

ème
9 Conférence internationale sur
l'énergie renouvelable et l'ingénierie
environnementale (GEEE-2023)

**Proceedings of Engineering & Technology
-PET-**

Editeur: Dr. Ahmed Rhif

ICID

Centre International d'Innovation et de Développement

Proceedings of Engineering & Technology
-PET-

**9^{ème} Conférence Internationale
sur l'Energie Renouvelable et l'Ingénierie
Environnementale (GEEE-2023)**

Editeur:

Dr. Ahmed Rhif (Tunisie)

PET-Vol. 74

ISSN : 1737-9934

Comités

Présidents d'honneurs :

Jalila Bouanani El Idrissi (MOR)
Mihoub Ouahiba (ALG)
Olfa Kammoun (TUN)

Présidents Généraux :

Ahmed Rhif (TUN)
Fatima Zohra Boufadi (ALG)
Jeru Achyl Hounogbe (SEN)
Tayane Souad (MOR)

Comité d'organisation:

Abdoulaye Bouya Diop (SEN)
Akrouch Soukaina (MOR)
Allé Dioum (SEN)
Belatel Mimi (ALG)
Djeghlal M.Lamine (ALG)
Georges Descombes (FR)
Ines Ben Sassi (TUN)
Kasbadji Merzouk Nachida (ALG)
Meriem Hayani Mechkouri (MOR)
Nada Chtioui (TUN)
Nawel Seddiki (ALG)
Rekioua Djamila (ALG)
Sara Zatir (ALG)
Sahbeni Kawther (TUN)
Salma El Aïmani (MOR)
Yosra Lahdheri (TUN)
Youcef Soufi (ALG)

Comité technique :

Abdelkrim Khireddine (ALG)
Abdellah Mechaqrane (MOR)
Ahmed Maher (EGY)
Amer Ragab Ali Zerek (LBY)
Barara Mohamed (FR)
Berbaoui Brahim (ALG)

Bedoud khouloud (ALG)
Cherkaoui Abdeljzbbbar (MOR)
Djalila Boudemagh (ALG)
El Fadar Abdellah (MOR)
Esther Muchiri (KEN))
Fatima Laassiri (MOR)
Fatima Zahra Messaoud (ALG)
Fateh Mebarek-Oudina (ALG)
Gherbi Mohamed (ALG)
Hadja Fatima Mehnane (ALG)
Haitham Saad Mohamed Ramadan (FR)
Kamal Reklaoui (MOR)
Kenz Amhmed Bozed (LBY)
Khaled Tarmissi (SAU)
Kheiri Abdelhamid (FR)
Kouzou Abdallah (ALG)
Lamia Iftekhar (BGD)
Madiha Yessari (MOR)
Manal Marzouq (MOR)
Mary Ahuna (KEN)
Mhamed Hammoudi (ALG)
Mounir Gaidi (UAE)
Mustapha Hatti (ALG)
Nadezhda Kunicina (LVA)
Olga Boiprav (BLR)
Rabhi Selma (ALG)
Rachid Benchrifa (MOR)
Rafika Boudries (ALG)
Rahmouni Soumia (ALG)
Sana Ahmed Abdaljlil (LBY)
Sapna Gambhi (IND)
Sellam Mebrouk (ALG)
Slimane Semghouli (MOR)
Sofiane Amara (ALG)
Stephen Okwiri (KEN)
Youssef Errami (MOR)
Yousef Jaradat (JOR)
Zohra Ameer (ALG)

Sommaire

- Caractérisation des Sédiments de Barrages en Vue de la Valorisation dans les Matériaux de Construction
Besma Talbi, Sihem Mezghenni 1
- Impact environnemental d'un mur en sol renforcé par géotextiles avec un parement fait de blocs en béton végétalisés
Hend Zbidi, Saloua Eleuch 7
- Le design de l'objet connecté pour un comportement responsable : le cas du mobilier urbain connecté
Imen Bouziri 15
- Elaboration et caractérisation de nouveaux matériaux de type pérovskite simples ou complexes sans plomb
 $Ba_{1-x}A_2x/3(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ (A=Eu,Sm)
Naima Boutal, Taibi Kamel 22

Caractérisation des Sédiments de Barrages en Vue de la Valorisation dans les Matériaux de Construction

Besma Talbi^{#1}, Sihem Mezghenni^{#2}

[#]Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Rades, Tunisie

¹talbi.bsml@gmail.com

²Sihemremadi@gmail.com

Résumé—L'envasement des barrages en Tunisie est un phénomène qui augmente d'une année à l'autre entraînant des pertes considérables, recensées en Mars 2023 d'environ 22,4%, de leur capacité de stockage. Le dragage des retenues serait une solution éventuelle pour préserver les ouvrages et prolonger leurs durées de vie. Cependant, une gestion durable des sédiments dragués implique la recherche de filières de valorisation. Une valorisation dans les matériaux de construction, en particulier en matériaux routiers et produits céramiques, peut présenter une solution potentiellement acceptable.

Cette étude s'inscrit dans une optique de résolution de deux problématiques majeures, qui sont d'une part l'accumulation des sédiments dans les barrages provoquant une diminution importante de leur capacité de stockage et de leur durée de vie et d'autre part l'épuisement progressif des gisements non renouvelables de roches nécessaires à la fabrication des matériaux de construction.

Les sédiments objet de ce travail sont issus de trois barrages en Tunisie : barrage de Sejnene, barrage de Joumine et barrage ElMasri. Une approche méthodologique de valorisation consiste à caractériser les sédiments à travers la définition de leurs propriétés géotechniques, minéralogiques et environnementales. Pour étudier les caractéristiques des sédiments, divers essais ont été réalisés à savoir : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, la valeur du bleu de méthylène, la teneur en matière organique, la masse volumique, l'analyse minéralogique et la teneur en éléments traces métalliques.

La valorisation des sédiments, en matériaux routiers et en matériaux céramiques, a été présentée et discutée en fonction des résultats des essais de caractérisation.

Mots clés— sédiments, barrages, envasement, caractérisation, valorisation, matériau routier, matériau céramique

I. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

L'envasement des barrages est l'un des problèmes préoccupant dans la mobilisation et l'exploitation des eaux de surface en Tunisie. En effet, l'accumulation des sédiments au fond des retenues diminue la capacité de stockage et cause des dégâts aux organes de dévasement et vidange.

L'envasement est la conséquence directe de l'érosion des bassins versants des barrages. En Tunisie, les bassins versants des barrages se caractérisent par des reliefs jeunes dominés, d'une part, par des terrains marneux et des sols vulnérables à l'érosion et, d'autre part, par un couvert forestier limité aux parties les plus arrosées et un couvert végétal saisonnier [1], [2]. À ces conditions naturelles s'ajoute le caractère torrentiel des précipitations qui s'abattent à la fin de la saison sèche et

qui seraient responsables de l'érosion et de la charge solide importante des eaux de crues. De ce fait, les retenues des différents ouvrages hydrauliques sont toutes confrontées à plus ou moins long terme à l'alluvionnement [3], [4].

Actuellement, la Tunisie compte 36 barrages en exploitation, dont 22 barrages au nord, 8 barrages au centre et 6 barrages au cap bon.

D'après le rapport « état hydrauliques des barrages- 02 Mars 2023 » de la Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH) relevant du Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche (MARHP), La capacité totale initiale des barrages est de 2988 Millions de m³ (Mm³), alors que la capacité utile actuelle est de 2320 Mm³, ces valeurs attestent d'un volume de sédiments piégés de 668 Mm³ et par conséquent une perte de 22,36% de capacité de stockage.

Pour réduire le taux d'envasement et prolonger la durée de vie des barrages, des opérations de dévasement efficaces sont fortement demandés. Cependant, une gestion durable des sédiments dragués est à prévoir. L'exploitation des sédiments dragués dans un secteur consommateur de granulats, issus des gisements non renouvelables, qu'est le secteur de construction peut présenter une solution acceptable. En effet, Plusieurs travaux antérieurs ont traité la valorisation des sédiments dans la fabrication des liants hydrauliques [5], [6], [7], [8], les matériaux routiers [9], [10], [11], les produits céramiques, [12], le mortier et le béton [13], [14]. Ils ont prouvé que ces derniers peuvent présenter des sources naturelles alternatives aux matériaux issus de carrières.

Le présent travail concerne des sédiments qui proviennent de trois barrages différents, situés au nord de la Tunisie, l'étude de leurs caractéristiques géotechniques, minéralogiques et environnementales a été réalisée à travers des essais pratiques. La caractérisation des sédiments permet de les orienter vers des filières de valorisation les plus adéquates. En effet, La valorisation des sédiments étudiés, dans les matériaux routiers ainsi que les matériaux céramiques, a été étudiée et discutée en fonction des résultats des essais de caractérisation.

II. ORIGINE ET PRELEVEMENTS DES SEDIMENTS

A. Sédiments Etudiés

Cette étude porte sur des sédiments qui proviennent de trois barrages situés au nord de la Tunisie à savoir le barrage de Joumine, de Sejnene et d'ElMasri. Les sédiments ont été prélevés en surface, en amont des barrages. Ils ont été

transportés dans des sacs hermétiques vers le laboratoire (voir Fig. 1).

Au laboratoire, avant d'effectuer les essais de caractérisation, les sédiments ont été séchés à une température, qui ne dépasse pas 50°C afin d'éviter toute modification de leurs composantes chimiques, en particulier les matières organiques, puis ils ont été désagrégés et homogénéisés.



Fig. 1 Sédiments étudiés

B. Situation Géographique et Caractéristiques des Barrages

Le barrage de Joumine, inauguré en 1983 sur l'oued de Joumine est situé à environ 15 Km au Nord-Est de Joumine dans la région de Mateur. L'eau du barrage est principalement destinée à l'eau potable. La capacité initiale totale du barrage est de 129,9 Mm³, alors que sa capacité utile actuelle (Décembre 2022) est de 118,77 Mm³, ce qui implique un taux d'envasement de 8,57%.

Le barrage de Sejnene est localisé au Nord-Est de Sejnene du gouvernorat de Bizerte. Il s'agit d'un barrage en terre, inauguré en 1994 sur l'oued de Sejnene. L'eau du barrage est surtout destinée à l'eau potable. Sa capacité initiale totale est de 137,5 Mm³ alors que sa capacité utile actuelle est de 134,01 Mm³. La fig. 2 montre la localisation géographique des barrages de Sejnene et Joumine [3], [4].

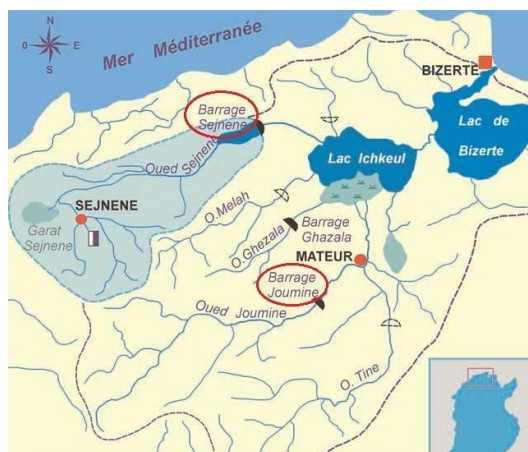


Fig. 2 Localisation géographique des barrages Sejnene et Joumine

Le barrage El Masri se situe au Djebel Sidi M'Hamed Latrach, mise en eau en 1968 sur l'oued Masri, à 10Km au sud de Grombalia. L'eau du barrage est destinée à l'irrigation des cultures d'agrumes dans les périmètres de Béni Khalled et Bou Argoub. Actuellement, le taux d'envasement du barrage El Masri atteint 24.74%.

Les principales caractéristiques des trois barrages sont données par le tableau I. Les caractéristiques hydrauliques sont issues du rapport « Etat hydraulique des barrages – 02 Mars 2023 » de la Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH).

TABLEAU I
 LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES BARRAGES

Barrage	Joumine	Sejnene	Masri
Gouvernorat	Bizerte	Bizerte	Nabeul
Cours d'eau	Oued Joumine	Oued Sejnene	Oued Masri
Bassin versant (Km ²)	418	363	53
Année de mise en eau	1983	1994	1968
Vocation	Eau potable	Eau potable	irrigation
Capacité initiale (Mm ³)	129.9	137.5	6.9
Capacité actuelle (Mm ³)	118.77	134.01	5.19
Taux d'envasement (%)	8.57	2.54	24.74
Vitesse annuelle d'envasement (Mm ³ /an)	0.37	0.13	0.04
Erosion du bassin versant (mm/an)	0.89	0.50	0.75

III. CARACTERISATION DES SEDIMENTS

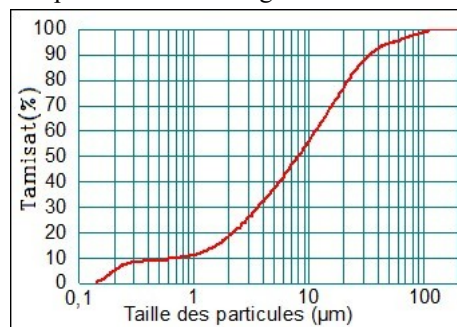
La première étape, essentielle et obligatoire, dans la recherche de valorisation de matériaux est la caractérisation. Une bonne connaissance des caractéristiques du sédiment est indispensable pour apprécier le potentiel de sa valorisation dans les filières les plus adéquates.

Le but de cette étude expérimentale est de déterminer les caractéristiques géotechniques, minéralogiques et environnementales des sédiments de barrages de Joumine, Sejnene et El Masri.

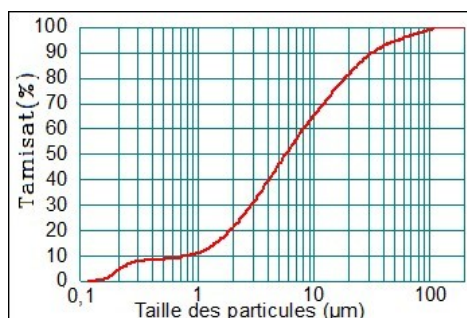
A. Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution des grains constituant le matériau en fonction de leurs dimensions. La technique adoptée est celle de la diffraction laser qui repose sur la diffraction d'un faisceau laser par des particules en suspension dans un liquide et permet d'explorer une large gamme de particules. L'angle de diffraction est inversement proportionnel à la taille des particules supposées sphériques.

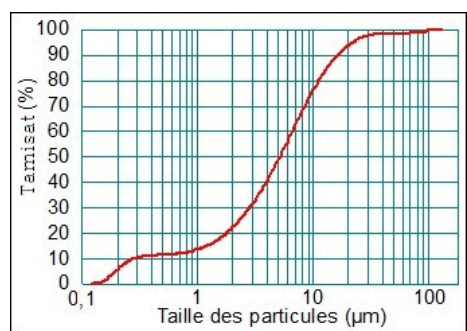
Ainsi, la technique d'analyse par granulométrie laser permet d'identifier précisément la taille des particules constituant les sédiments. Les courbes granulométriques obtenues sont présentées sur la Fig. 3.



a.



b.



c.

Fig. 3 Distribution granulométrique par laser des sédiments de barrages : a. Joumine, b. Sejnene, c. Masri

La Fig. 3 montre que les sédiments prélevés des barrages Joumine, Sejnene et Masri sont caractérisés par des courbes cumulatives semi-logarithmiques ayant la forme en S, peu régulier et plus étalé. Leur allure indique qu'il s'agit d'un grand pourcentage de limons. De plus, les trois courbes se ressemblent et ont la même allure. Elles présentent toutes un point de flexion qui correspond au passage de l'argile au limon. Les caractéristiques granulométriques issues de la lecture des courbes granulométriques sont résumées dans le tableau II.

TABLEAU II
 CARACTERISTIQUES GRANULOMETRIQUES

Barrage	Joumine	Sejnene	Masri
Fraction argileuse < 2µm (%)	19	20	21
Fraction limoneuse 2 à 63µm (%)	78	77	79
Fraction sableuse > 63µm (%)	3	3	0
Passant à 80µm (%)	98	97.8	100
Diamètre médian (µm)	8	5.5	5
Coefficient d'uniformité Cu	16.67	13.33	17.5
Coefficient de courbure Cc	2.04	1.87	3

Les résultats de l'analyse granulométrique appellent les commentaires suivants :

- La fraction limoneuse est la plus dominante. Pour les trois barrages, les teneurs en limon sont très proches et dépassent 77% ;

- La fraction ultra-fine de l'argile présente un pourcentage moyen, environ 20% de la granulométrie totale ;
- La fraction sableuse est négligeable pour les barrages de Joumine et de Sejnene, alors que le barrage de Mari est totalement dépourvu de cette fraction. Il s'agit alors des sédiments fins pour les trois barrages ;
- les diamètres médians pour les barrages Masri et Sejnene sont proches et sont inférieures à celui du barrage Joumine (8µm) ;
- Les coefficients d'uniformités obtenus sont largement supérieurs à 2. Par la suite, la granulométrie des sédiments des trois barrages est très étalée ;
- Les coefficients de courbure présentent des valeurs comprises entre 1 et 3, la granulométrie des sédiments des trois barrages est alors bien graduée.

B. Plasticité, Argilosité, Teneur en Matière Organique et Masse Volumique

Les paramètres géotechniques sont nécessaires à l'identification, la classification et le choix de la filière de valorisation des sédiments. Les limites d'Atterberg (W_L , W_P et I_P) et la valeur de bleu de méthylène du sol (VBS) ont été déterminées respectivement selon les normes NF P94-051 et NF P94-068. En complément de ces données, la teneur en matière organique (MO) par perte au feu et la masse volumique des grains solides ont été déterminées respectivement selon les normes NF EN 12879 et NF P94-054.

Les différents essais ont été réalisés sur trois échantillons des sédiments de chaque barrage. Les résultats moyens obtenus sont consignés dans le tableau III.

TABLEAU III
 CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES

Barrage	Joumine	Sejnene	Masri
Limite de liquidité W_L (%)	39	33,5	45,9
Limite de plasticité W_P (%)	30	26,0	30,0
Indice de plasticité I_P (%)	9	7,5	15,9
Valeur du bleu VBS (g/100g)	4,4	2,6	3,8
Teneur en MO (%)	4.4	3.8	3.4
Masse volumique (g/cm^3)	2,75	2,74	2,61

Les données du Tableau III montrent qu'il s'agit des sols limoneux de plasticité moyenne et faiblement organique vu que la teneur en matière organique, pour les trois barrages, est inférieure à 10%. Les masses volumiques des trois sédiments sont proches et comparables à celles des matériaux issus des carrières.

C. Analyse Minéralogique

La composition minéralogique a été déterminée par la Diffraction aux Rayons X (DRX). Cette méthode permet la détermination des phases minérales micro et poly-cristallines des matériaux. Elle consiste à bombarder l'échantillon (une poudre homogène) avec des rayons X, et à suivre l'intensité de rayons X qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace.

L'intensité détectée a été enregistrée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau.

Les analyses DRX ont été conduites au moyen d'un diffractomètre (voir Fig. 4) à Rayons X, (Siemens, Diffraktometer D5000) muni d'une anticathode en Cobalt, d'un porte-échantillon tournant, et d'un passeur automatique à 42 positions. La baie de mesure (PW 1710) est pilotée par un micro ordinateur à l'aide du logiciel FPS.



Fig.4 Diffractomètre à rayons X

Les principaux minéraux contenus dans les sédiments sont présentés dans le tableau IV.

TABLEAU IV
 ANALYSE MINÉRALOGIQUE

Minéraux	Joumine	Sejnene	Masri
Quartz	38	35	28
Calcite	2	19	24
Dolomite	5	3	7
Illite	16	13	10
Kaolinite	19	14	13
Chlorite	9	2	5
Albite	2	3	2
Anorthite	5	4	6
Minéraux ferrugineux	4	7	5

Les résultats de la caractérisation minéralogique montrent que:

- Les sédiments étudiés sont composés principalement de minéraux argileux, de quartz et de carbonates (calcite majoritairement et dolomite) ;
- les proportions de quartz sont élevées pour les trois barrages alors que la calcite est présente principalement dans les échantillons de Sejnane et Masri.
- Les sédiments du barrage de Joumine sont les plus riches en minéraux argileux et les plus pauvre en carbonates ;
- Des teneurs faibles en feldspath et des minéraux ferrugineux sont observées.

D. Teneur en Eléments Traces Métalliques

La contamination des sols par les métaux lourds est l'un des problèmes environnementaux les plus pressants. La présente étude a été menée pour évaluer la teneur des éléments traces métalliques (ETM) considérés comme polluants tels que le cadmium (Cd), Cuivre (Cu), Plomb (Pb), Nickel (Ni), Zinc (Zn), Chrome (Cr). L'analyse a été effectuée par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP/MS).

Les différents échantillons ont été séchés à l'air ambiant, broyés et tamisés sur un tamis de 2 mm pour les analyses au laboratoire. La minéralisation des ETM (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) a été effectuée à chaud, sur une plaque chauffante pendant trois heures, à l'aide d'un mélange d'acide chlorhydrique, d'acide nitrique et d'acide fluorhydrique.

Les concentrations moyennes mesurées, ainsi que les valeurs limites dans le sol selon la norme AFNOR U44-41, sont données dans le tableau V. Les résultats sont exprimés en mg/kg de poids sec du sol.

TABLEAU V
 CONCENTRATIONS DES ELEMENTS TRACES METALLIQUES

Eléments traces	Concentration			Valeur limite dans le sol AFNOR U44-41
	Joumine	Sejnene	Masri	
Cd	0.315	0.719	0.872	2
Cu	11.17	13.05	15.12	100
Pb	62.92	29.11	34.64	100
Ni	27.371	26.738	27.025	50
Zn	124.98	119.86	125.39	300
Cr	96.19	106.16	104.36	150

Les données du tableau V montrent que les sédiments étudiés renferment des quantités variables des éléments traces métalliques et que toutes les concentrations sont en dessous des valeurs limites, ceci prouve l'absence de contamination des sédiments des trois barrages par les métaux lourds.

IV. IDENTIFICATION ET FILIERES DE VALORISATION

Les caractéristiques des sédiments étudiés seront discutées dans cette section. L'identification des sédiments se fait à l'aide de classifications spécifiques selon la voie de valorisation envisagée.

A. La Filière Matériau Routier

Pour une utilisation comme matériau routier et assimilé, les caractéristiques des sédiments fins auxquelles il faut porter attention sont la granulométrie, l'argilosité et la teneur en matière organique. Ces trois paramètres sont demandés pour les différentes classifications géotechniques de référence qui permettent d'identifier les sols fins pour un usage routier ou non. Ils sont notamment fondamentaux dans le classement du Guide Technique Routier GTR (SETRA-LCPC, 2000) [15].

Selon le guide technique GTR (2000), les sédiments étudiés appartiennent à la classe F et la sous classe F11 et sont considérés comme faiblement organique, puisque leur teneur en matière organique est comprise entre 3% et 10%. En se référant à la distribution granulométrique, les sédiments des barrages de Joumine et Sejnene font partie de la classe A1, alors que les sédiments de barrage El Masri appartiennent à la classe A2, avec une importante fraction fine (< 80 μm), voir la Fig. 5.

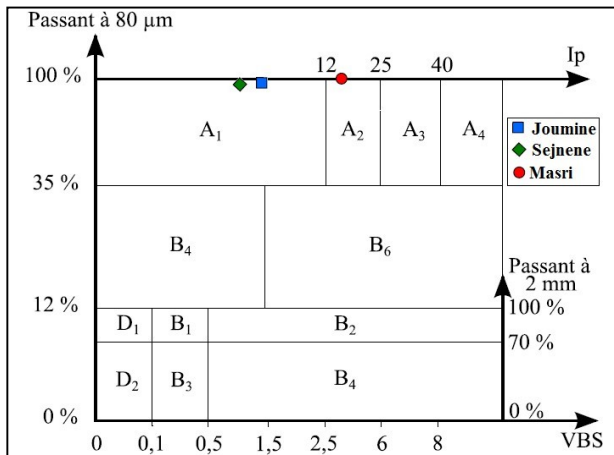


Fig. 5 Classification des sédiments selon le GTR

A partir de la connaissance des limites d'Atterberg des sédiments, des classifications peuvent être effectuées. Le diagramme le plus utilisé en géotechnique pour classer les sols fins est celui de Casagrande. La Fig. 6 est la synthèse de l'ensemble des valeurs obtenues pour les sédiments des trois barrages.

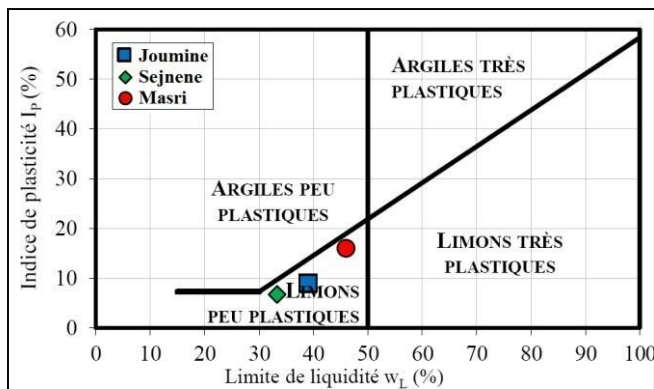


Fig. 6 Classification des sédiments sur le diagramme de Casagrande

A partir de la classification de Casagrande, il est possible de constater que les sédiments étudiés peuvent être assimilés à des sols limoneux peu plastique, du fait que leur limite de liquidité est inférieure à 50%.

Finalement, les sédiments étudiés sont assimilables à des sols fins faiblement argileux, peu plastique et faiblement organiques. La faible teneur en matière organique ainsi que la faible plasticité sont des éléments favorables à leur utilisation dans la filière matériau routier. En revanche, la faible proportion en éléments grossiers sera à l'origine d'un squelette interne médiocre. Cependant, ces sédiments fins ne peuvent être employés directement. Un traitement préalable à la chaux seule ou un traitement mixte avec des liants hydrauliques est recommandé afin qu'ils soient utilisés comme matériau routier dans des applications de type couche de forme, piste cyclable ou voie piétonne. Des constats similaires ont été relevés par les chercheurs [16] et [17].

B. La Filière Matériau Céramique

Les matériaux céramiques sont fabriqués à partir d'argiles. Après une préparation poussée, le mélange est mis en forme, séché et finalement cuit.

Pour une utilisation comme matériau céramique, les caractéristiques des sédiments fins auxquelles il faut porter attention sont la répartition granulométrique et la plasticité. La distribution granulométrique des mélanges a une grande importance sur leurs propriétés. Une certaine teneur en argiles et en limons est donc à rechercher dans les mélanges de production selon les produits.

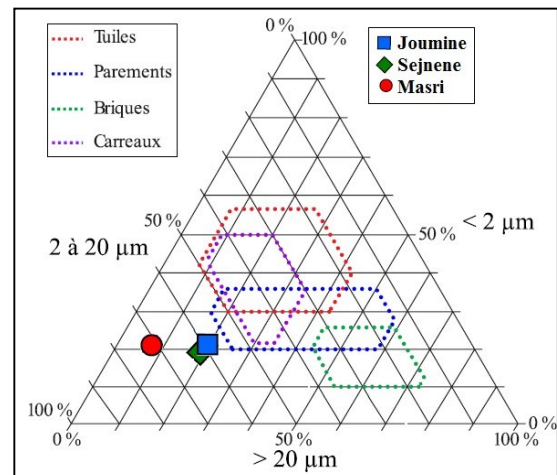


Fig.7 Répartition granulométrique des sédiments et diagramme de Winkler.

Le diagramme de Winkler reprend des données industrielles qui relient la granulométrie optimale et l'application, pour une mise en forme par extrusion. La fig. 7 montre que les sédiments de barrages étudiés, au regard de leurs répartitions granulométriques, ne semblent pas acceptables pour un usage comme matériau seul. Il en est généralement de même avec des matériaux traditionnels, issus de carrières, puisqu'il faut préparer un mélange de production afin d'obtenir une pâte avec des caractéristiques optimales. En effet, les pâtes des céramiques peuvent être constituées d'une seule ou plusieurs argiles, mélangées à des modificateurs minéraux, dits « non plastiques » qui ont un effet dégraissant [12].

La mise en forme des pièces pour la fabrication de matériaux céramique est presque toujours réalisée par extrusion. Gippini [1969] a défini des plages limite de plasticité / indice de plasticité afin de déterminer les caractéristiques des mélanges et d'obtenir une mise en forme optimale. Les sédiments des trois barrages sont placés sur cet abaque de plasticité (voir Fig. 8).

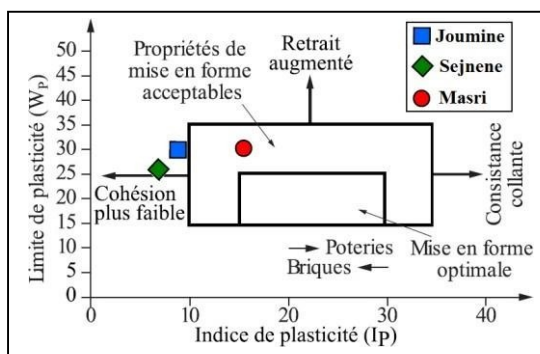


Fig.8 Classification des sédiments selon le diagramme de Gippini (1969)

Parmi les sédiments étudiés, le sédiment de Masri présente des propriétés de mise en forme acceptables, il est le plus adapté pour une utilisation comme matière première alternative pour la fabrication de terre cuite. Pour les autres sédiments, un mélange est à envisager afin d'obtenir des propriétés de mise en forme plus adéquates.

V. CONCLUSIONS

Le présent travail se présente dans une démarche de gestion durable de sédiments de barrages en étudiant leurs caractéristiques. La caractérisation de ces matériaux permet de les valoriser efficacement dans les filières les plus adéquates. Une caractérisation complète des sédiments de trois barrages a été réalisée à partir d'analyses géotechniques, minéralogiques, et environnementales. Les résultats des essais de caractérisation, des trois sédiments étudiés, ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La fraction limoneuse est la plus dominante (77 à 79%), la fraction argileuse est moyenne (19 à 21%) et la fraction sableuse est presque absente. Il s'agit alors des sols fins limoneux ;
- Les trois sédiments étudiés sont faiblement organique,
- D'après la valeur du bleu de méthylène, il s'agit des sols limoneux de plasticité moyenne,
- L'analyse minéralogique montre que les sédiments étudiés sont composés principalement de minéraux argileux, de quartz et de carbonates,
- La teneur en éléments traces métalliques montre l'absence de pollution métalliques des trois sédiments.

La première filière de valorisation de sédiments a concernée les matériaux routiers. L'identification de ces matériaux a montré qu'ils ne peuvent être utilisés seuls, mais ils nécessitent un traitement préalable à la chaux seule ou un traitement mixte avec des liants hydrauliques.

La valorisation des sédiments dans la fabrication de matériaux céramique constitue la deuxième voie de valorisation explorée. Les sédiments de barrage ElMasri présente des propriétés acceptables, alors que, pour les sédiments de barrage de Sejnene et de Joumine, un mélange est à prévoir afin d'obtenir des propriétés de mise en forme plus adéquates.

Bien que les sédiments gérés à terre aient un statut réglementaire de déchets, ils méritent d'être considérés comme une ressource alternative potentielle de matières premières

pour un secteur consommateur de granulats qu'est le secteur de la construction.

Enfin, il est proposé d'approfondir cette étude par des analyses chimiques de sédiments et d'étudier les possibilités de leur valorisation dans la fabrication des ciments, mortiers et bétons.

REFERENCES

- [1] A. Ben Mammou et M.H. Louati, "Évolution temporelle de l'envasement des retenues de barrages de Tunisie", *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 20, pp. 201-210, 2007.
- [2] I. Ayadi , H. Abida , Y. Djebbar et M. R. Mahjoub, "Sediment yield variability in central Tunisia: a quantitative analysis of its controlling factors", *Journal des sciences hydrologiques*, Vol. 55(3), pp. 446-458, 2010.
- [3] A. Marzougui et A. Ben Mamou, " Quantification et étude géotechnique des alluvions déposées dans la retenue du barrage Joumine (Nord de la Tunisie)", *Revue Française de géotechnique*, Vol 125, pp. 29-40, 2008.
- [4] A. Marzougui et A. Ben Mamou, "Le barrage de l'Oued Sejnane: quantification de l'alluvionnement et évaluation de l'érosion spécifique de son bassin versant". *Geo-Eco-Trop*, Vol. 30.2, pp. 57-68, 2006.
- [5] A. Zeraoui, W. Maherzi, M. Benzerzour, N.E. Abriak et G. Aouad, "Development of Flash-Calcined Sediment and Blast Furnace Slag Ternary Binders", *Buildings 2023*, Vol. 13, 333.
- [6] M. Amar, M. Benzerzour et N.E. Abriak, "Designing Efficient Flash-Calcined Sediment-Based Ecobinders", *Materials*, Vol. 15, pp. 7107, 2022.
- [7] D.C. Chu, M. Amar, J. Kleib, M. Benzerzour, D. Betrancourt, N.E. Abriak, J. Nadah, "The Pozzolanic Activity of Sediments Treated by the Flash Calcination Method", *Waste Biomass Valorization*, Vol. 13, pp. 4963-4982, 2022.
- [8] S. Bellara, M. Hidjeb, W. Maherzi, S. Mezazigh et A. Senouci, "Optimization of an Eco-Friendly Hydraulic Binders Comprising Clayey Dam Sediments and Ground Granulated Blast-Furnace Slag", *Buildings 2021*, Vol. 11, pp. 443.
- [9] B. Anger, D. Levacher, N. Mangwal et F. Thery, "Démarche d'identification et valorisation des sédiments de barrage en matériaux routiers". *XIII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil* Dunkerque, 2-4 juillet 2014, pp.941-952.
- [10] B. Banoune, B. Melbouci et F. Rosquoet, T. Langlet, "Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorization in road construction", *Bull. Eng. Geol. Environ*, Vol. 75, pp. 1505-1517, 2016.
- [11] A. Benaissa, Z. Aloui, M. S. Ghembaza, D. Levacher et Y. Sebaibi, "Behavior of sediment from the dam Fergoug in road construction", *Advances in concrete construction, Techno-Press*, Vol. 4(1), pp. 15-26, 2016.
- [12] B. Anger, "Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière", Thèse de doctorat, Université de Caen Basse-Normandie, Déc. 2014.
- [13] A. Zeraoui, "Approche opérationnelle pour une gestion durable des sédiments de dragage dans des filières de génie civil", Thèse de doctorat, Université de Lille, Douai, France, Nov. 2020.
- [14] J. Daher, J. Kleib, M. Benzerzour, N.E. Abriak et G. Aouad, "Recycling of Flash-Calcined Dredged Sediment for concrete 3D Printing", *Buildings 2022*, Vol. 12, 1400.
- [15] SETRA- LCPC, "Guide des Terrassements Routiers. Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)", Guide technique, fascicules I et II, références SETRA : D9233-1 et D9233-2, 2ème édition, juillet 2000.
- [16] S. Bellara, "Ouvrages réalisés sur un sol renforcé par des mélanges Co-valorisés: Application à la valorisation des sédiments en génie civil" Thèse de doctorat, Université 20 Aout 1955, Skikda, Algérie. 2022.
- [17] B. Anger, F. Thery et D. Levacher, "Caractérisation des sédiments fins des retenues hydroélectriques en vue d'une pré-orientation vers des filières de valorisation matière", *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime*. Edition 3, Ferrara, Italy, 2015, pp. 97-102.

Impact environnemental d'un mur en sol renforcé par géotextiles avec un parement fait de blocs en béton végétalisés

Hend Zbidi^{#1}, Saloua Eleuch^{*2}

[#]Département Génie Civil, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Rades
Ben Arous, Tunisie

¹zbidi.hend@gmail.com

^{*}Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis, laboratoire LAMOED, Université de Tunis El Manar
El Manar, Tunis, Tunisie

²saloua.eleuch@enit.utm.tn

Abstract— La technique relative au massif de sol renforcé par géosynthétiques associant un parement cellulaire modulable en béton a pour objectif de créer des murs de soutènement sans en voir l'apparence bétonnée grâce à un procédé permettant à la fois la végétalisation du mur et le maintien de l'irrigation pour protéger le verdissement de la construction. Malgré les amples avantages de cette technique, elle reste peu utilisée par les concepteurs dans les pays de l'Afrique du nord. Dans cet article, on s'intéresse d'une part à la présentation de cette technique en mettant l'accent sur ses objectifs, ses avantages et ses procédés d'exécution et d'autre part à l'évaluation de son impact environnemental dans un contexte de développement durable. A cet effet, une évaluation basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV) a été utilisée afin de comparer un mur de soutènement en blocs de béton associé à un sol renforcé par géosynthétiques avec un mur de soutènement classique en béton armé pour deux différentes hauteurs. Les résultats montrent que la technique du mur en blocs de béton présente une demande nettement plus faible en énergie grise et une réduction des émissions de gaz carbonique (CO₂).

Keywords— Mur de soutènement, blocs en béton, géotextiles, analyse du cycle de vie, énergie grise, émission de CO₂.

I. INTRODUCTION

Le développement durable est devenu aujourd'hui au cœur de la décision politique et de la recherche scientifique. L'objectif est d'économiser l'énergie et réduire radicalement les émissions de gaz à effet de serre [1].

Le défi mondial consistant à réduire la consommation d'énergie et à lutter contre le réchauffement climatique causé par les émissions de CO₂ nous contraint à concevoir et construire des ouvrages de plus en plus écologiques [2-5]. Dans ce contexte, les matériaux géosynthétiques sont devenus largement utilisés dans différents ouvrages de génie civil tels que la stabilisation des

fondations [6-7], la construction des routes [8], des voies ferrées [9], des culées des ponts [10] et enfin les ouvrages de soutènement des terres [11].

La construction de parements de blocs modulaires en combinaison avec des géosynthétiques de renforcement de sol fait partie de ce défi. Elle résout les problèmes de stabilité des terres [12] et offre une solution permettant de végétaliser le mur afin de masquer son apparence bétonnée [13]. Cette technique présente plusieurs avantages sur les plans technique, environnemental et économique. De nos jours, elle a connu un très fort développement à travers le monde, lié essentiellement à des impératifs économiques associés à un souci écologique croissant [14]. Cependant, malgré ses nombreuses applications et ses multiples avantages, cette technique reste peu répandue en Tunisie.

Cet article a pour objectif de présenter, d'une part, la technique de murs en blocs de béton en sol renforcé, ses avantages et la méthode de sa mise en œuvre et d'autre part, la réalisation d'une étude environnementale basée sur l'analyse du cycle de vie (ACV), en s'appuyant sur deux indicateurs d'impact environnemental (l'énergie grise et l'émission de CO₂) afin de mettre le point sur le gain écologique offert par ce type de mur de soutènement comparé à la variante classique d'un mur en béton armé.

II. BACKGROUND

A. *Présentation de la technique de mur en sol renforcé avec un parement en blocs de béton, avantages et méthode de mise en œuvre*

Un mur de soutènement en blocs de bétons associés à un sol renforcé par géotextiles est constitué de géotextiles de renforcement atanappes (posés horizontalement), de parement en blocs de béton, d'un remblai sélectionné et de terre végétale [15]. Dans son fonctionnement, les efforts dus au poids du remblai, aux surcharges et au terrain à soutenir sont transmises par frottement aux atanappes de renforcement. Le plan de glissement (en rouge dans l'exemple de la Figure 1) met en tension les atanappes qui transmettent les efforts de la zone active à l'aval vers la zone résistante à l'arrière du massif.

Cette technique présente plusieurs avantages. Tout d'abord, le mur est vivant et évolue avec les saisons et les années comme illustré par l'exemple de la Figure 2. En effet, pour monter un mur fait en blocs, il faut un volume important de terre végétale associé à un arrosage intégré dans les ailes des éléments afin d'assurer une végétalisation rapide et aboutir à des murs verts en massifs de fleurs ou autres jardins suspendus. Ainsi, la terre végétale doit présenter une bonne teneur en substances organiques, une forte porosité, une bonne aération, une capacité de rétention d'eau et une présence de micro-organisme.

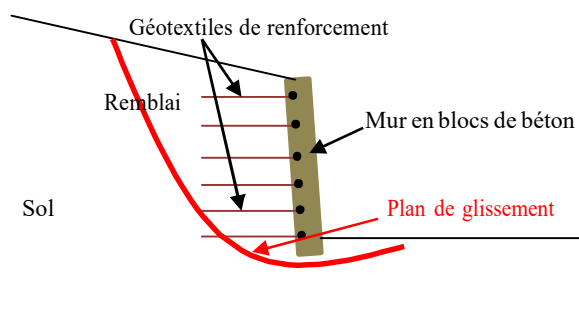


Fig. 1 Example of an unacceptable low-resolution image



Fig. 2 Développement de la végétalisation au niveau d'un mur en blocs de béton sur l'Autoroute A1, Tunisie

Ensuite, le mur est esthétique. En effet, les murs de soutènement végétalisés embellissent de plus en plus les villes et les milieux urbains en quête d'esthétisme et de naturel. C'est un mur qui disparaît sous la végétation et qui a une grande souplesse d'utilisation (courbe, angles droits, raccords verticaux, variation de pente, intégration d'escaliers, etc.). En plus, il peut avoir plusieurs aspects (béton gris ou ton pierre).

Par ailleurs, la mise en œuvre de ce type de mur est rapide et ne nécessite aucune fondation puisque les blocs en béton sont posés horizontalement sur un simple béton de propreté. Le mur est aussi économique en béton et en aciers (absence totale d'armatures). En plus, plusieurs modèles de blocs sont entièrement réutilisables et recyclables à la fin de leur durée de service de façon qu'ils soient complètement démontables pour être réutilisés ou concassés et intégrés un béton neuf [16].

D'autre part, les géotextiles atanappes utilisés en renforcement présentent la particularité d'être souples (faible raideur en flexion) et déformables (faible rigidité en traction). Cette souplesse rend le mur résistant aux séismes [16]. En plus, par recouvrement des lés (10 % de la longueur du lé), on obtient un renforcement en continu sur la largeur du massif. Les nappes géotextiles sont posées dans le remblai horizontalement dans le sens de résistance maximum tel qu'il est indiqué sur la Figure 3.

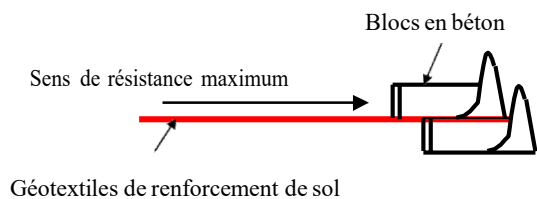


Fig. 3 Sens de résistance maximum des nappes géotextiles

La mise en œuvre de la technique du massif de sol renforcé par géotextiles associant un parement cellulaire modulable passe par plusieurs étapes [15] :

- La pose du béton de propreté : Elle commence par le point bas du mur. Le béton de propreté (de 10 cm d'épaisseur) est répandu sur une surface légèrement plus large que le premier rang de bloc. Le béton de propreté est une surface de référence, son dessus doit être au niveau -25 cm minimum par rapport au terrain naturel (T.N) (Figure 4).

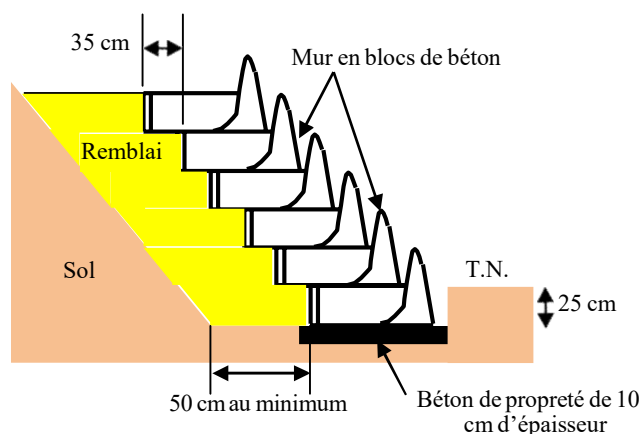


Fig. 4 Détails de pose de béton de propreté pour un mur en blocs de béton

- La pose du premier rang : Les blocs sont posés de façon à maintenir un écartement de 35 cm pour les murs rectilignes.

- La mise en place de remblai et son compactage : Le remblai drainant doit être mis en place à chaque rang et compacté à 95 % de l'Optimum Proctor Normal (OPN) par couche. La largeur du remblai drainant est au minimum de 50 cm derrière les blocs (Figure 4).

- La mise en place de la terre végétale dans les blocs.

- La pose des nappes géotextiles : Une première nappe de géotextile de renforcement peut être préconisée au-dessus du premier rang. Les nappes de renforcement sont intercalées entre les couches de sol selon le profil et la densité de renforcement

prévus par la note de calcul préalablement établie. Les nappes sont posées horizontalement dans le sens de résistance maximum. Les géotextiles se déroulent dans le sens perpendiculaire au mur. La longueur de la nappe est égale à la largeur du remblai mis en place.

- La pose des rangées suivantes : La méthode de pose est identique pour les rangées suivantes. Un arrosage intégré gouttes à gouttes dans les encoches est généralement prévu tous les deux ou trois rangs.

B. Présentation de l'analyse de cycle de vie (ACV)

L'ACV est une méthode normalisée (ISO 14040 - 14044) [17-18] qui s'inscrit dans le concept du développement durable en fournissant un moyen efficace et systématique pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé tout au long de leur cycle de vie.

Elle s'appuie sur plusieurs principes [17-18] :

- Doit être comparé ce qui est comparable. Ainsi, il ne s'agit pas de comparer un produit à un autre mais des fonctions équivalentes.
- Un résultat ne peut être utilisé qu'au regard des hypothèses prises.
- Le calcul ne pouvant être exact. Il convient d'identifier des simplifications pertinentes.

Cette méthodologie s'appuie sur des indicateurs, représentant les impacts qui doivent être quantifiés dans l'étude dont une bonne compréhension et analyse est primordiale. Les principaux indicateurs sont l'énergie grise (l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile, nucléaire et hydraulique) et les émissions de gaz à effet de serre notamment le CO₂ [18]. Les deux catégories d'impact peuvent être utilisées comme «ACV courtes» pour l'évaluation écologique en prenant en compte l'extraction et la production de matériaux de construction utilisés, leur chargement, leur transport et leur mise en place [19].

III. METHODOLOGIE

Face aux enjeux du développement durable et afin d'apporter une information objective aux acteurs de la construction, une étude a été entreprise pour évaluer les caractéristiques environnementales et sanitaires de la technique associant un parement cellulaire modulable à un massif de sol renforcé par géotextiles. Pour se faire,

une approche comparative en utilisant l'analyse de cycle de vie (ACV) entre un mur de soutènement utilisant cette technique et un mur de soutènement classique en béton armé a été réalisée.

Dans un souci de pertinence et de cohérence, il est nécessaire que l'ensemble des études environnementales considèrent comme objet d'étude un seul et même système. La notion d'ouvrage élémentaire (O.E.) permet de définir ce système d'étude commun. Les O.E. choisis correspondent à 1 mètre linéaire de mur pour deux hauteurs différentes : une hauteur de 3 m (O.E.1) et une hauteur de 5 m (O.E.2). La démarche de l'étude consiste à étudier l'impact environnemental de chacun des ouvrages élémentaires pour chacune des deux variantes de mur.

La conception des différents murs de soutènement a été ensuite réalisée. Pour le mur en blocs de béton en sol renforcé par des géotextiles, les blocs utilisés pour les deux hauteurs du mur sont de mêmes dimensions. Les nappes de renforcement en géotextile utilisées sont de type géosynthétique en Polyéthylène Téréphtalate (PET). Elles ont une largeur de 2.5 m et sont espacées de 50 cm. Pour le mur en béton armé, les masses de béton et d'acier sont calculées à partir d'un outil de dimensionnement selon les règles de Béton Armé Aux Etats Limites (BAEL 91) [20], ce qui permet de chiffrer la quantité utilisée de béton avec précision afin de pouvoir calculer ses impacts environnementaux.

Ainsi, tous les flux d'énergie et de matières entrants et sortants du système sont pris en compte pour chaque étape du cycle de vie de l'ouvrage, notamment la fabrication des matériaux de construction, le transport des matériaux jusqu'au chantier, les travaux de terrassement (y compris l'élimination de la terre excavée) et la construction du mur. L'entretien des deux variantes de murs est supposé à impact négligeable car le traitement des murs en béton n'emploie ni de nouveaux matériaux, ni d'outils polluants. A la fin de leurs durées de service, les matériaux utilisés dans les deux types de murs étudiés peuvent être jusqu'à 100 % recyclables, ce qui réduit l'impact environnemental. Par la suite, l'élimination des matériaux et leur mise en décharge ne sont pas pris en compte dans le calcul des indicateurs environnementaux.

Les deux types de murs étant soumis à des charges importantes dues à la poussée des terres, un béton suffisamment résistant (de classe c25/30) a été choisi. D'autre part, en tenant compte que les blocs en béton sont creux et espacés de 35 cm, la masse totale de béton du mur en blocs est calculée en multipliant le nombre de blocs utilisés par la masse unitaire d'un seul élément (estimée à 120 kg).

Par ailleurs, il est considéré comme plus économique l'achat du béton directement fini (mélange fait en centrale et non sur chantier). La distance de transport a été fixée à 40 km entre le lieu de la production et le chantier. La même distance a été considérée pour l'approvisionnement en acier et en géotextiles. Les données choisies des deux indicateurs environnementaux correspondent à un camion de 28 tonnes qui est le moyen de transport le plus utilisé pour ce type d'ouvrage.

Concernant le mode de construction des murs en béton armé, il consiste en plusieurs étapes successives: les terrassements, le ferrailage, le coffrage de la semelle et du voile, le coulage du béton et enfin le décoffrage. Dans cette étude, seul l'impact environnemental des travaux de terrassement mécanique est pris en compte. En effet, les calculs faits montrent que les machines spécifiques utilisées pour les autres étapes représentent une part négligeable de l'impact total de l'étape de construction. La même hypothèse a été adoptée pour la construction d'un mur en blocs renforcé par des géotextiles. En effet, mis à part les travaux de terrassement, toutes les autres étapes sont effectuées manuellement par des ouvriers et leurs impacts environnementaux sont par conséquent négligés. Pour le calcul des volumes des terrassements, le sol est supposé bien plat en amont du mur, et présentant une pente de 20° en aval. Les volumes excavés et remblayés sont identiques dans les deux technologies, ce qui est une approximation crédible.

Le calcul des deux indicateurs environnementaux pour les deux techniques a été établie en se basant sur la base des données Eco-invent développée dans la référence [21] qui présente l'avantage d'être centrée sur le domaine du Génie Civil.

IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Après avoir défini les étapes du cycle de vie à considérer dans le calcul des impacts environnementaux, un bilan d'énergie grise et des émissions de CO₂ a été établi pour chaque ouvrage élémentaire afin de comparer les impacts environnementaux des deux techniques.

Le Tableau 1 résume les résultats de calcul. La lecture des résultats montre que la solution de mur en blocs de béton a permis de diminuer considérablement les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie grise pour le cas des deux O.E .

Pour les deux techniques, les deux indicateurs environnementaux augmentent lorsque la hauteur du mur augmente, ce qui est prévisible. La comparaison des apports des différentes phases du cycle de vie confirme que le flux de matière est celui qui a le plus grand impact environnemental pour les deux types de murs. En effet, pour l'O.E.1 (à titre d'exemple) et pour la technique de mur en blocs de béton en sol renforcé, les matériaux représentent 84 % de l'impact environnemental total d'émission de CO₂, alors que le terrassement et le transport ne représente que 10% et 6% respectivement de cet impact. La même tendance pour la solution de mur en béton armé a été constatée, les matériaux ont encore plus d'impact (89%). Les impacts du transport et du terrassement restent largement inférieurs, de l'ordre de 7% et 4% respectivement.

TABLEAU 1
 IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DEUX TECHNOLOGIES SELON LES O.E.

Technologie	O.E.	Activité	Quantité	Facteur d'énergie grise (depuis la référence [8])	Energie grise (MJ _{eq})	Facteur d'émission de CO ₂ (depuis la référence [8])	Emissions de CO ₂ (kg)
Mur en blocs de béton associé à des géotextiles de renforcement	O.E.1	Terrassement	23.9 m ³	8.07	193	0.534	13
		Production du béton	1030 kg	0.721	743	0.0775	80
		Production de géotextile	5.7 kg	95.3	544	5.88	34
		Transport du béton et de géotextile sur 40 km	1035.7 kg	3.22	134	0.195	8
		Total			1614		135
	O.E.2	Terrassement	66.3 m ³	8.07	536	0.534	36
		Production du béton	1715 kg	0.721	1237	0.0775	133
		Production de géotextile	9.5 kg	95.3	906	5.88	56
		Transport du béton et de géotextile sur 40 km	1724.5 kg	3.22	223	0.195	14
		Total			2902		239
Mur en béton armé	O.E.1	Terrassement	23.9 m ³	8.07	193	0.534	13
		Production du béton	2580 kg	0.721	1861	0.0775	200
		Production de l'acier	99.8 kg	14	1398	0.705	71
		Transport du béton et de l'acier sur 40 km	2679.8 kg	3.22	346	0.195	21
		Total			3798		305
	O.E.2	Terrassement	66.3 m ³	8.07	536	0.534	36
		Production du	6084 kg	0.721	4387	0.0775	472

	béton					
	Production de l'acier	328.7 kg	14	4602	0.705	232
	Transport du béton et de l'acier sur 40 km	6412.7	3.22	826	0.195	51
	Total			10351		791

La majeure différence dans les impacts environnementaux entre les deux techniques est attribuée principalement à la plus grande quantité de béton (qui est un matériau ayant des indicateurs environnementaux relativement élevés) utilisée dans la technique de mur classique en béton armé, ce qui conduit par conséquent à une demande accrue en énergie grise et à plus d'émission de CO₂. La part élevée du béton dans le potentiel de réchauffement planétaire peut être expliquée par le processus de production de clinker. En effet, au cours de son processus de calcination, le CO₂ géogénique se dégage. D'autre part, l'impact de l'utilisation des géotextiles pour renforcer le sol dans la première technique reste inférieur à l'utilisation des armatures de béton dans la deuxième technique. J'ai effacé la phrase en jaune.

Afin de mieux interpréter les résultats, les valeurs des deux indicateurs pour les différentes étapes considérées du cycle de vie pour l'O.E.1 ont été portées sur les figures 5 et 6. La fabrication des matériaux utilisés pour 1ml de mur en blocs de béton en sol renforcé par des géotextiles engendre l'émission de 113.3 kg de CO₂ qui est largement inférieure à l'émission engendrée pour 1ml de mur en béton armé atteignant 270.3 kg, soit une valeur 138% plus importante que celle de la première technique. De même pour le transport des matériaux, l'émission de gaz à effet de serre passe d'une valeur de 8.1 kg pour la technique du mur en blocs de béton en sol renforcé par des géotextiles à 20.9 kg pour la technique de mur en béton armé, soit une valeur 158% plus importante. Les volumes de terrassement sont supposés identiques pour les deux techniques, ce qui explique les valeurs d'émission de CO₂ similaires. Ainsi, la technique de mur en blocs de béton engendre une diminution d'émission de CO₂ de 58% et 61% pour la fabrication des matériaux et leur transport respectivement. En ce qui concerne la consommation d'énergie grise, la même tendance a été constatée (Figure 5a). La technique de mur en

blocs de béton renforcé par des géotextiles engendre une diminution d'énergie grise de l'ordre de 60% pour la fabrication des matériaux et leur transport, comparée à la technique de mur en béton armé.

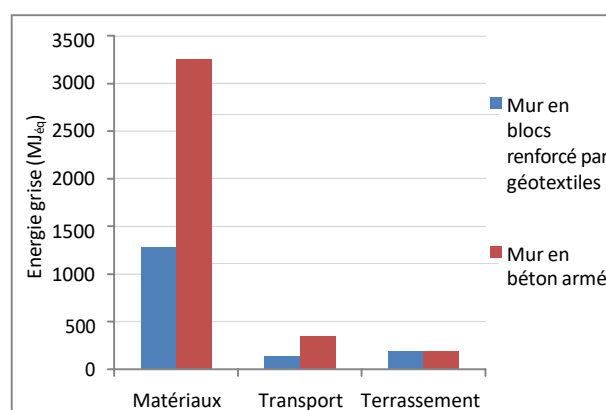


Fig. 5 Impacts environnementaux des étapes du cycle de vie des deux murs pour OE1 en terme de consommation d'énergie grise

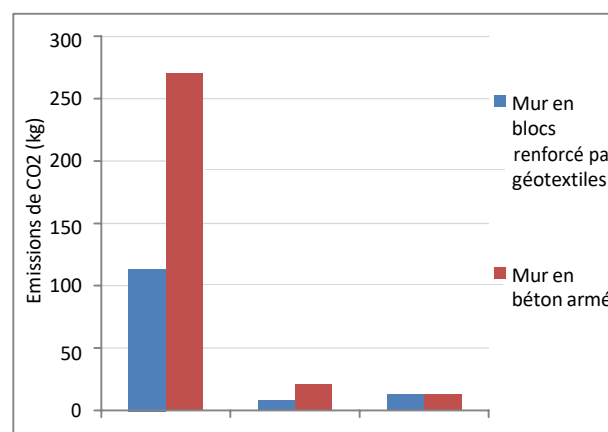


Fig. 6 Impacts environnementaux des étapes du cycle de vie des deux murs pour OE1 en terme d'émission de CO₂

Les Figures 7 et 8 illustrent les valeurs totales des deux indicateurs environnementaux pour les deux techniques et les deux O.E. L'augmentation de la hauteur du mur de 3m à 5m a entraîné une augmentation de l'ordre de 80% de la consommation d'énergie grise et des émissions de CO₂ pour le mur en blocs de béton alors que cette augmentation atteint 170% pour le mur classique en béton armé. Ceci est dû encore une fois à

l'augmentation de la quantité de béton utilisé par la dernière technique. En effet, cette augmentation est beaucoup plus importante pour le mur en béton armé à cause de l'augmentation de l'épaisseur de son voile et les dimensions de sa semelle.

Par ailleurs, les résultats montrent également que comparé à la technique classique de mur en béton armé, la technique de blocs de béton en sol renforcé par géotextiles a permis un gain en énergie grise qui atteint 58% et 72% et une réduction de la consommation de CO₂ de 56% et 70% pour les murs de 3m et 5m de hauteurs respectivement.

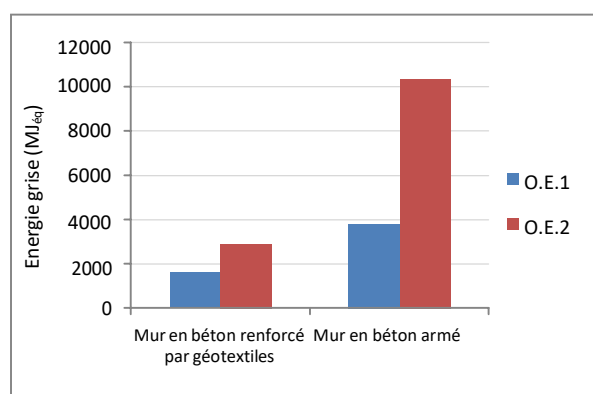


Fig. 7 Impacts environnementaux des deux murs pour les différents O.E en terme de consommation d'énergie grise

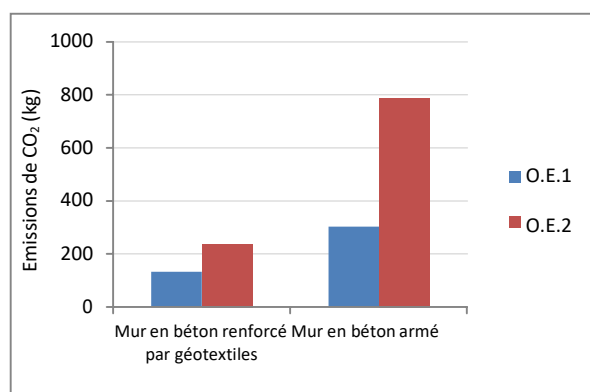


Fig. 8 Impacts environnementaux des deux murs pour les différents O.E en terme d'émission de CO₂

V. CONCLUSIONS

La demande mondiale en termes de réduction de la consommation d'énergie et le réchauffement planétaire causé par les émissions de CO₂ sont deux grands défis pour les constructeurs d'infrastructures.

Afin d'évaluer ses avantages écologiques, une étude comparative entre la technique de soutènement en mur de blocs de béton en sol renforcé par des géotextiles et la technique classique de mur en béton armé a été entreprise. Les résultats de l'analyse de cycle de vie basée sur deux indicateurs environnementaux à savoir la consommation d'énergie grise et l'émission de CO₂ ont montré que pour les deux techniques étudiés, la fabrication des matériaux de construction est l'étape de cycle de vie qui a l'impact environnemental le plus important (variant entre 84% et 89% selon la technique et l'O.E. considérés). La première technique a présenté un impact environnemental beaucoup plus faible que la variante traditionnelle d'un mur en béton armé. Ceci est principalement attribué à la demande réduite en béton et à l'absence d'aciers d'armature pour la solution de mur en blocs de béton associé à un sol renforcé par géotextiles. En effet, cette dernière technique offre une économie de béton entre 60% et 70% (selon la hauteur considérée du mur) étant donné que le parement du mur est constitué de blocs en béton creux et espacés et du fait que le béton est un matériau reconnu par sa très grande demande en énergie grise et sa forte émission de CO₂ et autres gaz polluants. Ainsi, la réduction importante de l'utilisation de béton a entraîné systématiquement la diminution des deux indicateurs environnementaux pour la technique de mur en blocs de béton, ce qui prouve par conséquent l'avantage de cette technique.

Enfin, les résultats de cette étude, montrant l'intérêt écologique certain de la technique de soutènement en mur en blocs de béton associé à un sol renforcé par des géotextiles, sont encourageantes pour l'utilisation de cette technique du fait de ses avantages environnementaux certains dans une démarche de développement durable.

REFERENCES

- [1] G. Heerten, Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics, ELSEVIER, Geotextiles and Geomembranes, volume 30, p. 43-49, 2012.
- [2] W.W. Müller, F. Saathoff. Geosynthetics in geoenvironmental engineering, Sci. Technol. Adv. Mater, 16 (3), 034605, 2015.
- [3] M. Abu-Farsakh, S. Hanandeh, X. Tang, Q. Chen, Sustainability Evaluation of Geosynthetic Stabilized Soft Subgrade Soil in Unpaved Test Sections, Geotechnical Special Publication, 270 GSP, pp. 687-696, 2016.

- [4] P. Zastrow, F. Molina-Moreno, T. García-Segura, V.J. Martí, V. Yepes, Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: A parametric study, *J. Clean. Prod.* 140 (3), P1037–P1048, 2017.
- [5] N. Kumar, D. Das, Nonwoven geotextiles from nettle and polylactic acid fibers for slope stabilization using bioengineering approach, *Geotext. Geomembranes* 46 (2), 206–213, 2018.
- [6] D.J. King, A. Bouazza, J.R. Gniel, R.K. Rowe, H.H. Bui, Serviceability design for geosynthetic reinforced column supported embankments, *Geotext. Geomembranes* 45 (4), 261–279, 2017.
- [7] M. Oliaei, S. Kouzegaran, Efficiency of cellular geosynthetics for foundation reinforcement, *Geotext. Geomembranes* 45 (2), 11–22, 2017.
- [8] N.S. Correia, J.G. Zornberg, Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading, *Geotext. Geomembranes* 46 (1), 111–120, 2018.
- [9] S.R. Satyal, B. Leshchinsky, J. Han, M. Neupane, Use of cellular confinement for improved railway performance on soft subgrades, *Geotext. Geomembranes* 46 (2), 190–205, 2018.
- [10] F.B. Bizjak, S. Lenart, Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system – A case study, *Geotextiles and Geomembranes* 46, 543–558, 2018.
- [11] R. Frischknecht, S. Büsler-Knöpfel, R. Itten, M. Stucki, H. Wallbaum, Comparative life cycle assessment of geosynthetics versus concrete retaining wall, *18th Int Conf Soil Mech Geotech Eng: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE* (3), 1979–1982, 2013.
- [12] B. Ercüment, C. Cihan, G. Erol, 1-g Shaking table tests to determine the behavior of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loads, *Transportation Geotechnics, Volume 30*, September 2021.
- [13] A. Nancey, A. Pieyre, J.B. Duquet, H. Ouedraogo, Remblais renforcés aux blocs cellulaires en parement pour l'échangeur nord à Ouagadougou, 12ème rencontres Géosynthétiques, Nancey, France, Mars 2019.
- [14] D. Rossi, O. Wyss, R.M. Faure, M. Ferrer, Impact environnemental d'un mur fait de blocs renforcé par géotextile, *Rencontres Géosynthétiques*, France, 2011.
- [15] Mémoire Technique, Procédés de soutènement Atalus, 69 chemin de Bellegarde 69140. Rillieux la pape. France.
- [16] M. Zermani, K. Belaid, R. Harzaz, P. Gendrin, Aménagement et soutènements avec massif renforcé par géotextile avec retour au parement et parement Atalus, 10ème rencontres Géosynthétiques, La rochelle, France, Mars 2015.
- [17] EN ISO 14040, Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework (2006).
- [18] EN ISO 14044, Environmental Management - Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines (2006).
- [19] A.T. Balasbaneh, D. Yeoh, M.I. Juki, M.H.W. Ibrahim, A.R. Zainal Abidin, Assessing the life cycle study of alternative earth-retaining walls from an environmental and economic viewpoint, *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pages 37387–37399, 2021.
- [20] BAEL 91, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, 1991.
- [21] University of Stuttgart and PE Europe, Users Manual Gabi 4.4, University of Stuttgart, 2007.

Le design de l'objet connecté

pour un comportement responsable : le cas du mobilier urbain connecté

Auteur : Imen Bouziri

Mots clefs : Objet connecté, usage, energie, technologie, mobilier urbain.

Fonction : Maître assistante à l'Institut supérieur des arts de Multimédia de Manouba (ISAMM)

Adresse électronique : bouziri.imen@gmail.com

RESUME

Dans un monde de plus en plus dématérialisé, les systèmes deviendront plus important un terrain commun entre industrie technologie et design à travers le prisme humain et de son action sur son environnement.

Cet article propose l'étude propose une réflexion sur les nouvelles collaborations à travers le design du mobilier urbain connecté, où l'objet est lié aux systèmes d'esthétique, de fonctions, de techniques ou encore de production et distribution. À partir d'une étude empiriques, nous proposons d'élargir la réflexion en montrant que la fonction du mobilier urbain émerge de son usage et du discours de design de l'objet autour des innovations technologiques.

Résumé (En)

In an increasingly dematerialized world, systems will become more important a common ground between industry, technology and design through the prism of humans and their action on their environment.

This article proposes the study proposes a reflection on new collaborations through the design of connected street furniture, where the object is linked to systems of aesthetics, functions, techniques or even production and distribution. Based on an empirical study, we propose to broaden the reflection by showing that the function of street furniture emerges from its use and from the design discourse of the object around technological innovations.

INTRODUCTION

A travers la ville, son tissu urbain, son architecture et son esthétique, le design urbain prend de plus en plus une mission plus large innovatrice et recherchée. Architectes, designers, graphistes, artistes,

entrepreneurs, ingénieurs et habitants travaillent et collaborent ensemble pour offrir et améliorer le confort de la vie au sein de la ville. Des études sur les espaces publics se sont multipliées au cours des dernières années, c'est un domaine relativement nouveau dans nos sociétés, il s'intéresse aux spécificités relatives aux nouvelles pratiques d'usages dans l'espace public.- Avec l'évolution des techniques et des technologies, ces derniers acteurs doivent adopter des nouvelles manières et des nouvelles attitudes vis à vis de la conception et de l'aménagement de l'espace urbain public, dans l'objectif d'offrir aux usagers un design qui répond à leurs nouvelles attentes en matière de confort d'attractivité et de convivialité. Dans cette nouvelle démarche, le designer doit non seulement comprendre le besoin de son utilisateur mais aussi l'évolution progressive du cadre de vie qui influence les usages. L'espace urbain offre aux utilisateurs le moyen de se détendre, de se reposer, de s'informer, de se rencontrer, à ces fonctionnalités premières, le designer intègre aujourd'hui le côté sensible dans une dimension de vie collective créatrice et innovatrice. Ces transformations concernent à la fois la nouvelle diversité des contenus et du contenant de l'espace public ce qui intègre un nouveau comportement du citoyen et une nouvelle relation se noue entre les l'espace et son usager : le citoyen . On relève dans l'espace public d'aujourd'hui la présence de plus en plus marquée du numérique et une diversification d'expériences sont offertes aux usages notamment dans le contexte de partager un moment ludique et agréable.

Notre réflexion tentera de répondre au deux questions suivantes : comment le design peut être considéré comme un levier de l'innovation dans le construction de la ville ? Quelles sont les nouvelles fonctionnalités

attribuées au mobilier urbain pour le rendre connecté ? Nous focalisons notre analyse sur le mobilier urbain connecté en tant qu'objet design, d'urbanisme et de sociabilité.

I. DE L'OBJET A L'OBJET CONNECTE

A. *Design de l'objet et processus de conception*

Le monde de l'objet s'inscrit dans l'espace social, il est un ancrage de sens, aboutissement d'une volonté de signification (signe social, objet désigné). L'objet est prescrit dans sa fonctionnalité, dans son usage, c'est ce qui lui donne son identité. Cette identité est éventuellement dans le discours social tel que nous l'a proposée Jean Baudrillard. « Les objets sont des preuves car ils sont l'effet d'un travail symbolique, ils restituent des disparités sociales dans une même catégorie d'objets (fauteuils, rangements, voitures...) et sont à analyser comme une syntaxe en dégagant des constantes d'organisation en fonction du type d'habitat ou de la catégorie sociale, ils sont le support d'une structure globale de l'environnement qui est en même temps une structure du comportement. » (Baudrillard, 1977)

Par cette définition, Baudrillard affirme que l'objet porte des sens. Il ajoute aussi que « Par la logique du signe, tout est design et rien ne lui échappe » (Baudrillard, 1977). L'objet design sera donc le résultat de la combinaison entre formes et signes. Il sera donc le manipulateur privilégié de ces signes.

Chaque projet design nécessite une réflexion spécifique qui s'adapte à la nature du produit et à sa particularité, « Le design en tant que processus, se faufile dans, avec, autour de chaque produit. Pour mieux saisir son impact dans la conception des objets, il faut interroger les démarches qui ont présidé à la création, notamment celle du désigner. » (Tortochot, 2004).

Le design de l'objet est un processus de réflexion qui s'agence sur des étapes successives comme le montre la figure (1). Les principales phases de ce processus de conception sont : la phase de l'analyse, la phase du développement ou Idéation, la phase de conception, la phase de prototypage et testes et enfin la phase de production et diffusion.

- Phase d'analyse : elle correspond à l'étude des fonctionnalités du projet sous forme de critères et de contraintes. Elle permet de mieux cerner la demande du client.

- Idéation : première phase de la recherche et de la production d'une série d'idées à travers lesquelles des directions et des orientations sont définies et identifiées. Il en résulte de cette étape les premiers choix fonctionnels et techniques.
- Conception et recherche : étape où s'élaborent les idées en volume bidimensionnel ou tridimensionnel en raisonnant sur les données formelles, techniques et fonctionnelles. Cette étape consiste aussi à réfléchir les mécanismes et les détails techniques afin de reproduire fidèlement le modèle imaginé et de lui donner l'apparence de l'objet final.
- Prototypage et teste : Elle consiste à réaliser la maquette finale. Cette dernière répond tous les détails fonctionnels et techniques vues précédemment sous forme de prototype sert à valider les faisabilités et les répercussions techniques et économiques de l'objet. Cette étape consiste à une validation par l'industriel, le client et le designer de tous les détails de conception et de leurs approbations par ces différents acteurs pour ensuite passer à la production.
- Production et diffusion : elle consiste au passage à la fabrication du produit validé et à sa commercialisation. Elle marque la fin du travail du designer, et consiste à la mise sur le marché du produit fini, à veiller sur sa promotion, et son échantillonnage.



Figure 1 : Processus de conception d'objet

C'est ainsi que la conception d'un produit implique des préoccupations diverses qui vont de la naissance de l'idée et de sa mise en forme à la mise en marché (diffusion). Aussi que de la fonction à la fabrication en série en passant par l'ergonomie.

B. *Design de l'objet connecté et processus de conception*

Les objets connectés sont les objets tendance de notre époque. Un objet connecté est un matériel électronique qui peut communiquer avec un autre : un smartphone, une tablette tactile et/ou un ordinateur. Cette communication consiste à envoyer et à recevoir des informations, ceci par le biais d'une liaison sans fil, Bluetooth ou Wifi.

L'intérêt principal de cette communication est de récupérer des informations, ou d'envoyer des statistiques, de créer des règles, etc. Mais l'avènement des smartphones et autres tablettes, qui font désormais partie de notre quotidien, a donné un élan au développement de l'interactivité, de la créativité des fabricants et a ouvert le champ des applications.

- Un objet connecté comporte un système d'identification et de captation des données (température extérieure, rythme cardiaque, etc.), un système de transmission des données alimentant une application intelligente .
- En théorie, tout objet peut être connecté. C'est l'Internet of things (IOT) ou Internet des Objets (IDO).

Aujourd'hui les objets connectés ont touché plusieurs domaines illustrés dans (la figure 2)

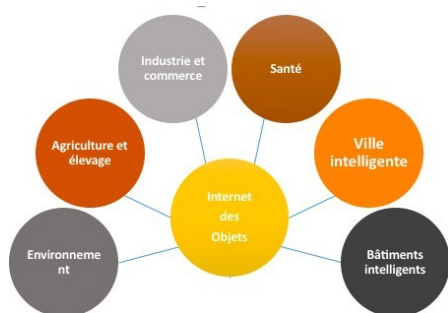


Figure 2 : Objet connecté domaines d'usages

« L'intérêt de l'objet connecté réside principalement par les modes alternatifs par lesquels il communiquent l'information et donnent corps aux services qu'ils incarnent » (Drouillat, 2016) , il offre ainsi de nouvelles performances aux utilisateurs et intègre des nouvelles fonctionnalités. C'est dans ce sens que la conception d'un objet connecté est considéré comme une méthode collaborative et participative. Elle intègre l'humain et lui permet de s'approprier une technologie adéquate à ses besoins. En nous appuyant sur cette démarche, nous essayons de reprendre le processus précédemment décrit et de l'adapter à une conception connectée. Par

cet apport nous proposons une fusion de phases et d'étapes du processus. Nous cherchons ensuite à leurs attribuer d'autres appellations qui nous semblent plus appropriées à une conception connectée. Cette démarche interactive prend en compte l'utilisateur dans toutes les phases de conception, il lui revient, si nécessaire, de proposer, de mesurer et de tester indifféremment chaque étape du processus. Ce qui se faisait par ordre canonique et en ordre de priorité peut maintenant être fusionné. La figure 3 illustre notre vision du processus de conception de l'objet connecté.

- La phase analyse fusionne avec l'étape recherche d'idées (première étape de la phase développement). Dans cette fusion d'étapes, le retour à l'utilisateur est inéluctable. Par sa participation, il permet au concepteur d'orienter la réflexion vers les attentes des utilisateurs potentiels et d'adapter le produit en question. Nous empruntons à cette phase de fusion l'appellation *idéation* déjà en usage dans le domaine du *design thinking*. Dans le fait, elle consiste à définir et à poser des questions afin de générer le maximum d'idées et à esquisser des solutions.

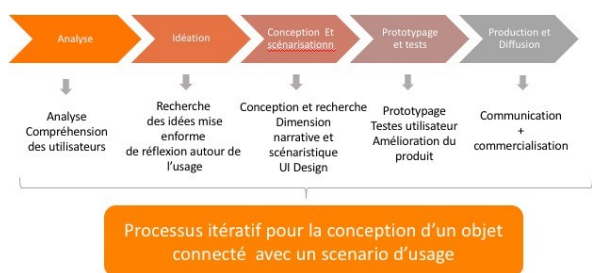
L'étape conception et recherche intègre la dimension interactive à l'objet en adoptant une méthodologie de scénarisation et de narration qui donne la forme de l'objet connecté. Cette étape vise à concevoir les différents modules constituant la structure et l'arborescence de l'ensemble des interactions possibles de l'objet. Nous la désignons de phase *conception et scénarisation* (figure 3) empruntée au domaine du *design d'interfaces interactives (UI design)* « Le design interactif crée les conditions techniques à partir desquelles l'imaginaire de l'utilisateur peut développer une relation au virtuel. Le designer construit ainsi une œuvre d'œuvre, en amont et en aval. L'œuvre en aval étant susceptible de se renouveler indéfiniment dans le temps et dans l'espace. L'œuvre complète se réalise enfin dans la combinaison de ces deux processus jamais figés, toujours en action et en rétroaction, en devenir » (Guillaume, 2003)

- Le prototypage qui ne s'arrête plus à l'élaboration de la maquette ou à apporter des solutions techniques, a évolué vers des réalisations de maquettes permettant de tester l'usage du produit et de le perfectionner à

travers les interventions et les retours des utilisateurs.

Les nouvelles possibilités technologiques permettent des nouveaux scénarios d'usage et des nouveaux systèmes d'informations, nous citons comme exemple les écrans tactiles qui nous procurent une utilisation de plus en plus intuitive, sensible et émotionnelle autour d'une narration interactive. « L'Internet des Objets est donc un Internet dont les objets sont capables de recueillir de nouveaux types de données, au moyen de capteurs distribués sur plusieurs environnements, et, à partir de ces interfaces numériques, de chercher de

Figure 4 : Les fonctions d'usage du mobilier nouvelles combinaisons informatiques et actions algorithmiques. La connexion est, à ce titre, un aspect central pour comprendre l'action d'objets connectés en réseau IdO. » (Barcelos, 2017)



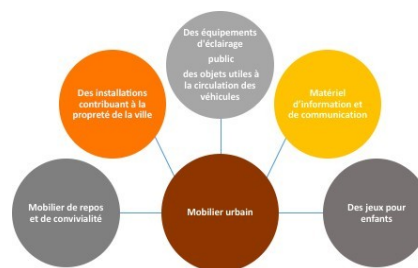
Le design prend comme objectif premier de faciliter la vie au consommateur. « Les innovations liées à l'expansion de l'électronique et des techniques de numérisation des contenus, signaux et signes en tous genres ont introduit des changements majeurs au sein des systèmes sociaux » (Mathien, 2005)

Ce critère interactif est déterminant dans la motivation de l'usage. Ce constat a trouvé écho dans le livre de Frédéric Kaplan « *La métamorphose de l'objet* », à travers lequel il incarne le produit interactif dans un objet de convoitise, désirable de la société de consommation. Ainsi, pour lui « l'interactivité va présenter un argument déterminant en faveur des nouvelles technologies. Elle deviendra un outil de médiation et de communication entre la sphère technologique et la sphère sociale, d'où l'importance qu'elle va acquérir au fil des années ». (kaplan, 2009)

II. LE MOBILIER URBAIN CONNECTÉ

Le mobilier urbain se définit par l'ensemble des objets qui sont installés dans l'espace public d'une ville pour

répondre aux besoins des usagers : poubelles de ville, abribus, panneaux publicitaires, lampadaires. Les fonctions du mobilier urbain (figure 4) sont multiples et offrent aux utilisateurs le moyen de se détendre, de se reposer, de s'informer et de se rencontrer....



Nos villes sont sans cesse en renouvellement permanent dicté essentiellement par les enjeux économique, écologique et technologique. Le comportement des usagers citoyens se modernise aussi et devient de plus en plus connecté à l'image de nos vies quotidiennes. La technologie offre aujourd'hui des moyens pour concevoir la ville intelligente, où toutes les installations publiques destinées aux citoyens (Lampadaires, abribus, bancs, poubelles, bornes...) n'ont plus seulement vocation à être utilisées pour sa fonction principale (éclairage, support assis...) mais aussi pour ses

Figure 3 : Processus de conception de l'objet fonctionnalités autres. Il s'agit de doter le mobilier urbain de fonctions adaptées à l'usage digital au moyen de capteurs intelligents. Le mobilier urbain se modernise et devient connecté, à l'image de nos vies quotidiennes. Ainsi le mobilier urbain *connecté* est donc la version connectée de tous ces éléments que les citoyens côtoient au quotidien. En effet, les infrastructures connectées sont de plus en plus un élément à prendre en compte dans le développement des espaces urbains. Pour les citoyens, l'IOT est un moyen pour améliorer la communication et la gouvernance des villes.

Ainsi, **Les abribus** sont dotés d'un système de communication interactive, permettant à l'utilisateur de recueillir les informations présentes à l'écran. **Les poubelles se veulent à tri sélectif**, Il est aussi possible de connaître en temps réel leur taux de remplissage. Les bancs se dotent quant à eux de points d'accès wifi et de prises de chargement alimentées grâce à des panneaux solaires.

Pour mieux comprendre de l'objet connecté urbain, Nous étudions quelques exemples pratiques de mobiliers

urbain, Nous montrons les éléments communs et distinctifs de leurs fonctionnements.

A. Les bennes à ordures intelligentes pour une ville plus propre start-up Taïwanaise Lidbot

Lidbot, un développeur taïwanais de capteurs intelligents pour poubelles. Lancé à Taïwan en avril 2018 par Ham Karami, sa proposition est d'installer des capteurs dans les poubelles de la ville pour suivre et enregistrer les données de gestion des déchets, fournissant des informations qui peuvent ensuite être utilisées pour optimiser les systèmes de déchets et de recyclage. « L'un des plus grands défis auxquels je suis confronté est de susciter l'intérêt des gens pour les déchets. Ce n'est pas l'industrie la plus attrayante, mais celle qui a besoin de beaucoup d'innovation » (Saunders, 2010), déclare Ham.

Figure 6 : Bin-e est une poubelle intelligente basée sur l'IoT et l'IA
Source <https://www.bine.world/>



Les capteurs dans les poubelles mesurent le taux de remplissage des bennes à ordures et communiquent les données à une application qui donne la possibilité aux agents d'opérer un suivi global et en temps réel de la gestion des ordures dans la ville. Les données récoltées permettent d'optimiser le ramassage des déchets, à l'échelle d'un quartier ou de la ville toute entière. Cette technologie permettra d'affiner le passage des camions poubelles. Le ramassage des déchets devient ainsi prédictif et intelligent, évitant que les bennes à ordures ne soient saturées.

B. La poubelle connectée start-up Bin-e

Bin-e est une poubelle intelligente basée sur l'IOT qui reconnaît, trie et comprime automatiquement les déchets. Il est né du besoin d'une solution intelligente

de tri des déchets là où un système de tri efficace est difficile à mettre en place. Dans les espaces publics et les bureaux, les gens ne trient souvent pas correctement les déchets en raison d'un manque de motivation, de connaissances ou d'infrastructures appropriées. Bin-e améliore la chaîne de recyclage en augmentant la quantité de ressources récupérées et en réduisant la quantité de déchets mis en décharge. Il transforme la gestion des déchets en un système intégré pour faciliter la voie vers une économie circulaire et durable. La compression automatique du plastique et du papier, a réduit la fréquence du vidage des bacs. Le dispositif différencie plastiques, cartons et déchets alimentaires. Bin-e garantit un tri précis des déchets, efficace à 92% selon ses concepteurs, grâce à une reconnaissance et un tri automatique basé sur l'intelligence artificielle. Ce système intelligent permet de rendre la gestion des déchets plus respectueuse de l'environnement.



C. Les bornes connectées pour guider les visiteurs Urbanflow

Le dispositif Urbanflow a pour but de guider les touristes dans la ville. Il s'agit d'une borne interactive munie d'une carte qui permet de

Figure 5 : Les bennes à ordures intelligentes pour une ville plus propre
<https://urlz.fr/hxv4>

géolocalise la position du visiteur, calculer son itinéraire pour aller à tel endroit, et l'aider à choisir le moyen de transport le plus pratique pour sa visite. Les bornes tactiles affichent toutes les informations qui peuvent leur être utiles. Elles informent les visiteurs sur les événements dans la ville et les lieux à visiter, les orientent vers les différents services dans la ville. La municipalité est plus réactive, elle est connectée en permanence à ses visiteurs, mais également à ses habitants pour répondre aux besoins. Elle peut ainsi adapter son service pour mieux satisfaire les citoyens.



D. L'arbre solaire

JCDecaux, leader mondial de la communication extérieure, propose son premier aménagement urbain « escale numérique », testé et installé massivement à Paris et à Londres depuis 2016. Le eTree ou l'Arbre Solaire est le premier projet du partenariat entre JCDecaux et Solar Tree Europ, une start up franco-israélienne .

L'Arbre Solaire Connecté dispose d'un feuillage en plaque photovoltaïques placé sur des troncs d'arbres (structure de l'abri pour crier l'ombre). Des sièges et des mini-tables sont fournis aux citoyens. Des bornes de recharge sont aussi disponibles pour l'utilisation d'un ordinateur portable ou autre avec une connexion Wi-Fi gratuite. L'arbre connectée rend service aux citoyens et distribue l'eau fraîche, éclaire la nuit, et permet la recharge des vélo électriques.



Des "eTree" ont déjà été installés dans une dizaine de villes

Figure 7 : Les bornes connectées pour guider les touristes dans le monde. Mais, c'est le premier spécimen planté en Europe.

Source : <https://urlz.fr/hxv4>

Dans les exemples que nous venons d'exposer, l'objet prend une nouvelle dimension dans l'espace Urbain. Il se dote d'une intelligence, une facilité et aisance dans les pratiques de tous les jours. Par son interaction il devient plus utile et plus pratique. Ainsi le mobilier urbain connecté a pour objectif de favoriser le lien social et la cohabitation sur les espaces publics, accroître le sentiment de quiétude, et d'accompagner aux changements des comportements inadéquats. Il est aussi un médiateur et détecteur de problèmes communautaires et individuels et amènent un retour du dialogue entre plusieurs intervenants.

Dans le tableau (tableau1) nous synthétisons l'apport du design dans l'évolution des fonctions d'usage offertes par le mobilier connecté.

Figure 8 : un arbre photovoltaïque "eTree"

Source : <https://urlz.fr/mhVB>

En France et à l'étranger, le "e Tree" est installé dans l'espace public par JCDecaux¹.

Le premier prototype qui a été installé dans la ville de Nevers, dans la Nièvre, a inauguré 29 mai 2017 le premier "eTree" ; c'est le premier spécimen planté en Europe.

« C'est un symbole de l'engagement numérique de la ville depuis 2014 », déclare le maire Denis Thuriot.

¹ JCDecaux, N°1 mondial de la communication extérieure, est aujourd'hui présent dans plus de 80 pays et 4 030 villes de plus de 10 000 habitants. Depuis plus de 55 ans, les produits de JCDecaux sont considérés comme la référence en matière d'innovation, de qualité, d'esthétique et de fonctionnalité. Grâce au savoir-faire de ses collaborateurs, les services proposés par le Groupe, notamment pour l'entretien et la maintenance, sont reconnus mondialement par les villes, les autorités aéroportuaires et de transports, ainsi que les annonceurs. JCDecaux est aujourd'hui le seul acteur mondial à exercer exclusivement le métier de la communication extérieure et

à en développer toutes les activités : mobilier urbain, publicité dans les transports et affichage grand format. A l'heure des villes intelligentes, JCDecaux se positionne pour en être l'un des acteurs majeurs et participe d'ores et déjà à l'émergence d'une ville connectée toujours plus humaine, ouverte et durable.

	Apprendre	Gérer les contraintes	Augmenter les performances informatives	Fournir un service plus rapidement	Offrir un meilleur confort
Les bennes à ordures intelligentes information sur le remplissage	+	+++	+++	+++	+
La poubelle connectée tri sélectif start-up Bins	+++	++	+++	++	+++
Les bornes connectées Urbanflow	+	++	+++	+++	+++
E Tree (Arbre solaire)	++	+++	+++	+++	+++

Tableau 1 Tableau récapitulatif des nouveaux service connectée

+ contexte faible
 ++ contexte moyen
 +++ contexte fort

- Mathien, M. (2005). *la « société de l'information » entre mythes et réalités*. Bruxelles: Bruylant.
- Saunders, R. (2010). *Smart Bins: The Key to Cleaner Cities?* . Récupéré sur <https://hivelife.com/lidbot/>
- Tortochot, E. (2004). *design(s): de la conception à la diffusion* . Italie : Editions Bréal

CONCLUSION

Le mobilier Urbain connecté vise l'amélioration de la qualité de vie, de la gouvernance, du développement de la politique urbaine. Par la conception intelligente du mobilier urbain on peut imaginer plusieurs scenarios qui auront pour objectif de contribuer progressivement à corriger les erreurs de gouvernance et d'inciter les citoyens à adopter un comportement plus responsable pour une ville durable. Le mobilier urbain intelligent est également vecteur d'avantages environnementaux ; les économies d'énergie sont plus réalisables et de plus en plus simple et rapide, ainsi la consommation énergétique est optimisée. Les trajets urbains sont mieux gérés et de plus en plus fluidifiés, les déplacements sont réduits au strict minimum...

BIBLIOGRAPHIE

- Barcelos, T. (2017). Les actions sociotechniques des objets connectés : des réflexions à partir de l'Internet des Objets - ,. *Interfaces Numériques*, v. 6, n. 2., Paris. Récupéré sur <https://www.unilim.fr/interfaces-numeriques/2685&file=1>
- Baudrillard, J. (1977). *Pour une critique de l'économie politique du signe*. Paris,: Edition Gallimard.
- Drouillat, B. (2016). *Le design interactif: Du web design aux objets connectés* .Paris : Dunod
- Guillaume, V. (2003). *L'ABCdaire du design* .Paris: Flammarion.
- kaplan, F. (2009). *La Métamorphose des objets*. Paris: FYP éditions.

Elaboration et caractérisation de nouveaux matériaux de type pérovskite simples ou complexes sans plomb $Ba_{1-x}A_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ (A=Eu,Sm)

BOUTAL N.¹, TAIBI K.²

¹Département de chimie faculté des sciences exactes, université Mohamed Ben Yahia, Jijel

^{1,2}Laboratoire de Cristallographie et thermodynamique, Faculté de Chimie, U.S.T.H.B., B.P. 32 El-Alia

RESUME

Les matériaux ferroélectriques actuellement utilisés sont des céramiques à base de plomb. De tels composés sont nocifs à l'environnement en raison de la toxicité et de la volatilité de l'oxyde de plomb. Notre travail intervient dans le cadre de la protection de l'environnement. Dans cet esprit de nouveaux matériaux sans plomb dérivés de $BaTiO_3$, par des substitutions cationiques en site dodécaédrique ont été examinés. La présente étude concerne des compositions relativement proches de $BaTiO_3$. Ainsi, nous avons élaborés les composés $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ $Ba_{1-x}Sm_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$. Les synthèses ont été réalisées par réaction à l'état solide. La pureté des phases obtenues a été contrôlée par DRX. L'étude des propriétés a été réalisée par des mesures diélectriques en température et en fréquence respectivement dans les gammes 77-400 K et 10^2 - $2 \cdot 10^5$ Hz. Les résultats obtenus montrent que les matériaux $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ et $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ présentent des propriétés ferroélectriques relaxeurs.

Mots- clés : *céramique, ferroélectrique, relaxeur.*

I. Introduction

Selon leur comportement en fréquence et en température, on distingue les composés ferroélectriques classiques (FC) des ferroélectriques relaxeurs (FR) [1]. Ces derniers présentent une forte dispersion en fréquence, caractérisée par une diminution du maximum de la permittivité diélectrique (ϵ'_{rmax}) et une augmentation de la température (T_m) associée à ce maximum lorsque la fréquence de mesure augmente. En outre la transition de phase diffuse et la polarisation ne disparaît pas à T_m comme dans le cas des

F.C. Les matériaux ferroélectriques actuellement utilisés sont des céramiques à base de plomb. De tels composés sont nocifs à l'environnement en raison de la toxicité et de la volatilité de l'oxyde de plomb. Dans le cadre du respect de l'environnement, les recherches actuelles sont orientées vers de nouveaux produits dépourvus de plomb mais qui présenteraient des performances similaires à celles actuellement utilisées dans l'industrie. C'est dans cet esprit que de nombreux travaux sont menés sur des matériaux pérovskites dérivés de $BaTiO_3$, obtenus par des substitutions cationiques (homovalentes ou hétérovalentes) en site A et/ou B [2].

C'est également dans cette perspective que se situe le présent travail : de nouveaux matériaux sans plomb dérivés de $BaTiO_3$, par des substitutions cationiques en site octaédrique et/ou dodécaédrique ont été examinés. Notre objectif est non seulement d'élaborer et de caractériser les céramiques, mais également de relier leurs propriétés ferroélectriques à leur composition et notamment à la nature des substitutions. Parmi les substitutions hétérovalentes couplées en sites A et B, nous avons examiné les compositions $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{1-y}Zr_y)$ pour $x = 0,025 ; 0,050$ et $y = 0,25$.

II. Préparation

Les compositions $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ sont préparées à partir des réactifs $BaCO_3$, Eu_2O_3 , Sm_2O_3 , TiO_2 et ZrO_2 avec une pureté de 99,9% (TABLEAU 1).

Les poudres sont préparées par réaction à l'état solide. Après pesée (200 à 250 mg de produit) et broyage fin durant 2 heures, le mélange stœchiométrique des produits de départ est placé dans un creuset en platine, puis introduit dans le four pour le traitement thermique.

La durée de calcination comprise entre 15 et 17 heures, et le domaine de température variant entre 850°C et 1300°C. La durée et la température de calcination dépendent de la nature des phases préparées.

En ce qui concerne le composé Sm_2O_3 , il a été au préalable chauffé à 1200°C pour éliminer l'eau ainsi que toute trace d'impureté car c'est un composé très hygroscopique.

La poudre obtenue après calcination est homogénéisée puis rebroyée finement au mortier d'agate durant 2 heures, puis pressée à 1.8 T.Cm⁻² pendant 1 minute, sous forme de disque de 8 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur environ. La pastille est d'abord pesée, ensuite placée dans un creuset en platine, puis frittée durant 4 heures à des températures comprises entre 1100 et 1400 °C.

Produit	Marque et pureté	Produit	Marque et pureté
BaCO ₃	(Merck, 99,9%)	TiO ₂	(Aldrich, 99,9%)
ZrO ₂	(Aldrich, 99,9%)	Eu ₂ O ₃	(Aldrich, 99,9%)
Sm ₂ O ₃	(Aldrich, 99,9%)		

TABLEAU I : CARACTERISTIQUES DES PRODUITS DE DEPART

III. Résultats et discussions

L'étude radiocristallographique sur poudre à température ambiante a permis de contrôler la pureté de différentes solutions solides et de limiter leurs domaines d'existence. A température ambiante, nous obtenons des phases pures pour $x = 0,025$. Malgré le choix optimal des conditions d'élaboration, dès la valeur $x = 0,050$, quelques raies d'impuretés apparaissent à côté des pics de Bragg. La figure 1 présente les diffractogrammes obtenus dans le cas des compositions $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{1-y}Zr_y)$ pour $x = 0,025$ (a) ; $0,050$ (b) et $y = 0,25$. La présence de ces impuretés peut être attribuée au fait que ces terres rares présentent une faible solubilité en site A des pérovskites et qu'ils sont généralement susceptibles de s'incorporer simultanément en site A et B.

Nous avons obtenu des phases avec quelques raies d'impuretés comme nous pouvons le constater sur les diffractogrammes de la figure 2 relatifs aux solutions solides de compositions $x = 0,025$ (a); $X=0,050$ et $Y=0,25$ pour la solution solide de formule $Ba_{1-x}Sm_{2x/3}(Ti_{1-y}Zr_y)O_3$.

Dans le domaine de compositions que nous avons explorées, les mesures diélectriques ont mis en évidence la présence du phénomène relaxeur dans tous les cas. Les figures (3, 4) et (5,6) illustrent les variations en température et en fréquence des permittivités relatives réelle (ϵ'_r) et imaginaire (ϵ''_r) dans le cas de céramiques de formules $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{1-y}Zr_y)$ et $Ba_{1-x}Sm_{2x/3}(Ti_{1-y}Zr_y)$ pour $x = 0,025$.

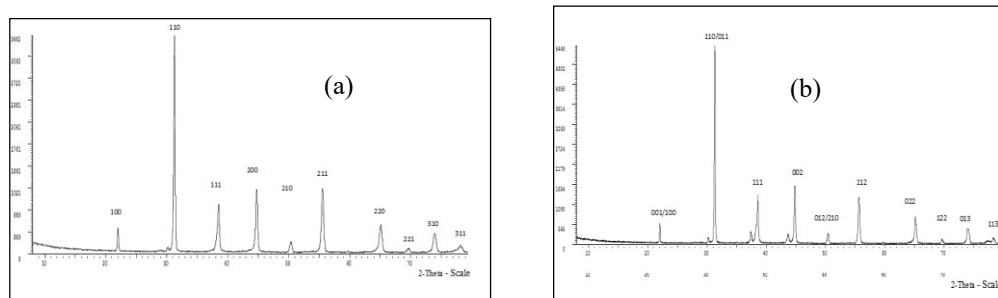


Fig. 1. Spectres de diffraction des rayons X du composé $Ba_{0.975}Eu_{0.017}(Ti_{0.75}Zr_{0.25})O_3$ (a) et du composé $Ba_{0.95}Eu_{0.034}(Ti_{0.75}Zr_{0.25})O_3$ (b) ; 0,050 (b) et $y = 0,25$.

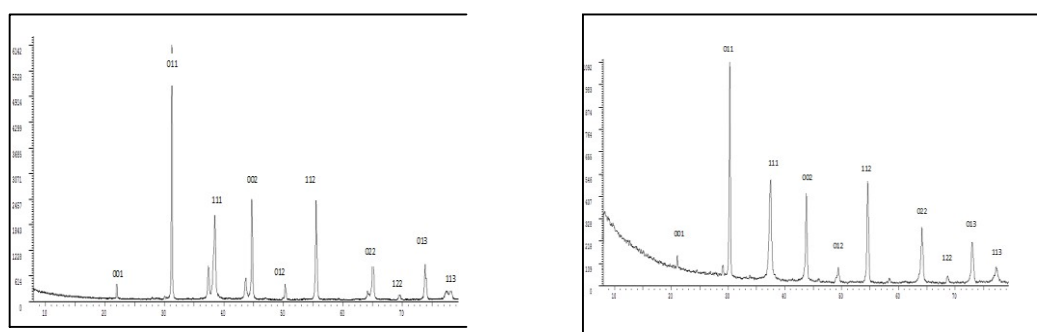


Fig. 2. Spectres de diffraction des rayons X du composé $Ba_{0.975}Sm_{0.017}(Ti_{0.75}Zr_{0.25})O_3$ (a) et du composé $Ba_{0.95}Sm_{0.034}(Ti_{0.75}Zr_{0.25})O_3$ (b) ; 0,050 (b) et $y = 0,25$.

Nous notons également que le caractère diffus de la transition (caractère relaxeur) s'amplifie principalement avec l'augmentation du taux de substitution en site B.

Par ailleurs, Le tableau II regroupe les principaux paramètres caractéristiques des différentes solutions solides explorées. Il ressort que le remplacement de Ti par Zr conduit à une diminution de T_m alors que $\Delta\epsilon''/\epsilon''$ et ΔT_m augmentent. Ceci implique que le caractère diffus de la transition de phase devient de plus en plus prononcé avec la substitution en site B d'ytane par le zirconium. D'autre part, nous n'observons pas une nette modification lors de la substitution de Ba par Eu. Lorsque x augmente de 0,025 à 0,050, T_m demeure pratiquement constant pendant que $\Delta\epsilon''/\epsilon''$ et ΔT_m augmentent légèrement ou varient de manière irrégulière.

Ceci est probablement dû au fait que le domaine de variation de x est faible pour que l'on puisse en tirer une conclusion rigoureuse sur l'évolution des caractéristiques relaxeurs dans ce cas.

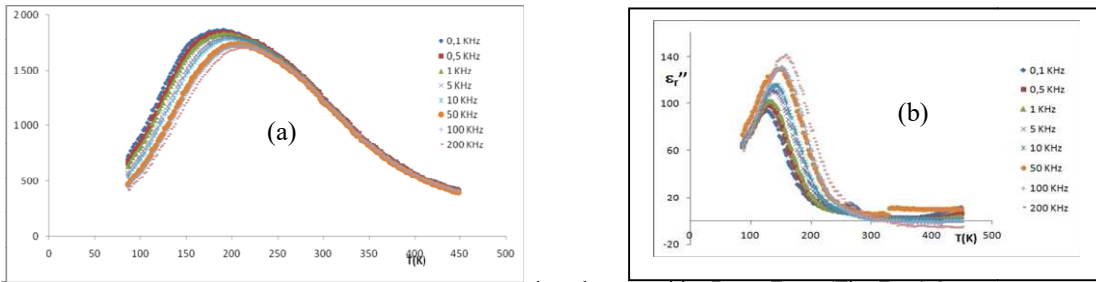
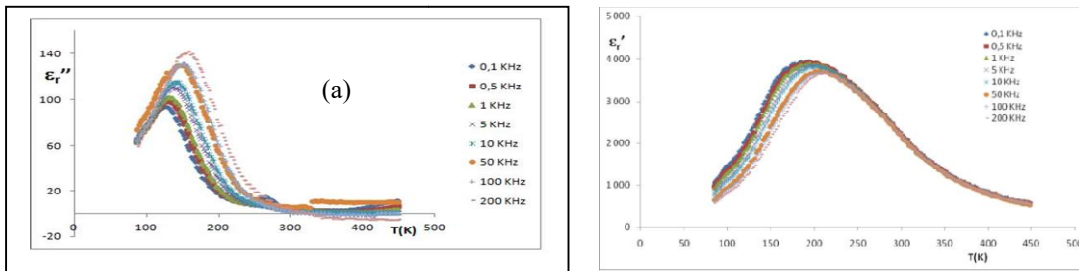


Fig. 2. Variation thermique de ϵ_r' (a) et ϵ_r'' (b) pour une céramique de composition $Ba_{0,975} Eu_{0,017} (Ti_{0,75}Zr_{0,25}) O_3$



céramique de composition $Ba_{0,950} Eu_{0,034} (Ti_{0,75}Zr_{0,25}) O_3$

Fig. 4. Variation thermique de ϵ_r' (a) et ϵ_r'' (b) pour une

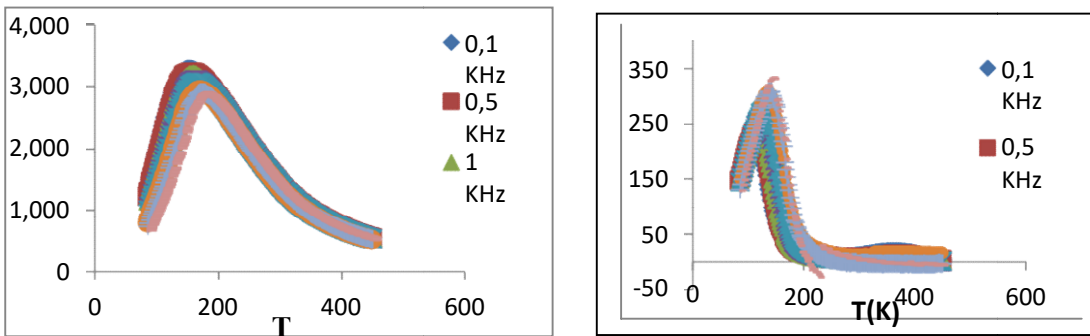


Fig. 5. Variation thermique de ϵ_r' (a) et ϵ_r'' (b) pour une céramique de composition $Ba_{0,950} Sm_{0,034} (Ti_{0,75}Zr_{0,25}) O_3$

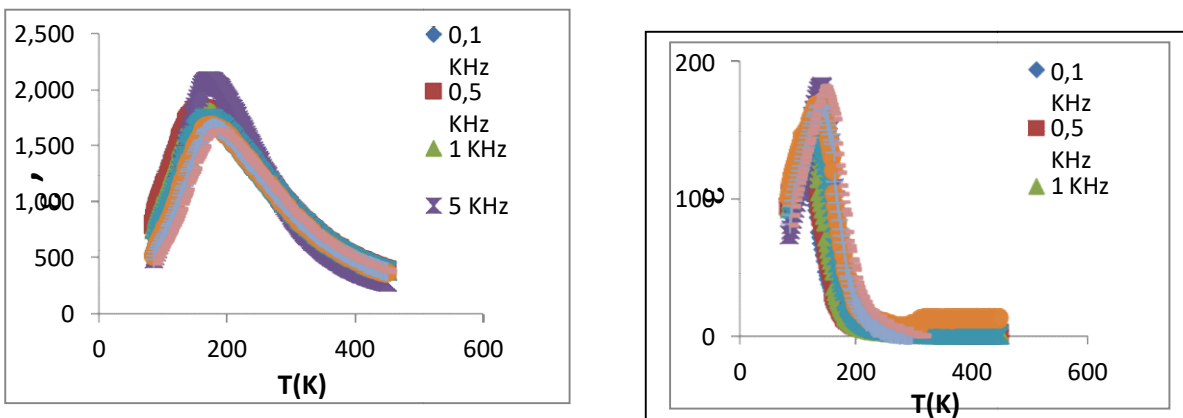


Fig. 6. Variation thermique de ϵ_r' (a) et ϵ_r'' (b) pour une céramique de composition $Ba_{0,950} Sm_{0,034} (Ti_{0,75}Zr_{0,25}) O_3$

TABLEAU II
 CARACTERISTIQUES RELAXEURS DE QUELQUES CERAMIQUES DE COMPOSITIONS $Ba_{1-x}Eu_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$

x	$T_m(K)(10^3Hz)$	$\Delta T_m(K)$	$\Delta \epsilon''/\epsilon''_r$
0,025	192	15	0,075
0,050	194	10	0,070

TABLEAU III
 CARACTERISTIQUES RELAXEURS DE QUELQUES CERAMIQUES DE COMPOSITIONS $Ba_{1-x}Sm_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$

x	$T_m(K)(10^3Hz)$	$\Delta T_m(K)$	$\Delta \epsilon''/\epsilon''_r$
0,025	155	22,1	0,10
0,050	163	20	0,12

Les résultats obtenus pour ce système concordent avec ceux signalés par d'autres auteurs pour des compositions similaires [3]. En effet, l'euporium est susceptible de se fixer en site A et B des structures de type pérovskite. Introduit en site A ($Ba_{1-x}Sm_{2x/3}TiO_3$) l'euporium (et samarium) améliore les caractéristiques diélectriques de $BaTiO_3$. A température ambiante, La valeur maximale de la permittivité est proche de 3000 pour la composition $x = 0,03$ sous une fréquence de 1 kHz. Dans tous les cas, l'ajout d'euporium dans le réseau de $BaTiO_3$ entraîne la diminution de la température de Curie. En outre, la transition de phase ferroélectrique-paraélectrique devient de plus en plus diffuse lorsque la quantité de Eu augmente.

IV. Conclusions

Diverses compositions dérivées de $BaTiO_3$ et de formule $Ba_{1-x}A_{2x/3}(Ti_{0,75}Zr_{0,25})O_3$ ($A=Eu,Sm$) ont été préparées et les céramiques correspondantes ont été obtenues par frittage à haute température. Cette étude a été menée en opérant par des substitutions homovalentes en site octaédrique (B) et hétérovalentes en site dodécaédrique (A) de la pérovskite $BaTiO_3$.

L'étude radiocristallographique sur poudre à température ambiante a permis de contrôler la pureté de différentes solutions solides et de limiter leurs domaines d'existence. A température les réflexions relatives aux phases présentant un comportement ferroélectrique relaxeur s'indexent dans la symétrie cubique

L'étude diélectrique a mis en évidence un comportement exclusivement de type ferroélectrique-relaxeur. Les caractéristiques diélectriques ont été reliées à la nature et à la taille des cations substitués.

Ces matériaux sans plomb, constituent une famille de relaxeurs très importante dans le cadre de la protection de l'environnement.

References

- [1] Cross L.E. *Ferroelectrics*,151(1994)305.
- [2] Ravez J. et Simon A., *J. Korean Phys.*32(1998) S 955
- [3] C. Huiying, Y. Xiaobing, H. Lifang, H. Xinyue, W. Yanhong and B. Guli , *J. rare earths*,189 (2007)25

