

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MANTOURI DE CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

# MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du grade de Magistère en Génie Civil

**Option : Matériaux**

**Par Med Abdelhafid Bouhamla**

**CARACTERISATION DES MATERIAUX DE  
CONSTRUCTION PAR LES METHODES  
ELECTRIQUES  
CAS DES INCLUSIONS DANS LES PATES PURES**

**Président :**

Dr: HOUARI HACENE

Professeur Université Mentouri Constantine.

**Rapporteur :**

Dr: AHMED BEROUAL

M.C.A Université Mentouri Constantine.

**Examineurs :**

Dr: MED NACER GUETTECHE

M.C.A Université Mentouri Constantine.

Dr: KAMEL ABDOU

M.C.A Université Mentouri Constantine.

*A mes parents.*

*A mon épouse et mes enfants.*

*A tous les miens.*

## **Remerciements**

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'Université Mentouri de Constantine en collaboration avec le laboratoire Microsystèmes et Instrumentations (LMSI) - Département d'Électronique - Université Mentouri -Constantine.

Je remercie Monsieur le Professeur S.Sahli Directeur du LMSI qui m'a accueilli dans son laboratoire et a mis à ma disposition l'appareil de mesure.

Je remercie Monsieur le Président et Messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'il me font en acceptant de juger ce travail.

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.

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

## Tables des matières

Introduction Générale	p5
Bibliographie	p7

### **CHAPITRE I : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX-PERMITTIVITE ET RESISTIVITE ELECTRIQUE**

I.1 Introduction	p9
I.2 Classification des matériaux	p9
I.2.1 Classification basée sur la conductivité électrique	p9
I.2.2 Classification basée sur les niveaux d'énergie	p9
I.2.3 Classification basée sur la permittivité diélectrique	p10
I.2.4 Classification basée sur la susceptibilité magnétique	p11
1. 3 Permittivité électrique	p11
I.3.1 Phénomènes de polarisation	p12
I.3.1.2 Polarisation électronique	p13
I.3.1.3 Polarisation ionique (ou atomique)	p13
I.3.1.4 Polarisation dipolaire (ou d'orientation)	p14
I.3.1.5 Polarisation macroscopique (ou de charge spatiale)	p14
I.3.1.6 Polarisation interfaciale	p15
I. 3.2 Permittivité	p16
I.3.2.1 Permittivité relative	p16
I.3.2.2 Permittivité absolue	p16
I.3.2.3 Permittivité relative complexe	p17
I.3.2.4 Facteur de dissipation diélectrique	p17
I.3.3 Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux	p17
I.3.3.1 Fréquence	p18
I.3.3.2 Température	p19
I.3.3.3 Humidité et d'autres impuretés	p20
I.3.3.4 Structure physique et chimique	p20

I.3.3.5 Intensité du champ alternatif	p20
I.4 Permittivité effective et champ d'excitation	p21
I.5 Théories des milieux effectifs	p23
I.6 Influence de la géométrie des inclusions sur la permittivité	p26
I.7 Conclusion	p27
Bibliographie	p28

## **CHAPITRE II : METHODES NON DESTRUCTIVES DE CARACTERISATION DES HETEROSTRUCTURES**

II.1 Introduction	p31
II.2 Méthodes de caractérisation	p31
II.2.1 Inspection visuelle	p31
II.2.2 Méthode thermique	p31
II.2.3 Méthode électrique – résistivité	p32
II.2.4 Méthodes diélectriques	p32
II.2.4.1 Méthode capacitive	p32
II.2.4.2 Méthode T.D.R. (Time Domain Reflectometry)	p33
II.2.5 Méthode acoustique (ultra sons)	p34
II.2.6 Méthodes magnétiques	p34
II.2.7 Méthodes des rayons X	p35
II.8 Conclusion	
Bibliographie	p36

## **CHAPITRE III: METHODES DE MESURE DE LA PERMITTIVITE ET DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE**

III.1 Introduction	p40
III.2 Mesures au pont	p40
III.3 Méthodes du circuit résonnant	p41

III.4 Méthode de la double résonance	p42
III.5 Mesures par lignes de transmission	p42
III.6 Mesure dans le domaine des ondes micrométriques	p43
III.7 Conclusion	p43

Bibliographie	p44
---------------	-----

## **CHAPITRE IV : CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES MATERIAUX AVEC INCLUSIONS**

IV.1 Introduction	p46
IV.2 Caractérisation de la pâte de ciment	p47
IV.2.1 Influence de la concentration d'eau sur la constante diélectrique et la résistivité de la pâte de ciment	p47
IV.2.2 Influence des cavités d'air sur la constante diélectrique et la résistivité de la pâte de ciment	p53
IV.2.3 Echantillons en pâte de ciment avec des inclusions en verre	p58
IV.2.4 Echantillons en pâte de ciment avec des inclusions en acier	p62
IV.3 Conclusion	p67

Conclusion générale	p68
---------------------	-----

Annexe	p71
--------	-----

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction :**

L'inspection efficace des structures existantes est devenue un très grand enjeu à cause des aspects environnementaux, économiques et sociopolitiques. Pratiquement toutes les structures exposées à l'environnement naturel subissent des détériorations avec le temps. L'évaluation de ces détériorations a constitué pendant longtemps un problème. Elle ne se faisait que par un processus destructif à savoir le prélèvement direct d'échantillons de la structure (carottage) ; ce qui laisse des dommages à divers degrés et par conséquent affaiblit cette dernière (la structure) et affecte souvent sa performance et sa durabilité. De ce fait, l'intégrité structurale doit être garantie en développant des stratégies optimales d'entretien. Pour cela, de nouvelles techniques permettant de détecter la détérioration (défauts) interne d'une structure sans l'endommager ont connu le jour à savoir les techniques non destructives (TND).

Actuellement, ces techniques sont largement utilisées pour l'évaluation in-situ de l'état des structures en béton tels que les ponts, les bâtiments et particulièrement les centrales nucléaires. Leur importance résulte de leur nature non envahissante, de la vitesse des mesures, de la non perturbation du service durant la collecte de données et de l'évaluation quantitative.

Il existe plusieurs TND ; chacune d'elle est basée sur un principe physique donnée permettant de fournir différentes informations relatives aux propriétés physiques du matériau. Ces paramètres, tels que la vitesse d'onde électromagnétique et ultrasonique, la résistivité électrique etc. sont interprétées en termes de caractéristiques du matériau.

Parmi ces techniques, nous pouvons citer: la méthode thermique [1], les méthodes nucléaires [2], la méthode basée sur la mesure de la résistivité appelée « méthode électrique » [3 - 5] et les méthodes basées sur la mesure de la permittivité diélectriques appelées « méthodes diélectriques » [6 - 8]. Ces dernières ont connu un développement remarquable ces dernières années. Ainsi, plusieurs techniques basées sur la détermination de la permittivité diélectrique relative (ou constante diélectrique) ont vu le jour : la méthode capacitive [1,6] : la méthode de réflectométrie connue sous l'appellation T.D.R (Tim Domain Reflectometry) [7,8] et les méthodes radars [9,10].

Les TND ont généralement des applications potentielles selon deux axes essentiels :

- détection des inclusions
- caractérisation et quantification de ces inclusions.



Les exigences pour chaque application diffèrent d'une TND à une autre. La détection des inclusions seules exige une technique donnée qui identifie qu'une inclusion est présente, et donne une indication approximative de sa localisation alors qu'une autre technique est utilisée pour la détermination de la nature et l'ampleur de ces inclusions avec une approximation suffisante pour permettre une évaluation technique.

Dans ce travail de recherche, nous proposons une nouvelle technique permettant la détection d'une inclusion dans une matrice cimentaire ainsi que sa concentration (volume apparent) et sa nature. Cette méthode est basée sur la mesure de la permittivité diélectrique et de la résistivité électrique du matériau. Ce manuscrit comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux principales caractéristiques des matériaux et plus particulièrement à la permittivité diélectrique (constante diélectrique) et aux phénomènes de polarisation apparaissant dans les matériaux lorsqu'un champ électrique leur est appliqué. Nous donnons également la définition de la résistivité électrique, autre paramètre important caractéristique des matériaux.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les différentes méthodes de classification des matériaux ainsi que les différentes techniques non destructives permettant leur caractérisation.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes techniques de mesure de la permittivité diélectrique et de la résistivité électrique.

Le quatrième chapitre, qui constitue l'essentiel de notre travail, présente le dispositif expérimental utilisé pour la mesure des deux caractéristiques principales de nos matériaux, à savoir la permittivité diélectrique et la résistivité électrique, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus. Les applications de cette méthode y sont également discutées.

## **Bibliographie**

- [1] B. Pincet, 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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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**

**PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES**

**MATERIAUX - PERMITTIVITE ET**

**RESISTIVITE ELECTRIQUE**

## **I.1. Introduction**

La caractérisation d'un matériau présente fréquemment un caractère de pluridisciplinarité. Selon leur application, on peut diviser les matériaux en : conducteurs et semi-conducteurs, diélectriques (ou électro- isolants) et magnétiques. Tout matériau est en général caractérisé par plusieurs constantes. En pratique, on ne considère que les caractéristiques qui semblent les plus importantes pour une application donnée.

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. Dans le domaine du Génie Civil, cet objet est généralement le matériau béton.

Il existe plusieurs méthodes de caractérisation des matériaux [1, 2] : les méthodes nucléaires, les méthodes thermiques, les méthodes électriques, les méthodes diélectriques, ... Chacune de ces méthodes est adaptée à une application spécifique. Certaines s'intéressent à la détermination de la teneur en eau dans un sol, d'autres à la présence de fissures ou de cavités dans un métal ....

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes classifications des matériaux ainsi qu'un certain nombre de méthodes servant à leur caractérisation.

## **I.2. Classification des matériaux**

### **I.2.1. Classification basée sur la conductivité électrique**

Cette classification est faite sur la base de la conductivité électrique  $\sigma$ , mesurée à 20°C (293K) :

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

### **I.2.2. Classification basée sur les niveaux d'énergie**

Une autre façon de classer les matériaux c'est celle qui consiste à utiliser les niveaux d'énergie. 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  $\Delta E_w$  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 :  $\sigma$  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 ...

### **I.2.3. Classification basée sur la permittivité diélectrique**

Une manière intéressante de classer les matériaux est celle basée sur la permittivité diélectrique relative complexe :  $\epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon''$ . Cette représentation complexe ne prend en compte que le courant de conduction et le courant de déplacement ( $\epsilon'' = \epsilon_p'' + \sigma/\omega \epsilon_0$ ,  $\epsilon_p''$  étant le terme lié à la polarisation et  $\sigma$  la conductivité électrique). Comme le montre les expériences, l'angle de pertes des métaux, dans la gamme des fréquences les plus utilisées, est égal à  $\pi/2$  ( $\phi=0$ ) et donc  $\tan\delta = \epsilon'' / \epsilon'$  tend vers l'infini. Les pertes d'énergie due au passage du courant ont évidemment une valeur déterminée. De plus,  $\epsilon''$  doit avoir une valeur finie, c'est à dire que pour les métaux, on peut supposer que  $\epsilon' = 0$ . Pour les autres types de matériaux,  $\tan\delta$  a une valeur déterminée qui dépend de la fréquence. Pour les matériaux quasi-conducteurs,  $\tan\delta > 1$  et pour les matériaux quasi-diélectriques,  $\tan\delta < 1$ . 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  $\varepsilon'$  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.

#### **I.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  $\eta_m$ , 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 :  $\eta_m = \mu_r - 1$ .

### **I.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 [3-5], Rayleigh [3, 5]), soit sur des lois de mélanges moléculaires (théories de Clausius-Mossotti [4], Onsager [2, 3, 4]). Des théories plus générales consistent à étudier les

permittivités effectives des systèmes à deux composants sans se préoccuper des détails de leurs comportement (Looyenga [6], McLachlan [7 - 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.

### I.3.1 Phénomènes de polarisation

L'application d'un champ électrique induit des mouvements des porteurs de charges. L'effet de ces mouvements est appelé polarisation induite. Michael Faraday en 1837 était le premier à découvrir l'effet de la polarisation diélectrique. Plusieurs types de polarisation (Tableau I.1) sont à distinguer : électronique, ionique, dipolaire, macroscopique, interfaciale (ou du type Maxwell - Wagner), spontanée (Figure I.1); celles-ci peuvent co-exister ou apparaître séparément.

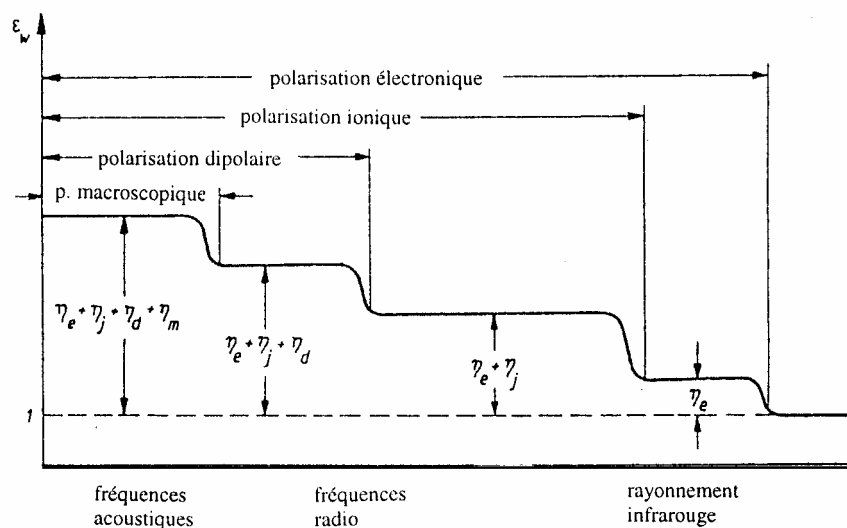


Figure I.1. Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence

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

$$P = \sum_k N_k \alpha_k (E_L)_k \quad (I.1)$$

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

### **I.3.1.2 Polarisation électronique**

Elle caractérise tous les diélectriques sans exception et résulte des déplacements d'orbitales électroniques externes par rapport au noyau d'un atome. Ce dernier (atome) est formé d'un noyau ponctuel, portant une charge  $Z_e$  et entouré d'électrons confinés dans une sphère de rayon  $R$ , à l'intérieur de laquelle ils constituent une densité de charge  $\rho$  uniforme. En l'absence de champ, le noyau se trouve au centre de la sphère. Un champ local  $E_L$  crée des forces  $F_r$  tendant à extraire le noyau de la sphère chargée. Mais un déplacement  $\delta$  du noyau par rapport au centre de la sphère, crée à son tour des forces d'attraction coulombienne  $F_a$  tendant à ramener le noyau au centre de cette sphère (Tableau I.1).

La polarisation électronique s'établit en quelques  $10^{-15}$ s; elle est donc indépendante de la fréquence jusqu'à l'ultraviolet.

### **I.3.1.3 Polarisation ionique (ou atomique)**

Elle résulte du déplacement des atomes liés par des liaisons ioniques. Ces liaisons sont rencontrées 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  $\Delta x$  par rapport à leurs positions de repos, donne naissance à une polarisation dite ionique (ou atomique).  $\Delta x$  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  $\Delta x$  (tableau I.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. Elle existe jusqu'aux fréquences correspondant à l'infrarouge; elle est propre à la plupart des matériaux céramiques.



### I.3.1.4 Polarisation dipolaire (ou d'orientation)

Les molécules présentant un moment dipolaire sont orientées sous l'action du champ électrique. 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. Dans une molécule comprenant plus de deux atomes, plusieurs liens peuvent présenter un moment dipolaire spontané. Le moment dipolaire de la molécule est alors la somme vectorielle de ceux-ci. 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  $H_2O$ ). La figure I.1.a correspond à la molécule  $CO_2$  qui, parfaitement symétrique, ne présente pas de moment dipolaire spontané. La figure I.1.b correspond à celle de  $H_2O$  qui présente un moment dipolaire  $P_m$  (Tableau I.1).

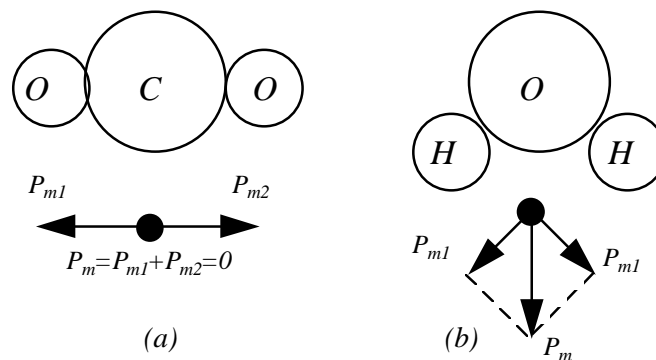


Figure I.1 Polarisation dipolaire ou d'orientation

### I.3.1.5 Polarisation macroscopique ( ou de charge spatiale )

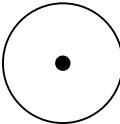
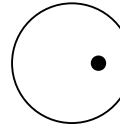
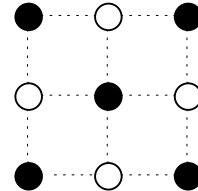
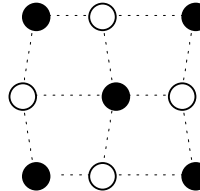
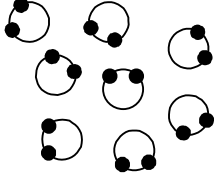
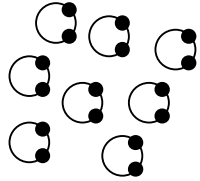
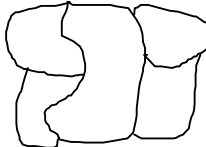
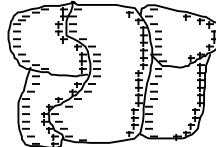
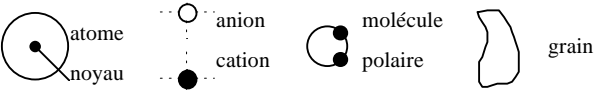
Elle décrit le processus du déplacement limité des charges libres. Elle peut être rencontrée dans les diélectriques liquides et solides, surtout avec une structure non-homogène ou amorphe. La polarisation macroscopique s'établit lentement. Selon le type de matériau et des conditions de mesure (température, 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.

### I.3.1.6 Polarisation interfaciale

Elle peut apparaître lorsqu'il y a association de deux diélectriques non homogènes dont les permittivités ( $\epsilon'_1$  et  $\epsilon'_2$ ) et les conductivités ( $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ) des matériaux constituants 1 et 2 sont telles que:

$$\epsilon'_1 / \epsilon'_2 \neq \sigma_1 / \sigma_2. \quad (I.1)$$

Elle résulte d'une accumulation de charges dues à l'ensemble des phénomènes de migration à la frontière des deux milieux à. 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 I.1).

Type de polarisation	$E=0$	$E \rightarrow$
Electronique		
Ionique		
Par orientation		
Interfaciale		
		

Les déplacements des charges sont très fortement exagérés

Tableau I.1

## I.3.2 Permittivité

### I.3.2.1 Permittivité relative

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité relative ou constante diélectrique  $\epsilon_r$ . Dans le cas d'un diélectrique parfait,  $\epsilon_r$  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:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \quad (\text{I.2})$$

### I.3.2.2 Permittivité absolue

La permittivité absolue  $\epsilon$  est le produit de la permittivité relative  $\epsilon_r$  par la permittivité du vide  $\epsilon_0$  ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m) :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 . \quad (\text{I.3})$$

La permittivité absolue définit la possibilité 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] :

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (\text{I.4})$$

En passant par la transformé de Fourier, on aura :

$$J(\omega) = \sigma E(\omega) + j\omega D(\omega) \quad (\text{I.5})$$

$$J(\omega) = [\sigma + j\omega\epsilon_0(1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega))]E(\omega) \quad (\text{I.6})$$

ou encore

$$J(\omega) = [\sigma_c + \omega\epsilon''(\omega) + j\omega\epsilon'(\omega)]E(\omega) \quad (\text{I.7})$$

où

$$\epsilon_0(1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega)) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) = \epsilon^*(\omega) \quad (\text{I.8})$$

$\chi'$  et  $\chi''$  sont les composantes réelle et imaginaire de la susceptibilité électrique  $\chi$  du milieu.  $\epsilon'$  et  $\epsilon''$  sont les composantes réelle et imaginaire de la permittivité électrique complexe  $\epsilon$  du

milieu. Cette permittivité complexe tient compte de dissipation d'énergie, des pertes par absorption et par diffusion.

### I.3.2.3 Permittivité relative complexe

On définit également une permittivité complexe relative :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (\text{I.9})$$

où  $\varepsilon_r'$  joue le rôle qu'avait  $\varepsilon_r$  dans le cas des isolants parfaits. La permittivité complexe absolue est, de la même manière, égale au produit de la permittivité complexe relative par  $\varepsilon_0$ . 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  $\sigma_c$  du diélectrique [15, 16].

### I.3.2.4 Facteur de dissipation diélectrique

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

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

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + (\sigma_c / \omega\varepsilon_0)}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (\text{I.10})$$

## I.3.3 Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux

La permittivité et le facteur de dissipation diélectriques mesurés d'un matériau sont affectés par divers paramètres physiques externes ou internes tels que fréquence, température, intensité du champ électrique, rayonnements ionisants, humidité et chimique ... [31].

### I.3.3.1 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:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m} = \frac{1}{\omega_m}. \quad (\text{I.11})$$

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  $\epsilon_s$ , et dans les fréquences optiques ( $\omega \rightarrow \omega_{opt}$ ), elle vaut  $\epsilon_\infty$ . L'équation typique décrivant ce modèle simple de relaxation diélectrique est l'équation de dispersion de Debye

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - i \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}. \quad (\text{I.12})$$

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:

$$i(t) \sim t^{-n}, \quad (\text{I.13})$$

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].

### **I.3.3.2 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.

### **I.3.3.3 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.

### **I.3.3.4 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 identifiable du matériau.

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

### **I.3.3.5 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.

## I.4 Permittivité effective et champ d'excitation

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

$$D = \varepsilon_{eff} E \quad (I.14)$$

Le déplacement  $D$  dépend de la polarisation  $P$  dans le matériau:

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_{eff} E. \quad (I.15)$$

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  $\alpha$  de la forme:

$$P = \sum_k N_k \alpha_k (E_l)_k \quad (I.16)$$

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 (I.15) dans (I.16), il vient :

$$(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0)E = \sum_k N_k \alpha_k (E_l)_k. \quad (I.17)$$

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  $\varepsilon_{eff}$ , grandeur macroscopique caractéristique du milieu et  $\alpha_k$  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 (I.17) qui relie la



fonction diélectrique  $\varepsilon_{eff}$  à la polarisabilité  $\alpha$  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  $\varepsilon_k$ . Il faut pour cela que la relation linéaire (I.15) 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  $\varepsilon_{eff}$  est donnée par :

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

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

$$(\varepsilon_k - \varepsilon_0)E = Na_k \alpha_k (E_l)_k \quad (I.19)$$

où  $Na_k$  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 (I.18) devient alors

$$(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0) = \sum_k \frac{Na_k}{N_k} (\varepsilon_k - \varepsilon_0) \frac{(E_m)_k}{(E_l)_k} . \quad (I.20)$$

$Na_k/N_k$  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 Claussius-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.

## I.5 Théories des milieux effectifs

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 propriétés des constituants, aussi bien que de leurs fractions de volume et que de leurs tailles.

Les lois de mélange les plus célèbres sont celle du milieu effectif (EMT), connue sous le nom de théorie de Maxwell-Garnett (MGT), et celle du modèle de l'approximation du milieu effectif (EMA), connue sous le nom de théorie de Bruggman.

La théorie de Maxwell-Garnett est dérivée de la relation de Clausius-Mossotti ; elle est basée sur la polarisation induite par un champ uniforme externe sur des inclusions sphériques isolées, placées dans le matériau hôte. La formule célèbre établie par Maxwell-Garnett en 1904 [17] a pour expression:

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_m} = p \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_m}{\varepsilon_k + 2\varepsilon_m} \quad (I.21)$$

où le constituant décrit par  $\varepsilon_m$  constitue une matrice continue dans laquelle sont immergées les inclusions  $\varepsilon_k$  (ou  $\varepsilon_i$  s'il s'agit d'un seul type d'inclusions),  $\varepsilon_{eff}$  étant la permittivité effective du milieu. Dans un article original, "*Colours in metal glasses and metallic films*" daté de 1904, Maxwell-Garnett avait traité la coloration des verres, par la dispersion d'une très faible quantité de particules métalliques dans une matrice continue. Le domaine d'application de cette théorie est clairement défini à la fois par les hypothèses de base et par sa formulation, à savoir que l'ensemble des inclusions est équivalent à un dipôle unique, isolé dans la matrice, dont la polarisabilité est la somme des polarisabilités individuelles (Figure I.3). Les inclusions sont donc sans interactions; il s'agit simultanément de faible volume d'inclusions et de grandes distances inter particules.

En pratique il peut être difficile de décider lequel des composants devrait être considéré comme le matériau hôte (le cas de la céramique poreuse). Et le modèle de Maxwell-Garnett est incertain pour les concentrations d'inclusions supérieures à 50% [6, 18,19].

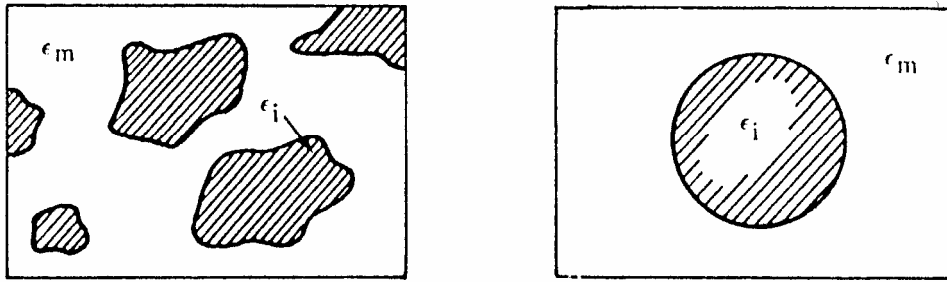


Figure I.3. La cellule unité représentative du milieu modélisé par la théorie de Maxwell-Garnett. Toutes les inclusions (modélisées par des sphères) sont ramenées à une inclusion unique: elles sont sans interactions.

Pour traiter ce problème, une autre théorie a été proposée par Bruggeman en 1935 [21]. Dans le modèle de Bruggeman (ou modèle du milieu effectif approximatif), l'hypothèse de l'existence du matériau hôte explicite n'est plus considérée [6, 18,21]. Au lieu de cela, les particules d'un composant quelconque d'un matériau simple sont supposées encastrées dans un milieu effectif de permittivité égale à la permittivité du mélange  $\epsilon_{eff}$  que l'on essaye de trouver (Figure I.4). Ainsi  $\epsilon_{eff}$  doit être déterminé à partir de la relation:

$$(1-f) \frac{\epsilon_m - \epsilon_{eff}}{\epsilon_m + 2\epsilon_{eff}} + f \frac{\epsilon - \epsilon_{eff}}{\epsilon + 2\epsilon_{eff}} = 0. \quad (I.22)$$

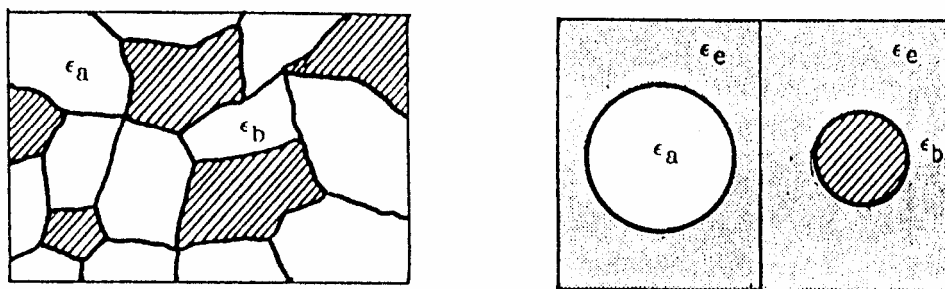


Figure I.4. Cellule unité de la théorie de Bruggeman. Elle est complexe et les deux inclusions types baignent dans le milieu moyen: elles sont donc en interaction.

Pour les faibles fractions volumiques, les deux théories MGT et EMA donnent des résultats très proches pour les constantes diélectriques effectives. Cependant, le modèle EMA

assure la validité aux fractions volumiques plus élevées puisqu'il traite les deux constituants de manière symétrique [21]. La deuxième hypothèse dans la théorie EMA porte sur la géométrie de la particule, puisque il est nécessaire de relier entre eux les champs interne et externe associés à la particule. Habituellement on suppose que les particules sont sphériques.

Les théories ci-dessus, basées sur les principes de l'électrostatique, ont été modifiées par d'autres auteurs durant le XX siècle, pour prendre en compte en particulier le paramètre taille des inclusions, ignoré jusque là dans la théorie des mélanges. En 1924, Fricke [22,23] a été le premier à inclure le facteur de forme pour prendre en compte la forme des particules. Le terme d'excentricité qu'il introduisit est basé sur l'aspect géométrique des inclusions sphéroïdales allongées ou aplaties aux pôles.

Böttcher [21] a proposé une formule permettant de retrouver la permittivité effective des milieux où la concentration des particules est si élevée que chaque particule est entourée par le mélange plutôt que par un composant. Cette relation a pour expression:

$$(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_2) / \varepsilon_{eff} = 3\theta(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{eff}). \quad (I.23)$$

où  $\varepsilon_1$  est propre à la matrice et  $\varepsilon_2$  est propre aux inclusions;  $\theta$  est la fraction volumique du composant dispersé.

Une autre équation intéressante a été développée par Looyenga [6] qui a supposé qu'en mélangeant deux constituants dont les permittivités sont telles que  $\varepsilon_1 = \varepsilon_{eff} - \Delta\varepsilon_{eff}$  et  $\varepsilon_2 = \varepsilon_{eff} + \Delta\varepsilon_{eff}$  et vice versa, la permittivité effective  $\varepsilon_{eff}$  du mélange peut être écrite sous la forme suivante:

$$\varepsilon_{eff} = \left\{ \varepsilon_2^{1/3} + \theta(\varepsilon_1^{1/3} - \varepsilon_2^{1/3}) \right\}^3. \quad (I.24)$$

L'équation ci-dessus a été également obtenue indépendamment par Landau et Lifschitz [28], comme indiqué dans la référence [26].

Ces formules et beaucoup d'autres ont été proposées au XX<sup>ème</sup> siècle pour le calcul de la permittivité effective. Toutefois, les résultats obtenus par les différentes formules, pour le même milieu modèle, ne sont pas toujours en parfait accord. Ils diffèrent selon les équations utilisées. Néanmoins, toutes les prédictions obtenues à partir des différentes approches,

peuvent être englobées par une région sous forme de lentille. Celle-ci a été proposée par Bergman et Stroud [27] et Milton [28].

## I.6 Influence de la géométrie des inclusions sur la permittivité

En considérant un mélange diélectrique contenant des inclusions formées, dispersées aléatoirement dans le matériau hôte, il est nécessaire d'attribuer la forme ou le facteur de forme aux inclusions en question pour expliquer les effets de la dépolarisation. Les inclusions (particules) sont appelées formées, quand au moins deux dimensions transversales diffèrent d'une manière significative, comme c'est le cas des ellipsoïdes, des sphéroïdes allongés ou aplatis aux pôles, des disques ou des fissures.

Pour introduire la forme des inclusions, Fricke [22,23] a développé une expression pour la permittivité effective d'un mélange diélectrique où le facteur de forme apparaît de manière explicite. Sa description analytique du mélange est basée sur l'induction du champ électrique dans le système dispersé. La permittivité effective du mélange est exprimée en fonction des permittivités du matériau hôte  $\varepsilon_2$  et des inclusions  $\varepsilon_1$ , de la fraction volumique  $\theta$  des inclusions et du facteur de forme  $x'_0$  pour représenter les effets de la dépolarisation dans le flux de l'induction électrique:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (1 + x'_0 \theta) + \varepsilon_2^2 x'_0 (1 - \theta)}{\varepsilon_1 (1 - \theta) + \varepsilon_2 (x'_0 + \theta)} \quad (I.25)$$

où  $x'_0$  dépend du rapport  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ . Cependant, les résultats obtenus à partir de la formule de Fricke dévient d'une manière significative des résultats expérimentaux. Kisdnasamy et Neelakantaswamy [29] ont inclus l'aspect statistique dans la formule de Fricke sur les bases de la loi logarithmique, pour obtenir le facteur de forme modifié  $x_0$ :

$$x_0 = M \frac{\varepsilon_1^\theta \varepsilon_2^{(1-\theta)} [\varepsilon_2^{(1-\theta)} + \varepsilon_1^\theta] - \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_2 [\varepsilon_2^{(1-\theta)} + \varepsilon_1^\theta - \varepsilon_1^\theta \varepsilon_2^{(1-\theta)}]} \quad (I.26)$$

où  $M$  est une fonction du rapport de deux demi axes des inclusions  $a/b$ .

Indépendamment de la forme, de la taille, de l'état physique, de la concentration volumique, ou de l'orientation de différentes phases, la réponse diélectrique effective du mélange se trouve toujours entre deux limites connues sous le nom de frontières de Wiener,

suggérées par l'auteur en 1912 [30]. La permittivité des systèmes hétérogènes est étroitement liée à l'agencement des particules dans le système par rapport à la direction du champ appliqué, comme on peut le voir sur l'exemple simple d'un système stratifié à deux constituants (Figure I.5). Quand les directions du champ et des stratifications coïncident (combinaison parallèle, Figure I.5a), la permittivité effective est donnée par la relation:

$$\varepsilon_{eff} = \theta\varepsilon_1 + (1-\theta)\varepsilon_2 \quad (I.27)$$

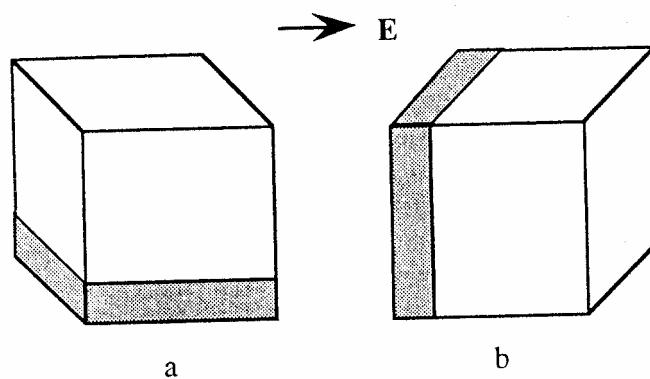


Figure I.5. Frontières de Wiener.

et quand les directions du champ et des stratifications sont perpendiculaires (combinaison série, Figure I.5b), elle est donnée par la relation:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{\theta}{\varepsilon_1} + \frac{(1-\theta)}{\varepsilon_2}} \quad (I.28)$$

## I.7 Conclusion

Il ressort de ce chapitre, que la caractérisation d'un milieu hétérogène, et par conséquent la détermination de sa permittivité effective, nécessite la connaissance des propriétés des ses constituants (permittivités complexes, géométrie, ...) et les paramètres qui les influencent. Il en est de même de la résistivité électrique.

## Bibliographie

- [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 Blaszkiewicz, Robert E. Newnham, *Electrical resistivity of composites*, J. Am. Ceram. Soc., 73 (8), (1990), pp. 2187-2203.
- [9] D.S. McLachlan, M. Blaszkiewicz 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] J.C. Maxwell Garnett, , *Colours in metal glasses and in metallic films*, Philos. Trans. R. Soc. Lond. A 203, (1904), pp. 38-420.
- [18] 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.
- [19] Robert W Boydy, Russell J Gehry, George L Fischery and J E Sipez, *Nonlinear optical properties of nanocomposite materials*, Pure Appl. Opt. **5**, (1996), pp. 505–512. Printed in the UK
- [20] D.A.G. Bruggeman, *Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen*, Annalen der Physik (Leipzig) **24**, (1935), pp. 636-679.
- [21] C. Pecharrromàn, J.E. Iglesias, *Effictive dielectric properties of packed mixtures of insulator particles*, Physical Review B **49** (11), (1994), The American Physical Society.
- [22] H. Fricke, *A mathematical treatement of the electrical conductivity and capacity of disperse systems I*, Phys. Review **24**, (1924), pp.575-587.
- [23] H. Fricke, *A mathematical treatement of the electrical conductivity and capacity of disperse systems II*, Phys. Review, **26**, (1926), pp. 687-681.
- [24] C.J.F. Böttcher, *Theory of Electric Polarization*, Elsevier Science Publishing Co., Amsterdam, 1952.
- [25] L.D. Landau, E.M. Lifschitz, *Course of Theoretical Physics*, Pergamon Press, Oxford, 1960.
- [26] P.S. Neelakanta, *Handbook of Electromagnetic Materials. Monolithic and Composite Versions and their Applications*, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, 1995.
- [27] Bergman D. J. and Stroud D., *Physical Properties of Macroscopically Inhomogeneous Media*, Solid State Physics **46**, (1992), pp. 147-269.
- [28] G.W. Milton, *Bounds on the electromagnetic, elastic, and optical properties of two-component composites*, Physical Review Letters **46** (8), (1981), pp. 5294-5304.
- [29] S. Kisdnasamy, P.S. Neelakantaswamy, *Complex permitivity of a dielectric mixture, Modified Fricke's formula based on logarithmic law of mixing*, Electron Letts. vol. **20**, (1984), pp. 291-293.
- [30] R.W. Sillars, Properties of dielectric containing semi-conducting particles of various shapes, J. Inst. Elect. Engr., vol. **80**, (1937), pp. 378-392.
- [31] NF C26-231,231] Norme AFNOR 2004



**CHAPITRE II**  
**METHODES NON DESTRUCTIVES DE**  
**CARACTERISATION DES**  
**HETEROSTRUCTURES**

## **II.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous décrivons les principales techniques non destructives de caractérisation des matériaux.

## **II.2 Méthodes de caractérisation :**

### **II.2.1 Inspection visuelle**

L'essai visuel est probablement le plus important de tous les essais non destructifs. Il est rapide, commode et relativement peu coûteux. Les spécialistes du domaine peuvent, à partir de constats visuelles, 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, de formuler les recommandations nécessaires et établir le programme d'essais approprié. Cependant, cette technique est limitée par les obstructions de la vue (éclairage, obstacles empêchant la visualisation ...) et parfois aux fausses interprétations.

### **II.2.2 Méthode thermique**

Cette méthode est basée sur la relation entre la conductivité thermique d'un milieu ou sa chaleur spécifique, et sa teneur en eau [3, 4]. Il existe plusieurs techniques de mesure de la teneur en eau d'un milieu. Parmi celles-ci, la méthode de la sonde cylindrique à régime transitoire ; elle consiste à placer un élément chauffant dissipant une énergie constante dans le milieu, et à suivre l'évolution de la température à la surface de la sonde. Comme la température est fonction de la conductivité thermique, elle même dépendant de la teneur en eau, on peut déterminer la teneur en eau du milieu considéré. La teneur en eau peut être également mesurée par des méthodes calorimétriques et des sondes à choc thermiques. Ces méthodes permettent de mesurer la chaleur spécifique du milieu qui est une grandeur physique liée linéairement à la teneur en eau massique du milieu. L'avantage des méthodes thermiques c'est leur caractère peu destructif et le faible coût des capteurs et du système de mesure. Cependant, elles ne suffisent pas à compenser les difficultés à disposer de bibliothèques de courbes d'étalonnage, à éliminer les effets de la température du milieu qui complique l'interprétation et à supprimer l'interaction de la sonde sur l'état hydrique du milieu qu'elle mesure. Cette méthode est très bien adaptée au milieu sol.

### **II.2.3 Méthode électrique – résistivité**

Cette méthode est basée sur la mesure de la résistivité  $\rho$  (ou la conductivité électrique  $\sigma : \rho = 1/\sigma$ ) du milieu [3, 4]. En effet, la conductibilité électrique d'un milieu dépend de sa teneur en eau et des ions en présence. De ce fait, la conductibilité électrique globale du milieu est directement liée à sa teneur en eau. En mesurant la conductibilité du milieu, on peut déterminer indirectement sa teneur en eau. Malheureusement, cette méthode est sensible aux fluctuations thermiques et demeure imprécise pour la mesure des fortes teneurs en eau.

### **II.2.4 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 contrasts, la constante 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 [4 - 6] 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  $\text{cm}^3$  à plusieurs  $\text{dm}^3$ . 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.

#### **II.2.4.1 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.

#### **II.2.4.2 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 [8 - 18] et plus particulièrement la méthode de la coupe radar verticale (Vertical Radar Profiling – VRP) qui connaît un intérêt croissant [12 - 18]. 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.

### **II.2.5 Méthode acoustique (ultrasons)**

Elle est basée sur les propriétés acoustiques de la matrice et des inclusions [18 - 19].

C'est une méthode connue et utilisée pour la détection des défauts dont les dimensions sont supérieures à 200  $\mu\text{m}$ . Son grand avantage est qu'elle permet d'effectuer des mesures en temps réel et d'analyser de grands volumes, permettant ainsi de diminuer les sources d'erreurs [21 - 22].

Les systèmes de mesure à ultrasons conventionnels ont des fréquences de fonctionnement inférieures à 10 MHz et, par conséquent, ne permettent pas de détecter des inclusions de petites tailles (50 – 100  $\mu\text{m}$ ). Le développement de systèmes ultrasons à hautes fréquences, utilisant des sondes travaillant dans la gamme 30 – 100 MHz, permettent de détecter des inclusions (trous ou autres) de diamètres inférieurs à 100  $\mu\text{m}$  [23]. Cependant, plus la fréquence est augmentée pour détecter des inclusions plus petites, plus les signaux ultrasons pénètrent moins dans l'hétérostructure.

### **II.2.6 Méthodes magnétiques**

Ces méthodes sont utilisées dans l'inspection interne des matériaux métalliques et des alliages [19]. L'une des méthodes les plus communément utilisées est la méthode du flux de fuite magnétique [26 - 29]. 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.

## **II.2.7 Méthode des rayons X**

La micro-radiographie à rayons X est une autre méthode non destructive utilisée pour la détection des inclusions dans les métaux. On peut avoir facilement une image agrandie avec un équipement standard. L'association d'un micro-objectif avec des tubes à rayons X permet d'obtenir un agrandissement de l'image de 5 à 10 [30, 31]. Pour éviter l'utilisation de films radiographiques, on peut faire appel à la fluoroscopie ; cette technique permet l'agrandissement de l'image en temps réel.

L'un des inconvénients de cette méthode, c'est sa difficulté à séparer les trous des inclusions. En effet, comme les trous ont un coefficient de transmission plus élevé que celui des inclusions, ils apparaissent plus foncés sur les radios, que les inclusions de mêmes dimensions. Cette méthode est une option intéressante pour la détection des inclusions. L'investissement est important et les coûts opérationnels sont élevés.

## **II.8 Conclusion**

La permittivité diélectrique et la résistivité (ou la conductivité) électrique apparaissent comme deux paramètres importants pour caractériser une hétérostructure. Les diverses méthodes actuelles dont nous avons exposé quelques unes dans ce chapitre, n'utilisent qu'un seul de ces paramètres séparément. Pour caractériser nos matériaux, nous utiliserons simultanément deux caractéristiques à savoir la permittivité diélectrique (constante diélectrique) et la résistivité électrique.

## **Bibliographie**

- [1] Baron, J.P. 1987. La mesure de la teneur en eau par les méthodes nucléaires, Journées de Physique. L.C.P.C., pp.151-156.
- [2] 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.
- [3] Pincent, B., Méline, D., and Auriol, J. 1993. Measurement of the moisture content variation in non saturated, compacted clays, Geoconfine 93, Arnould, Barrès and Côme (eds).
- [4] Davis, J.L., and Chudobiak, W.J., 1975. In situ method for measuring relative permittivity of soils, Geological Survey of Canada, Ottawa, paper 75-1, A, pp.75-79.
- [5] 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 transmission lines, Soil Science Society of America. Journal, Vol. 46.
- [6] Topp, G.C., and Davis, J.L., 1985. Measurement of soil water content using T.D.R. : a field evaluation, Soil Science Society of America. Journal, Vol. 49.
- [7] W. Herkelrath, S.P. Hambourg, F. Murphy, Automatic real time monitoring of T.D.R., Water Ressources Research, Vol. 27, n°5, 1991, pp. 857-864.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] M.J. Eppstein, D.E. Dougherty, Efficient three-dimensional data insersion: Soil characterization and moisture monitoring from cross-well ground-penetrating radar at a Vermont test site, Water Ressources Research, 34, 1998, pp. 1889-1900.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] B.A. Hardage, Vertical Seismic Profiling: Part A: Principles, 2<sup>nd</sup> ed. London, Geophysical Press, 1985.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] H.V. Atkinson and G. Shi, "Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods", Progress in Materials Science 48, 2003, pp. 457-520.



- [20] M.G. Silk, International Metal Review 23, 1982, pp. 28-50.
- [21] J.A. Olgilvy, Ultrasonics, 31, 1993, pp.219-222.
- [22] H.T. Ploegaert, J.V. Steel, Revue de métallurgie –CIT, 93, 1996, pp. 111-7
- [23] G. Auclair, R. Meilland, F. Meyer, Revue de Métallurgie – CIT 93, 1996, pp. 119-29
- [24] Syam K. Mantrala, C. Vipulanandan, Nondestructive evaluation of polyester polymer concrete, ACI Materials Journal, 1995, pp. 660-668.
- [25] S.P. Shah and S. Chandra, Mechanical Behavior of Concrete Examined by Ultrasonic Measurements, Journal of Materials, Vol.5, N°3, 1970, pp. 550-563.
- [26] M. Wakoh, Curr Adv. Mater Proc. 1993, 6, pp. 1172-3
- [27] H. Tanabe, Y. Matsufuji, J. Yosuji, S. Ando, J. Iron Steel Inst. Jpn, 1991, 4, pp. 63-9
- [28] Y. Matsuoka, Y. Nakamura, Y. Naganuma, Nippon Steel Rechnical Report 1991, 14, pp. 63-9
- [29] P. Neu, P. Piggi, B. Sarter, Proc. 3rd Int. Conf. ‘Clean steels ‘, Balatonfured, Hungary, June 1986, edited and published by the institute of Metals, London, 1987, pp.99-102
- [30] J. Dijl, D. Manneveld, J.M. Rabennerg, Ironmaking and Steelmaking, 1993, 20, pp. 75-80
- [31] D.E. Gridero, P.K. Ausburn, J. Non-Destruct. Test, 1987

**CHAPITRE III**

**METHODES DE MESURE DE LA**

**PERMITTIVITE ET DE LA RESISTIVITE**

**ELECTRIQUE**

### III.1 Introduction

Les méthodes de mesure de la permittivité et de la résistivité électrique sont multiples [1]. La méthode particulière à adopter dépend de la nature de l'échantillon à caractériser et de la bande de fréquence explorée pour une application donnée. La précision d'une mesure demande du soin dans le choix de l'appareillage utilisé. La méthode la plus utilisée est la méthode de compensation. Elle consiste à utiliser un pont, système à quatre branches plus une branche centrale permettant de vérifier le zéro du courant c'est-à-dire l'équilibre ; l'une des quatre branches comporte l'échantillon à caractériser, les trois autres sont constituées d'éléments fixes (éléments étalon) ou variable de manière à pouvoir équilibrer le pont. Il existe différents types de pont dont les performances dépendent de l'ordre des grandeurs à mesurer. Le pont le plus utilisé est le pont de Schering. Il permet de mesurer les capacités ainsi que les résistances. Et c'est à partir de ces deux grandeurs qu'on déduit la constante diélectrique (permittivité diélectrique) et la résistivité, connaissant la géométrie de l'échantillon. La mesure de la résistivité de façon singulière peut se faire également par un simple pont de Wheastone, c'est-à-dire avec des branches dont les éléments sont uniquement des résistances. Dans le cas général, les matériaux sont caractérisés par au moins deux paramètres. Dans le cas des matériaux de construction, c'est surtout la permittivité diélectrique et la résistance électrique qui sont les plus aptes à décrire ces matériaux. Et c'est avec la mesure de ces deux caractéristiques qu'est consacré notre recherche expérimentale.

En général, la partie réelle de la permittivité relative  $\varepsilon'$  est obtenue à partir de la mesure de la capacité de l'un échantillon introduit entre ses électrodes planes et la partie imaginaire  $\varepsilon''$  est fournie par la mesure du facteur de pertes  $tg\delta$ , connaissant la relation entre les parties réelle et imaginaire ( $tg\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ ).

Dans ce qui suit, nous décrivons et discuterons brièvement sur les méthodes adaptables à chaque bande de fréquence et de leurs applications.

### III.2 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 III.1 donne le schéma de principe d'un pont de mesure de la permittivité et de la résistivité.

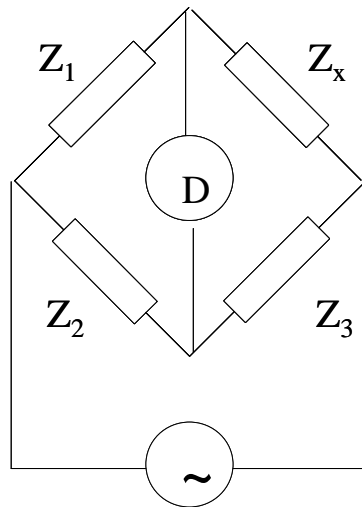


Figure III.1. Schéma de principe d'un pont

$Z_x$  représente la branche où est insérée 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 :

$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3 \quad (\text{III.1})$$

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'hétérostructure à caractériser et de choisir dans le menu les éléments désirés ( $R_p$ ,  $C_p$ ,  $R_s$ ,  $C_s$ ,  $\text{tg}\delta$ ..... ). Certains impédance-mètres fournissent les spectres de variations des différents éléments en fonction de la fréquence d'un signal

### III.3 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 :  $\text{tg}\delta \approx 0,05$ .

### **III.4 Méthode de la double résonance**

Dans le cas où  $\text{tg}\delta$  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.[2]. La partie réelle de la permittivité peut être déterminée dans ce cas indépendamment des pertes.

### **III.5 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 co-axiale, 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.

### **III.6 Mesure dans le domaine des ondes micrométriques : Méthode des guides d'ondes et des cavités résonnantes [4]**

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 quant on a affaire à de petites quantités de matériau [3]. 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 [3]. 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.

### **III.7 Conclusion**

Le choix de la méthode de mesure est important. Il dépend de divers facteurs dont le plus marquant est la fréquence. La méthode la plus simple et que nous utiliserons pour nos applications est la méthode de compensation, c'est-à-dire celle des ponts ou impédance- mètres.

## **Bibliographie**

[1] J.C. Anderson, Diélectriques, Dunod 1966.

[2] B. Ichijo, 1953 J , Appl. Phys, 24, 307.

[3] Lurio et Stern : 1960 J. Appl. 31 .180

[4] H. M. Barlow and A. L. Cullen, 1950, Microwave Measurements, Constable.

**CHAPITRE IV**  
**CARACTERISATION EXPERIMENTALE DES**  
**MATERIAUX AVEC INCLUSIONS**



## IV.1 Introduction

Ce chapitre constitue l'essentiel de notre travail. Il est consacré à la caractérisation d'échantillons constitués d'une matrice (matériau hôte) en ciment CPA (Hamma Bouziane), de 40x40x30 cm dont le rapport  $E/C = 0,5$ , séchés dans un four à 110° C pendant 24 H et contenant plusieurs types d'inclusions, en utilisant une méthode basée sur la mesure de la permittivité diélectrique et de la résistivité électrique effectives. Deux types d'inclusions sont considérés :

- diélectriques : air et verre
- conductrices : eau et acier

Ces inclusions sont de concentrations connues mais différentes.

La permittivité effective et la résistivité effective sont mesurées pour chaque matrice avec son inclusion pour différentes concentrations de cette dernière et pour différentes fréquences. Il s'agit donc d'analyser la variation de ces deux paramètres caractéristiques (permittivité et résistivité) en fonction de la concentration des inclusions et de la fréquence. Les résultats des mesures sont traduits par des courbes. Nous en déduisons comment différencier les différentes hétérostructures ainsi que les champs d'applications de cette méthode.

Le système de mesure est constitué de deux électrodes carrées en cuivre de 40 mm de côté. Un ressort est placé sur l'électrode supérieure pour assurer un bon contact entre les électrodes et l'échantillon ; ceci permet d'éviter les capacités parasites induites par la présence d'interstices entre l'échantillon et les électrodes. La figure (IV.1) donne une vue schématique du système de mesure.

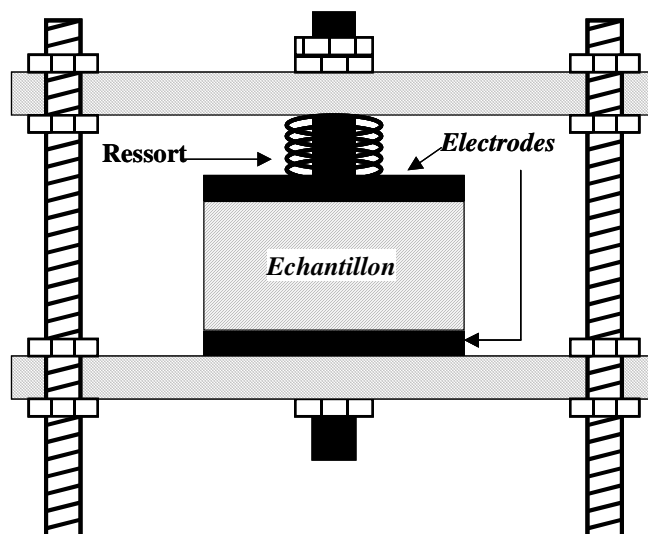


Figure IV.1. Schéma du dispositif de mesure.

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

La mesure de la capacité  $C_p$  et de la résistance  $R_p$  sont effectuées avec un impédance-mètre du type : HEWLETT PACKARD - 4284A - 20 Hz à 1MHz du département d'électronique.

La permittivité effective  $\varepsilon_e$  et la résistivité effective  $\rho_e$  sont déduites par la suite à partir des formules suivantes :

$$\varepsilon_e = \frac{C_p}{C_0} \quad \text{et} \quad C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{h}$$

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m (la permittivité du vide)

$h$  est la hauteur de l'échantillon

$S$  est la section effective de l'électrode du dispositif

$$\rho_e = \frac{R_p \cdot S}{h}$$

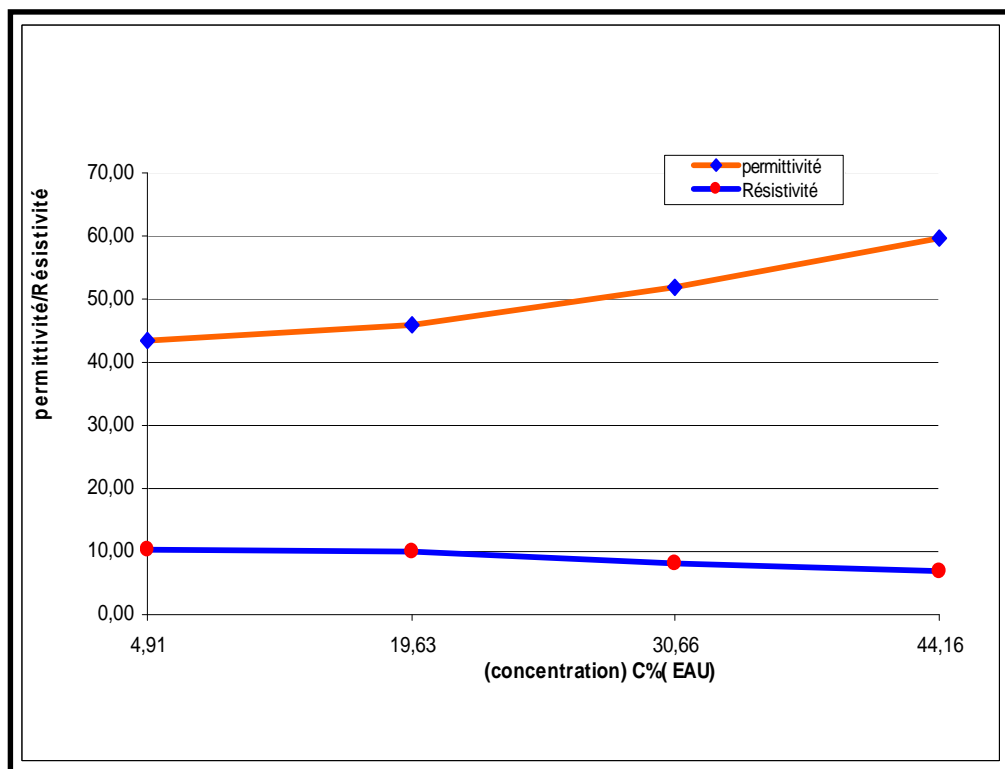
Les mesures sont effectuées à température ambiante.

## **IV.2. Caractérisation de la pâte de ciment**

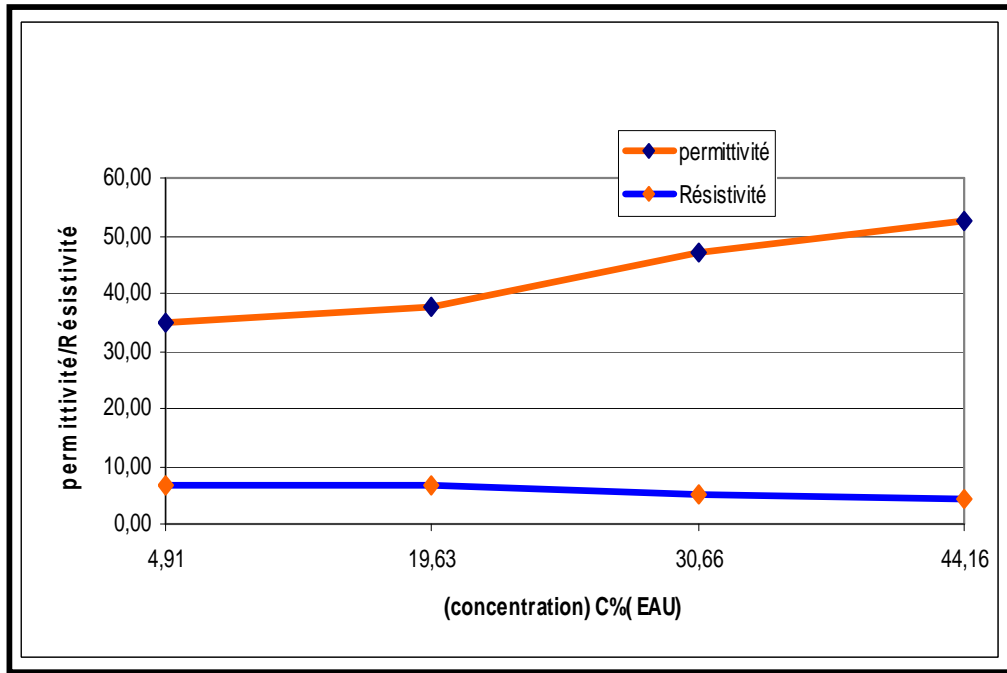
### **IV.2.1. Influence de la concentration d'eau sur la constante diélectrique et la résistivité**

Les essais effectués sur différents échantillons de pâte de ciment (P1, P2, P3, P4 : Annexe) contenant des inclusions cylindriques remplies d'eau montrent une augmentation significative de la constante diélectrique effective de l'hétérostructure (Figures 1 à 6) lorsque la concentration en eau augmente, et ce quelle que soit la fréquence; la constante diélectrique de l'eau étant plus importante que celle de la pâte de ciment. Ce résultat confirme les prédictions des lois de mélanges. Aussi, la résistivité de l'eau étant plus faible que celle de la pâte de ciment, la résistivité effective de l'hétérostructure diminue avec l'augmentation de la concentration d'eau dans la pâte de ciment.

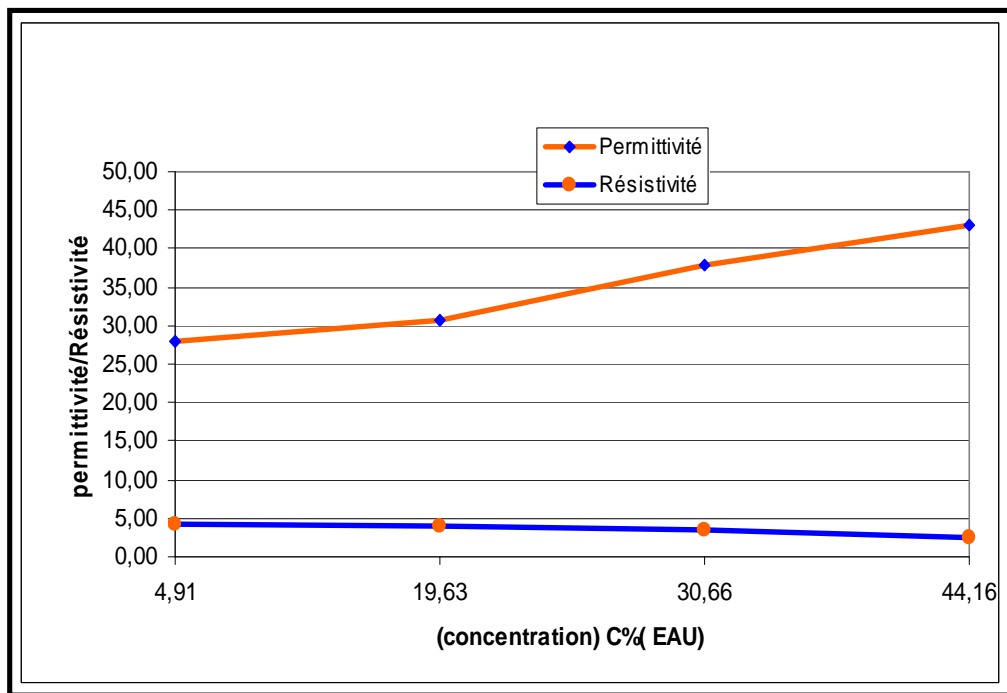
Ces résultats sont d'une importance fondamentale pour la caractérisation des matériaux composites. Les caractéristiques donnant la constante diélectrique et la résistivité effective constituent un outil permettant de suivre le taux d'humidité de la pâte de ciment. On peut ainsi suivre l'humidification de la pâte lorsque la permittivité effective augmente et la résistivité diminue ou encore le séchage lorsque la constante diélectrique diminue ou que la résistivité augmente. On peut se servir de cette technique pour suivre le gonflement d'un sol par exemple ou l'infiltration d'eau dans des structures. A l'inverse, cette méthode peut aussi être utile pour le suivi de dépôts de sable (voire d'affluents) dans les lits de rivière ou tout autre plan d'eau. La mesure de la résistivité constitue une information complémentaire venant confirmer le diagnostic avancé sur la base de la mesure de la constante diélectrique.



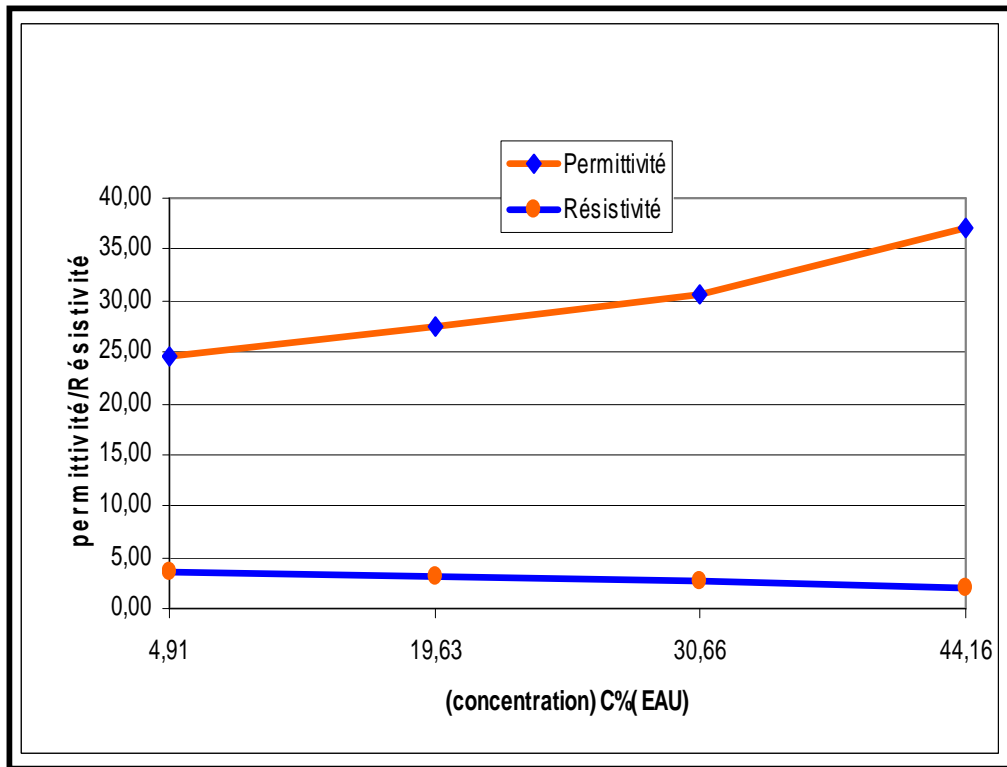
**Figure 1:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'eau à 100 kHz.



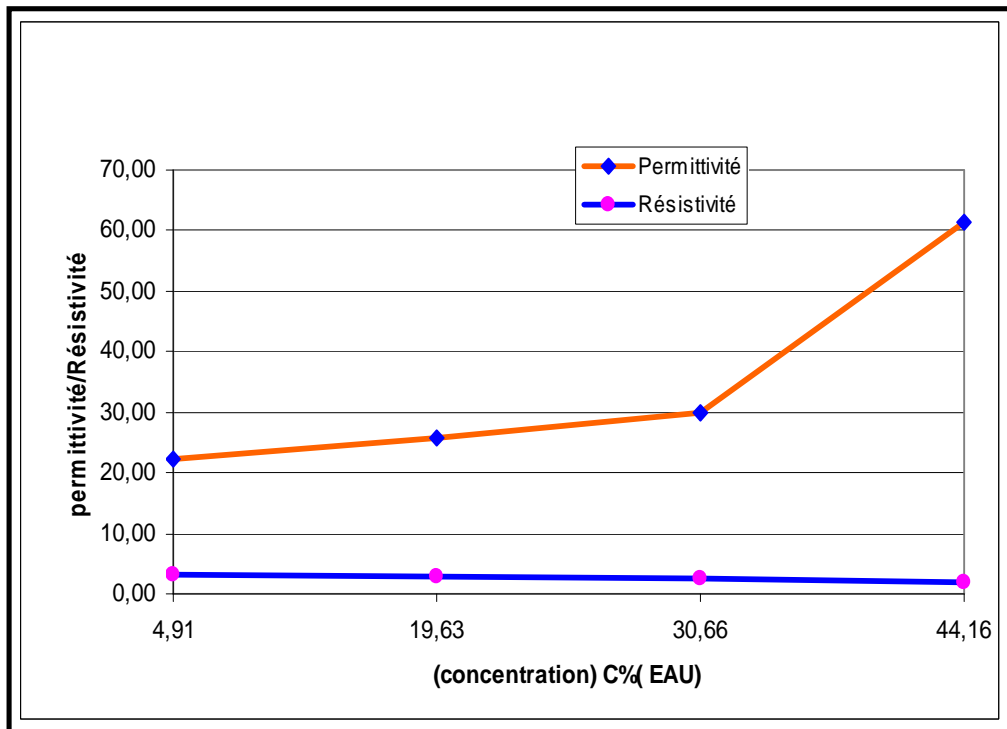
**Figure 2:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'eau à 200 kHz.



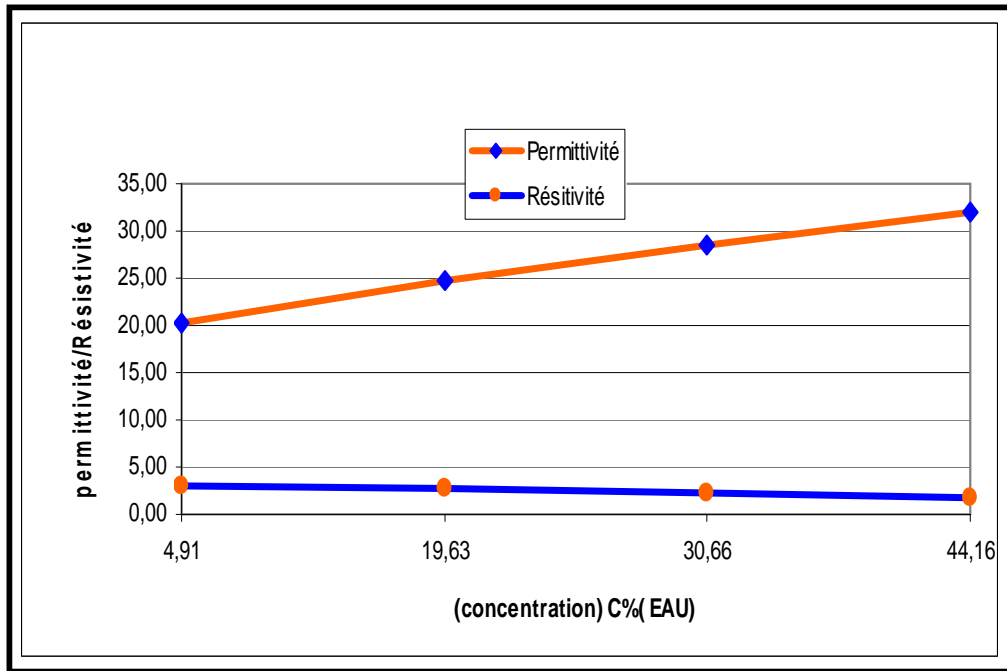
**Figure 3:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'eau à 400 kHz



**Figure 4:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'eau à 600 kHz

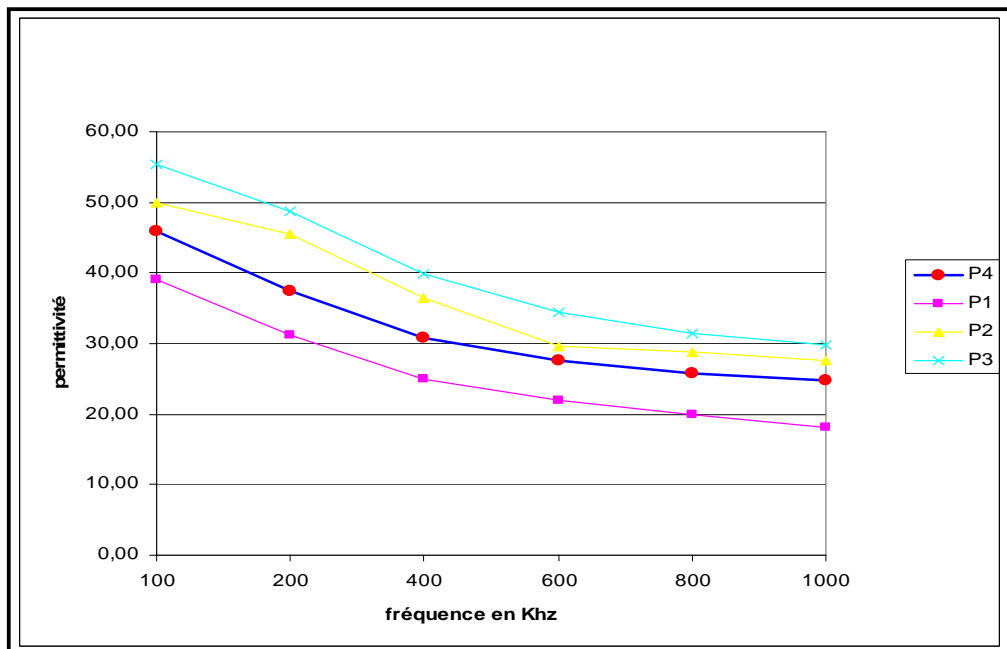


**Figure 5:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'eau à 800 kHz

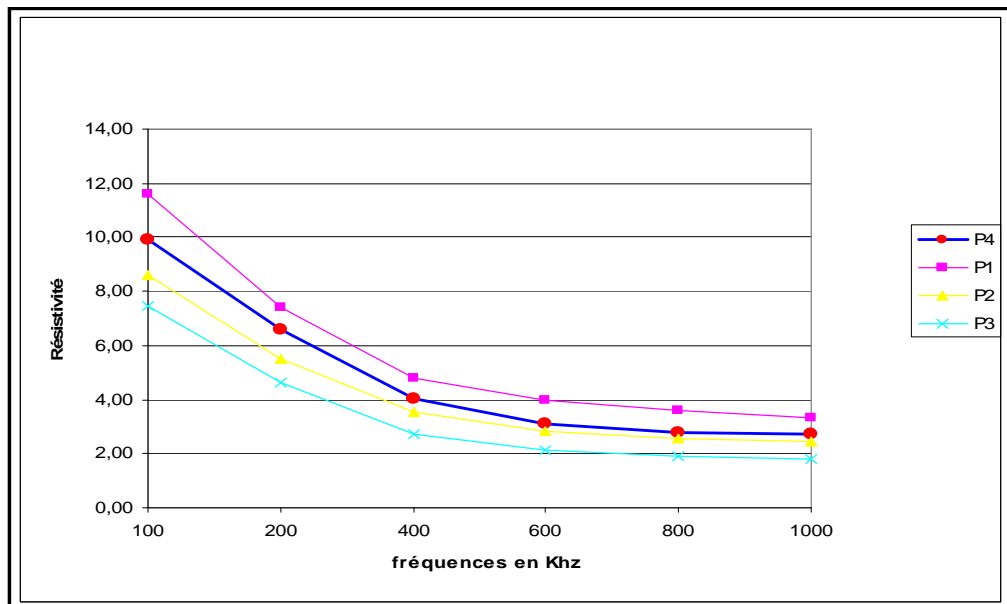


**Figure 6:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'eau à 1000 kHz.

Notons que la constante diélectrique et la résistivité effectives diminuent avec l'augmentation de la fréquence (Figures 7 et 8). Pour une concentration d'inclusions donnée, l'effet de la fréquence est plus marqué à basse fréquence.



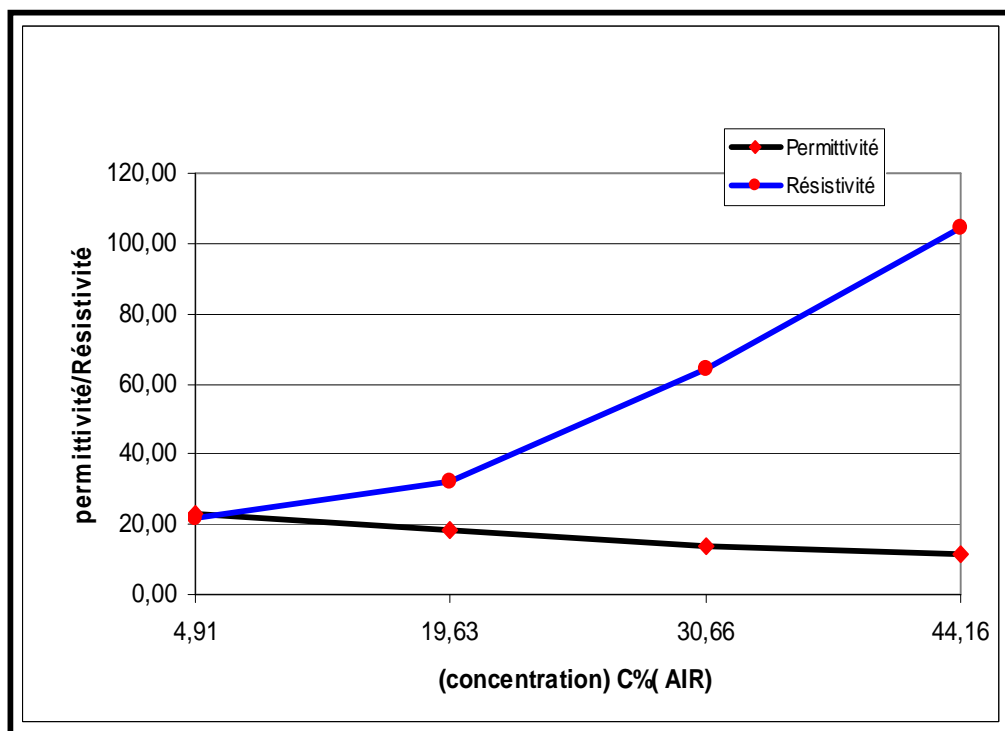
**Figure 7:** Variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (fr) avec des inclusions remplies d'eau



**Figure 8:** Variation de la résistivité en fonction de la fréquence (fr) avec des inclusions remplies d'eau

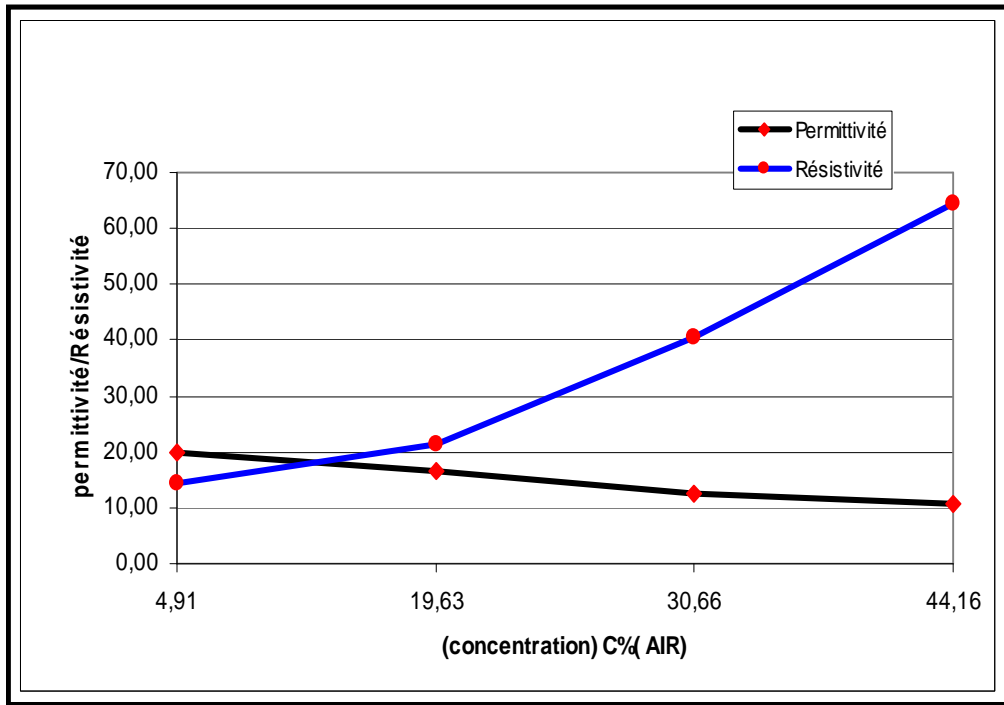
## IV.2.2. Influence des cavités d'air sur la constante diélectrique et la résistivité de la pâte de ciment

La mise en évidence de cavités et de leur volume apparent (total) peut se faire à travers la mesure de la constante diélectrique et de la résistivité effective. Contrairement au cas précédent où les inclusions étaient constituées d'eau, la constante diélectrique effective de la pâte de ciment contenant des cavités (inclusions remplies d'air), diminue lorsque la concentration (volume) d'air augmente vu que la constante diélectrique de l'air est beaucoup plus faible que celle de la pâte de ciment, quelle que soit la fréquence (Figures 9 à 14). D'autre part, l'air étant un très bon isolant, sa résistivité est très élevée par rapport à celle de la pâte de ciment. La résistivité de l'hétérostructure augmente avec la concentration d'air comme le montre les figures 9 et 14.

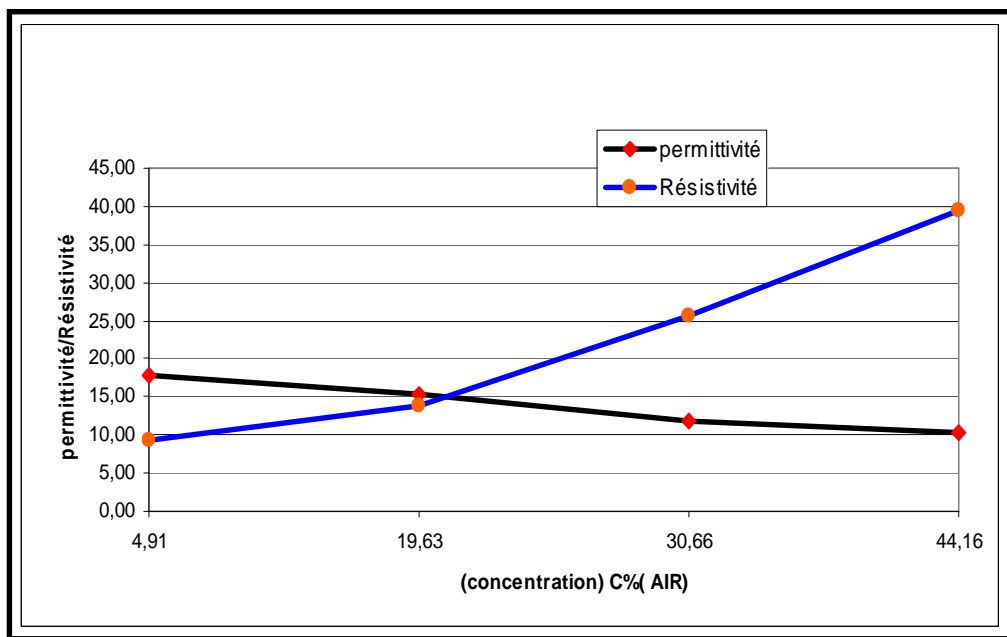


**Figure 9:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'air à 100kHz

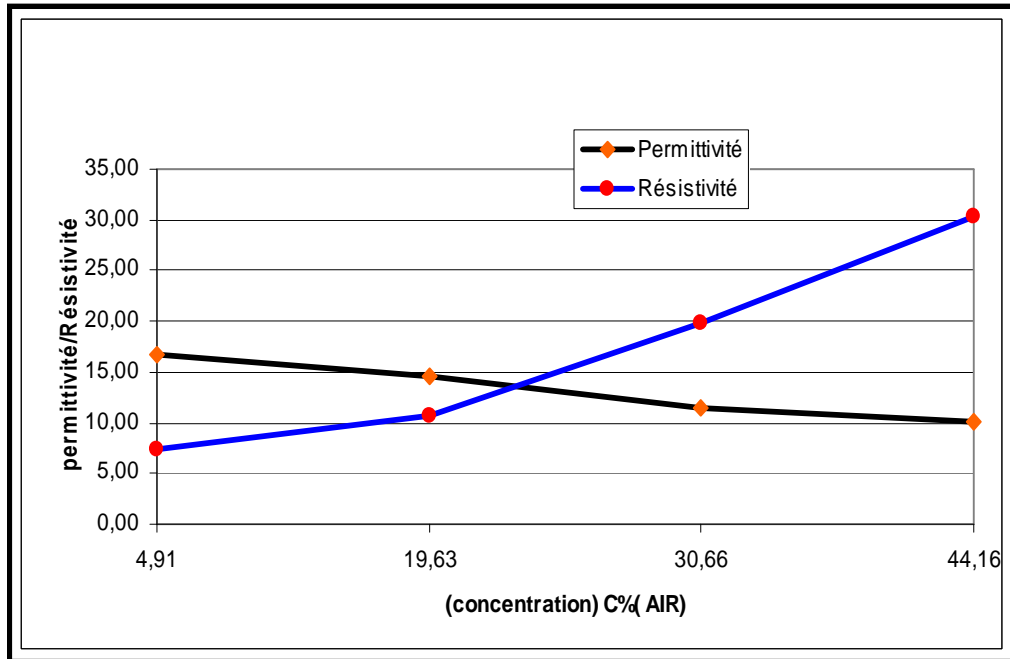




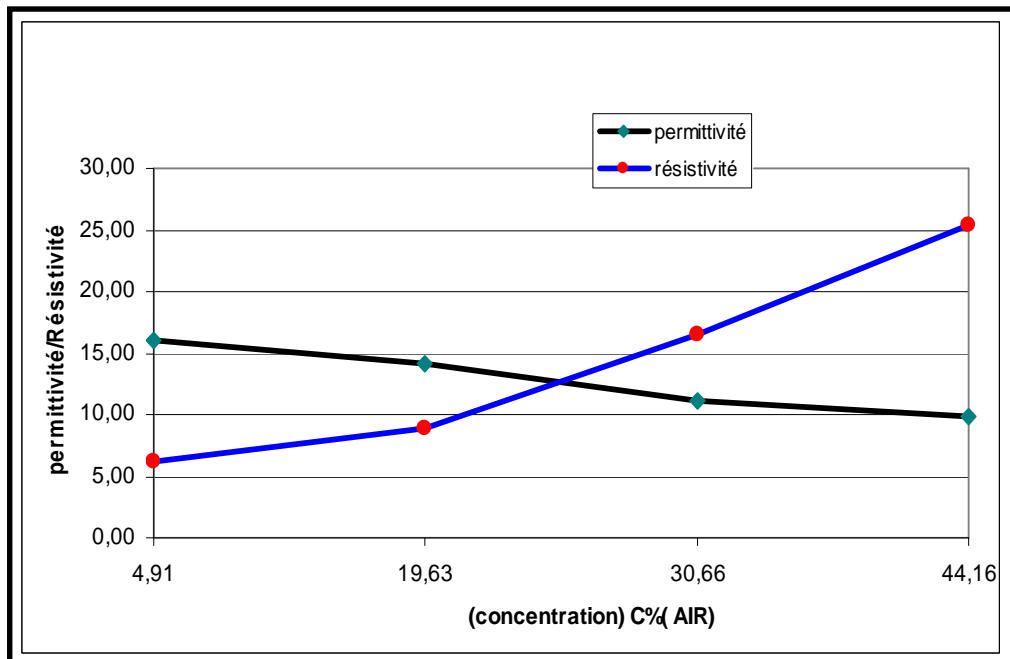
**Figure 10:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'air à 200kHz



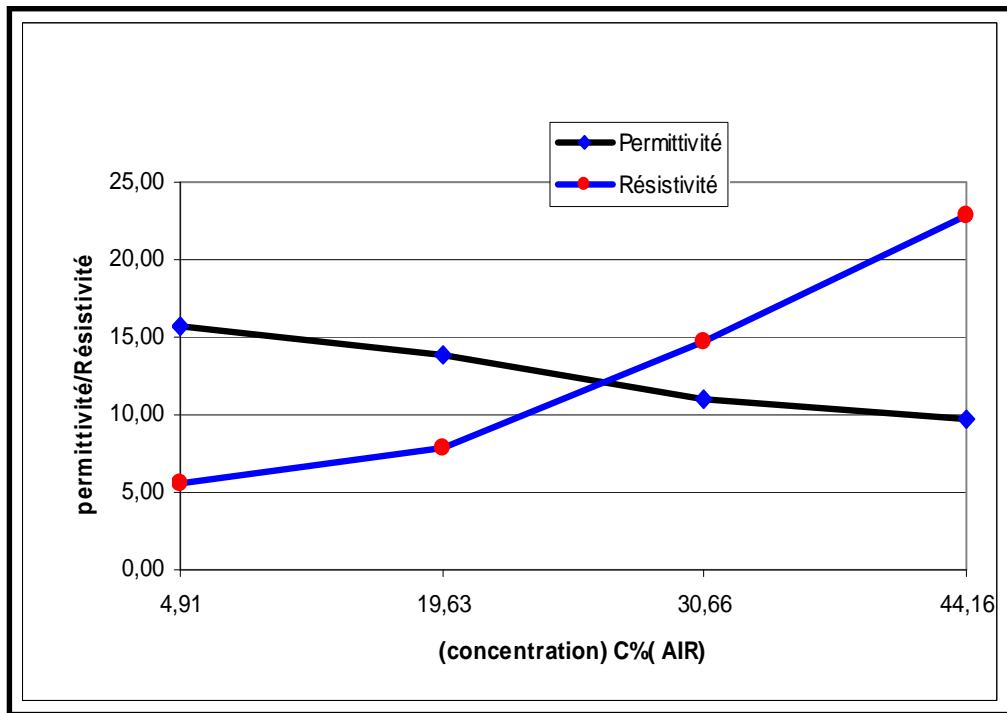
**Figure 11:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'air à 400kHz



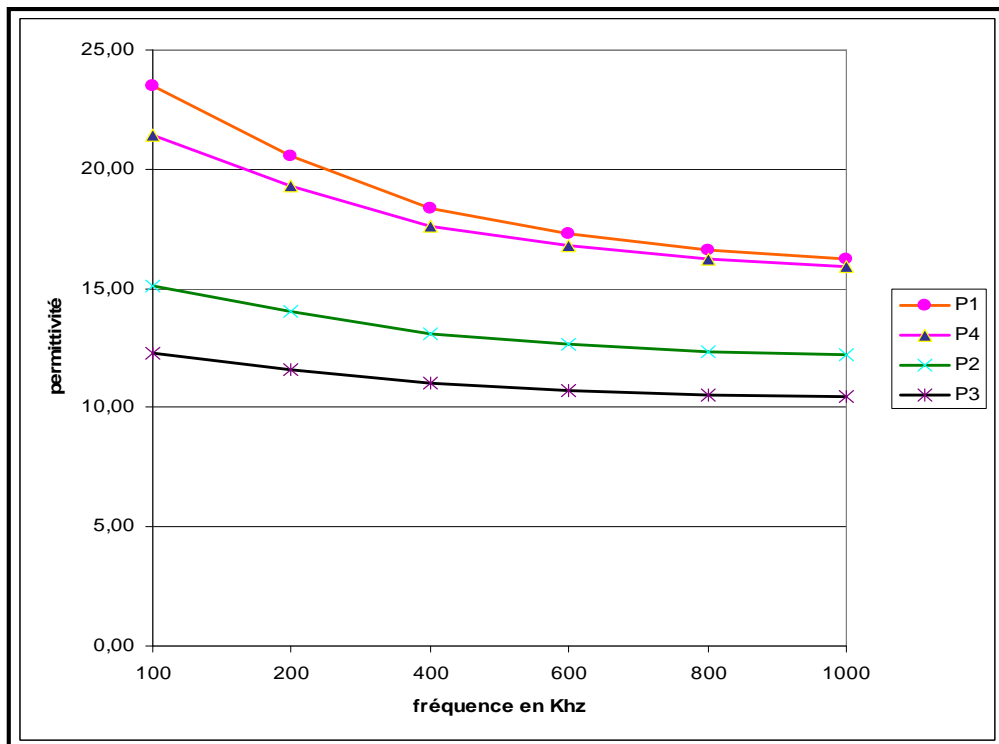
**Figure 12:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'air à 600kHz



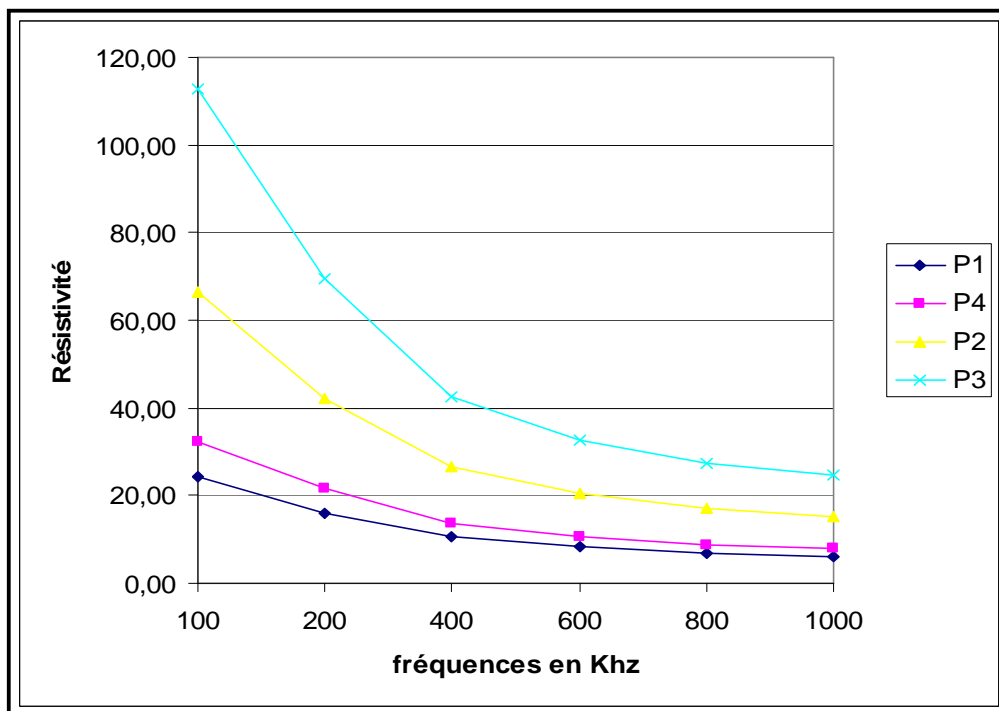
**Figure 13:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'air à 800kHz



**Figure 14:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'air à 800kHz



**Figure 15:** Variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (fr) avec des inclusions remplies d'air



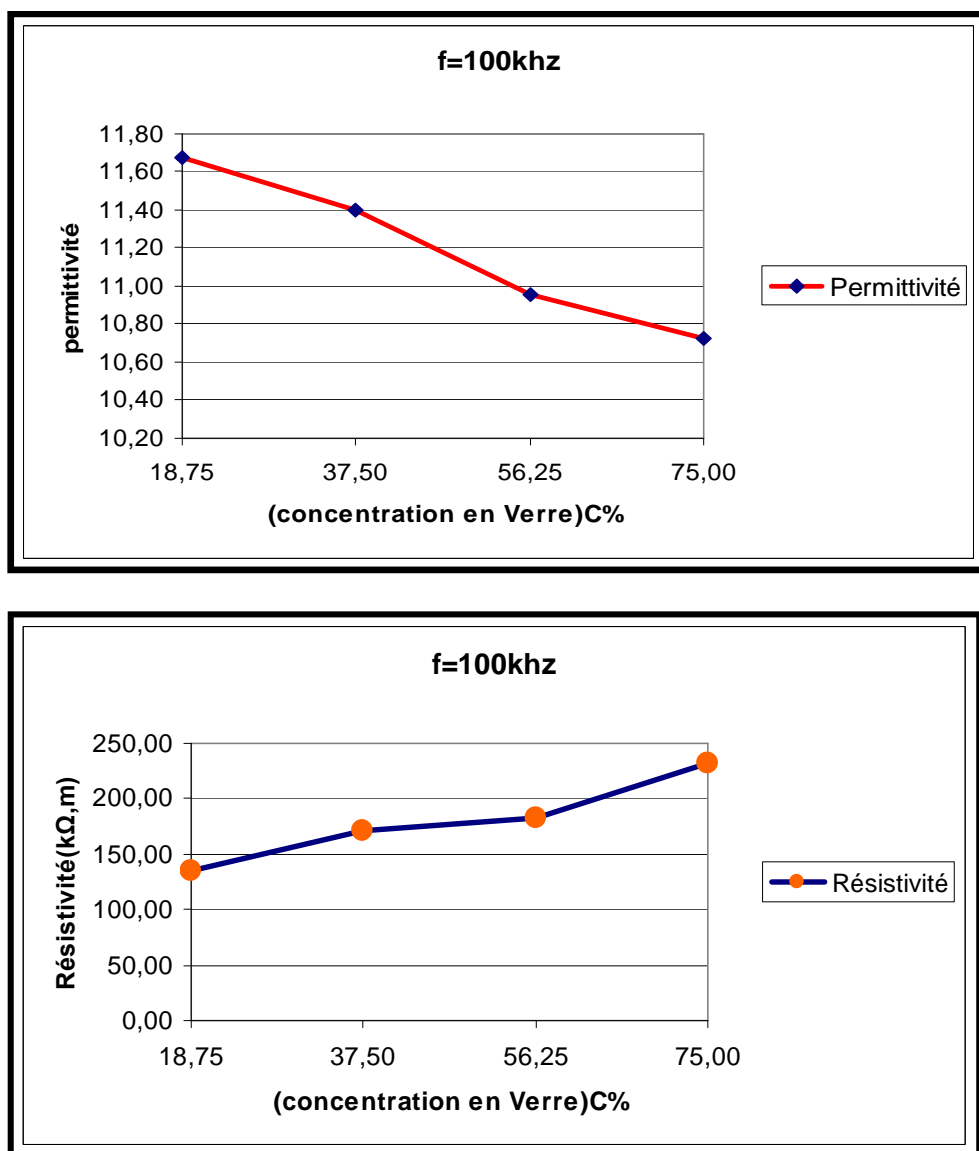
**Figure 16:** Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (fr) avec des inclusions remplies d'air

Comme dans le cas des inclusions d'eau, la constante diélectrique et la résistance effective du composite (matrice constituée de la pâte de ciment avec des cavités d'air comme inclusions) diminuent lorsque la fréquence augmente. L'effet est aussi très prononcé à basse fréquence.

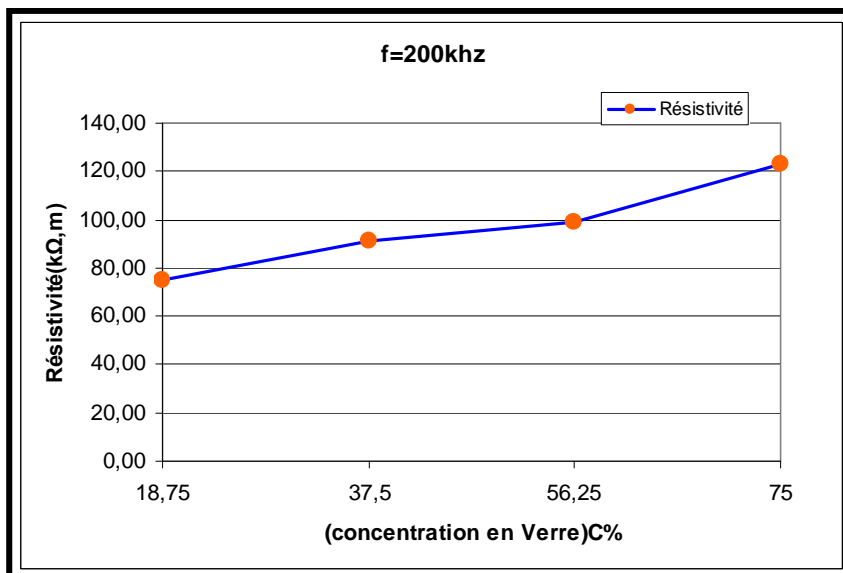
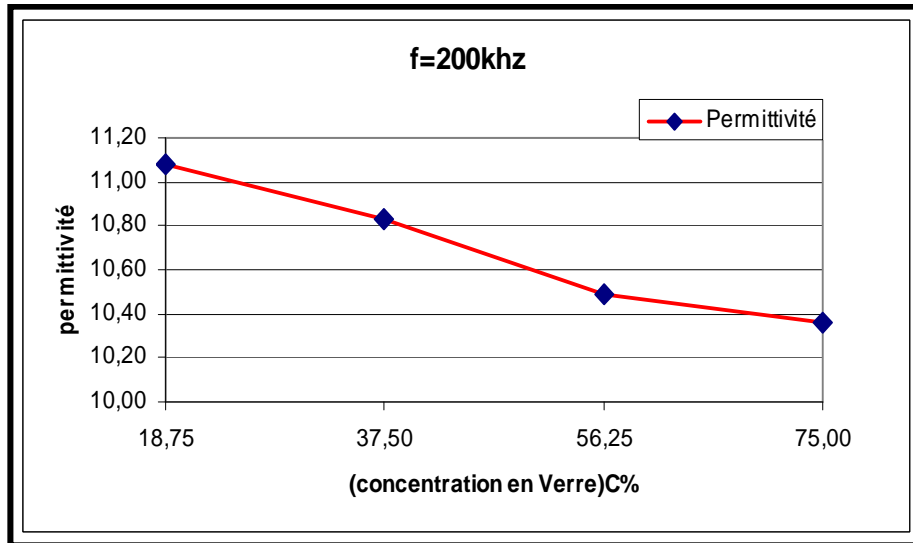
Il ressort des résultats présentés ci-dessus que la mesure de la constante diélectrique complétée par celle de la résistivité en fonction de la fréquence permettent de différencier de manière très claire la présence d'eau (humidité) ou de cavités d'air.

### IV.2.3. Echantillons en pâte de ciment avec des inclusions en verres

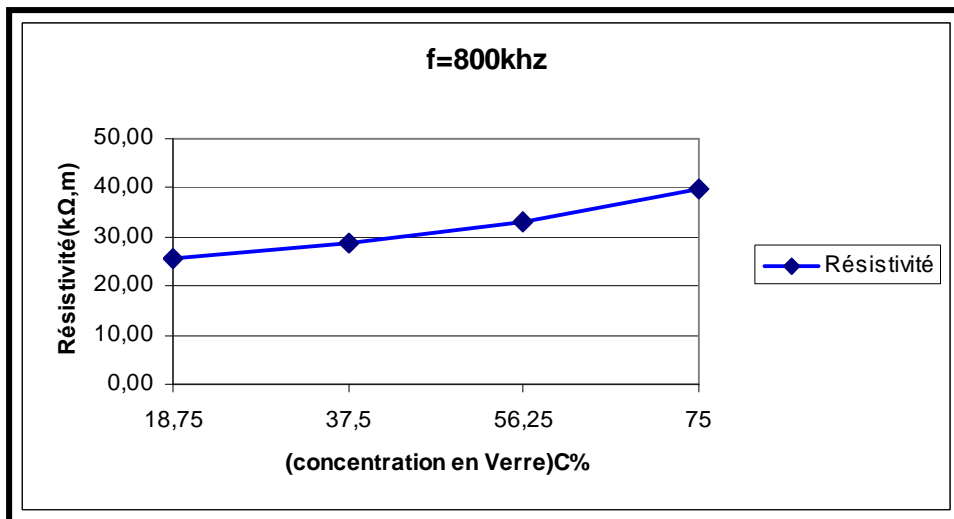
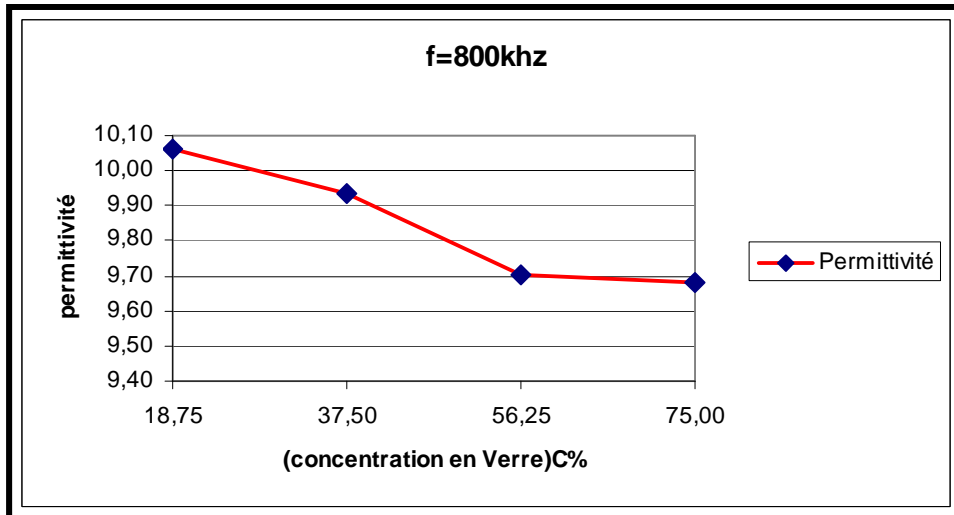
La variation de la constante diélectrique de la pâte de ciment en présence d'inclusions de verre (échantillons V1, V2, V3 et V4: Annexe) montre une diminution de la constante diélectrique effective et une augmentation de la résistivité effective lorsque la concentration en verre augmente (Figure 17 à 19). Cependant, la variation de la constante diélectrique est moins importante que dans les deux cas précédents (inclusions d'eau ou cavités d'air). Ceci est dû au fait que la constante diélectrique du verre est légèrement inférieure à celle de la pâte de ciment. La variation de la résistivité est par contre très significative du fait que la résistivité du verre est beaucoup plus importante que celle de la pâte de ciment.



**Figure 17:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en verre à 100 kHz

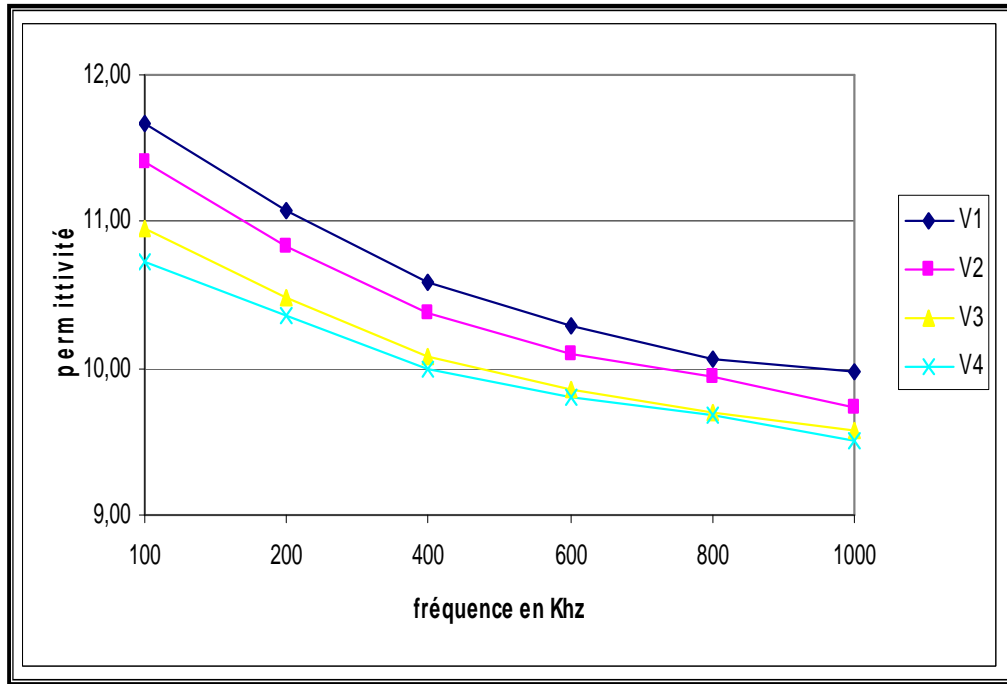


**Figure 18:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en verre à 200 kHz

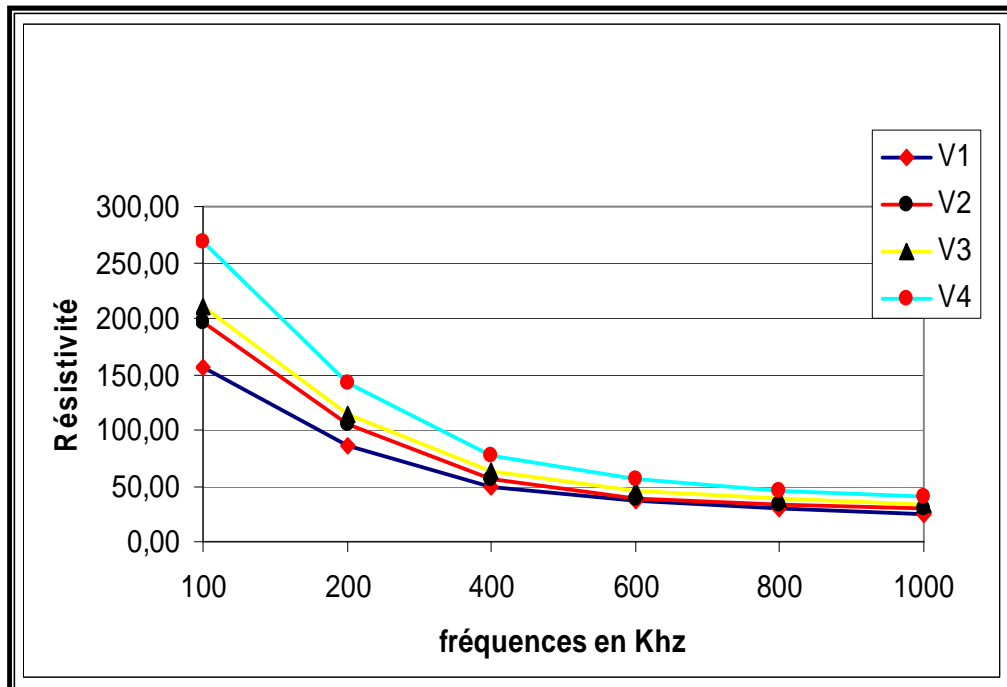


**Figure 19:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en verre à 800 kHz

L'effet de la fréquence est beaucoup plus marqué à basse fréquence (Figure 20). La variation est beaucoup plus importante sur la caractéristique de la résistivité effective (Figure 21).



**Figure 20:** Variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (fr) pour des inclusions en verre

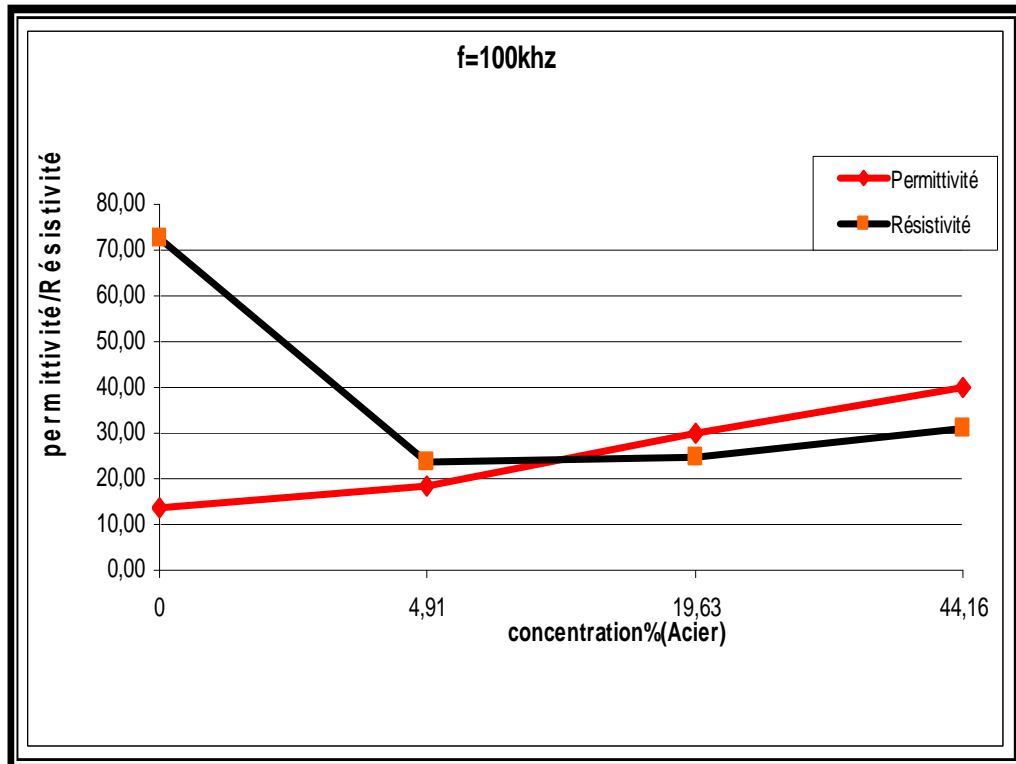


**Figure 21:** Variation de la résistivité effective en fonction de la fréquence (fr) pour des inclusions en verre

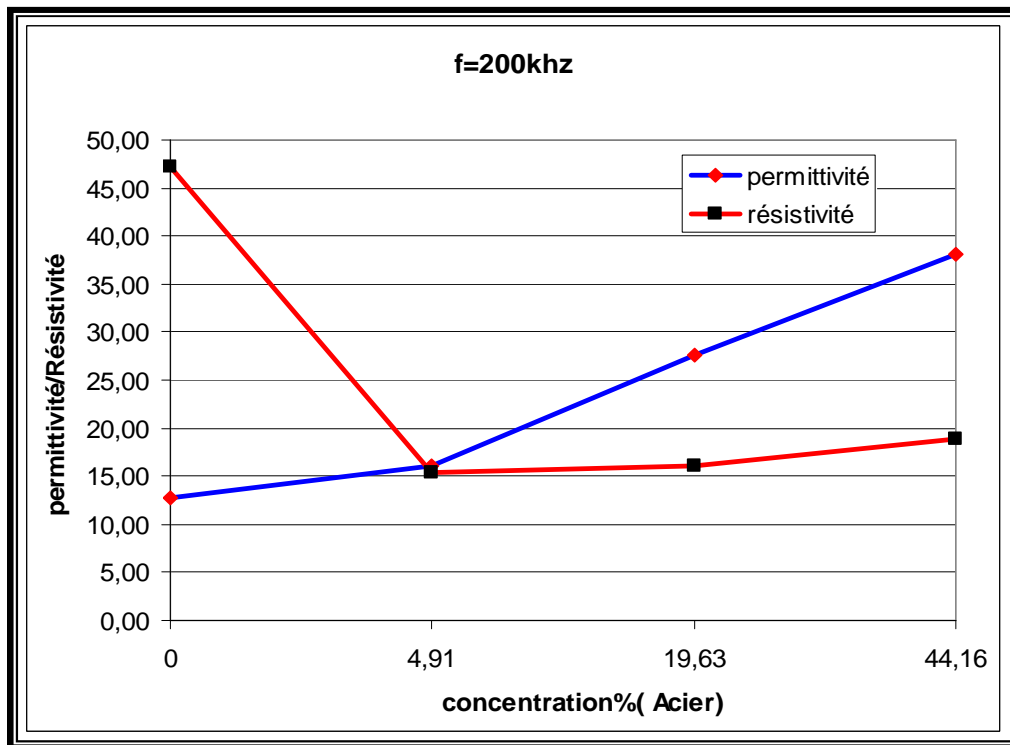


#### IV.2.4. Echantillons en pâte de ciment avec des inclusions en acier

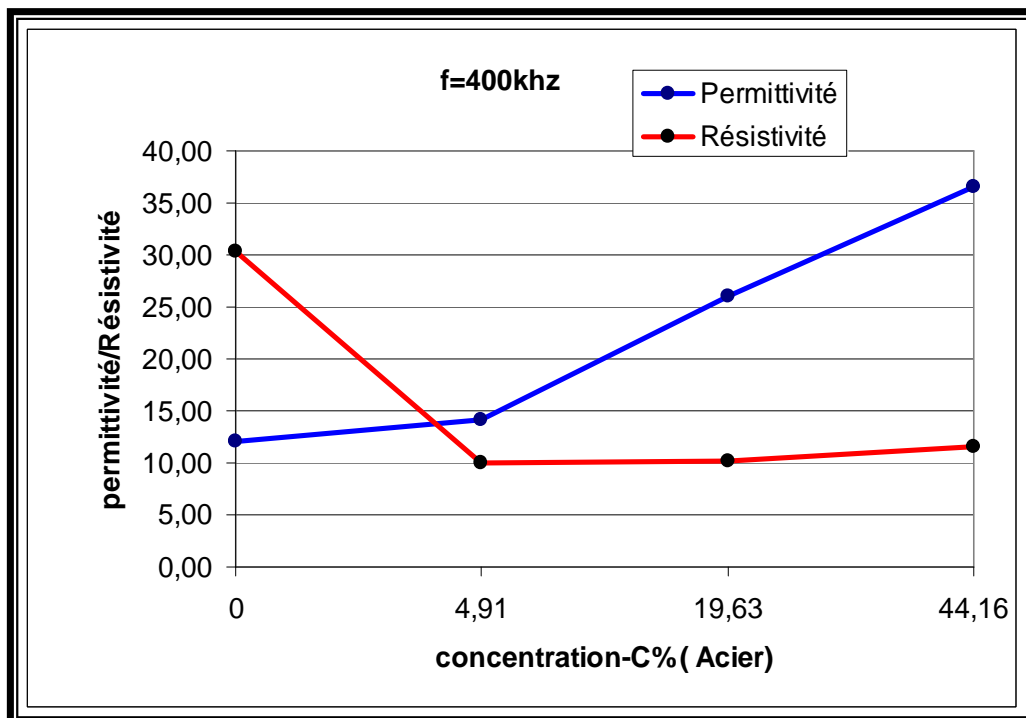
Les Figures 22 à 27 montrent une augmentation de la constante effective de l'hétérostructure et une réduction de la résistivité effective lorsque la concentration d'acier augmente. Ceci est dû au fait que l'acier a une constante plus importante que celle de la pâte de ciment.



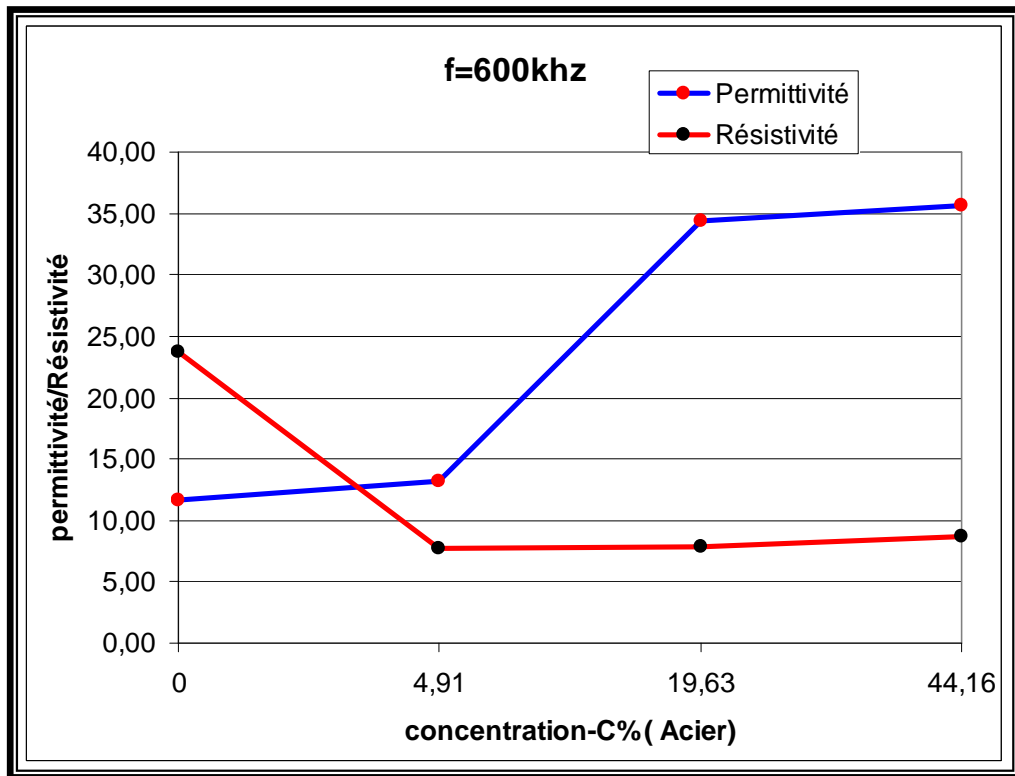
**Figure 22:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en acier à 100 kHz



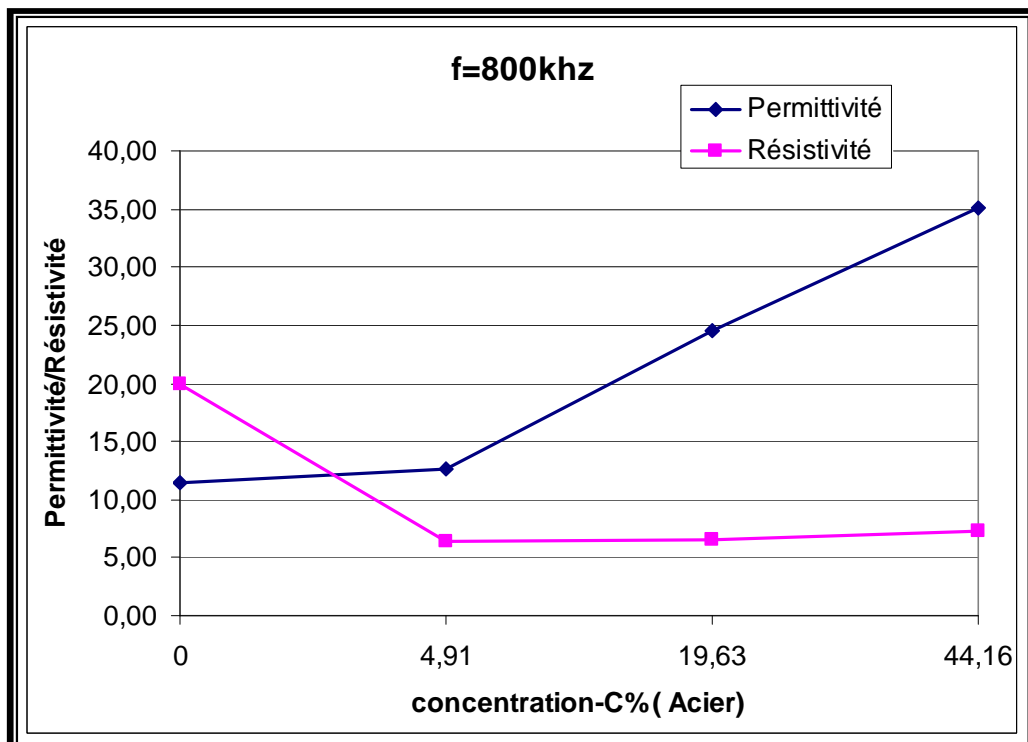
**Figure 23:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en acier à 200 kHz



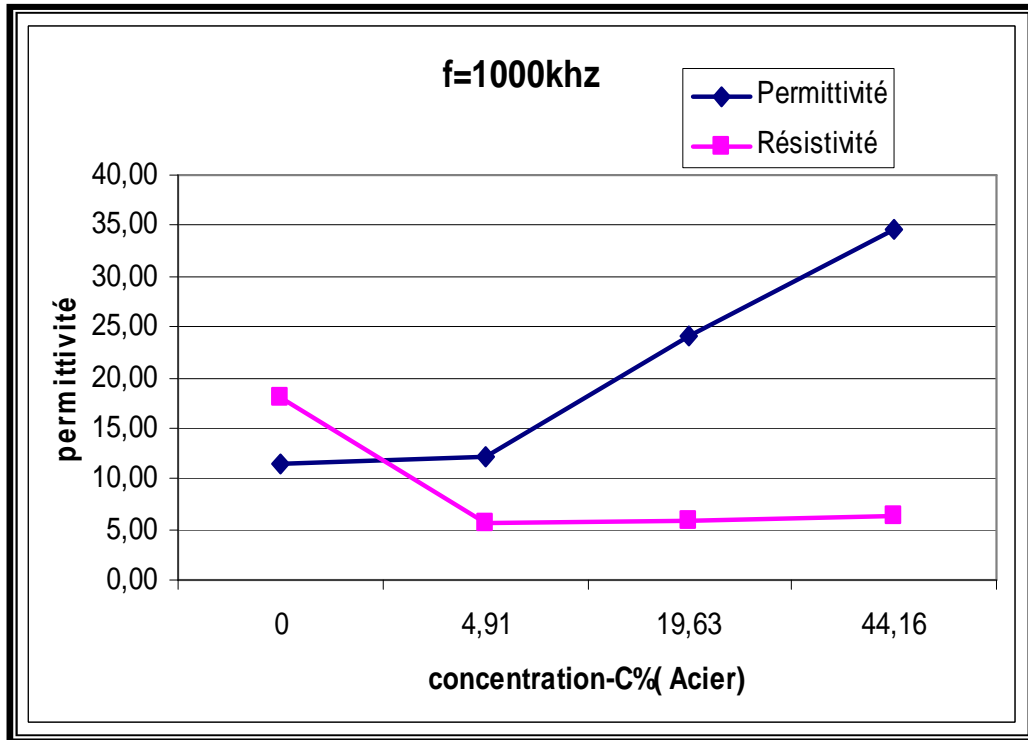
**Figure 24:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en acier à 400 kHz



**Figure 25:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en acier à 600 kHz

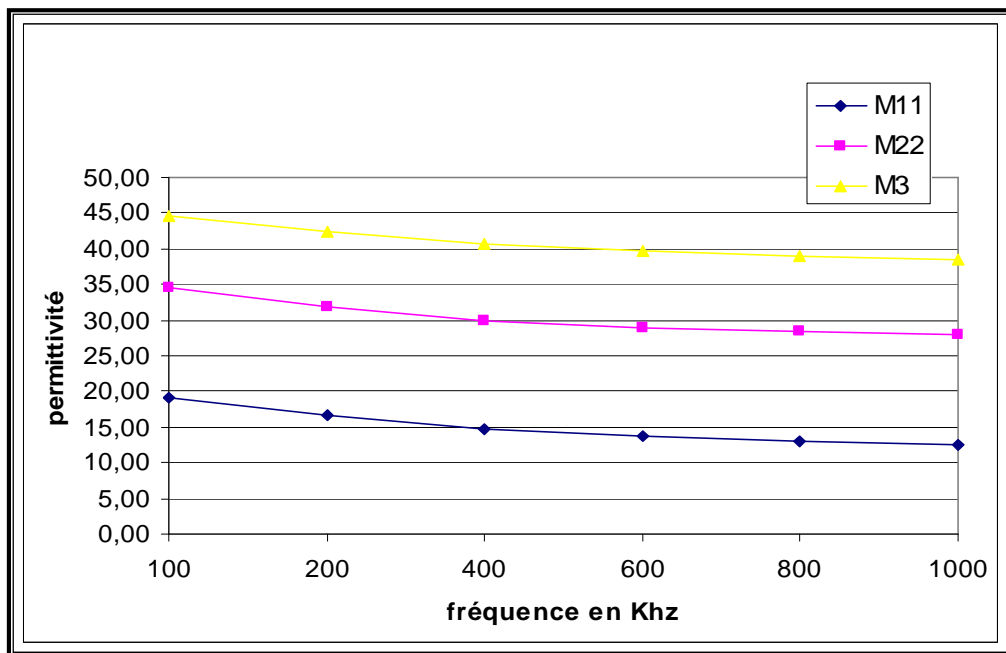


**Figure 26:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en acier à 800 kHz

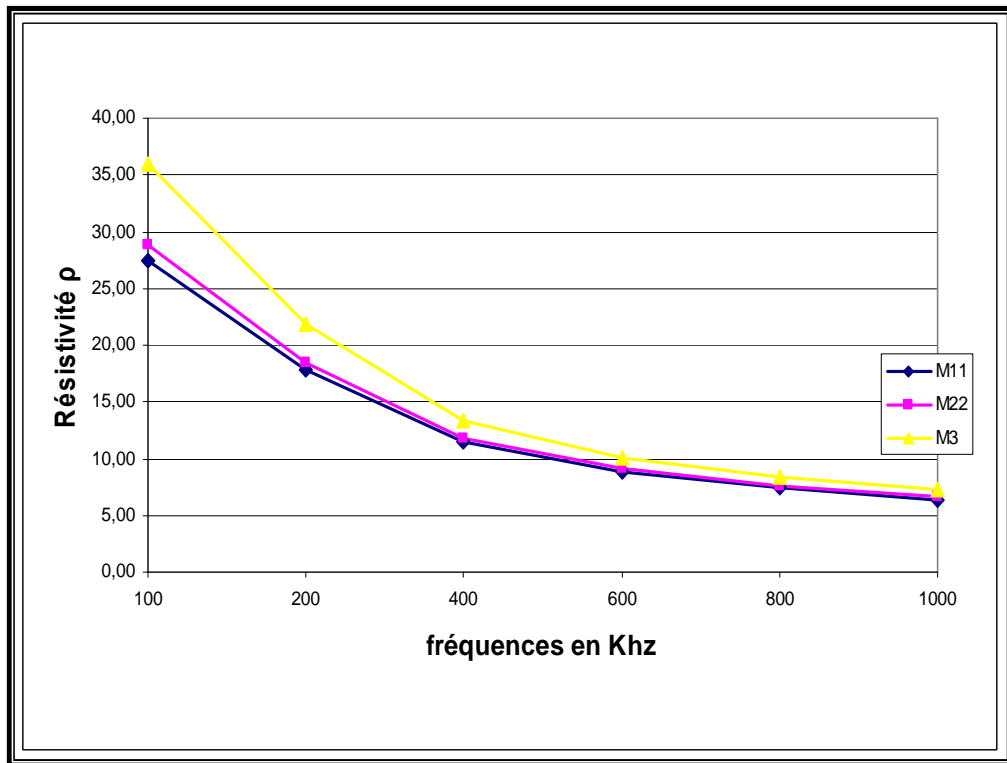


**Figure 27:** Variation de la permittivité/résistivité effectives en fonction de la concentration C% d'inclusions en acier à 1000 kHz

La variation de la constante diélectrique en fonction de la fréquence est également moins importante que dans le cas des inclusions d'eau (humidité) ou de cavités (inclusions d'air) (Figure 28).



**Figure 28:** Variation de la permittivité effective en fonction de la fréquence (fr) pour des inclusions en acier



**Figure 29:** Variation de la résistivité effective en fonction de la fréquence (fr) pour des inclusions en acier

### **IV.3. Conclusion**

Il ressort de cette étude expérimentale sur une pâte de ciment avec différents types d'inclusion (eau, air, verre et acier) que les caractéristiques donnant la constante diélectrique et la résistivité diélectrique effectives des hétérostructures constituent des outils de grande importance pour différencier le type d'inclusions connaissant la matrice mère. Il est possible, grâce à ces caractéristiques, de suivre l'humidification ou le séchage de la pâte de ciment. Ce résultat peut être appliqué à tout autre type de matériaux (argile ...). Il est également possible de distinguer entre les différents types d'inclusions ( eau , acier...).

Notons également que pour toutes les structures étudiées, il existe une corrélation entre la constante diélectrique et la résistivité effective : quand la constante diélectrique augmente, la résistivité diminue et vis versa.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans cette étude, nous avons montré que la permittivité diélectrique (ou constante diélectrique) et la résistivité électrique effectives d'un matériau composite dépendent des permittivités diélectriques et des résistivités des matériaux constituants et de leurs fractions volumiques. Pour cela, nous avons réalisé des échantillons de matériaux composites modèles à deux phases en prenant comme matériau hôte la pâte de ciment, matériau largement utilisé en génie civil. Les inclusions que nous avons utilisées sont des cavités de forme cylindrique remplies d'eau ou d'air, et des inclusions solides également de forme cylindrique de verre ou d'acier. La forme de la matrice considérée est de forme cubique.

Nous avons montré à travers cette étude expérimentale que les deux caractéristiques : donnant la constante diélectrique et la résistivité électrique effectives des hétérostructures constituent des outils de grande importance pour différencier le type d'inclusions connaissant la matrice mère. En effet, les caractéristiques de la constante diélectrique et de la résistivité électrique évoluent en fonction de la concentration volumique des inclusions et de leur nature. Ainsi, il est possible, grâce à ces caractéristiques, de suivre l'humidification ou le séchage de la pâte de ciment, de faire la distinction entre des inclusions d'eau et d'acier. Ce résultat peut être appliqué à tout autre type de matériaux (argile ...). Pour toutes les structures étudiées, il existe une corrélation entre la constante diélectrique et la résistivité effectives : quand la constante diélectrique augmente, la résistivité diminue et vis versa.

Cette méthode de caractérisation peut être étendue à d'autres applications comme le suivi des dépôts ou des variations des épaisseurs de dépôts dans les lits de rivière ou autres plans d'eau, la présence de poches d'air ou de gaz dans un sol, la prospection pétrolifère ou gazière ...



Même si ces méthodes macroscopiques ne permettent pas de déterminer la forme et les dimensions des inclusions contenues dans une matrice mère, elles permettent de prédire le type et le volume total apparent des inclusions, ce qui est d'une importance capitale pour le contrôle non destructif des hétérostructures.

En perspective, nous comptons poursuivre cette étude pour l'étendre à d'autres matériaux et en considérant des matériaux composites avec un nombre d'inclusions important.

# **ANNEXES**

P1,P2,P3,P4: échantillons testés. (en pâte de ciment)

V1,V2,V3,V4:échantillons en pâte de ciment avec inclusions en verres testés

M11,M22,M3:échantillons en pâte de ciment avec inclusions en aciers testés

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

	fréq(khz)	100	200	400	600	800	1000
P1(Ø=1cm) (air)	Cp(Pf)	11,08	9,71	8,66	8,17	7,85	7,66
	Rp(kΩ)	396,66	259,77	170,14	133,61	112,72	99,90
P4(Ø=2cm) (air)	Cp(Pf)	10,10	9,10	8,31	7,92	7,66	7,51
	Rp(kΩ)	527,03	349,79	223,74	173,36	144,78	127,56
P2(Ø=2,5cm) (air)	Cp(Pf)	7,12	6,61	6,18	5,97	5,83	5,76
	Rp(kΩ)	1081,00	684,55	431,11	334,20	279,82	249,43
P3(Ø=3cm) (air)	Cp(Pf)	5,79	5,48	5,20	5,07	4,97	4,93
	Rp(kΩ)	1830,40	1127,50	691,42	532,12	444,51	400,52

Valeurs mesurées de Cp, et Rp des échantillons pleins et avec inclusion (eau)

	fréq(khz)	100	200	400	600	800	1000
P1(Ø=1cm) (eau)	Cp(Pf)	21,28	17,05	13,63	11,95	10,83	9,86
	Rp(kΩ)	188,43	120,36	78,02	64,92	58,29	54,24
P4(Ø=2cm) (eau)	Cp(Pf)	24,95	20,42	16,78	15,03	14,07	13,46
	Rp(kΩ)	160,79	107,03	65,11	50,88	45,39	43,92
P2(Ø=2,5cm) (eau)	Cp(Pf)	27,24	24,78	19,83	16,08	15,66	15,01
	Rp(kΩ)	139,51	89,25	57,52	45,81	41,59	39,45
P3(Ø=3cm) (eau)	Cp(Pf)	30,16	26,55	21,73	18,76	17,06	16,22
	Rp(kΩ)	121,00	75,04	44,47	34,16	31,09	29,45

## Variation de la permittivité/résistivité en fonction de la concentration C% (différentes fréquences) [Cas de la concentration en eau]

valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	21,28	8,85	16,00	2,90	48,83	43,58	4,91
P4	24,95	8,85	16,00	2,60	54,46	45,81	19,63
P2	27,24	8,85	16,00	2,70	52,44	51,94	30,66
P3	30,16	8,85	16,00	2,80	50,57	59,64	44,16

valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	188,43	16	2,9	10,40	4,91
P4	160,79	16	2,6	9,89	19,63
P2	139,51	16	2,7	8,27	30,66
P3	121,00	16	2,8	6,91	44,16

valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	17,05	8,85	16,00	2,90	48,83	34,92	4,91
P4	20,42	8,85	16,00	2,60	54,46	37,49	19,63
P2	24,78	8,85	16,00	2,70	52,44	47,25	30,66
P3	26,55	8,85	16,00	2,80	50,57	52,50	44,16

valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =200Khz

F=200 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	120,36	16	2,9	6,64	4,91
P4	107,03	16	2,6	6,59	19,63
P2	89,25	16	2,7	5,29	30,66
P3	75,04	16	2,8	4,29	44,16

valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =400Khz

f=400khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	13,63	8,85	16,00	2,90	48,83	27,91	4,91
P4	16,78	8,85	16,00	2,60	54,46	30,81	19,63
P2	19,83	8,85	16,00	2,70	52,44	37,81	30,66
P3	21,73	8,85	16,00	2,80	50,57	42,97	44,16

Valeur des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =400Khz

f=400 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ m)	C %
P1	78,02	16	2,9	4,30	4,91
P4	65,11	16	2,6	4,01	19,63
P2	57,52	16	2,7	3,41	30,66
P3	44,47	16	2,8	2,54	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =600Khz

f=600khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	11,95	8,85	16,00	2,90	48,83	24,47	4,91
P4	15,03	8,85	16,00	2,60	54,46	27,60	19,63
P2	16,08	8,85	16,00	2,70	52,44	30,66	30,66
P3	18,76	8,85	16,00	2,80	50,57	37,10	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =600Khz

f=600khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	64,92	16	2,9	3,58	4,91
P4	50,88	16	2,6	3,13	19,63
P2	45,81	16	2,7	2,71	30,66
P3	34,16	16	2,8	1,95	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	10,83	8,85	16,00	2,90	48,83	22,18	4,91
P4	14,07	8,85	16,00	2,60	54,46	25,83	19,63
P2	15,66	8,85	16,00	2,70	52,44	29,86	30,66
P3	31,09	8,85	16,00	2,80	50,57	61,48	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =800Khz

F=800 Khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ , m)	C %
P1	58,29	16	2,9	3,22	4,91
P4	45,39	16	2,6	2,79	19,63
P2	41,59	16	2,7	2,46	30,66
P3	31,09	16	2,8	1,78	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =1000Khz

f=1000khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	9,86	8,85	16,00	2,90	48,83	20,19	4,91
P4	13,46	8,85	16,00	2,60	54,46	24,71	19,63
P2	15,01	8,85	16,00	2,70	52,44	28,62	30,66
P3	16,22	8,85	16,00	2,80	50,57	32,07	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =1000Khz

f=1000 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	54,24	16	2,9	2,99	4,91
P4	43,92	16	2,6	2,70	19,63
P2	39,45	16	2,7	2,34	30,66
P3	29,45	16	2,8	1,68	44,16

### Variation de la permittivité/résistivité en fonction de la concentration C% (différentes fréquences) [Cas de la concentration en Air]

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	11,08	8,85	16,00	2,90	48,83	22,69	4,91
P4	10,10	8,85	16,00	2,60	54,46	18,55	19,63
P2	7,12	8,85	16,00	2,70	52,44	13,58	30,66
P3	5,79	8,85	16,00	2,80	50,57	11,45	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	396,66	16	2,9	21,88	4,91
P4	527,03	16	2,6	32,43	19,63
P2	1081,00	16	2,7	64,06	30,66
P3	1830,40	16	2,8	104,59	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	9,71	8,85	16,00	2,90	48,83	19,89	4,91
P4	9,10	8,85	16,00	2,60	54,46	16,71	19,63
P2	6,61	8,85	16,00	2,70	52,44	12,60	30,66
P3	5,48	8,85	16,00	2,80	50,57	10,84	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	259,77	16	2,9	14,33	4,91
P4	349,79	16	2,6	21,53	19,63
P2	684,55	16	2,7	40,57	30,66
P3	1127,50	16	2,8	64,43	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =400Khz

f=400khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	8,66	8,85	16,00	2,90	48,83	17,74	4,91
P4	8,31	8,85	16,00	2,60	54,46	15,26	19,63
P2	6,18	8,85	16,00	2,70	52,44	11,78	30,66
P3	5,20	8,85	16,00	2,80	50,57	10,28	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =400Khz

f=400 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	170,14	16	2,9	9,39	4,91
P4	223,74	16	2,6	13,77	19,63
P2	431,11	16	2,7	25,55	30,66
P3	691,42	16	2,8	39,51	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =600Khz

f=600khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	8,17	8,85	16,00	2,90	48,83	16,73	4,91
P4	7,92	8,85	16,00	2,60	54,46	14,54	19,63
P2	5,97	8,85	16,00	2,70	52,44	11,38	30,66
P3	5,07	8,85	16,00	2,80	50,57	10,03	44,16



Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =600Khz

f=600khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C%
P1	133,61	16	2,9	7,37	4,91
P4	173,36	16	2,6	10,67	19,63
P2	334,20	16	2,7	19,80	30,66
P3	532,12	16	2,8	30,41	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	7,85	8,85	16,00	2,90	48,83	16,08	4,91
P4	7,66	8,85	16,00	2,60	54,46	14,06	19,63
P2	5,83	8,85	16,00	2,70	52,44	11,12	30,66
P3	4,97	8,85	16,00	2,80	50,57	9,83	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C%
P1	112,72	16	2,9	6,22	4,91
P4	144,78	16	2,6	8,91	19,63
P2	279,82	16	2,7	16,58	30,66
P3	444,51	16	2,8	25,40	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =1000Khz

f=1000khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
P1	7,66	8,85	16,00	2,90	48,83	15,69	4,91
P4	7,51	8,85	16,00	2,60	54,46	13,79	19,63
P2	5,76	8,85	16,00	2,70	52,44	10,98	30,66
P3	4,93	8,85	16,00	2,80	50,57	9,75	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =1000Khz

F=1000 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
P1	99,90	16	2,9	5,51	4,91
P4	127,56	16	2,6	7,85	19,63
P2	249,43	16	2,7	14,78	30,66
P3	400,52	16	2,8	22,89	44,16

**Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (fr) -inclusion=Air-**

P1: échantillon avec inclusion en air

Cp	$\epsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
11,08	8,85	16,00	3,00	47,20	23,47	100
9,71	8,85	16,00	3,00	47,20	20,57	200
8,66	8,85	16,00	3,00	47,20	18,35	400
8,17	8,85	16,00	3,00	47,20	17,31	600
7,85	8,85	16,00	3,00	47,20	16,63	800
7,66	8,85	16,00	3,00	47,20	16,23	1000

P4: échantillon avec inclusion en air

Cp	$\epsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
10,10	8,85	16,00	3,00	47,20	21,40	100
9,10	8,85	16,00	3,00	47,20	19,28	200
8,31	8,85	16,00	3,00	47,20	17,61	400
7,92	8,85	16,00	3,00	47,20	16,78	600
7,66	8,85	16,00	3,00	47,20	16,23	800
7,51	8,85	16,00	3,00	47,20	15,91	1000

P2: échantillon avec inclusion en air

Cp	$\epsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
7,12	8,85	16,00	3,00	47,20	15,08	100
6,61	8,85	16,00	3,00	47,20	14,00	200
6,18	8,85	16,00	3,00	47,20	13,09	400
5,97	8,85	16,00	3,00	47,20	12,65	600
5,83	8,85	16,00	3,00	47,20	12,35	800
5,76	8,85	16,00	3,00	47,20	12,20	1000

P3: échantillon avec inclusion en air

Cp	$\epsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
5,79	8,85	16,00	3,00	47,20	12,27	100
5,48	8,85	16,00	3,00	47,20	11,61	200
5,20	8,85	16,00	3,00	47,20	11,02	400
5,07	8,85	16,00	3,00	47,20	10,74	600
4,97	8,85	16,00	3,00	47,20	10,53	800
4,93	8,85	16,00	3,00	47,20	10,44	1000

## Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (fr) -inclusion=Eau-

P4-Concentration C=19,63% eau

Cp	$\varepsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
24,95	8,85	16,00	2,60	54,46	45,81	100
20,42	8,85	16,00	2,60	54,46	37,49	200
16,78	8,85	16,00	2,60	54,46	30,81	400
15,03	8,85	16,00	2,60	54,46	27,60	600
14,07	8,85	16,00	2,60	54,46	25,83	800
13,46	8,85	16,00	2,60	54,46	24,71	1000

P1-Concentration C=4,91% eau

Cp	$\varepsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
21,28	8,85	16,00	2,60	54,46	39,07	100
17,05	8,85	16,00	2,60	54,46	31,31	200
13,63	8,85	16,00	2,60	54,46	25,03	400
11,95	8,85	16,00	2,60	54,46	21,94	600
10,83	8,85	16,00	2,60	54,46	19,89	800
9,86	8,85	16,00	2,60	54,46	18,10	1000

P2-Concentration C=30,66% eau

Cp	$\varepsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
27,24	8,85	16,00	2,60	54,46	50,02	100
24,78	8,85	16,00	2,60	54,46	45,50	200
19,83	8,85	16,00	2,60	54,46	36,41	400
16,08	8,85	16,00	2,60	54,46	29,53	600
15,66	8,85	16,00	2,60	54,46	28,75	800
15,01	8,85	16,00	2,60	54,46	27,56	1000

P3-Concentration C=44,16% eau

Cp	$\varepsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
30,16	8,85	16,00	2,60	54,46	55,38	100
26,55	8,85	16,00	2,60	54,46	48,75	200
21,73	8,85	16,00	2,60	54,46	39,90	400
18,76	8,85	16,00	2,60	54,46	34,45	600
17,06	8,85	16,00	2,60	54,46	31,32	800
16,22	8,85	16,00	2,60	54,46	29,78	1000

## Variation de la résistivité $\rho$ en fonction de la fréquence -inclusion=eau-

P4-Concentration C=19,63% eau

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
160,79	16	2,6	9,89	100
107,03	16	2,6	6,59	200
65,11	16	2,6	4,01	400
50,88	16	2,6	3,13	600
45,39	16	2,6	2,79	800
43,92	16	2,6	2,70	1000

P1-Concentration C=4,91% eau

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
188,43	16	2,6	11,60	100
120,36	16	2,6	7,41	200
78,02	16	2,6	4,80	400
64,92	16	2,6	4,00	600
58,29	16	2,6	3,59	800
54,24	16	2,6	3,34	1000

P2-Concentration C=30,66% eau

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
139,51	16	2,6	8,59	100
89,25	16	2,6	5,49	200
57,52	16	2,6	3,54	400
45,81	16	2,6	2,82	600
41,59	16	2,6	2,56	800
39,45	16	2,6	2,43	1000

P3-Concentration C=44,16% eau

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
121,00	16	2,6	7,45	100
75,04	16	2,6	4,62	200
44,47	16	2,6	2,74	400
34,16	16	2,6	2,10	600
31,09	16	2,6	1,91	800
29,45	16	2,6	1,81	1000

## Variation de la résistivité $\rho$ en fonction de la fréquence -inclusion=Air-

P1-Concentration C=4,91% Air

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
396,66	16	2,6	24,41	100
259,77	16	2,6	15,99	200
170,14	16	2,6	10,47	400
133,61	16	2,6	8,22	600
112,72	16	2,6	6,94	800
99,90	16	2,6	6,15	1000

P4-Concentration C=19,63% Air

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
527,03	16	2,6	32,43	100
349,79	16	2,6	21,53	200
223,74	16	2,6	13,77	400
173,36	16	2,6	10,67	600
144,78	16	2,6	8,91	800
127,56	16	2,6	7,85	1000

P2-Concentration C=30,66% Air

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
1081,00	16	2,6	66,52	100
684,55	16	2,6	42,13	200
431,11	16	2,6	26,53	400
334,20	16	2,6	20,57	600
279,82	16	2,6	17,22	800
249,43	16	2,6	15,35	1000

P3-Concentration C=44,16% Air

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
1830,40	16	2,6	112,64	100
1127,50	16	2,6	69,38	200
691,42	16	2,6	42,55	400
532,12	16	2,6	32,75	600
444,51	16	2,6	27,35	800
400,52	16	2,6	24,65	1000

**Valeurs mesurées de Cp, et Rp des échantillons pleins et avec inclusion - acier et verres-**

	fréq(khz)	100	200	400	600	800	1000
V1(Ø=1cm) (Verre)	Cp(Pf)	5,51	5,23	5,00	4,86	4,75	4,71
	Rp(kΩ)	2530,00	1410,00	795,00	584,52	478,23	409,22
V2(Ø=2cm) (Verre)	Cp(Pf)	5,38	5,11	4,90	4,77	4,69	4,59
	Rp(kΩ)	3200,00	1706,00	908,37	615,22	541,51	472,89
V3(Ø=2,5cm) (Verre)	Cp(Pf)	5,17	4,95	4,76	4,65	4,58	4,52
	Rp(kΩ)	3430,00	1860,00	1030,00	755,12	618,25	530,43
V4(Ø=3cm) (Verre)	Cp(Pf)	5,06	4,89	4,72	4,63	4,57	4,49
	Rp(kΩ)	4363,00	2313,00	1268,00	913,19	748,68	642,65
T3 (plein)	Cp(Pf)	6,40	6,00	5,69	5,53	5,43	5,38
	Rp(kΩ)	1366,21	883,83	568,25	444,63	374,83	335,79

	fréq(khz)	100	200	400	600	800	1000
M11(Ø=1cm) (acier)	Cp(Pf)	9,01	7,84	6,91	6,45	6,15	5,94
	Rp(kΩ)	445,85	289,99	186,63	143,95	119,91	104,32
M22(Ø=2cm) (acier)	Cp(Pf)	16,27	15,09	14,16	13,69	13,39	13,16
	Rp(kΩ)	468,22	300,24	191,94	147,96	123,39	107,69
M3(Ø=3cm) (acier)	Cp(Pf)	21,04	20,03	19,18	18,72	18,43	18,21
	Rp(kΩ)	585,00	354,77	217,50	164,44	136,08	118,09
T3 (plein)	Cp(Pf)	6,40	6,00	5,69	5,53	5,43	5,38
	Rp(kΩ)	1366,21	883,83	568,25	444,63	374,83	335,79

**Variation de la permittivité/résistivité en fonction de la concentration C% (différentes fréquences)[Cas de la concentration en VERRE]**

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
V1	5,51	8,85	16,00	3,00	47,20	11,67	18,75
V2	5,38	8,85	16,00	3,00	47,20	11,40	37,50
V3	5,17	8,85	16,00	3,00	47,20	10,95	56,25
V4	5,06	8,85	16,00	3,00	47,20	10,72	75,00

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C%
V1	2530,00	16,00	3,00	134,93	18,75
V2	3200,00	16,00	3,00	170,67	37,50
V3	3430,00	16,00	3,00	182,93	56,25
V4	4363,00	16,00	3,00	232,69	75,00

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
V1	5,23	8,85	16,00	3,00	47,20	11,08	18,75
V2	5,11	8,85	16,00	3,00	47,20	10,83	37,50
V3	4,95	8,85	16,00	3,00	47,20	10,49	56,25
V4	4,89	8,85	16,00	3,00	47,20	10,36	75,00

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	c%
V1	1410,00	16	3	75,20	18,75
V2	1706,00	16	3	90,99	37,5
V3	1860,00	16	3	99,20	56,25
V4	2313,00	16	3	123,36	75

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
V1	4,75	8,85	16,00	3,00	47,20	10,06	18,75
V2	4,69	8,85	16,00	3,00	47,20	9,94	37,50
V3	4,58	8,85	16,00	3,00	47,20	9,70	56,25
V4	4,57	8,85	16,00	3,00	47,20	9,68	75,00

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	c%
V1	478,23	16,00	3,00	25,51	18,75
V2	541,51	16,00	3,00	28,88	37,5
V3	618,25	16,00	3,00	32,97	56,25
V4	748,68	16,00	3,00	39,93	75

Variation de la permittivité/résistivité en fonction de la concentration C% (différentes fréquences)[Cas de la concentration en ACIER]

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
T3	6,40	8,85	16,00	3,00	47,20	13,56	0
M11	9,01	8,85	16,00	2,90	48,83	18,45	4,91
M22	16,27	8,85	16,00	2,60	54,46	29,87	19,63
M3	21,04	8,85	16,00	2,70	52,44	40,12	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =100Khz

f=100 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
T3	1366,21	16	3	72,86	0
M11	445,85	16	3	23,78	4,91
M22	468,22	16	3	24,97	19,63
M3	585,00	16	3	31,20	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
T3	6,00	8,85	16,00	3,00	47,20	12,71	0
M11	7,84	8,85	16,00	2,90	48,83	16,06	4,91
M22	15,09	8,85	16,00	2,60	54,46	27,71	19,63
M3	20,03	8,85	16,00	2,70	52,44	38,19	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =200Khz

f=200khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
T3	883,83	16	3	47,14	0
M11	289,99	16	3	15,47	4,91
M22	300,24	16	3	16,01	19,63
M3	354,77	16	3	18,92	44,16



Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =400Khz

f=400khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
T3	5,69	8,85	16,00	3,00	47,20	12,06	0
M11	6,91	8,85	16,00	2,90	48,83	14,15	4,91
M22	14,16	8,85	16,00	2,60	54,46	26,00	19,63
M3	19,18	8,85	16,00	2,70	52,44	36,57	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =400Khz

F=400 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
T3	568,25	16	3	30,31	0
M11	186,63	16	3	9,95	4,91
M22	191,94	16	3	10,24	19,63
M3	217,50	16	3	11,60	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =600Khz

f=600khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
T3	5,53	8,85	16,00	3,00	47,20	11,72	0
M11	6,45	8,85	16,00	2,90	48,83	13,21	4,91
M22	18,72	8,85	16,00	2,60	54,46	34,37	19,63
M3	18,72	8,85	16,00	2,70	52,44	35,69	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =600Khz

f=600 khz	R (k $\Omega$ )	S (cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C %
T3	444,63	16	3	23,71	0
M11	143,95	16	3	7,68	4,91
M22	147,96	16	3	7,89	19,63
M3	164,44	16	3	8,77	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	h(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
T3	5,43	8,85	16,00	3,00	47,20	11,50	0
M11	6,15	8,85	16,00	2,90	48,83	12,60	4,91
M22	13,39	8,85	16,00	2,60	54,46	24,59	19,63
M3	18,43	8,85	16,00	2,70	52,44	35,14	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =800Khz

f=800khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C%
T3	374,83	16	3	19,99	0
M11	119,91	16	3	6,40	4,91
M22	123,39	16	3	6,58	19,63
M3	136,08	16	3	7,26	44,16

Valeurs des permittivités  $\epsilon$  calculées pour une fréquence =1000Khz

f=1000khz	Cp(pF)	$\epsilon_0$	S(cm <sup>2</sup> )	H(cm)	C <sub>0</sub> (pF)	$\epsilon$	C%
T3	5,38	8,85	16,00	3,00	47,20	11,40	0
M11	5,94	8,85	16,00	2,90	48,83	12,17	4,91
M22	13,16	8,85	16,00	2,60	54,46	24,16	19,63
M3	18,21	8,85	16,00	2,70	52,44	34,72	44,16

Valeurs des résistivités  $\rho$  calculées pour une fréquence =1000Khz

f=1000khz	R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	C%
T3	335,79	16	3	17,91	0
M11	104,32	16	3	5,56	4,91
M22	107,69	16	3	5,74	19,63
M3	118,09	16	3	6,30	30,66

**Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (fr) -  
inclusion=VERRE-**

V1-Concentration C=18,75% verre

Cp	$\epsilon_0$	S	H	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
5,51	8,85	16,00	3,00	47,20	11,67	100
5,23	8,85	16,00	3,00	47,20	11,08	200
5,00	8,85	16,00	3,00	47,20	10,59	400
4,86	8,85	16,00	3,00	47,20	10,30	600
4,75	8,85	16,00	3,00	47,20	10,06	800
4,71	8,85	16,00	3,00	47,20	9,98	1000

V2-Concentration C=37,50% verre

Cp	$\epsilon_0$	S	H	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
5,38	8,85	16,00	3,00	47,20	11,40	100
5,11	8,85	16,00	3,00	47,20	10,83	200
4,90	8,85	16,00	3,00	47,20	10,38	400
4,77	8,85	16,00	3,00	47,20	10,11	600
4,69	8,85	16,00	3,00	47,20	9,94	800
4,59	8,85	16,00	3,00	47,20	9,72	1000

V3-Concentration C=56,25% verre

Cp	$\epsilon_0$	S	H	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
5,17	8,85	16,00	3,00	47,20	10,95	100
4,95	8,85	16,00	3,00	47,20	10,49	200
4,76	8,85	16,00	3,00	47,20	10,08	400
4,65	8,85	16,00	3,00	47,20	9,85	600
4,58	8,85	16,00	3,00	47,20	9,70	800
4,52	8,85	16,00	3,00	47,20	9,58	1000

V4-Concentration C=75% verre

Cp	$\varepsilon_0$	S	H	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
5,06	8,85	16,00	3,00	47,20	10,72	100
4,89	8,85	16,00	3,00	47,20	10,36	200
4,72	8,85	16,00	3,00	47,20	10,00	400
4,63	8,85	16,00	3,00	47,20	9,81	600
4,57	8,85	16,00	3,00	47,20	9,68	800
4,49	8,85	16,00	3,00	47,20	9,51	1000

Variation de la permittivité en fonction de la fréquence (fr) -inclusion=Acier-

M11-Concentration C=4,91% Acier

Cp	$\varepsilon_0$	S	H	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
9,01	8,85	16,00	3,00	47,20	19,09	100
7,84	8,85	16,00	3,00	47,20	16,61	200
6,91	8,85	16,00	3,00	47,20	14,64	400
6,45	8,85	16,00	3,00	47,20	13,67	600
6,15	8,85	16,00	3,00	47,20	13,03	800
5,94	8,85	16,00	3,00	47,20	12,58	1000

M22-Concentration C=19,63% Acier

Cp	$\varepsilon_0$	S	h	C <sub>0</sub>	$\varepsilon$	f
16,27	8,85	16,00	3,00	47,20	34,47	100
15,09	8,85	16,00	3,00	47,20	31,97	200
14,16	8,85	16,00	3,00	47,20	30,00	400
13,69	8,85	16,00	3,00	47,20	29,00	600
13,39	8,85	16,00	3,00	47,20	28,37	800
13,16	8,85	16,00	3,00	47,20	27,88	1000

M3-Concentration C=30,66% Acier

Cp	$\epsilon_0$	S	H	C <sub>0</sub>	$\epsilon$	f
21,04	8,85	16,00	3,00	47,20	44,58	100
20,03	8,85	16,00	3,00	47,20	42,44	200
19,18	8,85	16,00	3,00	47,20	40,64	400
18,72	8,85	16,00	3,00	47,20	39,66	600
18,43	8,85	16,00	3,00	47,20	39,05	800
18,21	8,85	16,00	3,00	47,20	38,58	1000

**Variation de la résistivité en fonction de la fréquence (fr)-  
inclusion=VERRE-**

V1-Concentration C=18,75% verre

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
2530,00	16	2,6	155,69	100
1410,00	16	2,6	86,77	200
795,00	16	2,6	48,92	400
584,52	16	2,6	35,97	600
478,23	16	2,6	29,43	800
409,22	16	2,6	25,18	1000

V2-Concentration C=37,50% verre

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
3200,00	16	2,6	196,92	100
1706,00	16	2,6	104,98	200
908,37	16	2,6	55,90	400
615,22	16	2,6	37,86	600
541,51	16	2,6	33,32	800
472,89	16	2,6	29,10	1000

V3-Concentration C=56,25% verre

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
3430,00	16	2,6	211,08	100
1860,00	16	2,6	114,46	200
1030,00	16	2,6	63,38	400
755,12	16	2,6	46,47	600
618,25	16	2,6	38,05	800
530,43	16	2,6	32,64	1000

V4-Concentration C=75% verre

R(k $\Omega$ )	S(cm <sup>2</sup> )	H (cm)	$\rho$ (k $\Omega$ ,m)	f(en Khz)
4363,00	16	2,6	268,49	100
2313,00	16	2,6	142,34	200
1268,00	16	2,6	78,03	400
913,19	16	2,6	56,20	600
748,68	16	2,6	46,07	800
642,65	16	2,6	39,55	1000

## **Abstract**

Most of building materials nowadays are composite materials. These materials knew a big success which results from their capacity to be conceived "*à la carte*". Indeed, one can modify their behaviour by acting on the nature and properties of the constituent materials, the geometry of inclusions (shape and dimensions), their concentration, orientation and position within the host material (matrix). However, some problems that can affect their performances can occur during their exploitation leading to the appearance of cracks, cavities, water within these cavities and to the deterioration of reinforcements resulting of various stresses (chemical attack, heating, earthquake, non adequate proportioning ...). Thus it's important to characterise these composite materials at their conception and to follow the evolution of their properties during their exploitation.

This work is aimed at the characterisation of building materials consisting of three dimensions homogeneous matrices (host matrix) and dielectric/conducting inclusions using a non destructive method. This method combines two methods: dielectric and electric. These both methods enable to evaluate the presence of inclusions, their concentration and their nature in a given heterostructure. The samples we considered are of cubic shape; they consist of cement paste containing air cavities, cavities filled with water, steel and glass inclusions. The obtained results are very encouraging and makes the method we developed an interesting tool for building engineering applications.

## **Résumé**

De nos jours la majorité des matériaux de construction sont des matériaux composites. Ces matériaux ont connu un grand succès qui provient de leur aptitude à être conçus « à la carte ». En effet, le concepteur peut en modifier à volonté les comportements en jouant sur la nature des matériaux constituants et leurs propriétés, la géométrie des inclusions (forme et taille), leur concentration et leur disposition dans la matrice. Cependant, des problèmes affectant la performance de ces matériaux peuvent surgir au cours de leur exploitation et de ce fait menacer la sûreté de fonctionnement des structures dont ils font partie. Il s'agit en particulier de l'apparition de fissures, de cavités, d'eau dans ces cavités et de détérioration de renforts résultants de différentes contraintes (agression chimique, échauffement, séisme, mauvais dosage,...). Il est par conséquent important de caractériser ces matériaux lors de leur conception et de suivre l'évolution de leurs propriétés durant leur exploitation.

L'objectif de ce travail est de caractériser des matériaux de construction constitués de matrices homogènes à trois dimensions (matrice hôte) et d'inclusions diélectriques ou conductrices en utilisant une méthode non destructive.

Cette méthode rallie deux méthodes : l'une diélectrique et l'autre électrique.

Il s'agit particulièrement d'évaluer la présence d'inclusions, leurs concentrations et leur nature dans une structure donnée.

Les échantillons considérés sont constitués de pâte de ciment en forme de cubes carrés, contenant des inclusions d'air, d'eau, d'acier ou de verre.

Les résultats obtenus sont très intéressants.

