

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Mantouri De Constantine
Faculté Des Sciences de la Technologie
Département De Génie Civil



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de
MAGISTER
Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux de construction
Présenté Par :

AMINA REZIOUK

Thème

CARACTERISATION NON DESTRUCTIVE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Méthode électromagnétique

Soutenu le 28 / 05 / 2015.

Devant le jury composé de :

Dr GUETTECHE Med Nacer : Professeur
Dr ABDOU Kamel : Maitre de Conférence A
Dr ROUABAH Kamel : Maitre de Conférence A
Dr BEROUAL Ahmed : Maitre de Conférence A

Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mon père.

À ma mère.

À mon frère

À mes sœurs

À mon fiancé Ahmed.

À mon beau père

À ma belle mère

À mon beau frère

À tous les miens.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Ce travail d'initiation à la recherche a été réalisé au sein du laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'Université de Constantine 1, en collaboration avec le laboratoire microsystemes et Instrumentations (LMSI) - Département d'Electronique - Université Constantine1

Je remercie Monsieur le professeur Salah SAHLI Directeur du LMSI qui m'a accueilli dans son laboratoire et a mis à ma disposition l'appareil de mesure (impédance mètre).

J'exprime ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers Monsieur le Docteur **BEROUAL AHMED** pour l'aide qu'il m'a apportée tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont notamment aux membres du jury.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Mes pensées vont à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire, ainsi qu'à tous les anonymes administratifs qui ont travaillé dans l'ombre pour que je sois à ce stade.

Amína REZIOUK

المخلص :

هناك طريقتان لتحليل خصائص مادة ما ان طشوقيلن بنج ترميت ان طشوقيلن ال ح في شريت . في فزانخ داونى اح عبي ه زهني لمص اى صرب طشوقيلت لا تمى شريت , حتم في اسخ ع م ال خ لريت لش ب طيت ن ه مادة وهى ان س م ايتان لش ب طي ن ن خ ع ق ا و ب ان ماد م ه خ ال ل ن خ ع ان ال ق تسي ه زهني ل ص ي ت و م س ايتان م ادة . ان ان ه ي ط ل ت ان ل ح ي ت غ ن خ ج اس ب ا ف خ ي ح ع ط ي ان ال ق تسي ه ان س م ايتان لش ب ط ي ت و م س ايتان م ادة . ق ن اس خ ع م ه خ ي ق اس و خ ه ا م ع ه ي ف ي ا ت ع ذ د م ه و ا ر ج ق ي ل ي ه ان م ز ج م ه ا ج م ا ق ش ا ح و م ي ر ج ا خ ش .

الكلمات المفتاحية :

ان طشوقيلن بنج في شريت ان طشوقيلن ال ح في شريت ؛ ق ا و ب ن م ادة ؛ س م ايتان لش ب ط ي ت م س ايتان ق و ا ي ن م ز ج و م ي ر ج ال ط اس و م خ ي .

Résumé :

Deux types d'essais de caractérisation des matériaux sont connus : Les essais destructifs et les essais non destructifs. Dans ce travail, nous allons essayer d'approcher cette caractérisation par un essai non destructif. Il consiste en l'utilisation d'une caractéristique diélectrique du matériau pour suivre la variation de sa résistance à travers sa porosité. . La caractéristique électrique utilisée est la permittivité diélectrique. Le matériau concerné par cette étude est le mortier de ciment. Les courbes résultant des essais expérimentaux donnant la relation permittivité-porosité sont comparées à celles données par un certain nombre de modèles issus de lois de mélange. Cette comparaison est exploitée pour l'établissement d'un autre modèle.

Mots clés :

Essai destructif, essai non destructif, résistance, permittivité diélectrique, porosité, loi de mélange, modèle, mortier de ciment.

Abstract

Two types of materials characterization tests are known: The destructive testing and non-destructive testing. In this work, we will try to approach this characterization by non-destructive testing. It consists of the use of a dielectric characteristic of the material to follow the variation of its resistance through its porosity. The electrical characteristic used is the dielectric permittivity. The material involved in this study is the cement mortar. The curves resulting from the experimental tests giving the permittivity-porosity relationship are compared with those given by a number of models from mixing laws. This comparison is used to establish another model.

Key words:

Destructive testing, non-destructive testing ,resistance, dielectric permittivity, porosity, mixing law, model, cement mortar .

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	- 01 -
Références bibliographiques.....	- 02 -

CHAPITRE I : METHODES DE CARACTERISATIONS NON DESTRUCTIVES

I-1. Introduction.....	-03-
I-2. Le mortier	-03-
I-3. Porosité.....	-03-
I-4. Méthodes de caractérisation non destructives	-03-
I-4.1. Inspection visuelle.....	-03-
I-4.2. Par ressuage	-04-
I-4.3. Méthodes acoustiques : soniques et ultrasoniques	-04-
I-4.4. Méthodes magnétiques.....	-05-
I-4.5 Méthodes radiologiques.....	-05-
I-4.5.1 Rayons x.....	-06-
I-4.5.2 Gammagraphie.....	-06-
I-4.5.3 Neutronographie.....	-06-
I-4.5.4 Jauge.....	-06-
I-4.6 .thermographie.....	-07-
I.4.7.Méthodes optiques.....	-07-
I-4.8.Méthodes électriques.....	-07-
I-4.9. Méthodes diélectriques.....	-07-
I-4.9.1. Méthode capacitive.....	-08-
I-4.9.2. Méthode T.D.R. (Time Domain Reflectometry).....	-08-
I-5.Conclusion	-09-
Références bibliographiques.....	-10-

CHAPITRE II : PERMITTIVITE DIELECTRIQUE ET PHENOMENES DE POLARISATION

II-1 Introduction.....	-12-
II-2. Classification des matériaux.....	-12-
II-2.1 Classification basée sur la conductivité électrique.....	-12-
II-2.2. Classification basée sur les niveaux d'énergie.....	-12-

II-2.3. Classification basée sur la permittivité diélectrique.....	-12-
II-2.4. Classification basée sur la susceptibilité magnétique.....	-13-
II-3. Permittivité diélectrique.....	-13-
II-3.1. Phénomène de polarisation	-14-
II-3.1.1. Polarisation électronique.....	-15-
II-3.1.2. Polarisation ionique (ou atomique).....	-15-
II-3.1.3. Polarisation dipolaire (ou d'orientation).....	-15-
II-3.1.4. Polarisation macroscopique (ou de charge spatiale).....	-16-
II-3.1.5. Polarisation interfaciale.....	-16-
II-4. Permittivité.....	-17-
II-4.1. Permittivité relative.....	-17-
II-4.2. Permittivité absolue.....	-17-
II-4.3. Permittivité relative complexe.....	-18-
II-4.4. Facteur de dissipation diélectrique.....	-19-
II-5. Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux.....	-19-
II-5.1. Fréquence.....	-19-
II-5.2. Température.....	-20-
II-5.3. Humidité et autres impuretés.....	-20-
II-5.4. Structure physique et chimique.....	-21-
II-5.5. Intensité du champ alternatif	-21-
II-6. Permittivité effective et champ d'excitation.....	-21-
II-7. Mesure de la permittivité.....	-23-
II-7.1. Mesures au pont.....	-23-
II-7.2. Méthodes du circuit résonnant.....	-24-
II-7.3. Méthode de la double résonance.....	-24-
II-7.4. Mesures par lignes de transmission.....	-24-
II-7.5. Mesure dans le domaine des ondes micrométriques par méthode des guides d'ondes et des cavités résonnantes.....	-25-
II-8. Conclusion.....	-25-
Références bibliographiques.....	-26-

CHAPITRE III LOIS DE MELANGES

III-1. Introduction.....	-27-
III-2. Lois de Mossoti-Clausuis.....	-27-
III-3. Lois de Maxwell Garnett.....	-27-

III-4. Lois de Bruggeman.....	-28-
III-5. Lois de Looyenga.....	-29-
III-6. Lois de Lichtenecker	-29-
III-7. Lois de bornes de Wiener.....	-29-
III-8. Conclusion.....	-30-
Références bibliographiques.....	-31-

CHAPITRE IV PARTIE EXPERIMENTALE

IV-1. Introduction.....	-32-
IV-2. Données des essais.....	-32-
IV-3. Objectifs des essais.....	-33-
IV-4. Influence de la concentration en air (cavités d'air), de la fréquence sur la permittivité diélectrique effective pour un rapport E/C donné	-34-
IV-5. Influence du rapport E/C, de la concentration en air sur la permittivité diélectrique effective pour une fréquence donnée.....	-36-
IV-6. Influence de la fréquence sur la permittivité diélectrique effective pour une concentration en air donnée et un rapport E/C donnée.....	-43-
IV-7. Confrontation des résultats avec les modèles.....	-46-
IV-8. Prédiction de la valeur de la constante diélectrique d'un matériau à deux phases en utilisant simulink.....	-46-
IV-8.1. Le logiciel simulink.....	-46-
IV-8.2. Ajustement des résultats expérimentaux de nos essais avec les résultats des modèles établis.....	-49-
IV-9. Conclusion.....	-70-

CONCLUSION GENERALE.....	-71-
---------------------------------	-------------

ANNEXES.....	-72-
---------------------	-------------

LISTE DES SYMBOLES :

σ	La conductivité électrique.
ΔE_w	La largeur de la bande interdite.
$\text{Tan}\delta$	L'angle de perte.
η_m	La valeur de la susceptibilité magnétique.
α_k	La polarisabilité.
N_k	Le nombre de dipôles k par unité de volume.
E_L	Le champ inducteur qui polarise le dipôle.
Z_e	Une charge électronique.
F_a	Force d'attraction coulombienne.
c_p	La capacité du matériau.
c_v	La capacité du vide.
ϵ	La permittivité absolue.
ϵ_r	La permittivité relative.
ϵ_r^*	La permittivité relative complexe.
ϵ_0	La permittivité du vide.
σ	La conductivité électrique.
ϵ'	La permittivité réelle.
ϵ''	La permittivité imaginaire
τ	temps de relaxation.
ϵ_{eff}	La permittivité effective.
ϵ_m	La permittivité de la matrice hôte.
ϵ_i	La permittivité des inclusions.
P	La porosité.

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX :

- Figure I-1:** Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant pré émulsifié
- Figure I-2 :** Principe du contrôle non destructif par ultrasons
- Figure I-3 :** Principe de la radiographie.
- Figure I.4 :** Différentes familles de méthodes de **CND**.
- Figure II.1.** Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence
- Figure II.2.** Polarisation dipolaire ou d'orientation
- Figure II.3.** Schéma de principe d'un pont
- Figure III.1 :** Milieu modélisé par Maxwell Garnett dont toutes les inclusions sont ramenées à une inclusion unique : elles sont sans interaction.
- Figure III.2:** Milieu modélisé par Bruggeman dont les inclusions de permittivité ϵ_1, ϵ_2 sont en interaction et baignent dans un milieu moyen de permittivité ϵ_m .
- Figure III.3 :** Bornes de Wiener.
- Figure IV-1 :** Impédance mètre
- Figure IV-2 :** Schéma du dispositif de mesure
- Figure IV-3:** La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentration C% d'air et pour E/C=0,45
- Figure IV-4:** La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentration C% d'air et pour E/C=0,5
- Figure IV-5:** La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentration C% d'air et pour E/C=0,6
- Figure IV-6:** La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentration C% d'air et pour E/C=0,7
- Figure IV-7 :** la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 100khz
- Figure IV-8 :** la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 200khz
- Figure IV-9 :** la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 400khz
- Figure IV-10 :** la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 600khz

Figure IV-11 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 800khz

Figure IV-12 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 1000khz

Figure IV-13 : la variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 100khz

Figure IV-14 : la variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 200khz

Figure IV-15 : la variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 400khz

Figure IV-16 : la variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 600khz

Figure IV-17 : la variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 800khz

Figure IV-18: la variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 1000khz

Figure IV-19: La variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M0: échantillon plein

Figure IV-20 : La variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

Figure IV-21 : La variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air de 12,15%

Figure IV-22 : La variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air de 20,66%

Figure IV-23 : La variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air de 28,83%

Figure IV.24 : Schéma bloc via Simulink utilisé pour prédire la permittivité d'un mélange de deux phases, valable pour les lois de mélange de Maxwell Garnett, Bruggeman, Looyenga, Lichtenecker, les modèles Série et Parallèle.

Figure IV.25 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour E/C=0.45 et f=100 khz.

Figure IV.26 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour E/C=0.45 et f=200 khz.

Figure IV.27 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=400$ khz.

Figure IV.28 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=600$ khz.

Figure IV.29 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=800$ khz.

Figure IV.30 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=1000$ khz.

Figure IV.31 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=100$ khz.

Figure IV.32 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=200$ khz.

Figure IV.33 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=400$ khz.

Figure IV.34 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=600$ khz.

Figure IV.35 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=800$ khz.

Figure IV.36 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=1000$ khz.

Figure IV.37 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=100$ khz.

Figure IV.38 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=200$ khz.

Figure IV.39 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=400$ khz.

Figure IV.40 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=600$ khz.

Figure IV.41 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=800$ khz.

Figure IV.42 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=1000$ khz.

Figure IV.43 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=100$ khz.

Figure IV.44 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=200$ khz.

Figure IV.45 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=400$ khz.

Figure IV.46 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=600$ khz.

Figure IV.47 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=800$ khz.

Figure IV.48 : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=1000$ khz.

Figure IV.49 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 28.83\%$.

Figure IV.50 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 20.66\%$.

Figure IV.51 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 12.15\%$.

Figure IV.52 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 4.02\%$.

Figure IV.53 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 28.83\%$.

Figure IV.54 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 20.66\%$.

Figure IV.55 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 12.15\%$.

Figure IV.56 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 4.02\%$.

Figure IV.57 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 28.83\%$.

Figure IV.58 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 20.66\%$.

Figure IV.59 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 12.15\%$.

Figure IV.60 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 4.02\%$.

Figure IV.61 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 28.83\%$.

Figure IV.62 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 20.66\%$.

Figure IV.63 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 12.15\%$.

Figure IV.64 : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 4.02\%$.

Tableau II-1 : Les différents types de polarisation

Tableau IV.1: Identification des différentes boîtes utilisées dans le Modèle.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale:

Les performances d'un béton durci sont généralement jugées à travers des essais de résistance mécanique et de déformabilité (compression, traction, flexion, fluage...). La résistance mécanique est couramment déterminée suite à des écrasements d'éprouvettes de béton normalisées dans des presses ou par prélèvement direct d'échantillons de la structure (carottage). Ces essais sont qualifiés d'essais destructifs. Une autre catégorie d'essais appelée essais non destructifs est utilisée actuellement pour la détermination de la résistance mécanique [1-5].

Il est connu que la porosité ou la concentration en air d'un matériau influe considérablement sur sa résistance mécanique. Cette résistance diminue avec l'augmentation de la porosité [6] ; par conséquent la connaissance de la variation de la porosité constitue un indicateur sur la variation de la résistance

Dans ce travail, nous allons essayer d'approcher cette résistance mécanique indirectement en passant par une méthode non destructive. Cette dernière consiste en l'utilisation d'une caractéristique diélectrique du matériau pour suivre indirectement la variation de sa résistance à travers la variation de sa porosité en fonction de cette caractéristique. La caractéristique diélectrique utilisée est la permittivité. Plusieurs techniques basées sur cette propriété ont connus le jour [7-10].

Pour cela un ensemble d'essais ont été réalisés sur un mortier de ciment qui présente un comportement proche de celui du béton d'une part et pour lequel la détermination de la permittivité est plus simple d'autre part.

Nous avons examiné la variation de la porosité en fonction de la permittivité diélectrique pour différentes valeurs du rapport E/C (le rapport de la quantité massique d'eau sur celle du ciment) et pour un ensemble de fréquences appliquées.

Les résultats obtenus sont traduits par des courbes. Ces courbes sont comparées à des courbes données par un certain nombre de lois de mélanges; ce qui nous a servi de proposer un modèle donnant la variation de la porosité en fonction de la permittivité.

Ce manuscrit comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différentes techniques non destructives de caractérisation des matériaux.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les différentes méthodes de classification des matériaux du point de vue électrique ainsi que certains détails relatifs à la permittivité diélectrique et aux phénomènes de polarisation apparaissant dans le matériau lorsqu'un champ électrique lui est appliqué.

Le troisième chapitre est dédié aux lois de mélange les plus célèbres.

Le quatrième chapitre présente l'essentiel de notre travail à savoir la partie expérimentale dans laquelle nous avons exposé le dispositif de mesure de la permittivité, les différents essais réalisés ainsi que les résultats obtenus.

Une conclusion générale mettant en évidence les résultats obtenus clôture le document.

Des annexes regroupant les données des différents essais sont exposées en fin du document.

Références Bibliographiques

- [1] B. Pincent, D. Méline and J. Auriol, Measurement of the moisture content variation in non saturated, compacted clays, Geoconfine 93, Arnould, Barrès and Côme (eds), 1993.
- [2] J.P. Baron, La mesure de la teneur en eau par les méthodes nucléaires, Journées de Physique. L.C.P.C., 1987, pp.151-156.
- [3] P.J. Tumidajski, A.S. Schumacher, S. Perron, P. Gu and J.J. Beaudoin, On the relationship between porosity and electrical resistivity in cementitious systems, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 4, 1996, pp. 539-544.
- [4] P.J. Tumidajski, Electrical conductivity of Portland cement mortars, Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 4, 1996, pp. 529-534.
- [5] Zhongzi Xu, Ping Gu, Ping Xie and J.J. Beaudoin, Application of A.C. impedance techniques in studies of porous cementitious materials, Cement and Concrete Research, Vol. 23, 1993, pp. 1007-1015.
- [6] Mohamed HASSOUNE, Fouad GHOMARI, Abdelhafid KHELIDJ, Abdelillah BEZZAR, Brahim TOUIL, Influence Des Paramètres De Composition Et De Cure Sur La Diffusivité Des Bétons A Base De Matériaux Locaux ; « Nature & Technologie ». A- Sciences Fondamentales Et Engineering, N° 10/Janvier 2014, France.
- [7] Davis J.L., Chudobiak W.J., In situ method for measuring relative permittivity of soils, Geological Survey of Canada, Ottawa, 1975, paper 75-1, A, pp.75-79.
- [8] G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan, Electromagnetic determination of soil water content using T.D.R. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines, Soil Science Society of America. Journal, Vol. 46, 1982.
- [9] G.C. Topp, J.L. Davis, Measurement of soil water content using T.D.R. : a field evaluation, Soil Science Society of America. Journal, Vol. 49, 1985.
- [10] O. Buyukozturk, H.C. Rhim, Radar Imaging of concrete specimens for nondestructive testing, Construction and Building Materials, Vol. 11, N° 3, 1997, pp. 195-198.
- [11] H.C. Rhim, O. Buyukozturk, Electromagnetic properties of concrete at microwave frequency range, ACI Materials Journal, Vol. 95, N° 3, 1998, pp. 262-271.

CHAPITRE I :

**METHODES DE
CARACTERISATION NON
DESTRUCTIVES**

I-1. Introduction :

Une technique (méthode) de caractérisation non destructive (TND) est un examen, un essai, ou une évaluation exécutée sur n'importe quel type d'objet test sans changer ou apporter des modifications à cet objet de quelque façon que ce soit, afin de déterminer l'absence ou la présence de discontinuités qui peut avoir un effet sur l'utilisation de cet objet ; en d'autres termes, l'examen d'un objet qui ne doit pas affecter sa fonctionnalité.

Nous allons dans ce qui suit exposer les principales méthodes non destructives de caractérisation des matériaux ou structures.

Cependant et comme le matériau sur lequel nous avons effectué nos essais est un mortier de ciment nous présentons en premier certaines notions relatives à ce matériau.

I.2. Le mortier :

Le mortier est un des matériaux de construction, composé d'un liant (généralement du ciment), de l'eau, du sable, d'adjuvants et éventuellement d'additions quand il est nécessaire.

Le ciment représente le constituant dont les grains sont de l'ordre de quelques micromètres alors que ceux du sable peuvent varier de quelques μm à environ 5 mm. Leur granulométrie est définie de la même manière que pour les gros granulats.

L'eau du mélange hydrate progressivement le ciment.

Plusieurs types de mortier sont distingués : le mortier de ciment, le mortier de chaux, le mortier bâtard, le mortier industriel... L'emploi du mortier est varié. Il est utilisé principalement dans le hourdage de maçonnerie (assemblage des éléments maçonnés) et comme enduit et possède un ensemble de caractéristiques telles que l'ouvrabilité, la prise, le gonflement, le retrait et la résistance mécanique.

I.3. Porosité :

Une autre propriété importante du mortier est la porosité. Elle est définie comme le volume total des vides (pores) contenus dans un m^3 du matériau. Les dimensions des pores vont d'une dizaine de nanomètres aux millimètres. Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau libre. Cette eau libre ne participe pas à l'hydratation du ciment.

Dans notre étude nous nous intéressons aux pores remplis d'air. Ces pores sont appelés inclusions alors que le matériau qui les contient (mortier) est appelé matrice mère ou matériau hôte.

I-4. Méthodes de caractérisation non destructives :

I-4.1. Inspection visuelle :

La plus simple et la plus immédiate des méthodes est la méthode basée sur l'inspection visuelle [1]. Les spécialistes du domaine peuvent à partir de constats visuels distinguer les signes d'imperfection sur un élément d'une structure et les lier à la fonctionnalité de celle-ci, ce qui permet de donner une indication préliminaire de l'état de la structure, et de formuler les recommandations nécessaires. La technologie est aussi venue soutenir cette méthode, en offrant des capteurs complémentaires de l'œil (caméras et appareils numériques), des moyens

d'enregistrement (pour un suivi dans le temps) ainsi que des procédés d'analyse d'image pour l'interprétation. Cette méthode reste néanmoins très subjective puisque les résultats sont étroitement liés à l'expérience et au jugement de l'inspecteur.

I-4.2. Par Ressuage :

C'est une méthode destinée à révéler la présence de discontinuités ouvertes en surface de pièces métalliques, essentiellement, mais aussi en céramique [2]. Elle consiste à badigeonner (par immersion ou par pulvérisation électrostatique, parfois mais rarement, au pinceau) la cible avec un liquide fluorescent ou coloré en rouge, qui pénètre dans les discontinuités. Après nettoyage de la cible, un révélateur est appliqué et, en faisant « ressuer » le liquide resté dans les fissures, celui-ci va les révéler (figure I.1)

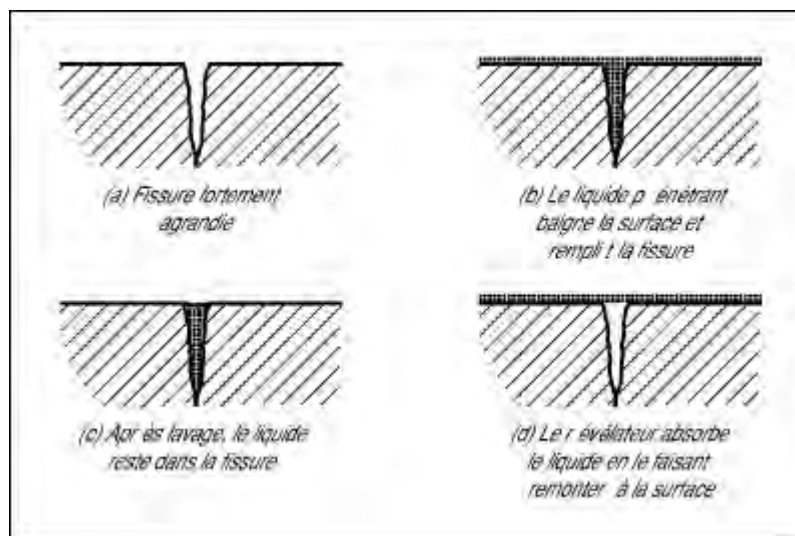


Figure I-1: Principe de la méthode de ressuage par liquide pénétrant pré émulsifié

I-4.3. Méthodes acoustiques : soniques et ultrasoniques :

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans la pièce à contrôler c'est-à-dire sur les propriétés acoustiques de cette dernière [3, 4, 5,6]. Le train d'onde émis se réfléchit dans le fond de la pièce et sur les défauts puis revient vers le transducteur (qui joue souvent le rôle d'émetteur et de récepteur). L'interprétation des signaux permet de positionner le défaut et de définir ses dimensions relatives. Cette méthode présente une résolution spatiale élevée et la possibilité de trouver des défauts en profondeur. L'étape d'inversion est simple, du moins pour les pièces géométriquement et matériellement simples. Par contre, c'est une méthode lente car il faut faire un balayage mécanique exhaustif de la pièce. Il est d'ailleurs souvent nécessaire de contrôler plusieurs surfaces de la pièce pour pouvoir faire une représentation tridimensionnelle des défauts. Cette technique sont largement employée dans les domaines de la métallurgie (figure I-2).

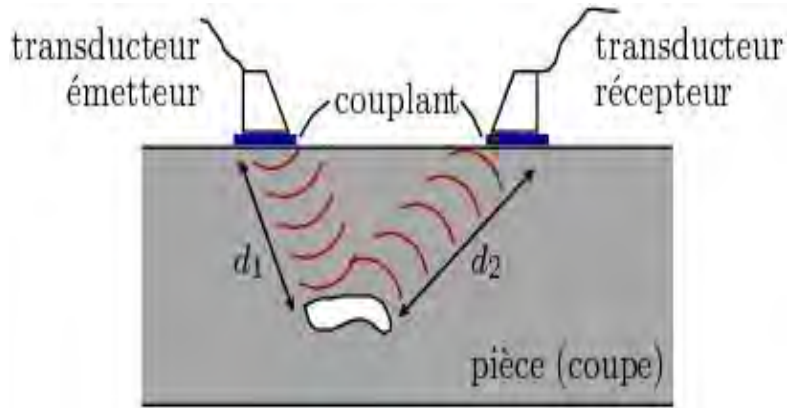


Figure I-2 : Principe du contrôle non destructif par ultrasons

I-4.4. Méthodes magnétiques :

Ces méthodes sont utilisées dans l'inspection interne des matériaux métalliques et des alliages [7]. L'une des méthodes les plus communément utilisées est la méthode du flux de fuite magnétique. [8, 9, 10,11]. Le principe de base de cette méthode est que lorsque une discontinuité, c'est à dire un défaut ou une inclusion sont présents près de la surface d'un matériau ferromagnétique, un flux de fuite se développe. La résistance magnétique dans cette position augmente jusqu'à une valeur très élevée par rapport au reste du matériau. Si le matériau ferromagnétique est magnétisé près de la saturation, le flux magnétique est perturbé par la discontinuité et est dévié dans la région au-dessus de la partie défectueuse comme le flux de fuite, qui peut être détecté par un capteur magnétique. Cette méthode est sensible surtout aux inclusions allongées.

I-4.5 Méthodes radiologiques :

Cette méthode présente l'avantage de fournir des images directement exploitables. L'étape d'inversion peut être extrêmement réduite et la résolution spatiale excellente. Toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. De plus, cette méthode est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie difficile.

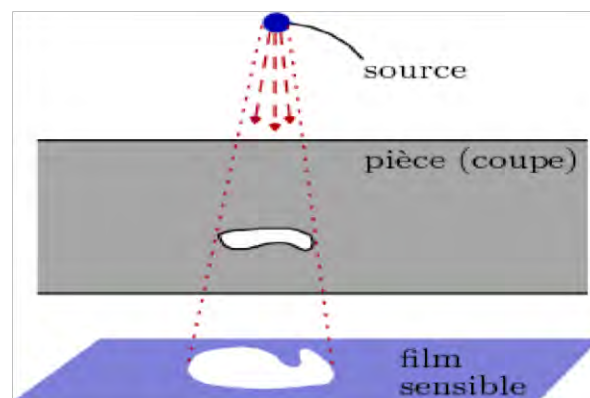


Figure I-3 : Principe de la radiographie.

Nous distinguons principalement quatre techniques radiologiques : [12,13]

I-4.5.1 Rayons X :

Les rayons X sont utilisés pour réaliser des radiographies (images visibles). L'avantage de cette technique est de fournir des informations directement exploitables sur l'intérieur des objets ou des matériaux. L'étape d'inversion peut être assez réduite et la résolution spatiale suffisamment bonne. Toutefois, l'interprétation des images demande de l'expertise. Aussi la réalisation des clichés nécessite des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement

Dans l'industrie lourde, le contrôle à l'aide des rayons X est utilisé notamment pour les soudures dans les centrales nucléaires et les chantiers navals et pétroliers, la corrosion des tuyaux, la structure des matériaux composites ou les fissures dans les pièces mécaniques complexes.

I-4.5.2 Gammagraphie :

Cette technique de radiographie industrielle utilise une source de rayonnements gamma. Elle se rapproche de la radiographie par rayons-X mais nécessite plus de précautions. La qualité d'image est également moins bonne. L'avantage principal réside dans l'énergie du rayonnement qui permet une meilleure pénétration que par les rayons-X et la plus grande compacité des projecteurs et des sources.

La technique consiste à placer la pièce à radiographier entre la source de rayonnements et un film photographique contenu dans une cassette souple ou rigide. Après un temps d'exposition dépendant de la nature et de l'épaisseur du matériau radiographié, le film est développé et révèle les défauts existant éventuellement à l'intérieur de la pièce. Les domaines d'utilisation sont nombreux (chaudronnerie, fonderie, industrie du pétrole, construction navale).

I-4.5.3 Neutronographie :

Le principe de la neutronographie est similaire à celui de la radiographie X. Elle peut être effectuée grâce à un faisceau neutronique issu d'un réacteur, d'un accélérateur d'ions. Elle est notamment utilisée pour le contrôle de matériaux hydrogénés situés à l'intérieur d'enceintes métalliques.

I-4.5.4 Jauge :

Le principe des jauges est basé sur la loi de l'atténuation des rayonnements. On distingue :
Jauges de niveau : elles indiquent la présence ou l'absence de matériau sur le trajet horizontal du faisceau (source et détecteur placé de part et d'autre du matériau). Les sources utilisées sont des émetteurs bêta ou gamma selon l'épaisseur et la densité du matériau à mesurer. Elles sont utilisées pour le contrôle des réservoirs de liquides, des silos (sable, grains, ciment, etc.).

Jauges d'épaisseur : si le matériau est de densité constante, l'intensité du signal reçu par le détecteur sera fonction de l'épaisseur de celui-ci. Elles sont utilisées pour la mesure en continu de produits en feuilles : papiers, tissus ou caoutchouc par exemple.

I-4.6 .Thermographie :

Les méthodes de contrôle thermique consistent à exciter un matériau ou une structure par un apport d'énergie (mécanique, photonique, chauffage par induction, air chaud...). La diffusion de la chaleur dans le matériau et l'impact qu'elle a sur la distribution de température de surface renseignent sur les propriétés thermo physiques des matériaux et sur d'éventuels défauts ; un temps de propagation d'une onde de chaleur dans un matériau peut par exemple permettre de mesurer la diffusivité thermique du matériau et ainsi en déduire la conductivité thermique.

Les principaux avantages de l'ensemble de ces méthodes résident dans la possibilité d'effectuer un contrôle sans contact et automatisable. Les inconvénients sont liés à la lenteur du contrôle, au coût de l'investissement et à la difficulté de mise en œuvre des étapes d'inversion pour établir le diagnostic.

I.4.7.Méthodes optiques :

Les méthodes optiques de mesure de champs ont l'avantage de ne pas interagir avec l'objet contrôlé [14]. Certaines méthodes, comme la photoélasticimétrie, le moiré et l'holographie ont été employées par le passé (il y a environ une vingtaine d'années) mais se sont confrontées à des difficultés de mise en œuvre sur le terrain.

Avec le développement de l'informatique et de la vidéo, ces techniques sont aujourd'hui des méthodes dont l'utilisation est de plus en plus simple. Mais il ne faut pas perdre de vue la difficulté d'interprétation qui demande encore aujourd'hui une très bonne connaissance de la mesure et de la physique des phénomènes mis en jeu.

Parmi cette grande famille, nous pouvons citer trois techniques de mesure optiques : la photogrammétrie, la projection de franges et l'interférométrie. Ces méthodes sont, de manière générale, de plus en plus courantes dans le monde industriel et notamment en génie civil

I-4.8. Les méthodes électriques :

Elles reposent sur la mesure des différences de potentiel, des intensités des courants ou de la capacité au sein du matériau, dus, soit à des réactions électrochimiques dans le matériau, soit à des sollicitations artificielles [15,16]. Cette famille regroupe les méthodes suivantes : mesure de la résistivité électrique, mesure du potentiel de corrosion (potentiel d'armature), mesure de la résistance de polarisation. Ces méthodes ont plusieurs applications dans le domaine de la corrosion des aciers.

I-4.9. Méthodes diélectriques :

Cette méthode est basée sur la détermination de la permittivité diélectrique, résultat de phénomènes de polarisation des porteurs de charge liés. En effet, les porteurs libres se déplacent sous l'effet du champ électrique donnant lieu à des phénomènes de conduction électrique. La permittivité diélectrique dépend de la fréquence du signal d'excitation. On distingue trois domaines de fréquences : le domaine des fréquences inférieures à 10 MHz, celui de la polarisation ionique, celui entre 10 MHz et 10 GHz, et enfin le domaine des fréquences supérieures à 10 GHz où la permittivité de nombreux matériaux diminue

fortement. La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu varie en fonction de sa permittivité. La constante diélectrique (ou permittivité relative) des matériaux utilisés surtout en génie civil varie sur une large gamme. Elle est de 80 pour l'eau, 2 à 5 pour la partie solide, 1 pour l'air et 4 à 5 pour la glace. Compte tenu de ces contrats, le constant diélectrique d'un milieu varie surtout en fonction de sa teneur en eau.

Il existe deux méthodes de mesure : la méthode capacitive où on mesure la capacité d'un condensateur formé du matériau étudié et la méthode par réflectométrie dans le domaine temporel [17, 18,19] qui est une méthode tout à fait nouvelle. Les électrodes de mesure capacitives peuvent être de très petite taille et concerner des volumes de quelques cm³ à plusieurs dm³. La méthode TDR exige une longueur de 10 cm donc des échantillons de matériaux d'un volume décimétrique. Ces méthodes ont la réputation d'être sensibles à la température et à la résistivité du milieu.

I-4.9.1. Méthode capacitive :

Pour mesurer la teneur en eau, on utilise le fait que la fréquence varie avec la teneur en eau d'un milieu donné. Pour cela, on place les électrodes dans le circuit d'un oscillateur électronique de fréquence élevée, 38 MHz environ, bien adaptée à la mesure de teneur en eau. L'utilisation d'un système à double fréquences, isolant provisoirement les électrodes, permet d'améliorer la précision de mesure. L'étalonnage fréquence-teneur en eau, corrigé de l'effet de température, permet de mesurer en continu la teneur en eau du sol. La forme des électrodes des sondes capacitives est très variée. Pour les mesures de surface, le système pointe-anneau (30 mm de longueur) est bien adapté.

Pour optimiser ce capteur et limiter les effets (capacités en particulier) parasites, l'électronique associée est placée le plus près possible des électrodes. D'autre part, ces circuits doivent résister aux différentes contraintes environnementales auxquelles elles sont exposées sur site : pluie, température, foudre ... Si cette protection est envisageable lorsque le capteur est en surface, une fois enterrée, donc inaccessible, la moindre panne de l'électronique le rend inutilisable.

I-4.9.2. Méthode T.D.R. (Time Domain Reflectometry):

La méthode par réflectométrie dans le domaine temporel (Time Domain Reflectometry) est basée sur l'analyse du comportement d'une onde électromagnétique émise dans le milieu étudié. Elle utilise le fait que : (1) la vitesse de propagation de cette onde est fonction de la permittivité du milieu ; et (2) cette onde se réfléchit en partie à chaque discontinuité d'impédance de la ligne de transmission. L'onde qui est une impulsion électrique à très haute fréquence délivrée par un générateur à impulsions, parcourt la ligne, puis la sonde, en se réfléchissant à l'entrée et à l'extrémité de la sonde. La mesure du temps aller-retour de l'onde, au niveau de la sonde, au moyen d'un oscilloscope ultra-rapide permet d'en déduire la permittivité apparente du sol.

Les sondes sont le plus souvent bifilaires, formées de deux électrodes métalliques parallèles reliées à un câble électrique d'impédance adaptée qui rejoint le générateur oscilloscope de mesure.

Notons que les méthodes capacitives et T.D.R. permettent toutes deux de mesurer la permittivité diélectrique. Et c'est pourquoi elles sont souvent regroupées ensemble.

D'autres méthodes basées sur le principe de l'émission d'une onde électromagnétique dans l'hétérostructure et de l'analyse de son comportement (absorption, réflexion, réfraction) ont été également développées ces dernières années. Parmi celles-ci, les méthodes utilisant des radars à ultra large bandes et [20-30] plus particulièrement la méthode de la coupe radar verticale (Vertical Radar Profiling –VRP) qui connaît un intérêt croissant. [25-30] Les méthodes radars permettent d'effectuer de l'imagerie à haute résolution pour visualiser les variations de fissures et de cavités dans les hétérostructures, de déterminer la permittivité diélectrique de l'hétérostructure, sa teneur eau et sa porosité et de localiser les inclusions. Ces méthodes permettent, à travers la mesure des propriétés diélectriques, d'évaluer les performances des hétérostructures ou de nouveaux matériaux de construction.

I.5.CONCLUSION :

Les méthodes de caractérisation non destructives sont multiples. Chacune de ces méthodes est applicable à un domaine bien déterminé pour lequel les résultats qu'elle donne sont fiables. Dans notre cas, nous avons opté pour l'utilisation de la méthode basée sur la permittivité diélectrique.

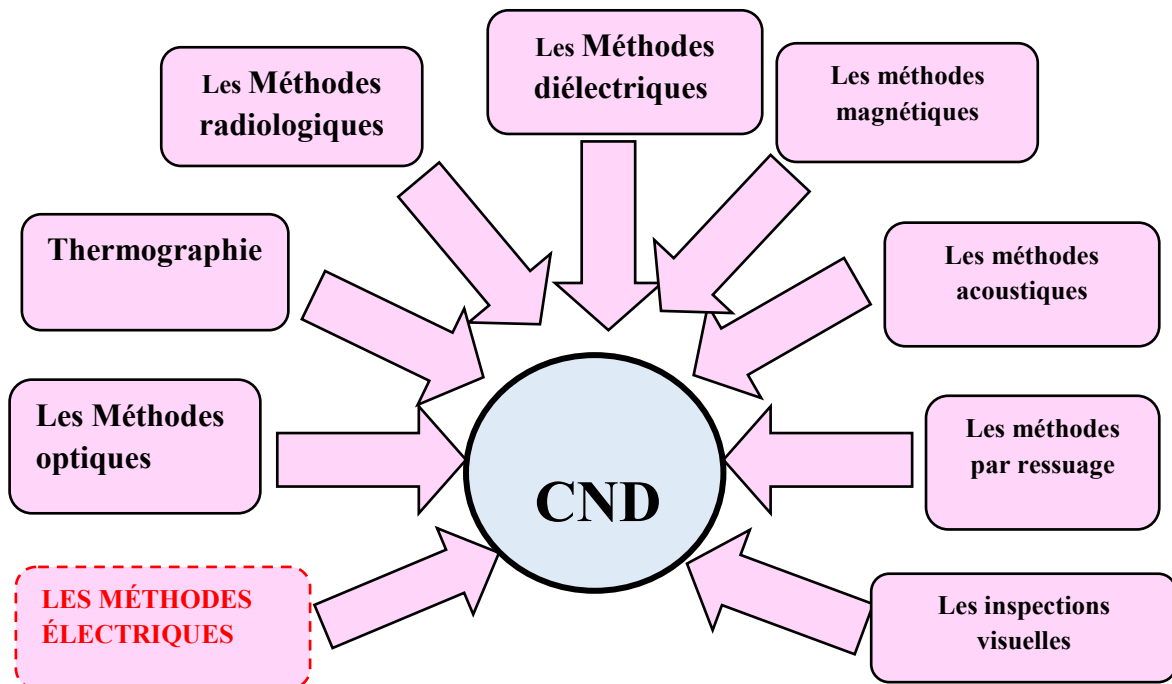


Figure I.4 : Différentes familles de méthodes de CND.

Références Bibliographiques

- [1] Graybeal.B, Phares. B, Rolander. D, Moore. M, Washer. G, *Visual Inspection of Highway Bridges*, Journal of Non-destructive Evaluation, vol. 21, Issue 3, pp. 67-83 (September 2002).
- [2] Manuel de ressuage. Cahiers du COFREND Fascicule I : Notions sur la perception des images des défauts. Annexe 2, no 7, déc. 1985.
- [3] Heving. G, Utilisation des ondes de surface pour l'auscultation des structures en génie civil : application à la caractérisation des fissures de surface, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble), 160 p. (1998).
- [4] Hassaim . M, Évaluation de la qualité de la peau du béton par analyse spectrale des ondes de surface, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, 149p. (1999).
- [5] Garnier. V, Abraham O, Dondonne. E, Marlot . D, Chapitre B3 : Méthodes d'évaluation non destructive par propagation d'ondes mécaniques, pp. 201-234.
- [6] Bretsse . D, Abraham. O, Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton, ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris),555 p. (2005).
- [7] H.V. Atkinson and G. Shi, "Characterization of inclusions in clean steels : à review including the statistics of extremes methods", Progress in Materials Science 48, 2003, pp.
- [8] M. Wakoh, Curr Adv. Mater Proc. 1993,6,pp.1172-3
- [9] H.Tanabe, Y. Matsufuji, Yosuji, S. Ando, J. Iron Steel Inst. Jpn, 1991,pp.63-9.
- [10] Y. Matsuoka, Y. Nakamura, Nagamura. Nippon Steel Rechnical Report 1991,14,pp63-6.
- [11]P. Neu, P. Piggi, B. Sarter, Proc. 3rd Int. Conf. 'Clean steel', Balatonfured, Hungray,june1986,edited and published by the institute of ,etals, London, 1987,pp.99-102.
- [12]J.Diji, D.Manneveld, Rabennerg, Ironmaking and Steelmaking, 1993,20,pp.75-80.
- [13]D.E. Gridero, P.K, Ausburn, J. aNon-Destructive.Test, 1987.
- [14]Taillade F. Méthodes optiques d'évaluation non destructive, ISBN 2-85978-405-5, Presses de l'École Nationales des Ponts et Chaussées (Paris), (2005) Chapitre B8,pp. 329-352.
- [15]Lataste , J.F, Évaluation Non Destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armépar mesures de résistivités électriques, Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 295 p.(Décembre 2002).
- [16]Andrade ,C, ALONSO. C, Electrical methods used in the characterization of reinforced concrete and steel corrosion, International RILEM Congress, edition Bournazel J.-P. et Maliery, Arles, pp. 196-206 (September 1996).
- [17]Davis;J.L., Chudobiak, W.J., 1975. In situ method for measuring relative permittivity of soils, Geo logical Survet of Canada; Ottawa, paper 75-79, A, pp75-79.
- [18]Topp, G.C., Davis , J.L., and Annan, A.P,1982. Electromagnetic determination of soil water content using T.D.R. Evaluation of installation and configuration of parallel trasmission lines, Soil Science Society of America. Journal, Vol. 46.

- [19] Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P., 1985. Measurement of soil water content using T.D.R., a field evaluation, Soil Science Society of America. Journal, Vol. 49.
- [20] Buyukozturk, O., and Rhim, H.C., 1997. Radar Imaging of concrete specimens for nondestructive testing, Construction and Building Materials, Vol. 11, N° 3, pp. 195-198.
- [21] Rhim, H.C., and Buyukozturk, O., 1998. Electromagnetic properties of concrete at microwave frequency range, ACI Materials Journal, Vol. 95, N° 3, pp. 262-271.
- [22] J.L. Davis, A.P. Annan, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: Geophysical Prospecting, 37, 1989, pp. 531-551.
- [23] M.J. Eppstein, D.E. Dougherty, Efficient three-dimensional data inversion: Soil characterization and moisture monitoring from cross-well ground-penetrating radar at a Vermont test site, Water Resources Research, 34, 1998, pp. 1889-1900.
- [24] K. Gerlitz, M.D. Knoll, G.M. Cross, R.D. Luzitano, and R. Knight, Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets, Proc. SAGEEP'93, San Diego, CA, 1993, pp. 561-572.
- [25] R.J. Greaves, D.P. Lesmes, J.M. Lee, and M.N. Toksov, Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar, Geophysics, 61, 1996, pp. 683-695.
- [26] B.A. Hardage, Vertical Seismic Profiling: Part A: Principles, 2nd ed. London, Geophysical Press, 1985.
- [27] S.S. Hubbard, Y. Rubin, E. Majer, Ground-penetrating-radar-assisted saturation and permeability estimation in bimodal systems, Water Resources Research, 33, 1997, pp. 971-990.
- [28] M.D. Knoll, A petrophysical basis for ground penetrating radar and very early time electromagnetics: Electrical properties of sand-clay mixtures, Ph.D dissertation, University of British Columbia, 1996.
- [29] O. Olsson, L. Falk, L. Forslund, L. Lundmark, and E. Sandberg, Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture zones in crystalline rock, Geophysical Prospecting, 40, 1992, pp. 109-142.
- [30] M.D. Knoll and W.P. Clement, Vertical radar profiling to determine dielectric constant, water content and porosity values at well locations, Processing of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP'99, Oakland, CA, Environmental and Engineering Geophysical Society, Wheat Ridge, CO, 1999, pp. 821-830.

CHAPITRE II :

**PERMITTIVITE DIELECTRIQUE
ET PHENOMENES DE
POLARISATION**

II-1 Introduction :

Selon leur application, les matériaux sont électriquement divisés en : conducteurs, semi-conducteurs, diélectriques (ou électro- isolants) et magnétiques. Tout matériau est en général caractérisé par un ensemble de constantes. En pratique, on ne considère que les caractéristiques qui apparaissent les plus significatives pour une application donnée.

Dans ce qui va suivre, nous présentons un phénomène très important à savoir le phénomène de polarisation, les différents types de polarisation ainsi qu'une caractéristique très intéressante: la permittivité diélectrique; résultat de ce phénomène. Mais avant cela nous exposons quelques classifications des matériaux.

II-2. Classification Des Matériaux :

II-2.1 Classification basée sur la conductivité électrique :

La conductivité électrique ζ mesurée à 20°C (293K) est à la base de cette classification:

- Pour les conducteurs : $\zeta > 10^6$ S/m ($\rho < 10^{-4}$ Ω cm)
- Pour les semi-conducteurs : $10^{-6} < \zeta$ (S/m) $< 10^4$ ($10^{-2} < \rho$ (Ω cm) $< 10^8$)
- Pour les diélectriques (isolants) : $\zeta < 10^{-10}$ S/m ($\rho > 10^{12}$ Ω cm)

II-2.2. Classification basée sur les niveaux d'énergie :

Les niveaux d'énergie constituent un autre critère de classification. Le modèle de l'état solide décrit les états énergétiques des électrons dans des domaines de la structure cristalline régulière et dont le degré de perturbation est faible. Pour l'interprétation de plusieurs phénomènes, il suffit d'utiliser trois notions liées au modèle : la bande de valence (niveau fondamental d'énergie), la bande interdite et la bande conduction. La largeur de la bande interdite ΔE_w influe de manière décisive sur la valeur de la conductivité électronique et sa dépendance de la température :

- $\Delta E_w = 0$: matériau conducteur
- $\Delta E_w = 0,5$ à $2,0$ eV : matériau semi-conducteur
- $\Delta E_w \sim$ dizaines d'eV : matériau diélectrique (nombre d'électrons dans la bande de conduction très faible : ζ faible).

Ce modèle, basé sur les niveaux d'énergie, explique uniquement le phénomène de conduction électronique. Par contre, il ne décrit pas les autres phénomènes comme la conduction ionique dans les diélectriques, le phénomène de polarisation ...

II-2.3. Classification basée sur la permittivité diélectrique :

L'angle de perte $\tan \delta$ qui représente le rapport entre la composante réelle ϵ_r' et la composante imaginaire ϵ_r'' de la permittivité relative complexe ϵ_r^* est une manière intéressante de classer les matériaux. Cet angle dépend essentiellement de la fréquence :

$$\begin{aligned} \tan \delta > 1 & \text{ matériau quasi conducteur} \\ \tan \delta < 1 & \text{ matériau quasi-diélectrique} \end{aligned}$$

Cependant, comme $\tan\delta$ est fonction de la fréquence, cette subdivision n'est que relative. En effet, selon la fréquence, un matériau passe d'un état quasi-conducteur à un état quasi-diélectrique. Cette fréquence par exemple pour un aussi bon matériau électro-isolant comme le mica, est de l'ordre de 10^{-5} Hz, alors que dans le cas des métaux, elle est de l'ordre de 10^{20} Hz.

Le fait de considérer un matériau donné comme quasi-conducteur ou encore comme quasi-diélectrique a une grande importance en particulier par rapport aux matériaux semi conducteurs lesquels soumis à des signaux (contraintes) rapidement variables (par exemple des impulsions), peuvent être considérés comme diélectriques. Ceci peut jouer un rôle essentiel lorsqu'il s'agit de distribution de potentiel dans les systèmes complexes (composites).

Les valeurs de ε' pour les matériaux semi-conducteurs et diélectriques varient dans une large gamme ; elles sont toujours supérieures à 1. Les diélectriques de permittivité relative statique $\varepsilon_r > 3$ sont considérés en pratiques comme polaires alors que les diélectriques dont $\varepsilon_r < 3$ sont dits non polaires ou peu polaires. est fonction de la fréquence, cette subdivision n'est que relative.

II-2.4. Classification basée sur la susceptibilité magnétique :

Selon leur comportement dans un champ magnétique et plus particulièrement selon la valeur de leurs susceptibilités magnétiques η_m , les matériaux sont divisés en :

- diamagnétiques : $\eta_m \sim 10^{-6}$; $0 < \mu_r < 1$
- paramagnétiques : $\eta_m > 0$; $\mu_r > 1$ (à 20°C, $\eta_m \sim 10^{-2} \dots 10^{-5}$)
- Ferromagnétiques : $\eta_m \gg 0$ $\mu_r \gg 1$ selon l'intensité du champ magnétique

La susceptibilité magnétique est définie par la relation $\eta_m = \mu_r - 1$.

II-3. Permittivité Diélectrique:

L'étude de la permittivité effective (ou constante diélectrique macroscopique) des matériaux composites remonte au début du siècle dernier. Le concept de la permittivité effective est pratiquement indispensable dans la modélisation des matériaux composites à basses fréquences [1].

La permittivité effective d'un matériau dépend des permittivités des matériaux constituants, de leurs fractions volumiques et de la forme des inclusions. L'accès à la permittivité effective dépend du degré de complexité de la structure du composite.

Plusieurs théories et modèles ont été développés pour calculer les grandeurs électriques effectives des matériaux hétérogènes constitués de deux ou plusieurs phases en fonction des permittivités de chaque constituant et de sa concentration. Ces théories sont basées soit sur une approche typiquement phénoménologique (théorie de Wiener [2, 3], Wagner [3,4,5], Rayleigh [3, 4,5]), soit sur des lois de mélanges moléculaires (théories de Clausius-Mossotti [4], Onsager [2, 3, 4]). Des théories plus générales consistant à étudier les

permittivités effectives des systèmes à deux composants sans se préoccuper des détails de leur comportement (Looyenga [6], McLachlan [7, 8, 9]) ont été également développées.

Dans ce qui va suivre nous présentons les différents types de polarisation, la permittivité complexe des matériaux ainsi que l'influence de ces paramètres sur les pertes diélectriques.

II-3.1. Phénomènes De Polarisation :

Suite à l'application d'un champ électrique, des mouvements des porteurs de charges sont induites. L'effet de ces mouvements est appelé polarisation induite. Ce phénomène de polarisation diélectrique avait été découvert par Michael Faraday en 1837. On distingue plusieurs types de polarisation (Tableau II.1), électronique, ionique, dipolaire, macroscopique, inter faciale (ou du type Maxwell - Wagner), spontanée (Figure II.1) ; celles-ci peuvent coexister ou apparaître séparément.

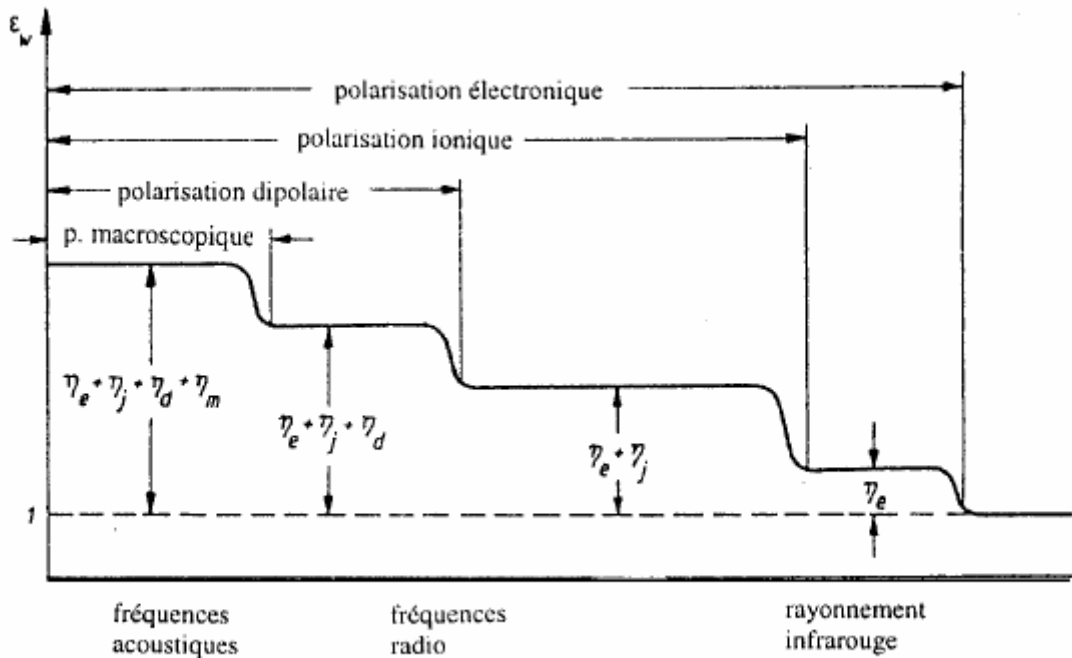


Figure II.1. Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence

Tous ces types de polarisation peuvent être classés en deux groupes selon leurs caractères : la polarisation élastique (ou de résonance) et la polarisation de relaxation. La polarisation totale P est la somme des différents types de polarisation [10,11,12] :

$$P = \sum N_k \alpha_k (E_L)_k \tag{II.1}$$

α_k est la polarisabilité, N_k le nombre de dipôles k par unité de volume et E_L le champ inducteur qui polarise le dipôle.

II-3.1.1. Polarisation électronique :

Elle est présente dans tous les diélectriques sans exception. Elle résulte des déplacements d'orbites électroniques externes par rapport au noyau d'un atome. L'atome est considéré comme formé d'un noyau ponctuel, portant une charge Z_e . Ce noyau est entouré d'électrons confinés dans une sphère de rayon R , à l'intérieur de laquelle ils constituent une densité de charge r uniforme. En l'absence de champ, le noyau se trouve au centre de la sphère. Un champ local EL crée des forces Fr tendant à extraire le noyau de la sphère chargée. Mais un déplacement δ du noyau par rapport au centre de la sphère, crée à son tour des forces d'attraction coulombienne $F\alpha$ tendant à ramener le noyau au centre de cette sphère (Tableau II-1).

La polarisation électronique s'établit en quelques 10^{-15} s ; elle est donc indépendante de la fréquence jusqu'à l'ultraviolet. La déformation de l'orbite qui l'accompagne est élastique, c'est à dire que le travail nécessaire à son apparition n'est pas converti en chaleur mais stocké dans le champ électrique. La polarisation élastique électronique ainsi que les dipôles induits disparaissent quand le champ est supprimé.

II-3.1.2. Polarisation ionique (ou atomique) :

La polarisation ionique (ou atomique) résulte du déplacement des atomes liés par des liaisons ioniques. Dans le cas des liaisons ioniques, les électrons de valence parcourent les orbites partagées avec d'autres atomes. On rencontre les liaisons ioniques dans la plupart des diélectriques solides non-organiques avec une structure cristalline (exemple : un monocristal ionique de structure cubique simple). Dans une structure donnée, le déplacement des ions sous l'action d'un champ local d'une quantité Δx par rapport à leurs positions de repos, donne naissance à une polarisation dite ionique (ou atomique). Δx correspond à l'équilibre entre les forces de rappel et la force due au champ local. Pour les petits déplacements, les forces de rappel peuvent être supposées proportionnelles à Δx (tableau II.1).

Vu l'inertie des ions relativement lourds, ce type de polarisation s'établit en environ 10^{-13} s, donc plus lentement que la polarisation électronique, et dépend de la charge de l'ion et des forces de liaisons ioniques mutuelles. La polarisation ionique, de même que la polarisation électronique, créent des dipôles induits ; elle ne provoque pas de pertes d'énergie et disparaît avec la suppression du champ appliqué. C'est donc une polarisation élastique. Elle existe jusqu'aux fréquences correspondant à l'infrarouge ; elle est propre à la plupart des matériaux céramiques.

II-3.1.3. Polarisation dipolaire (ou d'orientation) :

La polarisation dipolaire (ou d'orientation) consiste en l'orientation, sous l'action du champ électrique, des molécules polaires, c'est à dire celles qui possèdent un moment dipolaire permanent. La structure de ces molécules est asymétrique : le centre de gravité résultant de toutes les charges négatives d'une telle molécule ne coïncide pas avec celui de toutes ses charges positives – la molécule est un dipôle électrique. Le caractère dipolaire est généralement propre aux molécules des composés chimiques ayant des liaisons ioniques, mais également aux composés ayant des liaisons covalentes qui ont une structure asymétrique (par

exemple H₂O). La figure (II.2.a) correspond à la molécule CO₂ qui, parfaitement symétrique, ne présente pas de moment dipolaire spontané. La figure (II.2.b) correspond à celle de H₂O qui présente un moment dipolaire P_m (Tableau II.1).



Figure II.2. Polarisation dipolaire ou d'orientation

II-3.1.4. Polarisation macroscopique (ou de charge spatiale):

La polarisation macroscopique (appelée également polarisation de la charge spatiale) décrit le processus du déplacement limité des charges libres. Elle peut être rencontrée dans les diélectriques liquides et solides, surtout avec une structure non-homogène ou amorphe. La polarisation macroscopique s'établit lentement. Selon le type de matériau et des conditions de mesure (température, hygrométrie), le courant de déplacement qui l'accompagne lorsqu'une tension constante est appliquée, peut être observé pendant quelques millisecondes jusqu'à des centaines d'heures. La polarisation macroscopique dans les diélectriques liquides résulte de l'amasement des ions au voisinage des électrodes. Dans les diélectriques solides, le mouvement des charges est limité à cause des états énergétiques locaux de capture ou des barrières de potentiel. Les deux phénomènes résultent de la non-homogénéité du matériau.

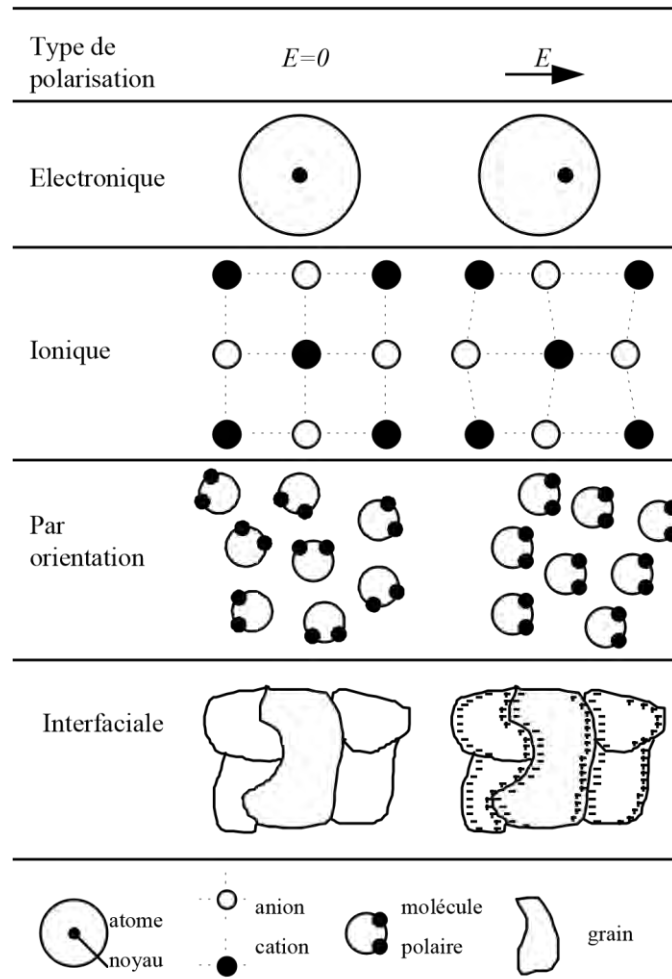
II-3.1.5. Polarisation interfaciale :

La polarisation interfaciale (ou du type Maxwell-Wagner) apparaît dans les diélectriques non-homogènes dont les permittivités (ϵ'_1 et ϵ'_2) et les conductivités (ζ_1 et ζ_2) des matériaux constituants 1 et 2 sont telles que :

$$\epsilon'_1 / \epsilon'_2 \neq \zeta_1 / \zeta_2. \quad (\text{II.2})$$

Elle résulte d'une accumulation de charges à la frontière des deux milieux dues à l'ensemble des phénomènes de migration. En effet, les porteurs de charges, jamais totalement absents dans un diélectrique, migrent sous l'effet du champ et tendent à se concentrer autour de défauts tels que les impuretés, les lacunes et les joints de grains. Cette polarisation est caractérisée par le temps d'établissement le plus long de tous, qui peut atteindre plusieurs minutes et même davantage (Tableau II.1).

Ce type de polarisation possède aussi un caractère de relaxation ; le temps de relaxation augmente quand la conductivité décroît. Généralement, la polarisation inter faciale s'affaiblie au voisinage des fréquences supérieures aux fréquences acoustiques.



Les déplacements des charges sont très fortement exagérés

Tableau II-1 : Les différents types de polarisation

II-4. Permittivité :

II-4.1. Permittivité relative :

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité relative ou constante diélectrique ϵ_r . Celle-ci définit le comportement des charges d'un matériau une fois soumises à un champ électrique. Elle s'exprime en Farads par mètre (F/m).

Dans le cas d'un diélectrique parfait, ϵ_r est le quotient de la capacité C_x entre deux électrodes, supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_v de la même configuration d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \quad (\text{II.3})$$

II-4.2. Permittivité absolue :

La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la permittivité du vide ϵ_0 ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (\text{II.4})$$

La permittivité absolue définit la possibilité pour un matériau d'être traversé par un courant électrique, sous l'action du champ électrique. Ceci résulte de diverses contributions de déplacements des charges : déplacement des électrons, déplacements des atomes et des ions, orientation des dipôles électriques et déplacement des charges d'espace. En effet, la densité de courant traversant ce diélectrique en présence d'un champ électrique sinusoïdal est [13,14] :

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (\text{II.5})$$

En passant par la transformé de Fourier, on aura :

$$J(\omega) = \sigma E(\omega) + j\omega D(\omega) \quad (\text{II.6})$$

$$J(\omega) = \left[\zeta + j\omega\epsilon_0 \left(1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \right) \right] E(\omega) \quad (\text{II.7})$$

Ou encore

$$J(\omega) = [\zeta_c + \omega\epsilon''(\omega) + j\omega\epsilon'(\omega)] E(\omega) \quad (\text{II.8})$$

Où

$$\epsilon_0(1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega)) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \epsilon^*(\omega) \quad (\text{II.9})$$

χ' et χ'' sont les composantes réelle et imaginaire de la susceptibilité électrique χ du milieu.

ϵ' et ϵ'' sont les composantes réelle et imaginaire de la permittivité électrique complexe ϵ du milieu. Cette permittivité complexe tient compte de dissipation d'énergie, des pertes par absorption et par diffusion.

II-4.3. Permittivité relative complexe :

On définit également une permittivité complexe relative :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (\text{II.10})$$

Où ϵ_r' joue le rôle qu'avait ϵ_r dans le cas des isolants parfaits. La permittivité complexe absolue est, de la même manière, égale au produit de la permittivité complexe relative par ϵ_0 . La composante en phase que présente J avec E est à l'origine des pertes diélectriques ; elle représente la dissipation d'une puissance dans le diélectrique. Ces pertes sont dues au travail nécessaire à l'établissement de la polarisation et à la conduction ohmique résiduelle σ_c du diélectrique [15, 16].

II.4.4. Facteur de dissipation diélectrique:

Le facteur de dissipation est égale au quotient $\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$; ce quotient est appelé aussi tangente de l'angle de perte ou $tg\delta$; δ est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte ($tg\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$).

En pratique, il n'est pas possible de s'affranchir des pertes par conduction [13]; dans ce cas

$$tg \delta = \frac{\epsilon_r''(\omega) + (\sigma_c / \omega \epsilon_0)}{\epsilon_r'(\omega)} \quad (II.11)$$

II-5. Facteurs influençant les propriétés diélectriques des matériaux :

La permittivité et le facteur de dissipation diélectriques mesurés d'un matériau sont affectés par divers paramètres physiques externes ou internes tels que la fréquence, la température, l'intensité du champ électrique, les rayonnements, l'humidité ... [17].

II-5.1. Fréquence :

En général, les propriétés diélectriques des matériaux varient considérablement avec la fréquence du champ électrique appliquée. L'apparition des pertes diélectriques peut être expliquée comme suit : aux très basses fréquences, la polarisation suit le champ alternatif, ce qui fait que sa contribution à la constante diélectrique est maximale et les pertes n'apparaissent pas. Aux fréquences très élevées, le champ alterne trop vite pour que la polarisation puisse augmenter et il n'y a aucune contribution à la constante diélectrique – aucune énergie n'est perdue dans le milieu [11]. Mais quelque part entre ces deux extrêmes, la polarisation commence à prendre du retard par rapport au champ électrique d'où dissipation de l'énergie. Le facteur de pertes atteint une valeur maximale à une fréquence f_m , liée au temps de relaxation caractéristique par la relation:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m} = \frac{1}{\omega_m} \quad (II.12)$$

La permittivité et la polarisation de relaxation dépendent du temps ; on distingue deux états d'équilibre pour chacune de ses caractéristiques. Dans un champ statique ($\omega \rightarrow 0$), la permittivité diélectrique vaut ϵ_s , et dans les fréquences optiques ($\omega \rightarrow \omega_{opt}$), elle vaut ϵ_∞ .

L'équation typique décrivant ce modèle simple de relaxation diélectrique est l'équation de dispersion de Debye

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - i \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (II.13)$$

L'équation de Debye peut être écrite sous différentes formes selon la caractéristique expérimentale cherchée. Plusieurs types de polarisation peuvent être décrits qualitativement de la même manière et c'est pourquoi, dans la plupart des cas, on peut appliquer l'équation de Debye. Il faut cependant rappeler que cette équation a été établie spécifiquement pour le cas de la relaxation dipolaire.

L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne considère qu'un seul temps de relaxation et omet les interactions moléculaires alors que les diélectriques dipolaires réels correspondent rarement à ce modèle. De ce fait, on ne peut pas toujours décrire le phénomène de relaxation à l'aide de cette équation simple de Debye, car bien souvent les diélectriques se caractérisent par plusieurs temps de relaxation, comme c'est le cas par exemple des substances macromoléculaires, et des composites. Cole-Cole, Davidson-Cole ainsi que d'autres chercheurs ont proposé des modifications de l'équation de Debye en y introduisant des exposants empiriques menant à une augmentation du nombre de temps de relaxation pris en considération.

Néanmoins, toutes ces tentatives de description des phénomènes de dispersion et de relaxation diélectrique n'expliquent pas la complexité des phénomènes et relations observés pour un grand nombre de corps solides, surtout dans le spectre des basses fréquences. Il semble que les processus résultant des interactions entre plusieurs molécules chargées et responsables de la polarisation du diélectrique, jouent un rôle fondamental. Par conséquent, la description des mécanismes physiques (à l'échelle microscopique) impliqués dans les propriétés diélectriques des matériaux demeure toujours ouverte. Et la dépendance exponentielle du courant $i(t)$ ou de la polarisation du temps, ne sont pas les seules descriptions possibles de ce problème. Déjà au début du siècle dernier, une loi exponentielle, connue sous le nom de loi de Curie - von Schweidler, avait été proposée :

$$i(t) \sim t^{-n} \quad (\text{II.14})$$

Certains auteurs, en particulier R.M. Hill, A.K. Jonscher et L.A. Dissado , ont remarqué que cette loi possède un caractère universel. Ces auteurs ont présenté un modèle universel d'interactions de plusieurs corps, en passant du domaine du temps au domaine de la fréquence, pour obtenir des équations légèrement différentes pour des intervalles de basses et hautes fréquences [12].

II-5.2. Température :

L'aptitude d'un matériau diélectrique à être polarisé dépend également de la température. Par conséquent, les fréquences correspondant aux maximum de l'indice de pertes (et ainsi à ceux du facteur de dissipation diélectrique) varient avec la température. Il s'ensuit que le coefficient de température de l'indice de pertes peut-être positif ou négatif selon la position du maximum de l'indice de pertes par rapport à la température de mesure.

II-5.3. Humidité et autres impuretés :

Le degré de polarisation est augmenté par l'absorption d'eau ou la formation d'une pellicule d'eau à la surface du diélectrique, ce qui affecte la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité en courant continu. Le conditionnement des éprouvettes est, de ce fait, d'une importance capitale et la régulation du degré d'humidité, tant avant que pendant l'essai, est indispensable pour l'interprétation correcte des résultats d'essai.

Le degré de polarisation dépend aussi des impuretés introduites par contamination physique ou par des ingrédients chimiques, par exemple solvants ou plastifiants. Par conséquent, on doit s'assurer que le matériau à essayer n'est pas affecté ou ne l'est que de façon connue par les opérations de prélèvement d'éprouvettes ou bien par des traitements appliqués ensuite, par exemple à des températures élevées.

II-5.4. Structure physique et chimique :

La direction du vecteur polarisation du champ électromagnétique par rapport à la structure de l'éprouvette exerce une forte influence sur le résultat de mesure. Des résultats de mesure différents peuvent être obtenus à cause du manque d'homogénéité (comme dans les stratifiés) ou de l'anisotropie, par exemple dans le cas des cristaux, sauf si toutes les mesures sur les éprouvettes sont effectuées en étant rapportées de la même façon à une caractéristique indentifiable du matériau.

Des éprouvettes ayant la même composition chimique mais de structures chimiques différentes comme des résines durcies sable soumises à des conditions différentes de durcissement ou de polymères polymérisés à des degrés différents donneront également des résultats différents.

II-5.5. Intensité du champ alternatif :

Généralement la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique ne dépendent pas de l'intensité du champ tant qu'aucune décharge partielle ne se produit dans le diélectrique. Toutefois dans le cas des matériaux ferroélectriques, un effet de variation en fonction du champ peut encore être observable aux fréquences inférieures du spectre hyperfréquence, mais il disparaît rapidement lorsque la fréquence croît.

II-6. Permittivité effective et champ d'excitation :

La permittivité effective, ou la permittivité macroscopique, ϵ_{eff} , est définie comme le rapport entre le déplacement et le champ électrique :

$$D = \epsilon_{eff} E \quad (II. 15)$$

Le déplacement D dépend de la polarisation P dans le matériau

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_{eff} E \quad (II. 16)$$

La polarisation P est par définition la somme de tous les moments multipolaires induits. Elle peut donc être reliée à une caractéristique des constituants microscopiques du milieu : la polarisabilité. Dans le cas où les moments multipolaires d'ordre supérieur à deux sont négligeables [11], on obtient une relation entre la polarisation (dipolaire) P et la polarisabilité α de la forme

$$P = \sum_k N_k \alpha_k (E_l)_k \quad (II. 17)$$

Où la sommation s'effectue sur les différents types de dipôles ; N_k est le nombre de dipôles k par unité de volume et E_l est le champ inducteur qui polarise le dipôle. Cette équation permet de relier les caractéristiques microscopiques et macroscopiques du milieu [7]. En substituant (II.16) dans (II.17), il vient :

$$(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0)E = \sum_k N_k \alpha_k (E_l)_k \quad (II.18)$$

Par conséquent, si on peut établir une relation entre le champ macroscopique appliqué E et le champ local E_l , on peut alors obtenir une relation entre \mathcal{E}_{eff} , grandeur macroscopique caractéristique du milieu et α_k caractérisant ses constituants élémentaires. L'établissement de relations entre les grandeurs macroscopiques et les grandeurs microscopiques de la matière est un problème physique d'une grande complexité et nécessite de nombreuses approximations qui sont loin d'être satisfaisantes. En effet, on suppose que l'équation (II.18) qui relie la fonction diélectrique \mathcal{E}_{eff} à la polarisabilité α s'applique aussi bien au cas des atomes et des molécules qu'à celui d'une inclusion de plusieurs centaines d'Angström d'un matériau k caractérisé lui-même par une fonction diélectrique \mathcal{E}_k . Il faut pour cela que la relation linéaire (II.16) soit applicable, ce qui suppose que : (1) l'approximation dipolaire est valable aussi bien pour l'atome que pour l'inclusion, ce qui limite les formes acceptables pour celle-ci, et (2) le champ est uniforme sur le dipôle, ce qui limite la taille supérieure de l'inclusion (approximation quasi-statique). Dans ces conditions, la fonction diélectrique effective \mathcal{E}_{eff} est donnée par :

$$(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0)E = \sum_k N_k \alpha_k (E_m)_k \quad (II.19)$$

où N_k est le nombre d'inclusions k par unité de volume, α_k leurs polarisabilité et $(E_m)_k$ le champ inducteur sur l'inclusion k , α_k est relié à la fonction diélectrique du matériau k par l'équation:

$$(\varepsilon_k - \varepsilon_0)E = \sum_k N a_k \alpha_k (E_l)_k \quad (II.20)$$

où $N a_k$ est le nombre d'atomes k par unité de volume du matériau k , et $(E_l)_k$ le champ local dans le matériau pur. L'équation (II.19) devient alors

$$(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0) = \sum_k \frac{N a_k}{N_k} (\varepsilon_k - \varepsilon_0) \frac{(E_m)_k}{(E_l)_k} \quad (II.21)$$

$N a_k / N_k$ est égal à la fraction volumique occupée par le matériau k dans le composite. Il faut maintenant déterminer la relation entre le champ inducteur mésoscopique $(E_m)_k$ polarisant l'inclusion et le champ local microscopique $(E_l)_k$ polarisant ses atomes. C'est très précisément le problème, à une échelle intermédiaire, traité à trois dimensions par Lorentz et qui conduit à l'équation de Clausius-Mossotti, que nous décrirons dans le paragraphe suivant. D'autres approches plus simples sont cependant envisageables ; elles conduisent à des théories dont le champ d'application est réduit mais qui constituent parfois de très bonnes approximations.

II.7. Mesure de la permittivité

La connaissance précise des propriétés diélectriques des matériaux est extrêmement importante, d'une part parce qu'elles font parties de l'ensemble de connaissances des propriétés spécifiques de la matière, d'autre part parce qu'elles doivent être maîtrisées dans la perspective d'applications.

La caractérisation diélectrique des matériaux nécessite l'utilisation d'une méthode de caractérisation ou de mesure. Le choix de la méthode dépend de plusieurs paramètres: dimensions de l'échantillon, son état (solide ou liquide; milieu peu ou très atténuant), ses pertes diélectriques et magnétiques...; et notamment de la caractéristique à déterminer.

Cependant La fréquence de détermination reste un de ces paramètres les plus importants.

Il existe actuellement de nombreuses méthodes permettant la mesure de la permittivité diélectrique [18].

Nous donnons dans ce qui suit un certain nombre de ces méthodes qui diffèrent par la gamme de fréquence d'étude.

II-7.1. Mesures au pont :

Ce type de système est utilisé pour des fréquences allant de 10^2 à 10^7 Hz et même pour des fréquences un peu plus grandes (100 MHz). La figure II.3 donne le schéma de principe d'un pont de mesure de la permittivité.

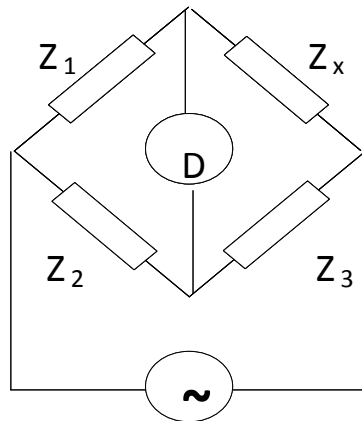


Figure II.3. Schéma de principe d'un pont

Z_x représente la branche où est inséré l'échantillon. Les autres branches sont celles sur lesquelles on agit pour équilibrer le pont. Le pont sera équilibré lorsque le courant I_d traversant le détecteur D s'annule : $I_d = 0$; le détecteur (ou indicateur de zéro) peut être un galvanomètre ou un oscilloscope. A l'équilibre, on a :

$$z_x = \frac{z_1}{z_2} z_3 \quad (\text{II.22})$$

Les systèmes utilisés actuellement sont des systèmes auto-compensés (c'est-à-dire auto réglables) qu'on appelle impédance-mètre. Il suffit de connecter dans la branche inconnue l'hétéro structure à caractériser et de choisir dans le menu les éléments désirés (R_p , C_p , R_s , C_s ,

tgδ.....). Certains impédance-mètres fournissent les spectres de variations des différents éléments en fonction de la fréquence d'un signal.

II-7.2. Méthodes du circuit résonnant :

Les mesures au pont deviennent difficiles pour des fréquences variant de 10 MHz à 100 MHz à cause de l'augmentation des effets de capacités parasites. Dans ce cas, les mesures sont généralement effectuées à l'aide d'un circuit résonnant où toute la capacité ou une partie est celle de la cellule de mesure. Le système d'électrodes est toujours utilisé ; le circuit est amené à la résonance initiale au moyen d'une capacité d'accord en parallèle avec la cellule de mesure et après avoir enlevé l'échantillon ; le circuit est ramené à la résonance par ajustement de l'électrode. Ceci permet des mesures relativement faciles et précises de la partie réelle de la permittivité. La mesure du facteur de perte est réalisée plus facilement en repérant la largeur de la courbe de résonance aux points où la tension aux bornes du condensateur est tombée à $\frac{1}{\sqrt{2}}$ de sa valeur à la résonance. Les pertes doivent dans ce type de mesure être faibles : $\text{tg}\delta \approx 0,05$.

II-7.3. Méthode de la double résonance :

Dans le cas où tgδ est plus grand, la fréquence de résonance ne peut être déterminée avec précision. Comme beaucoup de matériaux ont des facteurs de perte de 0,1 ou plus ; la nécessité d'avoir une méthode permettant la mesure de leurs permittivités en fonction de la fréquence s'impose, d'où l'apparition de la méthode de la double résonance. Dans cette méthode la cellule contenant l'échantillon constitue la capacité d'un second circuit résonnant qui est couplé à un premier circuit résonnant alimenté par un générateur de signal. Le principe de la méthode est que le circuit résonnant contenant l'échantillon à fortes pertes est couplé par un petit condensateur au premier circuit résonnant ; la résonance de ce dernier est plus pointue que celle du circuit avec l'échantillon. [19]. La partie réelle de la permittivité peut être déterminée dans ce cas indépendamment des pertes.

II-7.4. Mesures par lignes de transmission :

Dans le domaine des hautes fréquences : 100-1000 MHz, il est impossible de réaliser un circuit résonnant à constantes localisées. L'utilisation des circuits à paramètres répartis devient inévitable, les plus courants de ces circuits sont les lignes et les guides d'ondes. Cependant les méthodes faisant appel aux lignes sont généralement les plus employées pour la mesure de la permittivité car les guides d'ondes ont l'inconvénient d'être encombrants dans cette gamme de fréquences.

Il existe un ensemble de méthodes basées sur des mesures d'ondes progressives et d'ondes stationnaires. Dans la plus courante, l'échantillon représente une impédance terminale pour une ligne coaxiale, en y établissant un système d'ondes stationnaires. La mesure des positions et des grandeurs des maximums et des minimums permet la détermination de la permittivité de l'échantillon.

II-7.5. Mesure dans le domaine des ondes micrométriques : Méthode des guides d'ondes et des cavités résonnantes :

Lorsque les fréquences dépassent les 100 MHz, on a recours à la technique des guides d'ondes ou de cavités résonnantes. La nature et la quantité du matériau à mesurer définissent la méthode de mesure particulière employée. Dans le cas d'une grosse quantité de matériau, la méthode utilisée est celle des guides d'ondes alors que la méthode des cavités résonnantes est utilisée quand on a affaire à de petites quantités de matériau [20]. Dans le premier cas le guide d'onde est rempli complètement par le matériau (l'échantillon). Pour un échantillon de longueur donnée, si la fréquence croît graduellement, la puissance transmise passera par une succession de maximums. Il est montré que la permittivité (partie réelle) est en relation avec la longueur de l'échantillon, l'intervalle de fréquence entre les maximums et la vitesse de la lumière ; de là $tg\delta$ et par conséquent la partie imaginaire de la permittivité peut être calculée [20]. Dans le second cas, si une cavité résonnante est perturbée par l'introduction d'un petit échantillon, sa fréquence de résonance est abaissée. Le déplacement de fréquence est directement lié à la partie réelle de la permittivité du matériau tandis que la variation du facteur Q de cavité est liée à sa partie imaginaire.

II.8.CONCLUSION :

Il ressort de ce chapitre que la permittivité diélectrique est une propriété fondamentale pour la caractérisation d'un matériau.

Références Bibliographiques

- [1] A. Priou, Dielectric properties of heterogeneous materials: A.H. Shivola and I.V. Lindell –Polarisability modeling of heterogeneous media, Progress in Electromagnetics Research, Elsevier, New York 1992.
- [2] C. Grosse et J.L Greffe, Permittivité Statiques des Emulsions, Journ. Chim. Phys., 76 (4), (1979), p. 305.
- [3] L.K.H. Van Beck, “Progress in Dielectrics”, Vol. 7, Heywood Books, London, 1967, p. 69.
- [4] S. Berthier, Optique des milieux composites, Polytechnica, Paris 1993.
- [5] A.H. Shivola, J.A. Kong, Affective permittivity of dielectric mixtures, IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing, vol. 26 (4), (1988), pp. 420-429.
- [6] H. Looyenga, Dielectric constants of heterogeneous mixtures, Physica 31, (1965), pp. 401-406.
- [7] R. Landauer, “Electrical transport optical properties of homogeneous media”, (Ohio State University, 1977), Proceedings of the first Conference on the Electrical and optical Properties of Inhomogeneous Media, AIP Conf. N°40, Edited y J.C. Garland and D.B. Tanner (AIP, New York, 1978).
- [8] David S. McLachlan, Michael Blaszkievicz, Robert E. Newnham, *Electrical resistivity of composites*, J. Am. Ceram. Soc., 73 (8), (1990), pp. 2187-2203.
- [9] D.S. McLachlan, M. Blaszkievicz and R.E. Newnham, „Equation for conductivity of binary media”, Jap. J. Applied Physics, Vol. 26 (1987), supplement 26-3, p. 901.
- [10] A. von Hippel, Dielectrics and waves, (Artech House, Boston London 1995).
- [11] A. Chelkowski, Fizyka dielektrykow, PWN, Warszawa 1993.
- [12] B. Hilczer, Elektrety i piezopolimery, PWN, Warszawa, 1992.
- [13] R. Fournié, Diélectriques: bases théoriques, Technique de l’ingénieur (D2 I), D213.
- [14] A. Beroual, Matériaux pour le génie électrique, cours de DEA de génie électrique, Ecole Centrale de Lyon, France, 1996.
- [15] J.C. Mage, Origine des pertes dans les matériaux, RGE, N°7 (Juin 1991), p.24.
- [16] R. Coelho et B. Aladenize, „ Les diélectriques : propriétés diélectriques des matériaux isolants”, Ed. Hermès, 1993
- [17] NF C26-231,231] Norme AFNOR 2004
- [18] J.C. Anderson, Diélectriques, Dunod 1966.
- [19] B. Ichijo, 1953 J, Appl. Phys, 24, 307.
- [20] Lurio et Stern : 1960 J. Appl. 31 .180
- [21] H. M. Barlow and A. L. Cullen, 1950, Microwave Measurements, Constable.

CHAPITRE III :

LOIS DE MELANGES

III.1. Introduction

La caractérisation d'un milieu non homogène par ces fonctions diélectriques n'est pas si évidente, puisqu'on doit connaître l'arrangement géométrique exact des constituants du matériau. Cependant, si la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique est beaucoup plus grande que la dimension de la particule, les théories classiques des milieux non homogènes présument que le matériau peut être traité comme une substance homogène avec une fonction diélectrique effective. Cette quantité dépend des constituants, aussi bien que de leurs fractions volumiques et que de leurs tailles. Les lois de mélange les plus célèbres sont exposées dans ce qui suit :

III.2.loi de Mossoti-Clausius:

La première version du modèle diélectrique d'un mélange hétérogène à deux phases a été proposée par Mossotti et Clausius. En 1848, l'astronome Mossotti [1] a constaté que le comportement de la poussière constituée de particules identiques peut être décrit par la quantité $N_k \alpha_k / 3\epsilon_0$ laquelle quantité est proportionnelle à la densité de la poussière (N_k est le nombre de particules par unité de volume et α_k est la polarisabilité de chaque particule). En 1879, Clausius [2] le thermodynamicien a montré que le rapport $\epsilon - \epsilon_0 / (\epsilon + 2\epsilon_0)$ était proportionnel à la densité, ϵ étant la permittivité macroscopique. Finalement les deux descriptions, microscopique (Mossotti)et macroscopique (Clausius) ont été réunies en une seule, appelée aujourd'hui relation Clausius - Mossoti [3] :

$$\frac{\sum_k N_k \alpha_k}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} \quad (\text{III. 1})$$

A partir de cette relation unique de Clausius-Mossotti. On peut retrouver toutes les grandes théories classiques de la fonction diélectriques du milieu effectif, il suffit pour chacune d'elles, de définir le milieu dans lequel baignent les inclusions.

III.3. Loi de Maxwell Garnett :

La loi (théorie) de Maxwell-Garnet (MGT) ou loi du milieu effectif (EMT) , est dérivée de la relation de Clausius-Mossotti. Cette loi a été établie en 1904 [4]. Dans un article original « Colours in metal glasses and metallic films » ; Maxwell - Garnett ont traité la coloration des verres par la dispersion d'une très faible quantité de particules métalliques dans une matrice continue.

La théorie est basée sur la polarisation induite par un champ uniforme externe sur des inclusions sphériques isolées, placées dans le matériau hôte. Elle s'exprime par la relation [4]:

$$\left(\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_m}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_m} \right) = p \left(\frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \right) \quad (\text{III. 2})$$

Ou ϵ_m est la permittivité de la matrice hôte, ϵ_i la permittivité des inclusions, ϵ_{eff} la permittivité du milieu et P sa porosité.

Cependant cette théorie se limite aux matériaux dont les inclusions sont de petites tailles, suffisamment éloignées les unes des autres et de concentrations inférieures à 50% [5, 6,7], à cause d'un chevauchement des inclusions à partir de cette valeur de porosité (certains travaux stipulent que la théorie MGT est valable pour $P \leq 0.3$) D'autre part l'ensemble des inclusions est équivalent à un dipôle unique (figure III.1).

En pratique, il peut être difficile de décider lequel des composant devrait être considéré comme le matériau hôte (le cas de la céramique poreuse).



Figure III.1 : Milieu modélisé par Maxwell Garnett dont toutes les inclusions sont ramenées à une inclusion unique : elles sont sans interaction.

III.4. Loi de Bruggeman :

Dans la loi de Bruggeman ou celle de l'approximation du milieu effectif (EMA), établie en 1935 [1], l'hypothèse de l'existence d'un matériau hôte explicite n'est plus considérée [5,6,7] . Les particules d'un composant quelconque d'un matériau simple sont supposées encastées dans un milieu effectif de permittivité égale à la permittivité du mélange ϵ_{eff} (III.2)

La constante diélectrique effective est déterminée par:

$$(1 - P)(\epsilon_m - \epsilon_{eff})(\epsilon_m + 2\epsilon_{eff}) + P(\epsilon_i - \epsilon_{eff})/(\epsilon_i + 2\epsilon_{eff}) = 0 \quad (III.3)$$



Figure III.2: Milieu modélisé par Bruggeman dont les inclusions de permittivité ϵ_1, ϵ_2 sont en interaction et baignent dans un milieu moyen de permittivité ϵ_m .

Pour relier les champs interne et externe associés à la particule, les particules sont habituellement supposées sphériques.

Pour les faibles fractions volumiques, les deux théories Maxwell-Garnett et Bruggeman donnent des résultats très proches pour les valeurs des permittivités relatives. Néanmoins, le modèle de Bruggeman reste valable même pour les fractions [1], volumiques plus élevées que 50% puisqu'il traite les deux constituants de manière symétrique.

Dans le cas d'un mélange binaire, le développement de l'équation (III.3) conduit à une équation quadratique, dont les racines s'extraient facilement à l'aide d'une calculatrice ou un d'un logiciel mathématique, à savoir que le signe + dans la racine est utilisées lorsque ϵ_1 et ϵ_2 sont tous deux réels et positifs.

III.5. Loi de Looyenga :

Une autre loi intéressante a été développée par **Looyenga** [5]. Ce dernier suppose qu'en mélangeant deux constituants dont les permittivités sont telles que : $\epsilon_m = \epsilon + \Delta\epsilon$, $\epsilon_i = \epsilon + \Delta\epsilon$. et vice versa, la permittivité effective du mélange, en raison du développement en série de Taylor ($\Delta\epsilon$ pris assez petit) peut être écrite sous la forme [2, 5, 6, 8, 9,19]:

$$\epsilon_{eff} = \left[\epsilon_m^{1/3} + P(\epsilon_i^{1/3} - \epsilon_m^{1/3}) \right]^3 \quad (III. 4)$$

Il est à signaler que les inclusions dans ce cas sont supposées sphériques et sans interactions mutuelles. La relation (III.4) a été aussi obtenue indépendamment par Landau et Lifschitz [8].

III.6. Loi de Lichtenecker :

Lichtenecker [9] a considéré que les inclusions sont dispersées d'une manière aléatoire, sa loi est donnée par l'expression [9, 13,19]:

$$\ln \epsilon_{eff} = P \ln \epsilon_i + (1 - P) \ln \epsilon_m \quad (III. 5)$$

Dans la loi logarithmique, la détermination du comportement diélectrique macroscopique du mélange ne se base pas sur des considérations géométriques des inclusions [8 ,20]

Cependant Wiener a supposé que la valeur de la permittivité effective d'un mélange se situe entre deux valeurs appelées Bornes de Wiener.

III.7. Loi de Bornes de Wiener :

Les inclusions et la matrice hôte sont supposées dissociées et chaque constituant est assimilé à une capacité [2, 6, 9]. Si le champ électrique est orthogonal aux couches, les deux condensateurs sont en série (**Modèle Série**) et la valeur de la permittivité effective du milieu est donnée par :

$$\epsilon_{eff \ min} = P/\epsilon_i + (1 - P)/\epsilon_m \quad (III. 6)$$

Si le champ électrique est parallèle aux couches, les deux condensateurs sont en parallèle (**Modèle Parallèle**) et la valeur de la permittivité du milieu s'exprime par :

$$\varepsilon_{eff\ max} = P\varepsilon_i + (1 - P)\varepsilon_m \quad (III. 7)$$

Si le champ électrique appliqué est orienté de manière quelconque, la permittivité du milieu a pour expression:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} (1 - n^2) + \varepsilon_{\perp} n^2 \quad (III. 8)$$

n est la projection du vecteur unité normal, le long de la composante du champ appliqué.



Figure III.3 : Bornes de Wiener.

III.8.Conclusion :

La caractérisation d'un milieu hétérogène et par conséquent la détermination de sa permittivité effective, nécessite la connaissance de la géométrie et de la concentration de chaque constituant ainsi que les permittivités de chacun d'eux.

Références Bibliographiques

- [1] O.F.Mossoti, 1850, Discussione analitica sull influenza che l'azione di un mezzo dielettrico ha sultadistribuzione dell ellettrica atasuperficie di piu corpi eletctici disseminati in esso, Mem. Math. Fisica Modena 24, pp. 49 -74.
- [2] R. Clausuis, 1879, Die Mechanische Behandlung der Elektrizitat. Vieweg, Die Mechanische Warmtheorie, Vol, Braunschweig, pp.62-97.
- [3] M.T. Prinkey, a. lakhtakia, B. Skander, On the extended Maxwell - Garnett and the extended Bruggeman approaches for dielectric-composites, Optik 96 N0.1, (1994), pp. 25-30.
- [4] J.C. Maxwell Garnett, Colours in metal glasses and in metalic films, Philos. Trans. R. Soc. Lond. A 203, (1904), pp. 38-420.
- [5] H. Looyenga, Dielectric constants of heterogeneous mixtures, Physica **31**, (1965), pp.401-406.
- [6] B. Michel, A. Lakhtakia, On the application of the strong property fluctuation theory for homogenizing chiral-in-chiral composites, J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) pp.1431–1440.
- [7] B. Michel, A. Lakhtakia, On the application of the strong property fluctuation theory for homogenizing chiral-in-chiral composites, J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) pp.1431–1440.
- [8] G.W. Milton, Bounds on the electromagnetic, elastic, and optical properties of two component composites, Physical Review Letters **46** (8), (1981), pp. 5294-5304.

CHAPITRE IV :

PARTIE EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction:

Ce chapitre est dédié à la partie expérimentale de notre travail qui consiste en l'étude de la relation entre la permittivité diélectrique effective d'un mortier de ciment (**matrice mère**) et ses concentrations en air (**inclusions**) pour différents rapports E/C et pour un ensemble de fréquence.

Les résultats expérimentaux obtenus sont comparés avec ceux donnés par un certain nombre de modèles établis à partir de lois de mélanges. Les résultats de ces modèles sont obtenus en utilisant le logiciel Simulink.

Cette comparaison nous a permis d'établir notre propre modèle.

IV.2. Données des essais;

Les essais sont effectués sur des éprouvettes de mortier de **55 mm** de diamètre et de **30 mm** de hauteur (voir annexe).

Les constituants principaux de ces éprouvettes sont :

- sable de la carrière ENG Ben Badis (voir fiche technique : annexes) ;
- Ciment CPA Hamma Bouziane (voir fiche technique : annexes) ;
- Eau de robinet.

Les éprouvettes confectionnées sont séchées dans une étuve à 110° C pendant 24H.

La mesure de la permittivité diélectrique est effectuée pour chaque éprouvette.

La mesure de la capacité C_p et par conséquent de la permittivité est effectuée avec un impédance mètre du type : HEWLETT PACKARD - 4284A - 20 Hz à 1MHz du département d'électronique (figure IV-1). Celui-ci est relié à un système dans lequel l'éprouvette est placée. Ce système est constitué de deux électrodes circulaires en cuivre de **55 mm** de diamètre. Un ressort est placé sur l'électrode supérieure pour assurer un bon contact entre les électrodes et l'éprouvette ; ceci permet d'éviter les capacités parasites induites par la présence d'interstices entre l'éprouvette et les électrodes. La figure (IV.2) donne une vue schématique du système de mesure.



Figure IV-1 : Impédance mètre

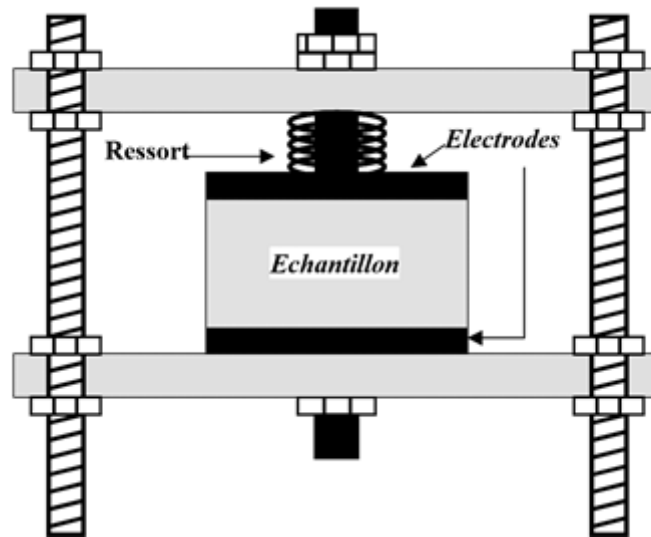


Figure IV-2 : Schéma du dispositif de mesure

Il est à noter que ce système dont le principe est connu, a été réalisé au laboratoire «Matériaux et durabilité des constructions ».

La permittivité effective ϵ_{eff} est déduite par la suite à partir des formules suivantes :

$$\epsilon_e = \frac{c_p}{c_0} \quad \text{et} \quad c_0 = \frac{\epsilon_0 S}{h}$$

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m (la permittivité du vide)

h est la hauteur de l'échantillon

S est la section effective de l'électrode du dispositif

Les mesures sont effectuées à température ambiante.

Les mesures des capacités et par conséquent celles des permittivités sont faites pour un ensemble de fréquence allant de 100 kHz à 1000 kHz.

Les rapports E/C considérés sont respectivement: 0.45; 0.5; 0.6; 0.7.

Les concentrations (fractions volumiques) examinées sont des concentrations (inclusions) en en air de formes cylindriques dont les volumes sont: 0% (échantillon plein) ; 4.02% ; 12.15% ; 20.66% ; 28.83%.

Les échantillons étudiés sont notés: M0; M1; M2; M3; M4.

Les données de tous les essais sont présentées en annexes.

IV.3. Objectifs des essais :

Le principe de tous les essais est le même. Il consiste en la détermination de la permittivité diélectrique d'un échantillon pour des fréquences données, des rapports E/C donnés et des concentrations en air aussi données.

Les différentes combinaisons par rapport à ces paramètres ainsi que les résultats de ces combinaisons sont traduits par des courbes.

IV.4. Influence de la concentration en air (cavités d'air), de la fréquence sur la permittivité diélectrique effective pour un rapport E/C donné :

Il est à noter que les termes concentration en air; cavités d'air; fraction volumique d'air (porosité); inclusion en air; ont ici la même signification.

Les figures (IV-3, IV-4, IV-5, IV-6) traduisent chacune les résultats des essais effectués sur des échantillons de mortier pour un rapport E/C donné, des concentrations en air données et un ensemble de fréquences. Les valeurs numériques de ces paramètres sont indiquées sur ces figures.

Analyse des figures :

La constante diélectrique effective du mortier contenant des cavités d'air diminue lorsque la concentration (volume) d'air augmente. D'autre part cette constante diminue avec l'augmentation de la fréquence.

Ce phénomène est dû au fait que la constante diélectrique de l'air est beaucoup plus faible que celle du mortier.

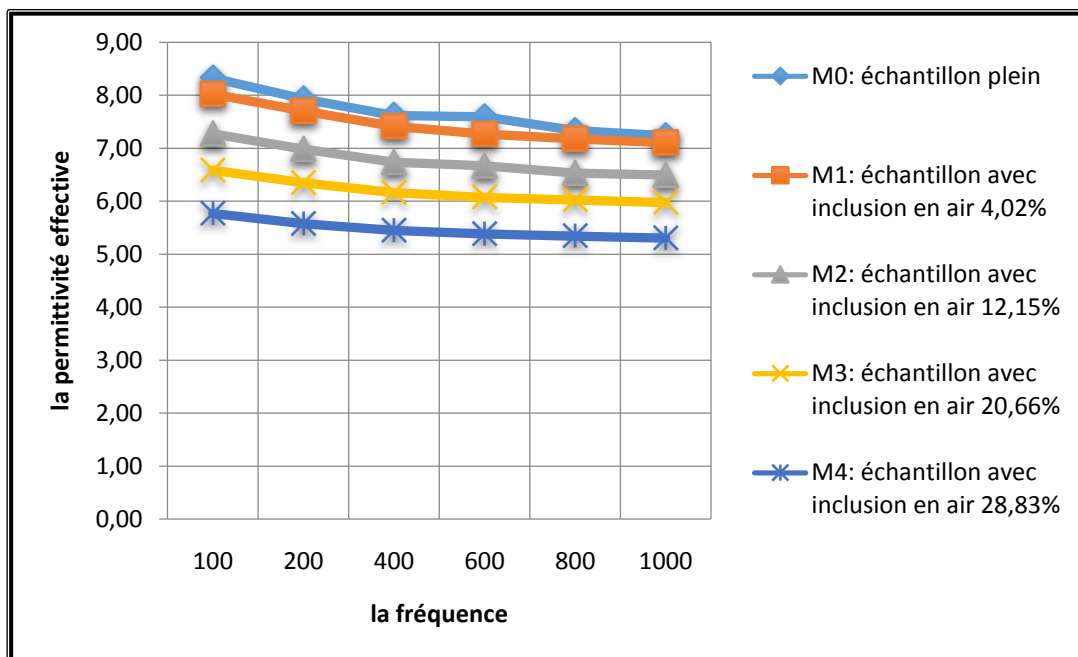


Figure IV-3: La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentrations C% d'air et pour E/C=0,45

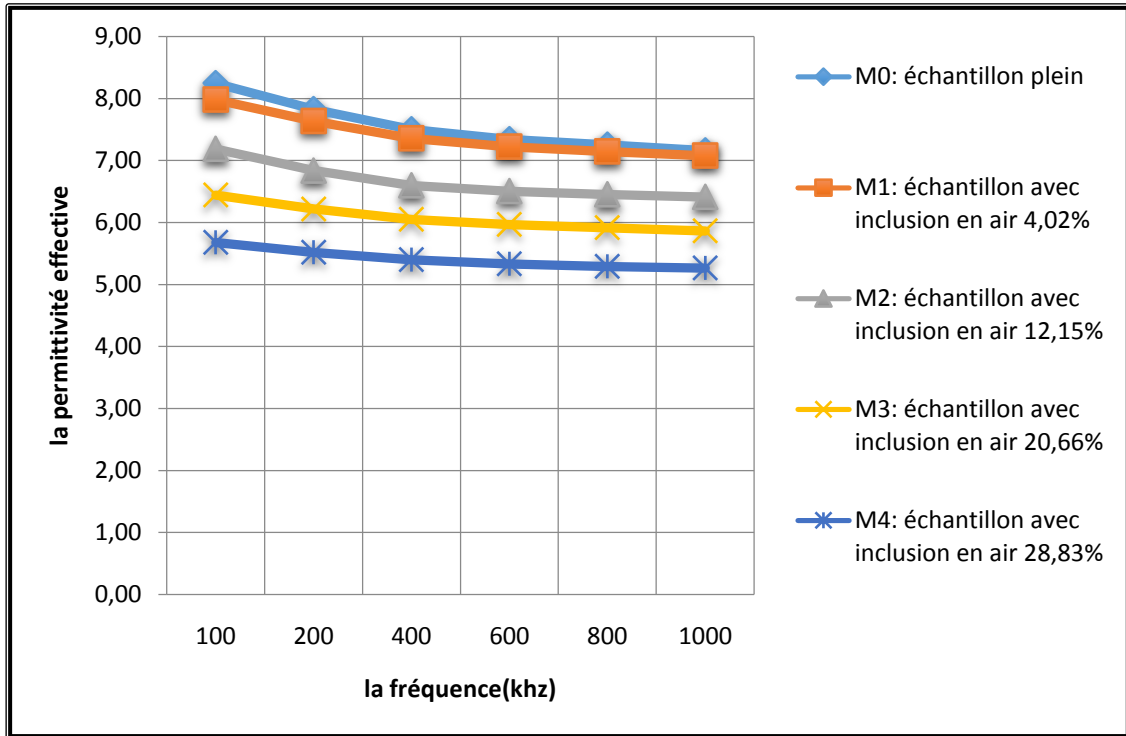


Figure IV-4: La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentrations C% d'air et pour E/C=0,5

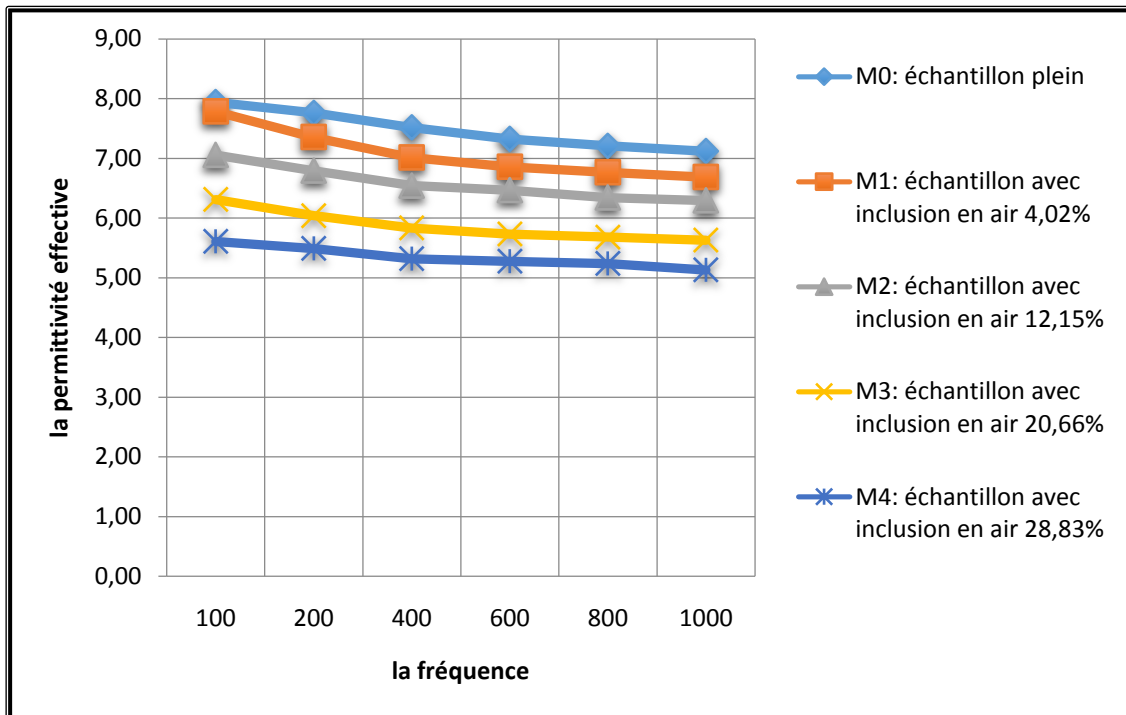


Figure IV-5: La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentrations C% d'air et pour E/C=0,6

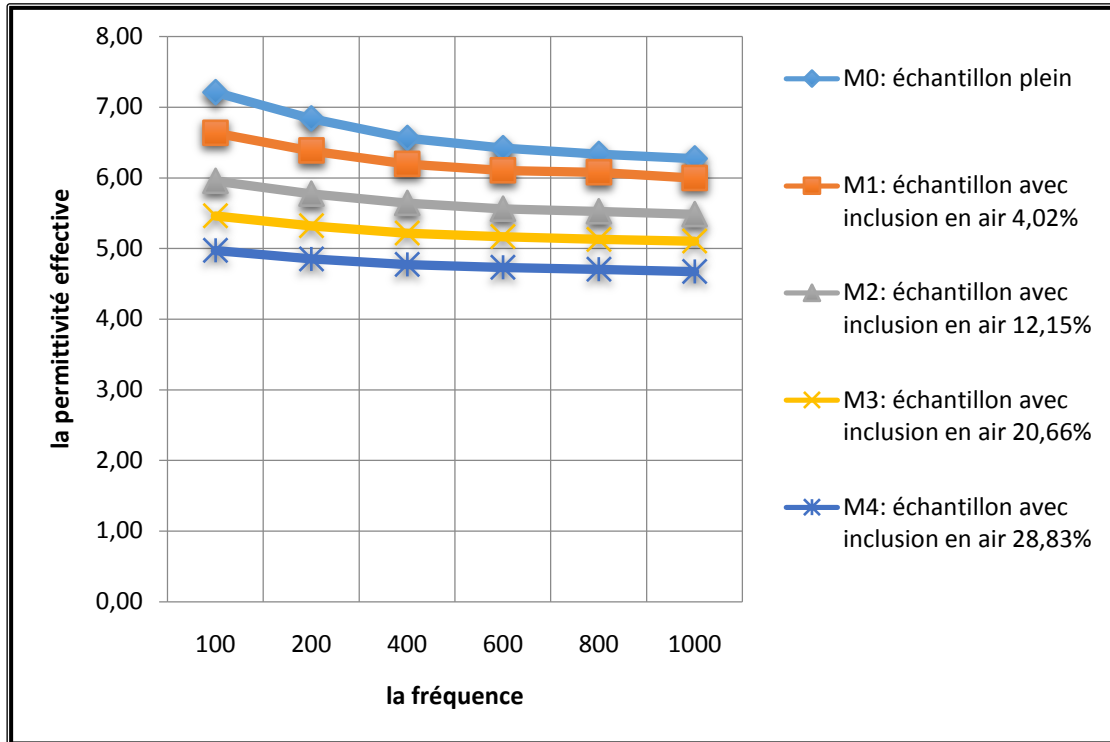


Figure IV-6:La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence pour différentes concentrations C% d'air et pour E/C=0,7

IV.5. Influence du rapport E/C, de la concentration en air sur la permittivité diélectrique effective pour une fréquence donnée:

Les figures (7-12) et les figures (13 - 18) dessinées en 3D pour une meilleure représentation, illustrent la variation de la permittivité diélectrique effective pour différents rapport E/C, différentes concentrations d'air et une fréquence donnée.

Analyse des figures:

La permittivité diélectrique effective diminue avec l'augmentation du rapport E/C ainsi qu'avec l'augmentation des concentrations en air quelle que soit la fréquence appliquée.

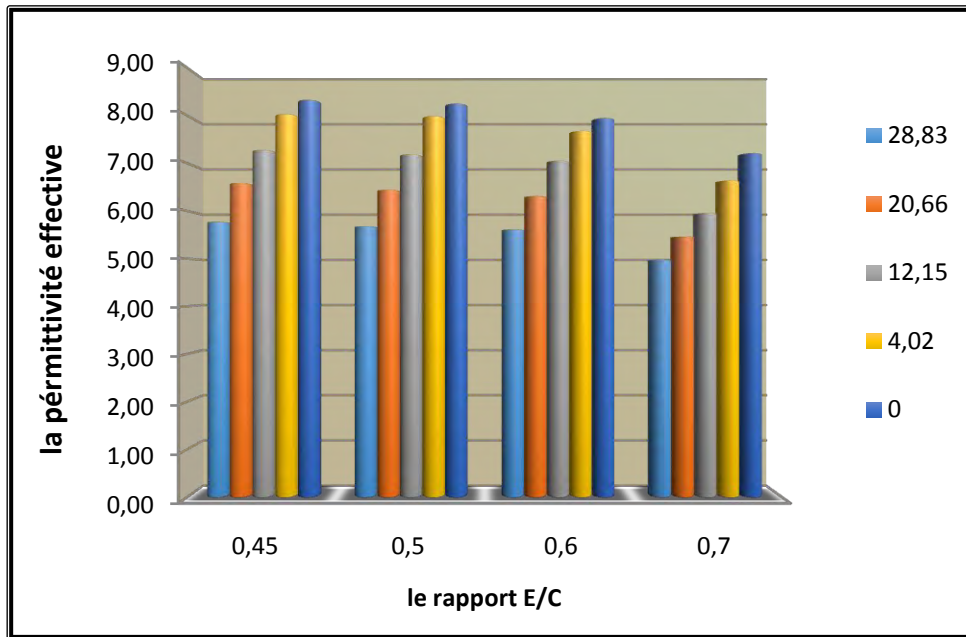


Figure IV-7 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 100khz

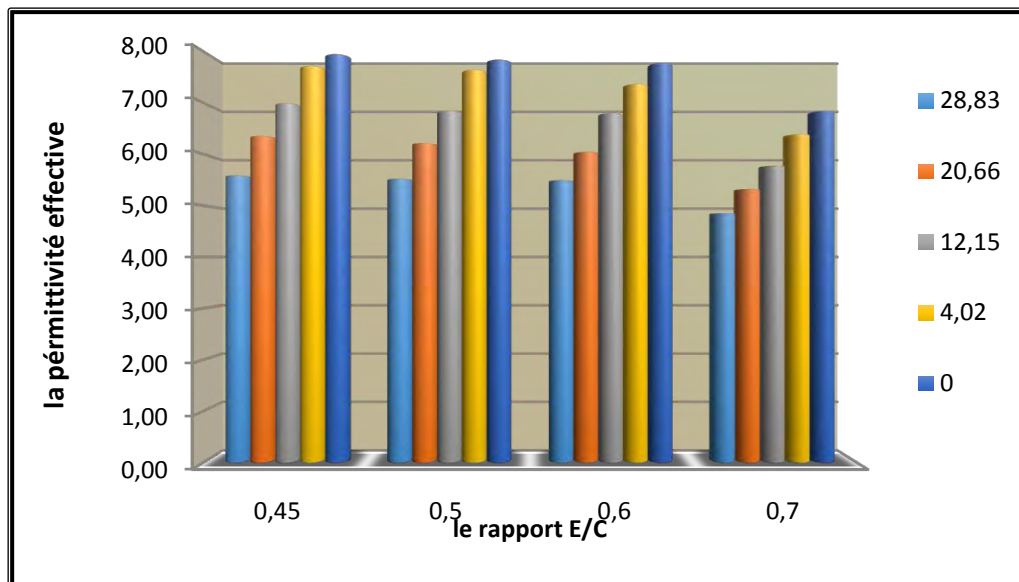


Figure IV-8 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 200khz

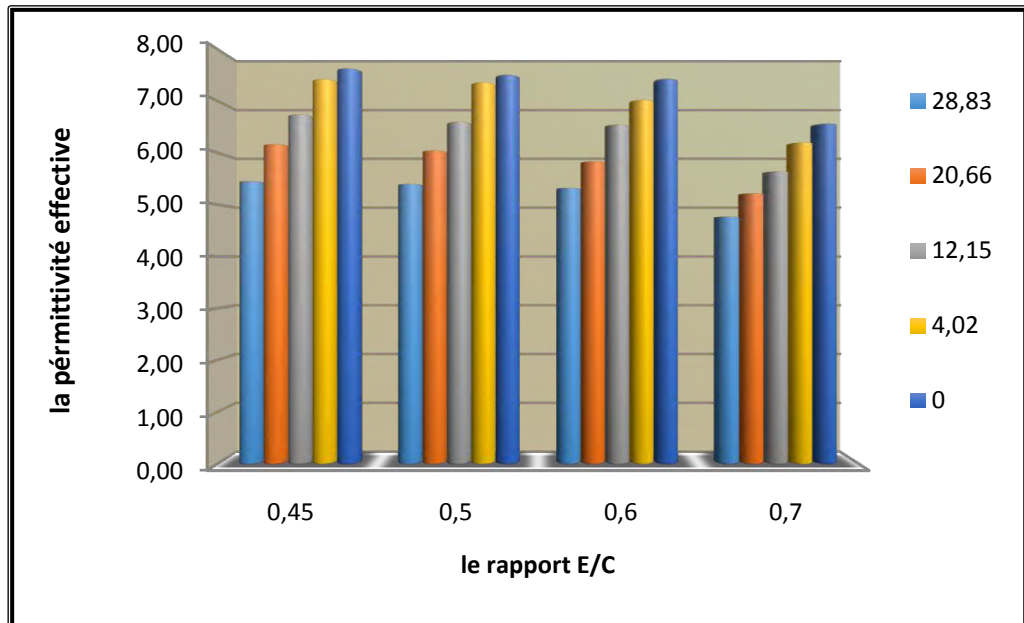


Figure IV-9 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 400khz

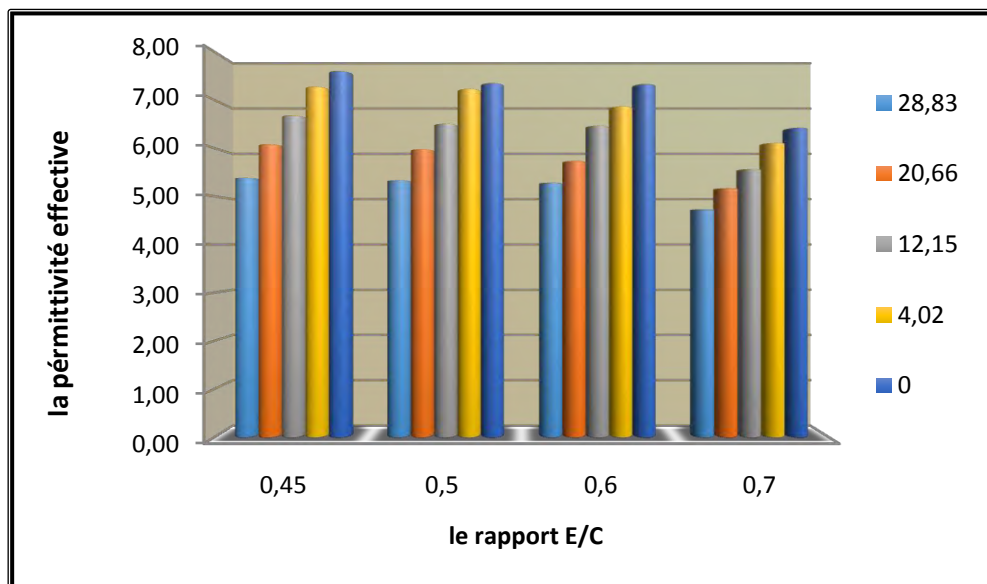


Figure IV-10 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 600khz

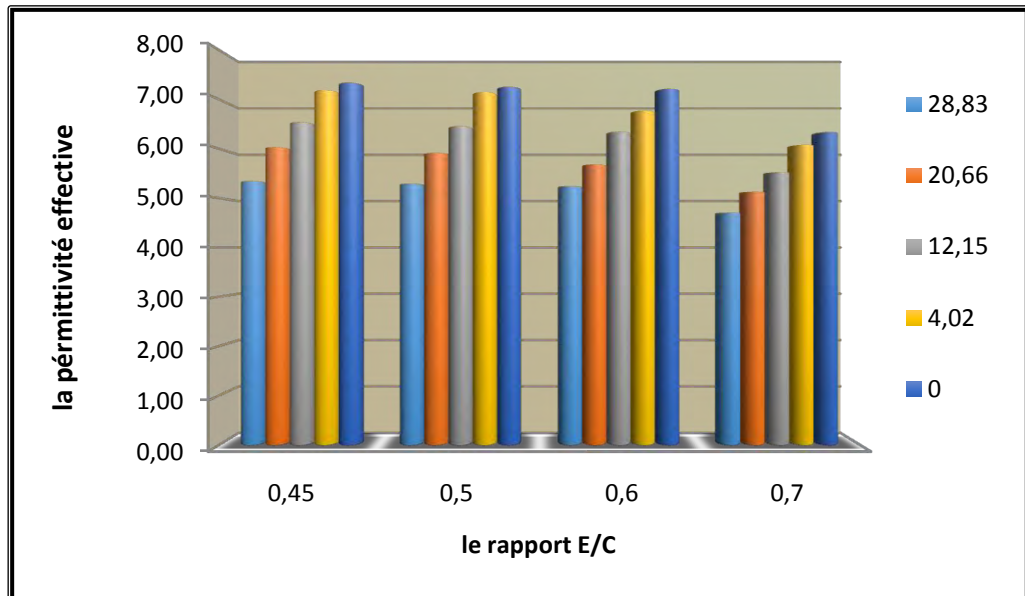


Figure IV-11 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 800kHz

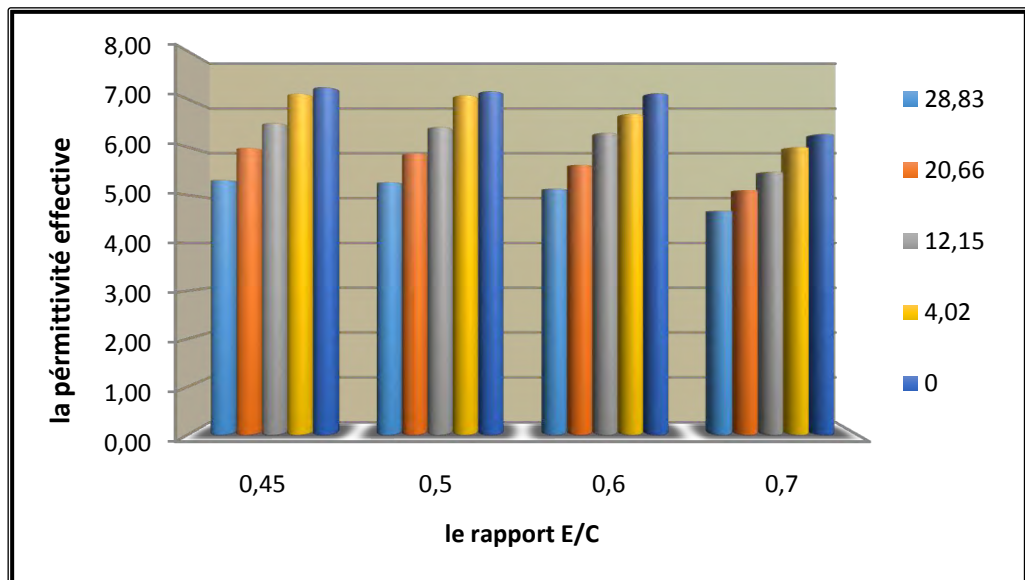


Figure IV-12 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 1000kHz

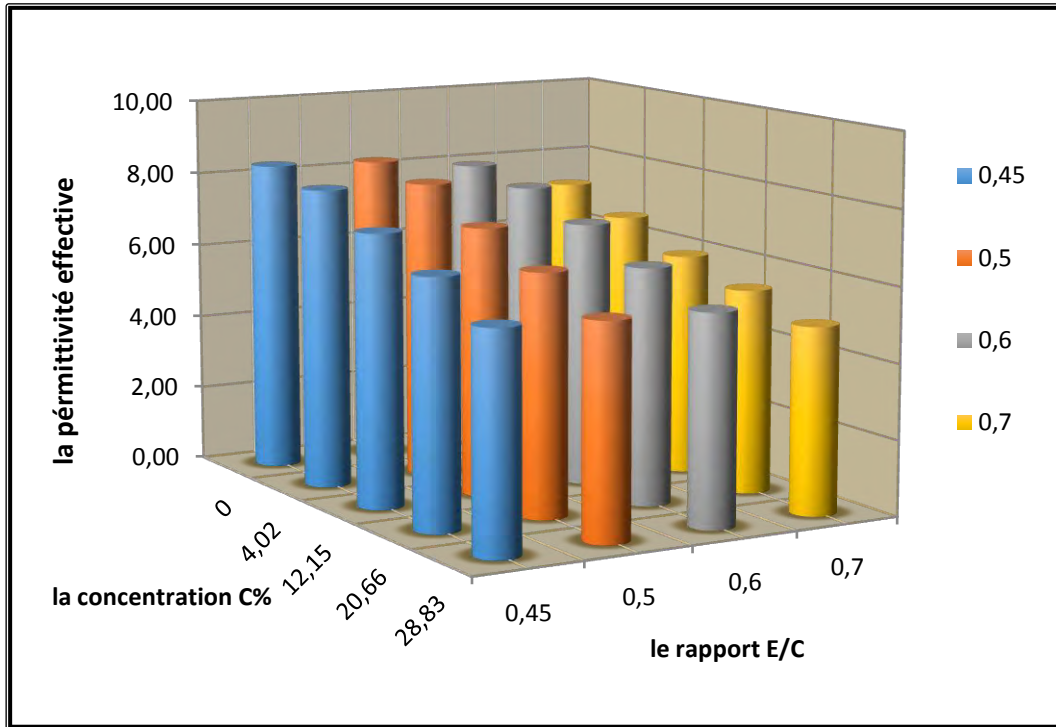


Figure IV-13 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 100khz

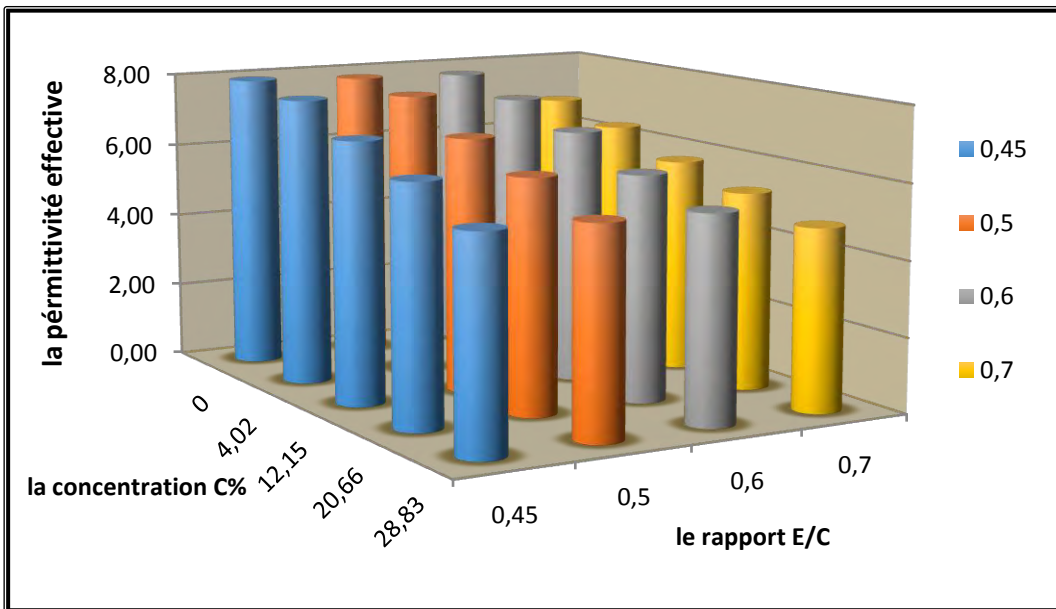


Figure IV-14 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 200khz

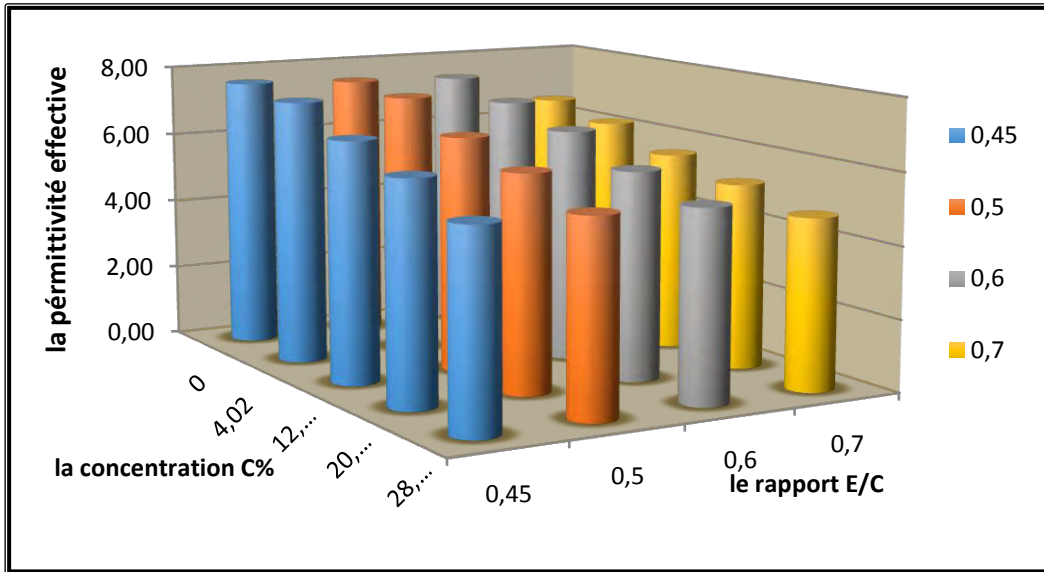


Figure IV-15 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 400khz

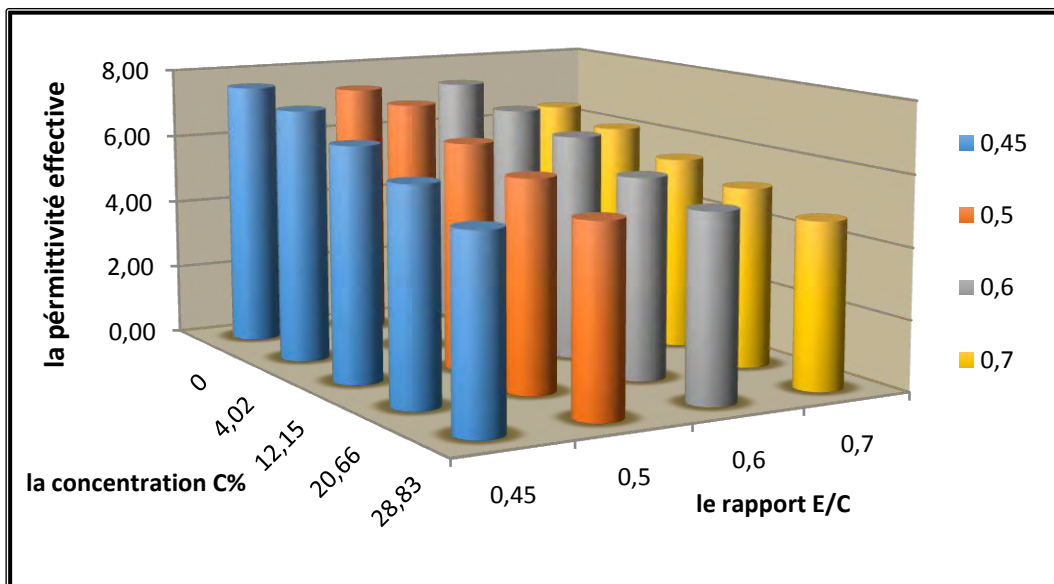


Figure IV-16 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 600khz

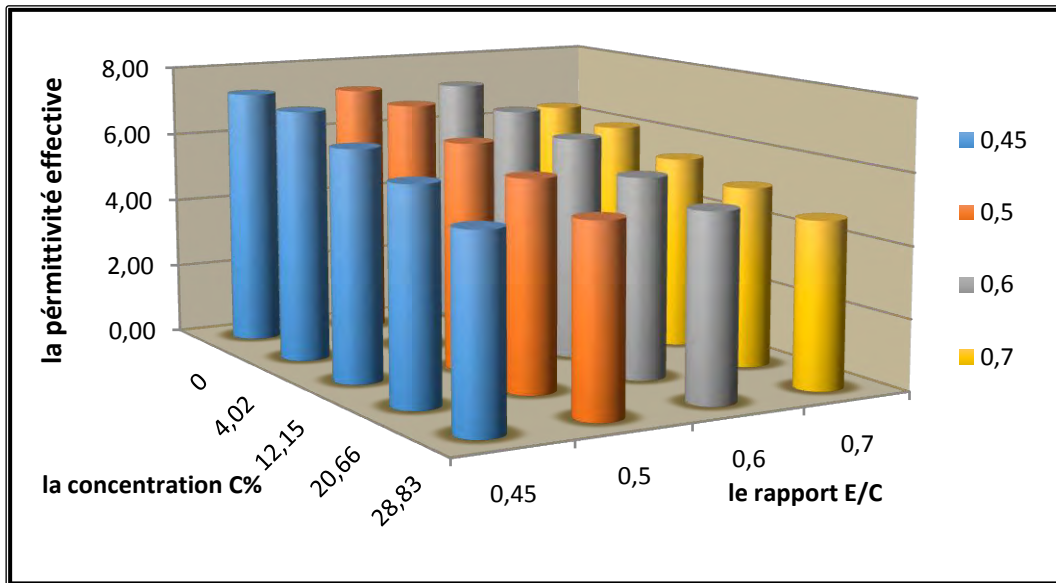


Figure IV-17 : la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 800khz

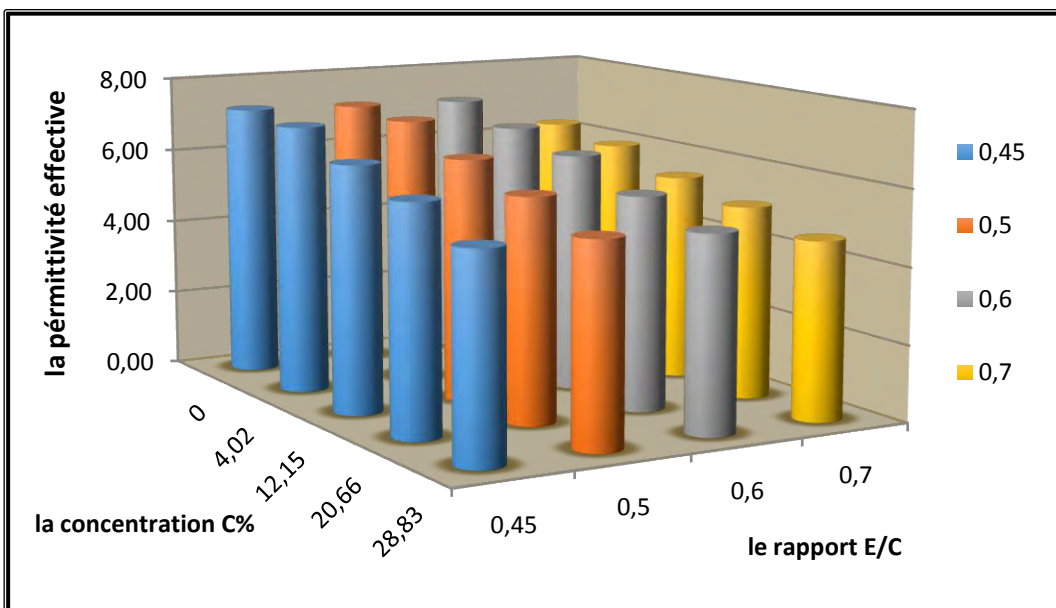


Figure IV-18: la variation de la permittivité effective en fonction de la concentration C% d'air et différents E/C pour une fréquence de 1000khz

IV.6. Influence de la fréquence sur la permittivité diélectrique effective pour une concentration en air donnée et un rapport E/C donnée :

Les figures (19 - 23) indiquent la variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence pour une concentration en air donnée et un rapport E/C donnée.

Analyse des figures:

La permittivité diélectrique effective diminue lorsque la fréquence augmente quelle que soit la concentration en air et le rapport E/C.

Cet effet est surtout très prononcé à basse fréquence.

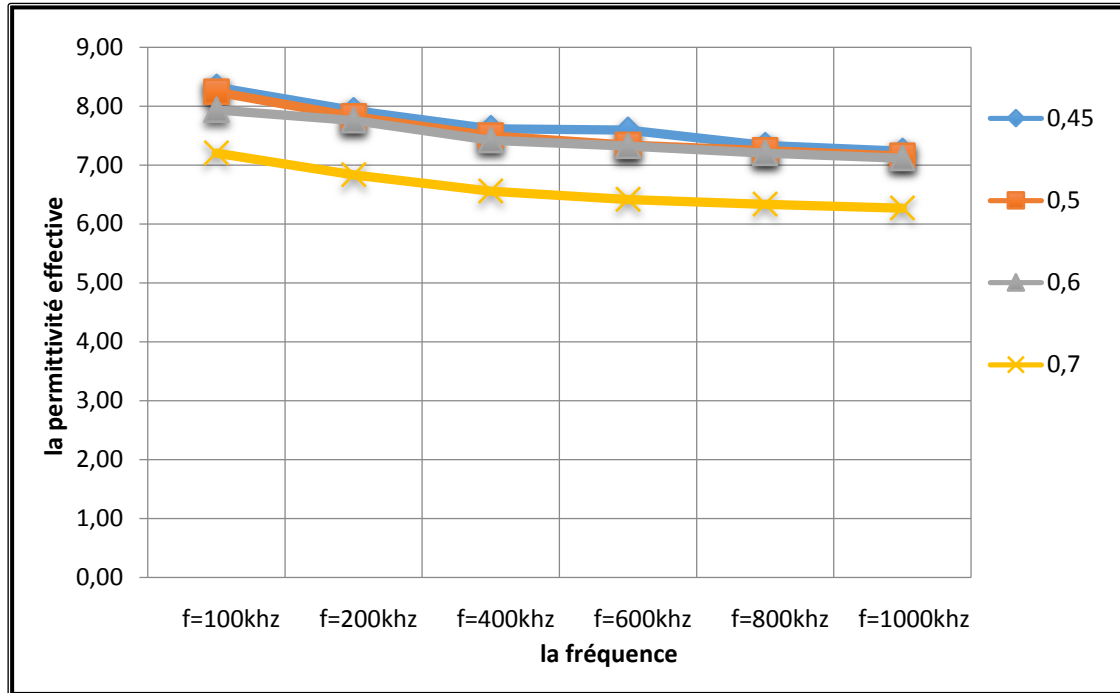


Figure IV-19: La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M0: échantillon plein

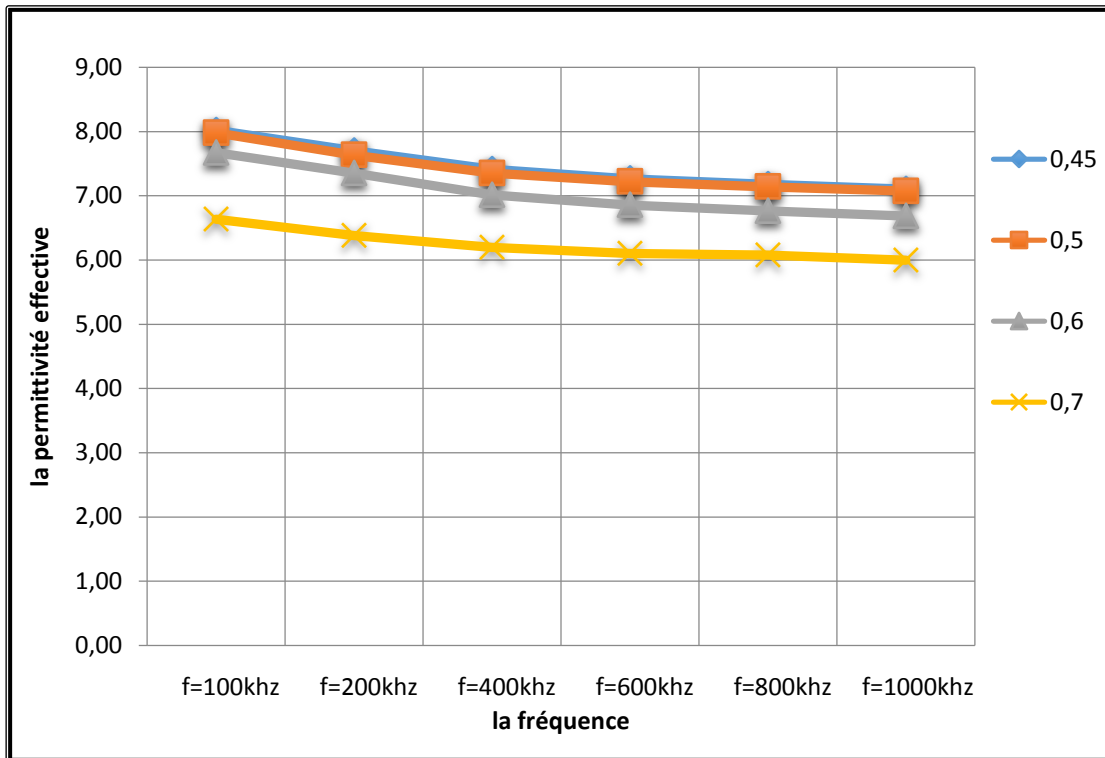


Figure IV-20 : La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

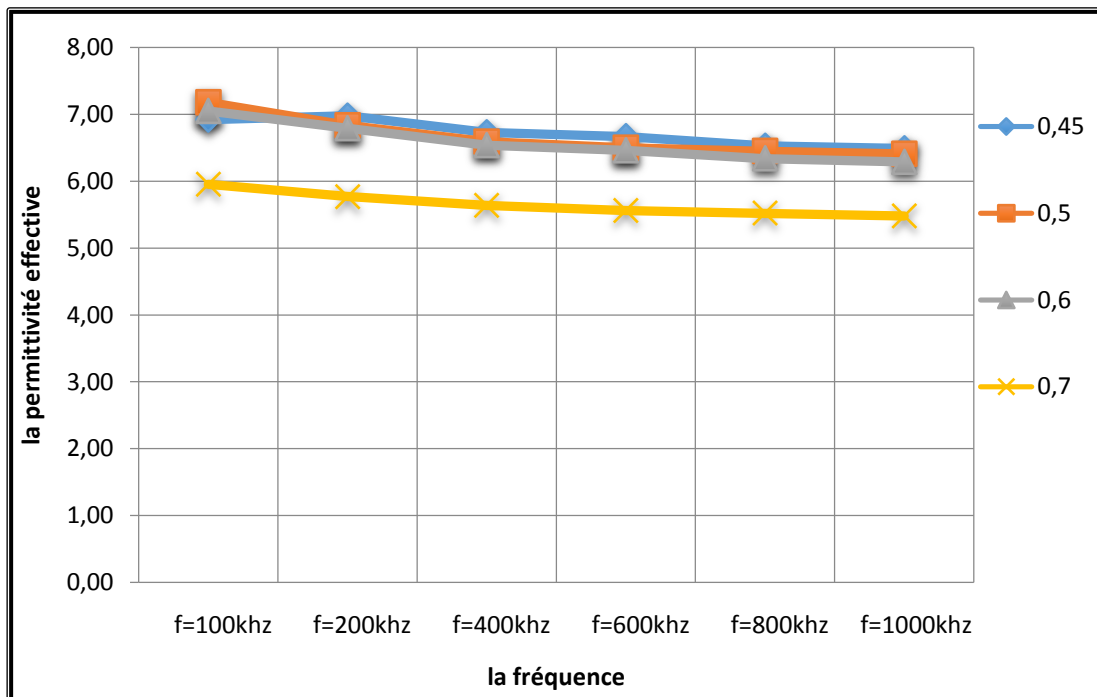


Figure IV-21 : La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air de 12,15%

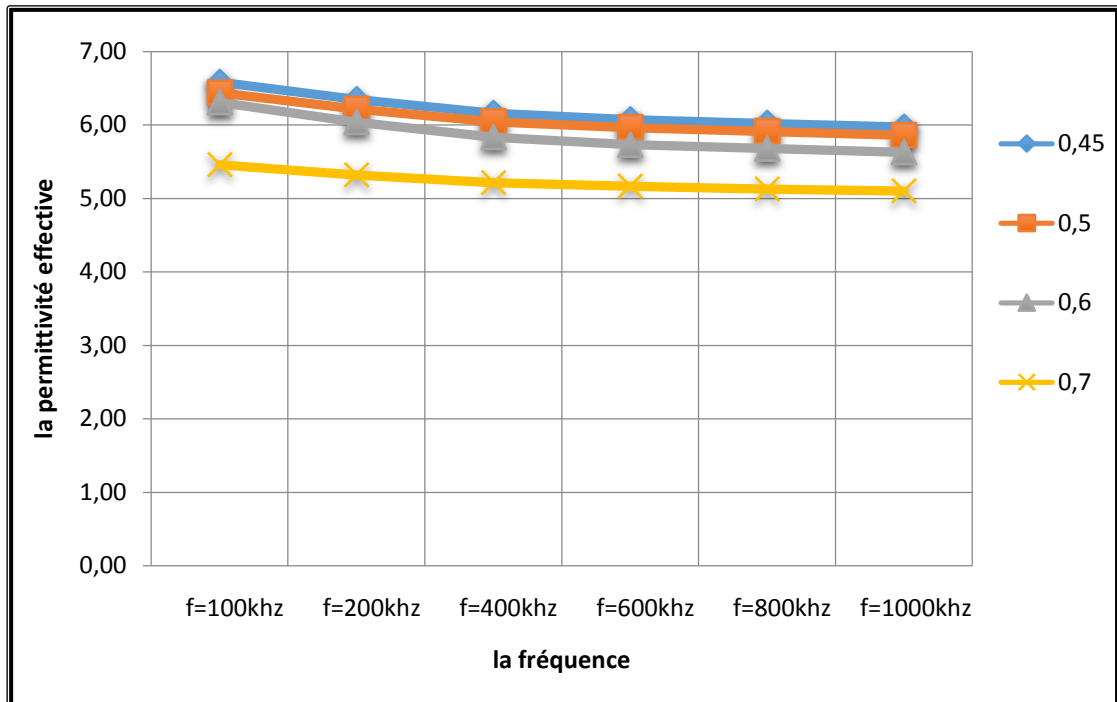


Figure IV-22 : La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air de 20,66%

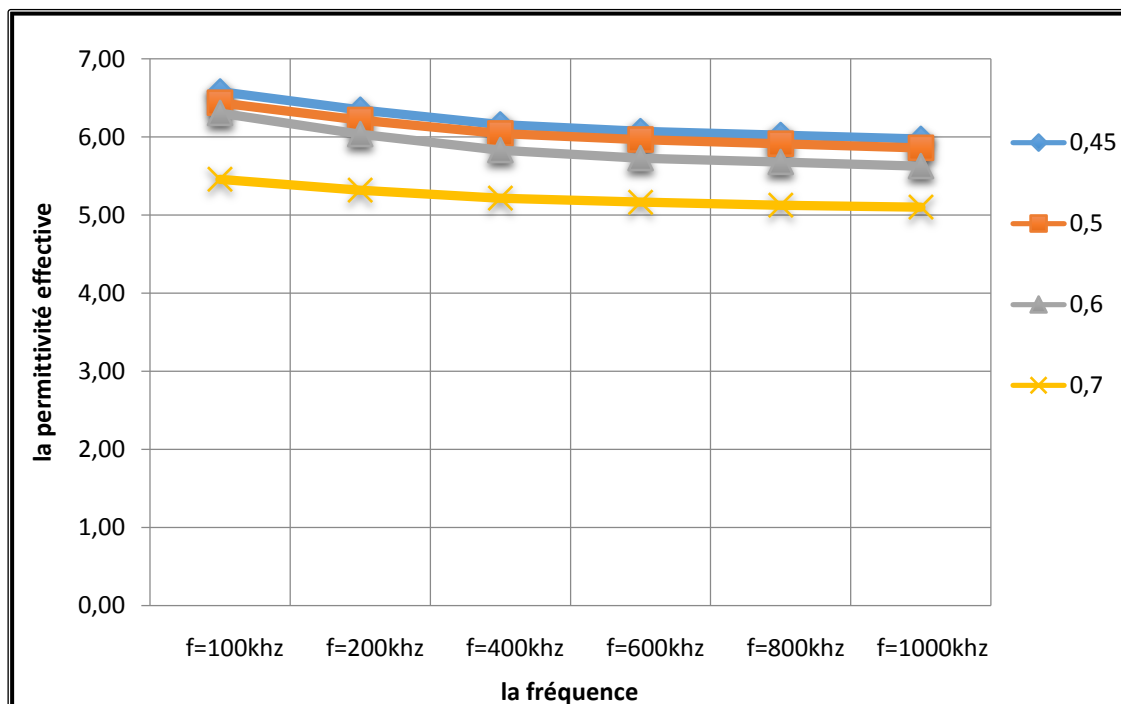


Figure IV-23 : La variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (f) et E/C pour M1: échantillon avec inclusion en air de 28,83%

Résultat important:

Il ressort de tous les essais réalisés que la permittivité diélectrique effective diminue avec l'augmentation de la concentration en air autrement dit avec l'augmentation de la porosité. Ce qui représente un résultat important et un indicateur sur la résistance mécanique de notre matériau (le mortier) car la résistance d'un matériau diminue avec l'augmentation de sa porosité. Par conséquent cette résistance diminue avec la diminution de la permittivité effective.

IV.7. Confrontation des résultats avec les modèles :

Les résultats auxquels nous sommes arrivés seront exploités pour établir un modèle permettant le calcul de la permittivité diélectrique effective en fonction de la porosité.

La majorité des lois de mélange calculant la valeur de la constante diélectrique en fonction de la porosité, traitent le cas d'un diélectrique à deux phases.

IV. 8.Prédiction de la valeur de la constante diélectrique d'un matériau à deux phases en utilisant Simulink :

Les lois de mélanges exposées dans le chapitre (III) sont utilisés pour établir des modèles correspondant chacun à une loi donnée. Cette modélisation est réalisée par le logiciel Simulink.

IV.8.1.Le logiciel Simulink:

Le logiciel Simulink est une extension graphique du logiciel de calcul scientifique Matlab. Il permet de modéliser et de simuler des systèmes. Par abus de langage, Simulink désigne également le langage graphique permettant de représenter ces systèmes.

Simulink utilise la technique de drag and drop (sélectionner et faire glisser). Il est facile de positionner les éléments nécessaires dans la fenêtre du modèle. On relie ensuite ces éléments entre eux pour constituer le modèle. Chaque élément possède une description et éventuellement des paramètres qui peuvent être modifiés.

Les éléments utilisés dans ce modèle sont représentés dans le tableau (IV.1)





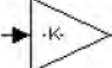



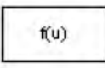

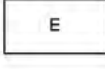

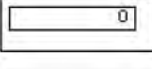

Boite	Identification	Emplacement
	Clock / Générateur	Librairie du Simulink  /Sources
	Constant / Constante	Librairie du Simulink  / Sources
	gain	Librairie du Simulink  / Math Operations
	Mux/Multiplexeur	Librairie du Simulink  /Signal Routing
	Fcn/Fonction	Librairie du Simulink  /User-Defined Functions
	Simout/Résultats de simulation	Librairie du Simulink  / Sinks
	Display/Afficheur	Librairie du Simulink  /Sinks

Tableau IV.1: Identification des différentes boites utilisées dans le Modèle.

Nous avons proposé un modèle via l’outil Simulink (sous le logiciel Matlab) schématisé sur la figure (IV.2). Le Modèle prédit la constante diélectrique en fonction de la fraction volumique dans un mélange constitué de deux phases (une matrice mère ayant une permittivité égale à ϵ_m , et une seule inclusion avec une permittivité diélectrique égale à ϵ_i . Ce modèle est valable pour les lois de : Maxwell Garnett [2-4], Bruggeman [2,5], Looyenga [2,6], Lichtenecker [2,6], le modèle Série [2] et le modèle Parallèle [2].

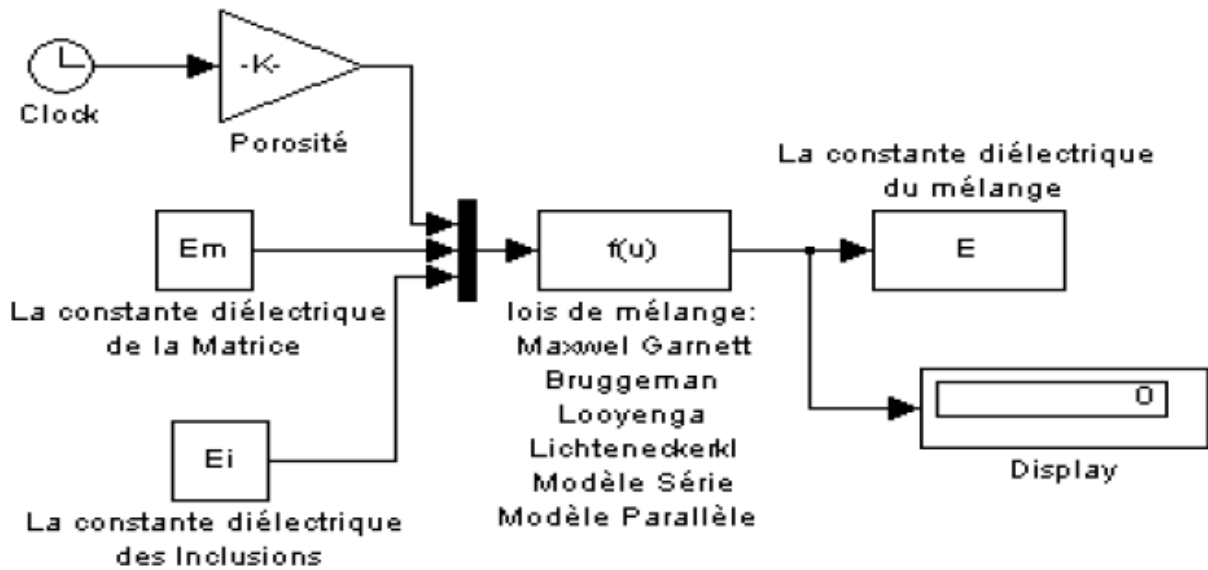


Figure (IV.24) Schéma bloc via Simulink utilisé pour prédire la permittivité d'un mélange de deux phases, valable pour les lois de mélange de Maxwell Garnett, Bruggeman, Looyenga, Lichtenecker, les modèles Série et Parallèle.

Nous rappelons dans ce qui suit les différentes expressions des lois de mélange exposées dans le chapitre (III)

Lois de Maxwell Garnett :

$$\left(\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_m}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_m} \right) = p \left(\frac{\epsilon_i - \epsilon_m}{\epsilon_i + 2\epsilon_m} \right)$$

Lois de Bruggeman:

$$(1 - P)(\epsilon_m - \epsilon_{eff})(\epsilon_m + 2\epsilon_{eff}) + P(\epsilon_i - \epsilon_{eff})/(\epsilon_i + 2\epsilon_{eff}) = 0$$

Lois de Looyenga:

$$\epsilon_{eff} = \left[\epsilon_m^{1/3} + P(\epsilon_i^{1/3} - \epsilon_m^{1/3}) \right]^3$$

Lois de Lichtenecker :

$$\ln \epsilon_{eff} = P \ln \epsilon_i + (1 - P) \ln \epsilon_m$$

Lois de Bornes de Wiener:

- (Modèle Série) : $\epsilon_{eff\ min} = P/\epsilon_i + (1 - P)/\epsilon_m$

- (Modèle Parallèle) $\epsilon_{eff\ max} = P\epsilon_i + (1 - P)\epsilon_m$

IV.8.2.Ajustement des résultats expérimentaux de nos essais avec les résultats des modèles établis :

Dans cette partie nous reprenons les résultats expérimentaux obtenus (IV.3, IV.4, IV.5), pour les comparer aux résultats donnés par les différents modèles des lois de mélange développés.

Nous constatons que les résultats obtenus confirment plus ou moins les prédictions des lois de mélanges. Ces constatations sont illustrées par les figures qui suivent (25 - 64).

Analyse des figures:

Les courbes obtenues par les lois de mélange de Bruggeman, Maxwell Garnett, Looyenga et Lichtenecker forment un faisceau prédisant des résultats assez similaires. Alors que ceux prédits par la loi de Wiener pour le modèle série s'éloigne relativement du reste du faisceau.

Les lois de mélanges de Maxwell - Garnett et le modèle parallèle de wiener en particulier prédisent des résultats proches de ceux donnés par les essais expérimentaux.

Les résultats obtenus par les lois de mélange de Lichtenecker et Bruggman et Looyenga divergent des résultats expérimentaux d'un maximum de 22%. Cependant les résultats obtenus en utilisant les lois de mélange de Maxwell Garnett et de Wiener pour le modèle parallèle ne divergent que d'un maximum de 8% de ces résultats expérimentaux

En outre quand le rapport E/C augmente les courbes des résultats expérimentaux tendent à se déplacer vers l'intérieur du faisceau des courbes des lois de mélange.

Remarque importante:

La courbe donnée par les résultats expérimentaux se situe toujours entre celle de Maxwell Garnett et de Wiener pour le modèle parallèle; ce qui nous à permis de prendre la moyenne de ces deux lois de mélange et proposer par conséquent une loi de mélange intermédiaire à savoir:

$$\epsilon_{eff} = \frac{(p^2 - p - 3)\epsilon_m^2 + (p - 1)\epsilon_i^2 - (2p^2 + 3p - 1)\epsilon_i\epsilon_m}{2[(p - 1)\epsilon_i - (p + 2)\epsilon_m]}$$

Il est à noter que toutes les lois de mélange examinées considèrent des inclusions de formes sphériques alors que dans notre cas celles-ci sont considérées de formes cylindriques de volume équivalent.

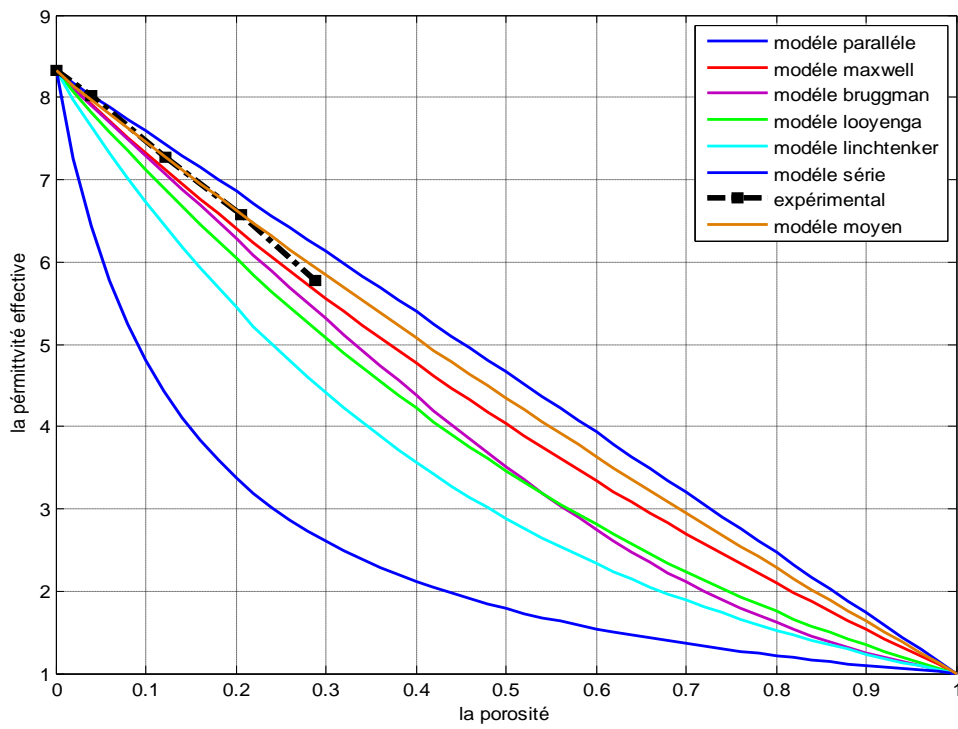


Figure (IV.25) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=100$ khz.

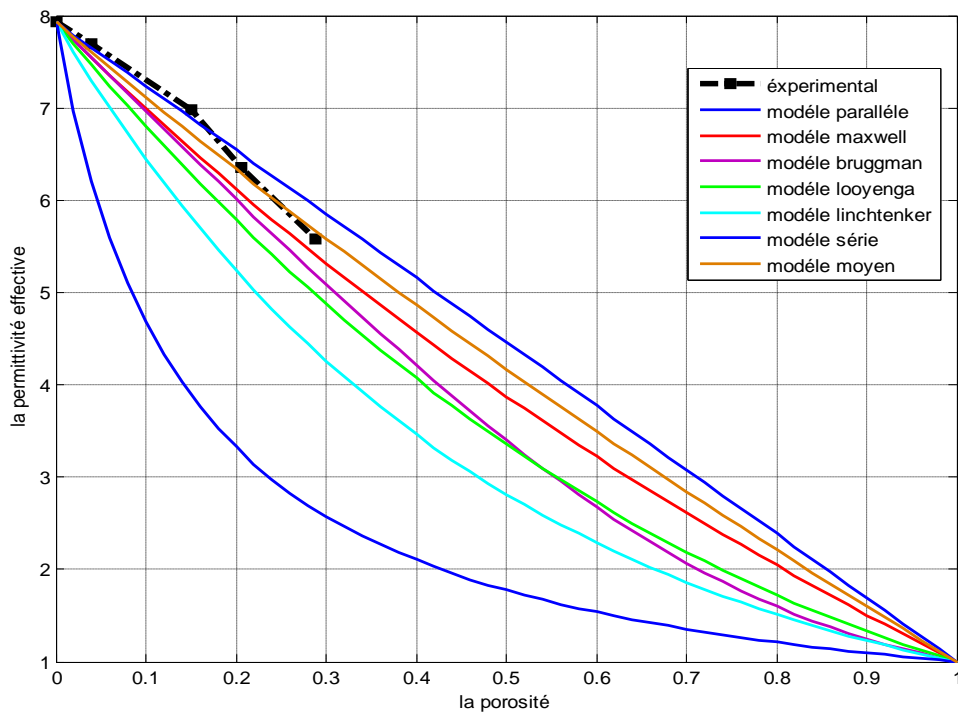


Figure (IV.26) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=200$ khz.

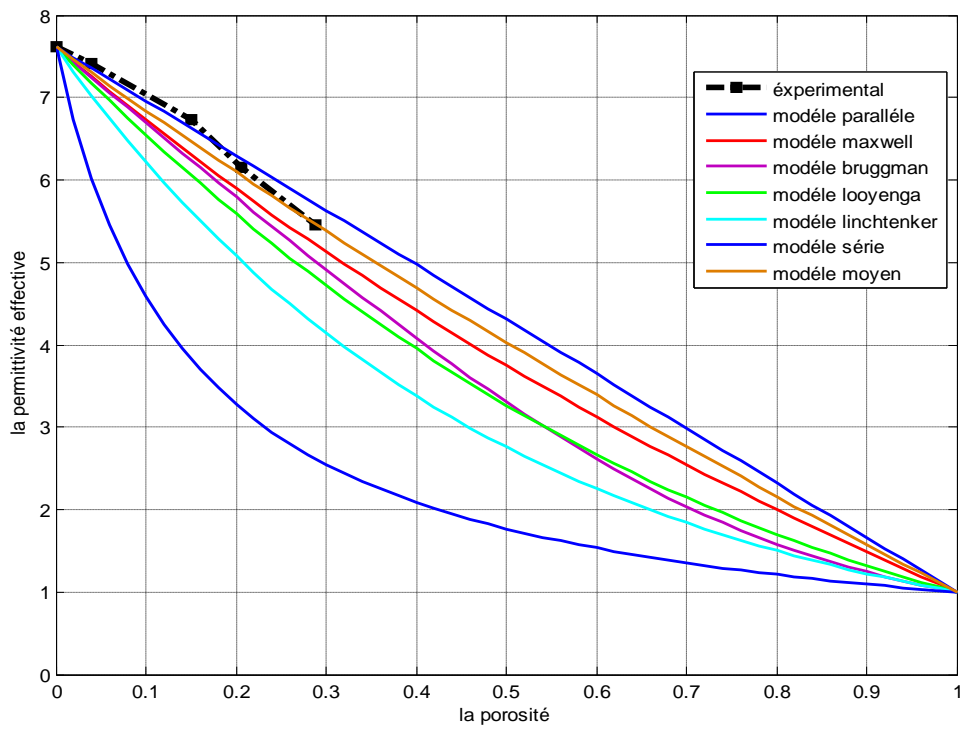


Figure (IV.27) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=400$ khz.

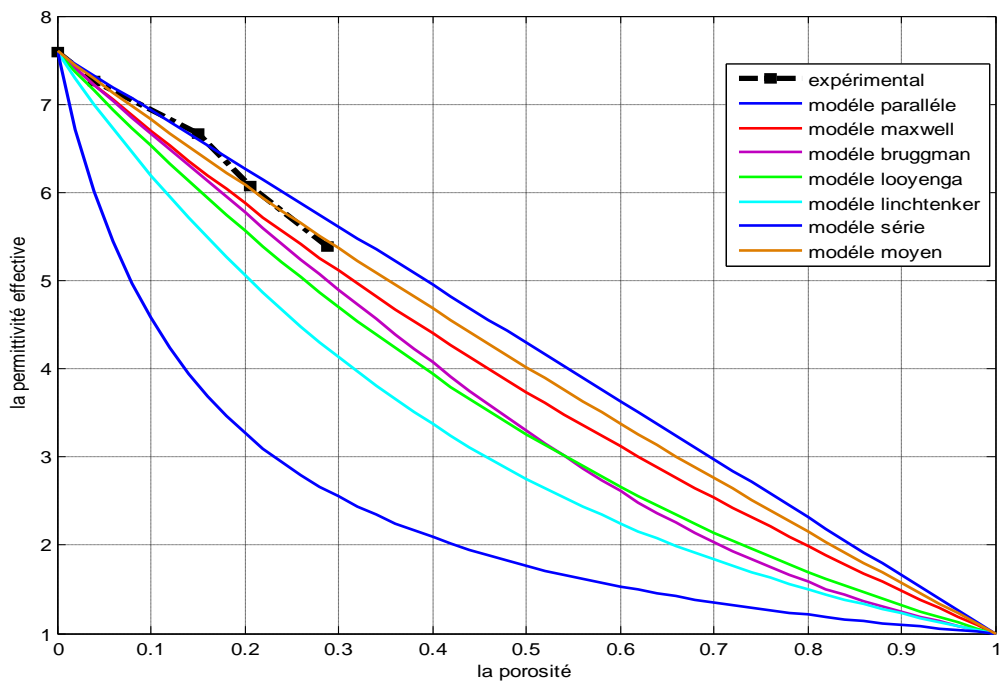


Figure (IV.28) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=600$ khz.

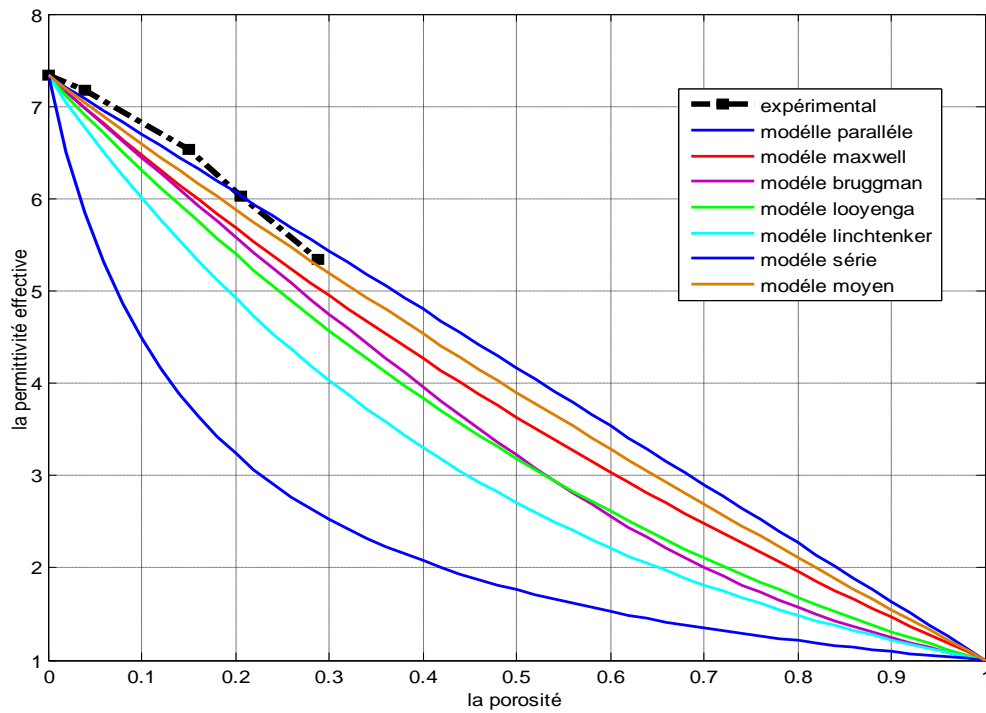


Figure (IV.29) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=800$ khz.

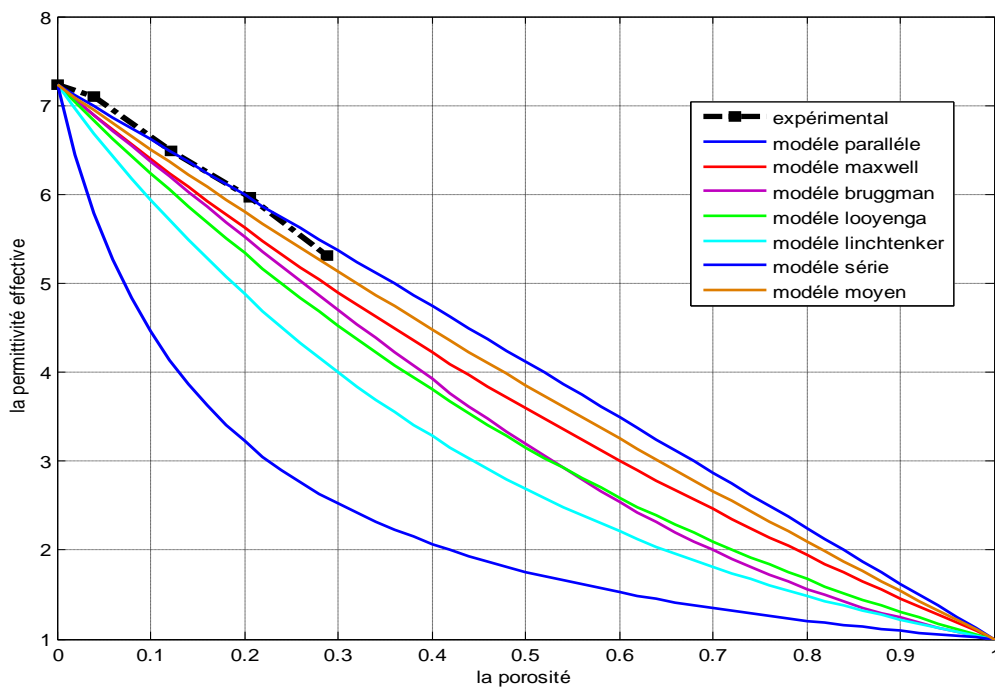


Figure (IV.30) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.45$ et $f=1000$ khz.

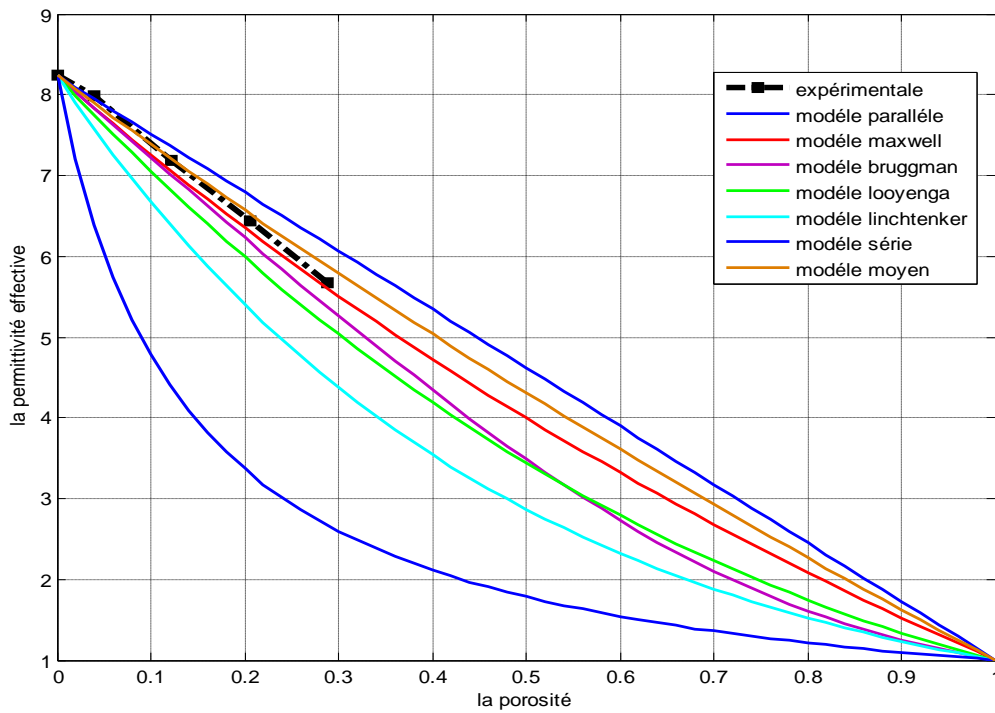


Figure (IV.31) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=100$ khz.

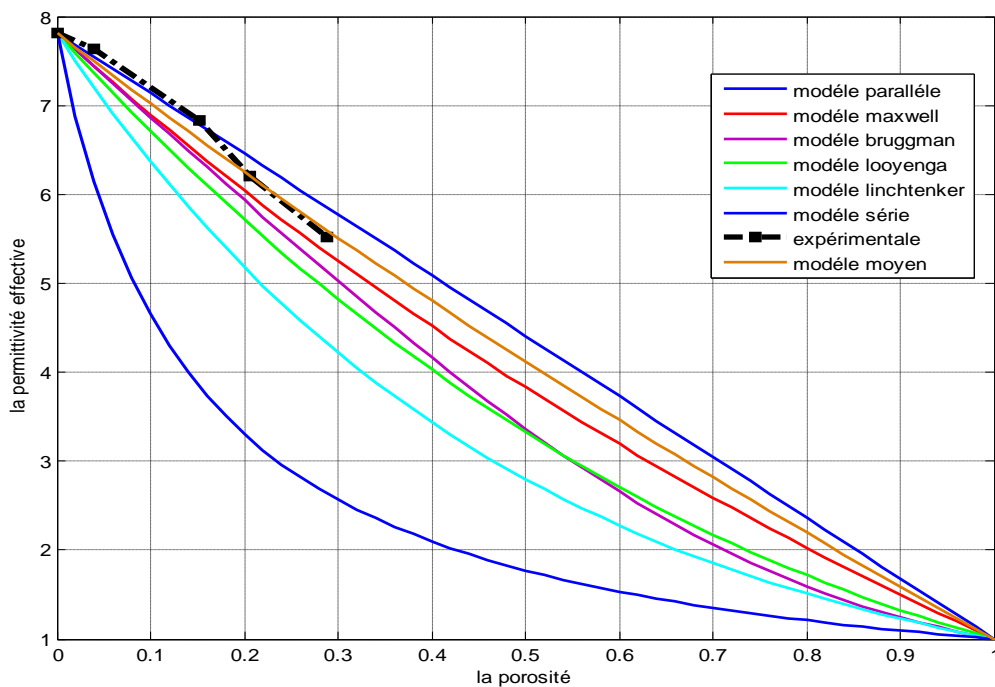


Figure (IV.32) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=200$ khz.

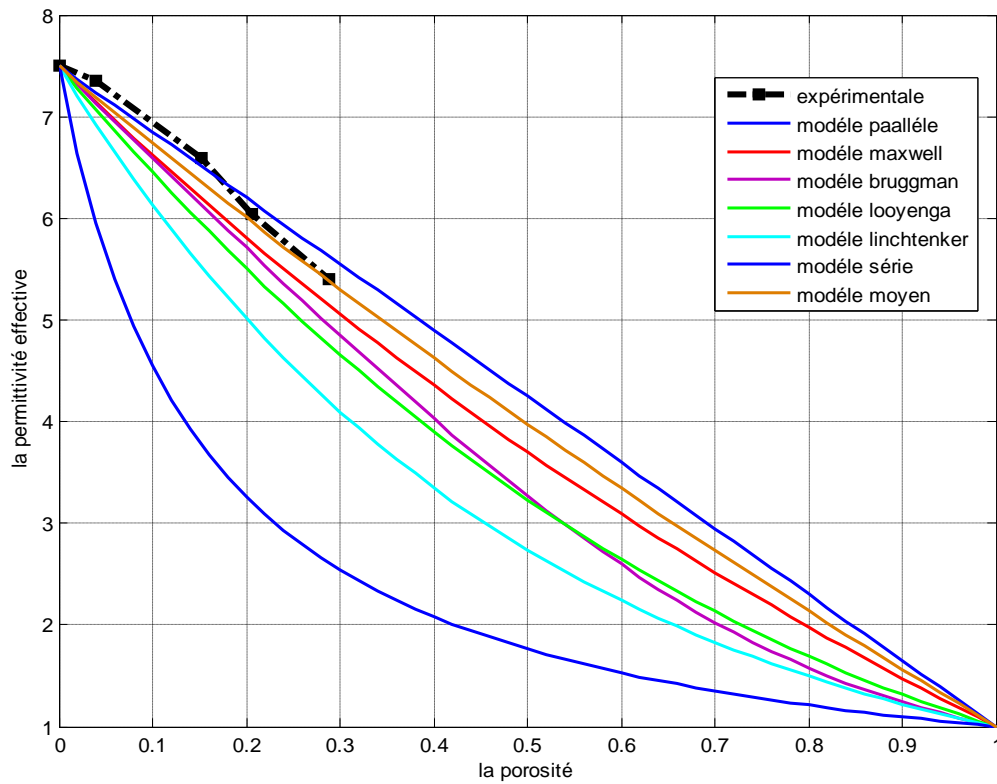


Figure (IV.33) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=400$ khz.

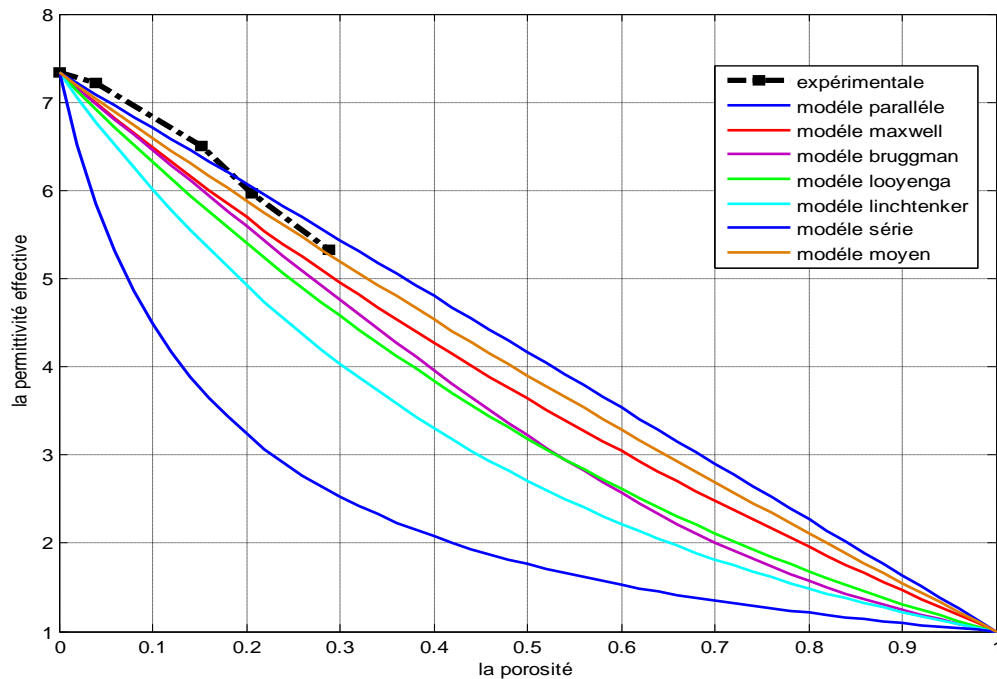


Figure (IV.34) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=600$ khz.

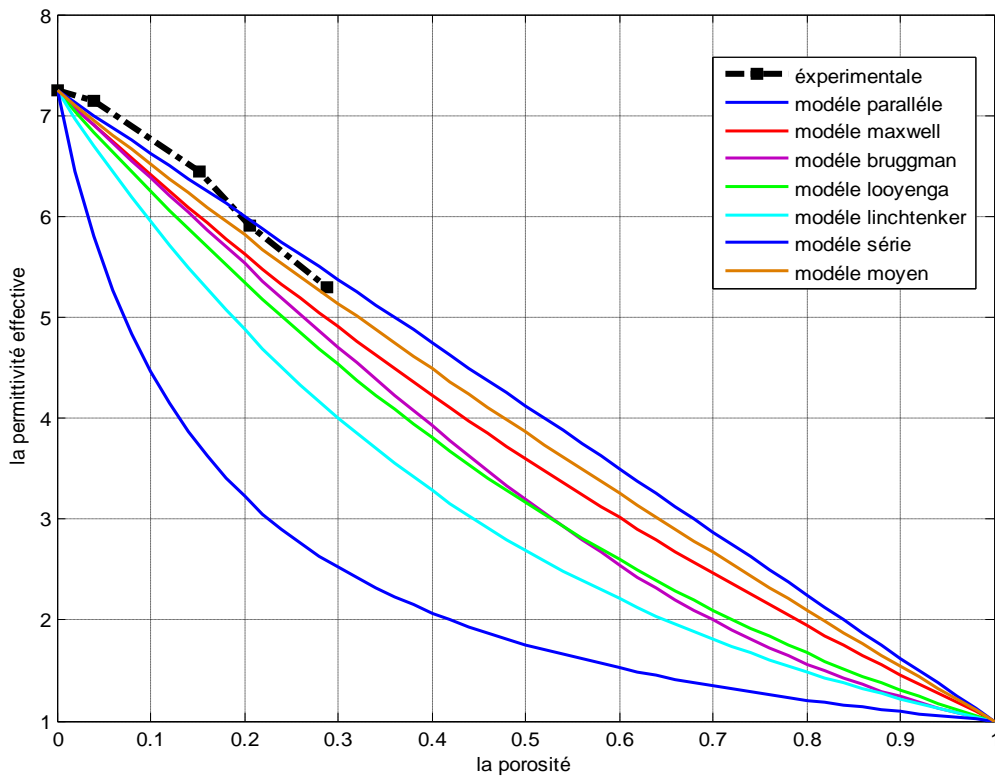


Figure (IV.35) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=800$ khz.

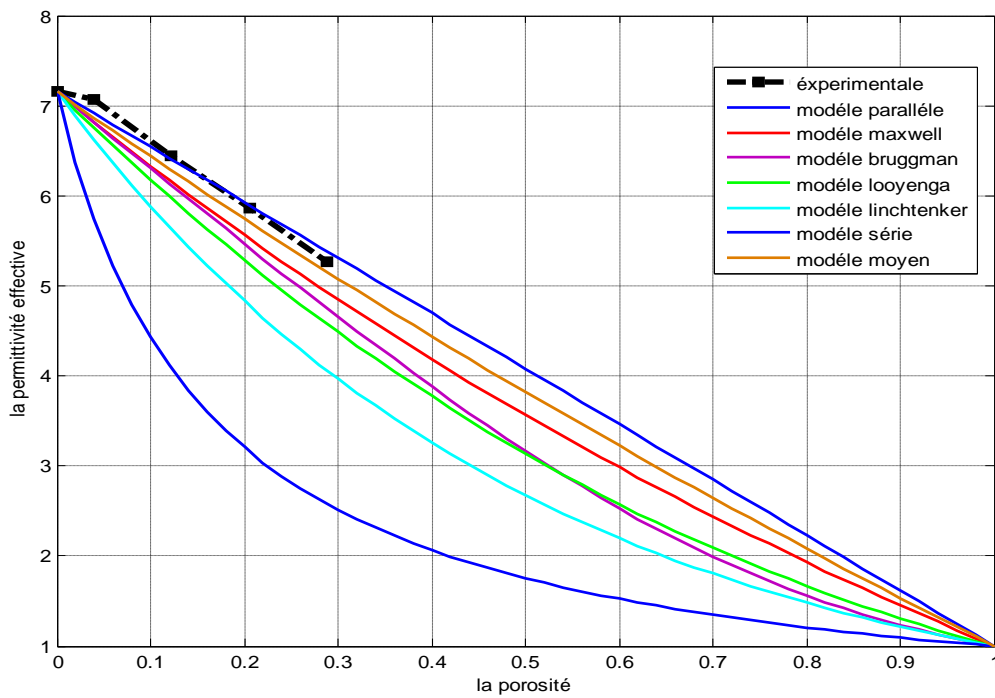


Figure (IV.36) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.5$ et $f=1000$ khz.

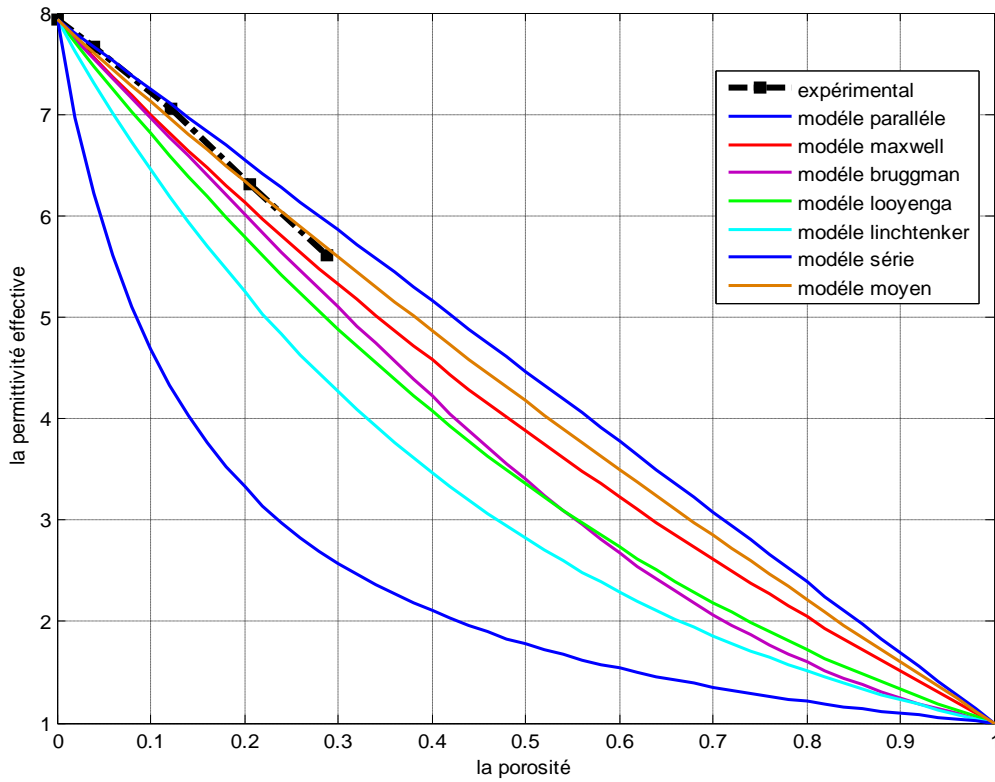


Figure (IV.37) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=100$ khz.

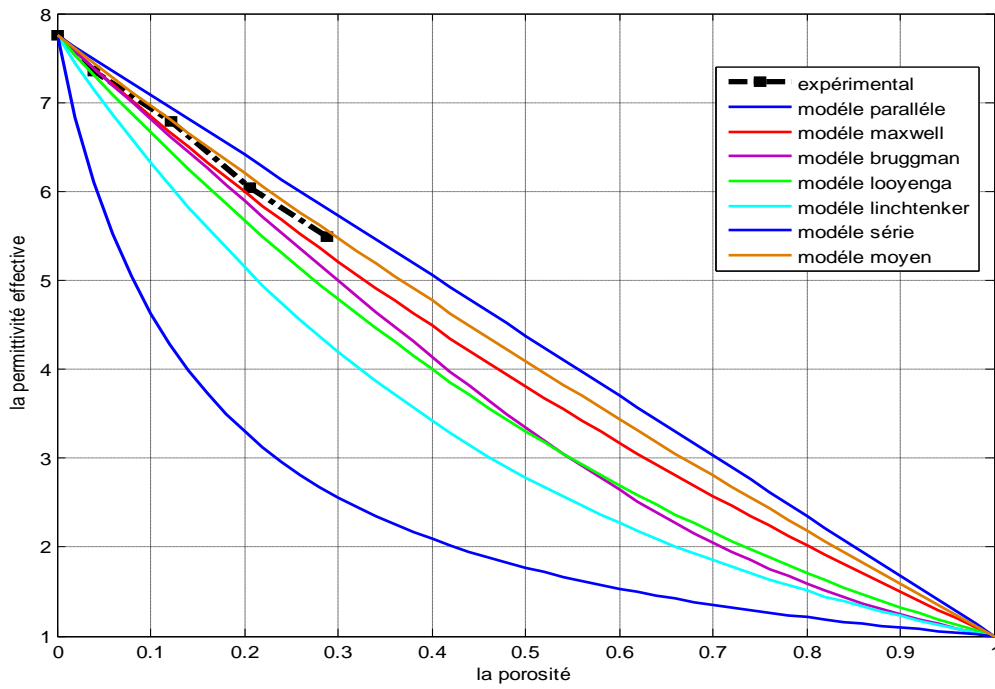


Figure (IV.38) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=200$ khz.

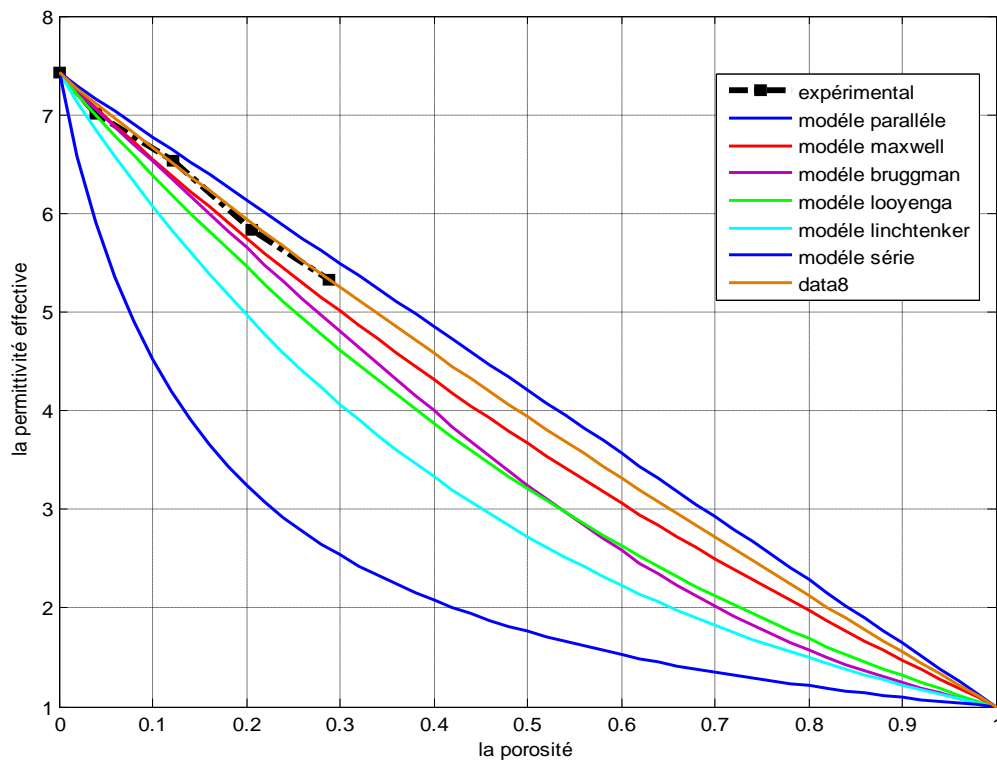


Figure (IV.39) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=400$ khz.

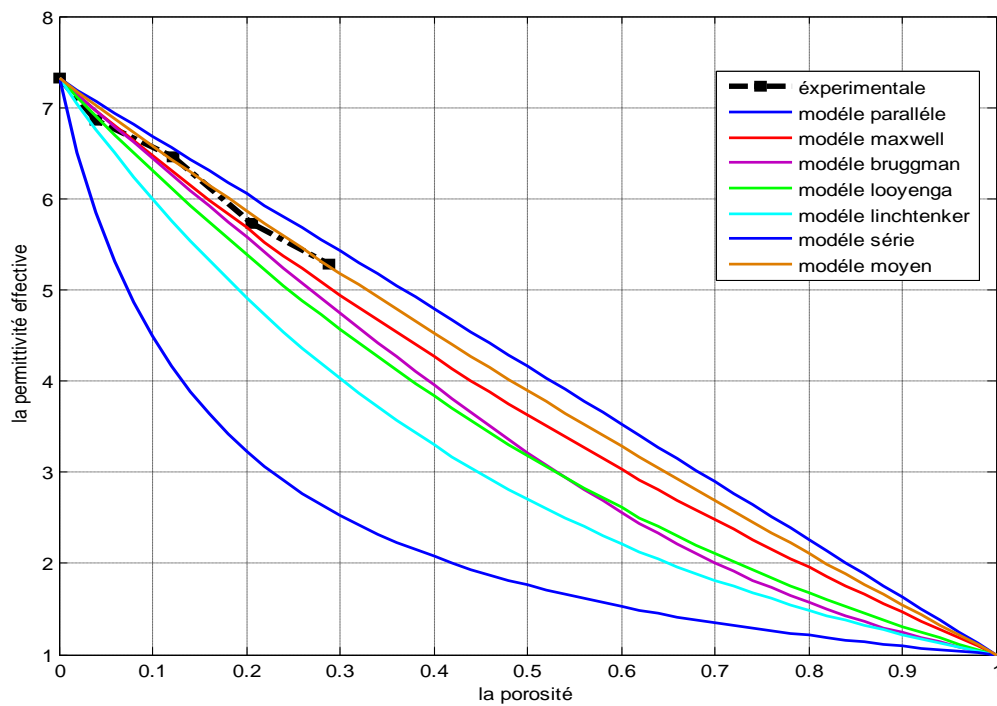


Figure (IV.40) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=600$ khz.

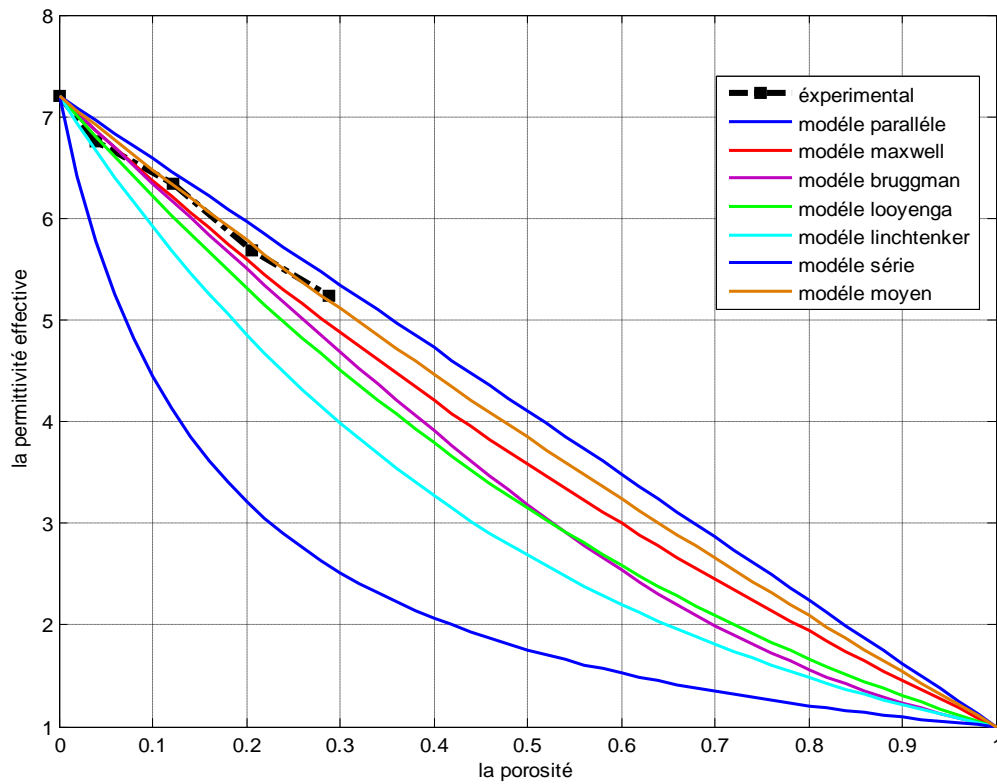


Figure (IV.41) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=800$ khz.

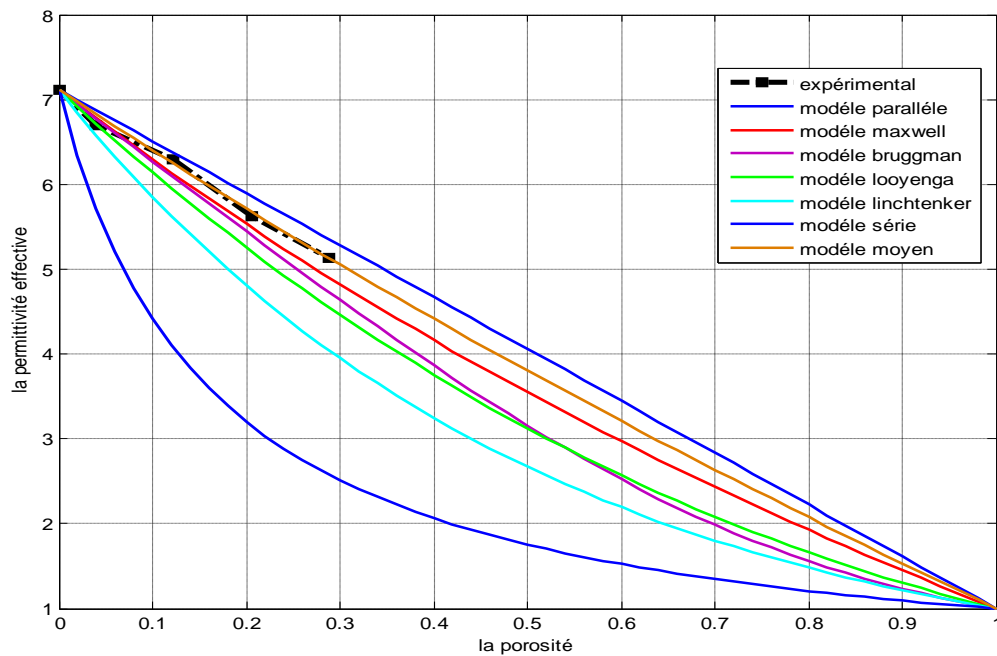


Figure (IV.42) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.6$ et $f=1000$ khz.

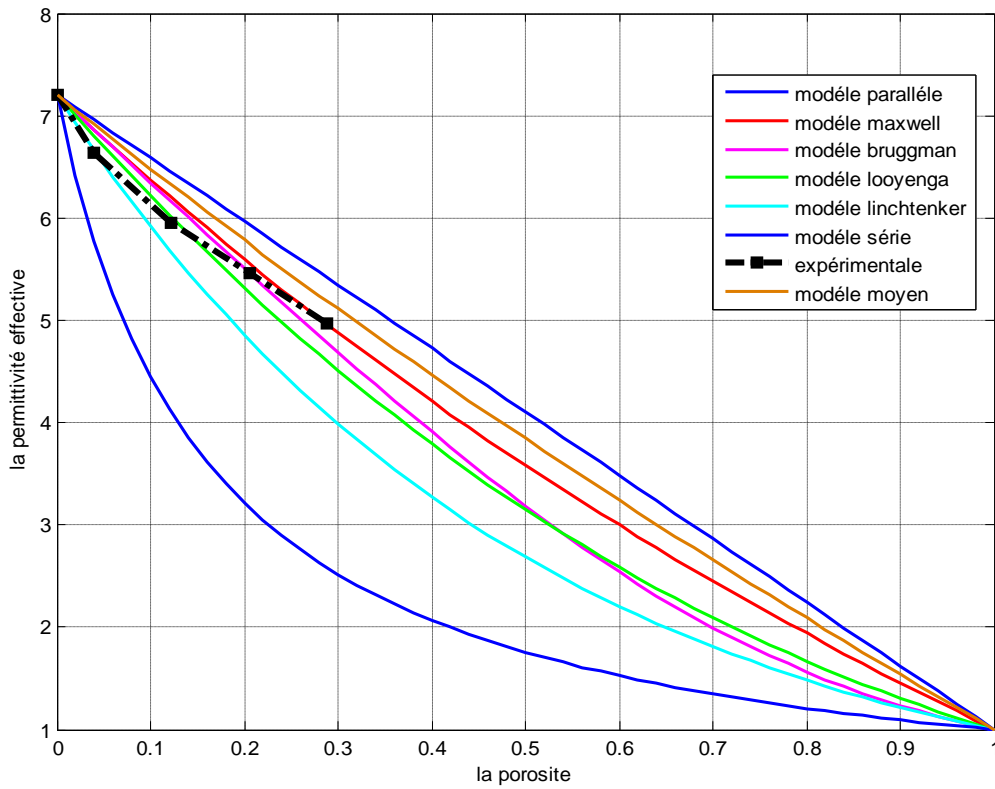


Figure (IV.43) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=100$ khz.

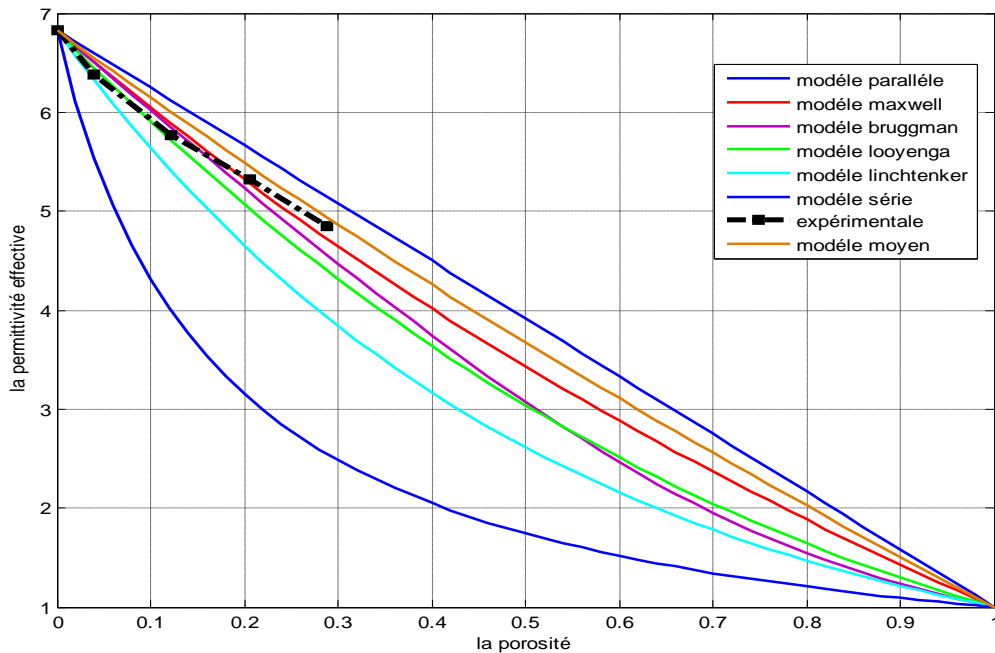


Figure (IV.44) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=200$ khz.

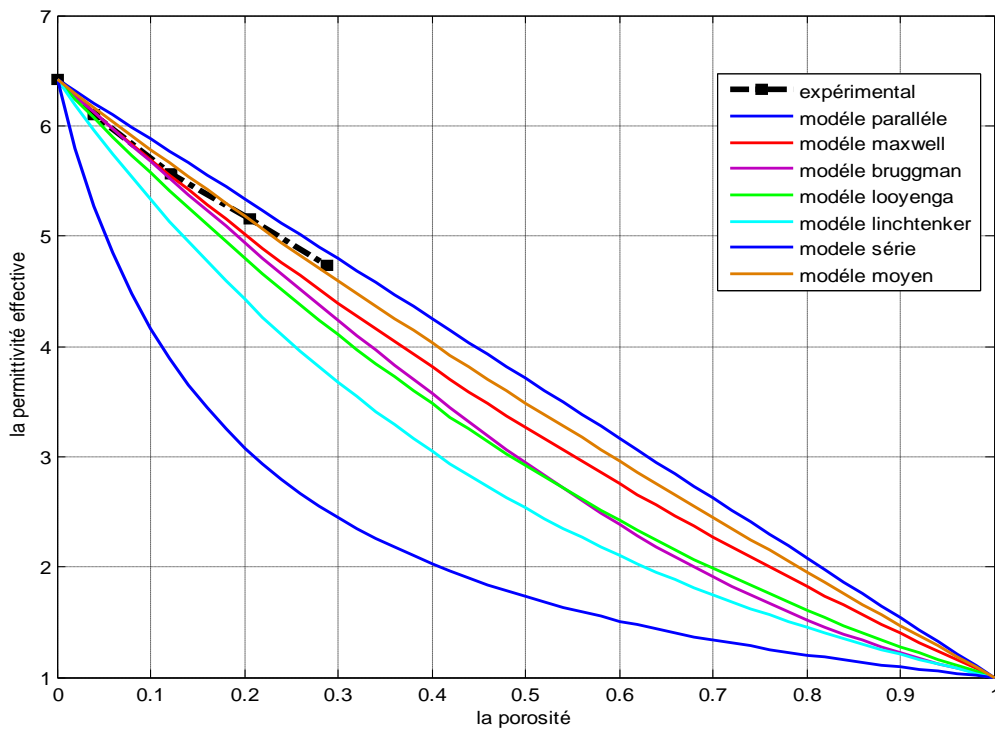


Figure (IV.45) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=400$ khz.

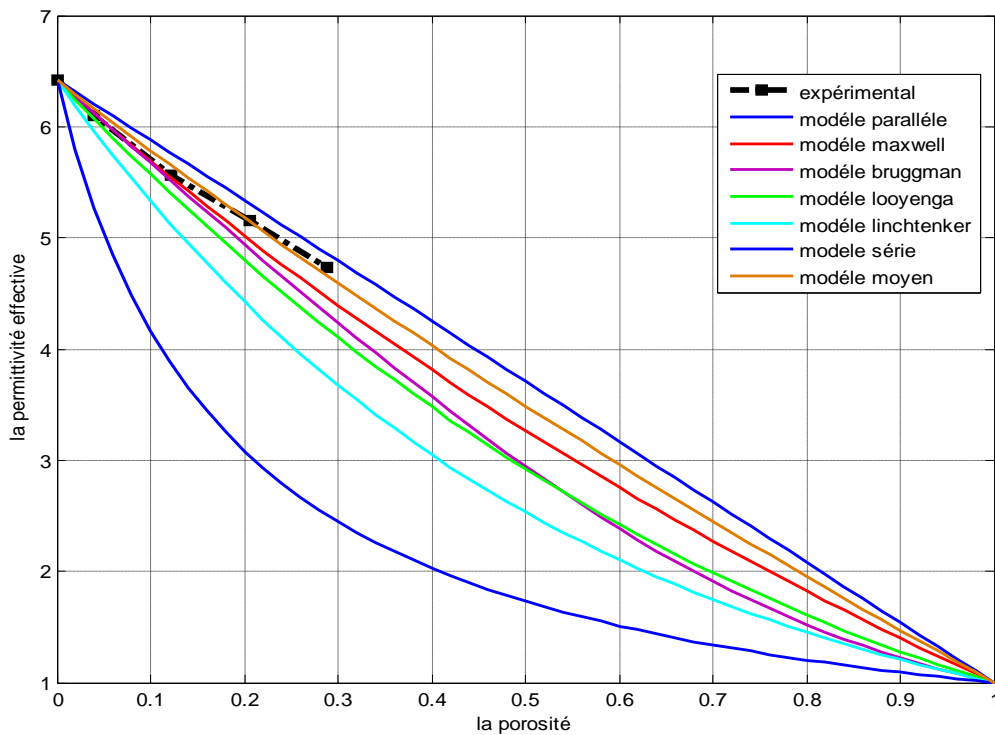


Figure (IV.46) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=600$ khz.

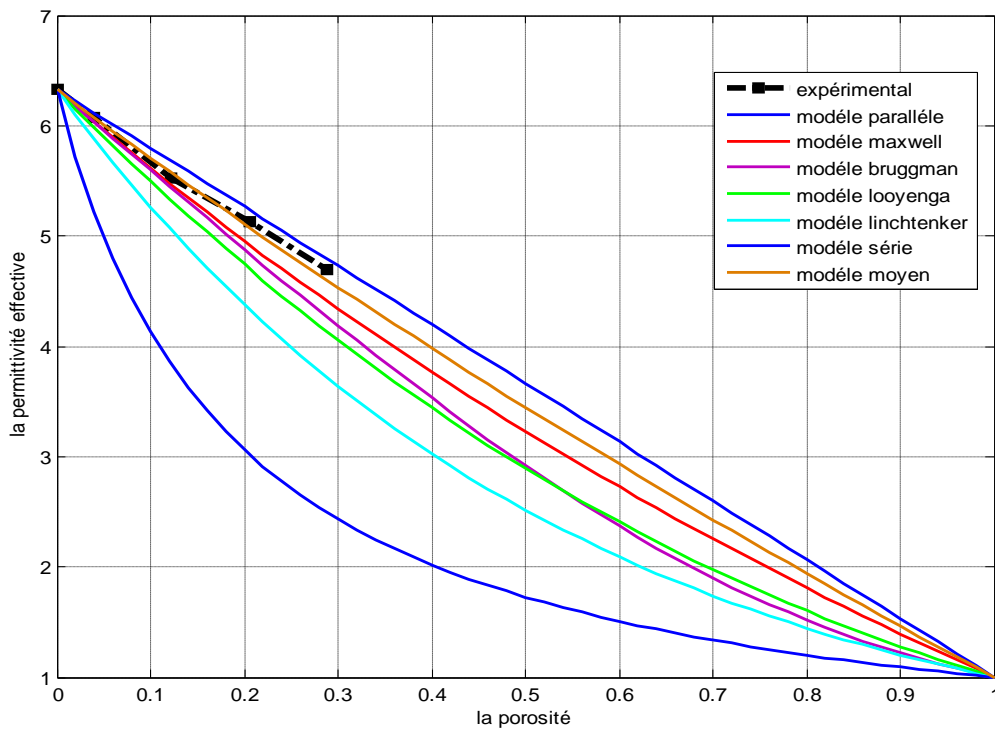


Figure (IV.47) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=800$ khz.

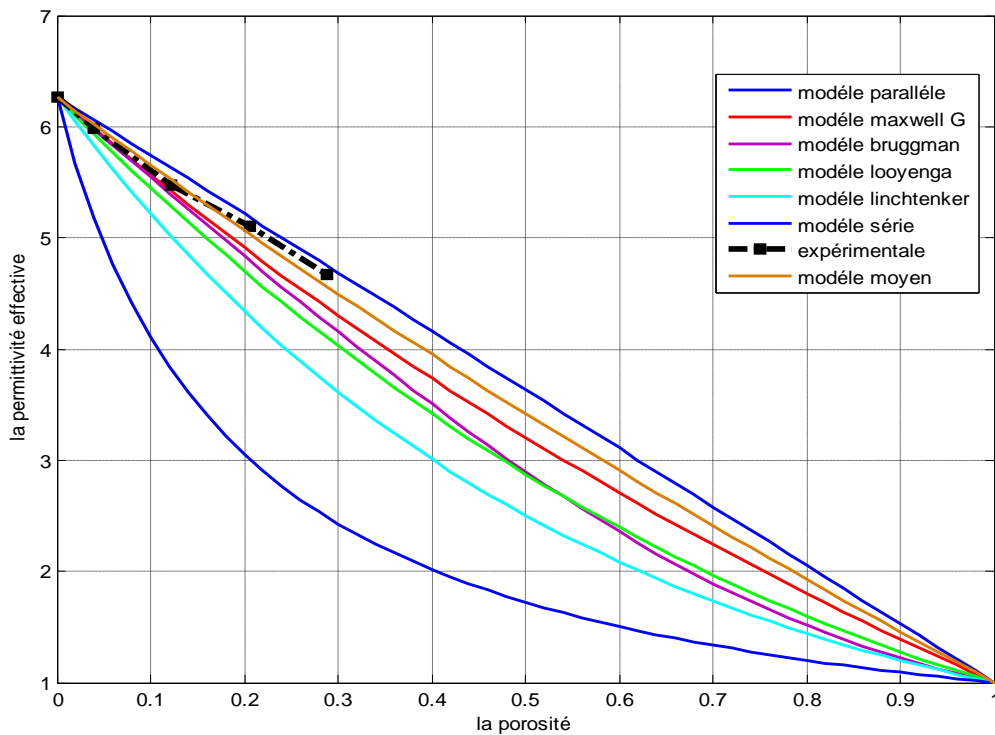


Figure (IV.48) : variation de la constante diélectrique en fonction de la porosité via simulink pour $E/C=0.7$ et $f=1000$ khz.

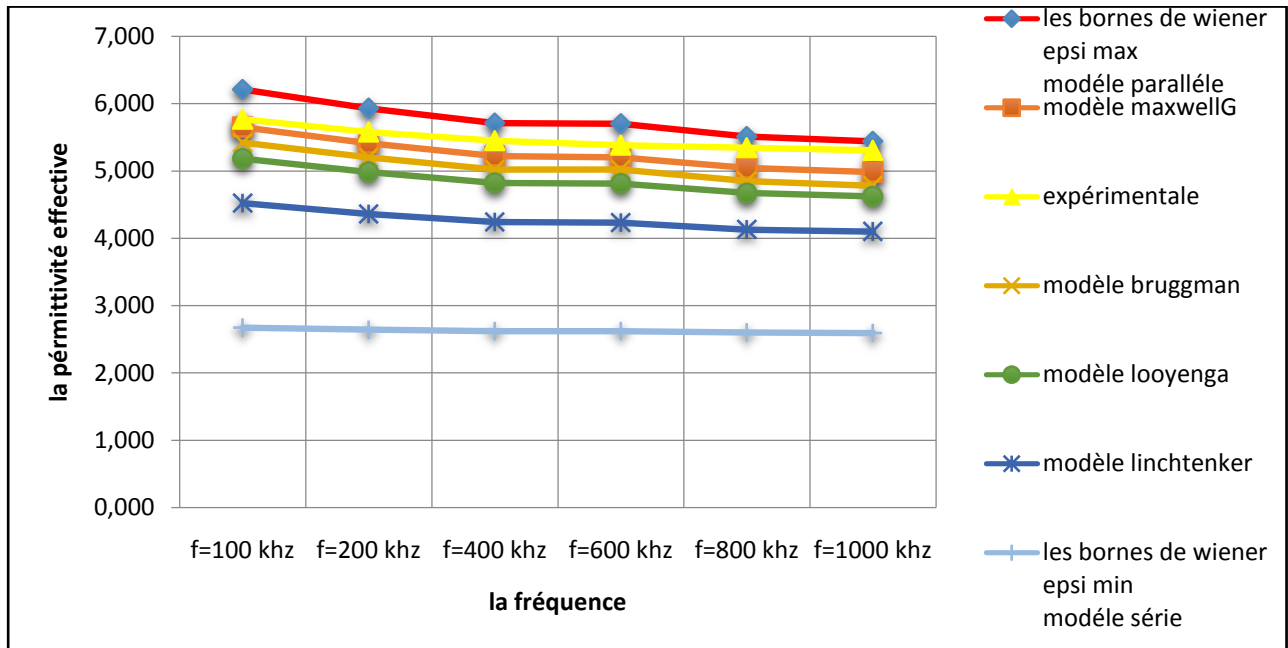


Figure (IV.49) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 28.83\%$.

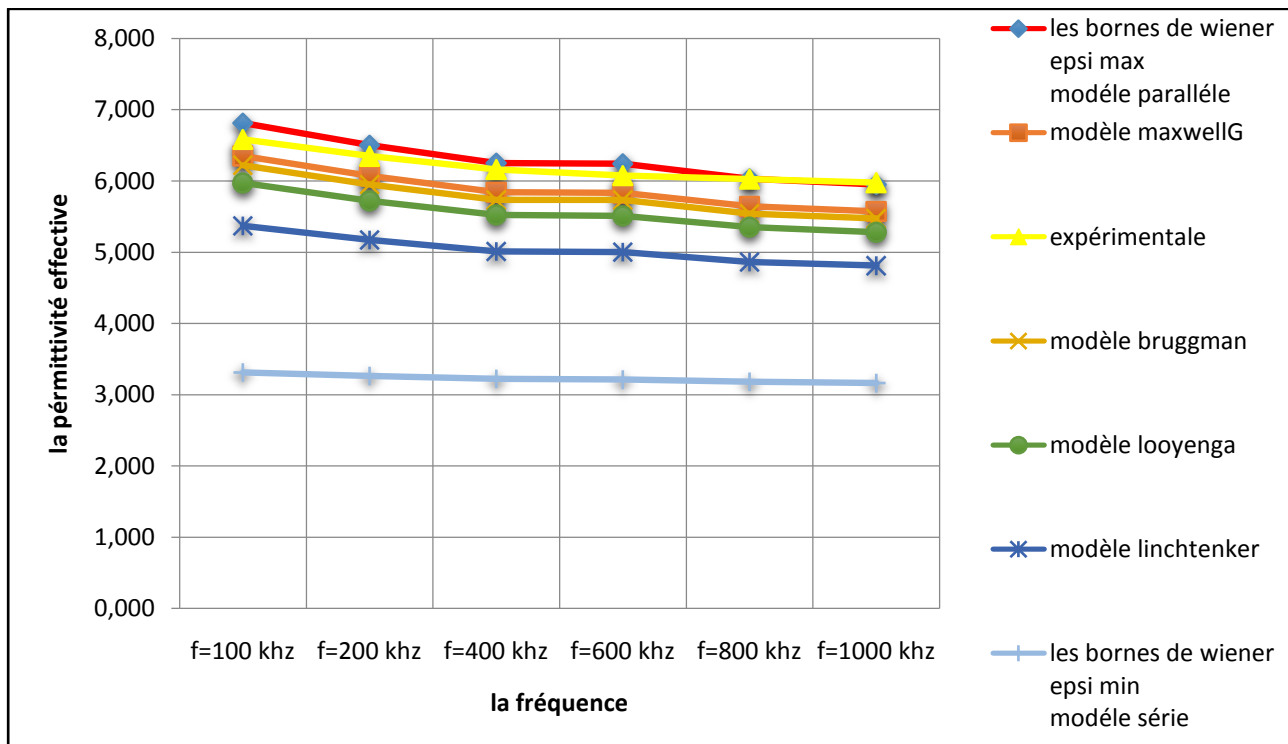


Figure (IV.50) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 20.66\%$.

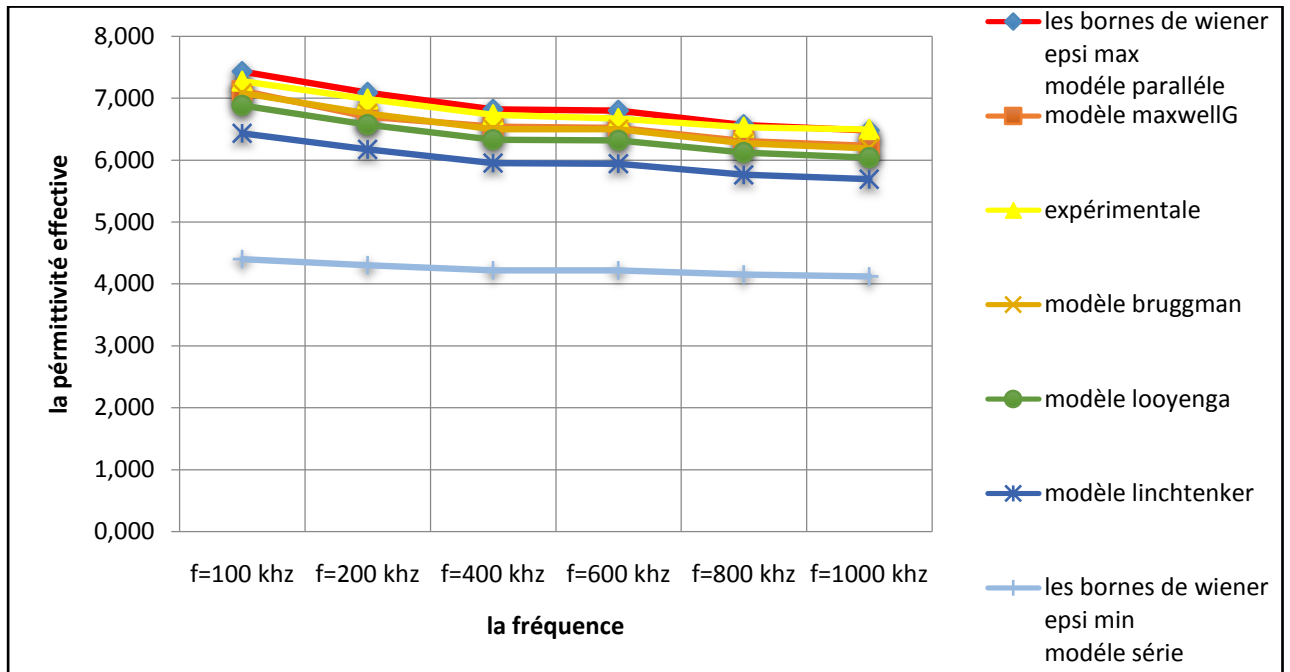


Figure (IV.51) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 12.15\%$.

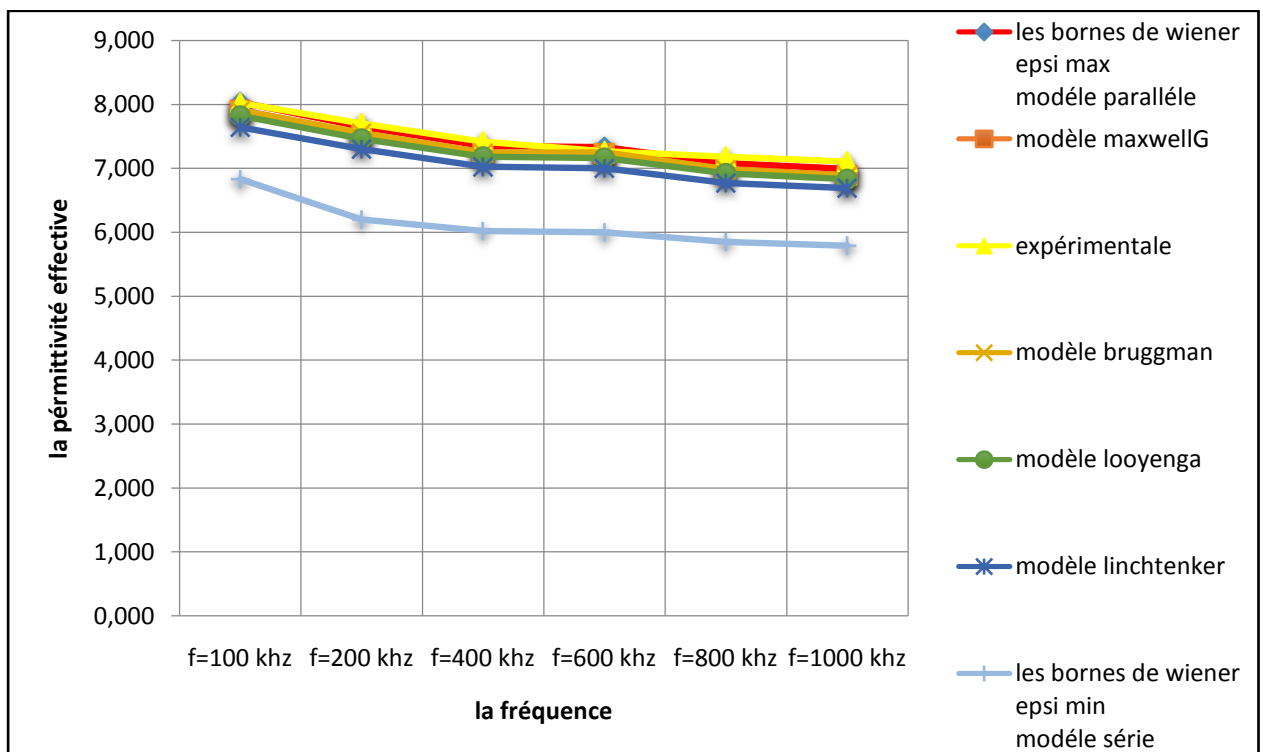


Figure (IV.52) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.45$ et $C\% = 4.02\%$.

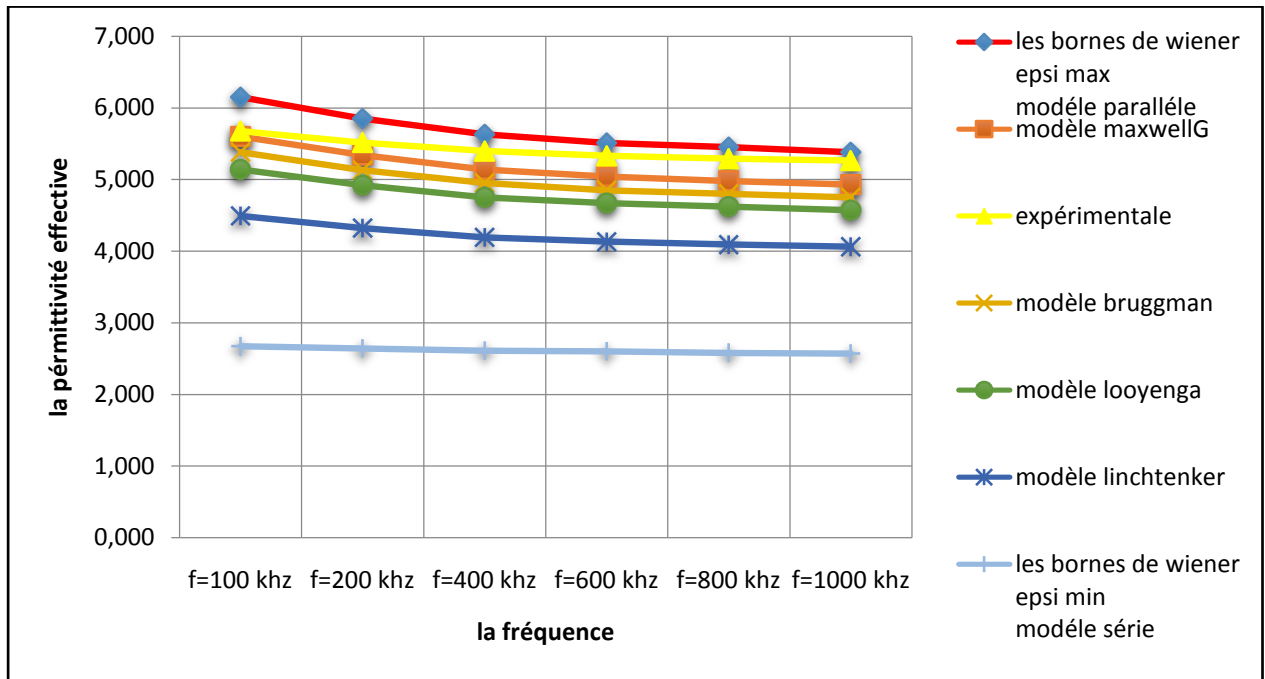


Figure (IV.53) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 28.83\%$.

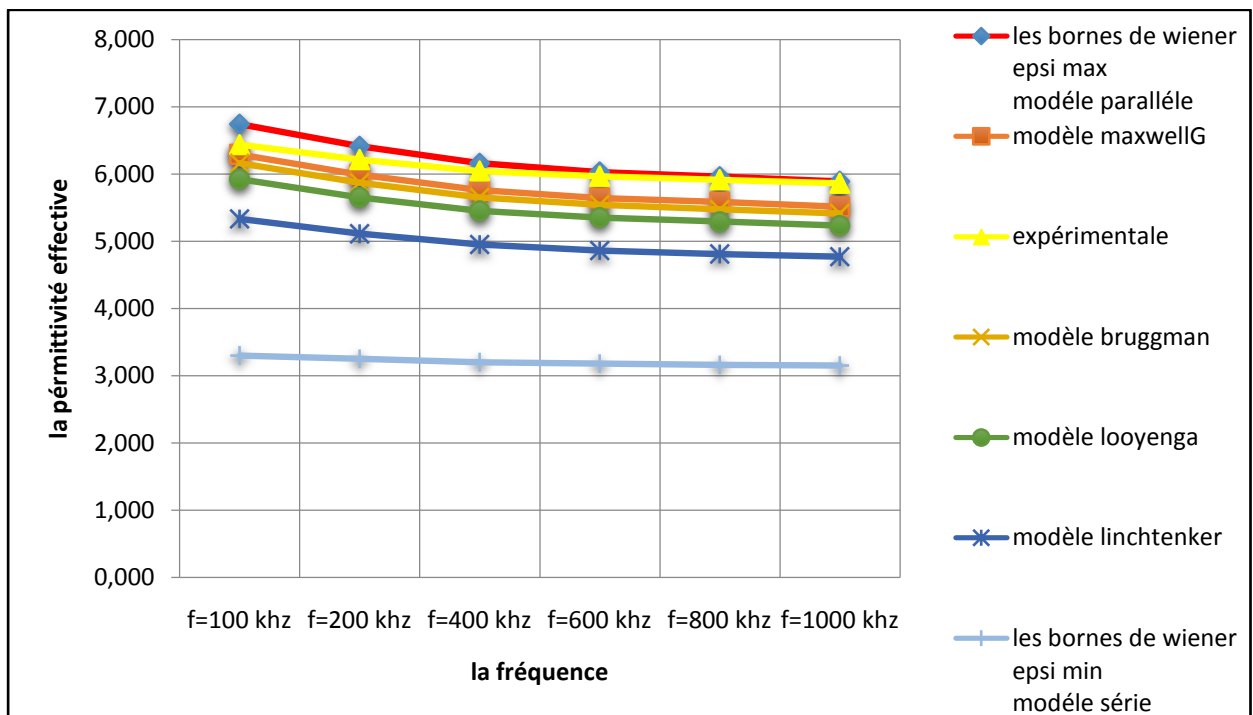


Figure (IV.54) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 20.66\%$.

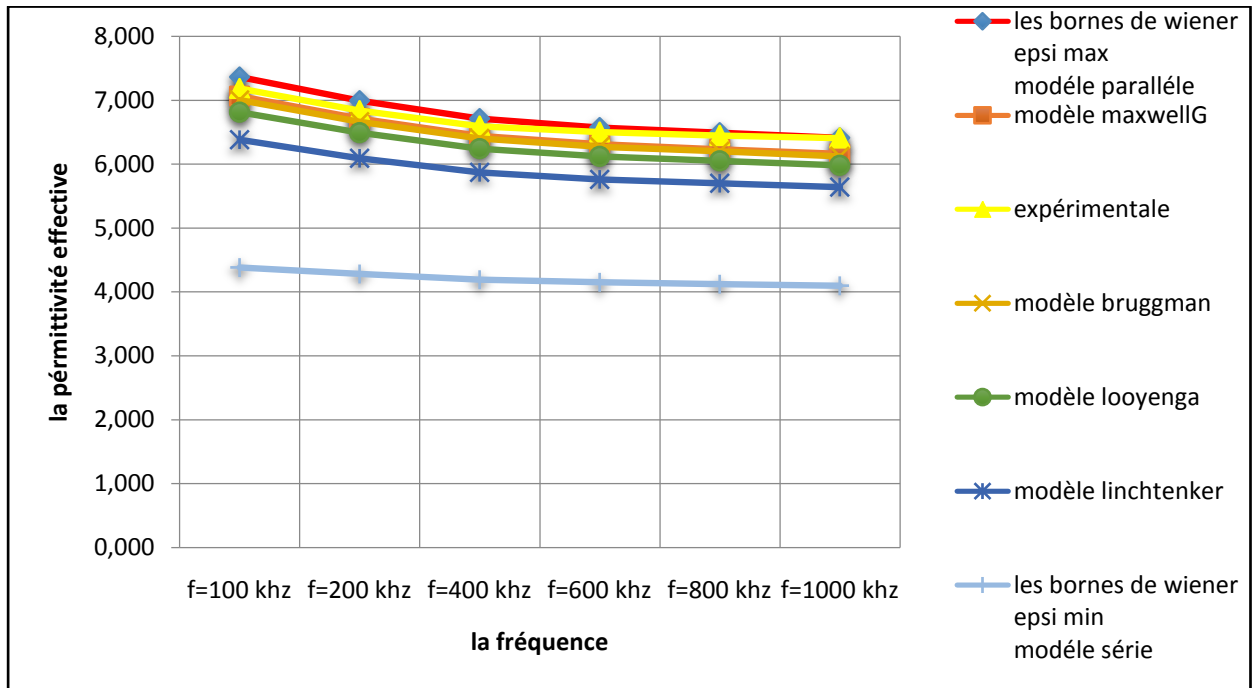


Figure (IV.55) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 12.15\%$.

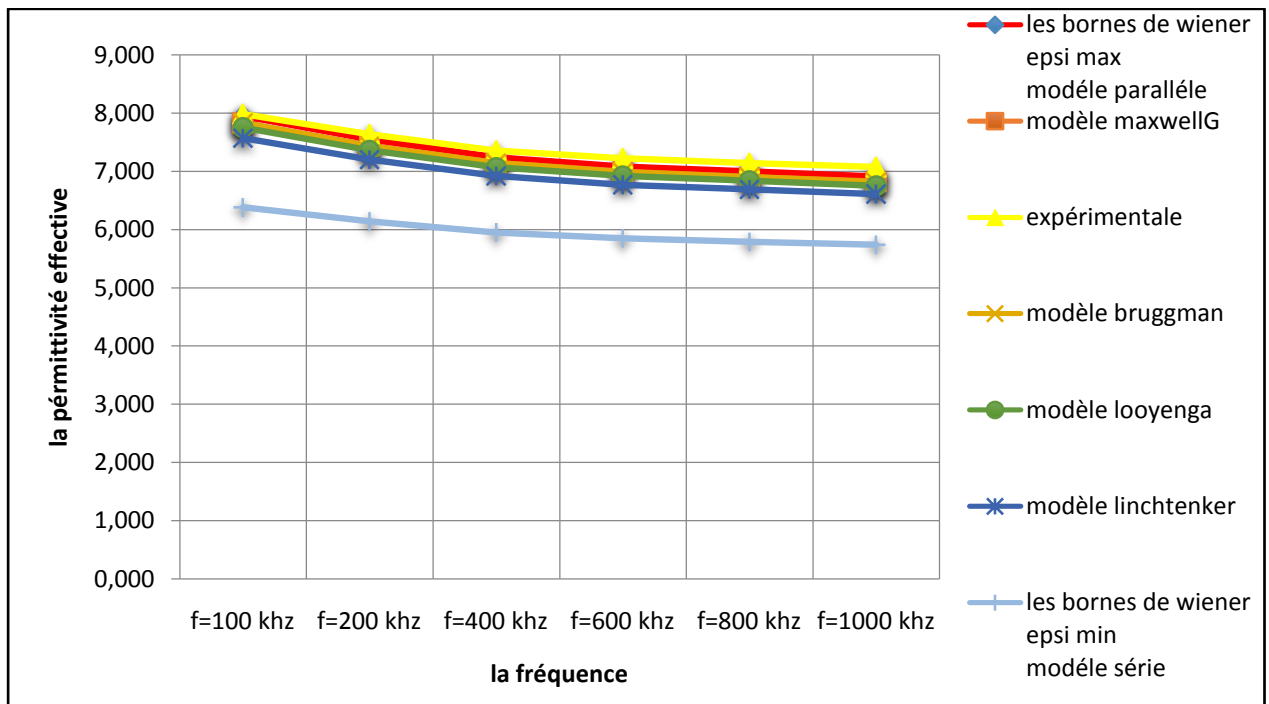


Figure (IV.56) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.5$ et $C\% = 4.02\%$.

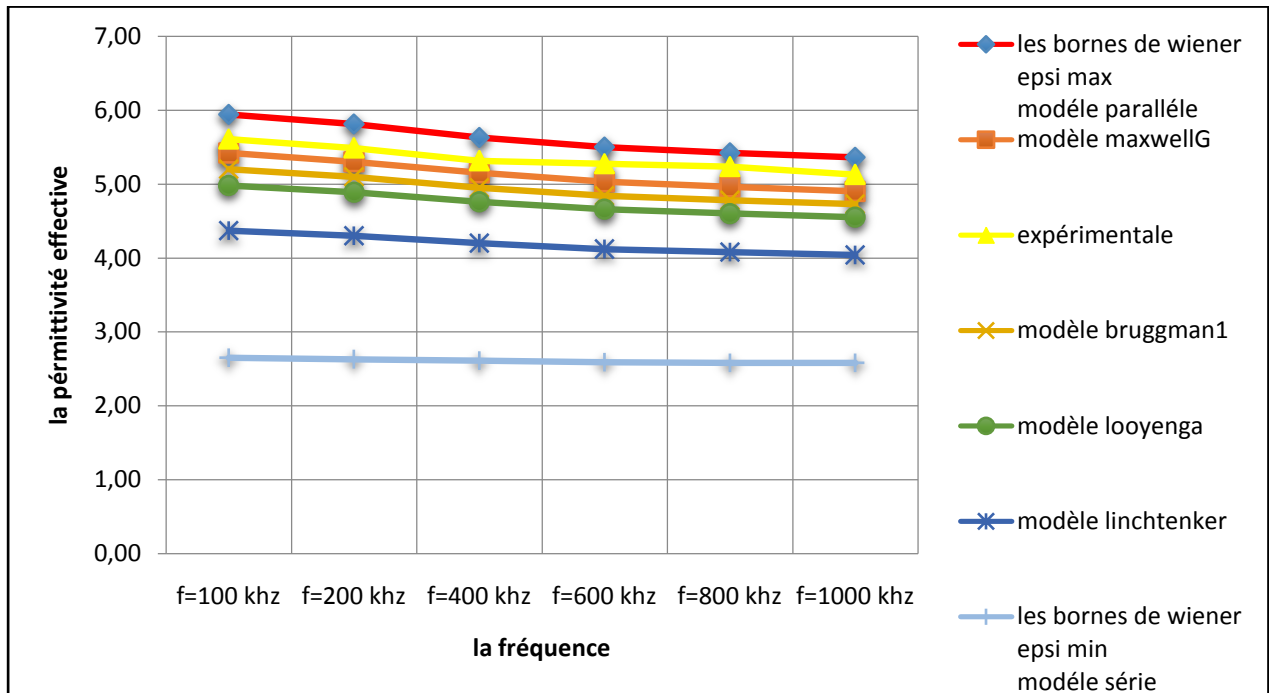


Figure (IV.57) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 28.83\%$.

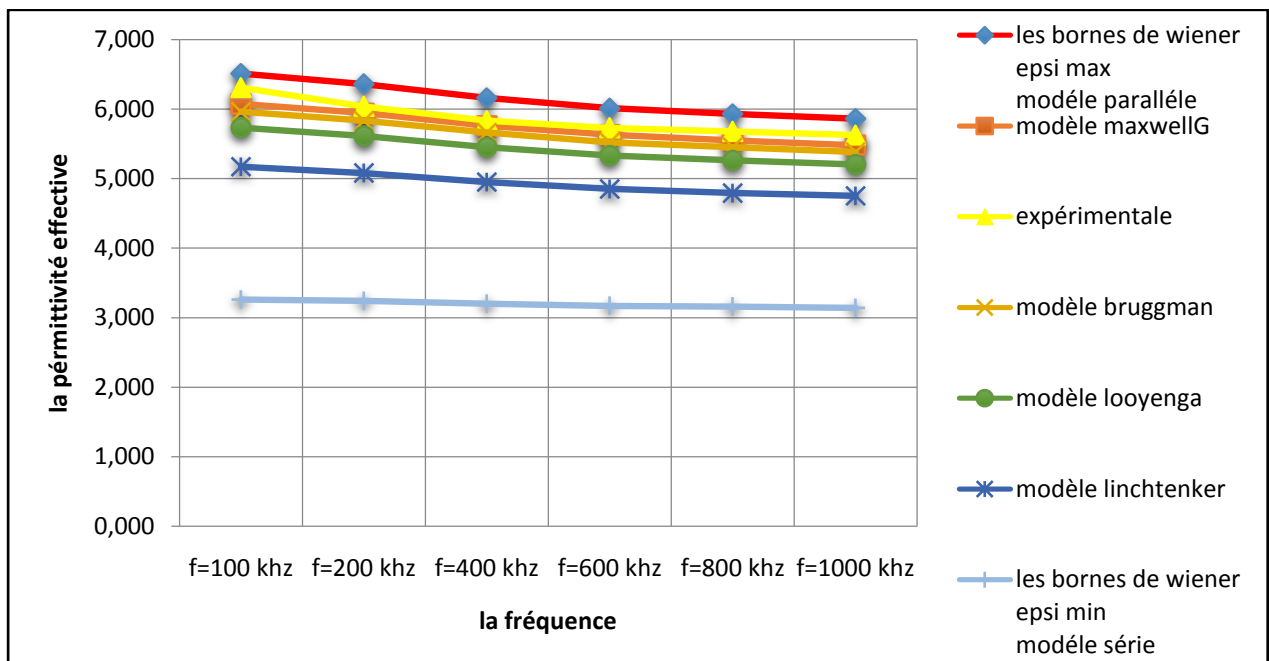


Figure (IV.58) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 20.66\%$.

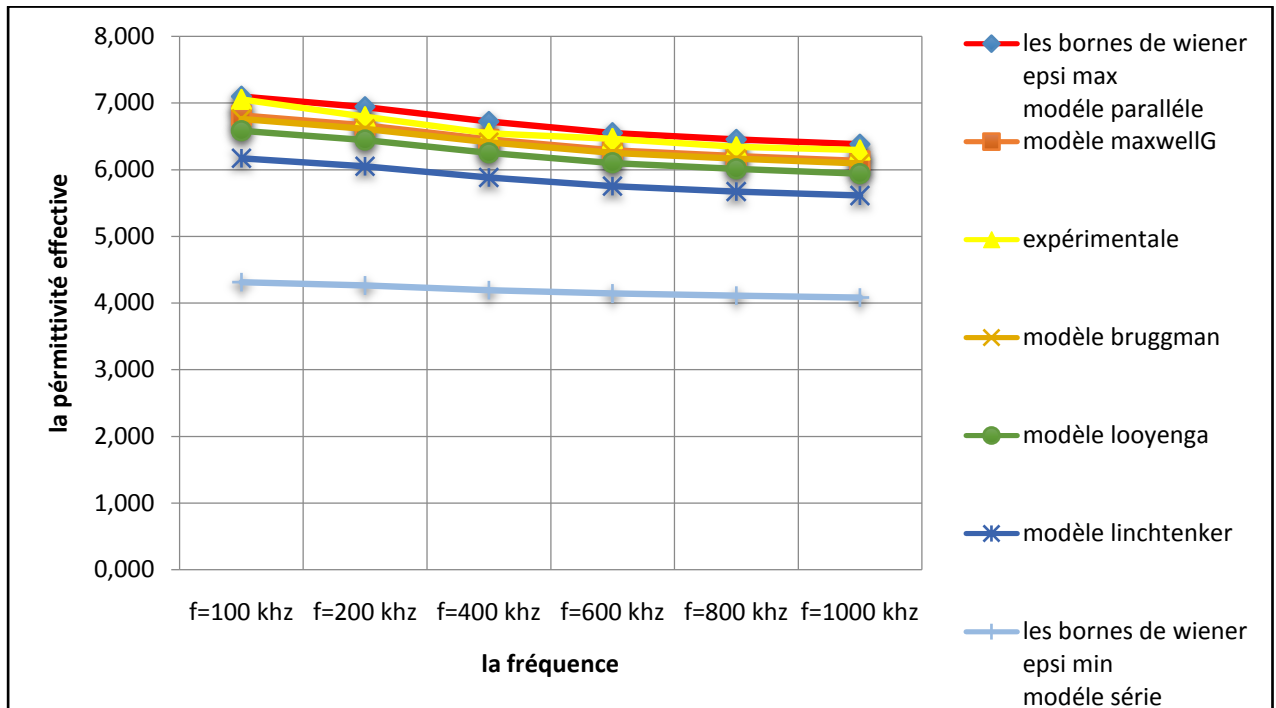


Figure (IV.59) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 12.15\%$.

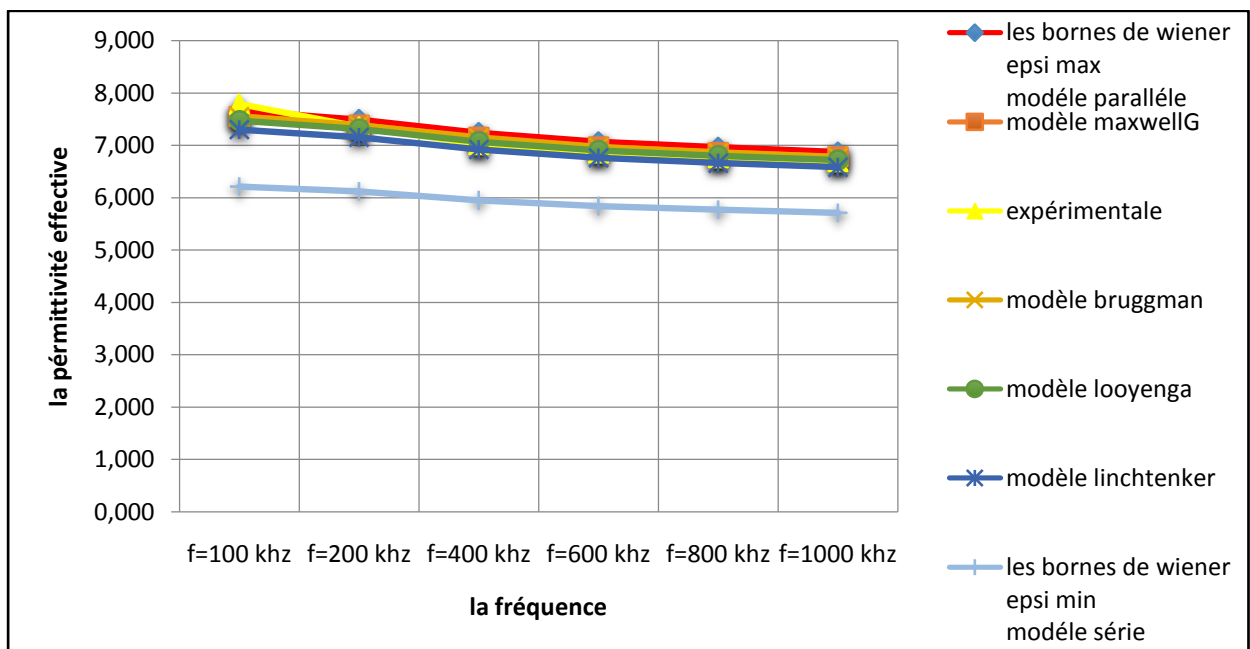


Figure (IV.60) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.6$ et $C\% = 4.02\%$.

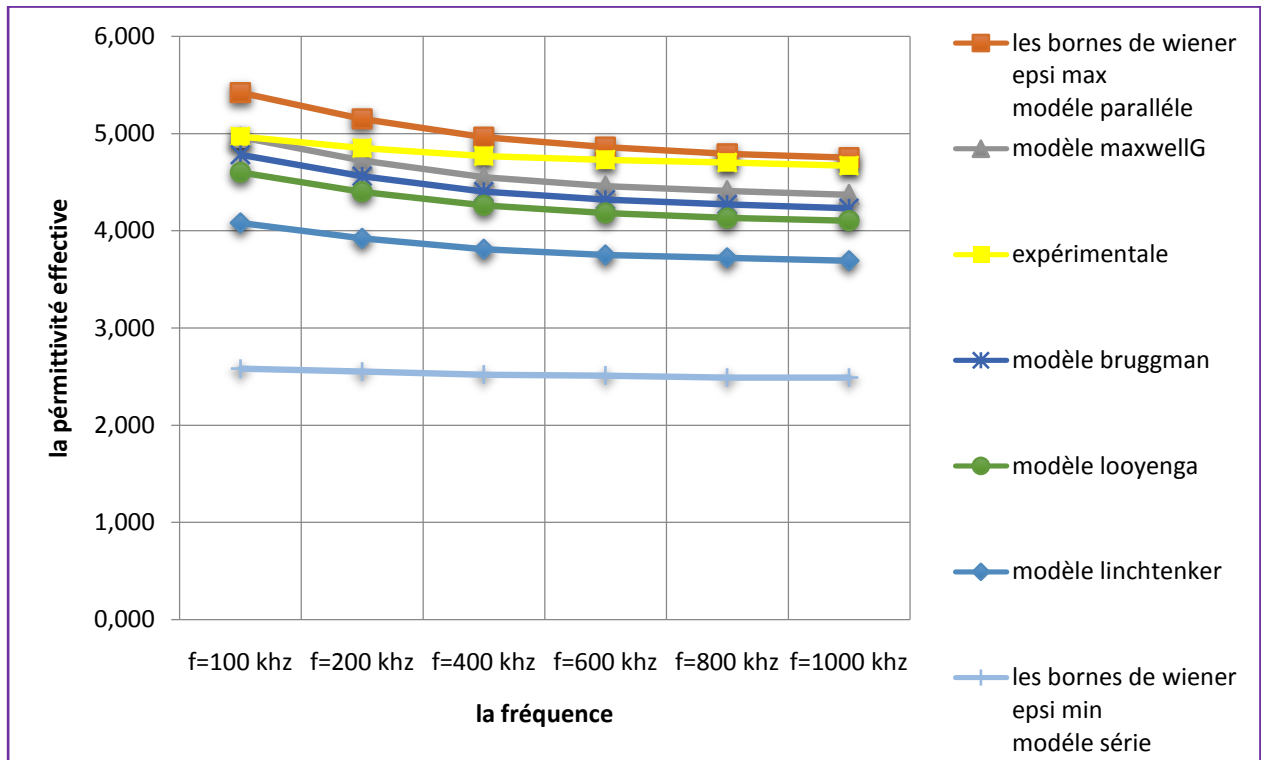


Figure (IV.61) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 28.83\%$.

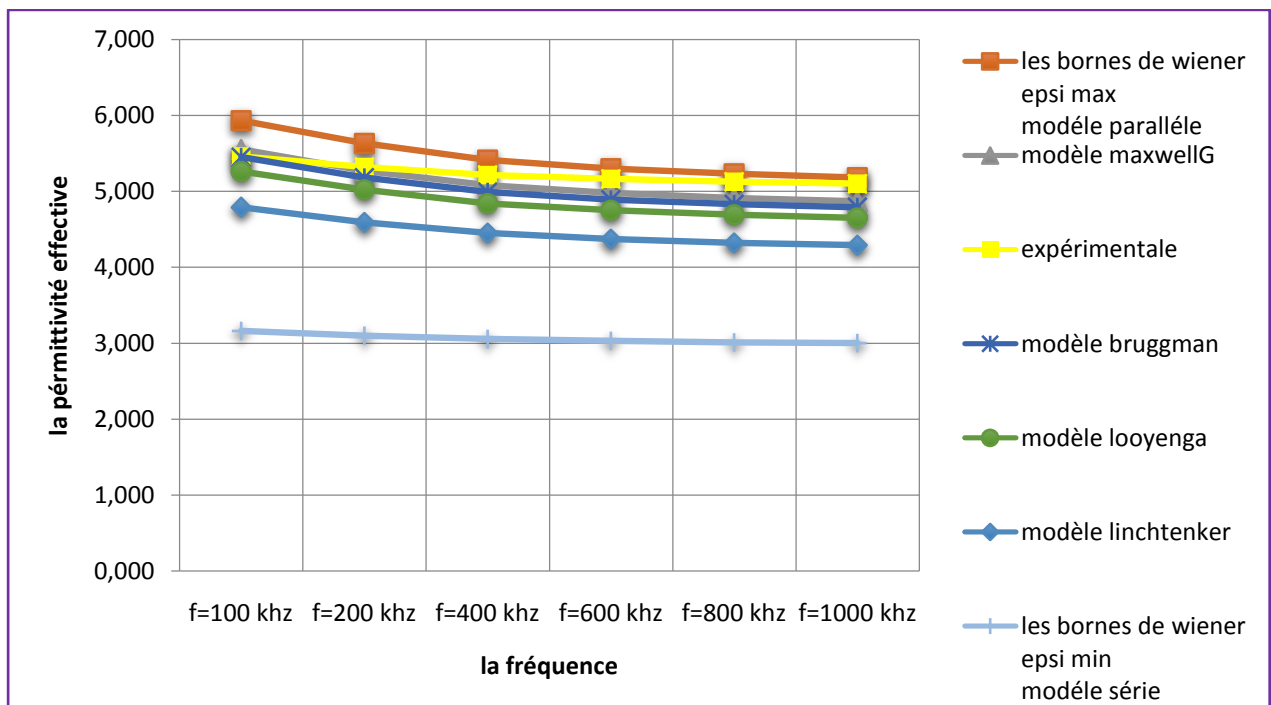


Figure (IV.62) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 20.66\%$.

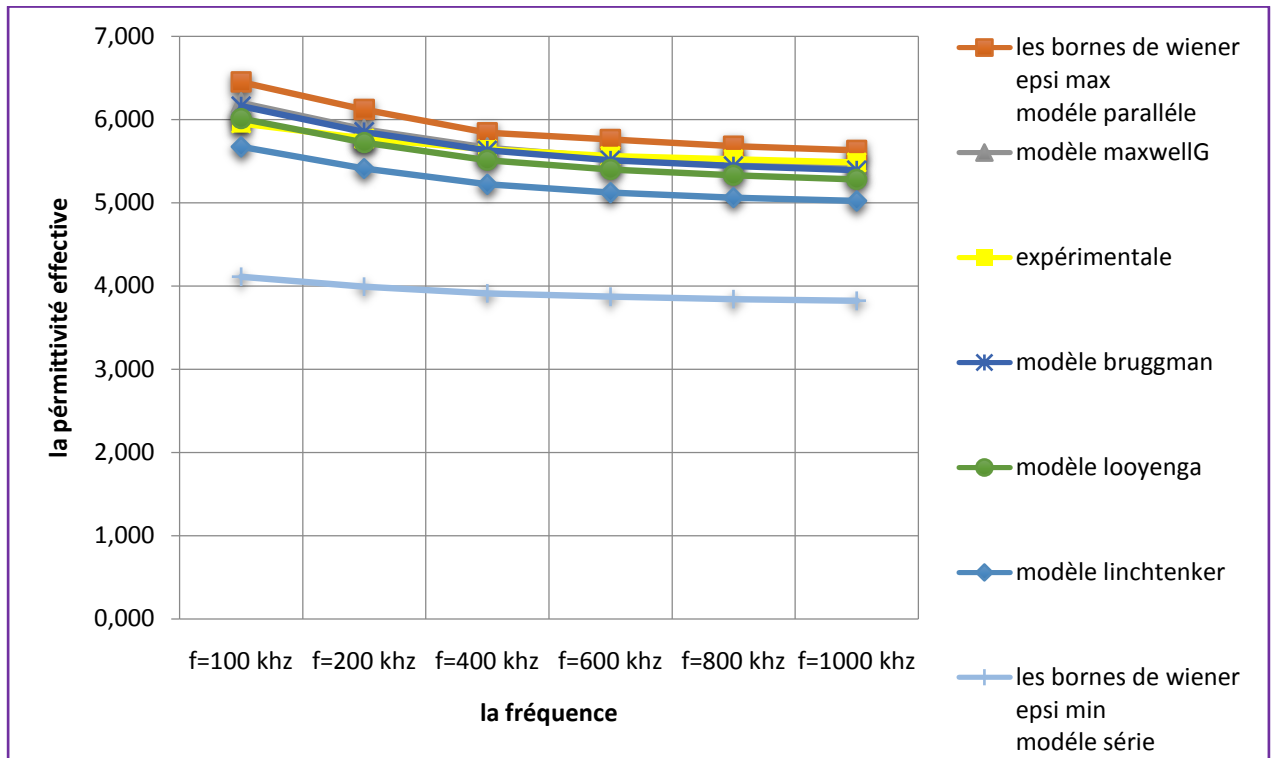


Figure (IV.63) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 12.15\%$.

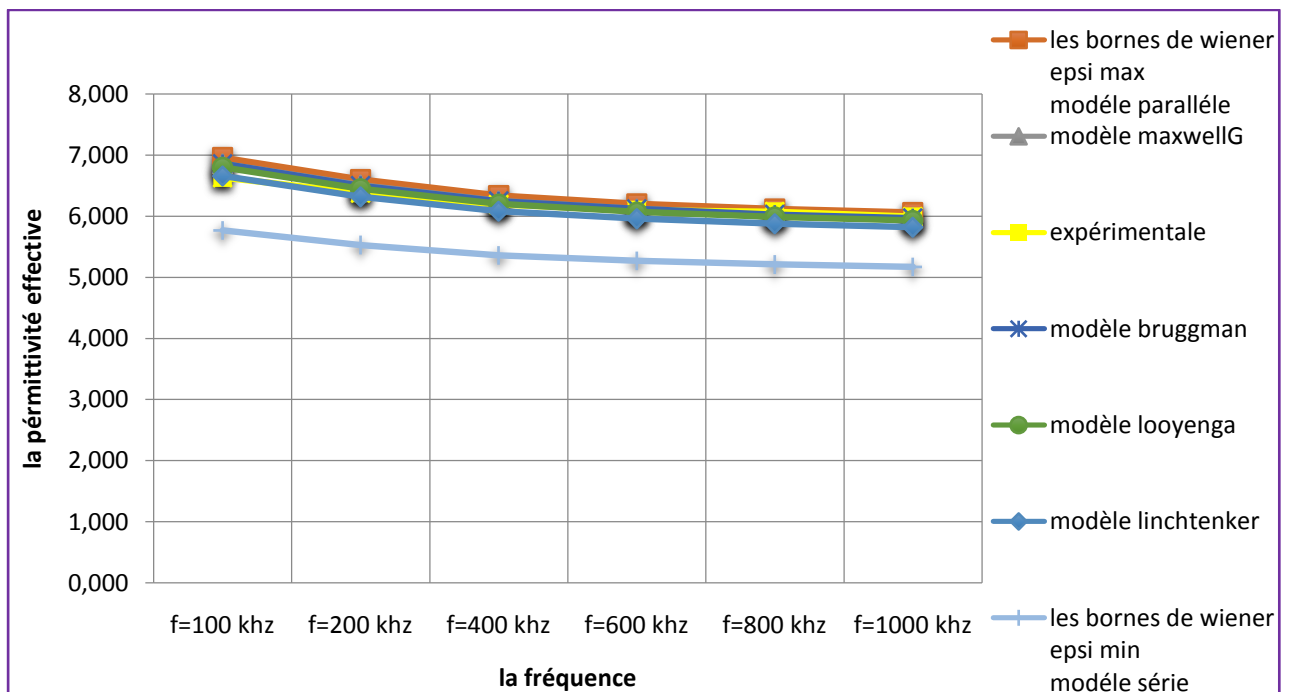


Figure (IV.64) : comparaison entre la permittivité effective des modèles et celle des essais en fonction de la fréquence pour $E/C = 0.7$ et $C\% = 4.02\%$.

IV.9. Conclusion :

La constante diélectrique effective du mortier contenant des cavités d'air diminue avec l'augmentation de la concentration (volume) en air ainsi qu'avec l'augmentation du rapport E/C. D'autre part cette constante diminue lorsque la fréquence augmente bien que cet effet est surtout très prononcé à basse fréquence.

La comparaison des courbes des résultats des essais réalisés aux courbes des lois de mélange nous a permis d'établir une loi de mélange.

La permittivité diélectrique effective diminue avec l'augmentation du rapport E/C ainsi qu'avec l'augmentation des concentration en air quelle que soit la fréquence appliquée.

La permittivité diélectrique effective diminue lorsque la fréquence augmente quelle que soit la concentration en air et le rapport E/C.

Cet effet est surtout très prononcé à basse fréquence.

Il ressort de tous les essais réalisés que la permittivité diélectrique effective diminue avec l'augmentation de la concentration en air autrement dit avec l'augmentation de la porosité.

Ce qui représente un résultat important et un indicateur sur la résistance mécanique de notre matériau (le mortier) car la résistance d'un matériau diminue avec l'augmentation de sa porosité. Par conséquent cette résistance diminue avec la diminution de la permittivité effective.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Nous avons montré à travers l'étude effectuée que la permittivité diélectrique effective (ou constante électrique) d'un matériau est un outil de caractérisation intéressant.

Cette étude nous a permis d'effectuer une analyse paramétrique sur des échantillons de matériau à deux phases en prenant comme matériau hôte un mortier de ciment, matériau largement utilisé en Génie Civil, lequel le comportement est proche de celui du béton et comme inclusions des cavités d'air de forme cylindriques.

L'étude s'est axée particulièrement sur la variation de la permittivité diélectrique en fonction de la porosité pour différents rapports de E/C et une certaine gamme de fréquence. Les résultats obtenus sont importants et se résume dans ce qui suit:

La permittivité diélectrique effective du mortier diminue lorsque sa concentration en air c'est à dire sa porosité augmente.

La permittivité diélectrique effective du mortier diminue lorsque le rapport E/C augmente.

Ces deux résultats sont valables quelle que soit la fréquence appliquée

D' autre part La permittivité diélectrique effective diminue lorsque la fréquence augmente quelle que soit la concentration en air (la porosité) et le rapport E/C.

Cet effet est surtout très prononcé à basse fréquence.

Il ressort principalement de tous les essais réalisés que la permittivité diélectrique effective diminue avec l'augmentation de la concentration en air autrement dit avec l'augmentation de la porosité. Ce qui représente un résultat important et un indicateur sur la résistance mécanique de notre matériau (le mortier) car la résistance d'un matériau diminue avec l'augmentation de sa porosité. Par conséquent cette résistance diminue avec la diminution de la permittivité effective.

Nous pouvons considérer que la permittivité est un nouveau paramètre de durabilité des matériaux de construction.

Il s'avère à partir de là que la relation permittivité diélectrique- porosité est d'une importance ; primordiale; ce qui nous a poussé à effectuer une comparaison entre les courbes des résultats expérimentaux et les courbes données par certains modèles issus de lois de mélanges les plus célèbres. Cette comparaison nous a permis de proposer un autre modèle qui permettra de prédire la porosité en utilisant la permittivité diélectrique effective.

En perspective, Il serait très intéressant de trouver une relation directe entre la permittivité diélectrique et la résistance du matériau.

ANNEXES

Composition des différents mortiers :

matériau \ EP	échantillons			
Sable (g)	750	750	750	750
Ciment (g)	250	250	250	250
E/C	0.45	0.5	0.6	0.7

M0,M1,M2,M3,M4:échantillons en mortier avec inclusions en air testés

Valeurs mesurées de Cp des échantillons pleins et avec inclusion en air

**Variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air
(différentes fréquences) [Cas de E/C=0.45] :**

Valeurs des permittivités ϵ calculées pour différents fréquences

f=100khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0(Ø=0cm)	6,73	8,85	23,75	2,60	80,84	8,32	0
M1(Ø=1.1 cm)	6,46	8,85	23,75	2,61	80,53	8,02	4,02
M2(Ø=1.9cm)	5,77	8,85	23,75	2,65	79,32	7,27	12,15
M3(Ø=2.5cm)	5,32	8,85	23,75	2,60	80,84	6,58	20,66
M4(Ø=2.9cm)	4,49	8,85	23,75	2,70	77,85	5,77	28,83

f=200khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	6,41	8,85	23,75	2,60	80,84	7,93	0
M1	6,20	8,85	23,75	2,61	80,53	7,70	4,02
M2	5,54	8,85	23,75	2,65	79,32	6,98	12,15
M3	5,13	8,85	23,75	2,60	80,84	6,35	20,66
M4	4,34	8,85	23,75	2,70	77,85	5,58	28,83

f=400khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	6,16	8,85	23,75	2,60	80,84	7,62	0
M1	5,97	8,85	23,75	2,61	80,53	7,41	4,02
M2	5,34	8,85	23,75	2,65	79,32	6,73	12,15
M3	4,98	8,85	23,75	2,60	80,84	6,16	20,66
M4	4,24	8,85	23,75	2,70	77,85	5,45	28,83

f=600khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	6,14	8,85	23,75	2,60	80,84	7,59	0
M1	5,85	8,85	23,75	2,61	80,53	7,26	4,02
M2	5,29	8,85	23,75	2,65	79,32	6,67	12,15
M3	4,91	8,85	23,75	2,60	80,84	6,07	20,66
M4	4,19	8,85	23,75	2,70	77,85	5,38	28,83

f=800khz	Cp(pF)	ϵ_0	S(cm ²)	h(cm)	C ₀ (pF)	ϵ	C%
M0	5,93	8,85	23,75	2,60	80,84	7,33	0
M1	5,78	8,85	23,75	2,61	80,53	7,18	4,02
M2	5,18	8,85	23,75	2,65	79,32	6,53	12,15
M3	4,87	8,85	23,75	2,60	80,84	6,02	20,66
M4	4,16	8,85	23,75	2,70	77,85	5,34	28,83

f=1000khz	Cp(pF)	ϵ_0	S(cm ²)	h(cm)	C ₀ (pF)	ϵ	C%
M0	5,85	8,85	23,75	2,60	80,84	7,24	0
M1	5,72	8,85	23,75	2,61	80,53	7,10	4,02
M2	5,15	8,85	23,75	2,65	79,32	6,49	12,15
M3	4,83	8,85	23,75	2,60	80,84	5,97	20,66
M4	4,13	8,85	23,75	2,70	77,85	5,31	28,83

Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f)

M0: échantillon plein

f	Cp(pF)	ϵ_0	S(cm ²)	h(cm)	C ₀ (pF)	e
100	6,73	8,85	23,75	2,60	80,84	8,32
200	6,41	8,85	23,75	2,60	80,84	7,93
400	6,16	8,85	23,75	2,60	80,84	7,62
600	6,14	8,85	23,75	2,60	80,84	7,60
800	5,93	8,85	23,75	2,60	80,84	7,34
1000	5,85	8,85	23,75	2,60	80,84	7,24

M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

f	Cp(pF)	ϵ_0	S(cm ²)	h(cm)	C ₀ (pF)	e
100	6,46	8,85	23,75	2,61	80,53	8,02
200	6,20	8,85	23,75	2,61	80,53	7,70
400	5,97	8,85	23,75	2,61	80,53	7,41
600	5,85	8,85	23,75	2,61	80,53	7,26
800	5,78	8,85	23,75	2,61	80,53	7,18
1000	5,72	8,85	23,75	2,61	80,53	7,10

M2: échantillon avec inclusion en air 12,15%

f	Cp(pF)	ϵ_0	S(cm ²)	h(cm)	C ₀ (pF)	ϵ
100	5,77	8,85	23,75	2,65	79,32	7,27
200	5,54	8,85	23,75	2,65	79,32	6,98
400	5,34	8,85	23,75	2,65	79,32	6,73
600	5,29	8,85	23,75	2,65	79,32	6,67
800	5,18	8,85	23,75	2,65	79,32	6,53
1000	5,15	8,85	23,75	2,65	79,32	6,49

M3: échantillon avec inclusion en air 20,66%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	5,32	8,85	23,75	2,60	80,84	6,58
200	5,13	8,85	23,75	2,60	80,84	6,35
400	4,98	8,85	23,75	2,60	80,84	6,16
600	4,91	8,85	23,75	2,60	80,84	6,07
800	4,87	8,85	23,75	2,60	80,84	6,02
1000	4,83	8,85	23,75	2,60	80,84	5,97

M4: échantillon avec inclusion en air 28,83%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,49	8,85	23,75	2,70	77,85	5,77
200	4,34	8,85	23,75	2,70	77,85	5,58
400	4,24	8,85	23,75	2,70	77,85	5,45
600	4,19	8,85	23,75	2,70	77,85	5,38
800	4,16	8,85	23,75	2,70	77,85	5,34
1000	4,13	8,85	23,75	2,70	77,85	5,31

**Variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air
(différentes fréquences) [Cas de E/C=0.5] :**

Valeurs des permittivités ϵ calculées pour différents fréquences

f=100khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	6,30	8,85	23,75	2,75	76,43	8,24	0
M1	5,99	8,85	23,75	2,80	75,07	7,98	4,02
M2	5,39	8,85	23,75	2,80	75,07	7,18	12,15
M3	4,92	8,85	23,75	2,75	76,43	6,44	20,66
M4	4,26	8,85	23,75	2,80	75,07	5,67	28,83

f=200khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,98	8,85	23,75	2,75	76,43	7,82	0
M1	5,73	8,85	23,75	2,80	75,07	7,63	4,02
M2	5,13	8,85	23,75	2,80	75,07	6,83	12,15
M3	4,75	8,85	23,75	2,75	76,43	6,21	20,66
M4	4,14	8,85	23,75	2,80	75,07	5,52	28,83

f=400khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,73	8,85	23,75	2,75	76,43	7,50	0
M1	5,52	8,85	23,75	2,80	75,07	7,35	4,02
M2	4,95	8,85	23,75	2,80	75,07	6,59	12,15
M3	4,62	8,85	23,75	2,75	76,43	6,04	20,66
M4	4,05	8,85	23,75	2,80	75,07	5,40	28,83

f=600khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,61	8,85	23,75	2,75	76,43	7,34	0
M1	5,42	8,85	23,75	2,80	75,07	7,22	4,02
M2	4,88	8,85	23,75	2,80	75,07	6,50	12,15
M3	4,56	8,85	23,75	2,75	76,43	5,97	20,66
M4	4,00	8,85	23,75	2,80	75,07	5,33	28,83

f=800khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,54	8,85	23,75	2,75	76,43	7,25	0
M1	5,36	8,85	23,75	2,80	75,07	7,14	4,02
M2	4,84	8,85	23,75	2,80	75,07	6,45	12,15
M3	4,52	8,85	23,75	2,75	76,43	5,91	20,66
M4	3,97	8,85	23,75	2,80	75,07	5,29	28,83

f=1000khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,47	8,85	23,75	2,75	76,43	7,16	0
M1	5,31	8,85	23,75	2,80	75,07	7,07	4,02
M2	4,81	8,85	23,75	2,80	75,07	6,41	12,15
M3	4,48	8,85	23,75	2,80	75,07	5,97	20,66
M4	3,95	8,85	23,75	2,80	75,07	5,26	28,83

Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f)

M0: échantillon plein

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	6,30	8,85	23,75	2,75	76,43	8,24
200	5,98	8,85	23,75	2,75	76,43	7,82
400	5,73	8,85	23,75	2,75	76,43	7,50
600	5,61	8,85	23,75	2,75	76,43	7,34
800	5,54	8,85	23,75	2,75	76,43	7,25
1000	5,47	8,85	23,75	2,75	76,43	7,16

M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	5,99	8,85	23,75	2,80	75,07	7,98
200	5,73	8,85	23,75	2,80	75,07	7,63
400	5,52	8,85	23,75	2,80	75,07	7,35
600	5,42	8,85	23,75	2,80	75,07	7,22
800	5,36	8,85	23,75	2,80	75,07	7,14
1000	5,31	8,85	23,75	2,80	75,07	7,07

M2: échantillon avec inclusion en air 12,15%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	5,39	8,85	23,75	2,80	75,07	7,18
200	5,13	8,85	23,75	2,80	75,07	6,83
400	4,95	8,85	23,75	2,80	75,07	6,59
600	4,88	8,85	23,75	2,80	75,07	6,50
800	4,84	8,85	23,75	2,80	75,07	6,45
1000	4,81	8,85	23,75	2,80	75,07	6,41

M3: échantillon avec inclusion en air 20,66%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,92	8,85	23,75	2,75	76,43	6,44
200	4,75	8,85	23,75	2,75	76,43	6,21
400	4,62	8,85	23,75	2,75	76,43	6,04
600	4,56	8,85	23,75	2,75	76,43	5,97
800	4,52	8,85	23,75	2,75	76,43	5,91
1000	4,48	8,85	23,75	2,75	76,43	5,86

M4: échantillon avec inclusion en air 28,83%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,26	8,85	23,75	2,80	75,07	5,67
200	4,14	8,85	23,75	2,80	75,07	5,52
400	4,05	8,85	23,75	2,80	75,07	5,40
600	4,00	8,85	23,75	2,80	75,07	5,33
800	3,97	8,85	23,75	2,80	75,07	5,29
1000	3,95	8,85	23,75	2,80	75,07	5,26

**Variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air
(différentes fréquences) [Cas de E/C=0.6] :**

Valeurs des permittivités ϵ calculées pour différents fréquences

f=100khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	6,18	8,85	23,75	2,70	77,85	7,94	0
M1	5,86	8,85	23,75	2,75	76,43	7,67	4,02
M2	5,39	8,85	23,75	2,75	76,43	7,05	12,15
M3	4,91	8,85	23,75	2,70	77,85	6,31	20,66
M4	4,21	8,85	23,75	2,80	75,07	5,61	28,83

f=200khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	6,04	8,85	23,75	2,70	77,85	7,76	0
M1	5,62	8,85	23,75	2,75	76,43	7,35	4,02
M2	5,19	8,85	23,75	2,75	76,43	6,79	12,15
M3	4,70	8,85	23,75	2,70	77,85	6,04	20,66
M4	4,12	8,85	23,75	2,80	75,07	5,49	28,83

f=400khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,78	8,85	23,75	2,70	77,85	7,42	0
M1	5,36	8,85	23,75	2,75	76,43	7,01	4,02
M2	5,00	8,85	23,75	2,75	76,43	6,54	12,15
M3	4,54	8,85	23,75	2,70	77,85	5,83	20,66
M4	3,99	8,85	23,75	2,80	75,07	5,32	28,83

f=600khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,70	8,85	23,75	2,70	77,85	7,32	0
M1	5,24	8,85	23,75	2,75	76,43	6,86	4,02
M2	4,94	8,85	23,75	2,75	76,43	6,46	12,15
M3	4,46	8,85	23,75	2,70	77,85	5,73	20,66
M4	3,96	8,85	23,75	2,80	75,07	5,28	28,83

f=800khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,61	8,85	23,75	2,70	77,85	7,21	0
M1	5,17	8,85	23,75	2,75	76,43	6,76	4,02
M2	4,85	8,85	23,75	2,75	76,43	6,34	12,15
M3	4,42	8,85	23,75	2,70	77,85	5,68	20,66
M4	3,93	8,85	23,75	2,80	75,07	5,24	28,83

f=1000khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,54	8,85	23,75	2,70	77,85	7,12	0
M1	5,11	8,85	23,75	2,75	76,43	6,69	4,02
M2	4,81	8,85	23,75	2,75	76,43	6,29	12,15
M3	4,38	8,85	23,75	2,70	77,85	5,63	20,66
M4	3,85	8,85	23,75	2,80	75,07	5,13	28,83

Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f)

M0: échantillon plein

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	6,18	8,85	23,75	2,70	77,85	7,94
200	6,04	8,85	23,75	2,70	77,85	7,76
400	5,85	8,85	23,75	2,70	77,85	7,51
600	5,70	8,85	23,75	2,70	77,85	7,32
800	5,61	8,85	23,75	2,70	77,85	7,21
1000	5,54	8,85	23,75	2,70	77,85	7,12

M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	5,95	8,85	23,75	2,75	76,43	7,78
200	5,62	8,85	23,75	2,75	76,43	7,35
400	5,36	8,85	23,75	2,75	76,43	7,01
600	5,24	8,85	23,75	2,75	76,43	6,86
800	5,17	8,85	23,75	2,75	76,43	6,76
1000	5,11	8,85	23,75	2,75	76,43	6,69

M2: échantillon avec inclusion en air 12,15%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	5,39	8,85	23,75	2,75	76,43	7,05
200	5,19	8,85	23,75	2,75	76,43	6,79
400	5,00	8,85	23,75	2,75	76,43	6,54
600	4,94	8,85	23,75	2,75	76,43	6,46
800	4,85	8,85	23,75	2,75	76,43	6,34
1000	4,81	8,85	23,75	2,75	76,43	6,29

M3: échantillon avec inclusion en air 20,66%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,91	8,85	23,75	2,70	77,85	6,31
200	4,70	8,85	23,75	2,70	77,85	6,04
400	4,54	8,85	23,75	2,70	77,85	5,83
600	4,46	8,85	23,75	2,70	77,85	5,73
800	4,42	8,85	23,75	2,70	77,85	5,68
1000	4,38	8,85	23,75	2,70	77,85	5,63

M4: échantillon avec inclusion en air 28,83%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,21	8,85	23,75	2,80	75,07	5,61
200	4,12	8,85	23,75	2,80	75,07	5,49
400	3,99	8,85	23,75	2,80	75,07	5,32
600	3,96	8,85	23,75	2,80	75,07	5,28
800	3,93	8,85	23,75	2,80	75,07	5,24
1000	3,85	8,85	23,75	2,80	75,07	5,13

**Variation de la permittivité en fonction de la concentration C% d'air
(différentes fréquences) [Cas de E/C=0.7] :**

Valeurs des permittivités ϵ calculées pour différents fréquences

f=100khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,61	8,85	23,75	2,70	77,85	7,21	0
M1	4,98	8,85	23,75	2,80	75,07	6,63	4,02
M2	4,55	8,85	23,75	2,75	76,43	5,95	12,15
M3	4,25	8,85	23,75	2,70	77,85	5,46	20,66
M4	3,73	8,85	23,75	2,80	75,07	4,97	28,83

f=200khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,32	8,85	23,75	2,70	77,85	6,83	0
M1	4,79	8,85	23,75	2,80	75,07	6,38	4,02
M2	4,41	8,85	23,75	2,75	76,43	5,77	12,15
M3	4,14	8,85	23,75	2,70	77,85	5,32	20,66
M4	3,64	8,85	23,75	2,80	75,07	4,85	28,83

f=400khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,11	8,85	23,75	2,70	77,85	6,56	0
M1	4,65	8,85	23,75	2,80	75,07	6,19	4,02
M2	4,31	8,85	23,75	2,75	76,43	5,64	12,15
M3	4,06	8,85	23,75	2,70	77,85	5,22	20,66
M4	3,58	8,85	23,75	2,80	75,07	4,77	28,83

f=600khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	5,00	8,85	23,75	2,70	77,85	6,42	0
M1	4,58	8,85	23,75	2,80	75,07	6,10	4,02
M2	4,25	8,85	23,75	2,75	76,43	5,56	12,15
M3	4,02	8,85	23,75	2,70	77,85	5,16	20,66
M4	3,55	8,85	23,75	2,80	75,07	4,73	28,83

f=800khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	4,93	8,85	23,75	2,70	77,85	6,33	0
M1	4,56	8,85	23,75	2,80	75,07	6,07	4,02
M2	4,22	8,85	23,75	2,75	76,43	5,52	12,15
M3	3,99	8,85	23,75	2,70	77,85	5,13	20,66
M4	3,53	8,85	23,75	2,80	75,07	4,70	28,83

f=1000khz	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e	C%
M0	4,88	8,85	23,75	2,70	77,85	6,27	0
M1	4,50	8,85	23,75	2,80	75,07	5,99	4,02
M2	4,19	8,85	23,75	2,75	76,43	5,48	12,15
M3	3,97	8,85	23,75	2,70	77,85	5,10	20,66
M4	3,51	8,85	23,75	2,80	75,07	4,67	28,83

Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f)

M0: échantillon plein

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	5,61	8,85	23,75	2,70	77,85	7,21
200	5,32	8,85	23,75	2,70	77,85	6,83
400	5,11	8,85	23,75	2,70	77,85	6,56
600	5,00	8,85	23,75	2,70	77,85	6,42
800	4,93	8,85	23,75	2,70	77,85	6,33
1000	4,88	8,85	23,75	2,70	77,85	6,27

M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,98	8,85	23,75	2,80	75,07	6,63
200	4,79	8,85	23,75	2,80	75,07	6,38
400	4,65	8,85	23,75	2,80	75,07	6,19
600	4,58	8,85	23,75	2,80	75,07	6,10
800	4,56	8,85	23,75	2,80	75,07	6,07
1000	4,50	8,85	23,75	2,80	75,07	5,99

M2: échantillon avec inclusion en air 12,15%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,55	8,85	23,75	2,75	76,43	5,95
200	4,41	8,85	23,75	2,75	76,43	5,77
400	4,31	8,85	23,75	2,75	76,43	5,64
600	4,25	8,85	23,75	2,75	76,43	5,56
800	4,22	8,85	23,75	2,75	76,43	5,52
1000	4,19	8,85	23,75	2,75	76,43	5,48

M3: échantillon avec inclusion en air 20,66%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	4,25	8,85	23,75	2,70	77,85	5,46
200	4,14	8,85	23,75	2,70	77,85	5,32
400	4,06	8,85	23,75	2,70	77,85	5,22
600	4,02	8,85	23,75	2,70	77,85	5,16
800	3,99	8,85	23,75	2,70	77,85	5,13
1000	3,97	8,85	23,75	2,70	77,85	5,10

M4: échantillon avec inclusion en air 28,83%

f	Cp(pF)	e_0	S(cm ²)	h(cm)	C_0 (pF)	e
100	3,73	8,85	23,75	2,80	75,07	4,97
200	3,64	8,85	23,75	2,80	75,07	4,85
400	3,58	8,85	23,75	2,80	75,07	4,77
600	3,55	8,85	23,75	2,80	75,07	4,73
800	3,53	8,85	23,75	2,80	75,07	4,70
1000	3,51	8,85	23,75	2,80	75,07	4,67

la permittivité en fonction de la concentration C%
(inclusion: air) et différent E/C pour une fréquence de 100khz

f=100khz	C% E/C	0,45	0,5	0,6	0,7
	0		8,32	8,24	7,94
	4,02	8,02	7,98	7,67	6,63
	12,15	7,27	7,18	7,05	5,95
	20,66	6,58	6,44	6,31	5,46
	28,83	5,77	5,67	5,61	4,97

la permittivité en fonction de la concentration C%
(inclusion: air) et différent E/C pour une fréquence de 200khz

f=200khz	C% E/C	0,45	0,5	0,6	0,7
	0		7,93	7,82	7,76
	4,02	7,70	7,63	7,35	6,38
	12,15	6,98	6,83	6,79	5,77
	20,66	6,35	6,21	6,04	5,32
	28,83	5,58	5,52	5,49	4,85

la permittivité en fonction de la concentration C%
(inclusion: air) et différent E/C pour une fréquence de 400khz

f=400khz	C% E/C	0,45	0,5	0,6	0,7
	0		7,62	7,50	7,42
	4,02	7,41	7,35	7,01	6,19
	12,15	6,73	6,59	6,54	5,64
	20,66	6,16	6,04	5,83	5,22
	28,83	5,45	5,40	5,32	4,77

la permittivité en fonction de la concentration C%
(inclusion: air) et différent E/C pour une fréquence de 600khz

f=600khz	C% E/C	0,45	0,5	0,6	0,7
	0		7,59	7,34	7,32
	4,02	7,26	7,22	6,86	6,10
	12,15	6,67	6,50	6,46	5,56
	20,66	6,07	5,97	5,73	5,16
	28,83	5,38	5,33	5,28	4,73

la permittivité en fonction de la concentration C%
(inclusion: air) et différent E/C pour une fréquence de 800khz

f=800khz	C% E/C	0,45	0,5	0,6	0,7
	0		7,33	7,25	7,21
4,02		7,18	7,14	6,76	6,07
12,15		6,53	6,45	6,34	5,52
20,66		6,02	5,91	5,68	5,13
28,83		5,34	5,29	5,24	4,70

la permittivité en fonction de la concentration C%
(inclusion: air) et différent E/C pour une fréquence de 1000khz

f=1000khz	C% E/C	0,45	0,5	0,6	0,7
	0		7,24	7,16	7,12
4,02		7,10	7,07	6,69	5,99
12,15		6,49	6,41	6,29	5,48
20,66		5,97	5,86	5,63	5,10
28,83		5,31	5,26	5,13	4,67

La Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (f) et E/C
pour M0: échantillon plein

f	0,45	0,5	0,6	0,7
f=100khz	8,32	8,24	7,94	7,21
f=200khz	7,93	7,82	7,76	6,83
f=400khz	7,62	7,50	7,42	6,56
f=600khz	7,60	7,34	7,32	6,42
f=800khz	7,34	7,25	7,21	6,33
f=1000khz	7,24	7,16	7,12	6,27

Pour M1: échantillon avec inclusion en air 4,02%

f	0,45	0,5	0,6	0,7
f=100khz	8,02	7,98	7,67	6,63
f=200khz	7,70	7,63	7,35	6,38
f=400khz	7,41	7,35	7,01	6,19
f=600khz	7,26	7,22	6,86	6,10
f=800khz	7,18	7,14	6,76	6,07
f=1000khz	7,10	7,07	6,69	5,99

Pour M2: échantillon avec inclusion en air 12,15%

f	0,45	0,5	0,6	0,7
f=100khz	6,92	7,18	7,05	5,95
f=200khz	6,98	6,83	6,79	5,77
f=400khz	6,73	6,59	6,54	5,64
f=600khz	6,67	6,50	6,46	5,56
f=800khz	6,53	6,45	6,34	5,52
f=1000khz	6,49	6,41	6,29	5,48

Pour M3: échantillon avec inclusion en air 20,66%

f	0,45	0,5	0,6	0,7
f=100khz	6,58	6,44	6,31	5,46
f=200khz	6,35	6,21	6,04	5,32
f=400khz	6,16	6,04	5,83	5,22
f=600khz	6,07	5,97	5,73	5,16
f=800khz	6,02	5,91	5,68	5,13
f=1000khz	5,97	5,86	5,63	5,10

Pour M4: échantillon avec inclusion en air 28,83%

f	0,45	0,5	0,6	0,7
f=100khz	5,77	5,67	5,61	4,97
f=200khz	5,58	5,52	5,49	4,85
f=400khz	5,45	5,40	5,32	4,77
f=600khz	5,38	5,33	5,28	4,73
f=800khz	5,34	5,29	5,24	4,70
f=1000khz	5,31	5,26	5,13	4,67

Comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimentale pour $E/C=0,45$
et $C\%=28,83\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,210	5,93	5,71	5,7	5,51	5,44
modèle maxwellG	5,650	5,41	5,22	5,2	5,04	4,98
expérimentale	5,77	5,58	5,45	5,38	5,34	5,31
modèle bruggman	5,420	5,2	5,02	5,02	4,85	4,78
modèle looyenga	5,180	4,98	4,82	4,81	4,67	4,62
modèle linchtenker	4,520	4,36	4,24	4,23	4,13	4,1
les bornes de wiener epsi min modèle série	2,670	2,64	2,62	2,62	2,6	2,59

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,45$ et
 $C\%=20,66\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,810	6,5	6,25	6,24	6,03	5,95
modèle maxwellG	6,350	6,07	5,84	5,83	5,64	5,57
expérimentale	6,58	6,35	6,16	6,07	6,02	5,97
modèle bruggman	6,220	5,95	5,73	5,73	5,54	5,47
modèle looyenga	5,970	5,72	5,52	5,51	5,35	5,28
modèle linchtenker	5,370	5,17	5,01	5	4,86	4,81
les bornes de wiener epsi min modèle série	3,310	3,26	3,22	3,21	3,18	3,16

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,45$ et $C\%=12,15\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	7,430	7,09	6,82	6,8	6,57	6,48
modèle maxwellG	7,120	6,7	6,54	6,52	6,31	6,23
expérimentale	7,27	6,98	6,73	6,67	6,53	6,49
modèle bruggman	7,080	6,75	6,5	6,5	6,27	6,19
modèle looyenga	6,880	6,57	6,33	6,32	6,12	6,04
modèle linchtenker	6,430	6,17	5,95	5,94	5,76	5,69
les bornes de wiener epsi min modèle série	4,400	4,3	4,22	4,22	4,15	4,12

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,45$ et $C\%=4,02\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	8,030	7,65	7,35	7,33	7,08	6,99
modèle maxwellG	7,910	7,54	7,25	7,23	6,99	6,89
expérimentale	8,02	7,70	7,41	7,26	7,18	7,10
modèle bruggman	7,900	7,55	7,24	7,25	6,98	6,88
modèle looyenga	7,820	7,46	7,18	7,16	6,92	6,83
modèle linchtenker	7,640	7,3	7,023	7	6,77	6,69
les bornes de wiener epsi min modèle série	6,830	6,2	6,02	6	5,85	5,79

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,5$ et $C\%=28,83\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,150	5,85	5,63	5,51	5,45	5,38
modèle maxwellG	5,600	5,34	5,14	5,04	4,98	4,93
expérimentale	5,67	5,52	5,40	5,33	5,29	5,26
modèle bruggman	5,380	5,13	4,95	4,85	4,8	4,75
modèle looyenga	5,140	4,92	4,75	4,67	4,62	4,57
modèle linchtenker	4,490	4,32	4,19	4,13	4,09	4,06
les bornes de wiener epsi min modèle série	2,670	2,64	2,61	2,6	2,58	2,57

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,5$ et $C\%=20,66\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,740	6,41	6,16	6,03	5,96	5,89
modèle maxwellG	6,290	5,99	5,76	5,64	5,58	5,51
expérimentale	6,44	6,21	6,04	5,97	5,91	5,86
modèle bruggman	6,160	5,87	5,65	5,54	5,47	5,41
modèle looyenga	5,920	5,65	5,45	5,35	5,29	5,23
modèle linchtenker	5,330	5,11	4,95	4,86	4,81	4,77
les bornes de wiener epsi min modèle série	3,300	3,25	3,2	3,18	3,16	3,15

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,5$ et $C\%=12,15\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	7,360	6,99	6,71	6,57	6,49	6,41
modèle maxwellG	7,060	6,71	6,44	6,31	6,23	6,16
expérimentale	7,18	6,83	6,59	6,50	6,45	6,41
modèle bruggman	7,000	6,66	6,4	6,27	6,2	6,12
modèle looyenga	6,810	6,49	6,24	6,12	6,05	5,98
modèle linchtenker	6,380	6,09	5,87	5,76	5,7	5,64
les bornes de wiener epsi min modèle série	4,380	4,28	4,19	4,15	4,12	4,095

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,5$ et $C\%=4,02\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	7,950	7,55	7,24	7,08	6,999	6,91
modèle maxwellG	7,830	7,44	7,14	6,99	6,9	6,82
expérimentale	7,98	7,63	7,35	7,22	7,14	7,07
modèle bruggman	7,830	7,43	7,14	6,98	6,9	6,81
modèle looyenga	7,750	7,36	7,066	6,92	6,84	6,75
modèle linchtenker	7,570	7,2	6,92	6,77	6,69	6,61
les bornes de wiener epsi min modèle série	6,380	6,14	5,95	5,85	5,79	5,74

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,6$ et $C\%=28,83\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	5,94	5,81	5,63	5,5	5,42	5,36
modèle maxwellG	5,42	5,3	5,15	5,03	4,96	4,9
Expérimentale	5,61	5,49	5,32	5,28	5,24	5,13
modèle bruggman I	5,20	5,098	4,95	4,84	4,78	4,73
modèle looyenga	4,98	4,89	4,76	4,66	4,6	4,55
modèle linchtenker	4,37	4,3	4,199	4,12	4,08	4,04
les bornes de wiener epsi min modèle série	2,65	2,63	2,61	2,59	2,58	2,58

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,6$ et $C\%=20,66\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,510	6,36	6,16	6,01	5,93	5,86
modèle maxwellG	6,070	5,94	5,76	5,63	5,55	5,48
expérimentale	6,31	6,04	5,83	5,73	5,68	5,63
modèle bruggman	5,960	5,83	5,66	5,52	5,45	5,38
modèle looyenga	5,730	5,61	5,45	5,33	5,26	5,2
modèle linchtenker	5,170	5,08	4,95	4,85	4,79	4,75
les bornes de wiener epsi min modèle série	3,260	3,24	3,2	3,17	3,16	3,14

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,6$ et $C\%=12,15\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	7,097	6,94	6,72	6,55	6,45	6,38
modèle maxwellG	6,810	6,66	6,45	6,29	6,2	6,13
expérimentale	7,05	6,79	6,54	6,46	6,34	6,29
modèle bruggman	6,760	6,61	6,41	6,25	6,16	6,09
modèle looyenga	6,580	6,44	6,25	6,1	6,01	5,94
modèle linchtenker	6,170	6,05	5,88	5,75	5,67	5,61
les bornes de wiener epsi min modèle série	4,310	4,26	4,19	4,14	4,11	4,08

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,6$ et $C\%=4,02\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	7,660	7,49	7,24	7,066	6,96	6,87
modèle maxwellG	7,550	7,38	7,15	6,97	6,86	6,78
expérimentale	7,78	7,35	7,01	6,86	6,76	6,69
modèle bruggman	7,548	7,38	7,14	6,96	6,86	6,77
modèle looyenga	7,470	7,31	7,07	6,9	6,8	6,72
modèle linchtenker	7,300	7,15	6,92	6,76	6,66	6,58
les bornes de wiener epsi min modèle série	6,210	6,12	5,95	5,84	5,77	5,71

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,7$ et $C\%=28,83\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	5,420	5,15	4,96	4,86	4,79	4,75
modèle maxwellG	4,960	4,72	4,55	4,46	4,41	4,37
expérimentale	4,97	4,85	4,77	4,73	4,70	4,67
modèle bruggman	4,780	4,56	4,4	4,32	4,27	4,23
modèle looyenga	4,600	4,4	4,26	4,18	4,13	4,101
modèle linchtenker	4,079	3,92	3,81	3,75	3,72	3,69
les bornes de wiener epsi min modèle série	2,580	2,55	2,52	2,51	2,49	2,49

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,7$ et $C\%=20,66\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	5,930	5,63	5,41	5,3	5,23	5,18
modèle maxwellG	5,550	5,27	5,08	4,98	4,91	4,87
expérimentale	5,46	5,32	5,22	5,16	5,13	5,10
modèle bruggman	5,450	5,18	4,99	4,89	4,83	4,79
modèle looyenga	5,260	5,02	4,84	4,75	4,69	4,65
modèle linchtenker	4,790	4,59	4,45	4,37	4,32	4,29
les bornes de wiener epsi min modèle série	3,160	3,098	3,053	3,03	3,01	3

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,7$ et $C\%=12,15\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,450	6,12	5,84	5,76	5,68	5,63
modèle maxwellG	6,200	5,88	5,66	5,54	5,47	5,42
expérimentale	5,95	5,77	5,64	5,56	5,52	5,48
modèle bruggman	6,160	5,85	5,63	5,51	5,44	5,39
modèle looyenga	6,010	5,72	5,51	5,4	5,33	5,28
modèle linchtenker	5,670	5,41	5,22	5,12	5,06	5,02
les bornes de wiener epsi min modèle série	4,110	3,99	3,91	3,87	3,84	3,82

comparaison entre la permittivité effective des modèles et de l'expérimental pour $E/C=0,7$ et $C\%=4,02\%$

	f=100 khz	f=200 khz	f=400 khz	f=600 khz	f=800 khz	f=1000 khz
les bornes de wiener epsi max modèle parallèle	6,960	6,6	6,34	6,2	6,12	6,06
modèle maxwellG	6,860	6,51	6,25	6,12	6,04	5,98
expérimentale	6,63	6,38	6,19	6,10	6,07	5,99
modèle bruggman	6,860	6,5	6,25	6,12	6,03	5,97
modèle looyenga	6,800	6,45	6,2	6,069	5,99	5,93
modèle linchtenker	6,660	6,32	6,082	5,96	5,88	5,82
les bornes de wiener epsi min modèle série	5,770	5,53	5,36	5,27	5,21	5,17