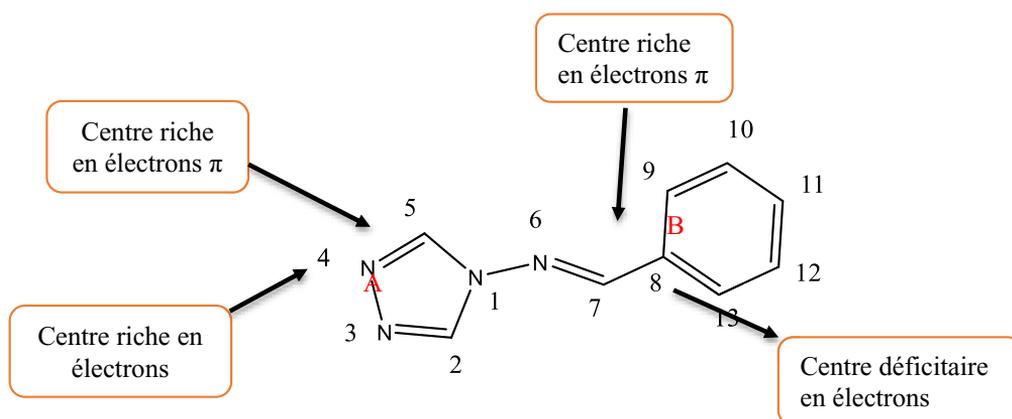


Figure 4 : Pharmacophore 2D partiel des dérivés du 4-amino-1,2,4-triazole avec l'enzyme α -Amylase.

3.3-Proposition des composés hypothétiques basés sur ce pharmacophore

Selon les sites indiqués sur ce pharmacophore (figure 4), quatre (04) nouvelles molécules antidiabétiques hypothétiques ont été proposées. En effet, sur les sites 4, 5, 9 et 13, différents substituants de nature chimique ont

été positionnés soit avec un effet mésomère attracteur (-M)/un groupement avec effet inductif attracteur (-I) ou soit avec un effet mésomère donneur (+M)/un groupement avec effet inductif donneur (+I) respectivement.

3.4-Validation du protocole de docking

Le Root Mean Square Deviation (RMSD) de la meilleure pose ayant le grand score d'affinité **75,8** avec le site est égal à **2.0** Angstrom. Ce RMSD prouve que notre protocole de docking est validé et pourrait servir de base pour docker nos composés antidiabétiques hypothétiques d'étude sur l'enzyme α -Amylase.

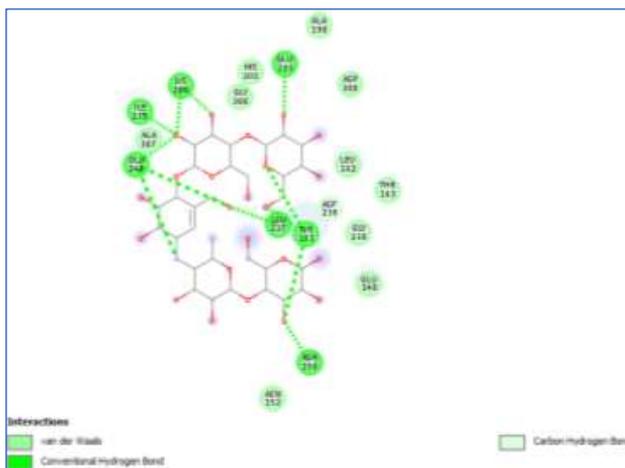


Figure 5 : Ligand cristal dans le site actif de l'enzyme 3BAJ

3.5-Docking moléculaire du composé le plus actif expérimentalement et des composés hypothétiques antidiabétiques

Nous avons docké le composé supposé avoir la faible valeur d'activité inhibitrice IC_{50} et tous les composés hypothétiques antidiabétiques sur l'enzyme 3BAJ.

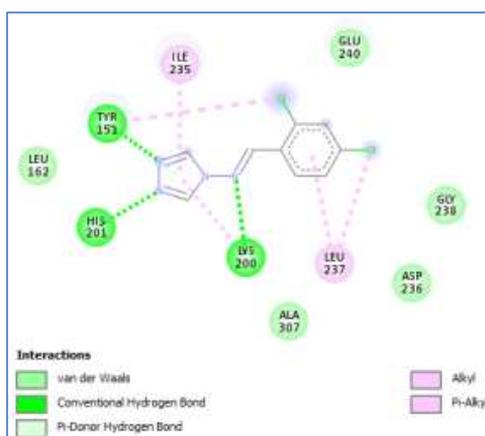


Figure 6 : Docking du composé le plus actif expérimentalement

Tableau 4 : Scores du docking des molécules hypothétiques dérivées du 4-amino-1, 2, 4-triazole sur l'enzyme 3BAJ (α -Amylase)

Mo- lé- cul es	smiles formats	Scor es
1	<chem>[H]Oc1c([H])c([H])c(N/C([H])([H])[H])C([H])([H])[H])c1\C([H])=Nn1[c]([H])=NN=[c]1S(F)(F)F</chem>	49,5
2	<chem>[H]C(=N/N1C([H])=NN=C1OC(F)(F)F)C1=C(OC([H])([H])[H])C([H])=C([H])C([H])=C1Br</chem>	51,0
3	<chem>[H]N([H])C1=C(\C([H])=NN2C([H])=NN=C2C([H])([H])C([H])([H])[H])C(Br)=C([H])C([H])=C1[H]</chem>	52,8
4	<chem>[H]N([H])C1=C([H])C([H])=C([H])C=C1\C([H])=NN1C([H])=NN=C1N(C1=C([H])C([H])=C([H])C([H])=C1[H])C1=C([H])C([H])=C([H])C([H])=C1[H]N(=O)=O</chem>	63,5
Ref	<chem>[H]C(=N/N1C([H])=NN=C1[H])C1=C([H])C([H])=C(Cl)C([H])=C1Cl</chem>	45,9

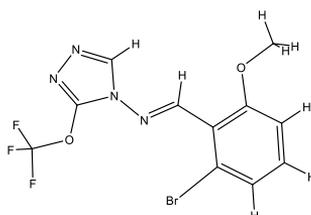
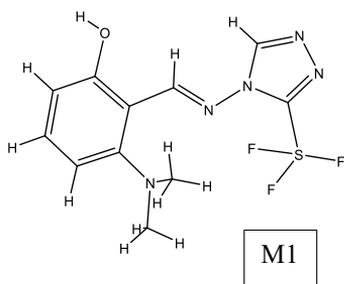
Parmi les quatre molécules hypothétiques antidiabétiques étudiées sur l'enzyme 3BAJ (α -Amylase), les scores d'affinité avec le site actif sont compris entre 49,5 et 63,5 et le score d'affinité de la molécule de référence est de 45,9 (**Tableau 4**). On retient donc que toutes molécules ont un score d'affinité supérieur à celle de la référence avec le site du récepteur 3BAJ.

Pour accéder aux propriétés physicochimiques (**Tableau 5**) des composés hypothétiques que nous avons proposés, SwissADME a été utilisé.

Tableau 5: Physicochemical propriety, Lipophilicity and druglikeness

Molécules	Partition coefficient log(P) Or Log P_{ow} (MLOGP)	Molecular weight (Dalton)	Hydrogen bond donor	Hydrogen bond acceptors	Number of rotatable bonds	Rule-of-five of Lipinski
M1	1.31	319.31	1	7	4	Yes; 0 violation
M2	2.12	365.11	0	8	5	Yes; 0 violation
M3	1.86	294.15	1	3	3	Yes; 0 violation
M3	2.66	399.41	1	5	6	Yes; 0 violation

Pour la sélection finale des composés plus actifs contre le récepteur 3BAJ, la règle de Lipinski a été employée. En effet, cette règle consiste à ne sélectionner que les molécules ayant un poids moléculaire (MW) ≤ 500 , un (log(P) MLOGP) ≤ 4.15 , un nombre d'atome accepteur de liaison hydrogène (N ou O) ≤ 10 ou un nombre de groupement donneur de liaison hydrogène NH or OH ≤ 5 . Au regard des résultats obtenus sur nos molécules hypothétiques proposées, cette règle de Lipinski confirme qu'elles ont toutes une bonne solubilité et perméabilité pour être de nouvelles molécules candidates contre le diabète.



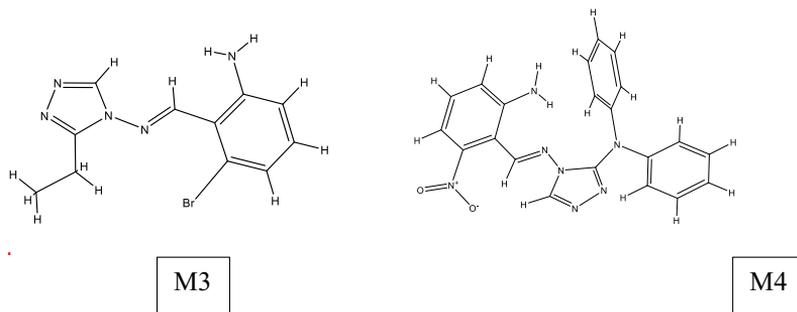


Figure 7 : Représentation 2D des composés hypothétiques

3.6-Orbitales moléculaires frontières de la molécule la plus active

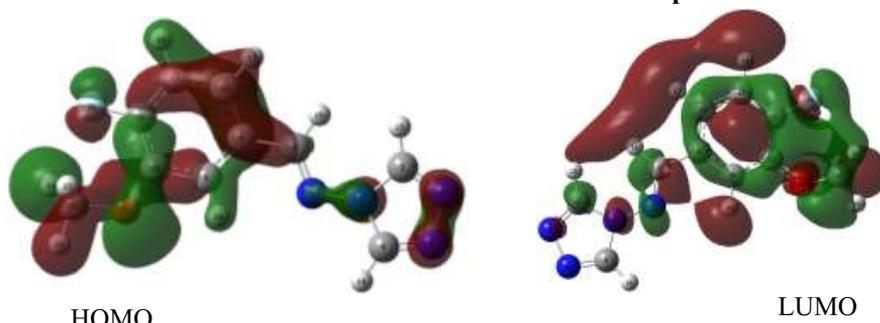


Figure 8 : Cartes d'isodensités des orbitales moléculaires frontières HOMO et LUMO de la molécule 25 de la série de dérivés du 4-amino-1,2,4-triazole

4- Conclusion

L'étude QSAR menée dans ce travail nous a permis l'obtention d'une relation statistiquement significative entre la variation des activités biologiques d'une série de molécules et la variation des valeurs numériques d'un ensemble d'indices de réactivités atomique locaux. Les analyses effectuées à partir de cette relation mathématique nous ont permis de proposer un pharmacophore 2D. Les analyses étant faites à l'échelle moléculaire, le modèle construit a montré que le processus est sous contrôle orbitales et de charges. Quatre nouvelles molécules hypothétiques ont été proposées pour l'enzyme étudiée. L'amarrage moléculaire effectué entre ces composés et le site actif de l'enzyme nous a permis de retenir que les quatre molécules sont plus actives avec le récepteur α -Amylase et respectent la règle de Lipinski.

References bibliographiques

- [1] Menteşe E, Baltaş N, Emirik M. Synthesis, α -glucosidase inhibition and in silico studies of some 4-(5-fluoro-2-substituted-1H-benzimidazol-6-yl)morpholine derivatives. *Bioorganic Chemistry* 2020; 101: 104002. doi:10.1016/j.bioorg.2020.104002
- [2] Kan L, Capuano E, Fogliano V, et al. Inhibition of α -glucosidases by tea polyphenols in rat intestinal extract and Caco-2 cells grown on Transwell. *Food Chemistry* 2021; 361: 130047. doi:10.1016/j.foodchem.2021.130047
- [3] Abbasi I, Nadeem H, Saeed A, et al. Isatin-hydrazone conjugates as potent α -amylase and α -glucosidase inhibitors: Synthesis, structure and in vitro evaluations. *Bioorganic Chemistry* 2021; 116: 105385. doi:10.1016/j.bioorg.2021.105385
- [4] Fadoua B, Jihane I, Yasmina T, et al. Mise au point du traitement du diabète type 2. *Batna Journal of Medical Sciences* 2020; 4
- [5] Katsila T, Spyroulias GA, Patrinos GP, et al. Computational approaches in target identification and drug discovery. *Computational and Structural Biotechnology Journal* 2016; 14: 177–184. doi:10.1016/j.csbj.2016.04.004
- [6] Yeye EO, Kanwal, Mohammed Khan Khalid, et al. Syntheses, in vitro α -amylase and α -glucosidase dual inhibitory activities of 4-amino-1,2,4-triazole derivatives their molecular docking and kinetic studies. *Bioorganic & Medicinal Chemistry* 2020; 28: 115467. doi:10.1016/j.bmc.2020.115467
- [7] Jaramillo-Hormazábal I, Gómez-Jeria J-S, Robles-Navarro A. A DFT analysis of the relationships between electronic structure and activity at D2, 5-HT1A and 5-HT2A receptors in a series of Triazolopyridinone derivatives. *Chemistry Research Journal* 2022; 7(2): 6-28. ISSN:2455-8990
- [8] Kpotin GA, Bédé AL, Houngue-Kpota A, et al. Relationship between electronic structures and antiplasmodial activities of xanthone derivatives: a 2D-QSAR approach. *Struct Chem* 2019; 30: 2301–2310. doi:10.1007/s11224-019-01333-w

Impact de l'incorporation de fibres de coco brutes sur les propriétés mécaniques des sols argileux : cas des sols de la localité d'Igana, commune de Pobè/Bénin

Koffi Judicaël AGBELELE^{1,3,4*}, Ernesto C. HOUEHANOU^{2,4}, MISSEKO Appolinaire Jean Paul^{3,4}, Aristide. C. HOUNGAN^{1,3,4}

¹ Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique (ENSET), (UNSTIM), Abomey, Bénin

² Institut National Supérieur de Technologies Industrielles (INSTI), (UNSTIM), Abomey, Bénin

³ Laboratoire des Matériaux et Structures (LAMS), Ecole supérieure VERECHAGUINE A. K., Cotonou, Bénin

⁴ Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliqué (LEMA), EPAC UAC

Résumé

Les sols argileux, en raison de leur teneur en minéraux gonflants, sont sujets au retrait-gonflement, un phénomène qui peut causer des dommages importants notamment aux constructions individuelles légères peu profondément ancrées. La stabilisation de ces sols est une technique fréquemment utilisée pour minimiser ce risque. Au Bénin, la consommation de la noix de coco est importante et les coques sont souvent délaissées dans la nature, entraînant ainsi une pollution environnementale. L'utilisation de l'enveloppe de la noix de coco, un déchet courant au Bénin, est une solution viable pour réduire la pollution tout en améliorant la résistance mécanique des sols argileux. L'étude actuelle examine les propriétés géo mécaniques du sol d'Igana stabilisé par des fibres de coques de noix de coco. Des essais physiques et mécaniques ont été effectués pour atteindre cet objectif. Les essais physiques réalisés sur ce sol nous ont permis de conclure que nous sommes en présence d'un sol de catégorie A-7-5 : argileux (classification HRB), contenant des limons très plastiques (classification de Casagrande) ; inorganique et ayant un gonflement et un indice de plasticité élevé. Par ailleurs les résultats des essais mécaniques ont montré que l'ajout des fibres à une teneur de 1,5% améliore la résistance en compression à 28 jours (soit une valeur de 10,746 MPa) alors que l'essai à la flexion a montré que l'ajout de 0,5% de teneurs en fibres de coco renforce la résistance du matériau soit une valeur de 1,52 MPa. En ce qui concerne la résistance au cisaillement, les résultats ont montré que l'ajout de 1% de fibres de coco l'argile optimise sa valeur.

Mots Clés: sols argileux, stabilisation, fibres de coco, propriétés mécaniques, résistance au cisaillement.

Introduction

Le processus de construction d'infrastructures stables, fiables et durables est souvent marquée par une utilisation limitée de l'argile en raison de son comportement imprévisible en présence d'eau. En Génie Civil, les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux et des formations géologiques argileuses induisent des tassements différentiels [1].

Ce phénomène a longtemps fait réfléchir les chercheurs qui ne cessent chaque jour de proposer des solutions palliatives à ce cycle infernal responsable de nombreux dommages [2], [3]. Pour traiter ce problème, la stabilisation est la technique généralement utilisée. Qu'il s'agisse du traitement à la chaux [4], [5]; au ciment [6], [7]; ou du traitement mixte [8], l'objectif demeure le même, améliorer les propriétés de la terre argileuse en place afin d'y ériger un ouvrage. En dépit de ces stabilisants, le problème continue de s'observer d'où l'idée de l'ajout d'autres additifs tels que les géotextiles dans certains cas de figures [9], [10], ou encore des fibres végétales a vu le jour

[11], [12]. D'après Djohore Ange Christine, la présence de ces fibres va s'opposer aux retraits et gonflements responsables de fissures améliorant ainsi les résistances mécaniques de l'argile [13]. L'incorporation des fibres végétales pour la réalisation d'un matériau composite, constitue donc une piste de recherche qu'explorent quelques éminents scientifiques [14], [15], [16].

D'un côté, la problématique de la gestion des déchets demeure l'une des principales préoccupations dans les pays en voie de développement (PED). L'amélioration de cette gestion constitue l'objectif central du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). De l'autre côté, au sein de la République du Bénin, le coco est largement consommé, et les coques, qui peuvent subsister pendant 10 ans dans la nature avant de se dégrader, sont souvent abandonnées, entraînant une pollution des rues. L'écorce de la noix de coco est abondamment présente en tant que résidu de la production de noix de coco dans de nombreuses régions. L'utilisation des fibres de coco pour la mise en œuvre d'un matériau composite est une option qui peut se montrer intéressante selon [17], [18], [19]. D'après ces auteurs, la durée de vie de cette fibre est située entre 4 et 10 ans. De plus, elle possède un fort coefficient d'absorption d'eau (entre 130 et 180 %) et son diamètre varie de 0,1 à 0,6 mm. Différentes destinations sont possibles pour ce matériau. Cela s'inscrit également dans un contexte pertinent de valorisation des ressources locales qui prends en compte la disponibilité des matières premières de base [20]. Les composites à fibres végétales sont très demandés actuellement dans plusieurs secteurs en raison de leur biodégradabilité, [21]. C'est dans cette optique que s'inscrit la fibre de coco naturelle qui a l'avantage direct de réduire l'impact négatif sur l'environnement [22].

2. Matériau, matériel et méthode

2.1. Matériau

Les matériaux entrant dans la composition du produit final qui sera soumis aux essais sont l'argile et les fibres de coco.

2.1.1. Argile

L'argile utilisée pour cette étude provient de la localité d'Igana située dans la commune de Pobè en République du Bénin. Les échantillons ont été prélevés à une profondeur située entre 1,50 et 1,80 m dont les coordonnées géographiques sont: latitude 7° 1'9,7572" Nord et la longitude 2° 42'16,06572" Est.



Figure 1: Argile de la localité d'Igana

Pour la réalisation de l'étude, les fibres utilisées sont achetées auprès de BIO AGRO-TECH S. A une entreprise spécialisée dans l'achat et la vente des fibres de noix de coco. Elles ont été obtenues dans la localité Zè, au Sud-Bénin (6°47'00" nord, 2°18'00"). Les fibres employées mesurent en moyenne 7 cm de long et leurs propriétés physico-mécaniques sont recensées dans [17], [23], [24] et [25].



Figure 2: Fibres de coco

2.2. Méthodologie

Des essais de caractérisation physico-mécanique ont été réalisés. Dans un premier temps, l'identification de l'argile selon la classification HRB (Highway Research Board) a été faite, suivie de la mesure de la résistance en compression à l'aide de l'essai de compression simple (NF EN 13286-41), la mesure de la résistance en flexion par l'essai de Flexion 3 points (NBN EN 1015-11) et enfin la mesure de la résistance au cisaillement ont été réalisées.

Dans le but d'obtenir des résultats, suite à la classification HRB de l'argile, différentes formulations du matériau composite argile-fibre de coco, ont été réalisées. Les teneurs en fibres de (0% - 0,5% -1%- 1,5% et 2%) ont été choisies en se référant aux études antérieures révélées par la littérature. Le mélange des fibres de coco et de l'argile s'est fait manuellement selon les teneurs en fibres. Cette méthode de traitement, très commune, consiste à mélanger l'argile avec la fibre de coco avant l'utilisation. L'homogénéité des mélanges est effectuée pendant 5 minutes. Finalement on a procédé à l'ajout des fibres en faisant le malaxage. Le matériau est alors mis en place et compacté juste après le malaxage. Pour chaque mélange, 2 kg d'argile ont été prélevés. La quantité d'eau ajoutée est celle qui favorise la maniabilité nécessaire à la préparation des éprouvettes. En effet, les éprouvettes ont été confectionnées à une compacité proche de l'optimum Proctor modifié et à différentes teneurs en eau soit 17,90, 18,20, 19,40 et 20,10 %. Deux types d'échantillons ont été produits : le premier est de forme prismatique de dimensions 16 x 4 x 4 cm³ et le second est cylindrique de 50 mm de diamètre et 100 mm de hauteur [26]. Les moules prismatiques sont remplis en deux couches tandis que les moules cylindriques sont remplis en trois couches. Après les éprouvettes sont conservées en laboratoire à température ambiante pendant 7, 14 ou 28 jours suivant les jours d'écrasement.



a) Moule d'éprouvette prismatique



b) Stockage des éprouvettes



c) Rupture de l'éprouvette cylindrique

Figure 3: Eprouvettes

3. Résultats et discussions

3.1. Caractérisation physique

3.1.1. L'essai d'analyse granulométrique par tamisage

Le but principal visé par cette analyse granulométrique est non pas de déterminer uniquement les répartitions des grains composant le matériau argileux en fonctions de leur taille mais d'apprécier la proportion de la fraction inférieure à 80 μ m afin d'aboutir à sa classification selon le HRB.

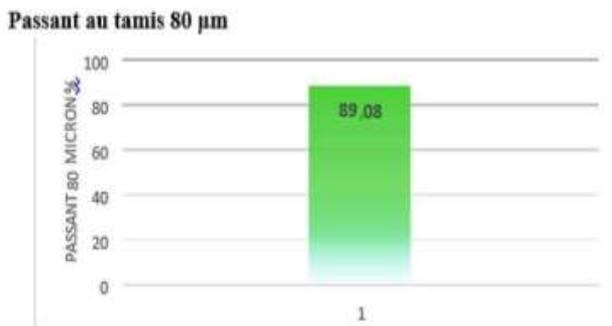


Figure 4 : Passants au tamis 80µm

3.1.2. L'essai de détermination des limites d'Atterberg

La valeur de l'indice de plasticité est le paramètre influençant la classification du matériau argileux. A cet effet les limites de liquidité et de plasticité ont été déterminées.

Tableau 1 : Limites d'atterberg

Limite de liquidité (w_L)	Limite de plasticité (w_p)	Indice de plasticité ($w_L - w_p$)
81	45	36

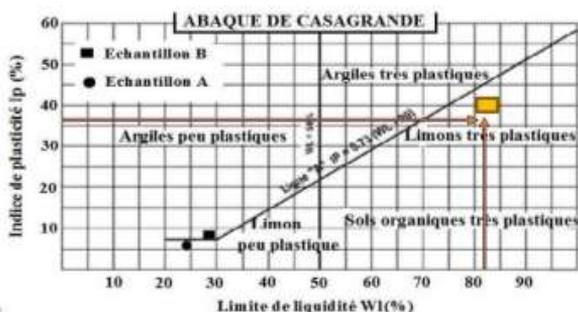


Figure 5: Figure de classification des sols selon la nature argileuse

3.1.3. Teneur en Matières Organiques

La teneur en matière organique influe sur la qualité des argiles. La classification du sol selon la teneur en matière organique est faite selon les valeurs indiquées dans [27]. Au terme de l'essai la valeur de la teneur en matière organique obtenue vaut 0,424. Le sol étudié est donc **inorganique**.

3.1.4. Gonflement

Des résultats issus du calcul de l'indice de plasticité nous avons procédé à la classification de Snethen (1980) [28] basés sur un seul paramètre : l'indice de plasticité.

Il en ressort que le sol de Igana présente **un potentiel de gonflement élevé**.

Tableau 2: Récapitulatif des essais physiques

LOCALITE	% $\leq 80 \mu\text{m}$	I_p (%)	W_i (%)	NATURE
IGANA	89	36	81	A7-5 Sol argileux

Il en ressort que l'argile prélevé dans la localité d'Igana est un sol de catégorie A-7-5 : argileux contenant des limons très plastiques (classification de Casagrande) ; inorganique, ayant un gonflement un indice de plasticité élevé. Il s'agit donc d'un sol argileux constitué de limons très plastiques avec une teneur en matière organique faible.

3.2. Caractérisation mécanique

3.2.1. Essai de compression simple

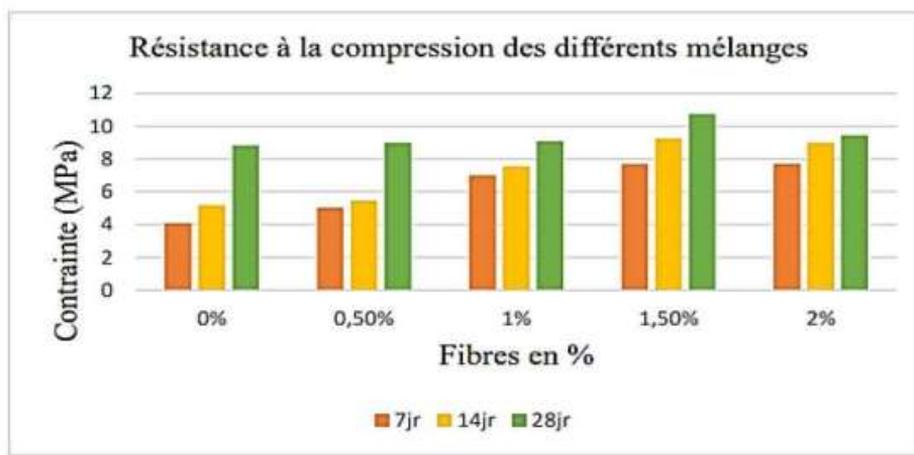


Figure 6: Histogramme des résultats d'essai de compression

L'influence des fibres sur la résistance à la compression des éprouvettes est évidente. En effet, la résistance la plus faible pour tous les âges est obtenue sur les éprouvettes d'argile crue (sans fibres) (8,84 MPa) et la plus grande valeur sur les éprouvettes d'argile avec incorporation de 1,5% de fibres (10,75). Cette augmentation est due à l'ajout des fibres dans l'argile et à la densité du mélange. On conclut alors que l'ajout de 1,5% de fibres de coco est la teneur optimale pour une meilleure résistance en compression de l'argile de Igana. Cette augmentation de la

résistance en compression a été également observée par d'autres chercheurs pour d'autres fibres végétales dans la littérature [13], [18].

3.2.2. Essai de flexion 3 points

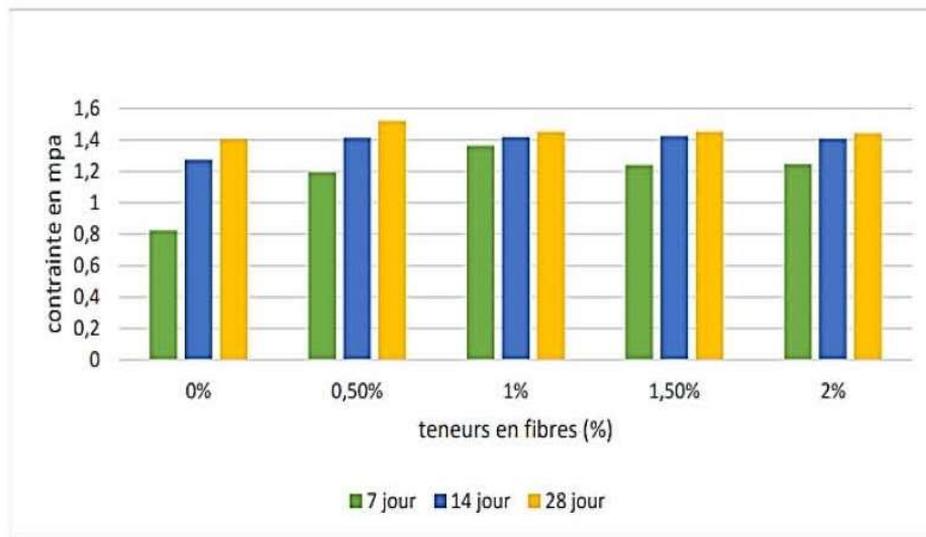


Figure 7: Histogramme des résultats d'essai de flexion

Les résistances des échantillons sans fibres et avec fibres à différentes teneurs ont été déterminées. Les résistances les plus faibles sont obtenues avec l'argile sans fibres et les plus fortes sont obtenues avec l'argile + 0,5% de teneur en fibres. L'augmentation de la résistance à cette teneur est due à la présence des fibres qui jouent le rôle des armatures reprenant les efforts transmis à l'argile. On conclut alors que l'ajout de 0,5% de fibres de coco est la teneur optimale pour une meilleure résistance en flexion. Ce constat a été fait par d'autres chercheurs [18].

3.2.3. Essai de cisaillement direct

La résistance au cisaillement de l'argile à différentes teneurs correspondant aux contraintes 50 KPa, 100 KPa, 200KPa et 400 Kpa a été réalisée et nous a permis d'aboutir aux valeurs de cohésion et angle de frottement du matériau

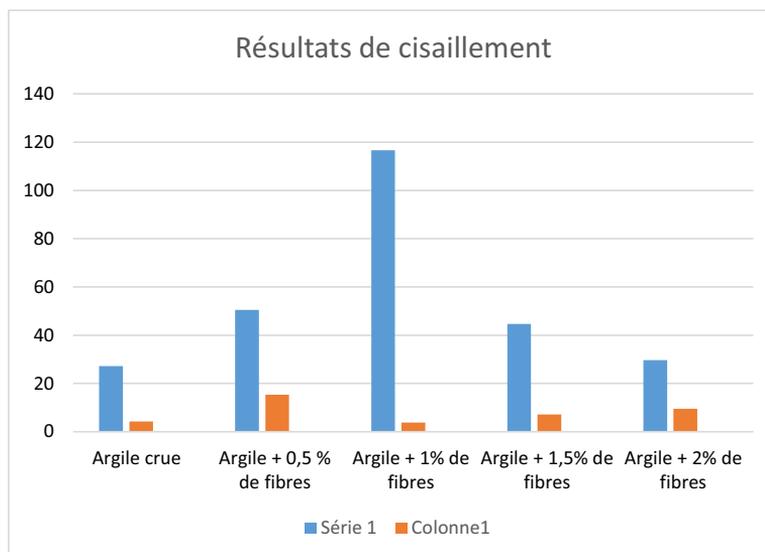


Figure 8: Histogramme des résultats d'essai de cisaillement

Il ressort que la valeur maximale de la cohésion qui est de 116,6 KPa est obtenue avec la teneur en fibres de 1% qui correspond à l'angle de frottement le plus faible d'une valeur 3,8°.

4. Conclusion

Cette étude nous a permis d'étudier l'influence des caractéristiques mécaniques des sols argileux de Igana stabilisés par les fibres de coques de noix de coco. Nous avons réalisé dans un premier temps des essais physiques sur le sol de base. Ce qui nous a permis de conclure que le sol de Igana est constitué des argileux, limoneux très plastique, et inorganique ayant un indice de plasticité et un potentiel de gonflement élevé. Dans un second temps, des essais mécaniques réalisés sur les différents mélanges (avec 0-0.5-1-1,5 et 2% de fibres de coco) ont révélé que, quelque soit la teneur en fibres, l'angle de frottement existe. Cependant, la cohésion la plus élevée est obtenue avec ta teneur en fibres de 1% soit une valeur de 116,6 KPa. Quant à sa résistance à la compression l'étude a révélé que la teneur optimale en fibres de coco est de 1,5% pour la compression, 0,5 pour la flexion, soit une contrainte maximale 1,523 MPa pour la flexion et 10,746 MPa pour la compression. En définitif, tous les résultats montrent que l'ajout des fibres de coco conduit à une amélioration des différentes propriétés physiques et mécaniques de ces sols tout en restant une solution écologique. Cependant cela laisse apparaître de nombreuses perspectives dont la plus pertinente est celle de la destination de ce matériau.

Bibliographie

- [1] V. Y. Chertkov and I. Ravina, "Shrinking–swelling phenomenon of clay soils attributed to capillary-crack network," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 34, no. 1, pp. 61–71, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0167-

8442(00)00024-0.

- [2] V. Y. Chertkov, "The reference shrinkage curve of clay soil," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 48, no. 1, pp. 50–67, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.TAFMEC.2007.04.005.
- [3] C. Andrieux, M. Chrétien, A. Denis, R. Fabre, and J. F. Lataste, "Shrinkage and swelling of clay soil," <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2011.9693367>, vol. 15, no. 5, pp. 819–838, 2011, doi: 10.1080/19648189.2011.9693367.
- [4] F. G. Bell, "Lime stabilization of clay minerals and soils," *Eng. Geol.*, vol. 42, no. 4, pp. 223–237, Jul. 1996, doi: 10.1016/0013-7952(96)00028-2.
- [5] S. M. Rao and P. Shivananda, "Compressibility behaviour of lime-stabilized clay," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 309–319, Jun. 2005, doi: 10.1007/S10706-004-1608-2/METRICS.
- [6] N. Miura, S. Horpibulsuk, and T. S. Nagaraj, "ENGINEERING BEHAVIOR OF CEMENT STABILIZED CLAY AT HIGH WATER CONTENT," *SOILS Found.*, vol. 41, no. 5, pp. 33–45, Oct. 2001, doi: 10.3208/SANDF.41.5_33.
- [7] J. I. Bhatta, S. Bhattacharja, and H. A. Todres, "USE OF CEMENT KILN DUST IN STABILIZING CLAY SOILS," 1996.
- [8] J. R. Prusinski and S. Bhattacharja, "Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils," <https://doi.org/10.3141/1652-28>, vol. 1, no. 1652, pp. 215–227, Jan. 1999, doi: 10.3141/1652-28.
- [9] J. G. Zornberg and G. H. Roodi, "Use of geosynthetics to mitigate problems associated with expansive clay subgrades," <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00043>, vol. 28, no. 3, pp. 279–302, Apr. 2021, doi: 10.1680/JGEIN.20.00043.
- [10] S. Jahandari, M. Saberian, F. Zivari, J. Li, M. Ghasemi, and R. Vali, "Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid," <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1329259>, vol. 13, no. 2, pp. 172–183, Mar. 2017, doi: 10.1080/19386362.2017.1329259.
- [11] A. Gheris and A. Hamrouni, "Treatment of an expansive soil using vegetable (DISS) fibre," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–17, Apr. 2020, doi: 10.1007/S41062-020-0281-5/METRICS.
- [12] H. Omrani, L. Hassini, A. Benazzouk, H. Beji, and A. ELCafsi, "Elaboration and characterization of clay-sand composite based on *Juncus acutus* fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117712, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117712.
- [13] D. A. Christine and B. M. Olivier, "Effet de l' addition de fibres de coco traitées à la potasse sur les propriétés mécaniques des matériaux de construction à base d' argile – ciment," vol. 14, no. 36, pp. 104–116, 2018, doi: 10.19044/esj.2018.v14n36p104.
- [14] V. Laverde, A. Marin, J. M. Benjumea, and M. Rincón Ortiz, "Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 340, p. 127729, Jul. 2022, doi:

- 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127729.
- [15] C. Galán-Marín, C. Rivera-Gómez, and J. Petric, "Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 8, pp. 1462–1468, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.01.008.
- [16] O. Onuaguluchi and N. Banthia, "Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 68, pp. 96–108, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2016.02.014.
- [17] R. D. Tol, K. Scrivener, G. L. England, and K. Ghavami, "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites," vol. 22, pp. 127–143, 2000.
- [18] L. Ivan, N. Nkotto, G. D. Kamgang, and J. Tiewa, "Caractérisation des blocs produits par addition des fibres de coco et des matériaux de construction à base de latérite - ciment Résumé," vol. 17, no. 4, pp. 170–184, 2020.
- [19] H. Loualbia, M. Duc, S. Feia, H. Loualbia, M. Duc, and S. Feia, "Etude du phénomène durcissement des encroutements calcaires en Algérie To cite this version : HAL Id : hal-03106394," 2021.
- [20] B. Morino, G. Koungang, N. Dieunedort, and B. Wenga, "3- Matériels et Méthodes ➤ Matériels 6- Bibliographie 7- Remerciements," no. September 2019, 2016.
- [21] H. Kim, J. Biswas, and S. Choe, "Effects of stearic acid coating on zeolite in LDPE, LLDPE, and HDPE composites," *Polymer (Guildf)*, vol. 47, no. 11, pp. 3981–3992, May 2006, doi: 10.1016/J.POLYMER.2006.03.068.
- [22] R. Ntenga, "Modélisation multi-échelle et caractérisation de l'anisotropie élastique de fibres végétales pour le renforcement de matériaux composites," 2007.
- [23] N. Mathura and D. Cree, "Characterization and mechanical property of Trinidad coir fibers," vol. 43692, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1002/app.43692.
- [24] M. Ho *et al.*, "Composites : Part B Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites," *Compos. Part B*, vol. 43, no. 8, pp. 3549–3562, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.10.001.
- [25] L. C. Fibers, P. D. Dharmaratne, H. Galabada, and R. Jayasinghe, "Characterization of Physical , Chemical and Mechanical Properties of Sri Characterization of Physical , Chemical and Mechanical Properties of Sri Lankan Coir Fibers," no. June, 2021, doi: 10.12911/22998993/137364.
- [26] E. Biology, "PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com PDF created with FinePrint pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com," vol. 57, no. 2, pp. 157–162, 2005.
- [27] B. T. Touolak, F. T. Nya, E. N. Haulin, E. Yanne, and J. M. Ndjaka, "Compressed Bricks Made of Makabaye and Pitoaré Clay: Implementation and Production," *Adv. Mater. Phys. Chem.*, vol. 05, no. 06, pp. 191–204, 2015, doi: 10.4236/ampc.2015.56020.
- [28] K. J. AGBELELE, "ETUDE INTEGREE DES SOLS INSTABLES EN VUE DE LA MAÎTRISE DU PHENOMENE DE GONFLEMENT : CAS DE LA DEPRESSION DE LA LAMA AU BENIN Par," 2017.

Réalisation d'un système de synthèse vocale des langues GBE, basé sur les réseaux de neurones

BOCO Charbel A. ^{1,}, DAGBA Théophile K.*

¹Université d'Abomey Calavi, BENIN

**Contact: bococharbel@gmail.com, Téléphone +229 97-60-26-56*

Résumé

Les systèmes de synthèse vocale sont des applications informatiques qui génèrent automatiquement la parole à partir d'un texte en entrée. Ils sont utilisés dans les systèmes destinés à divers domaines : l'éducation, la médecine, etc. Ces applications sont disponibles pour les langues mieux dotées en ressources informatiques comme le français et l'anglais. Mais ils sont plus difficiles à concevoir pour les langues peu dotées comme les langues africaines car ils nécessitent de grandes quantités de données.

L'objectif du présent travail est de réaliser un système de synthèse vocale pour les langues GBE de la branche Niger-congo. Nous avons pris un échantillon de trois langues: Fongbé, Gungbé et Gengbé.

La méthodologie adoptée a consisté dans un premier temps à collecter les données (audio et texte) pour les langues en nous basant sur des données enregistrées pour d'autres travaux, des données de la bible disponibles en ligne et des données d'une autre langue qui possède un corpus de plus de 10h de parole (Yoruba). Ensuite, il s'est agi de :

- supprimer manuellement les informations inutiles (les séquences musicales, les titres) dans les fichiers audio
- normaliser le texte: transformer les nombres en caractères, etc.
- faire un découpage des fichiers audio afin d'avoir des séquences de parole de moins de 30 secondes.

Enfin, nous avons adopté le modèle de réseau de neurones FastSpeech2 très utilisé dans le domaine de synthèse vocale, avec quelques modifications dans l'objectif de l'optimiser pour de faibles quantités de données audio.

Ainsi, nous avons conçu un système capable de générer la parole pour les trois langues sélectionnées. Des évaluateurs (10 locuteurs natifs par langue) ont attribué des scores qui varient entre 2/5 et 4/5 aux phrases générées par le système.

Mots clés : Technologie de langues, Système plurilingue de synthèse vocale, Fongbé, Gungbé, Gengbé

Introduction

L'intérêt pour la mise à disposition de corpus (paires de textes et données audio correspondantes) et la conception de systèmes de synthèse vocale (applications permettant de lire de manière audible un texte) est grandissant pour les langues en général. En effet, les systèmes de synthèse vocale sont très utiles et exploitables dans les domaines comme l'éducation et la santé (exemple : logiciels d'aide aux personnes analphabètes, logiciels d'aide aux personnes ayant des déficiences visuelles pour lire un texte ou aux personnes ayant des problèmes de locution, à communiquer avec un interlocuteur). Généralement, ils sont disponibles pour les langues fortement dotées ou possédant un grand nombre de locuteurs (Anglais, Français, etc.). Ils ont connu un grand progrès grâce aux divers travaux de recherche et à l'utilisation de diverses méthodes comme les méthodes par concaténation d'unités (Khan et Chitode, 2016), les méthodes basées sur les réseaux de Markov cachées (Kayte et al., 2015) et les réseaux de

neurones (Nazir et Malik, 2021) . Cette dernière méthode permet de synthétiser un signal de la parole de qualité comparable à la voix d'un locuteur natif. En effet, les modèles basés sur les réseaux de neurones sont capables d'apprendre, à partir uniquement des corpus, des règles phonétiques et prosodiques complexes (Ren et al., 2021; Shen et al., 2018). Mais ils nécessitent d'énormes quantités de données pour leur apprentissage (des dizaines d'heures de parole) avec des corpus comme LJSpeech pour l'Anglais (Ito et Johnson, 2017). Des travaux ont été effectués pour les langues africaines mais ils sont souvent confrontés aux défis de la collecte des données. En effet, ces langues sont souvent à faibles ressources informatiques. Dans la littérature, diverses solutions sont proposées : modifier les modèles existants afin de les rendre plus efficaces pour de faibles quantités de données (Zhang et al., 2022), collecter et effectuer un mixage des données de plusieurs langues (Babirye et al., 2022) . Dans le présent projet, nous avons travaillé à la conception d'un système de synthèse vocale pour les langues africaines de la famille GBE de la branche Kwa (Niger-Congo). Nous avons sélectionné un échantillon de trois langues : Fongbé, Gungbé et Gengbé. Le Yoruba, considéré comme une langue mieux dotée que les langues GBE étudiées, a servi pour le pré-entraînement. Le système conçu est basé sur la méthode des réseaux de neurones. Dans la suite de ce document, nous présenterons l'état de l'art de la conception des systèmes de synthèse vocale pour les langues africaines, la méthodologie adoptée pour ce travail, les résultats et la conclusion.

Etat de l'art des systèmes de synthèse vocale pour les langues africaines

Les systèmes de synthèse vocale ont pour objectif la génération de la parole à partir d'un texte. Les principales méthodes utilisées dans la littérature sont :

- la méthode par règles : elle se base sur les caractéristiques du conduit vocal humain et la méthode naturelle de génération de la parole par l'homme afin de proposer un modèle mathématique du processus de génération de la parole ou de génération des formants;
- la méthode par concaténation d'unités : elle vise à construire une forme de dictionnaire à partir du pré-enregistrement de données audio et permettre pour de nouvelles phrases de récupérer des segments de parole à agencer bout à bout selon des algorithmes pour générer la parole;
- la méthode basée sur les chaînes de Markov cachées : elle permet d'entraîner des chaînes de Markov cachées à prédire les paramètres de spectre de la parole, à partir du pré-enregistrement de données audio selon le contexte phonétique et prosodique. Ces modèles sont ensuite utilisés pour générer la parole pour de nouvelles phrases;
- la méthode basée sur les réseaux de neurones: elle permet d'entraîner des réseaux de neurones profonds à prédire en sortie la parole ou son spectre avec en entrée le texte (ou les phonèmes). L'apprentissage nécessite une large quantité de données.

Les modèles utilisant les réseaux de neurones profonds ont permis dans les récents travaux d'obtenir des résultats d'une qualité très proche de la voix humaine (Shen et al., 2018). Ces réseaux sont regroupés en deux branches :

- les modèles autorégressifs qui vont apprendre à générer la parole en se basant, pour un pas de temps donné, sur une unité de texte spécifique et en se référant aux paramètres qu'ils ont prédits pour le pas de temps qui précède ;
- les modèles non-autorégressifs qui se basent uniquement sur l'unité de texte correspondant à une unité de temps donnée pour prédire la parole.

Spécifiquement pour les langues africaines, les travaux sont basés sur des approches variées :

- la méthode par concaténation d'unités
Aoga et al. (2016) ont travaillé à l'intégration du Yoruba à MaryTTS (un système de synthèse vocale libre) en se basant sur un corpus conçu dans Dagba et al. (2016). Hassana et Sanusi (2019) ont également réalisé un système de synthèse vocale pour le Yoruba. Dagba et Boco (2014) ont travaillé sur le Fongbé en utilisant un algorithme de sélection d'unités. Kasie et Assabie (2012) ont proposé un système de synthèse vocale pour l'Amharic;
- les méthodes basées sur les chaînes de Markov cachées
Nous pouvons citer les travaux de Bereket (2008) pour l'Amharic et Baloyi et al. (2012) pour le Xitsonga ;
- les méthodes basées sur les réseaux de neurones
Elles comptent, pour les langues africaines, des travaux comme ceux de Meyer et al.(2022) pour 10 langues africaines (Yoruba, Ewé, Hausa, Lingala, ...), Boco et Dagba (2022) pour le Fongbé et le Yoruba, Nthite et Tsoeu (2020) pour Sesotho et isiXhosa, Rono et al. (2023) pour le Kiswahili...

Concernant la collecte de données plurilingues, nous pouvons citer Ogayo et al. (2022), Meyer et al. (2022) et Babirye et al. (2022) qui ont travaillé à la mise à disposition de corpus plurilingues pour plusieurs langues africaines (en majorité les plus parlées comme le Swahili, le Yoruba, le Lingala, etc.).

Les langues ciblées

Le Fongbé, le Gengbé et le Gungbé (Akoha, 2010; Capo, 1990, 2010; Eberhard et al., 2022; Kluge, 2007) appartiennent à la famille GBE de la branche KWA des langues nigéro-congolaises parlées en Afrique de l'ouest principalement au Bénin, au Togo et au Nigéria par une population variant entre 1 et 3 millions (Eberhard et al., 2022). Ces langues sont tonales et utilisent principalement l'alphabet latin, des emprunts de l'alphabet phonétique international (IPA). Les tons sont marqués par des diacritiques (accents graves, aigus, etc.).

Le Yoruba (Eberhard et al., 2022) appartient au groupe des langues yoruboïdes rattachées à la famille des langues nigéro-congolaises. Il est parlé majoritairement dans les mêmes pays (Bénin, Togo et Nigéria) par environ 40

millions de personnes. Il utilise également l'alphabet latin auquel on ajoute des diacritiques (point souscrit) et des digrammes. Le Tableau 1 résume les caractéristiques phonétiques de chaque langue.

Tableau 1: Caractéristiques phonétiques du Fongbé, du Gengbé, du Gungbé et du Yoruba

Langues	Consonnes	Voyelles	Tons
Fongbé	20	12	4
Gengbé	22	12	2
Gungbé	24	12	3
Yoruba	18	11	3

Méthodologie

Dans un précédent travail, nous avons proposé un système de synthèse vocale qui supportait le Fongbé et le Yoruba basé sur le modèle de réseaux de neurones FastSpeech2 (Boco et Dagba, 2022). Compte tenu de la faible quantité de données collectées pour les deux langues, nous avons procédé à un pré-entraînement avec les données de l'Anglais qui sont très utilisées dans le domaine et connues pour leur qualité.

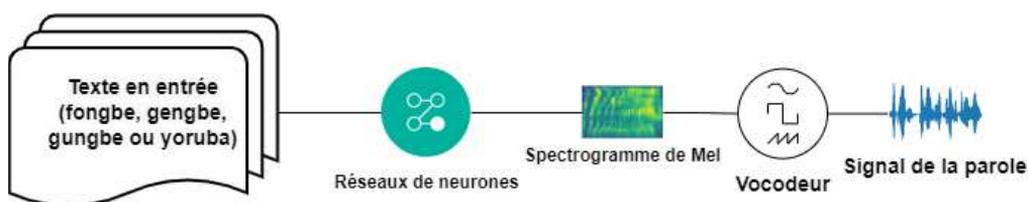


Figure 1: Vue globale du système

Dans le présent travail, nous avons obtenu grâce aux travaux de Gutkin et al. (2020) et Ogayo et al. (2022) des données assez importantes pour le Yoruba. Ainsi, nous avons proposé faire un pré-entraînement avec le Yoruba et ensuite procéder à l'entraînement de tout le système avec les données du Fongbé, du Gungbé et du Gengbé. Le système sera alors capable à partir d'un texte appartenant à l'une de ces langues, de produire la parole en sortie comme l'indique la Figure 1.

Dans la suite de cette section, nous expliquerons dans un premier temps le processus de collecte de données et ensuite nous donnerons une description du modèle utilisé.

➤ Collecte de données

Nous avons exploité les données du Yoruba proposées par Gutkin et al. (2020) et Ogayo et al. (2022). Nous avons extrait les données enregistrées pour la bible par www.Bible.is pour le Gungbé et le Gengbé. Pour le Fongbé, nous avons utilisé les données de Dagba et Boco (2014), ALFFA (Laleye et al., 2016) et celles de la bible.

Après la collecte des données, nous avons procédé à un nettoyage :

- supprimer manuellement les informations inutiles des fichiers texte et fichiers audio (les séquences musicales, les titres, les génériques);
- normaliser le texte: transformer les nombres en caractères, supprimer les parenthèses et autres ponctuations qui ne représentent pas une pause dans le discours, etc.

Chaque fichier de www.Bible.is est un chapitre de la bible ayant une durée qui varie entre quelques secondes et une dizaine de minutes. Pour faciliter l'apprentissage, nous avons procédé par une méthode proposée par Meyer et al. (2022), à un découpage en fichier de 30 secondes maximum. Cette méthode consiste à faire un alignement du texte sur l'audio avec l'outil MFA (Montreal Forced Aligner) (McAuliffe et al., 2017) et CMUWilderness (Black, 2019). Ensuite, grâce aux résultats fournis, pour chaque fichier audio, nous procédons à l'identification des limites en nombre de secondes de chaque verset par divers scripts. Ces limites serviront à découper les fichiers verset par verset. Nous avons alors sélectionné les versets dont les durées sont comprises entre 1 et 30 secondes. Grâce à quelques tests effectués au hasard, nous avons éliminé les chapitres pour lesquels au moins un fichier audio comporte des erreurs d'alignement. Le Tableau 2 résume la taille des données pour chaque langue.

Tableau 2: Taille des données pour chaque langue

Langue	Durée (Heure)	Nombre de phrases
Fongbé	14	11000
Gungbé	2	1500
Gengué	2	1500
Yoruba	18	15000

Pour chaque paire texte/audio, nous avons extrait le pitch, l'énergie et le spectrogramme de Mel. Les spectrogrammes de Mel sont de dimension 80 ayant des valeurs dans le domaine logarithmique extraits à partir des fichiers Wav 16KHz mono canal. Nous avons aussi associé des identifiants numériques aux locuteurs et langues.

Le corpus obtenu a été divisé en trois sous-ensembles avec un ratio de 90% pour l'entraînement et 10% pour la validation. Nous avons retenu 100 phrases du corpus de validation pour les tests (Figure 2).

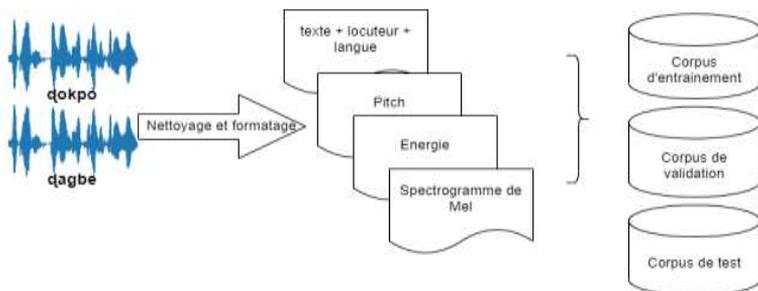


Figure 2: Processus de constitution des corpus

➤ **Description du Modèle de réseau de neurone**

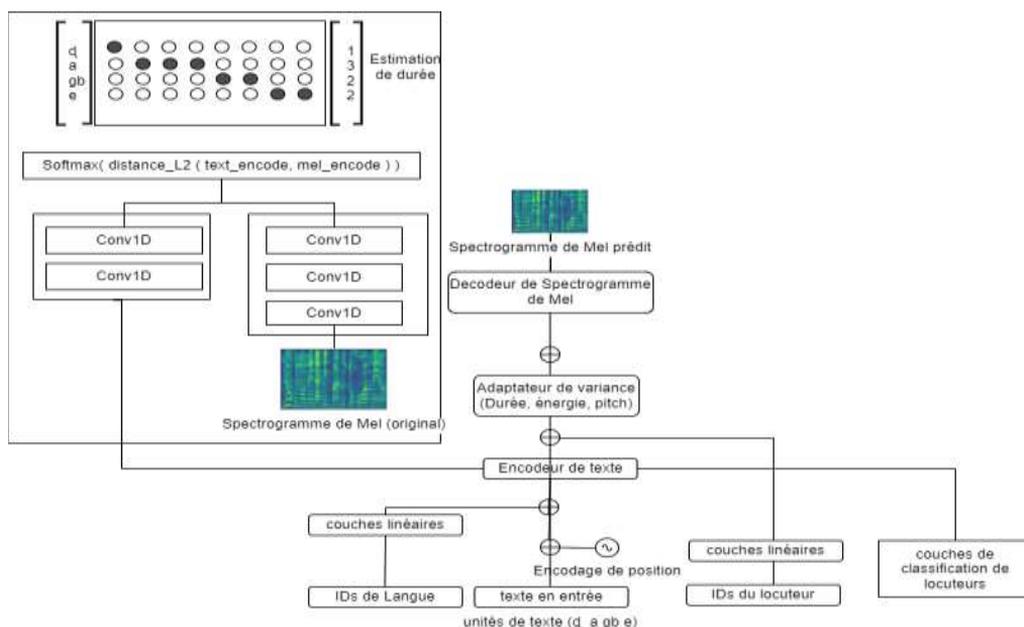


Figure 3: Architecture du modèle

Le modèle utilisé pour ce système (Figure 3) est le même que dans Boco et Dagba (2022). Il est composé :

- d'un encodeur (chargé de créer une représentation cachée du texte en entrée),
- de l'adaptateur de variance (chargé de prédire le pitch, l'énergie et la durée de chaque unité de texte et d'étendre la représentation cachée afin de la ramener aux dimensions des paramètres de sortie),
- d'un décodeur (chargé à partir de la sortie de l'adaptateur de variance de prédire le spectrogramme de Mel).
- le classifieur de locuteur qui permet d'apprendre les caractéristiques des locuteurs afin d'aider l'encodeur à créer une représentation cachée indépendante du locuteur grâce à l'apprentissage contradictoire.

Les données en entrée sont directement les caractères du texte (graphèmes) sans recours à des règles de conversion graphème-phonème.

Au lieu de faire recours à MFA pour extraire l'alignement entre parole et les unités de texte (phonèmes, caractères), nous avons utilisé le module de recherche d'alignement monotonique (Monotonic Alignment Search) conçu grâce à des réseaux convolutionnels et à un algorithme de recherche dynamique (Badlani et al., 2022). Ce module utilisable sur des modèles comme Fastspeech 2 permet durant l'apprentissage d'estimer de façon non supervisée un alignement entre les spectrogrammes de Mel et les unités de texte. Il est composé de deux blocs de convolutions. Le premier est constitué de deux convolutions 1-dimension (Conv1D) pour transformer le texte en une matrice *text_encode*. Le second est composé de trois convolutions 1-dimension pour transformer le spectrogramme de Mel en une matrice *Mel_encode*. Ensuite, le module calcule une distance L2 (Distance Euclidienne) entre les deux matrices à laquelle il applique la fonction SoftMax pour associer à chaque frame du spectrogramme de Mel une seule unité de texte. Ainsi, avec $e_{n,(n=1,\dots,N)}$ la liste des caractères en entrée et $s_{t, (t=1,\dots,T)}$ les frames du spectrogramme de Mel, nous aurons par exemple une association $s_1 = e_1, s_2 = e_2, s_3 = e_2, s_4 = e_2, \dots, s_T = e_N$.

L'implémentation a été faite à partir d'un code source public¹. Nous avons utilisé le vocodeur MelGan (Kumar et al., 2019) pour générer la parole à partir des spectrogrammes de Mel prédit par le décodeur.

Résultats et discussion

L'entraînement a été fait sur un GPU Nvidia V100². Nous avons gardé les paramètres d'optimisation d'apprentissage de Fastspeech 2 (Ren et al., 2021) avec la fonction d'optimisation *Adam Optimizer*.

Le système a d'abord été pré-entraîné uniquement avec les données de la langue Yoruba compte tenu de leur quantité, sur 100 cycles (epochs) avec à chaque pas d'apprentissage un lot de 16 phrases. Ensuite, nous avons entraîné le système avec les données du Fongbé, du Gungbé et du Gengbé sur 150 cycles.

Le système a été évalué en utilisant le test MOS (Mean Opinion Score). Il consiste à demander à des locuteurs natifs de la langue de noter les phrases prononcées avec des scores qui varient entre 1 (Médiocre) et 5 (Excellent). Ensuite nous calculons le score en utilisant la formule suivante:

$$\text{MOS} = \sum_{i=1}^C w_i p_i \quad (1)$$

Où:

- C représente le nombre de catégories (sa valeur est 5)
- p_i est le pourcentage de votes obtenu pour une catégorie i

¹ <https://github.com/NVIDIA/DeepLearningExamples/>

² Le GPU(Graphics Processing Unit) V100 est un processeur graphique de marque Nvidia de grande vitesse d'une capacité de 32GB de RAM et 640 cœurs Tensor.

- w_i est le poids associé à une catégorie i (1 pour médiocre, 2 pour passable, 3 pour bien, 4 pour très bien, 5 pour excellent).

Nous avons sélectionné 10 locuteurs natifs par langue, qui ont attribué divers scores selon leur appréciation du caractère naturel et de l'intelligibilité des séquences audio. Ce test a été effectué sur 15 phrases de chaque langue. Les résultats sont reportés dans le Tableau 3. Nous remarquons que malgré la faible quantité de données, nous obtenons un résultat proche de la note moyenne 3/5 pour le Gengbé et le Gungbé. Mais il faut noter qu'il y a quelques erreurs de prononciation. Dans Boco et Dagba (2022) le score MOS obtenu pour le Fongbé (3,68) est supérieur à celui obtenu ici. Ceci peut être dû entre autres à la qualité et la quantité des données de l'anglais utilisées par ce travail. En effet, LJSpeech (Ito et Johnson, 2017) est un corpus équilibré conçu professionnellement qui compte 24 heures de parole comparé aux corpus du Yoruba utilisés (18 heures). Aussi, il faut noter que mises à part les données de www.bible.is, le corpus du Fongbé est constitué de phrases lues par des locuteurs non professionnels dans un environnement parfois bruité; ce qui explique le faible score de vérité terrain obtenu pour les données de test de cette langue.

Tableau 3: Résultats des tests MOS effectués

Langue	Score MOS	Score "vérité terrain"
Fongbé	3,3	4,8
Gengbé	2,876	4,95
Gungbé	2,7325	5

Conclusion

Nous avons présenté un système de synthèse vocale basé sur le modèle FastSpeech2 capable de générer la parole pour 3 langues de la famille GBE des langues africaines (Fongbé, Gengbé et Gungbé). Il supporte aussi le Yoruba que nous avons utilisé pour le pré-apprentissage. Les résultats nous ont montré la capacité du système à générer la parole pour les différentes langues malgré la faible quantité de données utilisées pour certaines. Dans les prochains travaux, nous tenterons d'améliorer le résultat obtenu pour le Gengbé et le Gungbé. Nous testerons aussi l'extension à de nouvelles langues avec une faible quantité de données.

Références bibliographiques

- Akoha, A. B., 2010. *Syntaxe et lexicologie du fon-gbe: Bénin*. Edition L'harmattan. 1-368.
- Aoga, J.O., Dagba, T.K., Fanou, C.C., 2016. Integration of Yoruba language into MaryTTS. *Int. J. Speech Technol.* 19, 151–158.
- Babirye, C., Nakatumba-Nabende, J., Katumba, A., Ogwang, R., Francis, J.T., Mukiibi, J., Ssentanda, M., Wanzare, L.D., David, D., 2022. Building Text and Speech Datasets for Low Resourced Languages: A Case of Languages in East Africa. In: *3rd Workshop on African Natural Language Processing*.
- Badlani, R., Lañcucki, A., Shih, K.J., Valle, R., Ping, W., Catanzaro, B., 2022. One TTS alignment to rule them all. In: *ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, pp. 6092–6096.
- Baloyi, N., Manamela, M., Gasela, N., 2012. A text-to-speech synthesis system using hidden Markov models for Xitsonga. In: *Southern Africa Telecommunication Networks and Applications Conference (SATNAC)*.
- Bereket, K.T., 2008. *Developing a Speech Synthesizer for Amharic Language Using Hidden Markov Model (PhD Thesis)*. Addis Ababa University.
- Black, A.W., 2019. CMU Wilderness Multilingual Speech Dataset. In: *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. pp. 5971–5975.
- Boco, C.A.C.Y., Dagba, T.K., 2022. An End to End Bilingual TTS System for Fongbe and Yoruba. In: *Conference on Computational Collective Intelligence Technologies and Applications*. Springer, pp. 294–304.
- Capo, H.B., 1990. Towards a viable orthography for Egungbe. *Afr. Lang. Cult.* 3, 109–125.
- Capo, H.B.C., 2010. *A comparative phonology of Gbe*. Walter de Gruyter. 14th ed.
- Dagba, T.K., Aoga, J.O., Fanou, C.C., 2016. Design of a Yoruba Language Speech Corpus for the Purposes of Text-to-Speech (TTS) Synthesis. In: *Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*. Springer, pp. 161–169.
- Dagba, T.K., Boco, C., 2014. A Text To Speech system for Fon language using Multisyn algorithm. *Procedia Comput. Sci.* 35, 447–455.
- Eberhard, D.M., Simons, G.F., Fennig, C.D., 2022. *Ethnologue: Languages of the World*. Twenty-fifth edition, 25th ed. Dallas, Texas: SIL International . Online version: <http://www.ethnologue.com>, last accessed 2022-06-01.
- Gutkin, A., Demirşahin, I., Kjartansson, O., Rivera, C., Tübdösún, K., 2020. Developing an Open-Source Corpus of Yoruba Speech. In: *Proceedings of Interspeech 2020*. International Speech and Communication Association (ISCA), Shanghai, China, pp. 404–408.
- Hassana, I.L., SANUSI, M., 2019. Text to Speech Synthesis System in Yoruba Language. *Int. J. Adv. Sci. Res. Eng.* 5, 180–191.
- Ito, K., Johnson, L., 2017. The Ij Speech Dataset. 2017. <https://keithito.com/IJ-Speech-Dataset>; last accessed 2022-06-01.
- Kasie, E.B., Assabie, Y., 2012. Concatenative speech synthesis for Amharic using unit selection method. In: *Proc. International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems*. pp. 27–31.

- Kayte, S., Mundada, M., Gujrathi, J., 2015. Hidden Markov model based speech synthesis: A review. *Int. J. Comput. Appl.* 130, 35–39.
- Khan, R.A., Chitode, J.S., 2016. Concatenative speech synthesis: A Review. *Int. J. Comput. Appl.* 136, 1–6.
- Kluge, A., 2007. The Gbe language continuum of West Africa: a synchronic typological approach to prioritizing in-depth sociolinguistic research on literature extensibility. *Lang. Doc. Conserv.* 1, 216–239.
- Kumar, K., Kumar, R., de Boissiere, T., Gestin, L., Teoh, W.Z., Sotelo, J., de Brébisson, A., Bengio, Y., Courville, A.C., 2019. Melgan: Generative adversarial networks for conditional waveform synthesis. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 32.
- Laleye, F.A., Besacier, L., Ezin, E.C., Motamed, C., 2016. First automatic fonibe continuous speech recognition system: Development of acoustic models and language models. In: 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS). IEEE, pp. 477–482.
- McAuliffe, M., Socolof, M., Mihuc, S., Wagner, M., Sonderegger, M., 2017. Montreal Forced Aligner: Trainable Text-Speech Alignment Using Kaldi. In: *Interspeech*. pp. 498–502.
- Meyer, J., Adelani, D., Casanova, E., Öktem, A., Whitenack, D., Weber, J., KABENAMUALU, S.K., Salesky, E., Orife, I., Leong, C., Ogayo, P., Emezue, C.C., Mukiibi, J., Osei, S., AGBOLO, A., Akinode, V., Opoku, B., Samuel, O., Alabi, J., Muhammad, S.H., 2022. BibleTTS: a large, high-fidelity, multilingual, and uniquely African speech corpus. In: *Proc. Interspeech 2022*. pp. 2383–2387.
- Nazir, O., Malik, A., 2021. Deep Learning End to End Speech Synthesis: A Review. In: 2021 2nd International Conference on Secure Cyber Computing and Communications (ICSCCC). pp. 66–71.
- Nthite, T., Tsoeu, M., 2020. End-to-End Text-To-Speech synthesis for under resourced South African languages. In: 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference. IEEE, pp. 1–6.
- Ogayo, P., Neubig, G., Black, A.W., 2022. Building African Voices. In: *Proc. Interspeech 2022*. pp. 1263–1267.
- Ren, Y., Hu, C., Tan, X., Qin, T., Zhao, S., Zhao, Z., Liu, T.-Y., 2021. FastSpeech 2: Fast and High-Quality End-to-End Text to Speech. In: *International Conference on Learning Representations*.
- Rono, K.K., Maina, C.W., Mwangi, E., 2023. Development of a Kiswahili Text-to-Speech System Based on Tacotron 2 and WaveNet Vocoder. *SSRG Int. J. Electr. Electron. Eng.* 10, 75–83.
- Shen, J., Pang, R., Weiss, R.J., Schuster, M., Jaitly, N., Yang, Z., Chen, Z., Zhang, Y., Wang, Y., Skerrv-Ryan, R., others, 2018. Natural tts synthesis by conditioning wavenet on mel spectrogram predictions. In: 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, pp. 4779–4783.
- Zhang, X., Wang, J., Cheng, N., Xiao, J., 2022. Semi-Supervised Learning Based on Reference Model for Low-resource TTS. 2022 18th Int. Conf. Mobil. Sens. Netw. MSN 966–971.

CONTROLLABILITY OF AN INTEGRO-DIFFERENTIAL SYSTEM GOVERNING THE EVOLUTION OF A VISCOELASTIC BODY

PASCAL H. ZINSOU* AND GUY DEGLA

Article type: Research Article

(Received xx July 202x, Revised: xx October 202x, Accepted: xx June 202x)

(Communicated by)

ABSTRACT. In this work, we give sufficient conditions that ensure the controllability of an integro-differential system governing the evolution of a viscoelastic body, by proving that its linear homogeneous part admits a resolvent operator in Grimmer sense and by using the noncompactness measure and Mönch fixed-point theorem. This result generalizes the work of S. Nicaise and C. Pignotti and constitutes a contribution to the solvability of some models with memory in electromechanical fluid, electro-rheological, finance and biology.

Keywords: Controllability; Integro-differential; Viscoelasticity; Resolvent operator; Mönch fixed-point theorem

2020 MSC: Primary 93B05, 93C23, 35C99, 34B10, 47H10.

1. Introduction

Several mathematical models that come from physics (viscoelastic motion) lead to the study of partial differential equations (PDEs) and sometimes evolution equations allowing mathematicians to describe the behavior of a quantity that depends on several variables [7–9, 24]. We consider the controllability of the solution of the equations of linear viscoelasticity at large time. The simplest model is provided by the one-dimensional inhomogeneous case

$$(1) \quad \begin{aligned} \rho v_{tt}(t, x) &= cv_{xx}(t, x) - \int_{-\infty}^t j(t - \tau)v_{xx}(\tau, x)d\tau \\ &+ \mu_1 v_t(t, x) + \mu_2 v_t(t - s, x), \end{aligned}$$

where ρ, c are positive constants, μ_1, μ_2 are real numbers, b is independent from x and integrable, $v(t, x)$ has been assigned to (t, x) in $[0, +\infty[\times [0, \pi]$ and $v_{xx} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$.

The special inhomogeneous model describing this phenomenon is a variant of the homogeneous model (1) with an additional inhomogeneous external force $l(t, \epsilon)$ (in the second member) and the following parameter values : $c = 1$, $\mu_1 = -\alpha$, $\mu_2 = 0$, and some initial condition;

*Corresponding author, ORCID: 0000-0002-7026-8630,

e-mail: hinpascal51@gmail.com

DOI: 10.xxxxx/jmmrc.2021.yyyyy.zzzz

© the Author(s)

How to cite: P.H. Zinsou and G. Degla, *Title Controllability of an integro-differential system governing the evolution of a viscoelastic body*,

that is :

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}(t, \epsilon) + \alpha \frac{\partial v}{\partial t}(t, \epsilon) = \frac{\partial^2 v}{\partial \epsilon^2}(t, \epsilon) - \int_0^t j(t-s) \frac{\partial^2 v}{\partial \epsilon^2}(s, \epsilon) ds + l(t, \epsilon), \\ (t, \epsilon) \in [0, b] \times [0, 1], \\ \frac{\partial v(0, \epsilon)}{\partial t} = v_1(\epsilon) \text{ and } \frac{\partial v(0, \epsilon)}{\partial \epsilon} = v_2(\epsilon). \end{cases}$$

Kirane and Houari [14] studied this equation with suitable initial boundary value conditions with $\rho = 1$ and $c = 1$. Nicaise and Pignotti [17] studied this equation with conditions $\rho = 1$, $c = 1$ and $j = 0$.

In this paper, we prove the controllability of the solution with conditions $\rho > 0$, $c = 1$ and j is a positive nonincreasing C^1 and integrable function.

Several authors have studied the controllability problem of nonlinear systems described by functional integro-differential equations in infinite dimensional Banach spaces. In [21], R. Grimmer proved the existence and uniqueness of resolvent operators for this system under suitable conditions. In [10], Desch. W., R. Grimmer and W. Schappacher proved the equivalence of the compactness of the resolvent operator and that of the operator semigroup.

The mathematical model of viscoelasticity aims to take into the behaviour of those materials whose mechanical behaviour is determined not only by the present but also its past history. Since then a wide variety of results and applications have been obtained in many different fields. In [23] synthetic tissues which mimic human bones are investigated, while in [20] cardiological tissues are considered. Besides a model of apples regarded as viscoelastic bodies is studied in [1, 4–6, 16].

The present investigation concerns viscolastic bodies and their mechanical behaviour aiming to widen the range of applicative cases the theory can be applied.

The organization of this work is as follows : In section 2, we present the model, some definitions and results. In section 3, the controllability result for equation (1) is given.

2. Mathematical model

Let us set

$$x = \frac{\partial v}{\partial \epsilon} \text{ and } y = \frac{\partial v}{\partial t}.$$

Then we have :

$$(2) \quad \begin{aligned} \begin{bmatrix} x'(t) \\ y'(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & \partial_\epsilon \\ \frac{\partial_\epsilon}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \int_0^t \begin{bmatrix} j(t-s) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} ds \right\} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\alpha}{\rho} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l(t)}{\rho} \end{bmatrix}, t \geq 0. \end{aligned}$$

$$(3) \quad \begin{aligned} u(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & \partial_\epsilon \\ \frac{\partial_\epsilon}{\rho} & 0 \end{bmatrix}, \quad E(t) = \begin{bmatrix} j(t) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ F &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\alpha}{\rho} \end{bmatrix}, \quad \text{and } q(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l(t)}{\rho} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

we can rewrite the equation (2) into the following abstract form which is equivalent to (1)

$$(4) \quad \begin{cases} u'(t) = A \left[u(t) + \int_0^t E(t-s)u(s)ds \right] + Fu(t) + q(t) & \text{for } t \geq 0, \\ u(0) = u_0 \end{cases}$$

This operator A is unbounded, while F and $E(t)$ are bounded operators for any $t \geq 0$ on a Banach space X . If $AE(t) = E(t)A$, then we have the following system :

$$(5) \quad \begin{cases} u'(t) = Au(t) + \int_0^t E(t-s)Au(s)ds + Fu(t) + q(t) & \text{for } t \geq 0, \\ u(0) = u_0 \end{cases}$$

This equation (5) has been studied in [11].

Let X be a Banach space. Let us consider the following nonlocal model that generalizes (5) :

$$(6) \quad \begin{cases} \begin{aligned} u'(t) &= Au(t) + \int_0^t D(t-s)u(s)ds \\ &+ g(t, u(t)) + q(t) \end{aligned} & \text{for } t \in I = [0, b], \\ u(0) &= u_0 + f(u) \end{cases}$$

where $u_0 \in X$, $f : \mathcal{C}(I, X) \rightarrow X$ and $g : I \times X \rightarrow X$ are functions satisfying some conditions; $A : \mathcal{D}(A) \rightarrow X$ is the infinitesimal generator of a C_0 -semigroup $(T(t))_{t \geq 0}$ on X ; for $t \geq 0$, $D(t)$ is a closed linear operator with domain $\mathcal{D}(D(t)) \supset \mathcal{D}(A)$. The control q belongs to $L^2(I, U)$ which is a Banach space of admissible controls, where U is a Banach space and $\mathcal{C}(I, X)$ denotes the Banach space of continuous functions $u : I \rightarrow X$ with supremum norm $\|u\|_\infty = \sup_{t \in I} \|u(t)\|_X$ see [12].

We now introduce some definitions and lemmas that will be used throughout the section.

A measurable function $u : I \rightarrow X$ is Bochner integrable if and only if $\|u\|$ is Lebesgue integrable. We denote by $L^1_B(I, X)$ the Banach space of functions $u : I \rightarrow X$ which are Bochner integrable and

$$\|u\|_{L^1} = \int_0^b \|u(t)\| dt.$$

We consider the following linear homogeneous equation:

$$(7) \quad \begin{cases} u'(t) = Au(t) + \int_0^t D(t-s)u(s)ds & \text{for } t \geq 0 \\ u(0) = u_0 \in X. \end{cases}$$

where A and $D(t)$ are closed linear operators on a Banach space X .

We assume that A and $(D(t))_{t \geq 0}$ satisfy the following conditions:

(H₁) A is a densely defined closed linear operator in X . Hence $\mathcal{D}(A)$ is a Banach space equipped with the graph norm defined by $|z| = \|Az\| + \|z\|$, which will be denoted by $(Z, |\cdot|)$.

(H₂) $(D(t))_{t \geq 0}$ is a family of linear operators on X such that $D(t)$ is continuous when regarded as a linear map from $(Z, |\cdot|)$ into $(X, \|\cdot\|)$ for almost all $t > 0$, the map $t \mapsto D(t)z$ is measurable for all $z \in Z$ and belongs to $W^{1,1}(\mathbb{R}^+, X)$. Moreover, there is a locally integrable function $g : \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+$ such that

$$\|D(t)z\| \leq g(t)|z| \quad \text{and} \quad \left\| \frac{d}{dt} D(t)z \right\| \leq g(t)|z|.$$

Remark 1. Note that **(H₂)** is satisfied in the study of modelling heat conduction in materials with memory and viscosity. More details can be found in [15].

Definition 2.1. (see e.g., [13]). A resolvent operator for equation (4.2) is a family $(S(t))_{t \geq 0}$ of bounded linear operator valued functions

$$S : [0, +\infty) \longrightarrow \mathcal{B}(X)$$

such that

- (i) $S(0) = Id_X$ and $\|S(t)\| \leq Ne^{\alpha t}$ for some constants N and α .
- (ii) For all $u \in X$, the map $t \mapsto S(t)u$ is continuous for $t \geq 0$.
- (iii) Moreover, for $u \in Y$, $S(\cdot)u \in \mathcal{C}^1(I; X) \cap \mathcal{C}(I; Y)$ and

$$(8) \quad \begin{aligned} S'(t)u &= AS(t)u + \int_0^t D(t-s)S(s)uds \\ &= S(t)Au + \int_0^t S(t-s)D(s)uds. \end{aligned}$$

We observe that the map defined on I by $t \mapsto S(t)u_0$ solves equation (7) for $u_0 \in \mathcal{D}(A)$.

We have the following system :

$$(9) \quad \begin{cases} u'(t) = Au(t) + \int_0^t [D_1(t-s) + D_2(t-s)]u(s)ds & \text{for } t > 0, \\ u(0) = u_0 \in X, \end{cases}$$

where $D_1(t)$ and $D_2(t)$ are closed linear operators in X and satisfy **(H₂)**. Then we have the following Lemma coming from [10].

Lemma 2.1. (Perturbation result) ([10]). We Suppose that A satisfies (\mathbf{H}_1) and $(D_1(t))_{t \geq 0}$ and $(D_2(t))_{t \geq 0}$ satisfy (\mathbf{H}_2) . Let $(S_{D_1}(t))_{t \geq 0}$ be a resolvent operator of equation (7) and $(\bar{S}_{D_1+D_2}(t))_{t \geq 0}$ be a resolvent operator of equation (9). Then

$$S_{D_1+D_2}(t)u - S_{D_1}(t)u = \int_0^t S_{D_1}(t-s)P(s)uds$$

where the operator P is defined by

$$P(t)u = \int_0^t D_2'(t-s) \int_0^s S_{D_1+D_2}(\tau)ud\tau ds + D_2(0) \int_0^t S_{D_1+D_2}(s)uds$$

P is uniformly bounded on bounded intervals, and for each $u \in X, P(\cdot)u$ belongs to $\mathcal{C}([0, \infty), X)$.

Based on this and the following corollary from ([10], p. 224), we prove the operator-norm continuity of the resolvent operator $(S(t))_{t \geq 0}$ for $t > 0$.

Proposition 2.1. [10]. Let A be a closed, densely defined linear operator in X , $D(t) = 0$ for all $t \geq 0$, and $(S(t))_{t \geq 0}$ be a resolvent operator for equation (7). Then $(S(t))_{t \geq 0}$ is a C_0 -semi-group with infinitesimal generator A .

Theorem 2.2. [10] Let A be the infinitesimal generator of a C_0 -semi-group $(T(t))_{t \geq 0}$ and let $(D(t))_{t > 0}$ satisfy (\mathbf{H}_2) . Then the resolvent operator $(S(t))_{t > 0}$ for equation (7) is operator-norm continuous (or continuous in the uniform operator topology) for $t > 0$ if and only if $(T(t))_{t \geq 0}$ is operator-norm continuous for $t > 0$.

Definition 2.2. A mild solution of equation (4.6) is a function $u \in \mathcal{C}(I, X)$ such that,

$$u(t) = S(t) [u_0 + f(u)] + \int_0^t S(t-s)[g(s, u(s)) + q(s)]ds \quad \text{for } t \in I.$$

Definition 2.3. Equation (6) is said to be controllable on the interval I if for every $u_0, u_1 \in X$, there exist a control $q \in L^2(I, U)$ and a mild solution u of equation (6) satisfying the condition $u(b) = u_1$.

In order to use the Hausdorff measure of noncompactness, we recall some properties related to this concept.

Definition 2.4. ([10]) Let B be a bounded subset of a normed space Z . The Hausdorff measure of noncompactness (shortly MNC) is defined by

$$\beta(B) = \inf\{\epsilon > 0 : B \text{ has a finite cover by balls of radius less than } \epsilon\}.$$

Theorem 2.3. ([10]) Let B, B_1, B_2 be bounded subsets of a Banach space Z . The Hausdorff MNC has the following properties:

- (i) If $B_1 \subset B_2$, then $\beta(B_1) \leq \beta(B_2)$, (monotonicity).
- (ii) $\beta(B) = \beta(\bar{B})$.
- (iii) $\beta(B) = 0$ if and only if B is relatively compact.
- (iv) $\beta(\lambda B) = |\lambda|\beta(B)$ for any $\lambda \in \mathbb{R}$, (Homogeneity)
- (v) $\beta(B_1 + B_2) \leq \beta(B_1) + \beta(B_2)$, where $B_1 + B_2 = \{d_1 + d_2 : d_1 \in B_1, d_2 \in B_2\}$, (subadditivity)
- (vi) $\beta(\{a\} \cup B) = \beta(B)$ for every $a \in Z$.
- (vii) $\beta(B) = \beta(\overline{\text{co}}(B))$, where $\overline{\text{co}}(B)$ is the closed convex hull of B .
- (viii) For any map $E : \mathcal{D}(B) \subseteq X \rightarrow Z$ which is Lipschitz continuous with a Lipschitz constant k , we have

$$\beta(E(B)) \leq k\beta(B)$$

for any subset $B \subseteq \mathcal{D}(E)$.

Lemma 2.4. ([25]). If $(q_n)_{n \geq 1}$ is a sequence of Bochner integrable functions from I into a Banach space Z with the estimation $\|q_n(t)\| \leq \mu(t)$ for almost all $t \in I$ and every $n \geq 1$; where $\mu \in L^1(I, \mathbb{R})$, then the function

$$\psi(t) = \beta(\{q_n(t) : n \geq 1\})$$

belongs to $L^1(I, \mathbb{R})$ and satisfies the following bound

$$\beta\left(\left\{\int_0^b q_n(s)ds : n \geq 1\right\}\right) \leq 2 \int_0^b \psi(s)ds$$

Lemma 2.5. [12]. Let Z be a Banach space and $(T_n)_{n \geq 1}$ be a sequence of bounded linear maps on Z converging pointwise to $T \in \mathcal{B}(Z)$. Then for any compact set K in Z , T_n converges to T uniformly in K , namely,

$$\sup_{x \in K} \|T_n(x) - T(x)\| \rightarrow 0, \text{ as } n \rightarrow +\infty$$

To end this section, we recall a nonlinear alternative of Mönch’s type for non selfmaps.

Theorem 2.6. [10] (Mönch, 1980). Let G be an open neighborhood of the origin in a Banach space Z . Suppose that $F : \bar{G} \rightarrow Z$ is a continuous map which satisfies the following conditions:

- (i) $D \subset \bar{G}$ countable and $D \subseteq \overline{\text{co}}(\{0\} \cup F(D)) \implies \bar{D}$ is compact.
- (ii) $F(x) \neq \lambda x$ for all $x \in \partial G$ and $\lambda > 1$, (Leray-Schauder condition).

Then F has a fixed point.

We now state the following nonlinear alternative of Mönch’s type for selfmaps, which we shall use in the proof of the controllability of equation (6).

Theorem 2.7. [10] (Mönch, 1980). Let \mathcal{K} be a closed and convex subset of a Banach space Z and $0 \in \mathcal{K}$. Assume that $F : \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K}$, is a continuous map which satisfies Mönch’s condition, namely, if $D \subseteq \mathcal{K}$ is countable and $D \subseteq \overline{\text{co}}(\{0\} \cup F(D))$, then \bar{D} is compact. Then F has a fixed point.

Corollary 15 [12]. Let \mathcal{K} be a closed, convex and bounded subset of a Banach space Z and 0 be an interior point of \mathcal{K} . Assume that $F : \mathcal{K} \rightarrow \mathcal{K}$ is a continuous map which satisfies Mönch’s condition. Then F has a fixed point. We observe that in the statements of Mönch’s Theorem for non selfmaps in [25] and [22], the key Leray-Schauder boundary condition is missing.

3. Controllability Result

We consider the following hypotheses.

(H₃) The linear operator $W : L^2(I, U) \rightarrow X$ satisfies the following condition:

(i) W defined by

$$Wq = \int_0^b R(b - s)q(s)ds$$

is surjective so that it induces an isomorphism between $L^2(I, U)/\text{Ker}W$ and X again denoted by W with inverse W^{-1} taking values in $L^2(I, U)/\text{Ker}W$.

(ii) There exists a function $L_W \in L^1(I, \mathbb{R}^+)$ such that for any bounded set $Q \subset X$ we have

$$\beta((W^{-1}Q)(t)) \leq L_W(t)\beta(Q)$$

where β is the Hausdorff MNC.

(H₄) The function $g : I \times X \rightarrow X$ satisfies the following conditions:

(i) $g(\cdot, u)$ is measurable for $u \in X$ and $g(t, \cdot)$ is continuous for a.e $t \in I$.

(ii) There exist a function $L_g \in L^1(I, \mathbb{R}^+)$ and a nondecreasing continuous function $\phi : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ such that

$$\|g(t, u)\| \leq L_g(t)\phi(\|u\|) \text{ for } u \in X, \quad t \in I \text{ and } \liminf_{r \rightarrow +\infty} \frac{\phi(r)}{r} = 0.$$

(iii) There exists a function $h \in L^1(I, \mathbb{R}^+)$ such that for any bounded set $V \subset X$,

$$\beta(g(t, V)) \leq h(t)\beta(V) \text{ for } \quad \text{a.e } t \in I$$

where β is the Hausdorff MNC.

(H₅) $f : \mathcal{C}(I, X) \rightarrow X$ is continuous, compact and satisfies $\liminf_{r \rightarrow +\infty} \frac{f_r}{r} = 0$, where

$$f_r = \sup\{\|f(u)\| : \|u\| \leq r\}$$

Theorem 3.1. Suppose the equation (4.7) has a resolvent operator $(S(t))_{t>0}$ which is continuous in the operator-norm topology for $t > 0$ and hypotheses (\mathbf{H}_3) – (\mathbf{H}_5) are satisfied. Then equation (4.6) is controllable on I , provided that

$$\gamma = (1 + 2M_1 \|L_W\|_{L^1}) (2M_1 \|l\|_{L^1}) < 1$$

where $M_1 = \sup_{0 \leq t \leq b} \|S(t)\|$.

Proof. Note that $M_1 < +\infty$ according to the exponential growth of the resolvent operator $(S(t))_{t \geq 0}$. Using (\mathbf{H}_3) we define the control q_u by

$$q_u(t) = W^{-1} \left(u_1 - S(b) [u_0 + f(u)] - \int_0^b S(b-s)g(s, u(s))ds \right) (t) \quad \text{for } t \in I,$$

for an arbitrarily given function $u \in \mathcal{C}(I, X)$.

Using this control, we shall show that the operator $K : \mathcal{C}(I, X) \rightarrow \mathcal{C}(I, X)$ defined by

$$(Ku)(t) = S(t) [u_0 + f(u)] + \int_0^t S(t-s) [g(s, u(s)) + q_u(s)] ds$$

has a fixed point u which is just a mild solution of the equation (6). Observe that $(Ku)(b) = u_1$ and so the control q_u steers the integro-differential equation from u_0 to u_1 in time b . This means that equation (6) is controllable on I .

For each positive r , let $B_r = \{u \in \mathcal{C}(I, X) : \|u\|_\infty \leq r\}$. We shall prove the above theorem through the following steps.

Step 1. We claim that there exists $r > 0$ such that $K(B_r) \subset B_r$.

Suppose on the contrary that this is not true. Then for each positive r , there exists a function $u_r \in B_r$, such that $K(u_r) \notin B_r$, i.e., $\|(Ku_r)(\tau)\| > r$, for some $\tau = \tau(r) \in I$. Now

$$(*) \quad \frac{\|(Ku_r)(\tau)\|}{r} > 1 \text{ that implies that } \liminf_{r \rightarrow +\infty} \frac{\|(Ku_r)(\tau)\|}{r} \geq 1.$$

On the other hand, let $M_2 = \|W^{-1}\|$. We have

$$\begin{aligned} \|(Ku_r)(\tau)\| &\leq M_1 \|u_0\| + M_1 \|f(u_r)\| + M_1 \int_0^b \|g(s, u_r(s))\| ds \\ &\quad + bM_1M_2 (\|u_1\| + M_1 \|u_0\|) \\ &\quad + bM_1M_2 \left(M_1 \|f(u_r)\| + M_1 \int_0^b \|g(s, u_r(s))\| ds \right) \\ &\leq M_1 \|u_0\| + M_1 f_r + M_1 \phi(r) \|L_g\|_{L^1} \\ &\quad + bM_1M_2 (\|u_1\| + M_1 \|u_0\|) \\ &\quad + bM_1M_2 (M_1 f_r + M_1 \phi(r) \|L_g\|_{L^1}) \\ &\leq w_r := (1 + bM_1M_2) M_1 \|u_0\| + (1 + bM_1M_2) M_1 f_r \\ &\quad + (1 + bM_1M_2) M_1 \|L_g\|_{L^1} \phi(r) + bM_1M_2 \|u_1\|. \end{aligned}$$

Since

$$\liminf_{r \rightarrow +\infty} \frac{w_r}{r} = 0 = \liminf_{r \rightarrow +\infty} \frac{f_r}{r}$$

then we get

$$\liminf_{r \rightarrow +\infty} \frac{\|(Ku_r)(\tau)\|}{r} = 0$$

This is clearly a contradiction to (*). Consequently, there exists $r > 0$ such that $K(B_r) \subset B_r$

Step 2. The operator K is continuous on B_r . To see this, let $(u_n)_{n \geq 1} \subset B_r$ be such that $u_n \rightarrow x$ in B_r . Set

$$(K_1u)(t) := S(t)[u_0 + f(u)] \text{ and}$$

$$(K_2u)(t) := \int_0^t S(t-s)[g(s, u(s)) + q_u(s)] ds \text{ for } t \in I,$$

then $K = K_1 + K_2$.

Therefore, since f is continuous, we obtain

$$\|K_1u_n - K_1u\| \leq M_1 \|f(u_n) - f(u)\| \rightarrow 0, \text{ as } n \rightarrow +\infty.$$

For the proof of the continuity of K_2 , we set

$F_n(s) = g(s, u_n(s))$ for every n and a.e. s , and $F(s) = g(s, u(s))$ for a.e. s .

Therefore, by $(\mathbf{H}_4) - (i)$, $F_n(s) \rightarrow F(s)$ and by $(\mathbf{H}_4) - (ii)$,

$$\|F_n(s)\| = \|g(s, u_n(s))\| \leq L_g(s)\phi(\|u_n\|) \leq \phi(r)L_g(s)$$

for every n and a.e. s .

It follows from the Lebesgue dominated convergence theorem that

$$\int_0^t \|F_n(s) - F(s)\| ds \rightarrow 0, \text{ as } n \rightarrow +\infty, t \in I$$

Moreover, we have

$$\|K_2u_n - K_2u\| \leq M_1 \int_0^t \|F_n(s) - F(s)\| ds + M_1 b^{\frac{1}{2}} \|q_{u_n} - q_u\|_{L^2(I,U)},$$

where

$$\|q_{u_n} - q_u\|_{L^2(I,U)} \leq M_2 \left(M_1 \|f(u_n) - f(u)\| + M_1 \int_0^b \|F_n(s) - F(s)\| ds \right).$$

Thus it follows that $\|K_2x_n - K_2x\| \rightarrow 0$ as $n \rightarrow +\infty$, showing that K_2 is continuous on B_r . Hence K is continuous on B_r .

Step 3. The Mönch condition holds.

Suppose that $V \subseteq B_r$ is countable and $V \subseteq \overline{co}(\{0\} \cup K(V))$. We have to show that V is relatively compact. To this end, it suffices to show that $\beta(V) = 0$, where β is the Hausdorff MNC. Since V is countable, we can describe it as $V = \{u_n\}_{n \geq 1}$. Therefore, $K(V) = \{Ku_n\}_{n \geq 1}(t)$ and its relative compactness implies that V is also relatively compact. So we have to prove that $K(V)$ is equibounded and equicontinuous on I in order to use Ascoli-Arzelà's theorem. We show that $K(V)$ is equicontinuous. Let $y \in K(V)$, and $0 \leq t_1 < t_2 \leq b$. There exists $u \in V$ such that $y = Ku$ and

$$\begin{aligned} \|y(t_2) - y(t_1)\| &\leq \|S(t_2)u_0 - S(t_1)u_0\| + \|S(t_2)f(u) - S(t_1)f(u)\| \\ &\quad + \left\| \int_0^{t_2} S(t_2 - s)g(s, u(s))ds - \int_0^{t_1} S(t_1 - s)g(s, u(s))ds \right\| \\ &\quad + \left\| \int_0^{t_2} S(t_2 - s)q_u(s)ds - \int_0^{t_1} S(t_1 - s)q_u(s)ds \right\|. \end{aligned}$$

Firstly assume that $t_1 > 0$. By (ii) of definition 2, the first term on the right hand side tends to 0 as $|t_2 - t_1| \rightarrow 0$. That is

$$\|S(t_2)u_0 - S(t_1)u_0\| \rightarrow 0 \text{ as } |t_2 - t_1| \rightarrow 0.$$

Moreover, we have :

$$\begin{aligned} \|S(t_2)f(u) - S(t_1)f(u)\| &\leq \|S(t_2) - S(t_1)\| \|f(u)\| \\ &\leq \|S(t_2) - S(t_1)\| f_r, \end{aligned}$$

where $f_r = \sup\{\|f(u)\| : \|u\| \leq r\}$. Moreover, $\|S(t_2) - S(t_1)\| \rightarrow 0$ as $|t_2 - t_1| \rightarrow 0$, by the continuity of $(S(t))_{t>0}$ for $t > 0$ in the operator-norm topology.

Now let $t_1 = 0$. Since $\overline{f(B_r)}$ is compact, then we have

$$\|S(h)f(u) - f(u)\| \leq \sup_{y \in \overline{f(B_r)}} \|S(h)y - y\| \rightarrow 0,$$

as $h \rightarrow 0^+$.

Therefore, $\|S(t_2)f(u) - S(t_1)f(u)\| \rightarrow 0$ as $t_2 \rightarrow t_1$.

Now we have

$$\begin{aligned} & \left\| \int_0^{t_2} S(t_2 - s) g(s, u(s)) ds - \int_0^{t_1} S(t_1 - s) g(s, u(s)) ds \right\| \\ & \leq M_1 \int_{t_1}^{t_2} \|g(s, u(s))\| ds \\ & + \int_0^{t_1} \|S(t_2 - s) - S(t_1 - s)\| \|g(s, u(s))\| ds \\ & \leq M_1 \phi(r) \int_{t_1}^{t_2} L_g(s) ds \\ & + \phi(r) \int_0^{t_1} \|S(t_2 - s) - S(t_1 - s)\| L_g(s) ds. \end{aligned}$$

The right hand side tends to 0 as $t_2 \rightarrow t_1$ by the Lebesgue dominated convergence theorem, showing that the family $\left\{ \int_0^t S(t - s)g(s, u(s))ds, u \in D \right\}$ is equicontinuous. Moreover,

$$\begin{aligned} & \left\| \int_0^{t_2} S(t_2 - s) q_u(s) ds - \int_0^{t_1} S(t_1 - s) q_u(s) ds \right\| \\ & \leq M_1 \int_{t_1}^{t_2} \|q_u(s)\| ds \\ & + \int_0^{t_1} \|S(t_2 - s) - S(t_1 - s)\| \|q_u(s)\| ds \\ & \leq M_2 [\|u_1\| + M_1 (\|u_0\| + f_r) + M_1 \phi(r) \|L_g\|_{L^1}] \\ & \left[M_1 (t_2 - t_1) + \int_0^{t_1} \|S(t_2 - s) - S(t_1 - s)\| ds \right] \end{aligned}$$

and the right hand side tends to 0 as $t_2 \rightarrow t_1$. Therefore, the family

$$\left\{ \int_0^t S(t - s)q_u(s)ds; u \in D \right\}$$

is equicontinuous and the set $K(V)$ is equicontinuous on I .

We prove that $K(V)$ is equibounded. To do this, we show that for all $t \in [0, b]$, the set $\{K(u)(t); u \in V\}$ is relatively compact. We achieve this using the measure of noncompactness. For $t = 0$, the set

$$\{(Ku)(0); u \in V\} = \{u_0 + f(u); u \in V\} = u_0 + f(V)$$

is relatively compact in X . Since f is compact, then $\overline{f(V)}$ is compact also. For $t \in (0, b]$, we have

$$\rho \left(\{(K_1 u_n)(t)\}_{n \geq 1} \right) \leq \rho \left(\{S(t)(u_0 + f(u_n))\}_{n \geq 1} \right) = 0$$

by the compactness of f . Also, by (\mathbf{H}_3) -(ii) we obtain

$$\begin{aligned}
 & \rho \left(\{q_{u_n(t)}\}_{n \geq 1} (t) \right) \\
 &= \rho \left(W^{-1} \left\{ u_1 - S(b) (u_0 + f (u_n)) - \int_0^b S(t-s)g (s, u_n(s)) ds \right\}_{n \geq 1} (t) \right) \\
 &\leq L_W(t) \rho \left(\left\{ u_1 - S(b) (u_0 + f (u_n)) - \int_0^b S(t-s)g (s, u_n(s)) ds \right\}_{n \geq 1} (t) \right) \\
 &\leq L_W(t) \rho \left(\{u_1 - S(b) (u_0 + f (u_n))\}_{n \geq 1} (t) \right) \\
 &+ L_W(t) \rho \left(\left\{ \int_0^b S(t-s)g (s, u_n(s)) ds \right\}_{n \geq 1} (t) \right).
 \end{aligned}$$

By Lemma 4.1.2 and **(H₄)**-(iii), we deduce that

$$\begin{aligned}
 \rho \left(\{q_{u_n(t)}\}_{n \geq 1} (t) \right) &\leq 2M_1 L_W(t) \left(\int_0^b h(s) ds \right) \rho \left(\{u_n(s)\}_{n \geq 1} (t) \right) \\
 &\leq 2M_1 L_W(t) \left(\int_0^b h(s) ds \right) \beta(V(t)).
 \end{aligned}$$

Moreover,

$$\begin{aligned}
 & \rho \left(\{(K_2 u_n) (t)\}_{n \geq 1} \right) \\
 &= \rho \left(\left\{ \int_0^t S(t-s)g (s, u_n(s)) ds + \int_0^t S(t-s)q_{u_n}(s) ds \right\}_{n \geq 1} (t) \right) \\
 &\leq 2M_1 \left(\int_0^b h(s) ds \right) \beta(V(t)) \\
 &+ 2M_1 \left(\int_0^b L_W(s) ds \right) 2M_1 \left(\int_0^b h(s) ds \right) \beta(V(t)) \\
 &\leq 2M_1 \|h\|_{L^1} \beta(V(t)) + 2M_1 \|L_W\|_{L^1} 2M_1 \|h\|_{L^1} \beta(V(t)) \\
 &\leq (1 + 2M_1 \|L_W\|_{L^1}) (2M_1 \|h\|_{L^1}) \beta(V(t)).
 \end{aligned}$$

Finally

$$\begin{aligned}
 \beta(K(V)(t)) &\leq \beta (K_1(V)(t)) + \beta (K_2(V)(t)) \\
 &\leq (1 + 2M_1 \|L_W\|_{L^1}) (2M_1 \|h\|_{L^1}) \beta(V(t)).
 \end{aligned}$$

It means that $\beta(K(V(t))) \leq \gamma \beta(V(t))$. From Mönch's condition, we obtain

$$\beta(V(t)) \leq \beta(\overline{c\bar{o}}(\{0\} \cup K(V(t)))) = \beta(K(V(t))) \leq \gamma\beta(V(t))$$

This implies that $\beta(V(t)) = 0$, since $\gamma < 1$ and therefore, $\beta(K(V)(t)) = 0$. This shows that $\overline{K(V)(t)}$ is compact, that is $\overline{\{K(u)(t); u \in V\}}$ is compact as desired. So $K(V)$ is equicontinuous and equibounded and therefore, by Ascoli-Arzela's Theorem, we deduce that $K(V)$ is relatively compact.

But

$$\beta(V) \leq \beta(\overline{c\bar{o}}(\{0\} \cup K(V))) = \beta(K(V)) = 0$$

This implies that \bar{V} is compact in X as desired. Thus V is relatively compact and the Mönch condition is satisfied. Therefore, by proposition 4.1.1, K has a fixed point u in B_r , which is a mild solution of equation (6) and satisfies $u(b) = u_1$. The proof is complete.

4. EXAMPLE

We turn to an illustration of this model using the following example (see [12]).

Let Ω be a bounded domain in \mathbb{R}^n with smooth boundary. Consider the following nonlinear integro-differential equation.

$$(10) \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v(t, \xi)}{\partial t} = \Delta v(t, \xi) + \int_0^t \delta(t-s) \Delta v(s, \xi) ds \\ + \frac{e^{-t}}{k+e^t} \sin(v(t, \xi)) + a\omega(t, \xi) \quad \text{for } t \in [0, b] = I \text{ and } \xi \in \Omega, \\ v = 0 \text{ on } \partial\Omega \quad \int_{\Omega} \int_0^b \lambda(t, \xi) \log \left(1 + |v(t, \eta)|^{\frac{1}{2}} \right) dt d\eta \quad \text{for } \xi \in \Omega, \end{array} \right.$$

where $a > 0, k \geq 1, \omega : I \times \Omega \rightarrow \Omega$ is continuous in t and $\omega(t, \xi) = 0$ for all $\xi \in \partial\Omega, \lambda \in \mathcal{C}(I \times \bar{\Omega})$ and $\lambda(t, \xi) = 0$ for all $\xi \in \partial\Omega$, and $\delta \in W^{1,1}(\mathbb{R}^+, \mathbb{R})$. Let $X = U = \mathcal{C}_0(\bar{\Omega})$, the space of all continuous functions from $\bar{\Omega}$ to \mathbb{R} vanishing on the boundary. We define $A : \mathcal{D}(A) \subset X \rightarrow X$ by:

$$(11) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{D}(A) = \{v \in \mathcal{C}_0(\bar{\Omega}) \cap H_0^1(\Omega); \Delta v \in \mathcal{C}_0(\bar{\Omega})\} \\ Av = \Delta v \end{array} \right.$$

for each $v \in \mathcal{D}(A)$.

Theorem 4.1. If Ω has a \mathcal{C}^1 -boundary, then the operator A defined above is the infinitesimal generator of a C_0 -semigroup of contractions on $\mathcal{C}_0(\bar{\Omega})$.

By Theorem 54, A generates a C_0 -semigroup $(T(t))_{t \geq 0}$ of contractions on $\mathcal{C}_0(\bar{\Omega})$. Moreover, $(T(t))_{t \geq 0}$ generated by A is compact for $t > 0$ and operator-norm continuous for $t > 0$. Then by Theorem 49, the corresponding resolvent operator is operator-norm continuous. Define

$$x(t)(\xi) = v(t, \xi), \quad x'(t)(\xi) = \frac{\partial v(t, \xi)}{\partial t}$$

Let $f(t, x)(\xi) = \frac{e^{-t}}{k+e^t} \sin(x(t)(\xi))$ for $t \in I, \xi \in \Omega$ and $q = a\omega$.

Let $(B(t)x)(\xi) = \zeta(t)\Delta x(t)(\xi)$ for $t \in I, x \in \mathcal{D}(A), \xi \in \Omega$ and let $g : \mathcal{C}(I, X) \rightarrow X$ be defined by

$$g(x)(\xi) = \int_{\Omega} \int_0^b \rho(t, \xi) \log \left(1 + |x(t)(\eta)|^{\frac{1}{2}} \right) dt d\eta \quad \text{for } \xi \in \bar{\Omega} \text{ and } x \in \mathcal{C}(I, X)$$

The equation (10) can be transformed into the following form :

$$(12) \quad \begin{cases} x'(t) = Ax(t) + \int_0^t B(t-s)x(s)ds \\ + f(t, x(t)) + q(t) \quad \text{for } t \in I = [0, b], \\ x(0) = x_0 + g(x). \end{cases}$$

Then f is Lipschitz continuous with respect to its second variable and we get

$$\|f(t, x)\| \leq \frac{e^{-t}}{k+e^t} \text{ for } (t, x) \in I \times \bar{\Omega}.$$

Consequently, f satisfies $(\mathbf{H}_4) - (i), (\mathbf{H}_4)-(ii)$ and $(\mathbf{H}_4) - (iii)$, with $\phi : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ defined by $\phi(x) = 1$.

Moreover,

$$\|g(x)\|_{\mathcal{C}_0(\bar{\Omega})} \leq (b \text{ mes}(\Omega))M_{\lambda}(\|x\|)^{\frac{1}{2}}$$

where $M_{\lambda} = \max_{(t,\xi) \in I \times \bar{\Omega}} |\lambda(t, \xi)|$.

It is clear that for $g_r = \sup \{\|g(x)\| : \|x\|_{\infty} \leq r\}$, we have $\lim_{r \rightarrow +\infty} \frac{g_r}{r} = 0$.

Lemma 4.2. The map $g : \mathcal{C}(I, \mathcal{C}_0(\bar{\Omega})) \rightarrow \mathcal{C}_0(\bar{\Omega})$ defined by

$$g(x)(\xi) = \int_{\Omega} \int_0^b \lambda(t, \xi) \log \left(1 + |x(t)(\eta)|^{\frac{1}{2}} \right) dt d\eta \quad \text{for } \xi \in \bar{\Omega} \text{ and } x \in \mathcal{C}(I, X),$$

is compact.

Proof. Let $E \subset \mathcal{C}(I, \mathcal{C}_0(\bar{\Omega}))$ be bounded. Then, by computing as above, we have

$$\|g(x)\|_{\mathcal{C}_0(\bar{\Omega})} \leq (b \text{ mes}(\Omega))M_{\lambda}(\|x\|)^{\frac{1}{2}}, \text{ for all } x \in E$$

So $g(E)$ is bounded.

Now since λ is uniformly continuous on $I \times \bar{\Omega}$, it follows that $g(E)$ is equicontinuous on $\bar{\Omega}$. Therefore, by Ascoli-Arzelà's theorem, $g(E)$ is relatively compact in $\mathcal{C}_0(\bar{\Omega})$. Hence, g is compact.

By Lemma 4.3.1 g is compact and therefore, it satisfies (\mathbf{H}_5) . Now for $\xi \in \Omega$, the operator W is given by

$$(Wq)(\xi) = \int_0^1 R(1-s)a\omega(s, \xi)ds$$

Assuming that W satisfies (\mathbf{H}_3) , all conditions of Theorem 49 hold and equation (12) is controllable.

5. Conclusion

We have proved in our work, the controllability of the solution to integro differential system (1) that is motivated evolution linear viscoelasticity body. Our results coincide with conditions $\rho = 1$, $c = 1$ and $b = 0$ of Kirane, Houari, Nicaise and Pignotti.

6. Author Contributions

The results of this research are obtained with the strong contribution of all authors.

7. Funding

The authors would like to thank African Center of Excellence in Mathematical Sciences, IT and Applications (CEA-SMIA).

References

- [1] Amendola G., S. Carillo, J.M. Golden and A. Manes, Viscoelastic fluids : free energies, differential problems and asymptotic behaviour, Discrete and Continuous Dynamical Systems- Series B, vol. 19, pp.1815-1835, 2014.
- [2] Abdoulaye S., A. Heminna, and S. Nicaise, stabilization of an anisotropic thermoelasticity system with nonlinear feedback, C.R. acad. Sci. Paris, Ser. I339 (2004) 561-566.
- [3] Brezis H. Analyse fonctionnelle, Masson, 1987
- [4] Carillo S. , Valente V. and G. Vergara Caffarelli, A result of existence and uniqueness for an integro-differential system in magneto-viscoelasticity, Appllicable Analysis, vol. 90, pp. 1791-1802, 2010.
- [5] Carillo S. , V. Valente and G. Caffarelli, A linear viscoelasticity problem with a singular memory kernel : an existence and uniqueness result, Differential and Integral Equations, vol. 26, pp. 1115-1125, 2013.
- [6] Carillo S. A 3-dimensional singular kernel problem in viscoelasticity : an existence result, Atti della Accademia Peloritana dei Pericolanti, Classe di scienze Fisiche, Matematiche Naturali, vol. 97(SI), 13 pp, 2019.
- [7] Carillo S. , M. Chipot, Valente, and G. Caffarelli, A magneto-viscoelasticity problem with a singular memory kernel, Nonlinear Analysis Series B: Real world Applications, vol. 35C, pp. 200-210, 2017.
- [8] Chipot M. , I. Shafir, V. Valente, and G. Caffarelli, A nonlocal problem arising in the study of magneto-elastic interactions, Boll UMI Serie IX, I, pp. 197-222, 2008.
- [9] Chipot M. , I. Shafir, V. Valente, and G. Caffarelli, One a hyperbolic-parabolic system arising in magnetoelasticity, J. Math. Anal. App, vol. 352, pp. 120-131, 2009.
- [10] Desch W. R. Grimmer and W. Schappacher. Some considerations for linear integro-differential equations, J. Math. Anal and Appl. vol. 104, pp. 219-234, 1984.
- [11] Desch W. R. Grimmer , W. Schappacher. Well-posedness and wave propagation for a class of integro-differential equations in Banach spaces, J. Differ. Equ. 74(2), pp 391-411; 2009.

- [12] Degla G. A. , Ezzinbi K. , Patrice N. Controllability for some partial functional integrodifferential equations with nonlocal conditions in Banach spaces, vol. 35, pp. 25-46, 2015.
- [13] Ezzinbi K., H. Toure and I. Zabsonre. Existence and regularity of solutions for some partial functional integro-differential equations in Banach spaces, Nonlin. Anal.TMA 70(2009) 2761-2771.
- [14] Kirane M. and B.S. Houari, Existence and asymptotic stability of a viscoelastic wave equation with a delay, Z. Angew. Math. Phys, 62 (2011), 1065-1082.
- [15] Liang J., Liu J.H. and Xiao Ti-jun. Nonlocal problems for integro-differential equations, DCDIS Series A : Math. Anal. 15(2008) 815-824.
- [16] Mahiuddin Md. , Md. Imran H. Khan, Nghia Duc Pham and M.A. Karim, Development of fractional viscoelastic model for characterising viscoelastic properties of food material during drying, Food Bio-science, vol. 23, pp. 45-53, 2018.
- [17] Nicaise S. and Pignotti C., Stability and instability results of the wave equation with a delay term in the boundary or internal feedbacks, SIAM J. Control Optim, 45(5) (2006), 1561-1585.
- [18] Pazy A., Semi group of linear operator and applications to partial differential equations.
- [19] Quinn M.D. and Carmichael N., An approach to nonlinear control problem using fixed point methods, degree theory and pseudo inverses, Numer. Funct. Anal. Optim 7(1984) 197-219.
- [20] Rassoli A. , N. Fatourae and R. Guidoin, Structural model for viscoelastic properties of pericardial bioprothetic valves, Artificial Organs, vol. 42, pp. 630-639, 2018.
- [21] Ronald Grimmer. Resolvent operators for integral equations in Banach space, AMS 273(1982) 333-349.
- [22] Selvi S.and M.M. Arjunan, Controllability results for impulsive differential systems with finite delay, J. Nonlin. Sci Appl. 5 (2012) 206-219.
- [23] Shahin-Shamsabadi A. and al, Mechanical, material, and biological study of a PCL/ bioactive glass bone scaffold: Importance of viscoelasticity, Materials Science and Engineering: C, vol. 90, pp. 280-288, 2018.
- [24] Valente V. and G. Vergara Caffarelli, On the dynamics of magneto-elastic interactions: existence of solutions and limit behavior, Asymptotic Analysis, vol. 51, pp. 319-333, 2007.
- [25] Wang J., Fan Z. and Zhou Y., Nonlocal controllability of semilinear dynamic systems with fractional derivative in Banach spaces, J. Optim. Theory Appl. 154 (2012) 292-302.

PASCAL H. ZINSOU

ORCID NUMBER:0000-0002-7026-8630

INSTITUT DE MATHMATIQUES ET DE SCIENCES PHYSIQUES

PORTO-NOVO, BNIN

E-mail address: hinpascal51@gmail.com

GUY DEGLA

ORCID NUMBER: 0000-0003-1162-6140

INSTITUT DE MATHMATIQUES ET DE SCIENCES PHYSIQUES

PORTO-NOVO, BNIN

E-mail address: gdegla@gmail.com