

Université de Limoges
**ED 609 - Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique,
Énergétique (SIMME)**
Laboratoire de Génie Civil, Diagnostics et Durabilité (GC2D)

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
Génie Civil

Présentée et soutenue par
Minh Dung Pham

Le 11 mars 2022

**Approche Résistive pour l'Evaluation des Champs Hydriques dans
les Matériaux Hygroscopiques**

Thèse dirigée par **Frédéric DUBOIS**

Rapporteurs

Mme. Colette Sirieix, Professeur des Universités, Université de Bordeaux
M. Rachid Bennacer, Professeur des Universités, Université Paris Saclay

Examineurs

Mme. Marianne Perrin, Maître de Conférences, Université Toulouse III
M. Pascal Maillard, Docteur, Centre technique de Matériaux Naturels de
Construction, Limoges
M. Nicolas Angellier, Maître de Conférences, Université de Limoges
M. Frédéric Dubois, Professeur des Universités, Université de Limoges

Invités

M. Laurent Ulmet, Maître de Conférences, Université de Limoges
M. Ngoc Anh Vu, Professeur associé, Ministère de la Construction du Vietnam
M. Tuan Anh Nguyen, Docteur, Université des Transports de Ho Chi Minh-Ville



*Avec du temps et de la patience,
on vient à voir la lumière briller au bout du tunnel.*

Travaux scientifiques

Pham, M.D., Nguyen, T.A., Hafsa, W., Angellier, N., Ulmet, L., Takarli, M., Pop, I.O., and Dubois, F. (2018). Experimental-numerical resistivity measurements approach for characterization in structural timber. *Journal of Transport Science and Technology* 27, 28.

Hafsa, W., Pham, M.D., Angellier, N., Takarli, M., Ulmet, L., Pop, O., Nguyen, T.A., and Dubois, F. (2018). Evaluation de champs de résistivité électrique de matériaux hygroscopiques : vers le monitoring et le diagnostic hydrique des structures. 36ème Journées annuelles de l'AUGC, 584–587.

Pham, M.D., Ulmet, L., Nguyen, T.A., Angellier, N., and Dubois, F. (2018). Optimisation numérique de la détermination de champs de résistivité électrique de matériaux hygroscopiques. 7èmes Journées Du GDR 3544 « Sciences Du Bois ».

Nomenclatures

Loi de diffusion

c	Masse par unité de volume de l'espèce diffusante	kg m^{-3}
Λ	Masse d'élément	kg
S	Surface de section transversale	m^2
Π	Volume d'élément	m^3
u	Vitesse moyenne de la masse	m.s^{-1}
Θ	Flux diffusé	kg.s^{-1}
ω	Densité diffusé	$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
μ	Taux de production de masse par unité de temps et par unité de volume	
D	Coefficient de diffusion ou diffusivité	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
w	Teneur en eau	%
D_0	Coefficient de diffusion à l'état anhydre	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
ζ	Coefficient de non-linéarité de Droin-Josserand & al. (1989)	
F, G	Constantes intrinsèques au matériau de Simpson (1993)	
w_f	Teneur en eau à saturation libre	%
D_f	Coefficient de diffusion liquide respectifs à saturation capillaire	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
A	Coefficient d'absorption selon la norme NF EN ISO 15148 (2003)	$\text{kg.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}$
κ	Facteur de correction de Krus (1999)	

Comportement électrique

I	Intensité du courant électrique	A
j	Vecteur densité de courant électrique	A/m^2
q	Charge électrique	C
ρ_m	Densité de charges mobiles	C.m^{-3}
v	Vitesse des porteurs	m.s^{-1}
E	Champ électrique appliqué	V.m^{-1}
$f_{\text{él}}$	Force électrique	N

$f_{rés}$	Force visqueuse analogue due aux charges fixes	N
ζ	Constante phénoménologique du conducteur ohmique	
m	Masse d'un porteur de charge	kg
τ_r	Temps de relaxation du milieu	s
σ	Conductivité électrique du milieu	$S.m^{-1}$
ρ	Résistivité électrique	$\Omega.m$
V	Potentiel électrique	V
ΔV	Différence potentielle	V
J_t	Densité totale de courant	$A.m^{-2}$
J_c	Densité de courant de conduction	$A.m^{-2}$
J_d	Densité de courant de déplacement	$A.m^{-2}$
L	Induction électrique	$C.m^{-2}$
ξ_0	Constante diélectrique du vide ($8.854.10^{-12}$ F/m)	$F.m^{-1}$
χ	Susceptibilité électrique du milieux	
ξ_r	Constante diélectrique relative	$F.m^{-1}$
ξ	Constante diélectrique totale	$F.m^{-1}$
H	Fonction d'Heaviside	
E_s	Saut initial du champ électrique	$V.m^{-1}$
J_o	Échelon de densité de courant	$A.m^{-2}$
M	Chargeabilité électrique	$mV.V^{-1}$
r	Rayon appliqué de source de courant	m
K	Facteur géométrique	m
Caractéristiques de l'électricité des matériaux hygroscopiques		
F	Facteur de formation	
c_m	Constant lié au coefficient de saturation	
c	Constant lié au facteur de cémentation	
ρ_w	Résistivité de la résistivité de l'eau interstitielle	$\Omega.m$

ϕ	Porosité du milieu	%
e, f	Constantes empiriques contenant implicitement les caractéristiques du sol et de l'eau	
θ	teneur en eau volumétrique	%
ρ_s	Résistivité de la matrice solide	$\Omega.m$
ρ_i	Résistivité de la partie interstitielle	$\Omega.m$
g, h	Coefficients en fonction des caractéristiques de la phase solide	
σ_t	Conductivité à la température de l'expérience	$S.m^{-1}$
$\sigma_{25^\circ C}$	Conductivité à 25°C	$S.m^{-1}$
ϵ	Facteur de correction fixé à 2,02%	%
T	Température	K, °C
R	Resistance électrique	Ω
L	Hauteur de l'échantillon	m
A_T	Section transversale perpendiculaire de l'échantillon	m^2
a	Distance unitaire entre des électrodes	m
n	Niveau de prospection	
w	Teneur en eau (massive)	%

Analyse inverse

$f(x)$	Fonction objectif
$r(x)$	Vecteur d'erreur entre les données mesurées et calculées
$\phi(x)$	Résistivité apparente calculée par le modèle direct éléments finis
d	Données mesurées correspondante résistivité apparente calculée
x^*	Minimiseur local
δ	Distance entre deux points voisins de Taylor
f'	Dérivé primaire
f''	Dérivé secondaire
x_s	Point stationnaire
x_k	Point à k ^{ème} itération

e	Erreur
p	Direction de descente
α	Pas de descente
J	Jacobienne
λ	facteur d'amortissement
g	Gain du fonction objectif
$\varphi, \beta, \gamma, \varepsilon$	Facteurs de Nielsen (1999)

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier le gouvernement vietnamien pour l'opportunité et le soutien financier de mener à bien cette thèse par la bourse 911 administrée par le ministère de l'Éducation et de la Formation.

Je souhaite remercier M. Frédéric DUBOIS, mon directeur de thèse, pour l'orientation des travaux avec la large connaissance scientifique. De plus, sa compréhension m'a facilité à organiser raisonnablement le temps et le travail afin que je puisse finaliser la thèse. Je remercie également mon co-directeur de thèse, M. Nicolas ANGELLIER, qui a supervisé mes travaux. Il m'a donné des étapes concrètes pour que je comprenne clairement ce que je devais faire. D'ailleurs, il m'accompagne toujours lors de mon séjour en France, m'aide à résoudre mes difficultés de la vie et à mieux comprendre la culture, l'histoire et le peuple français. Je remercie vivement M. Laurent ULMET, mon encadrant sympathique et enthousiaste. Je ne peux pas imaginer sans lui comment je serais capable d'approfondir les modèles que nous avons modélisés. Ses instructions scientifiques et ses solutions ont toujours rapidement résolu mes problèmes. J'exprime mes sincères remerciements à M. NGUYEN Tuan Anh, l'encadrant m'a mis en contact avec un merveilleux équipe de recherche. Il m'a montré les premières étapes de la thèse et la prochaines applications de ce sujet au Vietnam.

Je souhaite également remercier Mme. Colette SIRIEIX et M. Rachid BENNACER qui m'ont fait l'honneur de rapporter ce travail de thèse. Mes remerciements vont aussi à Mme. Marianne PERRIN, M. Pascal MAILLARD et M. VU Ngoc Anh Vu pour avoir participé au jury.

Mes remerciements s'étendent également à tout le personnel du Campus Universitaire de Génie Civil d'Égletons ainsi qu'à toute l'équipe de GC2D pour leurs disponibilités, leurs gentillesse et leurs soutiens. Particulièrement, M. Jérôme DOPEUX m'a guidé la réalisation du protocole expérimental.

Ma sympathie va à tous mes collègues doctorants, en insistant particulièrement sur mes chers colocataires Waël HAFSA, Christian Quintero REYES, mes ami(e)s ZHANG Xi, et Soufyane BENABOUD que j'ai côtoyés pendant ces trois années de thèse, pour leurs amitiés, leurs encouragements et pour les échanges fructueux.

Enfin, je tiens à rendre hommage à ma famille pour tout le soutien moral, spirituel et familial qu'ils m'ont donné au cours de ces années malgré la distance. Surtout, avec tout mon amour, je remercie ma femme et mes enfants qui sont toujours ma motivation de compléter ma thèse ainsi que de me développer à l'avenir.

Droits d'auteurs

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :

« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »

disponible en ligne : <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des matières

Introduction	20
Chapitre I. Les méthodes de reconnaissance électrique dans le domaine du génie civil	23
Introduction	23
I.1. Matériaux hygroscopiques et diffusion hydrique.....	23
I.1.1. Matériau terre crue	23
I.1.2. Matériau bois.....	28
I.1.3. Diffusion hydrique dans les matériaux hygroscopiques	33
I.2. Propriétés électriques des matériaux de construction	37
I.2.1. Comportement électrique	37
I.2.2. Propriétés électriques des matériaux.....	42
I.3. Méthodes électriques de monitoring de bâtiments ou structures de génie civil.....	50
I.3.1. Ouvrages en terre et sols	50
I.3.2. Structures en maçonnerie.....	51
I.3.3. Structures en bois.....	54
I.3.4. Structures en béton	56
I.4. Tomographie électrique pour la reconnaissance en géotechnique.....	59
I.4.1. Résistivité apparente	59
I.4.2. Différentes configurations.....	60
I.4.3. Post traitement	62
I.5. Méthodes d'analyse inverse.....	63
I.5.1. Généralité.....	63
I.5.2. Méthodes descendantes.....	65
I.5.3. Méthodes des moindres carrées.....	69
Conclusion.....	74
Chapitre II. Approches numériques et expérimentales pour un état hydrique homogène.....	75
Introduction.....	75
II.1. Modélisation d'un problème de conduction électrique	75
II.1.1. Implémentation dans un code éléments finis – Analogie électrique/thermique.....	75
II.1.2. Modélisation par éléments finis d'un quadripôle en surface d'un milieu semi-infini homogène	76
II.1.3. Quadripôle dans un milieu fini homogène.....	89
II.2. Dispositif expérimental – Résistivimètre Syscal Jr.....	93
II.2.1. Caractéristiques de base	93
II.2.2. Calibres 1250 et 50mA	95
II.3. Détermination de la relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau	95
II.3.1. Multiplexage par une succession de 24 quadripôles.....	95
II.3.2. Mesures sous différents teneurs en eau	97
II.4. Prise de mesure par ceinturage d'électrodes	100
II.4.1. Montage expérimental	100
II.4.2. Maillage éléments finis	102
II.4.3. Choix d'un jeu de quadripôles non redondants	102
II.4.4. Mesures expérimentales.....	103
II.4.5. Analyse directe et confrontation entre résultats expérimentaux et numériques..	104
II.5. Conclusion	106
Chapitre III. Méthode d'inversion pour des états hydriques hétérogènes.....	108
Introduction.....	108

III.1. Etat des lieux	108
III.1.1. Maillage et multiplexage	108
III.1.2. Modélisation directe et algorithme d'inversion	109
III.2. Mise au point d'un nouvel algorithme	111
III.2.1. Des éléments maîtres aux nœuds maîtres	111
III.2.2. Résultats d'inversions d'un multiplexage théorique : échantillon à électrodes en profondeur.....	112
III.2.3. Résultats d'inversion d'un multiplexage théorique : cubes à électrodes en surface.	113
III.3. Optimisation du multiplexage	115
III.3.1. Modèle électrique	115
III.3.2. Profondeur d'investigation des quadripôles « de surface »	116
III.3.3. Discrimination des hétérogénéités profondes par des quadripôles traversants.	118
III.3.4. Quadripôles diagonaux de coins.....	122
III.3.5. Choix et classification des quadripôles pour le multiplexage.....	123
III.4. Mise en œuvre de la tomographie électrique sur une brique en régime hydrique transitoire.....	125
III.4.1. Protocoles expérimentaux : Appareillage de la brique	125
III.4.2. Modèles numériques hygrothermiques	127
III.4.3. Etude de multiplexages à différentes phases du séchage	129
III.4.4. Analyse inverse	132
Conclusion.....	134
Conclusion	136
Références bibliographiques	138
Annexes	153

Table des illustrations

Figure I-1 : Constitution du matériau terre (Daian 1986).....	24
Figure I-2 : Formes et Etats de l'eau dans le matériau terre (Guillaud & Houben 2015).....	25
Figure I-3 : Isotherme de sorption de la terre crue (Hall & Allinson 2009)	27
Figure I-4 : Classification des isothermes d'adsorption (Rouquerol & al. 1994).....	28
Figure I-5 : Niveaux hiérarchiques du bois (Blass & Carmen 2017).....	28
Figure I-6 : Plans de coupe d'une tranche de tronc d'arbre.....	29
Figure I-7 : Structure schématique et types de cellules de résineux (Blass & Carmen 2017)	30
Figure I-8 : Structure schématique et types de cellules de bois feuillu (Blass & Carmen 2017)	30
Figure I-9 : Représentation schématique des fosses bordées de résineux (Blass & Carmen 2017).....	31
Figure I-10 : Rang de la teneur en eau du bois et influence sur ses propriétés et sa vulnérabilité (Dietsch & al. 2015a)	32
Figure I-11 : Retrait ou gonflement selon la direction du matériau (Guitard 1987)	32
Figure I-12 : Des isothermes de sorption des 4 essences testées (Manfoumbi Boussougou 2012).....	33
Figure I-13 : Transfert de masse d'un milieu fermé.....	33
Figure I-14 : Evolution de E sous une densité de courant constante J_0	39
Figure I-15 : Evolution de E sous une annulation de densité de courant.....	40
Figure I-16 : Electrode de courant à la surface d'un sol homogène	40
Figure I-17 : Rangs typiques de résistivités des matériaux terrestres (Palacky 1987).....	43
Figure I-18 : Résistivité électrique de différentes argiles dans le monde (Giao & al. 2003) ...	43
Figure I-19 : Relation entre la teneur en eau volumétrique et la résistivité électrique pour différents types de sols.....	45
Figure I-20 : Relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique pour deux types de sols.....	45
Figure I-21 : Changement de la résistance électrique du bois selon la teneur en eau pour de nombreuses essences américaines (Simpson & TenWolde 1999)	47
Figure I-22 : Résistivité du pin slash en fonction de la teneur en eau (Glass & Zelinka 2010)	47
Figure I-23 : Relation entre le logarithme de la résistivité du bois et l'inverse de la teneur en humidité (Sandoz 1993)	48
Figure I-24 : Influence de l'humidité et de la température sur la résistance électrique du bois (Kollmann & Côté 1968)	49
Figure I-25 : Résistance de différentes essences en fonction de la teneur en eau (Forsen & Tarvainen 2000).....	50

Figure I-26 : Résistance électrique du duramen et de l'aubier du Pin en fonction de la teneur en eau (Forsen & Tarvainen 2000).....	50
Figure I-27 : Section transversale du barrage et disposition des électrodes (Sjödahl & al. 2008).....	51
Figure I-28 : Profile des électrodes (Verdet & al. 2017)	51
Figure I-29 : Distribution de la teneur en eau dans un mur de terre cuite.....	52
Figure I-30 : Mur équipé d'électrodes (Hoła & al. 2012).....	52
Figure I-31 : Distribution de l'humidité relative mesurée et modélisée selon une distribution exponentielle et quadratique de conductivité (Hoła & al. 2012).....	53
Figure I-32 : Concept des électrodes (Rymarczyk & al. 2018a)	53
Figure I-33 : Relation entre mesures diélectriques et teneur en humidité massique U_m de la paroi (Hoła & al. 2017).....	54
Figure I-34 : Dispositif utilisant la méthode de résistance (Dietsch & al. 2015a)	54
Figure I-35 : Dispositif utilisant la méthode de capacité (Dietsch & al. 2015a)	55
Figure I-36 : Des électrodes de vis (Franke & al. 2013) et de clou (Dietsch et al., 2015a) installées <i>in-situ</i>	56
Figure I-37 : Disposition des capteurs électriques de poutre lamellé-collé du pont (Björngrim & al. 2016).....	56
Figure I-38 : Méthode de sandwich pour le béton (Azarsa & Gupta 2017).....	57
Figure I-39 : Méthode de disque de surface (Azarsa & Gupta 2017)	58
Figure I-40 : Résistivimètre pour le béton (Layssi & al. 2015).....	58
Figure I-41 : Configuration carrée à quatre sondes (Azarsa & Gupta 2017).....	58
Figure I-42 : Géométrie de l'échantillon, sens de mesure et configuration d'électrode (Lim & al. 2018).....	59
Figure I-43 : Positionnement des capteurs à l'embouchure de la Loire (Priou & al. 2018).....	59
Figure I-44 : Section de sensibilité 2D des différentes configurations (Loke 2001)	61
Figure I-45 : Problématique et principe d'analyse inverse (Marescot 2004).....	62
Figure I-46 : Inversion d'une topographie 2D par Res2Dinv (Marescot 2008).....	63
Figure I-47 : Surfaces et contours près d'un point stationnaire	65
Figure I-48 : Algorithme de la méthode descente Madsen & al (2004).....	66
Figure I-49 : Algorithme de la méthode de Newton.....	68
Figure I-50 : Algorithme hybride	68
Figure I-51 : L'algorithme de la méthode de Gauss-Newton	70
Figure I-52 : L'algorithme hydrique modifié.....	70
Figure I-53 : L'algorithme de Levenberg	71
Figure I-54 : L'algorithme de Marquardt ajoutant la recherche de la valeur λ	71

Figure I-55 : Algorithme de Levenberg appliqué par Nguyen (2014).....	72
Figure I-56 : L'algorithme de la méthode de Levenberg-Marquardt.....	74
Figure II-1 : Maillage du problème d'injection par électrodes ponctuelles en milieu « semi-infini ».....	76
Figure II-2 : Champs potentiel au voisinage des électrodes.....	77
Figure II-3 : Potentiels éléments finis et analytique sur la ligne des électrodes ponctuelles ..	78
Figure II-4 : Potentiels éléments finis et analytique sur la ligne des électrodes ponctuelles (éléments quadratiques à 20 nœuds : CU20).....	78
Figure II-5 : Erreur relative sur le facteur géométrique K par rapport à la solution analytique en fonction de la taille du pavé externe	80
Figure II-6 : Erreur relative sur le facteur géométrique K par rapport à la solution analytique et temps de calcul en fonction de la taille des éléments du pavé central	80
Figure II-7 : Erreur relative sur le facteur géométrique K par rapport à la solution analytique en fonction de la taille du pavé central.....	81
Figure II-8 : Maillage 3D et axisymétrique avec une électrode dans un milieu de grandes dimensions	82
Figure II-9 : Maillage par extrusion de la coupe d'électrode	83
Figure II-10 : Maillage quadratique d'une électrode et de sa transition avec la trame parallélépipédique	84
Figure II-11 : Distribution de potentiel sur la surface d'un milieu semi-infini pour une électrode en surface	84
Figure II-12 : Distribution de potentiel sur la surface d'un milieu semi-infini pour une électrode en profondeur.....	85
Figure II-13 : Maillage du problème d'injection par électrodes réelles en milieu « semi-infini »	87
Figure II-14 : Distribution des potentiels sur la ligne d'électrodes, cas d'un quadripôle de type Wenner- β , rayon d'électrode $r_e=1$, hauteur $h=2$, espacement $a=4$	88
Figure II-15 : Maillage pour l'étude de l'influence des bords libres à proximité d'un quadripôle d'électrodes ponctuelles	90
Figure II-16 : Influence de la proximité d'un bord libre sur les facteurs géométriques dans le cas des électrodes ponctuelles.....	90
Figure II-17 : Influence de la proximité d'un bord libre profond sur les facteurs géométriques dans le cas des électrodes réelles.....	91
Figure II-18 : Résistivimètre Syscal Junior Switch-48	93
Figure II-19 : Formes du courant	94
Figure II-20 : Maillage par l'extrusion de surface du pavé $50 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$	96
Figure II-21 : Valeurs de modélisation de $\Delta VMNIAB$ de 24 quadripôles.....	96
Figure II-22 : Pavé de terre crue Standard et disposition de 4 électrodes	96

Figure II-23 : Dessiccateur pour le conditionnement de l'échantillon.....	97
Figure II-24 : Résistances apparentes aux différences HR de 2 modes (1250mA/50mA) et de la modélisation	98
Figure II-25 : Relation entre la résistivité en échelle logarithme et l'humidité relative du quadripôle Dipôle-Dipôle pour le pavé Standard à 4 électrodes	99
Figure II-26 : Relation entre la résistivité en échelle logarithme et la teneur en eau du quadripôle Dipôle-Dipôle pour le pavé Standard à 4 électrodes	99
Figure II-27 : Emplacements des prélèvements des cubes dans la brique et directions d'orthotropie	100
Figure II-28 : Montage expérimental par ceinturage d'électrodes en profondeur.....	101
Figure II-29 : Composition du support des électrodes en surface et montage complet	101
Figure II-30 : Montage final des électrodes en ceinturage	102
Figure II-31 : Maillage du cube de terre crue en ceinturage et numérotation des électrodes	102
Figure II-32 : Quelques exemples de quadripôles.....	103
Figure II-33 : Confrontation entre résultats expérimentaux et numériques du cube C1 à l'ambiance	104
Figure II-34 : Comparaison des résultats de multiplexage sur cubes pour différentes teneurs en eau	105
Figure II-35 : Points expérimentaux sur la courbe de la loi de passage	106
Figure III-1 : Principe du ceinturage et discrétisation éléments finis.....	108
Figure III-2 : Champ de conductivité bidimensionnel	109
Figure III-3 : Champ identifié élémentaire à la 10 ^{ème} itération de l'échantillon à 20 électrodes	110
Figure III-4 : Variation itérative des valeurs de conductivité de l'échantillon de Nguyen (2014)	111
Figure III-5 : Nouveau maillage de l'échantillon à 20 électrodes	112
Figure III-6 : Nœuds maîtres de la résistivité sur le maillage grossier de l'échantillon à 20 électrodes.....	112
Figure III-7 : Champ identifié des nœuds à la 10 ^{ème} itération pour l'échantillon à 20 électrodes et variation itérative des valeurs de conductivité des nœuds maîtres	113
Figure III-8 : Nœuds maîtres de la résistivité sur le maillage grossier de l'échantillon à 16 électrodes.....	114
Figure III-9 : Champ identifié après 10 itérations	114
Figure III-10 : Comparaison des valeurs de conductivité à la 10 ^{ème} itération entre des cubes aux électrodes enfoncées et surfaciques.....	115
Figure III-11 : Maillage de la brique entière en ceinturage et numérotation des électrodes en surface	115

Figure III-12 : Champ hétérogène 1D de résistivité.....	116
Figure III-13 : Rapports $\Delta VMNIAB$ en fonction de Lcz pour différents quadripôles de surface	117
Figure III-14 : Influence de Lcz sur la variation relative de résistance apparente par rapport au cas homogène.....	118
Figure III-15 : Quadripôles « de surface » choisis pour le multiplexage en surface.....	118
Figure III-16 : Potentiels aux électrodes en fonction de l'électrode B (A=3)	119
Figure III-17 Potentiels aux électrodes (injection en A=3 et B=15).....	119
Figure III-18 : Ecart de ΔVMN entre le cas homogène et le cas hétérogène	120
Figure III-19 : Deux configurations de champs de résistivité différentes	120
Figure III-20 : Quadripôles traversants choisis pour le multiplexage	121
Figure III-21 : Quadripôles diagonaux du multiplexage.....	122
Figure III-22 : Champ hétérogène 2D de résistivité.....	122
Figure III-23 : Influence d'un champ de résistivité hétérogène sur des quadripôles diagonaux	123
Figure III-24 : Champ identifié et variation itérative des valeurs de conductivité aux nœuds après 10 itérations (cas de l'échantillon à 20 électrodes et le multiplexage de 64 quadripôles)	124
Figure III-25 : Champ identifié et variation itérative des valeurs de conductivité des nœuds à la 10ème itération du cube à 16 électrodes encastrées et le multiplexage de 66 quadripôles	124
Figure III-26 : Champ identifié et variation itérative des valeurs de conductivité aux nœuds après 10 itérations (cas du cube à 16 électrodes surfaciques et multiplexage de 54 quadripôles)	125
Figure III-27 : Montage en ceinturage de la brique entière.....	125
Figure III-28 : Disposition des électrodes en ceinturage de la brique entière	126
Figure III-29 : Dessiccateur de condition de la Brique.....	126
Figure III-30 : Evolution de l'Humidité Relative et de la température à l'intérieur du dessiccateur	127
Figure III-31 : Evolution de la teneur en eau de la brique témoin	127
Figure III-32 : Evolution de la teneur en eau de la brique.....	128
Figure III-33 : Champ 2D de teneur en eau à 1 jour, projeté sur le maillage « électrique » .	128
Figure III-34 : Champ 2D de conductivité à 1 jour.....	129
Figure III-35 : Rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ pour différents instants.....	129
Figure III-36 : Ratios d'évolution de la résistivité apparente par rapport au cas homogène initial.....	130
Figure III-37 : Comparaisons entre modèle direct et mesures en début de séchage.....	131

Figure III-38 : Comparaisons entre modèle direct et mesures en fin de séchage.....	131
Figure III-39 : Champ de résistivité identifié après 5 itérations.....	132
Figure III-40 : Synoptique des opérations matricielles sur un pas de calcul	132
Figure III-41 : Champ de conductivité identifié selon plusieurs valeurs du facteur d'amortissement.....	133
Figure III-42 : Evolution du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ et champ identifié de la conductivité avec $\lambda = \max\{\text{dia}[J^T J]\}$ à itération 10	133
Figure III-43 : Evolution du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ pour les deux valeurs de conductivités initiales	134

Table des tableaux

Tableau I-1 : Analogies entre les lois de Fick et d'Ohm	42
Tableau I-2 : Exemple de configuration de réseau d'électrodes en ligne 2D et dispositif d'électrode 3D	61
Tableau I-3 : Performances des différents types de configurations 2D	62
Tableau II-1 : Analogie électrique et thermique.....	75
Tableau II-2 : Deux autres exemples des différentes valeurs de c_{1a} et L_{1yza}	81
Tableau II-3 : Calcul du potentiel aux emplacements des électrodes réceptrices et écarts par rapport à la solution de référence axisymétrique	86
Tableau II-4 : Facteurs géométriques équivalents de différentes configurations d'électrodes réelles	89
Tableau II-5 : Facteurs géométriques K de quadripôles dans un pavé de dimensions finies	92
Tableau II-6 : Réversibilité des quadripôles	103
Tableau II-7 : Valeurs de la teneur en eau.....	104
Tableau II-8 : : Valeurs de résistivité déterminée	105
Tableau III-1 : Evolution de $\Delta VMNIAB$ en fonction de L_{cz} pour différents types de quadripôles.....	117
Tableau III-2 : Potentiels pour des électrodes d'injection traversante A=3 ; B=15.....	121
Tableau III-3 : Choix du multiplexages appliqués.....	123

Introduction

Pour répondre aux enjeux environnementaux tels que la diminution d'émission de gaz à effet de serre, ou la diminution de l'usage d'énergie fossile, le secteur du Génie Civil étudie aujourd'hui des stratégies et des solutions basées sur l'usage de matériaux naturels demandant peu de transformation et peu de transport dès lors qu'ils sont employés à proximité des sites d'extraction. Si nous citons en exemple le matériau bois ou la terre crue, nous remarquerons que ces deux matériaux peuvent, du point de vue de leurs propriétés mécaniques et de durabilité, répondre en grande partie à cette problématique. De plus, notre patrimoine montre que ces matériaux ont fait leurs preuves dans le passé.

La réponse aux enjeux climatiques repose également sur une maîtrise de la durée de vie des structures en déployant des stratégies de maintenance basées sur toute une approche d'inspection et de surveillance des ouvrages. Le bois et la terre crue sont deux matériaux qui se distinguent par leur hygroscopicité. Cela se traduit par un comportement mécanique caractéristique associant viscoélasticité ou viscoplasticité à un couplage hygroscopique générant des effets de retrait-gonflement. Du fait de l'anisotropie matérielle de ces matériaux, les variations hydriques peuvent induire des pathologies comme, par exemple, des fissures de retrait hydrique. De plus, concernant le matériau bois, des niveaux hauts d'humidité peuvent être le siège d'attaques biologiques, ce qui augmente d'autant la vigilance que doivent porter les propriétaires ou les gestionnaires des ouvrages.

Pour répondre à l'ensemble de ces défis, les approches de type diagnostic reposent sur une surveillance des ouvrages. Concernant la surveillance de l'humidité, nous parlerons de monitoring hydrique. Plusieurs stratégies de monitoring peuvent être déployées comme, par exemple, le suivi d'humidité sur des pièces témoins placées au voisinage de l'ouvrage, soit par méthode de double pesée, par méthode résistive locale ou soit par méthode psychrométrique.

Les méthodes par double pesée permettent uniquement d'avoir une valeur moyenne globale de l'humidité dans une section donnée. Les méthodes résistives permettent d'avoir une information plus ponctuelle sur l'évolution temporelle de l'humidité mais sans avoir la dimension spatiale du phénomène. Les techniques employées se limitent généralement à étudier l'humidité proche de la surface des éléments à surveiller. Enfin, la méthode psychrométrique consiste à déployer un réseau de capteurs hygrométriques afin d'en déduire l'évolution temporelle et spatiale de l'humidité. Cependant, cette dernière approche nécessite d'intervenir lors de la phase de construction en implantant dans les sections des cavités qui accueilleront ces capteurs.

Aujourd'hui, attachés à une approche non destructive des structures, nous recherchons des méthodes non intrusives pour permettre une caractérisation du champ hydrique dans le matériau. Dans ce contexte, plusieurs technologies peuvent être employées. Les méthodes ultrasonores permettent de corrélérer les vitesses de propagation d'ondes aux propriétés d'élasticité, elles-mêmes, corrigées de l'humidité interne dans le domaine hygroscopique. La mise en œuvre de cette technique est plus appropriée à des mesures ponctuelles lors de missions d'inspections périodiques d'ouvrage. De plus, la détermination du champ hydrique 2D demande de dupliquer les chemins de propagation pour reconstruire un champ complet. Il en va de même des méthodes radar par ondes électromagnétiques.

Une alternative à ces techniques est empruntée aux méthodes de caractérisation géophysique. Nous parlons de tomographie résistive. Cette méthode, basée sur le

déploiement d'un réseau de quadripôles résistifs, permet, à l'aide d'un algorithme d'analyse inverse, d'atteindre une cartographie spatiale de résistivité du milieu, et ce, corrélé à une cartographie de l'humidité interne. Les applications géophysiques supposent, d'une part, une répartition des quadripôles sur la surface libre dictée par la topographie du milieu et, d'autre part, un milieu conducteur semi-infini. En revanche, les outils existants intègrent une tête de mesure associée à un système multiplexé programmable, ce qui en fait une bonne base de développement pour notre problématique. Reste à adapter les approches à un milieu fini caractérisé par la périphérie des éléments structuraux qui représente également un ensemble de surfaces permettant une multitude de déploiement de quadripôles multipliant ainsi la forme et la répartition des lignes de courant. Ainsi, la répartition spatiale des quadripôles permet de rechercher un compromis entre précision de la mesure et profondeur d'investigation, et ce, en relation avec les techniques d'inversion et d'analyse inverse.

Le laboratoire de Génie Civil Diagnostic et Durabilité travaille sur cette thématique depuis une dizaine d'années. L'objectif de ces approches est d'atteindre une représentation spatiale de l'humidité interne afin d'alimenter un modèle de diffusion permettant, d'une part, de déterminer les caractéristiques de diffusion du milieu sur la base d'une analyse inverse (ce que nous appellerons une phase d'apprentissage) et, d'autre part, de proposer un travail d'extrapolation pour aboutir à du pronostic comportemental associant de la tomographie temporelle et un modèle de diffusion complet adapté aux matériaux et géométries diagnostiqués. Ce travail de thèse repose sur cette démarche globale.

Cette thématique scientifique a été initiée pour étudier la capacité des méthodes résistives à évaluer la réparation de l'humidité interne dans des sections transversales d'éléments en bois. A l'heure de la rédaction de ce mémoire, deux thèses ont été soutenues sur le sujet mettant cependant en exergue les difficultés à appliquer la méthode pour des humidités 'basses', c'est-à-dire en dessous de 10%. En effet, à basse humidité, les résistivités apparentes deviennent très importantes en répondant à des lois exponentielles. En atteignant les limites physiques de potentiel, ces mesures ne permettent plus d'alimenter de façon robuste les algorithmes d'inversion numérique. Pourtant, ces états hydriques peuvent être rencontrés dans des ouvrages en extérieur en période estivale sèche (périodes de canicule par exemple) ou dans des charpentes industrielles surchauffées. Afin cependant de consolider et de faire évoluer ces approches résistives, nous proposons, dans ce travail, d'utiliser comme matériau hygrosopique la terre crue pour lequel : (i) les temps de diffusion sont plus courts permettant ainsi d'obtenir des gradients hydriques plus rapidement ; (ii) à humidité relative équivalente, les résistivités sont plus faibles que pour le bois. Ce matériau a également fait l'objet d'études au laboratoire pour des aspects mécaniques et de confort thermo-hydrique. Cette étude complètera ainsi l'état de l'art sur ce matériau à faible impact environnemental.

Le mémoire se compose de trois parties. Le premier chapitre est un état de l'art sur les méthodes de reconnaissance résistives employées aujourd'hui dans la surveillance ou l'inspection des ouvrages du Génie Civil. Nous aborderons également les matériaux hygrosopiques avec un focus particulier pour le matériau bois et la terre crue. Enfin, les méthodes d'inversions sont présentées afin d'aboutir à un arbitrage sur la méthode à employer dans la suite de ce travail.

Le second chapitre présente la mise en œuvre de la stratégie numérique d'inversion développée. La méthode inverse employant un calcul direct de la mesure électrique par éléments finis, tout un travail de calibration numérique tant sur la façon de modéliser les injections de courant et la mesure des différences de potentiel est présenté. Focalisé sur des

humidités homogènes, toute une étude sur les quadripôles utilisés et leur mise en place (déploiement en ligne, ceinturage de la section) est présentée. Cette étude repose, d'une part, sur le modèle numérique développé mais également sur des mesures expérimentales menées sur des échantillons de terre crue et en employant une tête de mesure Syscal Junior et son système de multiplexage. Cette partie a également pour objectif de fixer les limites physiques de la mesure avant de la déployer pour des états hétérogènes hydriques en régime transitoire, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Ainsi, ce dernier chapitre traite de la pertinence de la méthode d'inversion développée pour déterminer la répartition spatiale de l'humidité dans des phases de séchage. Le modèle est, dans un premier temps, développé en employant des champs hydriques calculés par un algorithme de diffusion implémenté dans le code de calcul aux éléments finis Castem. Dans un second temps, les premières tentatives d'emploi de la méthode sur mesures réelles seront présentées et discutées.

Chapitre I. Les méthodes de reconnaissance électrique dans le domaine du génie civil

Introduction

Les matériaux de construction hygroscopiques voient leurs propriétés physiques et mécaniques fortement influencées par leur teneur en eau. L'étude de leur composition (terre crue) ou de leur anatomie (bois) est très importante pour comprendre le rôle que joue l'eau dans ces matériaux. La diffusion d'humidité en surface et à cœur s'opère dans les éléments massifs (éléments de maçonneries en terre crue, poutre en bois). La diffusion hydrique est présentée mathématiquement par les lois fondamentales de type Fick et les propriétés qui les caractérisent.

La mesure de la teneur en eau repose, dans ce travail, sur l'application des méthodes résistives. Ainsi, il est nécessaire de maîtriser les lois de comportement électrique dans le domaine transitoire et permanent afin d'étudier les variations de résistivité électrique corrélées aux propriétés des matériaux hygroscopiques dépendantes de l'humidité. Actuellement, la méthode électrique est utilisée largement pour le monitoring des bâtiments ou des structures de génie civil. La référence de plusieurs recherches appliquant cette méthode à l'échelle du laboratoire et in-situ ont permis de fixer les grandes lignes de notre orientation scientifique dans ce travail.

Concernant l'étude de la diffusion hydrique, la méthode de tomographie par résistivité électrique est aujourd'hui développée. Cette méthode fournit une image spatiale plus quantitative et rigoureuse des données de résistivité électrique comme la résistivité apparente et la polarisation provoquée. En se basant sur des injections de courant et des mesures de potentiel, des configurations types de quadripôles sont définies. Leur choix dépend de la concordance de chaque configuration vis-à-vis de la géométrie et du périmètre de l'objet étudié.

Le dispositif expérimental est accompagné d'un algorithme d'analyse inverse permettant d'optimiser le champ de résistivité recherché par rapport à une simulation par éléments finis du problème de conduction électrique. La méthode inverse développée et adaptée à notre problème est le moteur de cette thèse. Elle a fait l'objet de développements complexes et de mises au point qui allaient demander un effort scientifique important. La base de l'analyse inverse est la méthode des moindres carrés en se basant sur l'optimisation et la minimisation de la fonction objectif. Les algorithmes tels que Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt, sont mis en œuvre et étudiés.

I.1. Matériaux hygroscopiques et diffusion hydrique

I.1.1. Matériau terre crue

I.1.1.1. Constitution

La terre crue est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terre avec une « collection » de caractéristiques illimitée. Quatre propriétés fondamentales caractérisent la terre crue, à savoir la granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion. Afin de rationaliser l'exploitation de la connaissance de ces propriétés, il est

important de classer les terres. Les classifications les plus adéquates pour la construction en terre sont les classifications géotechnique et pédologique (Guillaud & Houben 2015).

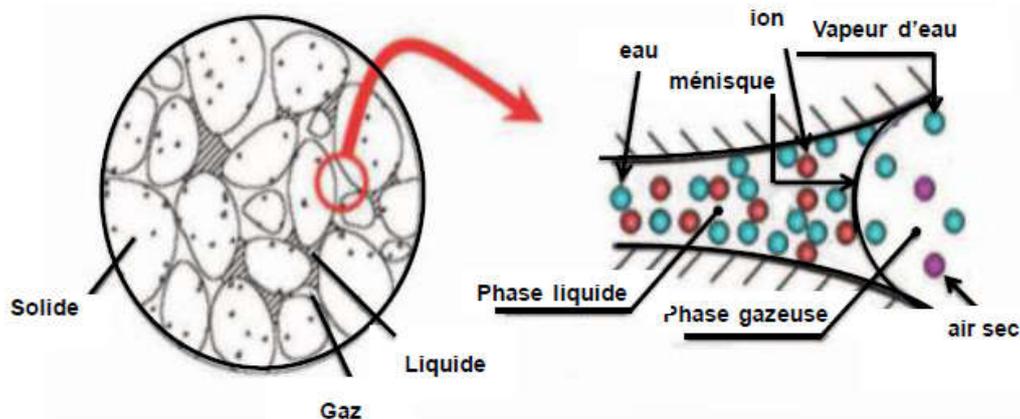


Figure I-1 : Constitution du matériau terre (Daian 1986)

Le matériau terre crue est constitué de plusieurs éléments, Figure I-1 (Daian 1986)

- Constituants gazeux : Composés principalement de l'air, ils sont localisés dans les cavités et proviennent de l'air extérieur, de la vie des organismes et de la décomposition des matières organiques.
- Les constituants liquides : Ils proviennent à la fois de la pluie et des conditions atmosphériques (brouillard, humidité relative), des apports de l'homme, de la décomposition des matières organiques et des produits de l'érosion de la roche. Nous retrouvons l'eau, les éléments solubles dissouts dans cette eau tels que les corps organiques (sucres, alcools, acides organiques) et les minéraux (acides, bases et sels en partie dissociés en ions Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , PO_4^{---} , SO_4^{--} , CO_3^{--} , NO_3^{--} , etc.).
- Les constituants solides : Ils regroupent les matières minérales et organiques qui ne sont pas en solution dans l'eau. Les matières organiques proviennent des organismes végétaux et animaux. Les constituants minéraux proviennent, quant à eux, de la désagrégation de la roche mère. Les éléments sableux sont soit des fragments de roche (pierres et graviers), soit des minéraux qui constituent ces roches (sables et limons). Ils sont de même composition que ces minéraux et peuvent être siliceux, silicatés ou calcaires.

I.1.1.2. L'eau dans la terre crue

a. Formes de l'eau

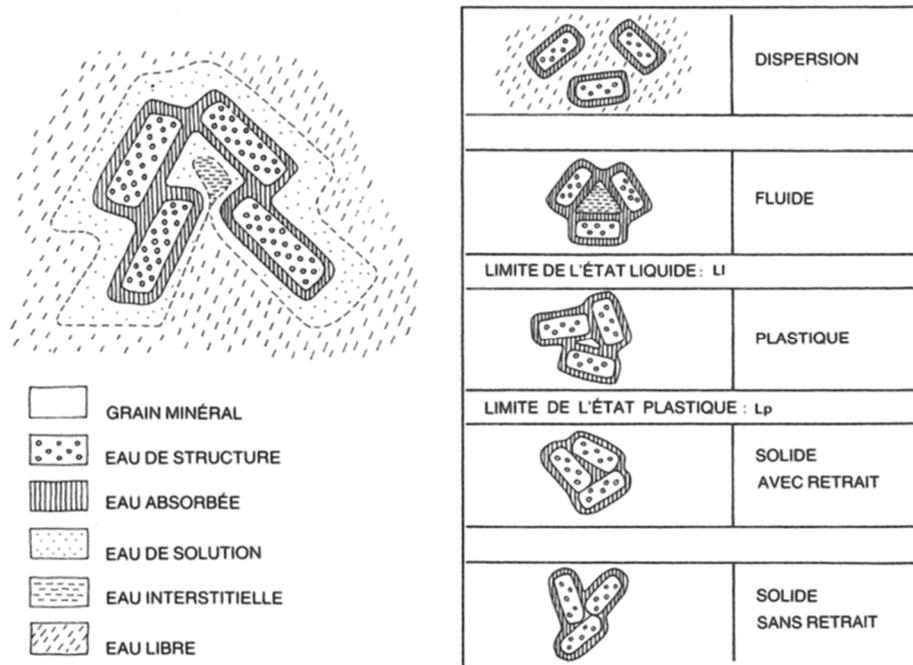


Figure I-2 : Formes et Etats de l'eau dans le matériau terre (Guillaud & Houben 2015)

L'eau est présente sous différentes formes qui peuvent impacter les propriétés mécaniques de la terre crue, Figure I-2 (Guillaud & Houben 2015).

- L'eau libre se diffuse par gravitation ou par capillarité, au gré des mouvements de la nappe phréatique ou des variations journalières de la pression atmosphérique et de la température. L'eau capillaire, accumulée dans les petits pores à la surface des particules, n'est pas absorbée. Elle peut être éliminée à température ambiante.
- L'eau interstitielle est contenue dans des pores de petite taille où la capillarité est supérieure aux forces hydrodynamiques. Cette eau peut être éliminée sous conditions de température ambiante et à faible humidité relative. Pour accélérer le départ de cette eau, un passage en étuve entre 50 et 120°C est préconisé.
- L'eau de solution prend la forme d'un film englobant les particules solides. Elle est liée en surface par des forces polaires, électrostatiques et d'hydratation ionique. Elle peut être éliminée à température ambiante.
- L'eau adsorbée, sous forme de film très fin, se positionne à la fois sur les surfaces externes et internes. Elle est retenue par des forces si puissantes qu'elle ne peut s'arracher que sous des températures supérieures à 100°C.
- L'eau de composition ou de structure se présente sous la forme de groupes hydroxyles faisant partie des réseaux cristallins solides. Son élimination se fait sous hautes températures, supérieures à 600°C.

b. Effet de l'eau

Les variations de teneurs en eau libre, interstitielle ou de solution peuvent modifier les propriétés physiques du matériau. Dans un sable grossier, l'eau interstitielle joue un rôle

prédominant. En revanche, pour un sol argileux fin, l'eau de solution modifiera les propriétés du matériau. Ces caractéristiques structurales et hydrauliques sont affectées par l'épaisseur de la couche d'eau de solution qui, à son tour, est sensible aux éléments dissouts dans l'eau.

1. Effet dû au caractère liquide

- Cohésion : Les particules fines (limons et argiles) doivent leur cohésion, entre autres, aux films d'eau qui les relient. Ces forces cohésives sont de deux types :
 - Celles dues à la tension de surface à l'interface air/eau (grains, grossiers),
 - Celles dues à l'interaction des particules d'argile et des molécules d'eau polarisées.
- Succion : Les forces, à l'origine de l'hydratation de surface des particules, se combinent à la tension de surface créant une succion dans l'eau qui croît avec la réduction de la teneur en eau.
- Gonflement : A la surface des argiles, les forces d'adsorption, agissant sur les molécules d'eau, sont fortes. Les couches absorbées gonflent avec l'humidification provoquant une augmentation de volume.
- Retrait : Le retrait des argiles est généralement dû à l'évaporation de l'eau.
- Plasticité : Au-delà de sa limite d'élasticité, une terre cohésive bien hydratée peut se déformer sans se briser. La plasticité, due à l'effet lubrifiant des films d'eau entre les particules, dépend de la taille, de la forme des particules et de la nature chimique de leurs surfaces.

2. Effet dû au caractère solvant

- Les sels solubles en solution sont dissociés en cations métalliques (Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} et Al^{+++}) qui sont absorbés sur les surfaces des particules. Les sulfates de Na, Mg et Ca affectent le matériau en le brisant par cristallisation.
- Les matières organiques peuvent influencer la redistribution des éléments minéraux dans le sol. Ceci est particulièrement le cas pour le fer.

Généralement, le transfert d'eau est considéré comme la principale cause de décomposition des matériaux poreux tels que la terre crue (Sommers & al. 2015) ou la pierre (Saheb & al. 2016 ; Walbert 2015 ; Carmeliet & Abeeel 2004 ; Beck & al. 2003 ; Rozenbaum & al. 2014). En effet, il peut induire des changements physiques (par exemple des changements dans les propriétés mécaniques, la dilatation hydraulique (Al-Omari & al. 2015 ; Laou 2017 ; Laou & al. 2021)). Il est également un vecteur de dégradation par le transport de polluants et la dissolution/cristallisation des sels solubles (Aalil & al. 2016 ; Kloppmann & al. 2011). La porosité agit comme un réservoir d'eau par infiltration (imbibition capillaire, remontée d'humidité, pluie, etc.). Dans le cas de la pierre, les composants minéraux argileux augmentent également la capacité de rétention d'eau et jouent un rôle important dans le comportement hydraulique (Colas & al. 2011) et le comportement hydromécanique (Cherblanc & al. 2016). Il est essentiel de déterminer la teneur en eau afin de corréliser l'action de l'eau et sa dégradation (Brimblecombe & al., 2011 ; Franzen & Mirwald, 2004).

c. Propriétés hydriques

La capacité d'adsorption et de désorption d'un matériau caractérise la capacité qu'ont les matériaux hygroscopiques à trouver un équilibre entre l'état hydrique du matériau et les

propriétés de l'air humide du milieu environnant. Dans le cas de la terre crue, sa capacité d'adsorption d'eau varie de 2 à 8 % de sa masse sèche selon sa nature et sa teneur en argile.

Minke (2013) a mis en évidence des cinétiques d'adsorption et de désorption beaucoup plus rapides par rapport à d'autres matériaux de construction comme la terre cuite. Ainsi, la terre crue joue le rôle de tampon hydrique avec une forte capacité à stocker de l'eau lui permettant, dans le cadre du confort de l'habitat, de réguler l'ambiance autour de la zone de confort optimale caractérisée par une humidité de l'air comprise entre 40 et 50% d'humidité relative. En outre, la terre crue est très perméable à la vapeur comparativement aux autres matériaux de construction. De plus, la capacité qu'à la terre crue à assurer le transport de vapeur d'eau en fait un matériau dit « respirant ».

Cependant, au regard de ces propriétés d'amortissement et de déphasage hydrique (Morel & al. 2001) se traduisant par un bon amortissement naturel de l'humidité des ambiances intérieures (Allinson & Hall 2010), ses propriétés mécaniques sont dépendantes de sa teneur en eau (Bui & al. 2011; 2014).

Dans un milieu poreux les phénomènes de fixation de l'humidité sont représentés par des isothermes de sorption traduisant l'équilibre entre teneur en eau interne et humidité de l'air, Figure I-3 (Hall & Allinson 2009).

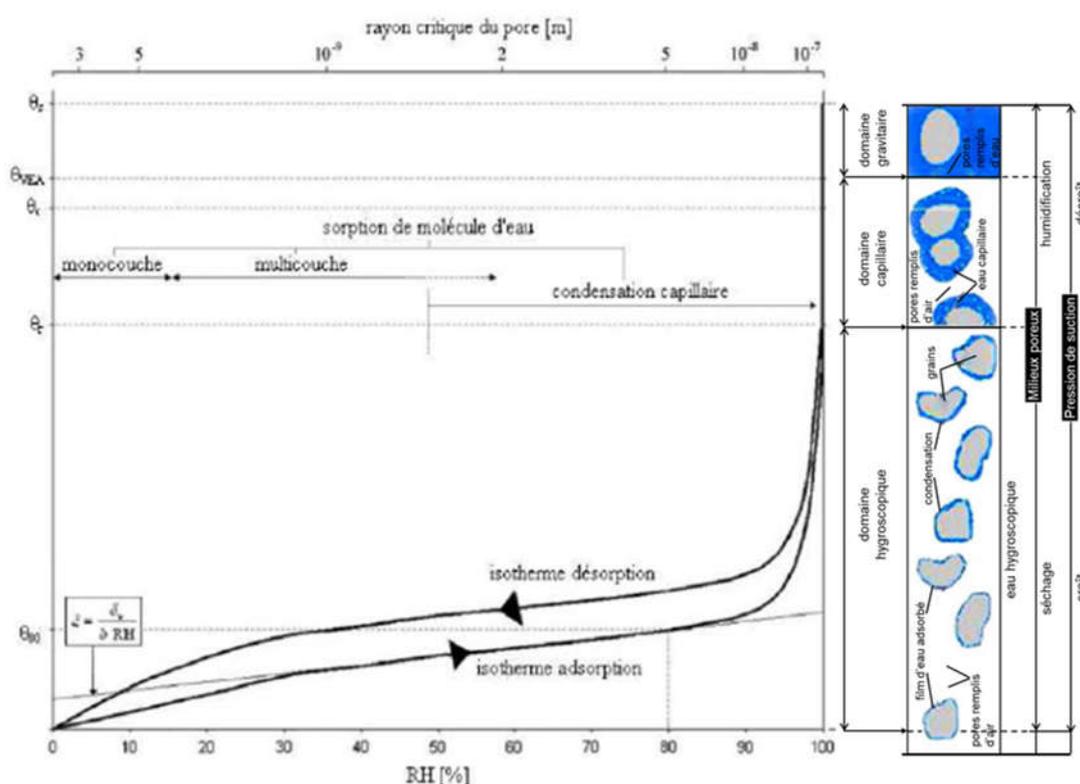


Figure I-3 : Isotherme de sorption de la terre crue (Hall & Allinson 2009)

Dans ces conditions, trois zones peuvent être identifiées, à savoir :

- Le domaine hygroscopique est caractérisé par un transfert de phase vapeur au détriment de la diffusion d'eau libre, et ce, jusqu'à atteindre une teneur en eau critique (Collet-Foucault, 2004).
- Le domaine capillaire concerne l'état où la teneur en eau dépasse la teneur en eau critique. Nous observons, dans un premier temps, le remplissage des pores dont la

taille est supérieure à $0,1 \mu\text{m}$. Dans un second temps, les pores plus gros se remplissent. Il s'agit de la condensation capillaire dans des pores dont la taille est inférieure à $5 \mu\text{m}$.

- Le domaine gravitationnel est atteint une fois que les pores capillaires sont remplis. Le transport de l'eau dans les pores de diamètres supérieurs à $5 \mu\text{m}$ ne peut se faire que sous l'effet d'un gradient de pression ou par gravité.

L'équilibre hydrique entre le matériau et l'environnement est donc piloté par les isothermes de sorption. Pour des questions d'équilibre thermodynamique et de chaleur latente spécifique, les phases de séchage et d'humidification se traduisent par un phénomène d'hystérésis dont les différentes formes peuvent définir 6 classes de comportement selon Rouquerol & al. (1994), Figure I-4

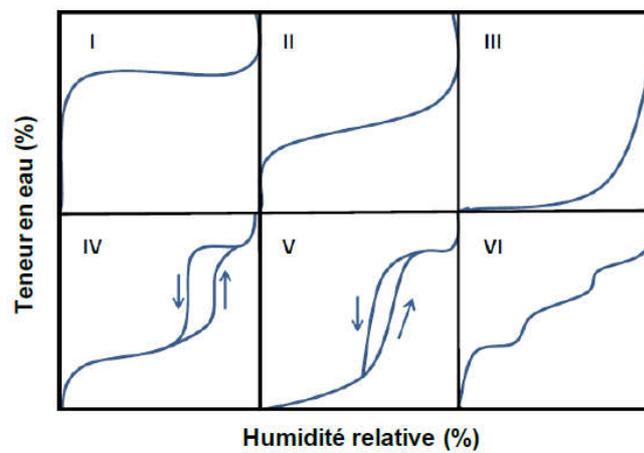


Figure I-4 : Classification des isothermes d'adsorption (Rouquerol & al. 1994)

I.1.2. Matériau bois

I.1.2.1. Anatomie du bois

Blass & Carmen (2017) ont observé le bois à différentes échelles, Figure I-5, passant de l'échelle macroscopique à microscopique, puis moléculaire.

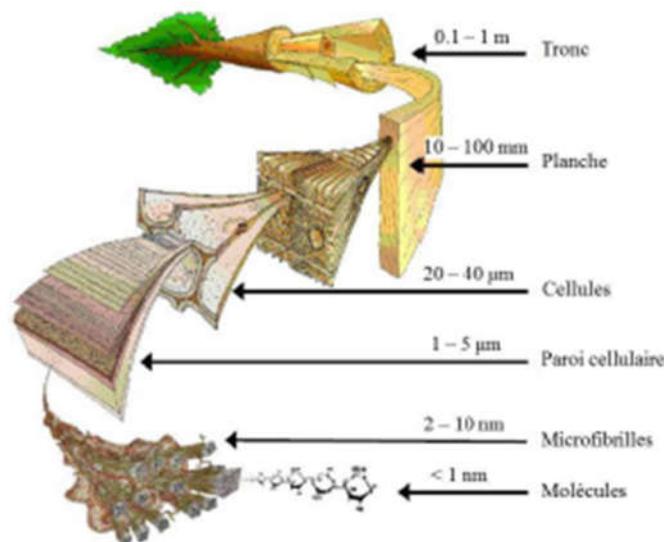


Figure I-5 : Niveaux hiérarchiques du bois (Blass & Carmen 2017)

a. Structure macroscopique

Le bois est un matériau orthotrope caractérisé par trois plans de symétries orthogonaux. Cela confère au matériau des comportements mécaniques et de transferts différents selon les trois directions de référence. L'organisation des cellules par plans est appelée plan ligneux.

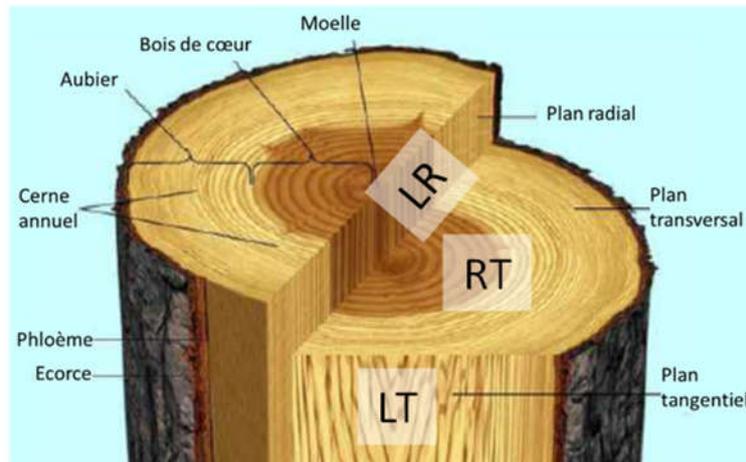


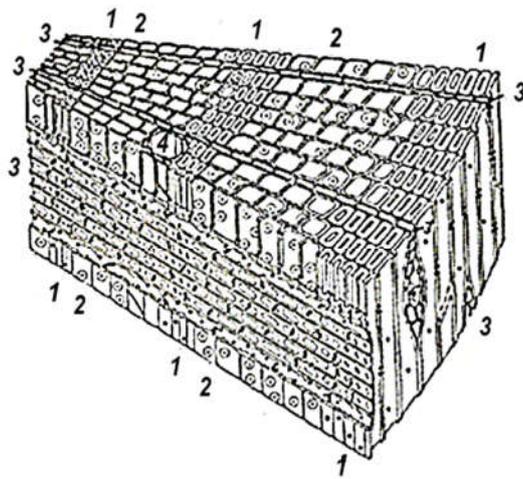
Figure I-6 : Plans de coupe d'une tranche de tronc d'arbre

Les plans principaux sont des coupes transversales, radiales et tangentielles, Figure I-6. Ils sont référencés comme suit :

- Le plan transversal RT est perpendiculaire à l'axe du tronc (direction longitudinale). Ce plan contient les cernes de croissances annuels concentriques (plus ou moins circulaires) révélant le bois de cœur et l'aubier.
- Le plan radial LR coupe le tronc le long de l'axe longitudinal confondu avec la moelle. Ici, les rayons courent horizontalement et les cernes de croissance sont clairement visibles.
- Le plan tangentiel LT est perpendiculaire aux deux plans précédents. Les cellules axiales sont facilement visibles, tandis que les rayons radiaux sont visibles dans le plan transversal

b. Structure microscopique

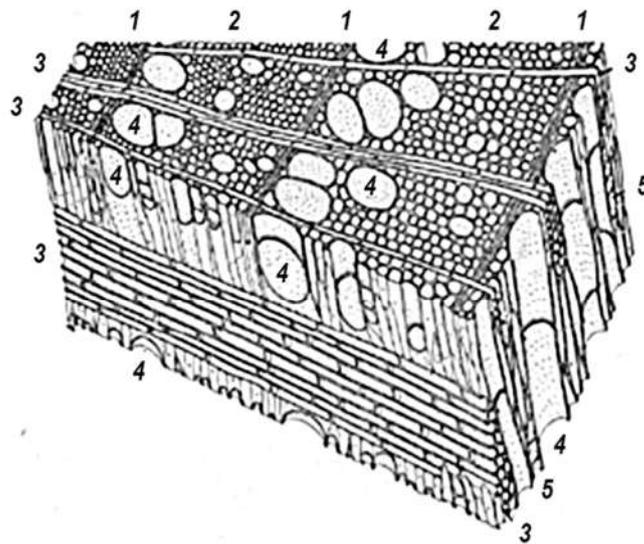
La structure des résineux ne comprend que deux types de cellules, les trachéides et les cellules du parenchyme. Les cellules sont disposées en deux systèmes entrecroisés de sorte que les trachéides se distinguent en termes de trachéides longitudinales et perpendiculaires, tandis que le parenchyme comprend le parenchyme longitudinal et les rayons, Figure I-7 (Blass & Carmen 2017)



1) Trachéides de bois final; 2) Trachéides de bois initial; 3) Rayons; 4) Canaux en résines

Figure I-7 : Structure schématique et types de cellules de résineux (Blass & Carmen 2017)

Les feuillus, plus anciens, ont évolué vers un niveau de complexité plus élevé que les résineux et comprennent, selon les espèces, plusieurs types de cellules avec des spécificités plus étendues, Figure I-8 (Blass & Carmen 2017). C'est pour cette raison que nous distinguerons la fibre des feuillus et la trachéide des résineux.



1) Section de bois final; 2) Section de bois initial; 3) Rayons; 4) Vaisseaux; 5) Parenchyme longitudinal

Figure I-8 : Structure schématique et types de cellules de bois feuillu (Blass & Carmen 2017)

Cependant, dans les deux cas, les fibres et les trachéides permettent le transport de l'eau. Ce transport se fait via de petites ouvertures ou des lacunes dans la paroi des fibres, appelées fosses ou ponctuations aréolées, Figure I-9 (Blass & Carmen 2017). En plus de laisser passer l'eau, elles empêchent toute pénétration d'air dans les cellules. La fermeture d'une fosse étant généralement irréversible, il faut en tenir compte lors du séchage ou de l'imprégnation du bois.

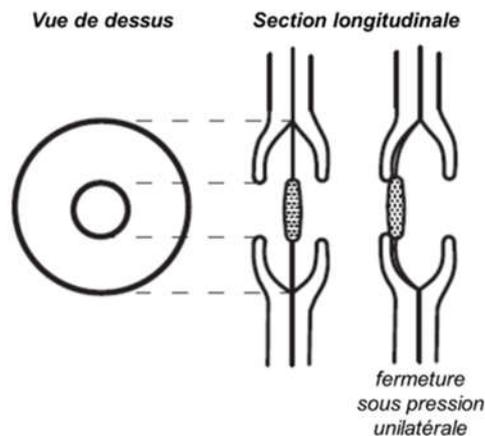


Figure I-9 : Représentation schématique des fosses bordées de résineux (Blass & Carmen 2017)

1.1.2.2. L'eau dans le bois

L'eau dans le matériau se trouve selon trois états distincts :

- Eau libre : Sous une forme liquide ou vapeur, l'eau libre dans les lumens et dans les cavités de cellules est trouvée. Pour une utilisation en service, nous estimons que cette eau libre n'est pas présente dans les structures à l'exception près des éléments en immersion. Cette eau libre est surtout présente dans le bois vivant et s'échappera dès les premiers instants de séchage du bois après abattage de l'arbre.
- Eau liée : Elle est fixée par l'attraction intermoléculaire à l'intérieur des parois cellulaires. Elle caractérise le domaine hygroscopique délimitant l'état anhydre et le point de saturation des fibres.
- Eau de constitution : Elle entre dans la composition chimique de la cellule. Elle est caractérisée par de fortes liaisons ne permettant pas de l'extraire sans brûler la matière ligneuse.

Ce que l'on définit habituellement comme teneur en eau dans le bois comprend à la fois de l'eau libre et de l'eau liée. Comme tous les matériaux poreux comme la terre crue présentée précédemment, le caractère hygroscopique du matériau bois permet d'absorber l'eau (présente dans l'air ambiant humide) et de la stocker dans les membranes et les cavités cellulaires. Le comportement hygroscopique du bois décrit l'adsorption et la désorption de molécules d'eau afin de tendre vers un équilibre hydrique lié à l'hygrométrie et la température de l'environnement proche. L'adsorption d'humidité se produit selon deux niveaux. Dans la plage comprise entre 0% et 30% (Point de Saturation des Fibres ou PSF), l'humidité est transférée dans les parois cellulaires. Au-dessus du PSF, les parois cellulaires sont complètement saturées et l'humidité est transférée dans les cavités des cellules (lumens), Figure I-10 (Dietsch & al. 2015a). Il est à noter que le PSF varie en fonction des essences (Kollmann & Côté 1968).

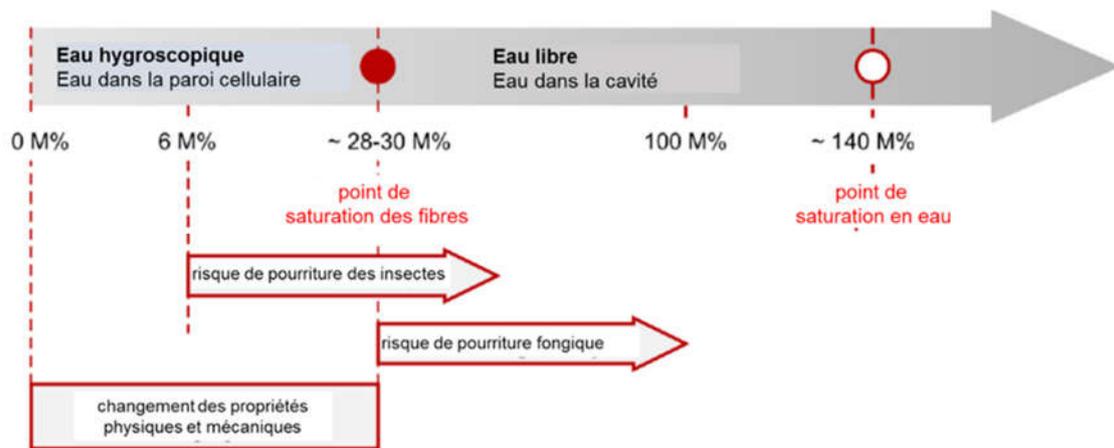


Figure I-10 : Rang de la teneur en eau du bois et influence sur ses propriétés et sa vulnérabilité (Dietsch & al. 2015a)

Les variations de la teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres affectent les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques du bois, par exemple les valeurs de résistance ou le module d'élasticité (Kollmann & Côté 1968; Siau 1984). Ce domaine hygroscopique est également caractérisé par des variations dimensionnelles induites caractérisant le phénomène de retrait-gonflement.

Les variations dimensionnelles dues aux variations de teneur en eau (retrait, gonflement) sont différentes selon les trois axes principaux d'orthotropie (longitudinal, tangentiel ou radial). Le retrait et le gonflement sont significativement plus prononcés dans les directions radiale et tangentielle que dans la direction longitudinale, Figure I-11 (Guitard 1987)

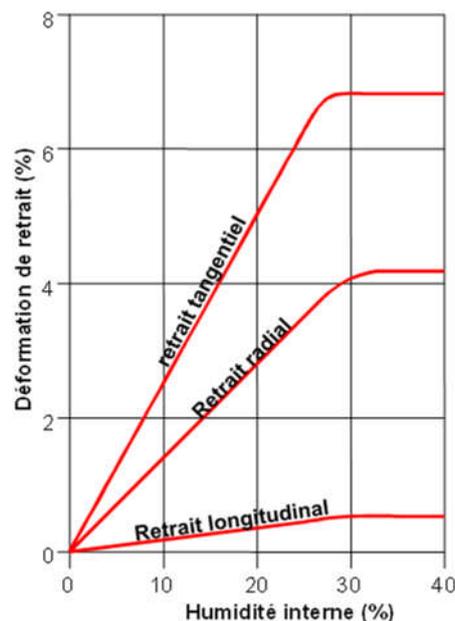


Figure I-11 : Retrait ou gonflement selon la direction du matériau (Guitard 1987)

Lorsqu'il est confiné dans un environnement stabilisé, le bois atteint une teneur en eau d'équilibre qui est influencée par l'humidité relative, la température et la pression atmosphérique de l'ambiance. La relation entre ces propriétés et la teneur en eau d'équilibre du bois est souvent représentée sous la forme d'isothermes de sorption. Comme le met en

évidence (Manfoumbi Boussougou 2012), l'équilibre hydrique dépend des phases d'adsorption et de désorption, Figure I-12

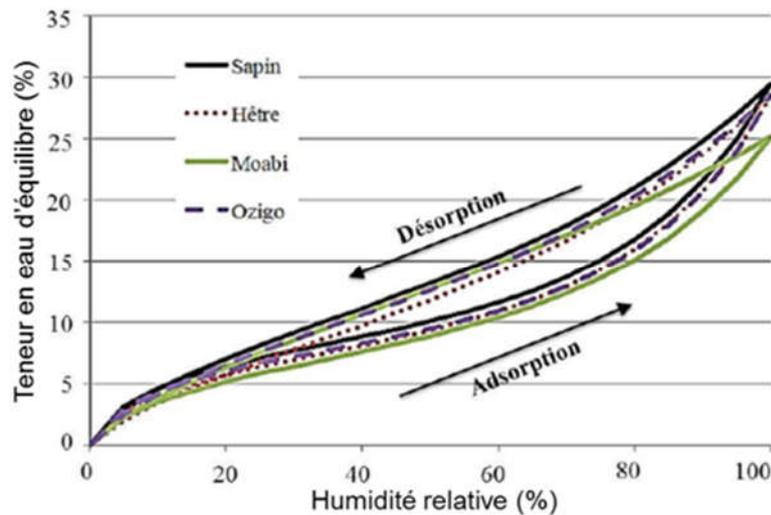


Figure I-12 : Des isothermes de sorption des 4 essences testées (Manfoumbi Boussougou 2012)

I.1.3. Diffusion hydrique dans les matériaux hygroscopiques

Différentes formulations sont possibles en fonction du potentiel choisi pour caractériser la diffusion hydrique

I.1.3.1. Choix de la teneur massique en eau comme potentiel de diffusion

a. Loi de Fick

Le processus de diffusion hydrique se traduit par un transfert d'une masse d'eau sans générer de mouvement macroscopique du support. Ce transport se produit lorsque le système est hors équilibre, cherchant à déplacer les molécules d'eau des sites les plus humides vers les régions les plus sèches, ce qui tend à homogénéiser la répartition hydrique spatiale.

Considérons un milieu fermé (gaz, solide ou liquide) de volume V délimité par une surface S , Figure I-13

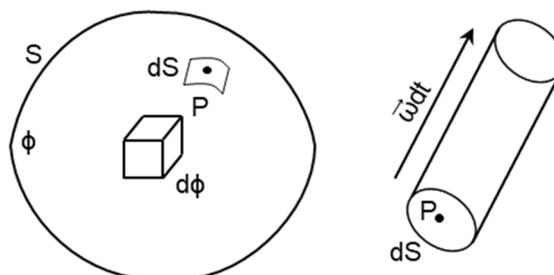


Figure I-13 : Transfert de masse d'un milieu fermé

- Soit c la concentration massique d'eau liée définie au point P et à l'instant t
- Soit \vec{w} le vecteur densité surfacique de flux de massique.
- Soit ϕ la quantité massique d'eau traversant la surface $d\vec{S}$ ($d\vec{S} = dS \cdot d\vec{n}$) entre les instants t et $t+dt$

La quantité massique d'eau traversant la surface $d\vec{S}$ pendant dt est définie comme suit :

$$\phi = \vec{\omega}(P, t) \cdot d\vec{S} \cdot dt \quad (I-1)$$

L'équation de conservation de la masse s'écrit comme suit :

$$\text{div} \vec{\omega} + \frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (I-2)$$

Le processus de diffusion cesse lorsque la répartition $c(P, t)$ est homogène. Le flux hydrique s'oriente des régions les plus riches vers les moins riches. Fick a proposé sa première loi rendant compte de ces deux observations en proposant une relation linéaire écrite sous sa forme tridimensionnelle suivante :

$$\vec{\omega} = -D \cdot \overrightarrow{\text{grad}c} \quad (I-3)$$

$\underline{\underline{D}}$ désigne le tenseur de diffusion hydrique. Il fait partie des paramètres intrinsèques au matériau. Si le cas linéaire est le plus simple à traiter, des approches non linéaires peuvent être nécessaires dans le sens où le coefficient de diffusion peut dépendre de l'état hydrique.

b. Loi de diffusion

L'équation de diffusion (équation de Laplace ou seconde loi de Fick) s'obtient en remplaçant la Loi de Fick (I-3) dans l'équation de continuité (I-2). Nous obtenons ainsi l'expression suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div} \left(\underline{\underline{D}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}c} \right) \quad (I-4)$$

La loi de passage reliant concentration massique d'eau liée et humidité interne s'exprime, via la masse volumique anhydre du matériau φ_{anh} telle que :

$$w = \frac{c}{\varphi_{\text{anh}}} \quad (I-5)$$

En considérant un milieu homogène, la seconde loi de Fick s'exprime alors :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \text{div} \left(\underline{\underline{D}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}w} \right) \quad (I-6)$$

$\underline{\underline{D}}$ représente le tenseur de diffusion hydrique. Dans un milieu isotrope, ce tenseur est diagonal composé de trois valeurs identiques. On parlera alors de coefficient de diffusion D tel que :

$$\underline{\underline{D}} = D \cdot \underline{\underline{I}} \quad (I-7)$$

$\underline{\underline{I}}$ désigne le tenseur unité.

Lorsque le milieu est caractérisé par une orthotropie matérielle, tel que le bois, dans le repère principal d'orthotropie ce tenseur prend la forme d'une matrice diagonale composée de trois coefficients de diffusion distincts. D_α

c. Diffusion non linéaire

Dans le domaine des matériaux hygroscopiques, il est souvent mis en évidence un processus de diffusion non linéaire se traduisant par une dépendance du tenseur de diffusion avec la teneur en eau w . Droin-Josserand & al. (1989) ont mis en évidence un coefficient de diffusion dépendant de la teneur en eau en accord avec la forme exponentielle suivante :

$$D_{\alpha} = D_{\alpha}^{\circ} \cdot \exp(\zeta \cdot w) \quad (I-8)$$

D_{α}° représente le coefficient de diffusion à l'état anhydre et ζ un coefficient de non-linéarité. En intégrant l'influence de la température, Simpson (1993) a proposé de compléter l'expression ci-dessus en introduisant un effet de température sur le coefficient de diffusion anhydre sous la forme de la loi d'Arrhenius suivante :

$$D_{\alpha}^{\circ}(T) = F_{\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{5280}{T}\right) \exp(G_{\alpha} \cdot w) \quad (I-9)$$

T désigne la température exprimée en Kelvin. F_{α} et G_{α} sont deux constantes caractérisant le matériau.

1.1.3.2. *Choix de l'humidité relative comme potentiel de diffusion*

Dans une autre approche, proposée par (Künzel, 1995), le choix de l'humidité relative comme potentiel de diffusion hydrique permet un couplage complet entre les transferts de chaleur et de masse. Nous présentons brièvement les étapes qui conduisent à cette formulation

a. Equation de bilan hydrique

La densité surfacique de flux massique total d'humidité $\vec{\omega}_h$ résulte d'un terme $\vec{\omega}_v$ de migration sous forme vapeur et d'un terme $\vec{\omega}_l$ de migration sous forme liquide.

Le potentiel qui régit la diffusion sous forme de vapeur est classiquement la pression de vapeur p_v . Dans l'expression suivante, δ désigne la perméabilité à la vapeur du matériau.

$$\vec{\omega}_v = -\delta \cdot \vec{\text{grad}} p_v \quad (I-10)$$

Le potentiel qui régit la diffusion sous forme liquide est la teneur en eau pondérale w :

$$\vec{\omega}_l = -\varphi_{anh} \cdot D_w \cdot \vec{\text{grad}} w \quad (I-11)$$

D_w représente le coefficient de diffusion liquide.

Considérant que, d'une part, la pression de vapeur p_v est le produit de la pression de vapeur saturante p_{vs} par l'humidité relative H_r : $p_v = H_r \cdot p_{vs}$ et que, d'autre part, la teneur en eau pondérale w peut être directement reliée à l'humidité relative par l'isotherme de sorption, il est possible d'exprimer le flux total d'humidité en fonction uniquement du gradient d'humidité relative et du gradient de pression de vapeur saturante :

$$\vec{\omega}_h = -\delta \cdot p_{vs} \cdot \vec{\text{grad}} H_r - \delta \cdot H_r \cdot \vec{\text{grad}} p_{vs} - \varphi_{anh} \cdot D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial H_r} \cdot \vec{\text{grad}} H_r \quad (I-12)$$

Ou encore sous la forme :

$$\overrightarrow{\omega_h} = -\delta^* \cdot p_{vs} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} H_r - \delta \cdot H_r \cdot \overrightarrow{\text{grad}} p_{vs} \quad (I-13)$$

où δ^* désigne la perméabilité apparente à la vapeur d'eau :

$$\delta^* = \delta + \frac{\varphi_{anh} \cdot D_w}{p_{vs}} \cdot \frac{\partial w}{\partial H_r} \quad (I-14)$$

La dérivée $\xi = \partial w / \partial H_r$ est la pente de la courbe isotherme, encore appelée capacité hydrique.

L'équation locale de bilan hydrique traduit la variation temporelle de teneur en eau en un point sous l'effet d'un déséquilibre des flux hydriques sous forme liquide et vapeur :

$$\left(\varphi_{anh} \cdot \frac{\partial w}{\partial H_r} \right) \cdot \frac{\partial H_r}{\partial t} = \text{div}(\delta^* \cdot p_{vs} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} H_r) + \text{div}(\delta \cdot H_r \cdot \overrightarrow{\text{grad}} p_{vs}) \quad (I-15)$$

b. Equation de bilan thermique

La densité surfacique de flux thermique par conduction s'exprime par la loi de Fourier :

$$\overrightarrow{\omega_T} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (I-16)$$

Où λ désigne la conductivité thermique du matériau.

L'équation locale de bilan thermique traduit la variation temporelle de l'énergie thermique volumique en un point sous l'effet d'un déséquilibre des flux thermiques de conduction et de sources volumiques :

$$(\overline{\varphi C}) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) + H_s \cdot \text{div}(\delta \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H_r \cdot p_{vs})) \quad (I-17)$$

$(\overline{\varphi C})$ est la capacité thermique volumique du matériau humide, qui dépend de la masse volumique et de la chaleur spécifique du matériau anhydre (respectivement φ_{anh} et C_{anh}), de la teneur en eau pondérale w et de la chaleur spécifique de l'eau sous forme liquide :

$$(\overline{\varphi C}) = \varphi_{anh}(C_{anh} + w \cdot C_w) \quad (I-18)$$

L'expression $H_s \cdot \text{div}(\delta \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H_r \cdot p_{vs}))$ est un terme source correspondant à la chaleur de sorption échangée lors de l'adsorption ou la désorption de l'eau par le matériau. H_s désigne la chaleur de sorption. Cette formulation présente l'avantage, par rapport à la seconde loi de Fick, de permettre le couplage entre transferts hydriques et thermiques. D'autre part, les équations de continuité aux interfaces et d'échanges superficiels se trouvent considérablement simplifiées grâce à l'utilisation de l'humidité relative de l'air présent dans les vides et dans les ambiances. La mise en œuvre numérique est présentée plus en détail en Annexe 1.

I.2. Propriétés électriques des matériaux de construction

I.2.1. Comportement électrique

I.2.1.1. Loi d'Ohm

Soit \vec{E} le champ électrique responsable de la mise en mouvement des porteurs de charge q à la vitesse \vec{v} . Celles-ci sont, d'une part, soumises à la force électrique suivante :

$$\vec{f}_{\text{él}} = q\vec{E} \quad (I-19)$$

Elles sont également soumises à une force due aux charges fixes. On modélise cette force par une force visqueuse analogue à un 'frottement fluide' :

$$\vec{f}_{\text{rés}} = -\zeta\vec{v} \quad (I-20)$$

ζ est une constante phénoménologique dépendant du milieu conducteur considéré. Si m désigne la masse d'un porteur de charge, le principe fondamental de la dynamique de translation (deuxième loi de Newton) s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\zeta}{m}\vec{v} = \frac{q}{m}\vec{E} \quad (I-21)$$

Soit t_r le temps de relaxation du milieu défini par :

$$\frac{1}{t_r} = \frac{\zeta}{m} \quad (I-22)$$

Les expressions (I-21) et (I-22) permettent d'en déduire l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{1}{t_r}\vec{v} = \frac{q}{m}\vec{E} \quad (I-23)$$

En supposant que le champ électrique ne dépend pas du temps, la solution de l'équation différentielle ci-dessus permet d'exprimer la vitesse des porteurs de charge selon la forme suivante :

$$\vec{v} = \vec{v}_0 \exp\left(-\frac{t}{t_r}\right) + \frac{qt_r}{m}\vec{E} \quad (I-24)$$

Au-delà du régime transitoire, le régime permanent se résume à l'expression suivante ($t \gg t_r$) :

$$\vec{v} = \frac{qt_r}{m}\vec{E} \quad (I-25)$$

Soit ρ_m désigne la densité de charges mobiles. La densité de courant électrique \vec{J}_c se définit comme suit :

$$\vec{J}_c = \rho_m \cdot \vec{v} \quad (I-26)$$

La loi d'Ohm s'exprime par la proportionnalité entre la densité de courant et le champ électrique telle que :

$$\vec{J}_c = \sigma \cdot \vec{E} \quad (I-27)$$

La loi d'Ohm est ainsi expliquée à partir de la limitation de la vitesse de migration des porteurs du fait de leurs interactions avec le milieu considéré.

1.2.1.2. Polarisation provoquée

La densité totale de courant \vec{J}_t (A/m²) est la somme de la densité de courant de conduction \vec{J}_c et de la densité de courant de déplacement \vec{J}_d telle que :

$$\vec{J}_t = \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (I-28)$$

\vec{J}_d est la dérivée de l'induction électrique \vec{L} (C/m²) telle que :

$$\vec{J}_d = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (I-29)$$

\vec{L} est une fonction vectorielle linéaire du champ électrique \vec{E} et de la polarisation \vec{P} telle que :

$$\vec{L} = \xi_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (I-30)$$

ξ_0 est la constante diélectrique du vide (8.854.10⁻¹² F/m). \vec{P} est proportionnelle à \vec{E} suivant l'expression suivante :

$$\vec{P} = \xi_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} \quad (I-31)$$

χ désigne la susceptibilité électrique du milieu. En combinant les expressions (I-29) et (I-31), \vec{L} admet la forme suivante :

$$\vec{L} = (1 + \chi) \cdot \xi_0 \cdot \vec{E} \quad (I-32)$$

On note ξ_r et ξ les constantes diélectriques relative et totale telle que :

$$\begin{aligned} \xi_r &= (1 + \chi) \\ \xi &= \xi_r \cdot \xi_0 \end{aligned} \quad (I-33)$$

Selon (I-33), l'expression (I-32) se réécrit comme suit :

$$\vec{L} = \xi \cdot \vec{E} \quad (I-34)$$

Finalement, en considérant les expressions (I-28), (I-29) et (I-34), l'équation (I-28) prend la forme de l'équation différentielle suivante :

$$\vec{J}_t = \sigma \cdot \vec{E} + \frac{d}{dt} (\xi \cdot \vec{E}) \quad (I-35)$$

En considérant une constante diélectrique indépendante du temps, l'équation (I-35) devient :

$$\frac{d\vec{E}}{dt} + \frac{\sigma}{\xi} \cdot \vec{E} = \frac{\vec{J}_t}{\xi} \quad (I-36)$$

On considère à présent une sollicitation en densité de courant imposée prenant la forme d'un créneau telle que, dans un cas unidirectionnel :

$$J(t) = J_0 \cdot H(t - t_0) \quad (I-37)$$

H(t) désigne la fonction d'Heaviside telle que :

$$\begin{aligned} H(t) &= 0 \text{ si } t < 0 \\ H(t) &= 1 \text{ si } t = 0 \end{aligned} \quad (I-38)$$

Dans ces conditions, la résolution unidirectionnelle de l'équation différentielle (I-36) donne l'évolution temporelle du champ électrique E suivante :

$$E(t, t_0) = Q \cdot \exp\left(-\frac{\sigma}{\xi}(t - t_0)\right) + \frac{J_0}{\sigma} \quad (I-39)$$

Pour $t = t_0$, On note E_s , le saut initial du champ électrique ; Dans ces conditions, la constante Q admet la forme suivante :

$$Q = E_s - \frac{J_0}{\sigma} \quad (I-40)$$

En considérant l'expression (I-19), l'évolution temporelle du champ électrique, équation (I-39), devient :

$$E(t) = \left[E_s \cdot \exp\left(-\frac{\sigma}{\xi}(t - t_0)\right) + \frac{J_0}{\sigma} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\sigma}{\xi}(t - t_0)\right)\right) \right] \cdot H(t - t_0) \quad (I-41)$$

L'évolution du champ électrique, provoquée par un échelon de densité de courant J_0 , prend la forme exponentielle présentée en Figure I-14

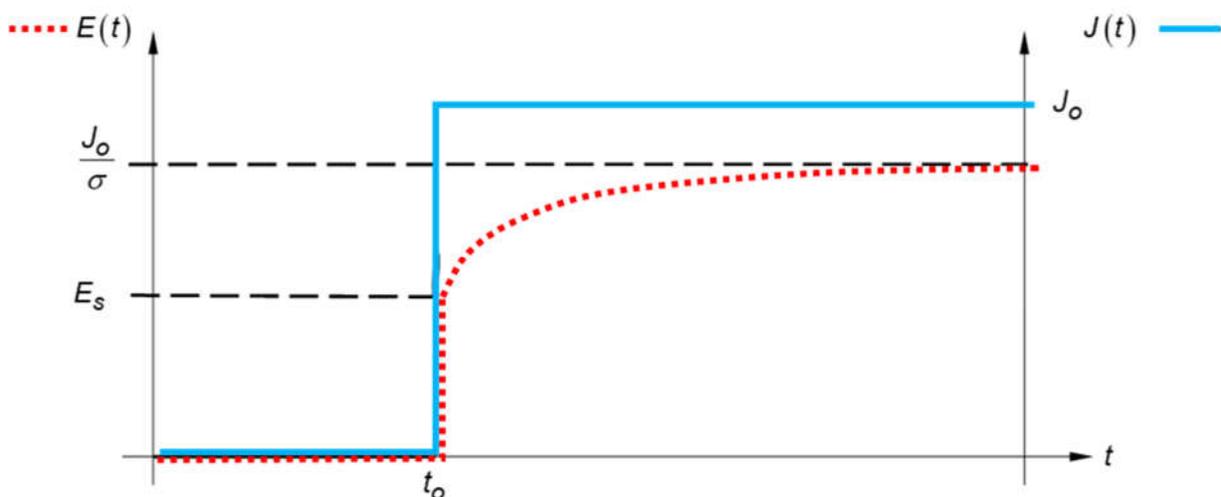


Figure I-14 : Evolution de E sous une densité de courant constante J_0

Afin de réduire ou d'annuler les effets de polarisation provoquée, il peut être appliqué soit une annulation des courants de polarisation comme l'indique la Figure I-15. Dans le cas d'un comportement électrique linéaire et par application du principe de superposition, la réponse en champs électrique, après annulation de la densité de courant, s'exprime par l'expression suivante :

$$E(t) = \left[\left(E_s - \frac{J_0}{\sigma} \right) \cdot \left(\exp\left(\frac{\sigma}{\xi}(t-t_0)\right) - \exp\left(\frac{\sigma}{\xi}(t-t_1)\right) \right) \right], \text{ avec } t > t_1 \quad (I-42)$$

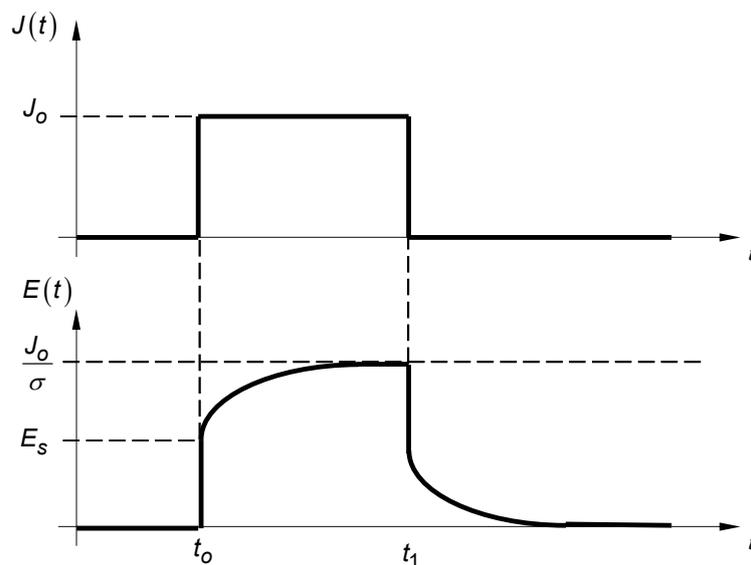


Figure I-15 : Evolution de E sous une annulation de densité de courant

I.2.1.3. Application à un milieu semi-infini

Pour la circulation du courant continu dans un milieu semi-infini tel qu'un sol, la résistivité est la capacité d'un milieu à s'opposer au passage d'un courant électrique.

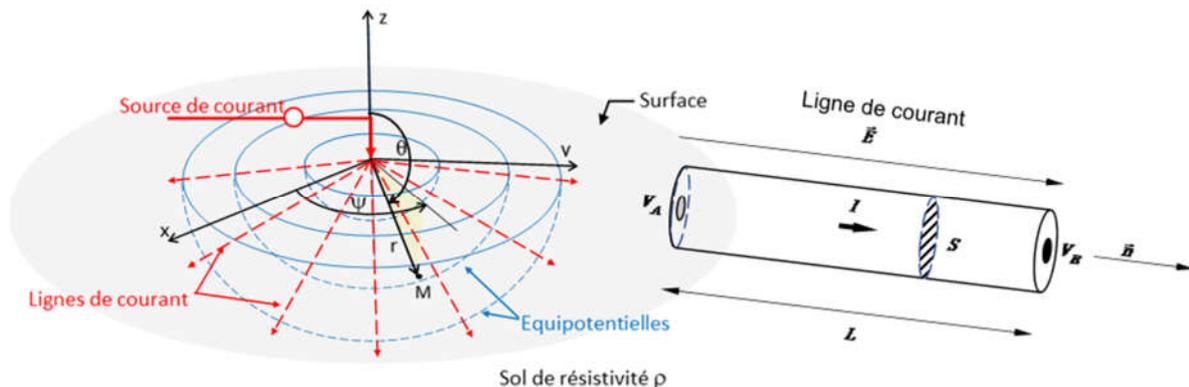


Figure I-16 : Electrode de courant à la surface d'un sol homogène

En effet, les dérivées par rapport au temps disparaissent. La divergence de la densité de courant est nulle excepté à la source.

$$\text{div} \vec{j}_c = 0 \quad (I-43)$$

En regroupant les expressions (I-27) et (I-43), nous obtenons l'équation de Laplace :

$$\frac{1}{\rho} \operatorname{div} \vec{E} = -\frac{1}{\rho} (\operatorname{grad} V)^2 = 0 \quad (I-44)$$

Comme indiqué en Figure I-16, les milieux semi-infinis nous invitent à exprimer l'équation de Laplace dans un repère sphérique (vision tridimensionnelle des lignes de courant) :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial \psi^2} = 0 \quad (I-45)$$

Comme pour une seule source de courant, le flux de courant est invariant suivant les angles ψ et θ , l'équation (I-45) se simplifie selon l'équation différentielle :

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (I-46)$$

L'équation (I-46) admet la solution générale suivante, C_1 et D_1 étant deux constantes d'intégration :

$$\begin{aligned} r^2 \frac{\partial V}{\partial r} &= C_1 \\ V &= -\frac{C_1}{r} + D_1 \end{aligned} \quad (I-47)$$

Le potentiel tendant vers 0 lorsque r tend vers l'infini, la levée de l'indétermination en zéro nécessite d'avoir une constante D_1 nulle. Pour évaluer la constante C_1 , nous exprimons le courant total I de telle sorte que :

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S} = \int_S \frac{\vec{E}}{\rho} d\vec{S} = \int_S \frac{C_1}{\rho r^2} d\vec{S} = -\frac{2\pi C_1}{\rho} \quad (I-48)$$

Comme le flux de courant est radial, la densité de courant doit être uniforme au travers d'une surface hémisphérique de rayon r autour de la source. I est donc l'intégrale de la densité de courant sur cette surface (Figure I-16). L'expression du potentiel devient alors :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (I-49)$$

Avec n sources de courant, le potentiel au point M vaut alors :

$$V_M = \frac{\rho}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{r_i} \quad (I-50)$$

1.2.1.4. Analogie hydrique

Tout comme la loi de Fick, la loi d'Ohm est une loi "phénoménologique" : cela signifie que ce n'est pas une loi physique, mais une relation mathématique vérifiée sous des hypothèses d'emploi bien établies et des conditions d'approximation. Ces deux lois traduisent que les

effets (densité de courant ou densité de flux de masse) sont proportionnels à la cause (gradient de potentiel ou de densité particulaire).

Le Tableau I-1 résume les analogies entre les lois de Fick et d'Ohm. Elles correspondent à une évolution spontanée du milieu qui tend vers un équilibre en minimisant les gradients, et ce, conformément au second principe de la thermodynamique :

Tableau I-1 : Analogies entre les lois de Fick et d'Ohm

Loi de Fick	Loi d'Ohm
Vecteur densité de particules $\vec{\omega}$	Vecteur densité de courant électrique \vec{j}
Densité particulaire c	Potentiel V
Coefficient de diffusion D	Conductivité électrique σ
$\vec{\omega} = -D \text{grad}c$	$\vec{j} = -\sigma \text{grad}V$

1.2.2. Propriétés électriques des matériaux

1.2.2.1. Sols et matériaux argileux

McCarter (1984) ; Fukue & al. (1999) ; Samouëlian & al. (2005) ont présenté la variation de la résistivité électrique en fonction des propriétés du sol, notamment la nature des constituants solides (distribution granulométrique, minéralogie), la disposition des vides (porosité, distribution granulométrique, connectivité), le degré de saturation en eau (teneur en eau), la résistivité électrique du fluide (concentration en soluté) et la température.

L'air est un isolant parfait, c'est-à-dire infiniment résistif. La résistivité de la solution d'eau est fonction de la concentration ionique. La résistivité des grains solides est liée à la densité des charges électriques à la surface des constituants. Ces paramètres affectent la résistivité électrique mais à des degrés différents. Des mesures de résistivité électrique ont été réalisées pour établir des relations entre la résistivité électrique et chaque caractéristique des constituants du sol.

Des méthodes capacitatives sont également utilisées en géophysique pour l'analyse des sols. Elles sont basées sur la mesure des propriétés diélectriques (permittivité complexe) pour une fréquence donnée (Gardner & al. 1998; Eller & Denoth 1996).

a. Nature et disposition des constituants solides

Palacky (1987) a synthétisé les rangs typiques de résistivités des matériaux minéraux terrestres (Figure I-17) variant de 0.01 Ωm à $10^5 \Omega\text{m}$

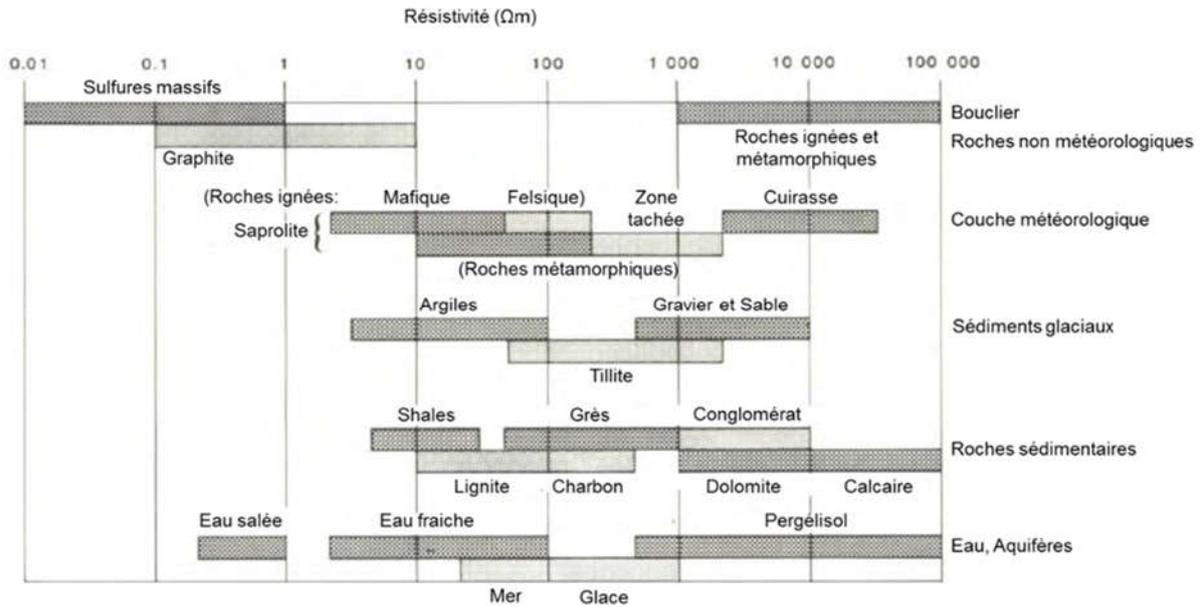


Figure I-17 : Rang typique de résistivités des matériaux terrestres (Palacky 1987)

La conductivité électrique est liée à la taille des particules par la densité de charge électrique à la surface des constituants solides.

Dans les sols argileux, les charges électriques situées à la surface des particules d'argile conduisent à une conductivité électrique plus élevée que dans les sols à texture grossière en raison d'une très importante surface spécifique. Avec leur modèle, il est possible d'utiliser la résistivité pour décrire la microstructure de l'argile (Russell & Barker 2010 ; Shevni & al. 2007; Fukue & al. 1999 ; Waxman & Smits 1968). La résistivité électrique, enregistrée par Giao & al. (2003) sur 25 échantillons d'argile prélevés dans le monde, variait de 1 à 12 Ωm (Figure I-18).

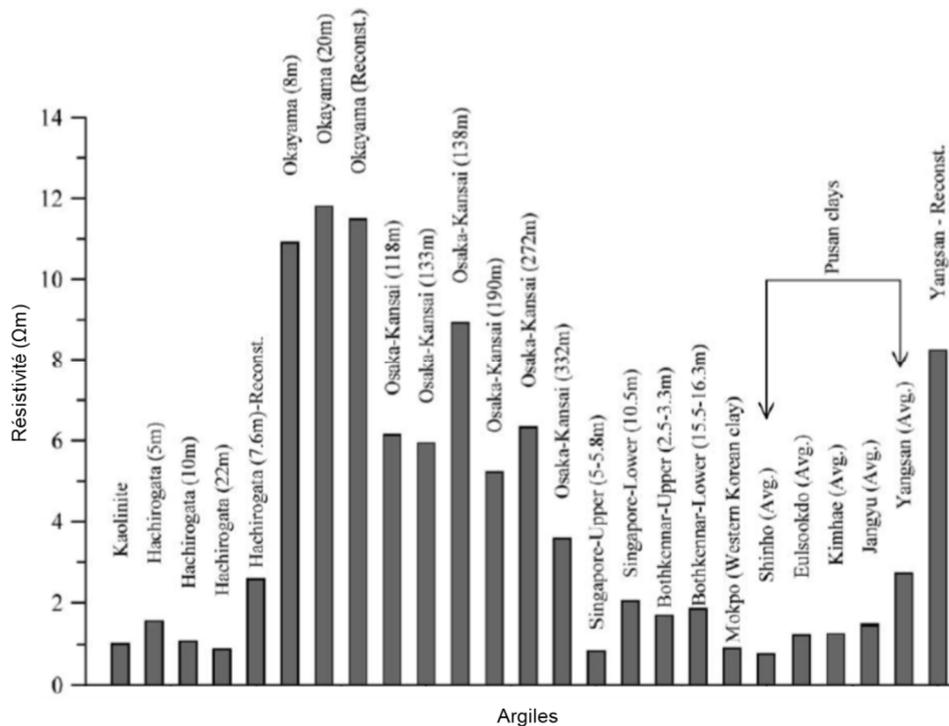


Figure I-18 : Résistivité électrique de différentes argiles dans le monde (Giao & al. 2003)

Lamotte & al. (1994) ont étudié deux sols sableux de composition très similaire mais de résistivité électrique significativement différente. Dans le sol sableux présentant la plus grande résistivité, peu de micro-agrégats d'argile ont été juxtaposés aux grains de sable. Tandis que dans le deuxième sol, les grains de sable ont été recouverts et pontés par l'argile conduisant à une grande continuité de la phase argileuse.

La géométrie des pores (forme et distribution des vides) détermine la proportion d'air et d'eau en fonction du potentiel hydrique. Robain & al. (1996) ont lié les variations de résistivité à la structure des matériaux, identifiant que les valeurs de résistivité élevée et faible étaient liées respectivement à la macro et à la méso-porosité. Cela a permis la détection de terriers de blaireaux et l'étude de leur réseau comme démontré par Butler & al. (1994). Cela a également permis l'étude de l'ouverture de fissures à l'échelle centimétrique par Samouëlian & al. (2003). La porosité peut être obtenue pour la propriété électrique via la loi d'Archie (1942) qui, pour un sol saturé sans argile, s'écrit :

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = c\phi^{-c_m} \quad (I-51)$$

F représente le facteur de formation. c_m et c sont des constantes liées, respectivement, au coefficient de saturation et le facteur de cimentation. ρ et ρ_w sont, respectivement, la résistivité de la formation et la résistivité de l'eau interstitielle. Enfin, ϕ est la porosité du milieu.

Le facteur F dépend de la géométrie des pores. Connaissant la résistivité interstitielle et les constantes c et c_m la porosité peut être calculée à partir de la valeur de résistivité. La porosité calculée doit être considérée comme une valeur de porosité «apparente» car la loi d'Archie suppose que tout espace vide est rempli d'eau, excluant la possibilité de présence de gaz.

b. Influence de la teneur en eau

Le courant électrique dans les sols est d'origine électrolytique. Il est basé sur le déplacement des ions dans l'eau interstitielle. Il est donc plus important lorsqu'il y a des sels dissous. Ainsi, le courant électrique dépend de la quantité d'eau dans les pores et de sa composition ionique. La conductivité électrique de la solution est supposée rester constante. Cette hypothèse permet de relier toute variation de conductivité électrique à une variation de teneur en eau (Noborio 2001 ; Bhatt & Jain, 2014).

Samouëlian & al. (2005) ont synthétisé des résultats expérimentaux de McCarter (1984) et Michot & al. (2001) (Figure I-19), reliant résistivité électrique et teneur en eau. De la même façon, Fukue & al. (1999) et Cosenza & al. (2006) ont établi la variation de la résistivité en fonction de la teneur en eau de deux types de sol (Figure I-20). Dans tous les cas, la résistivité électrique diminue lorsque la teneur en eau augmente. On peut également voir que pour de faibles teneurs en eau, la résistivité électrique augmente exponentiellement avec la diminution de la teneur en eau.

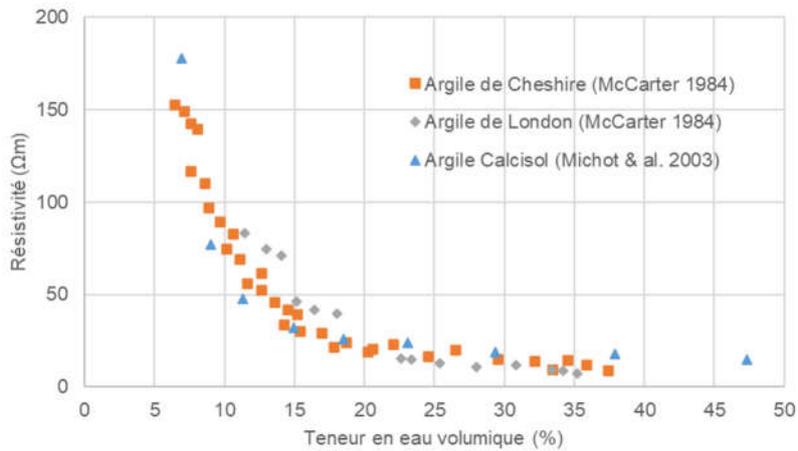


Figure I-19 : Relation entre la teneur en eau volumétrique et la résistivité électrique pour différents types de sols

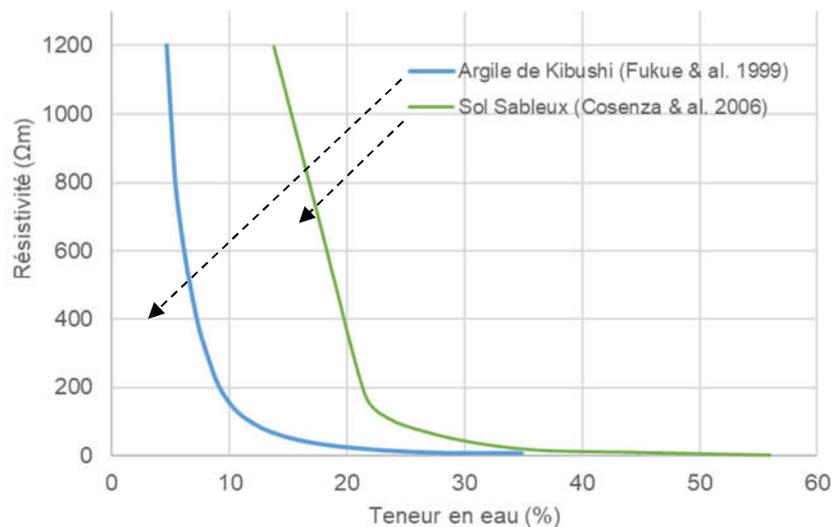


Figure I-20 : Relation entre la teneur en eau et la résistivité électrique pour deux types de sols

Goyal & al. (1996) ont proposé la relation linéaire entre résistivité et teneur en eau volumétrique θ :

$$\rho_{(z,t)} = e + f\theta_{(z,t)} \quad (I-52)$$

e et f sont des constantes empiriques contenant implicitement les caractéristiques du sol et de l'eau (c'est-à-dire la porosité, la température, la salinité). Elles sont supposées constantes dans le temps. Les variations temporelles du profil d'humidité du sol sont estimées en utilisant des données de sondage par résistivité électrique acquises à différents moments (Michot & al. 2003). Pour les sols à texture fine, la résistivité électrique de la matrice solide ne peut être négligée. Comme discuté ci-dessus, le courant électrique dans l'argile est non seulement conduit par l'eau interstitielle libre mais également par l'eau adsorbée et liée à la surface des particules d'argile. Un nouveau terme décrivant la résistivité de la matrice solide a été introduit par Rhoades & al. (1976). L'équation (I-52) est alors corrigée de la façon suivante:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_w} (a\theta^2 + b\theta) + \frac{1}{\rho_s} \quad (I-53)$$

ρ_s et ρ_w représentent les résistivités respectives de la matrice solide et de la partie interstitielle. g et h sont des coefficients en fonction des caractéristiques de la phase solide, liées à la texture et à la minéralogie.

c. Composition du fluide dans le milieu poreux

La résistivité électrique est liée à la mobilité des ions présents dans le fluide remplissant les pores. La résistivité dépend de la concentration et de la viscosité de l'eau. L'estimation de la teneur en eau par des mesures de résistivité nécessite une connaissance de la concentration en ions dissous. Puisque les sels doivent être sous une forme ionisée pour conduire le courant, la quantité d'eau dans le sol régit les voies de conduction disponibles. L'estimation de la salinité du sol par résistivité électrique nécessite des mesures effectuées à la même teneur en eau. La salinité du sol est généralement mesurée à saturation car elle est considérée comme une condition normalisée. Pour une teneur en eau donnée, la résistivité électrique diminue lorsque la conductivité de l'eau augmente. De plus, les différents ions présents dans la solution (H^+ , OH^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- , ...) n'affectent pas la conductivité de la même manière en raison des différences de mobilité ionique. Cela explique pourquoi les solutions de sol (à la même concentration mais ayant des compositions ioniques différentes) peuvent avoir des conductivités électriques différentes. Il en résulte une large gamme de conductivités électriques en raison des variations de concentration et de composition ionique dans différentes zones du sol (Bernstone & al. 2000). Le contraste important de résistivité entre les zones saturées d'eau salée et d'eau douce a été utilisé par plusieurs auteurs afin d'étudier l'intrusion d'eau salée dans les zones côtières (Nowroozi & al. 1999; Yaramanci 2000). Van Dam & Meulenkaamp (1967) ont considéré les valeurs de résistivité du sol de 40, 12 et 3 Ωm comme représentatives respectivement de l'eau douce, saumâtre et saline.

d. Température

L'agitation ionique augmente avec la température lorsque la viscosité d'un fluide diminue. Ainsi, la résistivité électrique diminue lorsque la température augmente. Campbell & al. (1949) ont proposé une fonction pour calculer la conductivité électrique selon celle-ci à la température normalisée de 25 °C. Elle prend la forme suivante :

$$\sigma_t = \sigma_{25^\circ C} [1 + \epsilon(T - 25^\circ C)] \quad (I-54)$$

σ_t et $\sigma_{25^\circ C}$ représentent les conductivités à la température de l'expérience et à 25°C, respectivement. ϵ est un facteur de correction fixé à 2,02%. T est la température exprimée en °C. L'augmentation relative de la conductivité entre 0°C et 30°C serait donc de l'ordre de 60%.

Dans les sols, la variation de température au cours d'une année se produit à deux échelles temporelles, à savoir le jour et la saison. Dans les études où l'effet de la température n'est pas corrigé, on suppose que la température reste stable principalement parce que les mesures sont effectuées tous les jours à la même heure et sur une courte période (Bottraud & al. 1984). À l'échelle annuelle, il n'est pas possible d'éviter l'effet de la température sur les mesures de résistivité du champ électrique.

1.2.2.2. Matériau Bois

a. Teneur en eau

D'après Glass & Zelinka (2010), la résistivité du bois dépend de la teneur en eau, de la température, de l'angle des fibres et de la quantité de sels hydrosolubles. Les propriétés électriques du bois sont des fonctions assez précises de la teneur en eau entre 0% et le Point de Saturation des Fibres (PFS) (James 1963 ; Stamm 1927). Simpson & TenWolde (1999) ont présenté le changement de résistance selon la teneur en eau, sur des échantillons de géométries identiques et ce pour un grand nombre d'essences. 90% des points de données expérimentales se situent dans la zone grisée de la Figure I-21.

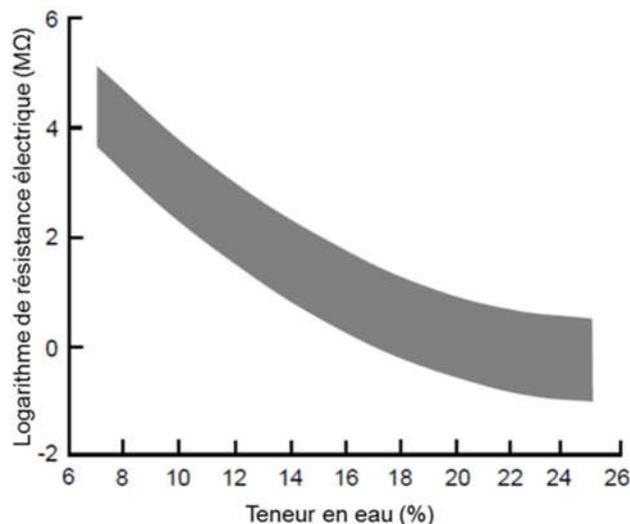


Figure I-21 : Changement de la résistance électrique du bois selon la teneur en eau pour de nombreuses essences américaines (Simpson & TenWolde 1999)

Glass & Zelinka (2010) ont décrit la relation forte entre la résistivité électrique et la teneur en eau à travers des mesures expérimentales de Stamm (1929) pour le pin slash (*Pinus elliottii*) dans le sens longitudinal entre les teneurs en eau de 8% à 180% (Figure I-22).

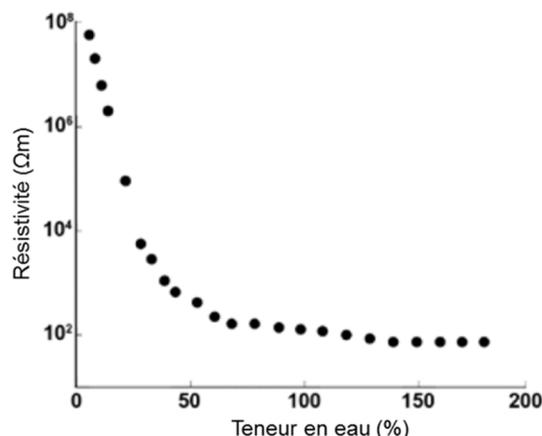


Figure I-22 : Résistivité du pin slash en fonction de la teneur en eau (Glass & Zelinka 2010)

Lorsque l'humidité du bois augmente de zéro jusqu'à la saturation des fibres, la résistivité diminue d'un facteur supérieur à 10⁶ sous la forme d'une fonction exponentielle. Lorsque la teneur en eau augmente du point de saturation des fibres à la saturation complète en eau libre,

la diminution de la résistivité est largement moins sensible. Cela peut se traduire par le fait que les lignes de courant coupent les cellules et les sites de sorption occupés par l'eau liée. Sandoz (1993) a utilisé la méthode résistive pour mesurer la teneur en eau en la comparant aux méthodes ultrasoniques. Afin de connaître la relation empirique entre la résistivité électrique ρ de l'épicéa et du sapin et leur teneur en eau pondérale w , des mesures ont été effectuées sur de petits échantillons de 20x20x3 mm³ conditionnés à une température de 20°C pour des teneurs en eau allant de 6% à 100%. La plage de densité sèche s'étend de 0,35 à 0,48. Les résultats sont regroupés en Figure I-23. L'expression de cette relation est obtenue comme suit :

$$\ln \rho = 125 \left(\frac{1}{w} + 0,054 \right) \quad (I-55)$$

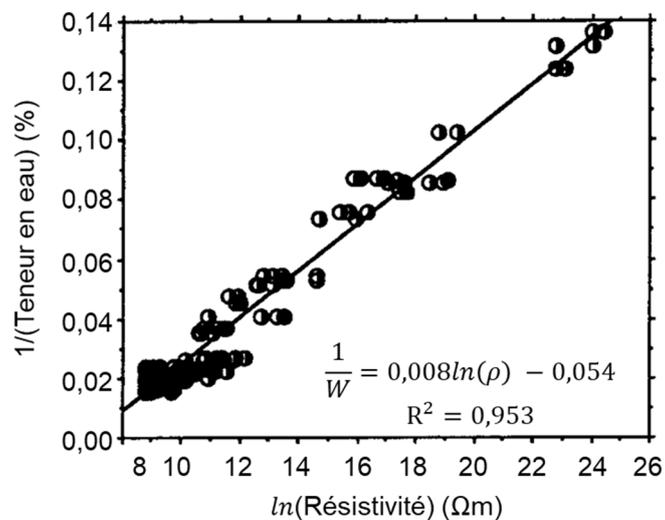


Figure I-23 : Relation entre le logarithme de la résistivité du bois et l'inverse de la teneur en humidité (Sandoz 1993)

Pour ce qui est des propriétés diélectriques du matériau bois, celles-ci changent également de manière prononcée en proportion de sa teneur en eau. La constante diélectrique augmente avec l'augmentation de la teneur en eau. Sa mesure offre une précision acceptable pour les teneurs en eau du bois allant de 2% jusqu'au PSF (Kollmann & Côté 1968).

b. Température

La température influence également aux propriétés électriques (Clark & Williams 1933 ; Kollmann & Côté 1968 ; Sandoz 1993 ; Hartley & Marchant 1995; Carl & TenWolde 1996; Simpson & TenWolde 1999 ; Forsen & Tarvainen 2000 ; Luo & al. 2019). La résistance électrique du bois diminue à mesure que la température augmente. Ceci est mis en évidence dans le schéma de l'Ohmmètre de Siemens (Figure I-24) qui sert à la détermination de l'électrique et d'une correction de température. L'appareil est conçu pour afficher, pour une résistance électrique donnée, la teneur en eau correspondante à 20°C. Par exemple, pour la teneur en eau 20% et la température 20°C, la teneur en eau lue sur l'appareil est 20%, ce qui correspond à une résistance de $2 \times 10^6 \Omega$. Pour cette même teneur en eau effective de 20% et une température de 40°C, la teneur en eau lue sur l'appareil serait 24%, et la résistance correspondante $6 \times 10^5 \Omega$. A teneur en eau égale, la résistance peut donc diminuer d'un facteur supérieur à 3 entre 20°C et 40°C (Kollmann & Côté 1968)

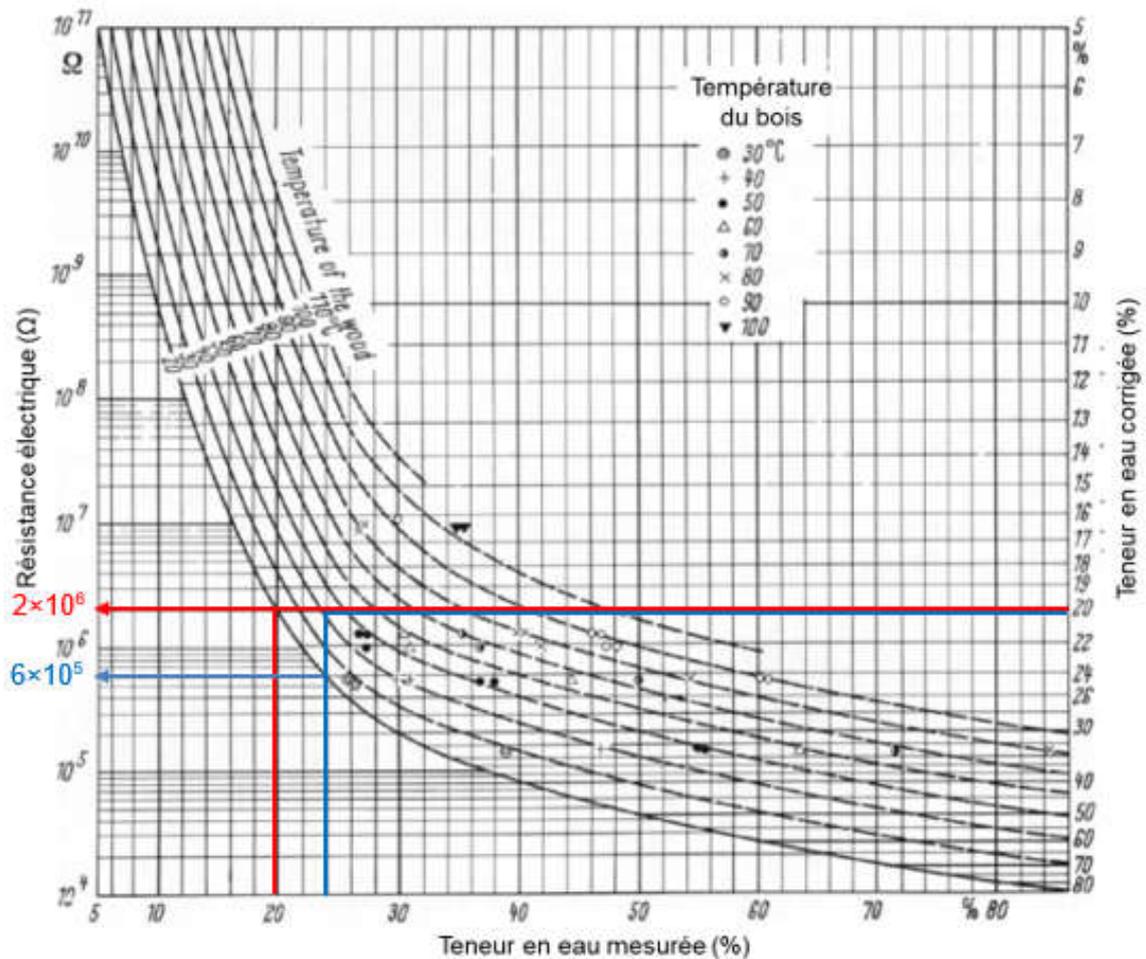


Figure I-24 : Influence de l'humidité et de la température sur la résistance électrique du bois (Kollmann & Côté 1968)

La résistance est corrélée à l'humidité et à la température en °C selon l'expression suivante, (Forsen & Tarvainen 2000) :

$$\log(\log(R)+2)=-0,00147.T-0,0262.w-0,000158.T.w+1,075 \quad (I-56)$$

Luo & al. (2019) ont montré que la résistivité électrique mesurée ρ sur l'aubier à une température donnée ($T^{\circ}\text{C}$) peut être exprimée en fonction d'une résistivité de référence ρ_{25} à la température de référence (25°C) à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho=\rho_{25}\cdot e^{3,4\cdot 10^{-3}(25-T)} \quad (I-57)$$

Aujourd'hui, les hygromètres portables, affichant directement la teneur en eau en surface des matériaux, nécessitent une correction de la mesure avec la température ambiante.

c. Essence et structures du bois

La relation entre la teneur en eau et l'électricité dépend en plus de l'essence (Figure I-25) et la structure (Figure I-26) du bois (Forsen & Tarvainen 2000)

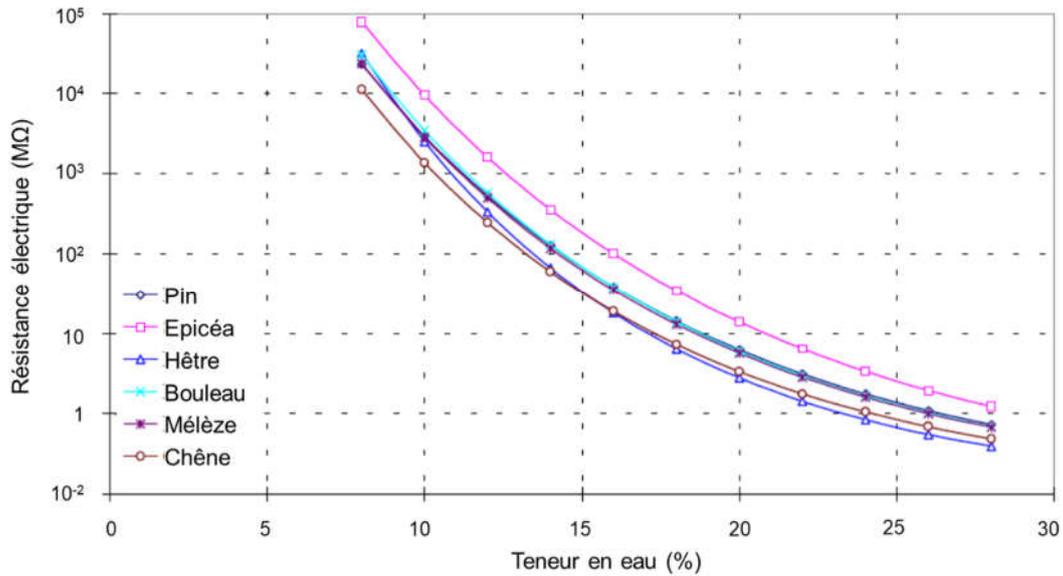


Figure I-25 : Résistance de différentes essences en fonction de la teneur en eau (Forsen & Tarvainen 2000)

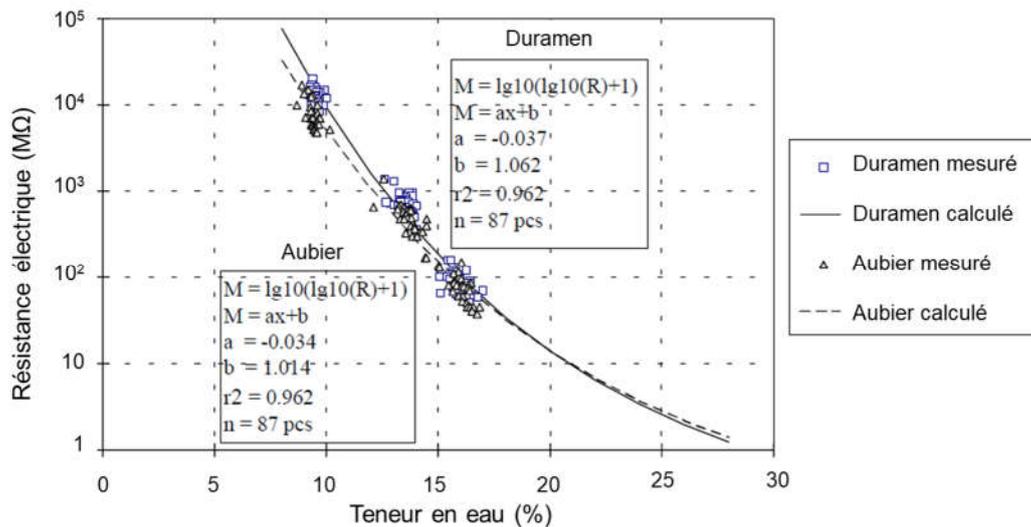


Figure I-26 : Résistance électrique du duramen et de l'aubier du Pin en fonction de la teneur en eau (Forsen & Tarvainen 2000)

La conductivité est orientée vis-à-vis des axes d'orthotropie du matériau. Elle est deux fois plus élevée dans le sens longitudinal que dans le sens transversal. Lorsque le bois contient des quantités anormales de sels hydrosolubles ou d'autres substances électrolytiques (traitement de conservation ou ignifuge, eau de mer), la conductivité électrique peut être considérablement augmentée (Forsen & Tarvainen 2000).

I.3. Méthodes électriques de monitoring de bâtiments ou structures de génie civil

I.3.1. Ouvrages en terre et sols

Les mesures de résistivité électrique ont donné des résultats précieux sur le mouvement de l'eau dans des milieux poreux (Sass 2005; Sass & Viles 2006 ;Sass & Viles 2010 ; Martinho & Dionísio 2014 ;Souffaché & al. 2016 ; Hassine & al. 2018). La mesure de la résistance électrique est actuellement la méthode la plus sensible et la plus simple à utiliser aussi bien

en laboratoire que in situ. Toute approche de monitoring doit être précédée d'un travail préliminaire d'étalonnage des propriétés électriques sur des échantillons de laboratoire.

Afin de surveiller les conditions des talus et des barrages, la méthode de la tomographie de résistivité électrique utilisant des peignes des électrodes a été utilisée et développé (Hen-Jones & al. 2017 ; Gunn & al. 2015 ; Chambers & al. 2014; Perrone & al. 2014 ; Merritt & al. 2013 ; Chambers & al. 2011 ; Sjö Dahl & al. 2010 ; Sjö Dahl & al. 2009 ; Dahlin & al. 2008 ; Sjö Dahl 2006; Ahn & al. 1993). Sjö Dahl & al. (2008) ont appliqué cette méthode pour la détection des fuites et de l'érosion interne au barrage en remblai de Hällby. 5 câbles avec des électrodes installées en permanence sont situés sur le fond du réservoir le long de la pente amont du barrage (gauche et droite), enfous le long de la crête du barrage (gauche et droite) et le long du pied aval (droit uniquement). Au total, 102 électrodes sont installées sur le barrage, dont 43 sur la crête et 21 sur le pied aval. Des plaques d'acier inoxydable ont été utilisées comme électrodes sur terre. Les 38 électrodes restantes ont été installées dans le réservoir sur la face amont du barrage, à l'aide d'électrodes annulaires en acier inoxydable. La distance entre chaque électrode est de 7m, Figure I-27.

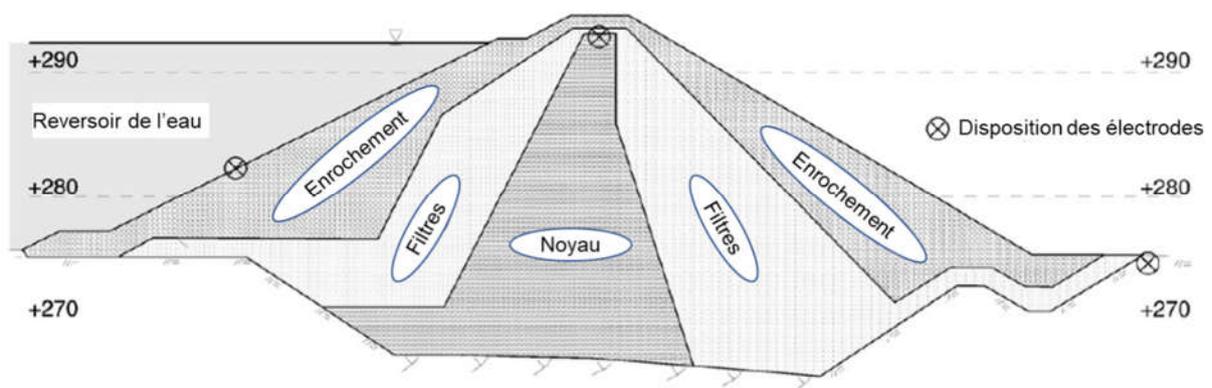


Figure I-27 : Section transversale du barrage et disposition des électrodes (Sjö Dahl & al. 2008)

Verdet & al. (2017) ont étudié la variation de saturation au cours de l'année et d'expériences de feux dans la paroi calcaire d'une carrière souterraine. Les parois ont été équipées de profils de 24 électrodes espacées de 4 cm. Le calcaire ayant tendance à s'effriter vu sa faible cimentation, les électrodes ont été enfoncées en moyenne à 1.5 cm.

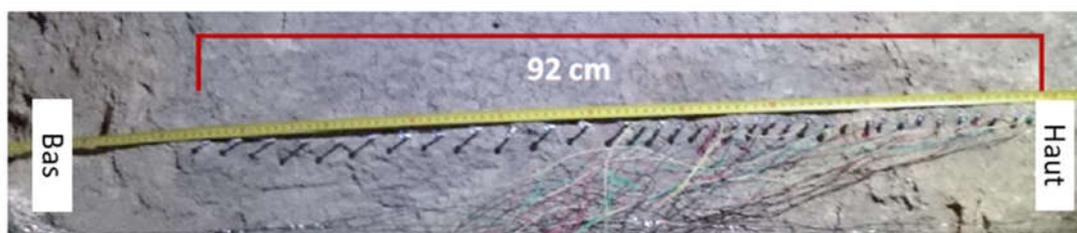


Figure I-28 : Profil des électrodes (Verdet & al. 2017)

1.3.2. Structures en maçonnerie

La terre cuite est un des matériaux de construction utilisés massivement pour les murs des bâtiments. Plus particulièrement, la durabilité des bâtiments historiques est impactée par l'humidité, Figure I-29.

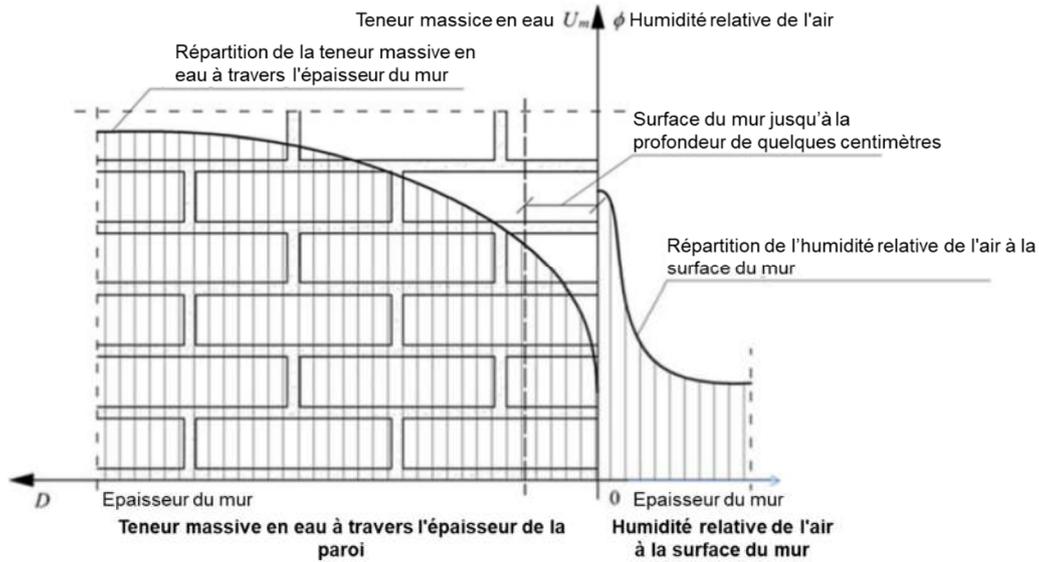


Figure I-29 : Distribution de la teneur en eau dans un mur de terre cuite

Hoła & al. (2012) ont appliqué la méthode de tomographie d'impédance électrique pour obtenir la répartition de la teneur en eau des murs sur la hauteur et l'épaisseur du mur. La technique rencontre des limites de faisabilité au regard de la plage d'humidité mesurée et la profondeur d'exploration n'excédant pas quelques centimètres. Cette limitation est un réel problème car, dans le cas du patrimoine bâti, l'humidité est généralement élevée en profondeur car ce matériau fonctionne comme une réserve tampon.

La disposition des électrodes sur le mur conditionné par le niveau de teneur en eau est montrée dans la Figure I-30. Ensuite, la technique de tomographie a été utilisée pour déterminer la conductivité interne du mur de brique. Le résultat de calculs basés sur la méthode des éléments de frontière permet de définir la distribution de l'humidité le long de la paroi, et ce, dans le plan des électrodes, Figure I-31. Selon les conclusions de l'étude, les résultats de tomographie sont satisfaisants au regard de la distribution réelle d'humidité.

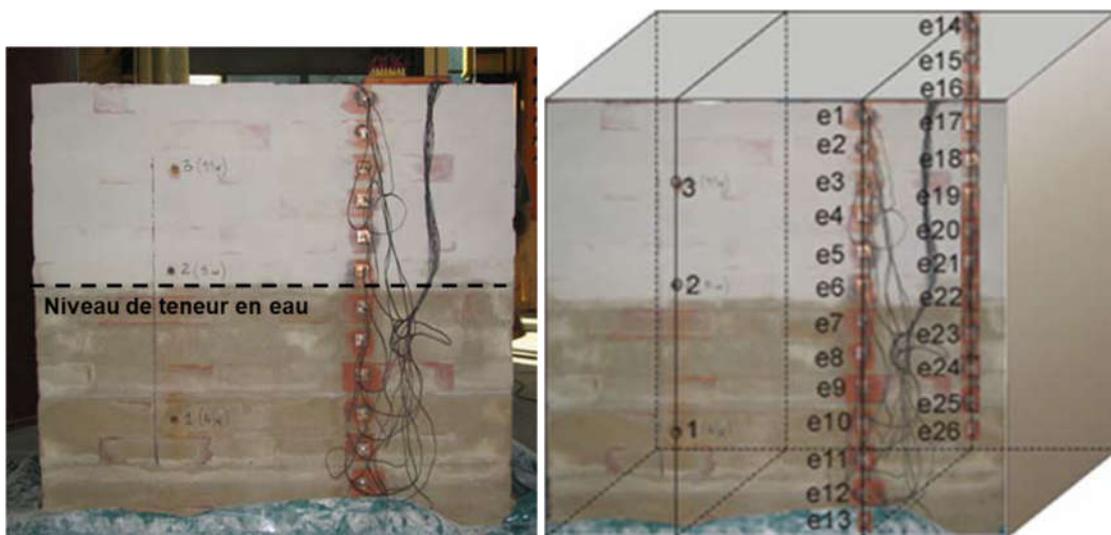


Figure I-30 : Mur équipé d'électrodes (Hoła & al. 2012)

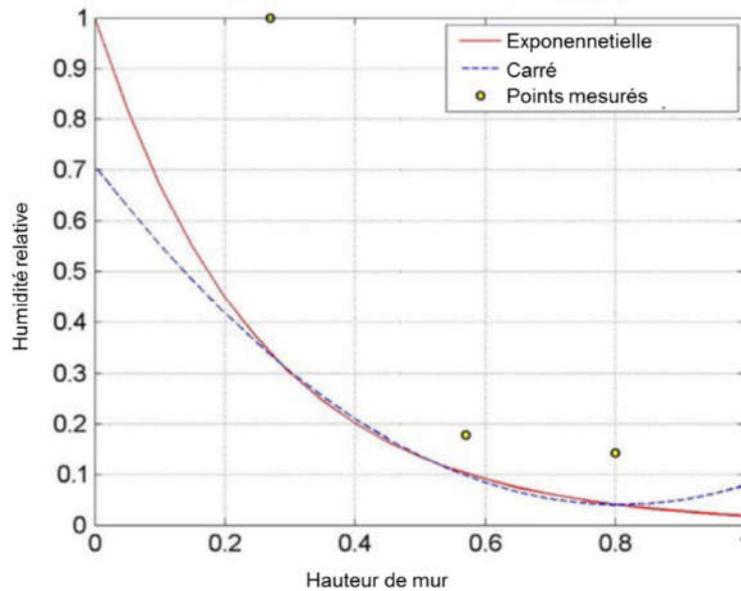


Figure I-31 : Distribution de l'humidité relative mesurée et modélisée selon une distribution exponentielle et quadratique de conductivité (Hoła & al. 2012)

Rymarczyk & al. (2018a; 2018b ; 2018c) ont développé un tomographe hybride pour la mesure de l'humidité des murs. Des électrodes spéciales en caoutchouc conducteur, assurant un bon contact avec la surface des matériaux de construction poreux tels que les briques, ont été introduites (Figure I-32).

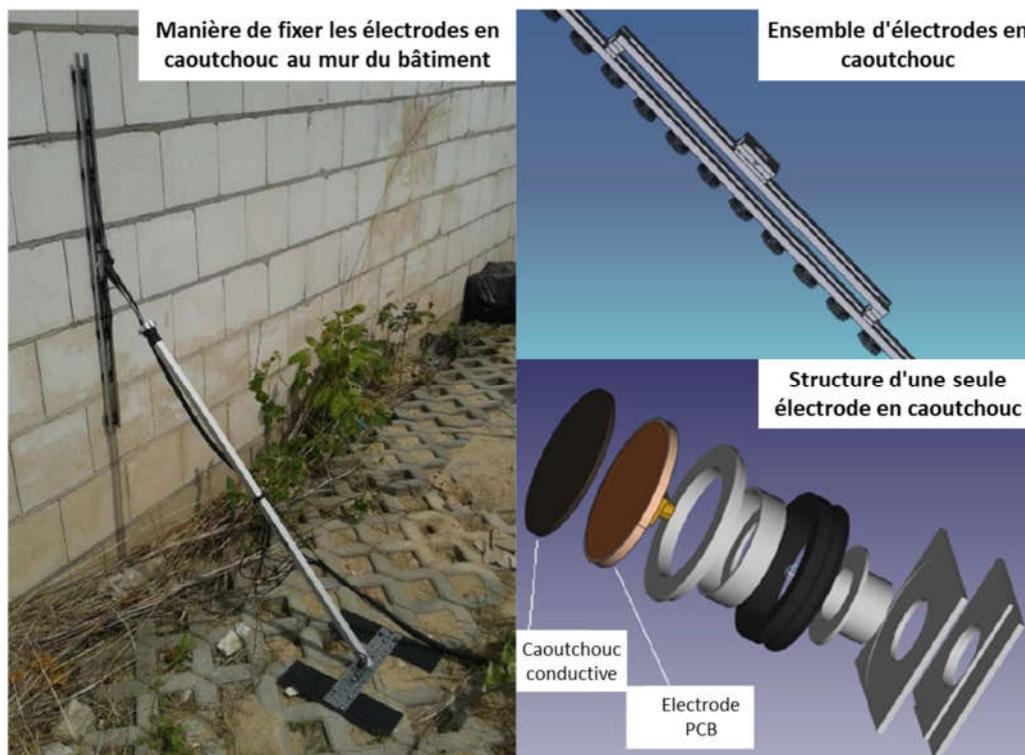


Figure I-32 : Concept des électrodes (Rymarczyk & al. 2018a)

Dans le cas des murs des bâtiments historiques, Hoła & al. (2017) ont établi la relation entre les mesures ponctuelles diélectriques (cordonnées X) et la teneur en eau massique mesurée U_m , (Figure I-33). Cette relation a été utilisée pour l'évaluation non destructive de la teneur en eau des murs de briques dans le sous-sol de ce bâtiment.

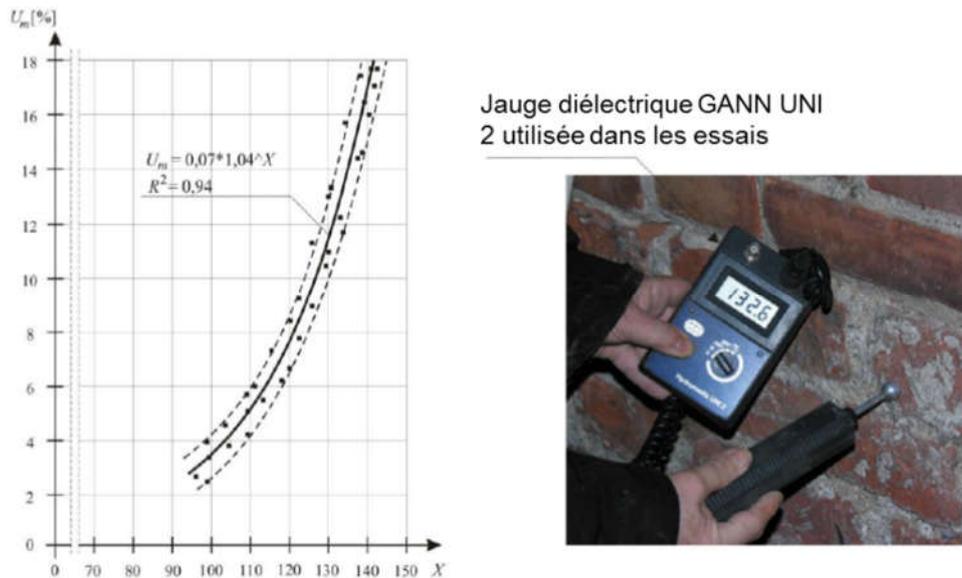


Figure I-33 : Relation entre mesures diélectriques et teneur en humidité massique U_m de la paroi (Hola & al. 2017)

1.3.3. Structures en bois

La mesure électrique est une des différentes méthodes disponibles pour l'évaluation non-destructive des objets du patrimoine culturel en bois (Niemz & Mannes 2012). Forsen & Tarvainen (2000) ont appliqué plusieurs machines portables de type résistive capacitive pour évaluer les effets de divers facteurs sur la résistance électrique. Les méthodes, basées sur des mesures électriques, sont utilisées largement pour le contrôle de la teneur en eau du matériau bois (James 1963 ;Skaar 1988 ; Hartley & Marchant 1995).

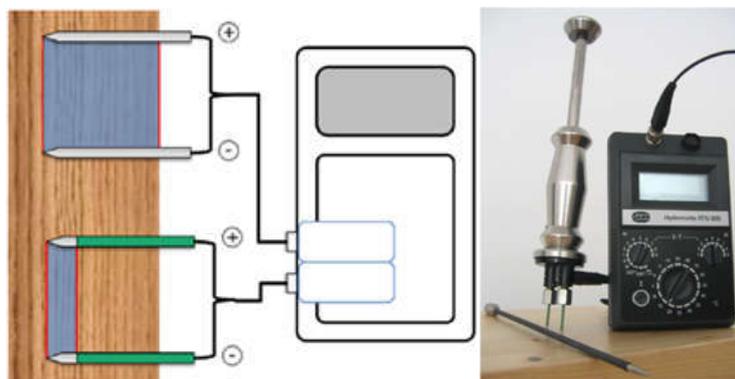


Figure I-34 : Dispositif utilisant la méthode de résistance (Dietsch & al. 2015a)

La mesure de résistance électrique repose sur deux électrodes enfoncées dans le bois ou fixées à la surface avec une distance prédéfinie, Figure I-34 (Dietsch & al. 2015a). Afin de garantir une stabilité et une répétabilité de la mesure, il est recommandé d'orienter les deux électrodes perpendiculairement au fil du bois. Dans le cas du lamellé-collé, les électrodes doivent être placées dans la même lamelle afin que la lige de courant ne soit pas coupée par le plan de colle. Le système de mesure applique un courant aux électrodes et mesure la différence de potentiel. La méthode est normalisée selon la norme NF EN 13183-2 (2002) mais reste cependant une technique de mesure surfacique du fait de la faible pénétration des électrodes et du faible écartement de celles-ci. Une généralisation de la méthode a été employée pour réaliser du monitoring d'ouvrages d'art en mettant en œuvre des électrodes en

profondeur en isolant leur corps. Cependant, les résultats ne sont pas probants, et ce, pour deux raisons :

- La résistivité étant dépendant de la température, le dispositif doit être complété par une mesure de la température à l'endroit où la résistivité est mesurée,
- Les électrodes métalliques étant bonnes conductrices de chaleur, le champ thermique est perturbé à cœur par les variations de température de l'ambiance, ce qui fausse la mesure.

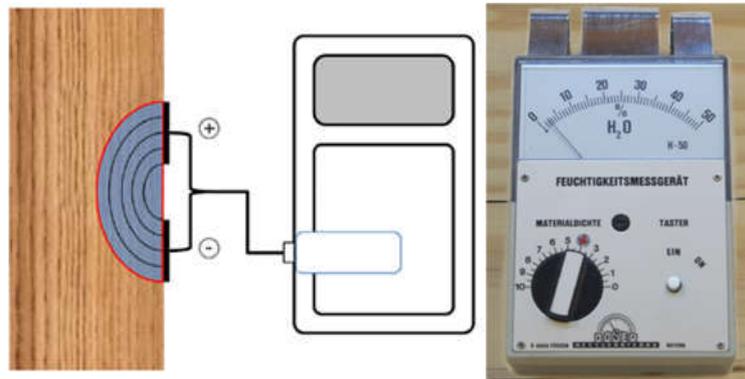


Figure I-35 : Dispositif utilisant la méthode de capacité (Dietsch & al. 2015a)

Pour la mesure de la constante diélectrique, des plaques conductrices jouant le rôle d'un condensateur sont placées sur la surface du bois, le bois agissant comme diélectrique, Figure I-35 (Dietsch & al. 2015a). Les électrodes de contact permettent l'application d'un courant alternatif et la réception de la différence de potentiel. La densité et la température du matériau ainsi que la fréquence de la tension sont les principaux paramètres mesurés. Les électrodes de contact ne pénétrant pas dans le matériau, seule une mesure en surface (<35mm) est possible sans avoir accès au gradient d'humidité à cœur. La méthode est principalement utilisée pour mesurer la teneur en eau de planches lors du contrôle avant encollage des pièces pour le lamellé-collé ou des panneaux de bois reconstitué (OSB, contreplaqué, panneaux de fibres, etc.). La méthode est normalisée selon la norme NF EN 13183-3 (2005) et est plus généralement applicable pour du monitoring avec, cependant, les limites dues à une mesure de surface (Kasal & Lear 2011) qui demandent un complément de mesures, via des techniques alternatives à cœur.

Plusieurs études ont montré les possibilités d'utiliser des méthodes résistives et capacitives avec différents types de capteurs pour la surveillance continue de la teneur en eau dans le bois (Brischke & al. 2008a ; Li & al. 2018). Pour les méthodes résistives, différents types d'électrodes sont utilisés tels que des clous (Dietsch et al., 2015a); des vis (Franke & al. 2013), Figure I-36. En utilisant des électrodes de quelques centimètres plus courtes que l'épaisseur du tablier d'un pont et en les plaçant à des points singuliers, il est possible d'enregistrer la teneur en eau provenant du haut, des côtés et du dessous d'une poutre de tablier, Figure I-37 (Björngrim & al. 2016). Björngrim & al. (2017) ont utilisé deux fils en acier inoxydable serrés entre deux poutres en lamellé-collé pour effectuer des mesures résistives à l'interface des deux poutres. La méthode résistive est une technique largement reconnue et est aujourd'hui à la pointe de la technologie. Elle est développée pour la surveillance dans les bâtiments ou les ponts en bois (Dietsch & al. 2015b ; Pousette & Fjellström 2016).

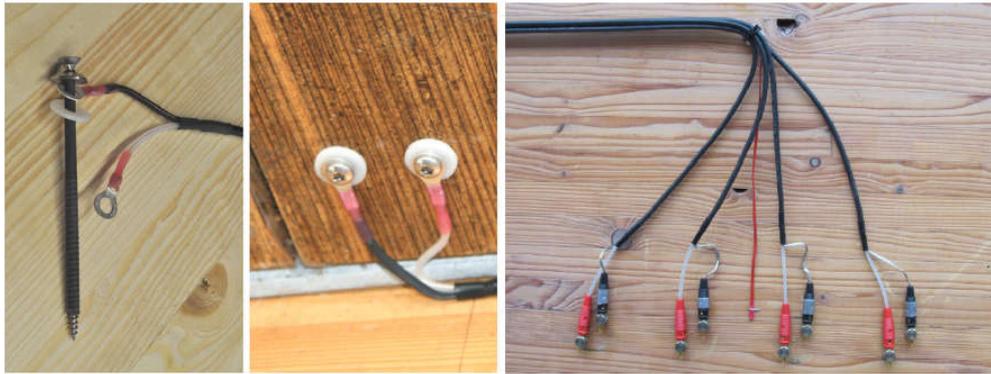


Figure I-36 : Des électrodes de vis (Franke & al. 2013) et de clou (Dietsch et al., 2015a) installées *in-situ*

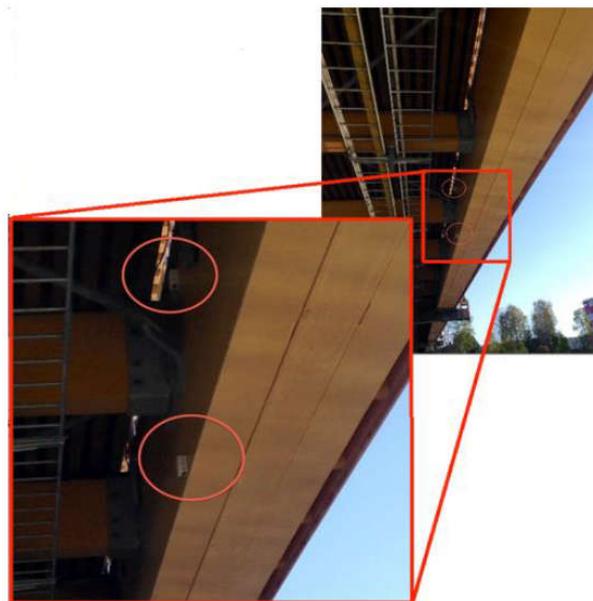


Figure I-37 : Disposition des capteurs électriques de poutre lamellé-collé du pont (Björngrim & al. 2016).

1.3.4. Structures en béton

La tomographie électrique (résistance, impédance et capacité électrique) est devenue un moyen viable et fiable pour caractériser des propriétés mécaniques dans les matériaux à base de ciment (Osterminski & al. 2012 ; Layssi & al. 2015; Voss & al. 2019 ; Smyl 2020). Plusieurs mesures sur des échantillons de bétons ont été réalisées pour évaluer les propriétés électriques dépendant de facteurs tels que la teneur en eau (Weiss & al. 2013; Spragg & al. 2016), la température (Julio-Betancourt & Hooton 2004; McCarter & al. 2009 ; Spragg & al., 2013a; Coyle & al. 2018), la géométrie de l'échantillon (Morris & al. 1996 ; Spragg & al. 2013b ; Chen & al. 2014), les conditions de stockage (Spragg & al. 2013a ; Spragg & al. 2017) et la concentration ionique de la solution poreuse (Rajabipour & Weiss 2007 ; Polder 2009 ; Bu & Weiss 2014; Spragg & al. 2016). Ces méthodes sont également développées pour étudier le mécanisme d'hydratation et l'évolution de la porosité des matériaux cimentaires (Xiao & al. 2007; Xiao & Li 2008), et modifiées pour tenir compte de l'effet des différentes températures de durcissement (Zhang & Li 2009 ; Zhang & Zhang 2017).

Pour les structures en béton armé, les méthodes électriques sont efficaces dans la détection des armatures, leur diamètre et la profondeur d'enrobage du béton (Polder 2001 ; Karhunen

& al. 2010a ; Presuel-Moreno & al. 2013 ; Garzon & al. 2014 ; Lim & al. 2015 ; Salehi & al. 2016 ; Sanchez & al. 2017). Également, diverses études ont été menées pour l'estimation de la corrosion (Andrade & González 1978 ; Feliu & al. 1996 ; Gowers & Millard 1999 ; Polder & al. 2000 ; Polder & Peelen 2002 ; Güneyisi & al. 2005 ; Ferreira & Jalali 2006 ; Lim & al. 2009 ; Sadowski 2010 ; du Plooy & al. 2013 ; Hornbostel & al. 2013 ; Ghosh & Tran 2015 ; Nguyen & al. 2018), l'évaluation de la diffusivité des chlorures (Ramezani pour & al. 2011 ; Gjørv 2013), ainsi que la progression des fissures ou des fractures dans la structure du béton (Lataste & al. 2003 ; Karhunen & al. 2010b).

Les mesures de résistivité électrique peuvent être effectuées de plusieurs manières non destructives (Azarsa & Gupta 2017):

- Méthode de résistivité volumique ou méthode uniaxiale (Méthode dite « sandwich ») (Figure I-38) : deux électrodes sont placées sur la surface du béton (généralement deux plaques métalliques parallèles) avec une éponge humide placée entre les deux. En général, seules des éprouvettes prismatiques ou cylindriques prélevés sur ouvrages sont utilisées. La résistivité est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{L}{S} \quad (I-58)$$

S et L désignent respectivement la section transversale perpendiculaire au courant et la hauteur de l'échantillon

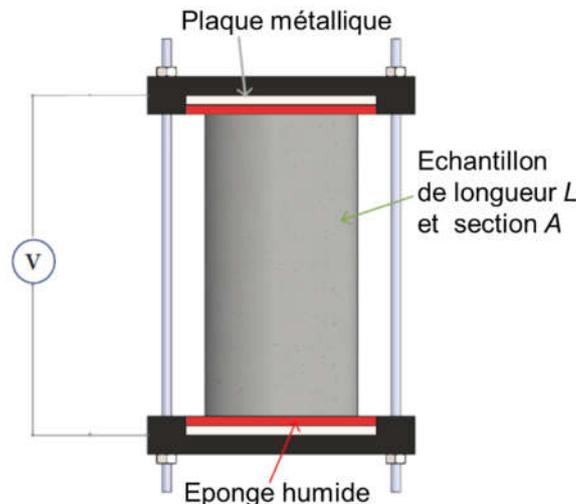


Figure I-38 : Méthode de sandwich pour le béton (Azarsa & Gupta 2017)

- Disque de surface (Figure I-39) : le test électrode-disque comprend une électrode (disque) placée sur la surface du matériau, une barre d'armature constituant l'autre électrode. La résistance apparente R_{apparent} est mesurée entre le disque et l'armature (Polder 2001). Pour un enrobage donné, le diamètre du disque et de l'armature, le facteur géométrique est de 0,1 m. Par conséquent, la résistivité du béton $\rho_{\text{béton}}$ est déduite selon l'expression suivante :

$$\rho_{\text{béton}} = 0,1 \cdot R_{\text{apparent}} \quad (I-59)$$

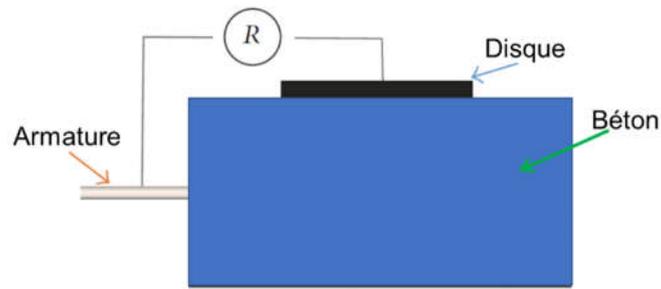


Figure I-39 : Méthode de disque de surface (Azarsa & Gupta 2017)

- Configuration de lignes à quatre points : les deux électrodes extérieures appliquent un courant à la surface du béton tandis que la différence de potentiel est mesurée entre les deux sondes intérieures. En se basant sur cette configuration, un résistivimètre a été développé pour la mesure *in-situ* de la résistivité apparente du béton selon le norme AASHTO T-358 (2015), Figure I-40 (Layssi & al. 2015 ; Sabbağ & Uyanık, 2018)

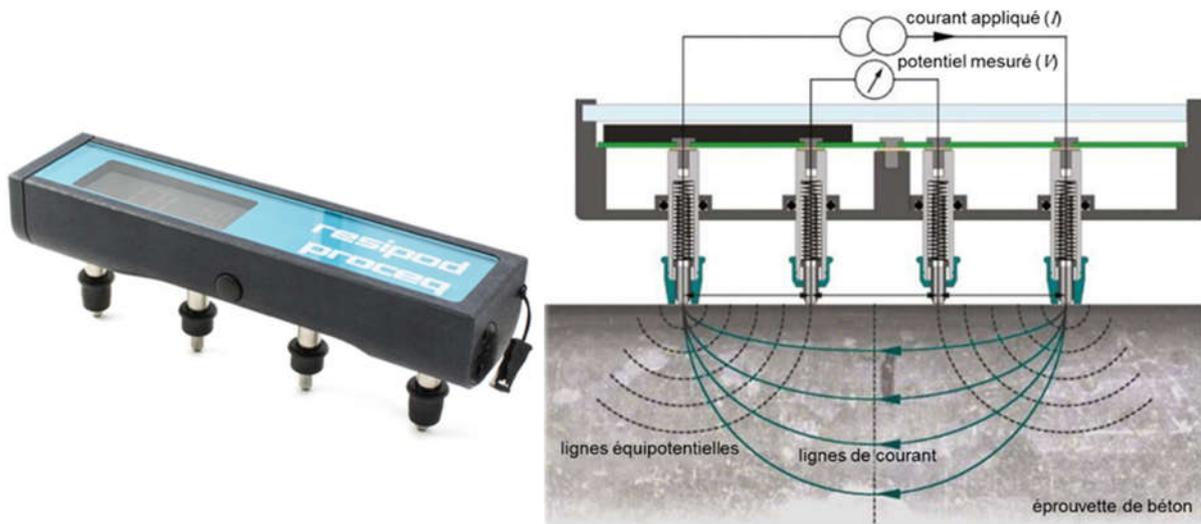


Figure I-40 : Résistivimètre pour le béton (Layssi & al. 2015)

- Configuration carrée à quatre sondes (Figure I-41) : elle se compose de quatre sondes disposées en carré avec un espacement de 50 à 100 mm

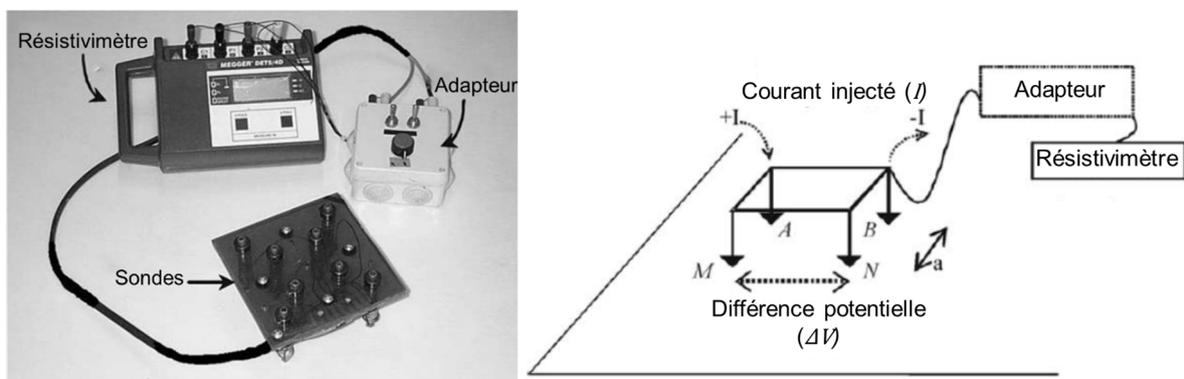


Figure I-41 : Configuration carrée à quatre sondes (Azarsa & Gupta 2017)

Afin de définir la plage d'influence des armatures proches sur la mesure en surface de résistivité d'une éprouvette de mortier, Lim & al. (2018) ont réalisé la mesure résistive à différentes distances du plan vertical de l'armature (140, 100, 70, 50, 40, 30, 20, 10 et 0 mm).

Les électrodes sont disposées en ligne avec des barres de renforcement installées à chaque intervalle d'électrodes (20, 30 et 40 mm), parallèlement à l'armature. La résistivité apparente est mesurée en fonction de la distance horizontale entre l'armature et la ligne d'électrodes (Figure I-42).

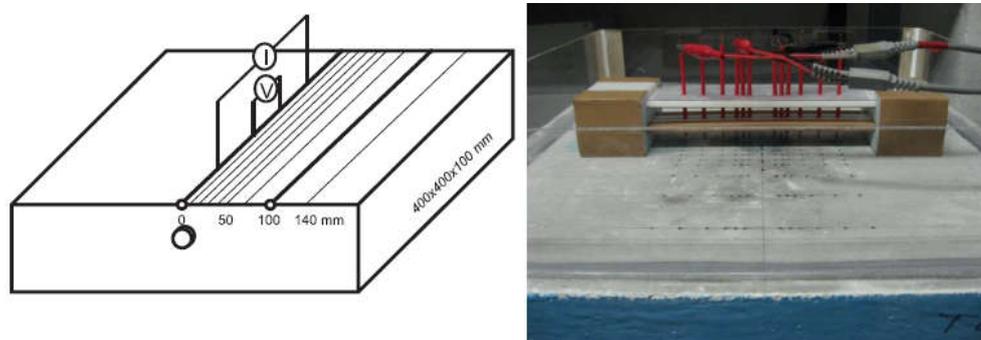


Figure I-42 : Géométrie de l'échantillon, sens de mesure et configuration d'électrode (Lim & al. 2018)

Priou & al. (2018) ont mise en œuvre un capteur multi-électrodes sur site noyé dans le béton (du Plooy & al. 2013 ; Lecieux & al. 2015) sur un quai portuaire en construction à l'embouchure de la Loire, t ce, dès les premiers jours après coulage du béton. Les mesures de résistivité *in-situ* sont analysées en contrôlant les conditions d'humidité et de température avec l'évolution de la résistance mécanique du béton. Sur la section transversale des poutres, des capteurs de résistivité sont positionnés en sous face du quai au niveau des armatures les plus proches de la surface en associant la mesure avec des sondes thermo-hydriques, ainsi que des détecteurs de chlorures et des électrodes de mesure de potentiel d'armature pour déceler les risques de corrosion (Figure I-43).

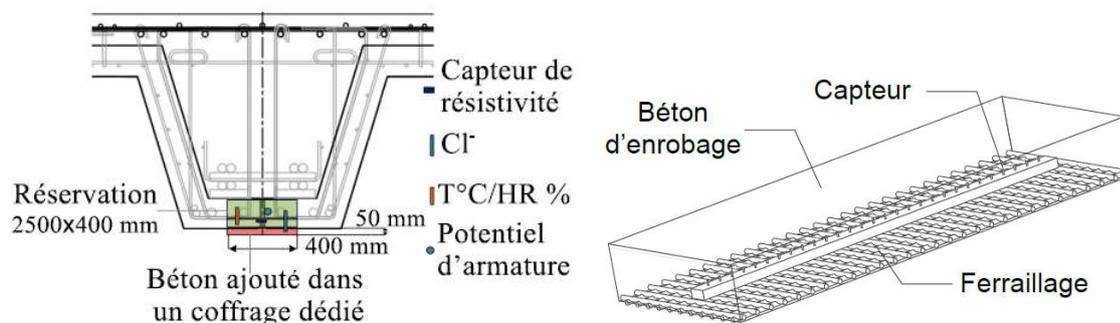


Figure I-43 : Positionnement des capteurs à l'embouchure de la Loire (Priou & al. 2018)

I.4. Tomographie électrique pour la reconnaissance en géotechnique

La tomographie électrique est couramment utilisée dans les applications pratiques et de recherche qui comprennent: les études géologiques (Lech & al. 2020 ; Kowalczyk & al. 2015 ; Reynolds 2011), hydrogéologiques (Trappe & Kneisel 2019 ; Nguyen & al. 2013 ; Zohdy et al. 1974) et hydro-géophysiques (Binley & al. 2015 ; Yamakawa & al. 2012), ainsi que la surveillance des décharges et des zones agricoles et post-industrielles (Koda & al. 2017 ; Lech & al. 2016 ; De Carlo & al. 2013 ; Mondelli & al. 2010 ; Batayneh 2005).

I.4.1. Résistivité apparente

Les méthodes résistives ont été déployées en géotechnique dans le but de mesurer la densité des différentes couches de terrain pour en détecter, par exemple, des niveaux de nappe phréatique. Dans la pratique, on injecte dans le sol, un courant continu dont on mesure

l'intensité. Ensuite, on étudie la répartition des potentiels dans l'espace environnant. De cette répartition de potentiel, on peut en déduire une répartition de la résistivité dans le sous-sol. Dans le cas d'un milieu homogène et isotrope, cette résistivité correspond à la résistivité vraie, ce qui n'est pas le cas pour des milieux hétérogènes. Dans ce cas, on fait appel au concept de résistivité apparente.

La résistivité apparente est le rapport du potentiel mesuré sur le terrain à celui calculé théoriquement dans les mêmes conditions (même géométrie des électrodes, même intensité de courant injectée) sur un terrain homogène de résistivité unitaire.

Pratiquement, la mesure de la résistivité apparente ρ_{app} (Ωm) est réalisée en surface, et ce, à partir de deux électrodes A et B dites électrodes d'injection auxquelles un courant électrique d'intensité I_{AB} (mA) y est injecté. La différence de potentiel ΔV_{MN} (mV) est mesurée entre les deux autres électrodes M et N, dites électrodes de potentiel.

De l'équation (I-50), Les potentiels aux électrodes M et N sont définis selon l'expression suivante :

$$\begin{aligned} V_M &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \\ V_N &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \end{aligned} \quad (I-60)$$

On en déduit la différence de potentiel suivante :

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (I-61)$$

La résistivité apparente est déterminée selon le rapport entre différence de potentiel et intensité du courant injecté et corrigée d'un facteur géométrique K :

$$\rho_{app} = K \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \quad (I-62)$$

Avec

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad (I-63)$$

1.4.2. Différentes configurations

En fonction de la position respective des électrodes de mesure de potentiel et celles d'injection de courant, plusieurs configurations de réseau peuvent être définies. Les configurations Wenner, Wenner-Schlumberger, dipôle-dipôle pôle-pôle ou pôle-dipôle sont les plus couramment utilisées, Tableau I-2 (Loke & al. 2013 ; Lowrie 2007 ; Ward 1987 ; Zohdy & al. 1974). Selon la configuration du réseau, le facteur géométrique K diffère.

Tableau I-2 : Exemple de configuration de réseau d'électrodes en ligne 2D et dispositif d'électrode 3D

Configuration			Réseau d'électrodes	K
2D	Wenner	α	A — M — N — B a a a	$2\pi a$
		β	B — A — M — N a a a	$6\pi a$
		γ	A — M — B — N a a a	$3\pi a$
	Wenner - Schlumberger		A — M — N — B na a na	$\pi n(n+1)a$
	Dipôle-Dipôle		A — B — M — N a na a	$\pi n(n+1)(n+2)a$
	Pôle-Pôle		B — A — M — N x a x	$2\pi a$
	Pôle-Dipôle	Aller	A — M — N na a	$2\pi n(n+1)a$
Retour		M — N — A na a		
3D	Carré		A — B M — N a	$\frac{2\pi a}{2-\sqrt{2}}$

La sensibilité d'une configuration de mesure peut être définie comme l'influence d'un changement de résistivité d'une petite région particulière du domaine sur le potentiel mesuré. La Figure I-44 présente les cartographies de sensibilité de chaque configuration.

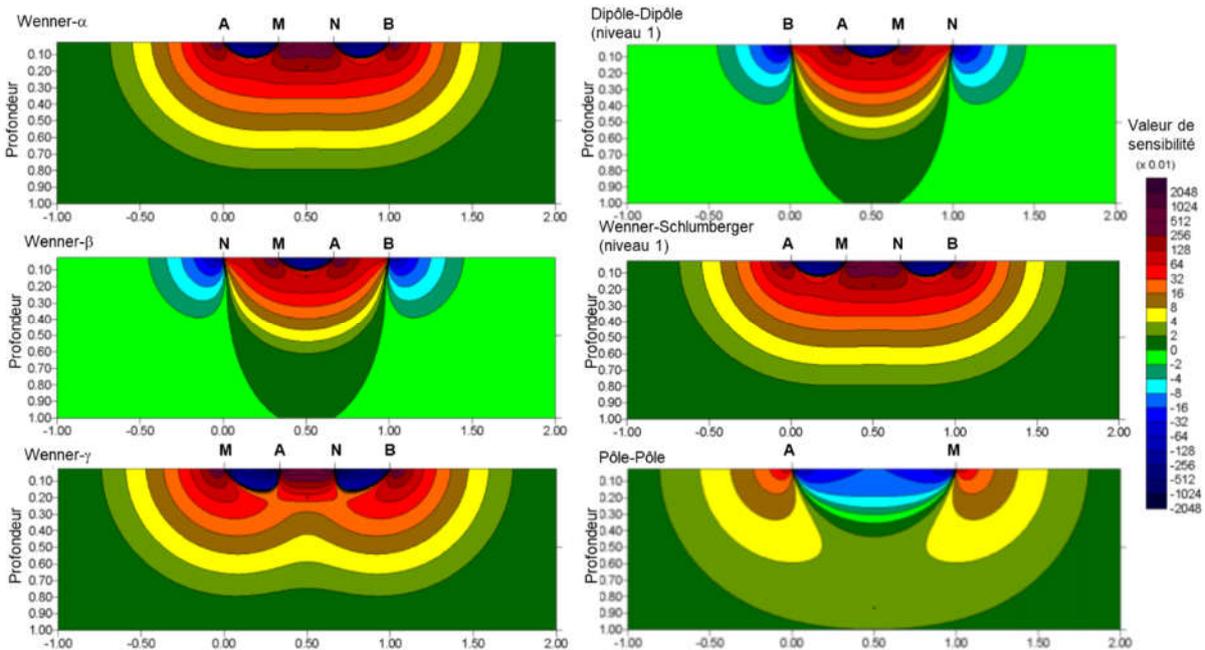


Figure I-44 : Section de sensibilité 2D des différentes configurations (Loke 2001)

Le Tableau I-3 résume les différentes configurations de réseaux 2D et compare les performances telles que la sensibilité du réseau aux hétérogénéités horizontales et verticales, la profondeur d'investigation ou encore la couverture des données horizontales et l'amplitude du signal (Loke 2000).

Tableau I-3 : Performances des différents types de configurations 2D

	Wenner	Wenner-Schlumberger	Dipôle-dipôle	Pole-pole	Pole-dipôle
Sensibilité des structures horizontales du réseau	++++	++	+	++	++
Sensibilité des structures verticales du réseau	+	++	++++	++	+
Profondeur de l'investigation	+	++	+++	++++	+++
Couverture horizontale des données	+	++	+++	++++	+++
Amplitude du signal	++++	+++	+	++++	++

Les différentes orientations de l'hétérogénéité peuvent être verticales pour les hétérogénéités telles que les digues, les cavités, l'écoulement préférentiel ou horizontales comme les couches sédimentaires. La profondeur d'investigation est déterminée pour un sol homogène. Elle donne cependant une indication sur la profondeur d'investigation dans un sol hétérogène. La couverture de données horizontales est liée à la configuration du réseau d'électrodes. L'amplitude du signal reçu est inversement proportionnelle au facteur géométrique K. Son impact est important si la mesure est effectuée dans des zones à fort bruit de fond. Le choix de la configuration dépend alors du type d'hétérogénéité à cartographier et du niveau de bruit de fond. Hesse & al. (1986) ont souligné que, dans des cas spécifiques, l'utilisation de configurations multiples peut conduire à une mesure plus robuste et donc à une meilleure interprétation.

1.4.3. Post traitement

Les **données mesurées** en tomographie (injection de courant et mesure de potentiel) visent à évaluer les **propriétés physiques réelles** du milieu (champ de résistivité). Un modèle de base est tout d'abord élaboré à partir d'informations renseignées par l'utilisateur en donnant les propriétés physiques provisoires du matériau. En se basant sur des lois de la physique, comme la loi d'Ohm pour notre cas, le **calcul direct** permet de calculer la réponse d'un modèle physique et de fournir des **données calculées**. Le **problème inverse** détermine alors le degré de différence entre les données calculées et mesurées. Il s'agit de l'évaluation du **critère d'erreur**. Le **modèle estimé** est ensuite corrigé grâce à la **modification du modèle** dans le but de minimiser le degré de différence. L'opération se répète de manière itérative jusqu'à ce que le processus converge avec une erreur minimale asymptotique. Dans ces conditions, nous parlerons de propriétés physiques optimisées, Figure I-45 (Marescot 2004 ; 2008).

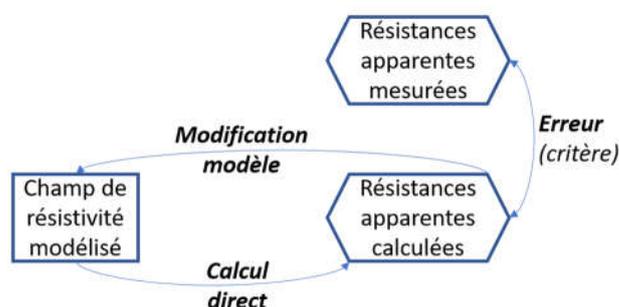


Figure I-45 : Problématique et principe d'analyse inverse (Marescot 2004)

Le modèle direct peut être réalisé par des méthodes d'éléments finis ou de différences finies. L'optimisation du maillage de ce modèle est un point déterminant afin de concilier définition de l'imagerie et temps de calcul (Loke 2001). La modélisation de la géométrie des électrodes sont absentes dans le domaine de la géophysique de subsurface (Verdet & al. 2020 ; Ochs & Klitzsch 2020)

En géotechnique, à partir des résistivités apparentes mesurées et du multiplexage des différentes configurations, il est possible de retrouver l'imagerie électrique du terrain en se basant sur le principe ci-dessus. Actuellement, il existe des outils d'inversion tels que Res2Dinv ou IP2WIN qui permettent d'obtenir une estimation des résistivités vraies du terrain étudié. La Figure I-46 présente un exemple d'identification de résistivité par l'inversion 2D issue du logiciel Res2Dinv (Marescot 2008)

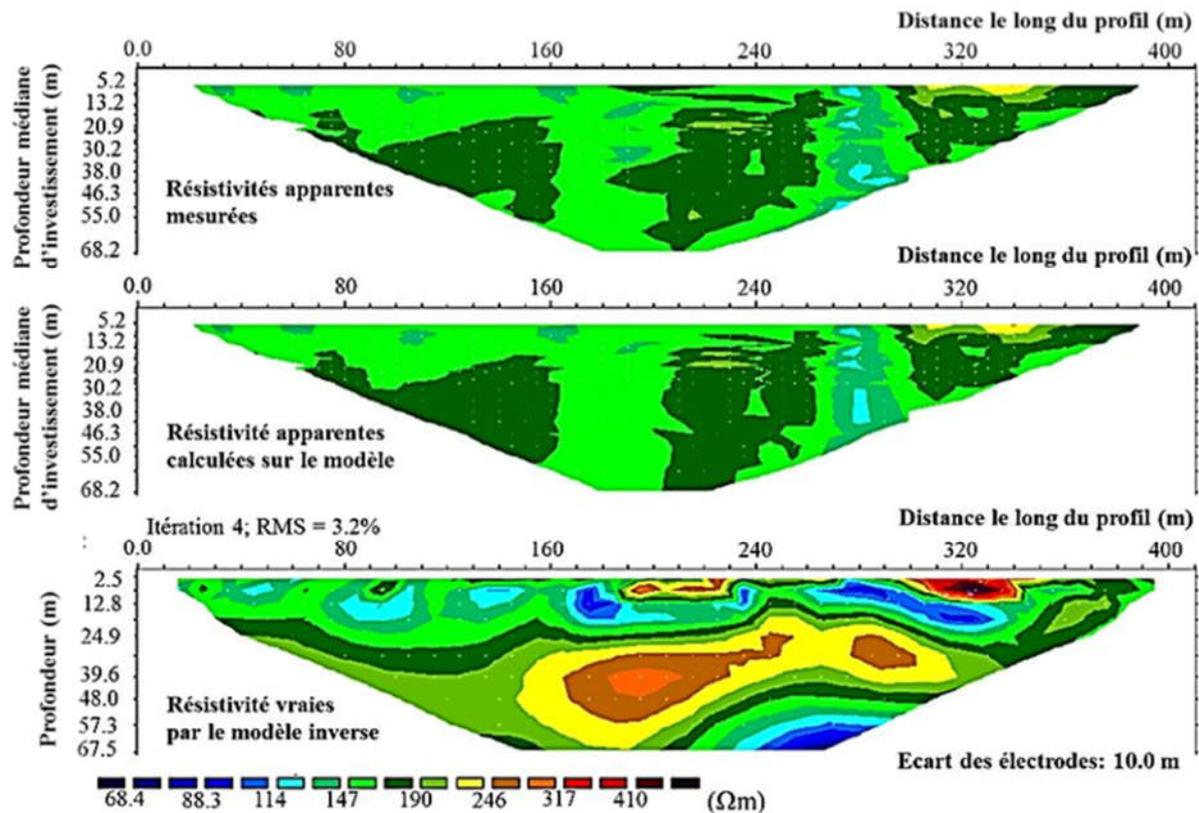


Figure I-46 : Inversion d'une topographie 2D par Res2Dinv (Marescot 2008)

I.5. Méthodes d'analyse inverse

I.5.1. Généralité

Pour un tel problème d'optimisation, l'erreur est définie comme la somme des résidus entre les données mesurées et les données calculées. Ce résidu, appelée fonction objectif $f(x)$, est fréquemment défini par une norme au sens des moindres carrés, de la façon suivante :

$$f(x) = \sum_{j=1}^{m_r} r_j^2(x) \quad (I-64)$$

r_j désigne les m_r composantes du vecteur d'erreur entre les données mesurées et calculées par le modèle. Chaque r_j représente une fonction régulière d'un vecteur x de n_x variables représentant les inconnues du problème ($m_r \geq n_x$) telle que :

$$r_j(x) = \Phi(x) - d_{mj} \quad (I-65)$$

Dans le cadre de la tomographie électrique, $\phi(x)$ représente la résistivité apparente calculée par le modèle direct éléments finis tandis que d_{m_j} représente la mesure correspondante.

L'idéal est de résoudre cette inversion en cherchant un **minimiseur global** pour f , c'est à dire un vecteur $r(x)$ pour lequel la fonction f atteint sa plus petite valeur. Ce minimiseur correspond au point x^* si, quel que soit x de \mathbb{R}^n :

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (I-66)$$

Cet idéal est malheureusement très difficile à atteindre. Aujourd'hui, seules des méthodes simplifiées sont employées pour trouver un **minimiseur local** pour $f(x)$. Il s'agit d'un vecteur d'argument donnant la plus petite valeur de fonction à l'intérieur d'une certaine région, définie par ε , telle que :

$$x^* \text{ est un minimiseur local pour } f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \text{ si} \quad (I-67)$$

$$f(x^*) \leq f(x) \text{ pour } \|x^* - x\| \leq \varepsilon \ (\varepsilon > 0)$$

On suppose que la fonction objectif $f(x)$ est différentiable et continue. Au voisinage de x , la série de Taylor d'une fonction objectif $f(x)$ en un point $x+\delta$ est décrite par l'expression suivante:

$$f(x+\delta) = f(x) + \frac{1}{1!} f'(x)\delta + \frac{1}{2!} f''(x)\delta^2 + \dots \quad (I-68)$$

La condition nécessaire pour un minimiseur local est définie comme suit. Si x^* est un minimiseur local, alors :

$$f'(x^*) = 0 \quad (I-69)$$

Si un point satisfait la condition (I-69), il est nommé point stationnaire et est noté x_s .

Si le second terme est positif quel que soit δ , $f''(x_s)$ est alors définie positive. De plus, si δ est très petit, le terme restant est négligeable. Dans ces conditions, x_s est un minimiseur local.

Frandsen & al. 2004 ont synthétisé les différents cas possibles en cherchant le minimiseur local (Figure I-47). Ainsi, si x_s est un point stationnaire et que $f''(x_s) \neq 0$, plusieurs scénarios se présentent :

- si $f''(x_s)$ est définie positive, alors x_s est un minimiseur local.
- si $f''(x_s)$ est semi-définie positive, alors x_s est soit un minimiseur local ou un point de selle.
- si $f''(x_s)$ est définie négative, alors x_s est un maximiseur local
- si $f''(x_s)$ est semi-définie négative, alors x_s est un maximiseur local ou un point de selle
- Pour tous les autres cas, x_s est un point de selle

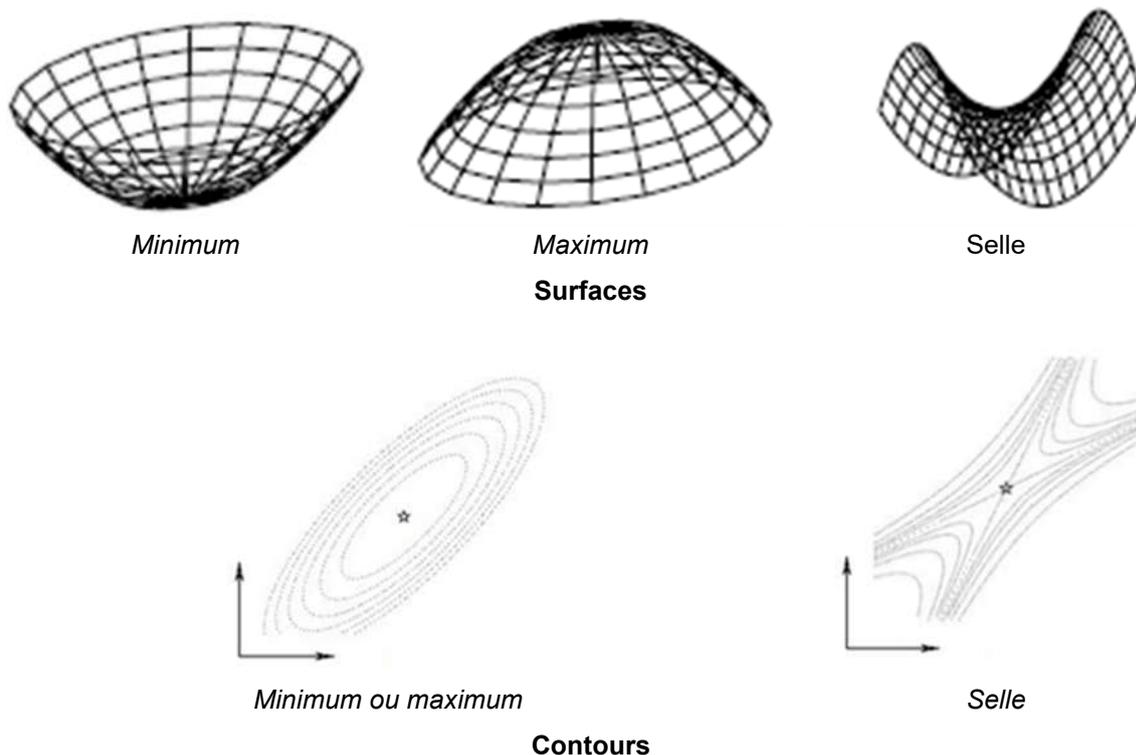


Figure I-47 : Surfaces et contours près d'un point stationnaire

I.5.2. Méthodes descendantes

La minimisation de la fonction $f(x)$ s'obtient par un algorithme itératif. À partir d'un point de départ x_0 , l'algorithme produit une série de vecteurs x_1, x_2, x_3, \dots , qui converge vers x^* , un minimiseur local pour la fonction donnée. La plupart des méthodes existantes repose sur des algorithmes itératifs descendants imposant une fonction $f(x)$ décroissante telle que :

$$f(x_{k+1}) < f(x_k) \quad (I-70)$$

Cela ne garantit pas systématiquement la convergence et rend moins probable la convergence vers un point de selle. Si $f(x)$ a plusieurs minimiseurs, la convergence dépendra du point de départ x_0 .

Dans de nombreux cas, la méthode converge vers x^* en deux temps. Dans un premier temps, lorsque x_0 est loin de la solution, l'algorithme doit produire des itérations qui se rapprochent régulièrement vers x^* . Après ces quelques B premières itérations, l'algorithme doit avoir une cinétique de convergence avec une erreur e_k décroissante de pas après pas de telle sorte que :

$$\|e_{k+1}\| < \|e_k\| \text{ pour } k > B \text{ avec } e_k = x_k - x^* \quad (I-71)$$

Le deuxième temps correspond à la phase finale de convergence pour laquelle on demande une accélération du processus :

$$\text{Convergence linéaire} \quad \|e_{k+1}\| < c_1 \|e_k\|; \quad 0 < c_1 < 1 \quad (I-72)$$

Selon Marescot (2004), l'algorithme de convergence est décomposé selon les étapes suivantes, Figure I-48 :

- Réaliser une simulation directe avec un vecteur initial x_0
- Définir le vecteur correction δ_k pour l'itération k (Sa définition sera décrite ultérieurement)
- Mettre à jour le nouveau vecteur ($x_{k+1}=x_k+\delta_k$) et relancer une itération
- Répéter les deux étapes précédentes jusqu'à obtenir un minimum de la fonction f .

Le vecteur de modification δ_k est caractérisé par une direction descente p_k et un pas α_k tel que :

$$\delta_k = \alpha_k p_k \quad (I-73)$$

Pour chaque itération k , nous avons :

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \quad (I-74)$$

L'algorithme de la méthode descente est décrit par Madsen & al (2004).

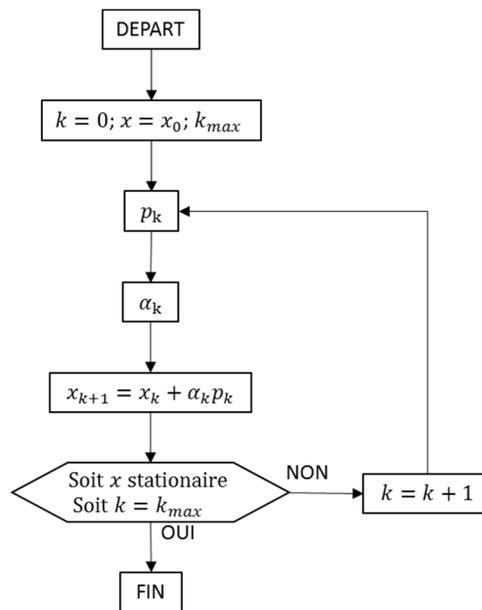


Figure I-48 : Algorithme de la méthode descente Madsen & al (2004)

p est une direction de descente pour f en x si :

$$p \cdot f'(x) < 0 \quad (I-75)$$

1.5.2.1. Méthode de plus grande pente (steepest descent)

On voit que lorsque nous effectuons une étape $\alpha \cdot p$ avec α positive, l'incrément de la fonction $f(x)$ satisfait le passage à la limite suivant :

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(x + \alpha p)}{\alpha \|p\|} = -\frac{1}{\|p\|} p^T f'(x) = -\|f'(x)\| \cos [p; \widehat{f'(x)}] \quad (I-76)$$

$[\widehat{p;f'(x)}]$ désigne l'angle entre les vecteurs p et $f'(x)$. Cela montre que nous obtenons le plus grand taux de gain si $[\widehat{p;f'(x)}]=\pi$, c'est-à-dire si on utilise la direction de descente la plus raide dont la pente p_{sd} est donnée par l'expression suivante :

$$p_{sd}=-f'(x) \quad (I-77)$$

Dans le contexte de l'algorithme présenté en Figure I-48, l'expression (I-77) est appelée méthode de descente ou méthode du gradient. Si cette méthode assure une convergence, cette convergence linéaire demeure très lente et nécessite un grand nombre d'itérations, ce qui devient une contrainte pour notre problème.

1.5.2.2. Méthodes de Newton

Selon la condition (I-69), si x^* est un point stationnaire alors $f'(x^*)=0$. Dans ces conditions, nous obtenons un système d'équations non linéaire, selon la série de Taylor (I-68) (avec $\alpha=1$) :

$$f'(x+p)\approx f'(x)+f''(x)p \quad (I-78)$$

Par dérivation de la méthode de Newton, il s'agit d'exprimer p comme étant la solution de l'équation différentielle ci-dessous:

$$f'(x)+f''(x)p=0 \quad (I-79)$$

Par conséquent, la résolution du système (I-79) complète l'algorithme, présenté en Figure I-48 selon la Figure I-49

Les avantages et inconvénients de la méthode de Newton sont résumé par Frandsen & al. (2004) :

- Avantages :
 - convergence quadratique à partir d'un point de départ si $f''(x)$ est définie positive,
 - simplicité et facilité à mettre en œuvre
- Inconvénients :
 - convergence non effective pour de nombreuses situations,
 - risque de convergence vers un maximum ou un point de selle pour la fonction f ,
 - risque d'un système d'équations linéaires à résoudre, à chaque itération, mal conditionné ou singulier,
 - nécessite de définir analytiquement les dérivées secondes de f .

Si $f(x)$ est définie positive et donc non singulière, p devient une direction de descente dans le respect de l'inégalité suivante :

$$0 < p^T f''(x) p = -p^T f'(x) \quad (I-80)$$

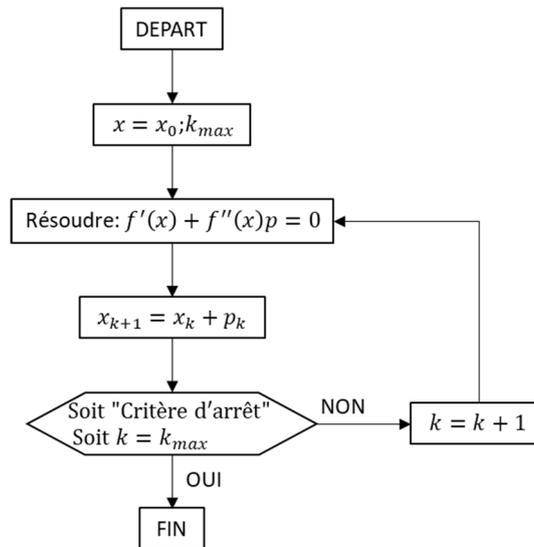


Figure I-49 : Algorithme de la méthode de Newton

La méthode de Newton devient très efficace dans la phase finale itérative où x tends vers x^* . Si, de plus, $f(x)$ et $f''(x)$ sont définies positives à l'intérieur de la sphère, alors on obtient systématiquement une convergence quadratique.

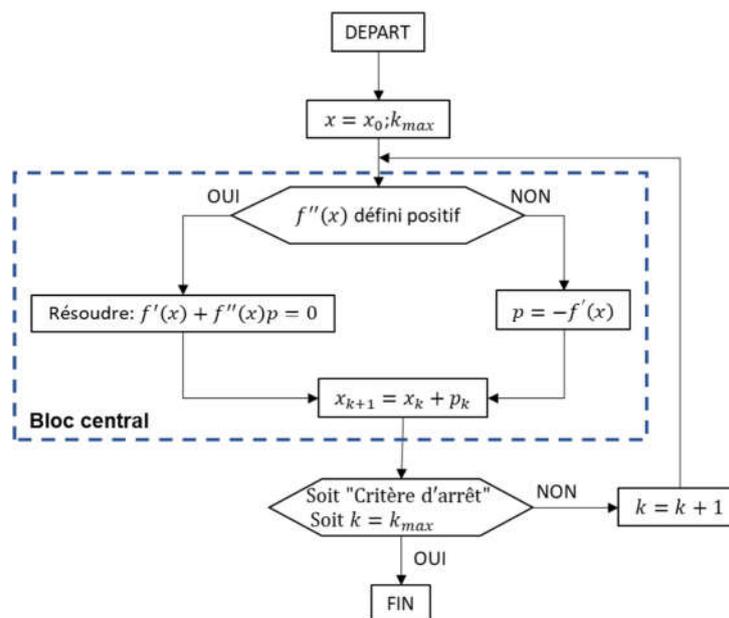


Figure I-50 : Algorithme hybride

En revanche, si x est dans une région où $f''(x)$ est définie négative, et s'il y a un point stationnaire, la méthode de Newton convergera vers un point stationnaire maximiseur. Nous éviterons cette situation en forçant systématiquement l'algorithme à prendre une direction descendante de forte pente. Dans ce contexte, Madsen & al. (2004) ont proposé une méthode hybride couplant la méthode de Newton et la méthode de descente de plus grande pente (*steepest descent*). Selon l'inégalité (I-80), les étapes de Newton sont descentes si $f''(x)$ est définie positive, ce qui permet de compléter l'algorithme Figure I-49 général par un bloc central comme précisé dans la Figure I-50. Si ces méthodes hybrides sont très efficaces, elles nécessitent d'implémenter analytiquement la dérivée de sonde de $f(x)$, c'est à dire de $f''(x)$, fonction qui n'est que très rarement définie pour des problèmes complexes.

1.5.3. Méthodes des moindres carrées

Pour les problèmes aux moindres carrés, la fonction objectif $f(x)$ est décrite en considérant le vecteur résiduel $r(x)$ tel que:

$$f(x) = \sum_{j=1}^m r_j^2(x) = \|r(x)\|^2 = r(x)^T \cdot r(x) \quad (I-81)$$

Dans le cas où $r(x)$ admet des dérivées partielles continues, sa série de Taylor s'exprime de la façon suivante:

$$r(x+p) \approx r(x) + J(x) \cdot p \quad (I-82)$$

$J \in \mathbb{R}^{m \times n}$ désigne une matrice **jacobienne** dont les composantes sont exprimées à partir des dérivées partielles d'ordre 1 de la fonction $r(x)$:

$$(J(x))_{ij} = \frac{\partial r_i}{\partial x_j}(x) \quad (I-83)$$

Les fonctions dérivées première et seconde peuvent être exprimées comme suit:

$$\nabla f(x) = f'(x) = \frac{\partial f}{\partial x_j}(x) = \sum_{j=1}^m r_j(x) \cdot \frac{\partial r_j}{\partial x_j}(x) = J(x)^T \cdot r(x) \quad (I-84)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 f(x) = f''(x) &= \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(x) = \sum_{j=1}^m \frac{\partial r_j}{\partial x_j}(x) \frac{\partial r_j}{\partial x_k}(x) + \sum_{j=1}^m r_j(x) \frac{\partial^2 r_j}{\partial x_j \partial x_k}(x) \\ &= J(x)^T \cdot J(x) + \sum_{j=1}^m r_j(x) \cdot r_j''(x) \end{aligned} \quad (I-85)$$

Lorsque la fonction est bien minimisée, le deuxième terme $\sum_{j=1}^m r_j(x) \cdot r_j''(x)$ de nable de $f(x)$ peut être négligeable. Donc, nous avons la forme simplifiée de l'équation (I-85) :

$$\nabla^2 f(x) = J(x)^T J(x) \quad (I-86)$$

L'expression (I-77) de la direction de descente la plus raide p_{sd} est déduite suivante :

$$p_{sd} = -f'(x) = -J(x)^T \cdot r(x) \quad (I-87)$$

1.5.3.1. Méthode de Gauss - Newton

La méthode de Gauss – Newton est basée sur la résolution de l'équation différentielle (I-79) En y intégrant les adaptations apportées par les expressions (I-83) et (I-84), nous obtenons la forme suivante :

$$[J(x)^T J(x)] p_{GN} = -J(x)^T r(x) \quad (I-88)$$

Cette solution représente une direction de descente pour f car elle respecte la condition suivante :

$$p_{GN}^T \cdot f'(x) = p_{GN}^T \cdot (J(x)^T \cdot r(x)) = -p_{GN}^T \cdot [J(x)^T \cdot J(x)] \cdot p_{GN} < 0 \quad (I-89)$$

L'algorithme de la méthode de descente (Figure I-48) peut alors être utilisée avec la direction de descente p_{GN} et le pas $\alpha=1$, comme indiqué dans la Figure I-51

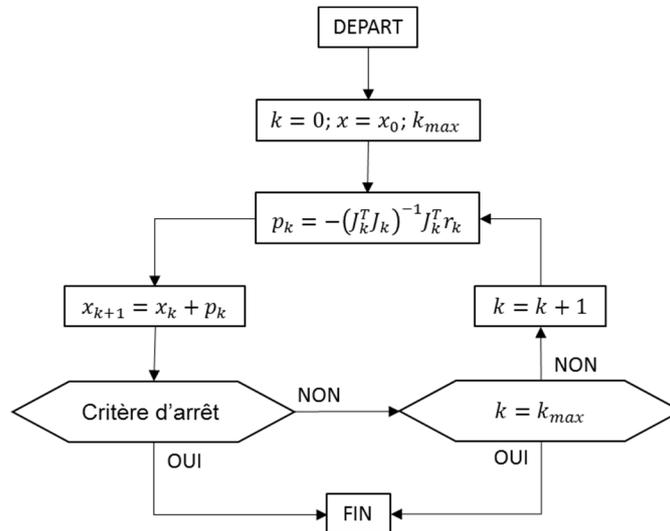


Figure I-51 : L'algorithme de la méthode de Gauss-Newton

En plus, nous pouvons également associer cette méthode avec la méthode de plus grande pente selon la condition de dérivé de second ordre de la fonction objectif comme la Figure I-50. La condition de défini positif du dérivé de second ordre de la fonction objectif peut être précisée maintenant via l'équation :

$$f''(x) = \nabla^2 f(x) = J^T \cdot J \quad (I-90)$$

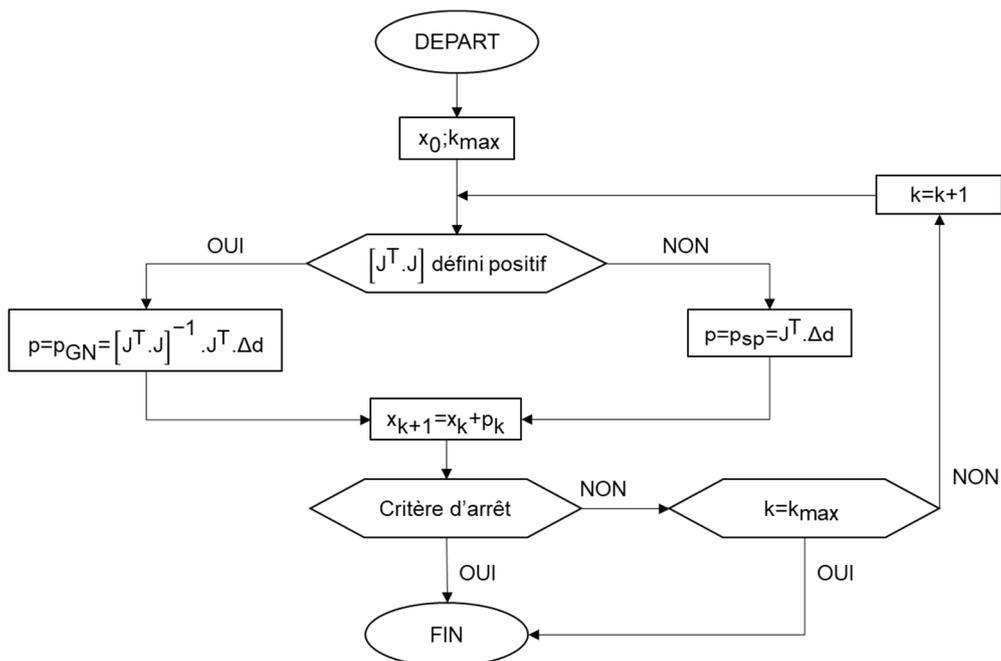


Figure I-52 : L'algorithme hydrique modifié

1.5.3.2. Méthode de Levenberg-Marquard

Levenberg (1944) et Marquardt (1963) ont ajouté un facteur d'amortissement λ pour calculer le vecteur de modification. Son rôle est de moduler la vitesse de convergence liée à diminution de la valeur de $f(x)$. Ainsi, l'équation (I-88) est corrigée de la façon suivante :

$$[J(x)^T \cdot J(x) + \lambda \cdot I_M] \cdot p_{LM} = -J(x)^T \cdot r(x) \quad (I-91)$$

avec I_M , la matrice identité. Dans ces conditions, la mise à jour de x s'effectue ainsi :

$$x_{k+1} = x_k + p_{LM} = x_k - [J(x)^T J(x) + \lambda \cdot I_M]^{-1} J(x)^T r(x) \quad (I-92)$$

L'algorithme de Levenberg (1944) est décrit par Ranganathan (2004) sous la forme proposée en Figure I-53.

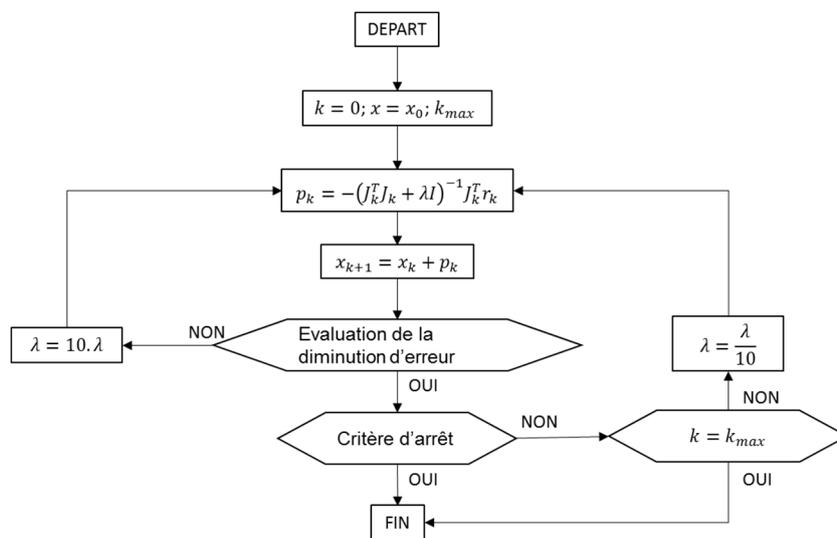


Figure I-53 : L'algorithme de Levenberg

La correction de l'amortissement λ est proposée par Marquardt (1963) suivant l'algorithme de la Figure I-54.

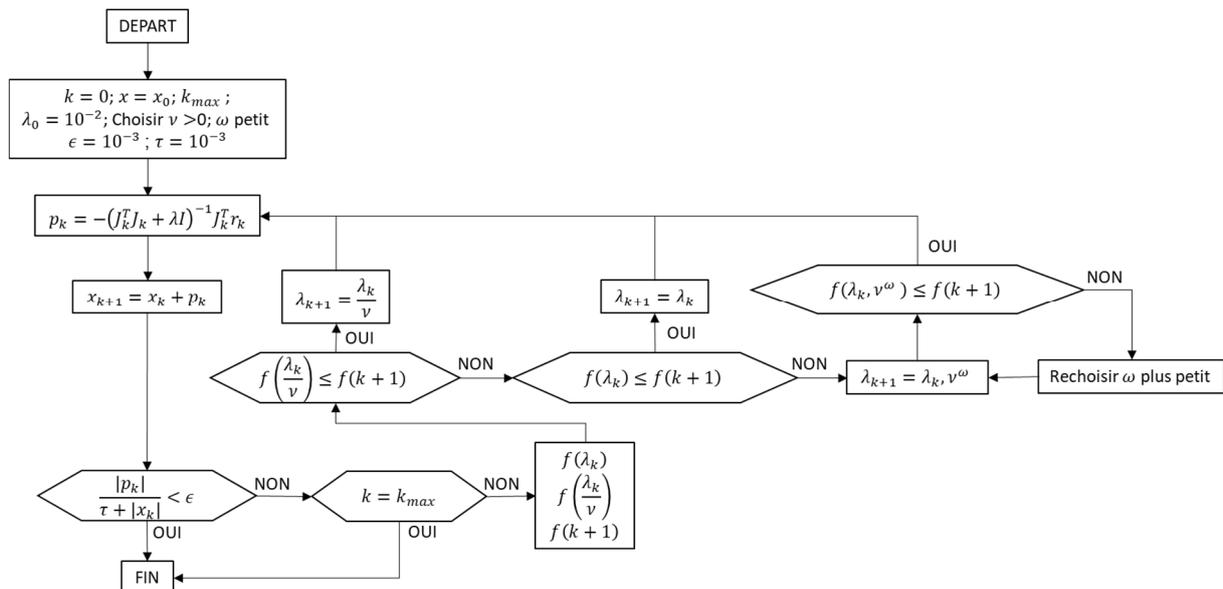


Figure I-54 : L'algorithme de Marquardt ajoutant la recherche de la valeur λ

La convergence de l'algorithme de Levenberg (Figure I-53) est fortement conditionnée à la valeur de λ . Si ce dernier est trop grand, la convergence devient très lente, voir stationnaire.

Cela pour conséquences d'entraîner un mouvement trop fort le long de la direction de descente où le gradient est plus petit pouvant ainsi atteindre un minimum local.

La matrice identité, équation (I-91), peut être remplacée par la diagonale de la matrice \mathbf{A}_M ($\mathbf{A}_M = \mathbf{J}(x)^T \mathbf{J}(x)$) dans le calcul de la mise à jour du vecteur x_{k+1} telle que:

$$x_{k+1} = x_k + p_{LM} = x_k - \left[\mathbf{J}(x)^T \mathbf{J}(x) + \lambda \cdot \text{diag}[\mathbf{A}_M] \right]^{-1} \mathbf{J}(x)^T r(x) \quad (I-93)$$

Madsen et al. (2004) ont étudié les effets de λ :

- Pour $\lambda > 0$, la matrice $\mathbf{J}(x)$ est définie positive, ce qui garantit que p_{LM} est une direction de descente
- Pour de grandes valeurs de λ , selon l'équation (I-92), la mise à jour du vecteur x_{k+1} n'est pas significative, ce qui entraîne un processus de convergence infiniment long.
- Si λ est petit, alors $p_{LM} \approx p_{GN}$. Dans ce cas, les dernières itérations (lorsque x est proche de x^*) conduisent à une convergence quasi quadratique.

Ainsi, le paramètre d'amortissement λ a une influence, à la fois, sur la direction et sur la taille du pas, ce qui amène à mettre en œuvre la méthode sans recherche de ligne spécifique. Le choix de la valeur λ initiale est lié à la taille des éléments dans $\mathbf{A}_0 = \mathbf{J}(x_0)^T \mathbf{J}(x_0)$. Nous proposerons, par exemple, la valeur initiale λ_0 suivante:

$$\lambda_0 = \psi \cdot \max(a_{ii}^{(0)}) \quad (I-94)$$

ψ est choisi par l'utilisateur même si l'algorithme n'est pas très sensible à son choix. Dans nos applications, nous choisirons $\psi = 1$. En appliquant l'algorithme présenté dans la Figure I-53, Nguyen (2014) a choisi ce facteur initial très élevé pour le modèle inverse du bois $\lambda_0 = 10^{16}$.

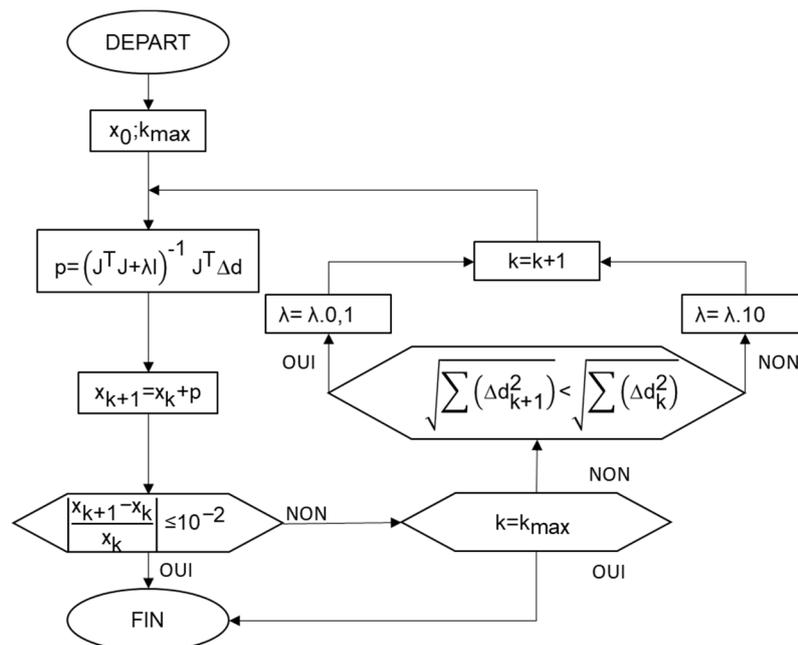


Figure I-55 : Algorithme de Levenberg appliqué par Nguyen (2014)

Pendant l'itération, λ peut être corrigé en fonction du rapport de gain ρ défini selon l'expression suivante (Nielsen 1999 ; Madsen & al. 2004):

$$\rho = \frac{f(x) - f(x + p_{LM})}{\frac{1}{2} p_{LM}^T [\lambda p_{LM} - J(x)^T r(x)]} \quad (I-95)$$

Nielsen (1999) a proposé une stratégie similaire mais en minimisant les seuils de telle sorte que:

- Si $\rho > 0$

$$\begin{aligned} x &= x + p \\ \lambda &= \lambda \cdot \max \left\{ \frac{1}{\gamma}; 1 - (\beta - 1)(2\rho - 1)^\vartheta \right\} \\ \varphi &= \beta \end{aligned} \quad (I-96)$$

- Si $\rho \leq 0$

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda \cdot \varphi \\ \varphi &= 2\varphi \end{aligned}$$

Dans ce cas, il a choisi $\varphi = \beta = 2$; $\gamma = 3$; $\vartheta = 3$. De plus, lorsque ρ est négatif, λ croît plus vite.

Enfin, le critère d'arrêt de convergence doit se référer à un minimiseur global ($f'(x^*) = J(x^*)^T r(x^*) = 0$). En considérant ε_1 comme étant un indice de minimisation, il devient le critère d'arrêt en respectant l'inégalité suivante:

$$\|J^T r\|_\infty \leq \varepsilon_1 \quad (I-97)$$

ε_1 est choisi par l'utilisateur selon la précision de convergence recherchée. Un autre critère de convergence repose sur les variations relatives ε_2 du vecteur x entre deux itérations successives tel que :

$$\|x_{new} - x\| \leq \varepsilon_2 (\|x\|) \quad (I-98)$$

Cette expression donne un changement progressif de la taille du pas relatif ε_2 . Enfin, comme dans tous les processus itératifs, nous avons besoin d'une protection contre une boucle infinie :

$$k \geq k_{max} \quad (I-99)$$

Finalement, l'algorithme général est proposé dans la Figure I-56.

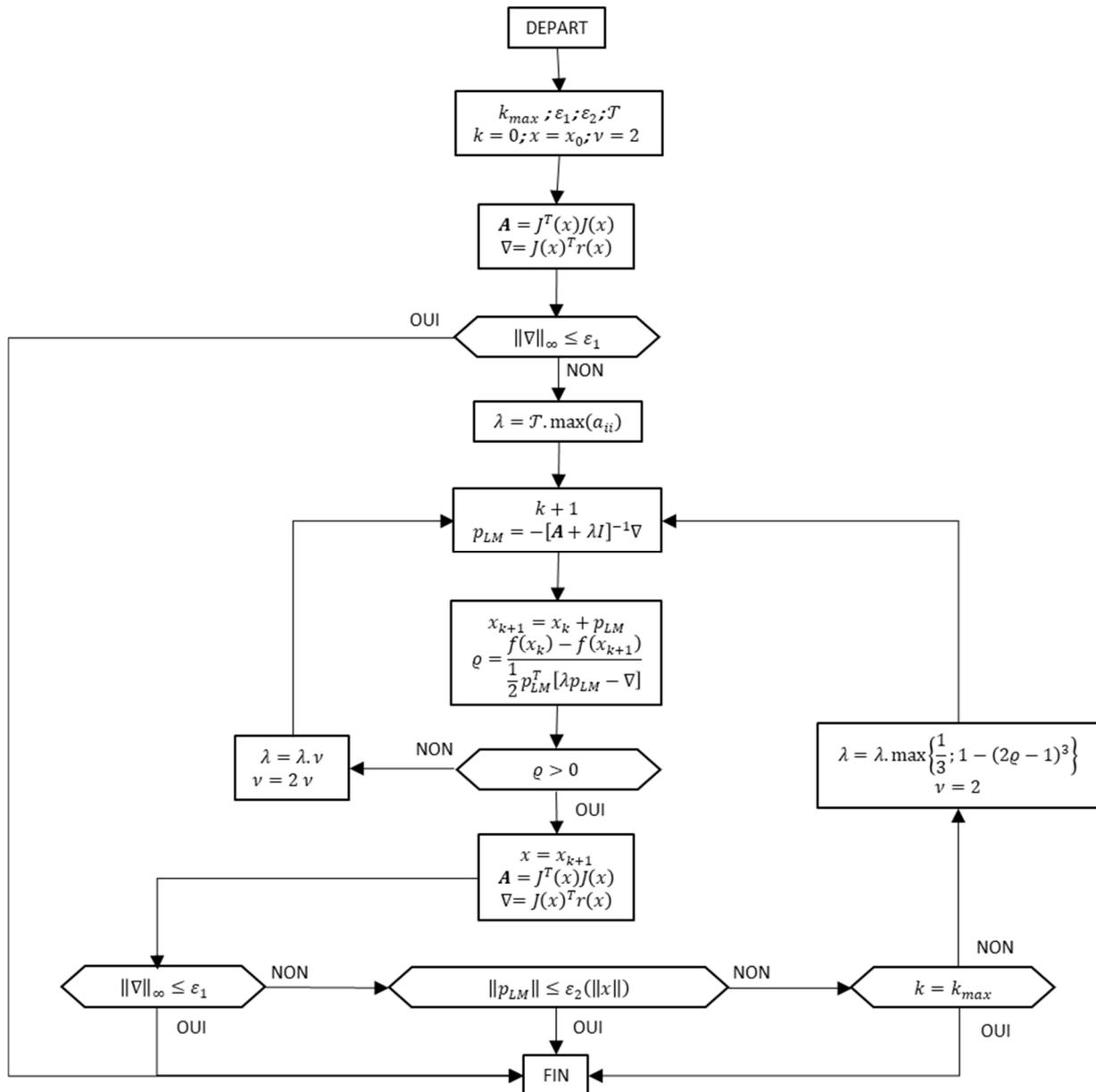


Figure I-56 : L'algorithme de la méthode de Levenberg-Marquardt

Conclusion

Cette partie a permis de présenter les propriétés électriques liées à l'hygroscopie des matériaux bois et terre crue. Les méthodes électriques sont présentées pour des applications en Génie Civil avec un focus particulier sur la tomographie électrique employée en géotechnique. Enfin, l'exploitation des mesures in-situ demandant un traitement analytique et numérique des données, il a été présenté les différentes méthodes d'analyse inverse pouvant être développées pour en déduire les champs hydriques dans les sections étudiées. Plus particulièrement, les méthodes d'inversion Gauss-Newton et Levenberg-Marquard ainsi que les algorithmes généraux de résolution ont été présentés. La suite de ce travail concerne donc la mise en application de ces techniques. Comme indiqué dans l'introduction générale, nous nous focaliserons sur le matériau terre crue. Pour cela, il est nécessaire de développer le support numérique permettant de calculer les champs de résistivité (calcul direct) ainsi que la mise en œuvre expérimentale. Cela fait l'objet des développements présentés dans le chapitre à venir en se limitant à des champs hydriques homogènes.

Chapitre II. Approches numériques et expérimentales pour un état hydrique homogène

Introduction

Ce chapitre se concentre sur la mise en œuvre du protocole expérimental et l'optimisation de la méthode d'inversion sur des échantillons de terre crue conditionnés à un état hydrique homogène. L'analogie entre le comportement électrique et thermique permet de développer une stratégie de modélisation de la conduction électrique. En prenant comme référence les travaux de tomographie électrique développés pour la prospection en géotechnique, un modèle aux éléments finis d'un quadripôle simple en surface d'un milieu semi-infini est développé. Il sera plus spécifiquement étudié les injections du courant par des nœuds et par des électrodes non ponctuelles. La conception du maillage des électrodes garantit la continuité du domaine étudié ainsi que l'optimisation du maillage et du temps de calcul. Dans un second temps, nous étudions un milieu fini et l'influence de ses frontières, et ce, en concordance avec les géométries des échantillons de terre crue équipés d'électrodes et conditionnés à humidité constante. Les résultats obtenus par la modélisation et le multiplexage associé sont confrontés aux mesures expérimentales effectuées par le résistivimètre Syscal Junior, dont les caractéristiques de base et avancées sont étudiées. Ce multiplexage, qui repose sur une succession de 24 quadripôles, est effectué à différentes teneurs en eau. Grâce à la méthode des moindres carrés, appliquée à la comparaison des données modélisées et expérimentales, la relation entre la résistivité et la teneur en eau homogène est déterminée. Enfin, un premier protocole expérimental de ceinturage est développé. Le modèle aux éléments finis et le multiplexage intégré sont adaptés à cette nouvelle configuration d'électrodes.

II.1. Modélisation d'un problème de conduction électrique

II.1.1. Implémentation dans un code éléments finis – Analogie électrique/thermique

La loi d'Ohm généralisée et la loi de Fourier présentent une analogie évidente entre le comportement de conduction électrique et le transfert de chaleur en régime permanent. Les correspondances entre les grandeurs électriques et thermiques sont présentées dans le Tableau II-1 (Nguyen 2014)

Tableau II-1 : Analogie électrique et thermique

Thermiques		Electriques	
Loi de Fourier	$\vec{\psi} = -\lambda_T \cdot \overrightarrow{\text{grad}}T$	Loi d'Ohm généralisée	$\vec{j} = -\sigma \overrightarrow{\text{grad}}V$
Conductivité thermique	$\lambda_T [W.m^{-1}.K^{-1}]$	Conductivité électrique	$\sigma [S.m^{-1}]$
Température	$T [K]$	Potentiel	$V [V]$
Densité de flux de chaleur	$\psi [W.m^{-2}]$	Densité de courant	$J [A.m^{-2}]$
Résistance thermique	$R_T [K.W^{-1}]$	Résistance électrique	$R [\Omega]$
Conductance thermique	$UA [W.K^{-1}]$	Conductance électrique	$G [S]$
Flux de chaleur	$\phi [W]$	Intensité	$I [A]$

C'est sur ce constat que repose la modélisation du processus de diffusion de courant électrique en appliquant les outils de transfert de chaleur implémentés dans le code aux éléments finis Cast3M.

II.1.2. Modélisation par éléments finis d'un quadripôle en surface d'un milieu semi-infini homogène

L'objectif de cette étude est de tester plusieurs stratégies de modélisation numérique d'un quadripôle injectant un courant électrique dans un matériau via un premier dipôle et mesurant la différence de potentiel aux bornes du second dipôle. Dans la présente étude, contrairement aux applications géophysiques, les espacements entre électrodes ne peuvent plus être considérés comme très grands par rapport à la taille des électrodes elles-mêmes. La question se pose donc de savoir dans quelle mesure l'hypothèse d'injections ponctuelles de courant reste valable, ou s'il est au contraire souhaitable de réaliser une modélisation réaliste de la géométrie des électrodes. Le milieu considéré est ici semi-infini et homogène, de manière à pouvoir confronter les résultats numériques aux solutions analytiques disponibles dans ce cas de figure.

II.1.2.1. Injections ponctuelles de courant

Pour modéliser le milieu semi-infini, un domaine parallélépipédique est étudié. Ses dimensions $L_{2x} \times L_{2y} \times L_{2z}$ sont très grandes par rapport à l'étendue du quadripôle, liée à la distance entre les électrodes. En raison de la symétrie du problème par rapport au plan xOz , seule la moitié du domaine est modélisée. Un petit parallélépipède rectangle (pavé) central de dimensions $L_{1x} \times L_{1y}/2 \times L_{1z}$, comprenant les électrodes, est modélisé par des éléments cubiques de taille constante c_1 , Figure II-1.

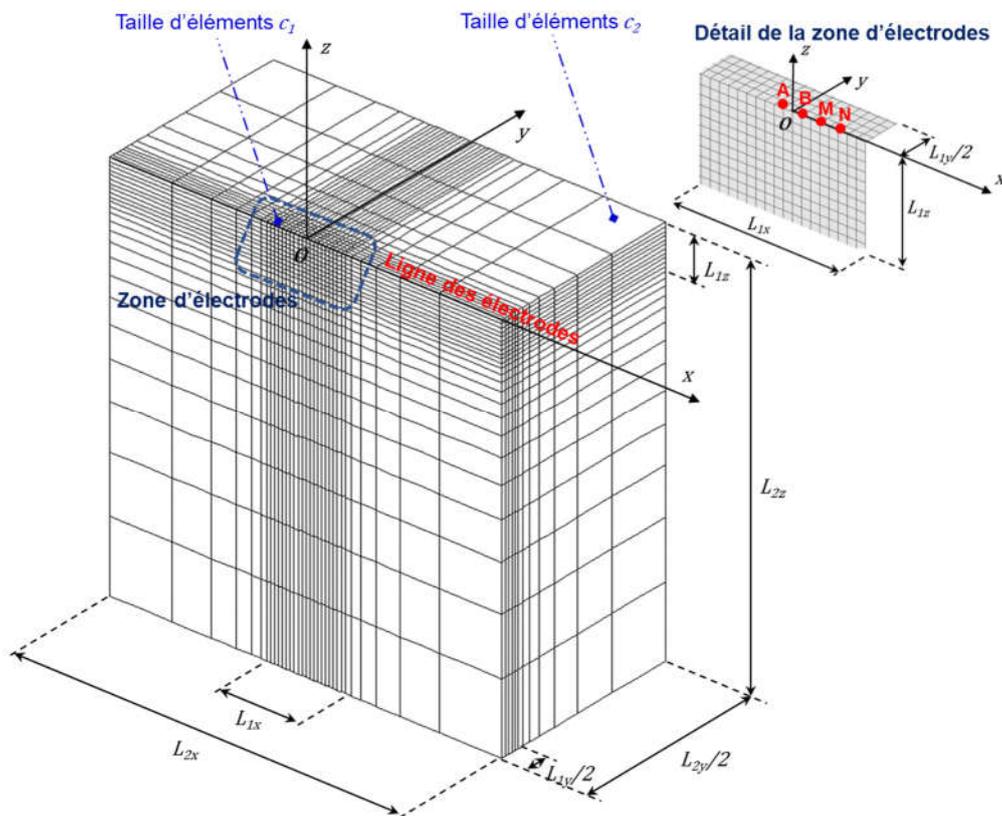


Figure II-1 : Maillage du problème d'injection par électrodes ponctuelles en milieu « semi-infini »

Le domaine extérieur est constitué d'éléments parallélépipédiques dont la taille passe progressivement de c_1 (au contact du pavé central) à $c_2 \gg c_1$ pour les éléments les plus lointains, ceci de manière à limiter le nombre d'éléments, et donc les temps de calcul. Deux points d'injections ponctuelles A et B sont créés sur la ligne Ox, symétriquement par rapport à l'origine. Deux points de réception de potentiel M et N sont créés sur le même alignement. Le quadripôle choisi étant de type Wenner β , les quatre électrodes sont espacées régulièrement d'une distance a.

Considérons un matériau de résistivité homogène $\rho=1\Omega m$. Dans le modèle complet, un courant $I_{AB}=1 A$ est injecté par l'électrode A et sortant par l'électrode B avec un écartement a de 1m. Du fait de la symétrie, seule la moitié de l'intensité est injectée numériquement. Un potentiel nul est imposé au point de coordonnées $(0, 0, -L_{2z})$

Le problème de Laplace est résolu par les opérateurs de thermique stationnaire classiques intégrés au code Cast3M. La Figure II-2 illustre les cartographies du potentiel obtenues sur la surface et dans le plan de symétrie xOz, ainsi que dans les plans yz, et ce, au droit des électrodes de réception.

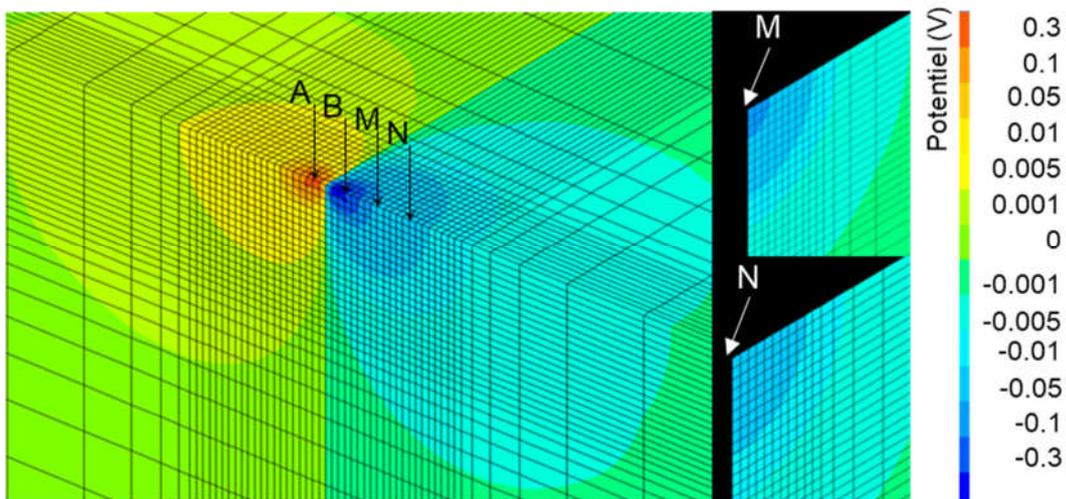


Figure II-2 : Champs potentiel au voisinage des électrodes

Les potentiels relevés sur la ligne des électrodes sont tracés et comparés avec des potentiels analytiques selon l'équation (I-50), Figure II-3. Pour un potentiel de référence nul à l'infini, le potentiel analytique sur la ligne d'électrodes est donné par la relation suivante :

$$V_{\text{analytique}} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{I_A}{r_A} + \frac{I_B}{r_B} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (\text{II-1})$$

r_A, r_B sont respectivement les distances entre les électrodes ponctuelles et les points où sont calculés les potentiels. La modélisation emploie des éléments tridimensionnels linéaires à 8 nœuds (CUB8). La répartition des potentiels obtenue présente des singularités aux points d'injection A et B, pour lesquels le potentiel est théoriquement infini. Ceci se manifeste dans le modèle aux éléments finis par des valeurs de potentiel très importantes sur ces nœuds, mais qui ne prennent pas exactement en compte la singularité. On constate des oscillations sur la courbe au voisinage immédiat des électrodes. Celles-ci apparaissent à une distance des électrodes d'autant plus grande que le maillage est grossier.

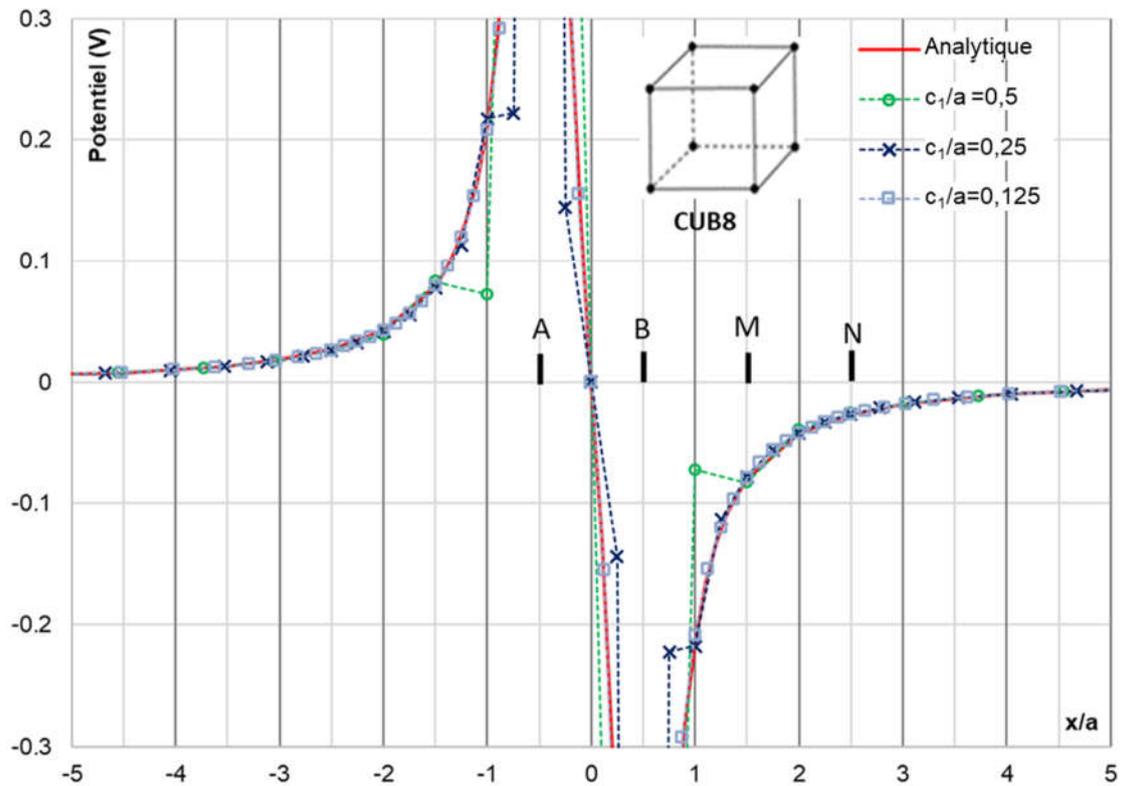


Figure II-3 : Potentiels éléments finis et analytique sur la ligne des électrodes ponctuelles

Une seconde modélisation est basée sur un maillage composé d'éléments quadratiques à 20 nœuds (CU20) dont les résultats sont présentés en Figure II-4.

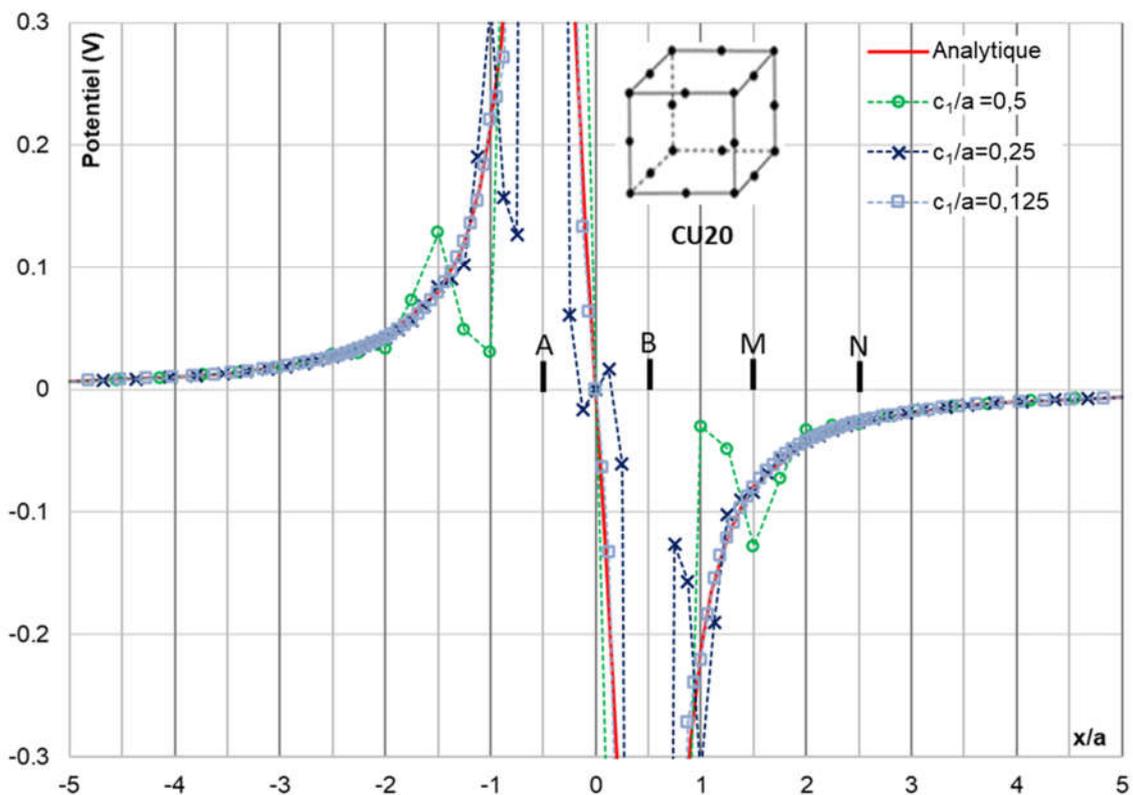


Figure II-4 : Potentiels éléments finis et analytique sur la ligne des électrodes ponctuelles (éléments quadratiques à 20 nœuds : CU20)

Nous observons que ces oscillations sont plus prononcées pour un maillage d'éléments quadratiques (CU20) que pour un maillage d'éléments linéaires (CUB8). Il s'agit alors de déterminer dans quelle mesure cette difficulté peut altérer la valeur de la différence de potentiel relevée sur une paire d'électrodes réceptrices.

Considérant une configuration Wenner β , une étude de sensibilité va permettre de préciser les conditions requises pour le maillage pour que la solution numérique soit la plus proche possible de la solution analytique. Ces comparaisons portent sur un scalaire unique qui est le facteur géométrique défini comme suit :

$$K = \rho \frac{I_{AB}}{\Delta V_{MN}} \quad (II-2)$$

Dans le cas qui nous intéresse, ce facteur se définit ainsi

$$K = 6\pi a \quad (II-3)$$

A présent, nous proposons d'étudier l'influence des paramètres suivants :

- Distance de troncature du milieu semi infini : ratio L_2/a (L_2 : dimension caractéristique du pavé extérieur constitué de densités d'éléments variables : $L_{2x}=L_{2y}=L_{2z}=L_2$)
- Raffinement du pavé central : ratio c_1/a (c_1 : coté des éléments cubiques du pavé central)
- Taille du pavé central : ratio L_{1yz}/a , (L_{1yz} : dimension transversale caractéristique du pavé central : $L_{1yz}=L_{1y}=L_{1z}$)

Une étude de sensibilité préalable a montré que certains paramètres n'ont pas d'influence sur la précision des résultats. Ainsi, le paramètre L_{1x} est choisi de telle manière que l'électrode de réception N soit exactement à la limite du pavé central ($L_{1x}=5 \times a$). Il est prouvé que des valeurs supérieures de L_{1x} n'ont aucune influence sur la précision de la solution. De la même manière, la taille des éléments plus lointains est en progression géométrique de manière à atteindre la valeur $c_2=10 \times a$ à la distance $50 \times a$ du centre du dipôle d'injection. Elle n'a pas d'influence sensible sur la précision des résultats.

Pour chaque type d'élément fini (CUB8 ou CU20), le jeu de valeurs des trois paramètres qui donne la solution la plus exacte est le suivant :

- $c_1/a=0,0625$
- $L_{1yz}/a=5$
- $L_2/a = 50$

Par rapport à ces valeurs de base, nous étudions séparément la sensibilité de chaque paramètre sur la précision de la solution, les deux autres paramètres restants fixes.

La Figure II-5 montre que l'hypothèse d'un milieu semi-infini est satisfaite pour une troncature de maillage à une distance égale à 50 fois l'espacement entre électrodes. Dans ce cas, il est donc inutile de faire des maillages plus étendus. Si, par souci d'économie de temps de calcul, nous réduisons l'étendue du pavé extérieur, l'erreur augmente. Elle est, par exemple, de l'ordre de 2% pour une troncature à une distance de 10 fois l'espacement entre électrodes, et ce, quel que soit le type d'élément utilisé.

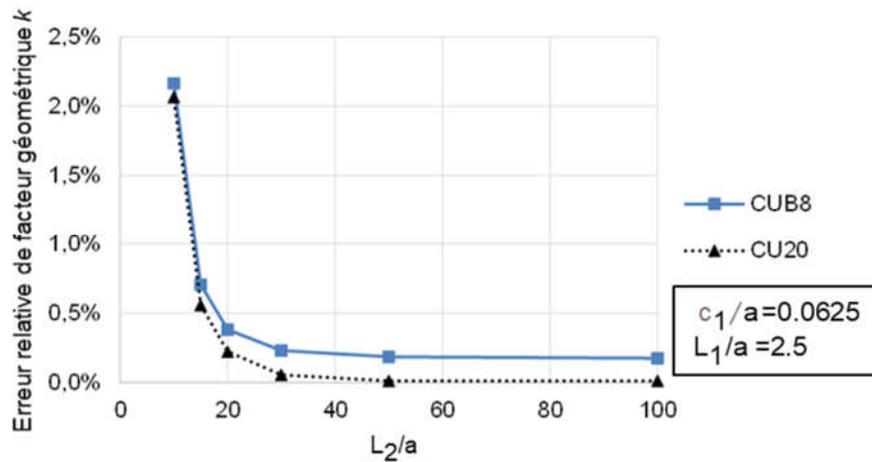


Figure II-5 : Erreur relative sur le facteur géométrique K par rapport à la solution analytique en fonction de la taille du pavé externe

La Figure II-6 met en évidence l'influence de la taille des éléments entourant les électrodes sur la précision de la solution. Pour des CUB8, la précision reste acceptable (erreur relative inférieure à 2%) pour des tailles d'éléments allant jusqu'au quart de l'espacement entre électrodes. Pour le raffinement maximal étudié, l'erreur résiduelle est de 0.17%. Pour des CU20, l'erreur est inférieure à 0.05% pour des tailles d'éléments inférieures au huitième de l'espacement entre électrodes. En revanche, l'erreur augmente de manière beaucoup plus significative au-delà, en comparaison avec les éléments linéaires CUB8. L'usage de CU20 permet donc d'obtenir la meilleure précision à condition que le maillage soit très fin. Cependant, ils dégradent fortement la précision de la solution lorsque la taille des éléments augmente, ce qui est cohérent avec l'observation des fortes oscillations à des distances assez éloignées des électrodes d'injection faite en Figure II-4. La Figure II 6 montre également que la durée de calcul (pour la résolution du problème de Laplace) peut augmenter de manière très significative lorsque la taille des éléments du pavé central diminue.

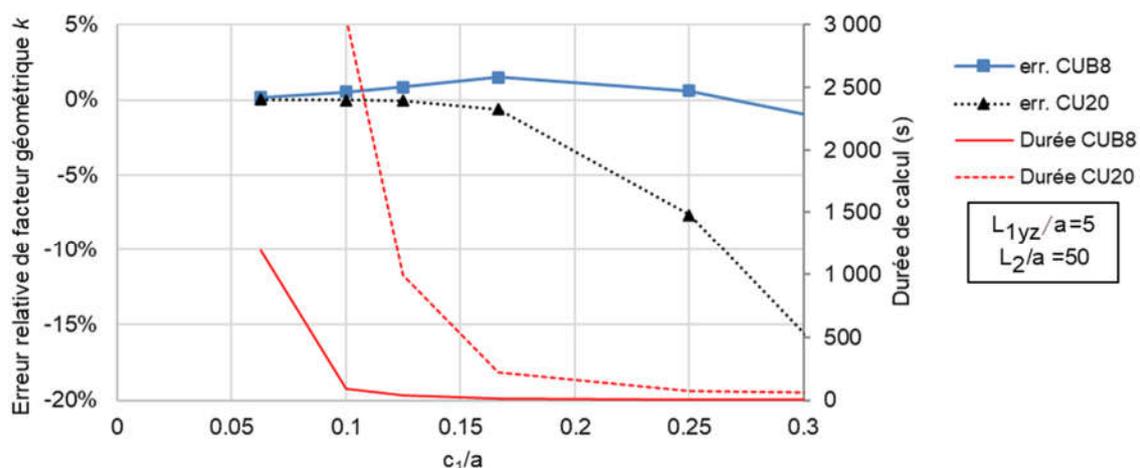


Figure II-6 : Erreur relative sur le facteur géométrique K par rapport à la solution analytique et temps de calcul en fonction de la taille des éléments du pavé central

La Figure II-7 souligne l'influence de l'étendue du pavé central de maillage fin dans les directions Oy et Oz. Pour un maillage employant des éléments CUB8, la réduction de cette zone provoque une légère augmentation de l'erreur qui peut atteindre 0.65% pour une largeur de zone raffinée égale au cinquième de l'espacement entre électrodes. En revanche, pour des

CU20, l'étendue de cette zone n'a aucune influence sur la précision de calcul. L'importance d'une zone de maillage fin de densité constante autour des électrodes semble donc relativement secondaire.

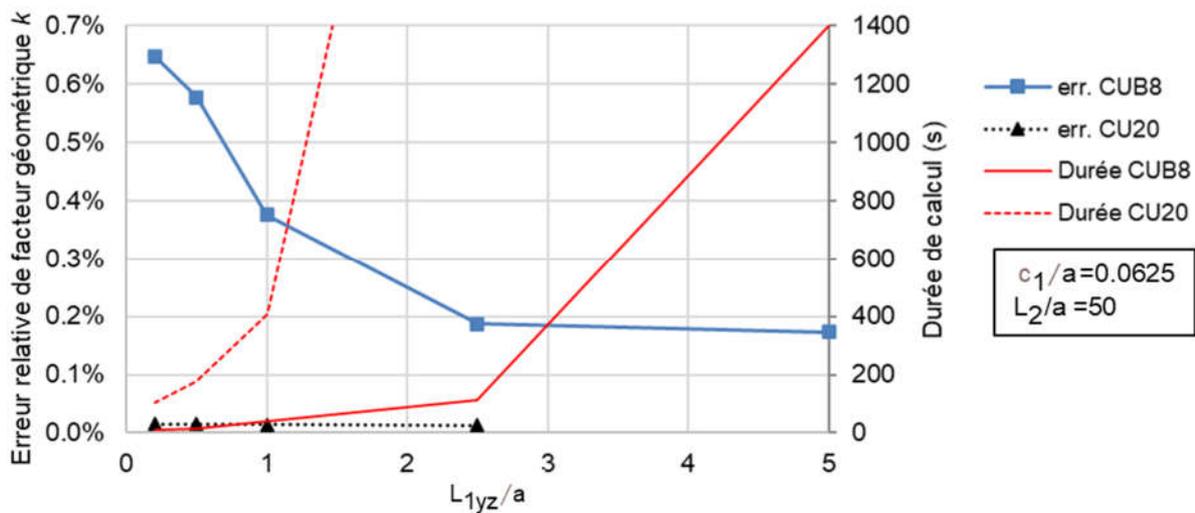


Figure II-7 : Erreur relative sur le facteur géométrique K par rapport à la solution analytique en fonction de la taille du pavé central

Au vu de ces résultats, il est possible de trouver, pour une précision souhaitée, une solution optimisant la durée du calcul pour chaque type d'élément en agissant, à la fois, sur l'étendue de la zone maillée finement et sur la taille des éléments de cette zone. Le Tableau II-2 donne deux solutions permettant d'obtenir une erreur inférieure à 1%.

Tableau II-2 : Deux autres exemples des différentes valeurs de $\frac{c_1}{a}$ et $\frac{L_{1yz}}{a}$

Type d'élément	Taille des éléments autour des électrodes $\frac{c_1}{a}$	Etendue de la zone discrétisée finement $\frac{L_{1yz}}{a}$	Erreur relative sur k (%)	Durée du calcul (s)
CUB8	0.1	2.5	0.55	35
CU20	0.1667	0.2	0.67	16

II.1.2.2. Modélisation des électrodes réelles

Les électrodes sont à présent modélisées conformément à leur géométrie réelle. Deux types d'électrodes sont envisagés :

- Les électrodes en surface (Esurf) : Elles sont constituées d'un cylindre infiniment conducteur de rayon r_e et d'épaisseur e_e , dont la base inférieure est en contact avec la surface du matériau.
- Les électrodes en profondeur (Eprof) : Elles sont constituées d'un cylindre infiniment conducteur de rayon r_e et de hauteur d'enfoncement h_e à partir de la surface libre du matériau en contact avec celui-ci sur la base inférieure et la surface latérale.

Dans les deux cas, l'intensité est appliquée sous la forme d'une densité de flux uniforme sur la surface supérieure de l'électrode (que nous appellerons « cosse »). Les électrodes sont constituées d'un matériau quasi infiniment conducteur ($\rho=10^{-7}\Omega m$). Pour l'électrode en surface, il a été constaté numériquement que la densité de courant sur la face de l'électrode au contact du matériau n'est pas nécessairement uniforme. Cette manière de modéliser

l'électrode reproduit donc fidèlement les conditions réelles de l'injection, ce qui n'aurait pas été le cas si la densité de courant avait été directement appliquée à la surface du matériau.

a. Conception du maillage d'une électrode

Pour les calculs directs de multiplexage qui suivront, il est indispensable de pouvoir insérer facilement des alignements d'électrodes sur la surface des domaines étudiés de façon à obtenir un maillage compatible avec l'algorithme d'analyse inverse tout en évitant des éléments dégénérés (grand élançement) induisant des imprécisions numériques.

Le maillage élémentaire d'une électrode et de son environnement immédiat doit rester aussi économe que possible (nombre de nœuds) de manière à ne pas pénaliser le temps de résolution du problème de Laplace.

Pour évaluer la validité d'un maillage d'une électrode cylindrique et de sa transition avec le matériau environnant, une solution de référence est nécessaire. En l'absence de solution analytique, le choix est fait de modéliser l'injection de courant par une électrode unique insérée à la surface d'un milieu de très grandes dimensions (tendant vers un milieu semi-infini). Ce problème peut être résolu numériquement par une modélisation bidimensionnelle axisymétrique. Le maillage 2D correspondant est choisi suffisamment fin pour s'assurer de la convergence du calcul; ce qui valide la solution de référence. Atteindre cette même convergence avec un maillage tridimensionnel aurait nécessité des temps de calculs extrêmement longs, Figure II-8

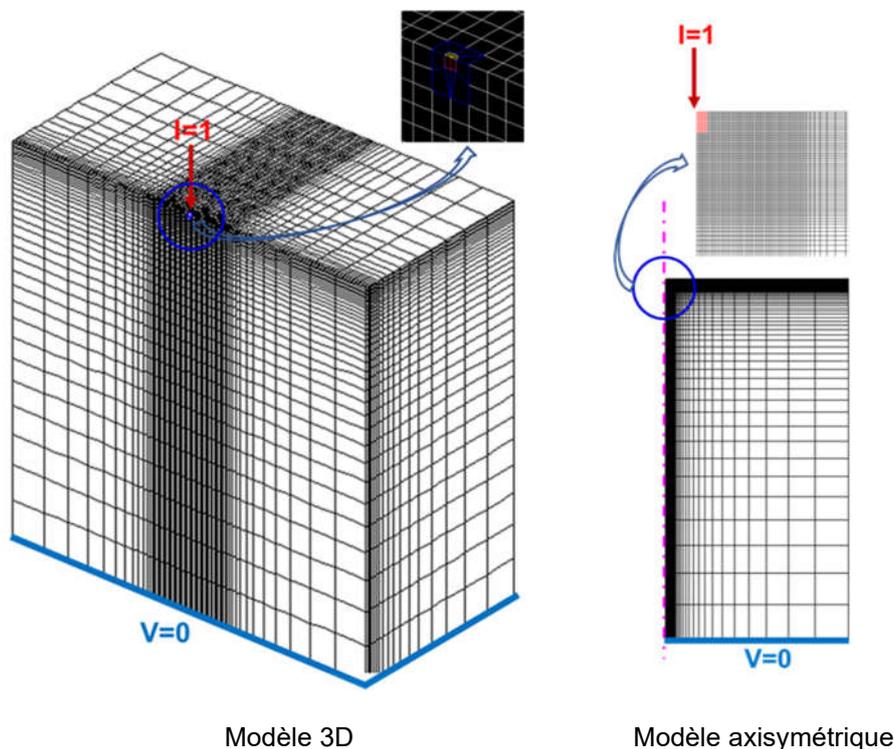


Figure II-8 : Maillage 3D et axisymétrique avec une électrode dans un milieu de grandes dimensions
La modélisation tridimensionnelle d'une électrode peut être abordée de différentes manières :

Extrusion du maillage de surface

La surface libre du matériau est modélisée en intégrant un disque qui correspond à l'électrode vue en coupe. La transition entre ce disque et un contour rectangulaire externe s'effectue par

des éléments quadrilatéraux rayonnant à partir de l'électrode. Le domaine ainsi créé peut s'insérer dans une trame d'éléments rectangulaires plus étendue. Cette surface plane est ensuite extrudée dans la direction normale pour créer le domaine tridimensionnel étudié.

L'inconvénient majeur de cette technique de discrétisation est que, afin d'assurer la continuité du matériau sous l'électrode, le disque générant l'électrode doit être extrudé jusqu'à l'extrémité inférieure du domaine sous la forme d'un cylindre vertical. Ce type de discrétisation est donc applicable soit pour des électrodes disposées sur une même face soit pour des positions identiques sur des faces en vis-à-vis. En revanche, des dispositions d'électrodes en ceinturage ne sont pas envisageables en raison de l'impossibilité de mailler correctement les zones d'intersection des cylindres.

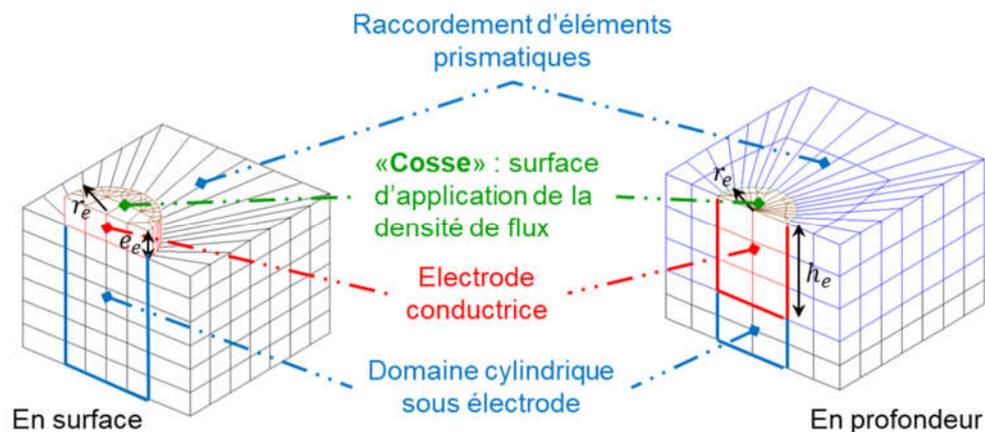


Figure II-9 : Maillage par extrusion de la coupe d'électrode

Incorporation dans une trame parallélépipédique

Du fait de l'alignement des électrodes et de leur équidistance, une solution évidente consiste à incorporer ces électrodes dans une maille d'éléments parallélépipédiques dont les côtés sont : c_x , c_y et c_z , Figure II-10. Le maillage d'une électrode est donc à considérer en même temps que celui de son entourage immédiat dont la surface externe est un parallélépipède rectangle en cohérence avec la trame du maillage du domaine sur lequel il va se raccorder. Pour une trame donnée, les dimensions de l'électrode peuvent varier dans certaines limites dépendant de la distorsion des éléments de raccord. Une difficulté particulière intervient pour le raccordement du disque de la face inférieure de l'électrode avec les éléments parallélépipédiques de la trame. Cette zone de transition a recours à des éléments tétraédriques (TET4, TE10) et pyramidaux (PYR5, PY13). Par commodité de langage, nous appellerons « enrobage » l'ensemble des éléments de transition entre l'électrode et la trame parallélépipédique.

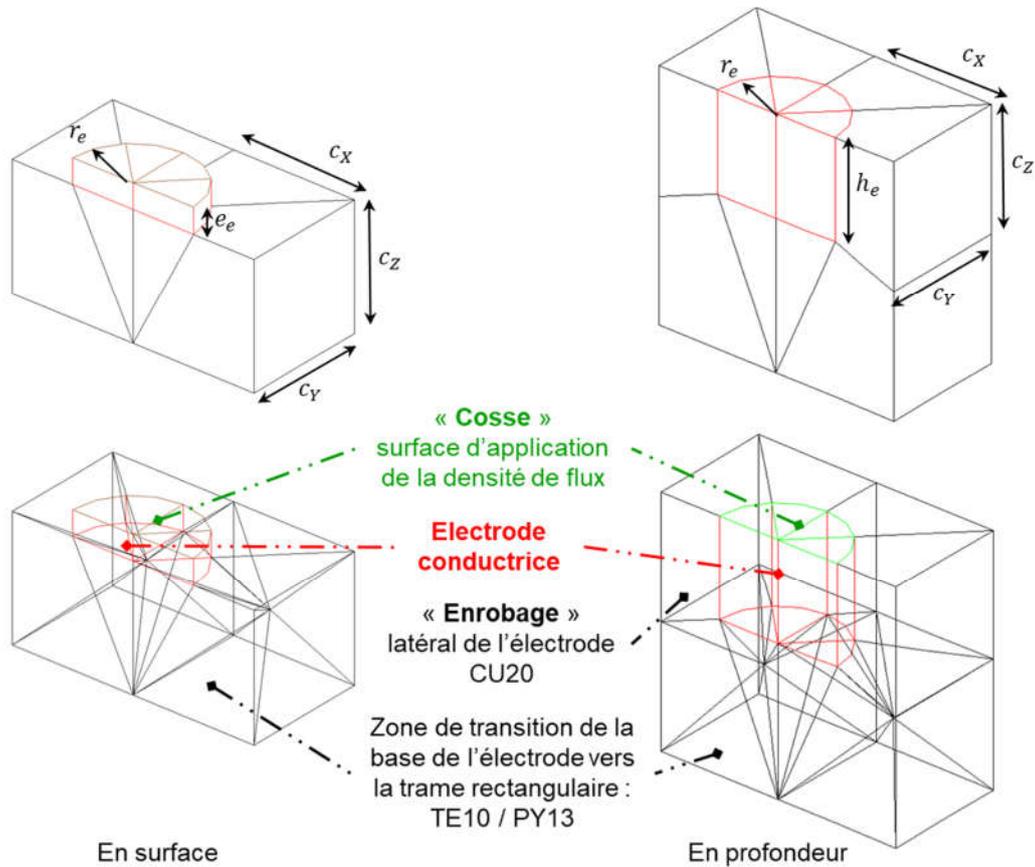


Figure II-10 : Maillage quadratique d'une électrode et de sa transition avec la trame parallélépipédique

Considérons une électrode de rayon r_e unitaire, de type Esurf ou Eprof à la surface d'un milieu semi-infini. L'intensité appliquée sur l'électrode est également unitaire. Un potentiel de référence nul est appliqué sur la base du domaine éloignée de toute interaction avec l'électrode. La Figure II-11 montre, pour une électrode en surface, le tracé du potentiel de surface le long d'une ligne radiale issue du centre de l'électrode pour différents ratios c_1/r_e , c_1 désignant la largeur de la maille cubique ($c_1=c_x=c_y=c_z$). Les distributions de potentiels calculées par ce modèle tridimensionnel sont comparées à la courbe de référence issue du modèle axisymétrique.

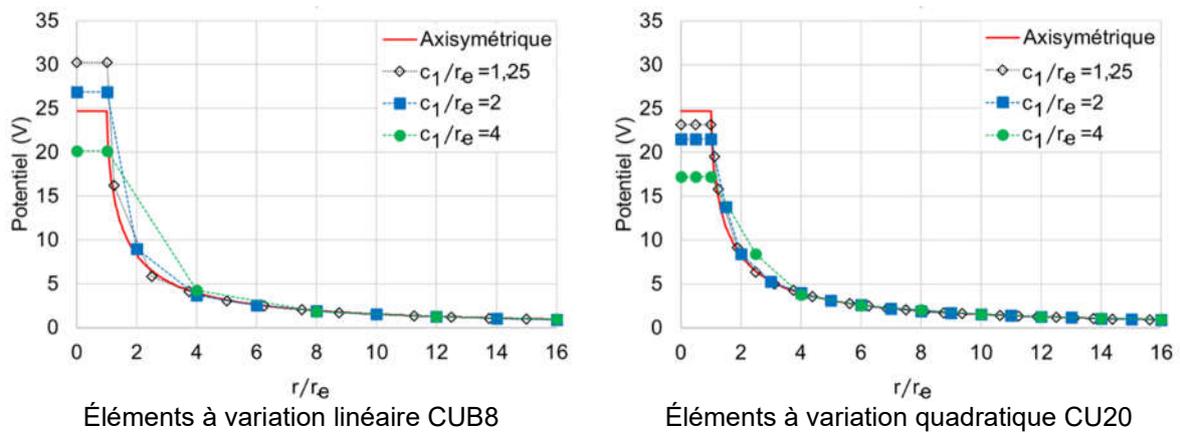


Figure II-11 : Distribution de potentiel sur la surface d'un milieu semi-infini pour une électrode en surface

La modélisation de la géométrie réelle des électrodes régularise le problème en supprimant le potentiel théoriquement infini au voisinage des électrodes ponctuelles donnant lieu à des 'singularités' numériques.

Le potentiel de l'électrode d'injection est sensible au ratio c_1/r_e . Il s'éloigne d'autant plus de la valeur de référence que la maille est large par rapport au rayon de l'électrode. Ceci peut être attribué au caractère grossier et fortement élancé des éléments d'enrobage. Cet inconvénient n'est toutefois pas un handicap car la méthode de tomographie ne requiert pas la connaissance précise du potentiel aux électrodes d'injection (A et B). En revanche, en s'éloignant de l'électrode avec un ratio r/r_e supérieur à 4, le potentiel rejoint la valeur de référence quels que soient la finesse de la trame et le type d'élément. Dans les configurations expérimentales qui nous intéressent, le pas entre électrodes est généralement supérieur ou égal à cinq fois le diamètre de celles-ci. Les électrodes de potentiel M et N sont donc dans une zone pour laquelle l'exactitude des valeurs du potentiel n'est pas affectée par les imperfections du maillage de la zone d'enrobage. Les mêmes tendances sont observées pour des électrodes en profondeur, Figure II-12.

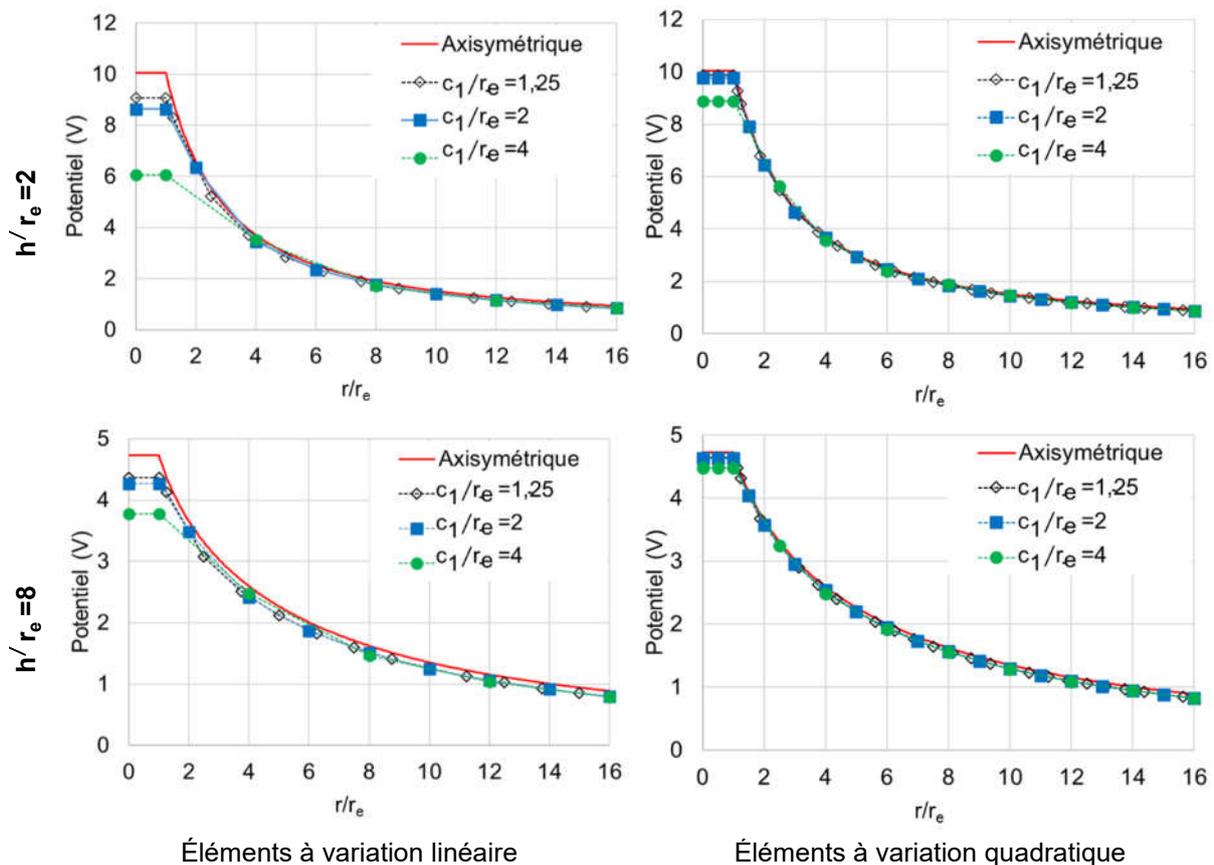


Figure II-12 : Distribution de potentiel sur la surface d'un milieu semi-infini pour une électrode en profondeur

Le Tableau II-3 présente les valeurs des potentiels V_M obtenues aux emplacements présumés d'électrodes de réception pour différentes hauteurs d'électrodes et pour différents choix de discrétisation. r_M désigne la distance entre l'électrode d'injection et l'électrode de calcul du potentiel.

Tableau II-3 : Calcul du potentiel aux emplacements des électrodes réceptrices et écarts par rapport à la solution de référence axisymétrique

		Esurf			Eprof $h/r_e=2$			Eprof $h/r_e=8$			
Point M de prise de potentiel	r_M/r_e	5	10	15	5	10	15	5	10	15	
Référence axisymétrique		$V_M(V)$	3.137	1.531	1.005	3.010	1.514	1.000	2.267	1.354	0.943
Extrusion	CUB8	$V_M(V)$	3.085	1.475	0.947	2.951	1.458	0.942	2.208	1.297	0.885
	$\frac{c_1}{r_e}=1,25$	Erreur (%)	-1.67	-3.62	-5.69	-1.95	-3.72	-5.75	-2.63	-4.19	-6.07
	CUB8	$V_M(V)$	3.106	1.475	0.948	2.948	1.457	0.942	2.199	1.294	0.884
	$\frac{c_1}{r_e}=2$	Erreur (%)	-1.00	-3.60	-5.69	-2.07	-3.76	-5.77	-3.03	-4.40	-6.19
	CUB8	$V_M(V)$	3.149	1.499	0.952	3.047	1.464	0.946	2.207	1.287	0.884
	$\frac{c_1}{r_e}=4$	Erreur (%)	0.37	-2.08	-5.26	1.23	-3.30	-5.35	-2.66	-4.95	-6.23
Incorporation trame parallélépipédique	CUB8	$V_M(V)$	3.060	1.490	0.964	2.833	1.412	0.915	2.118	1.254	0.858
	$\frac{c_1}{r_e}=1,25$	Erreur (%)	-2.47	-2.63	-4.00	-5.87	-6.71	-8.50	-6.57	-7.40	-8.99
	CUB8	$V_M(V)$	3.122	1.519	1.001	2.898	1.405	0.917	2.142	1.251	0.860
	$\frac{c_1}{r_e}=2$	Erreur (%)	-0.49	-0.78	-0.41	-3.73	-7.21	-8.31	-5.54	-7.59	-8.80
	CUB8	$V_M(V)$	/	1.566	/	/	1.431	/	/	1.255	/
	$\frac{c_1}{r_e}=4$	Erreur (%)	/	2.31	/	/	-5.48	/	/	-7.28	/
	CU20	$V_M(V)$	3.101	1.497	0.967	2.950	1.457	0.942	2.206	1.296	0.885
	$\frac{c_1}{r_e}=1,25$	Erreur (%)	-1.17	-2.20	-3.74	-1.99	-3.78	-5.81	-2.69	-4.25	-6.13
	CU20	$V_M(V)$	3.141	1.533	1.001	2.950	1.457	0.941	2.204	1.295	0.884
	$\frac{c_1}{r_e}=2$	Erreur (%)	0.11	0.16	-0.40	-2.01	-3.79	-5.83	-2.82	-4.30	-6.17
	CU20	$V_M(V)$	3.151	1.576	1.035	2.968	1.464	0.945	2.200	1.289	0.885
	$\frac{c_1}{r_e}=4$	Erreur (%)	0.43	2.99	2.99	-1.41	-3.28	-5.45	-2.96	-4.81	-6.10

Les erreurs relatives les plus faibles sont obtenues pour une taille de trame égale au diamètre de l'électrode ($c_1/r_e=2$). Des trames plus fines donnent des résultats plus imprécis en raison d'éléments très élancés dans la zone d'enrobage. Des trames plus larges sont également moins précises du fait de l'appauvrissement du nombre d'éléments dans l'espace inter-électrodes. Pour l'extrusion du maillage de surface, les erreurs relatives sont faibles lorsque le rapport c_1/r_e augmente.

En conclusion, malgré leur caractère relativement grossier visant à économiser le nombre d'éléments, les deux techniques de maillage d'électrodes (par extrusion ou par incorporation en trame parallélépipédique via un enrobage de transition) sont en mesure de procurer des valeurs de potentiel correctes, et ce, avec une erreur relative inférieure à 1% par rapport à la solution de référence pour des électrodes en surface. Il n'est pas observé de différence notable entre des éléments linéaires et des éléments quadratiques. Pour des électrodes en profondeur, cette erreur relative est significativement plus importante (supérieure à 2%), et s'accroît systématiquement lorsque le point de prise de potentiel s'éloigne de l'électrode.

b. Influence des dimensions réelles des électrodes dans un quadripôle

Il s'agit maintenant de quantifier l'impact des dimensions réelles des électrodes sur le facteur géométrique d'un quadripôle. Ceci permettra de connaître les limites d'applicabilité de la simulation par électrodes ponctuelles.

Pour continuer à bénéficier d'une solution théorique en injection ponctuelle, le modèle choisi (Figure II-13) représente un milieu semi-infini, avec des dimensions identiques à celui présenté précédemment pour les électrodes ponctuelles. L'étude va porter sur l'influence du diamètre et de l'enfoncement des électrodes, pour un écartement a donné. Comme pour le modèle d'injections ponctuelles, la symétrie permet de n'étudier que la moitié du domaine. Nous utilisons des éléments quadratiques CU20 et retenons (pour le ratio entre la largeur de trame et le rayon d'électrode) la valeur : $c_1/r_e = 2$. Il a été montré précédemment que ces choix conduisaient à la meilleure précision de calculs.

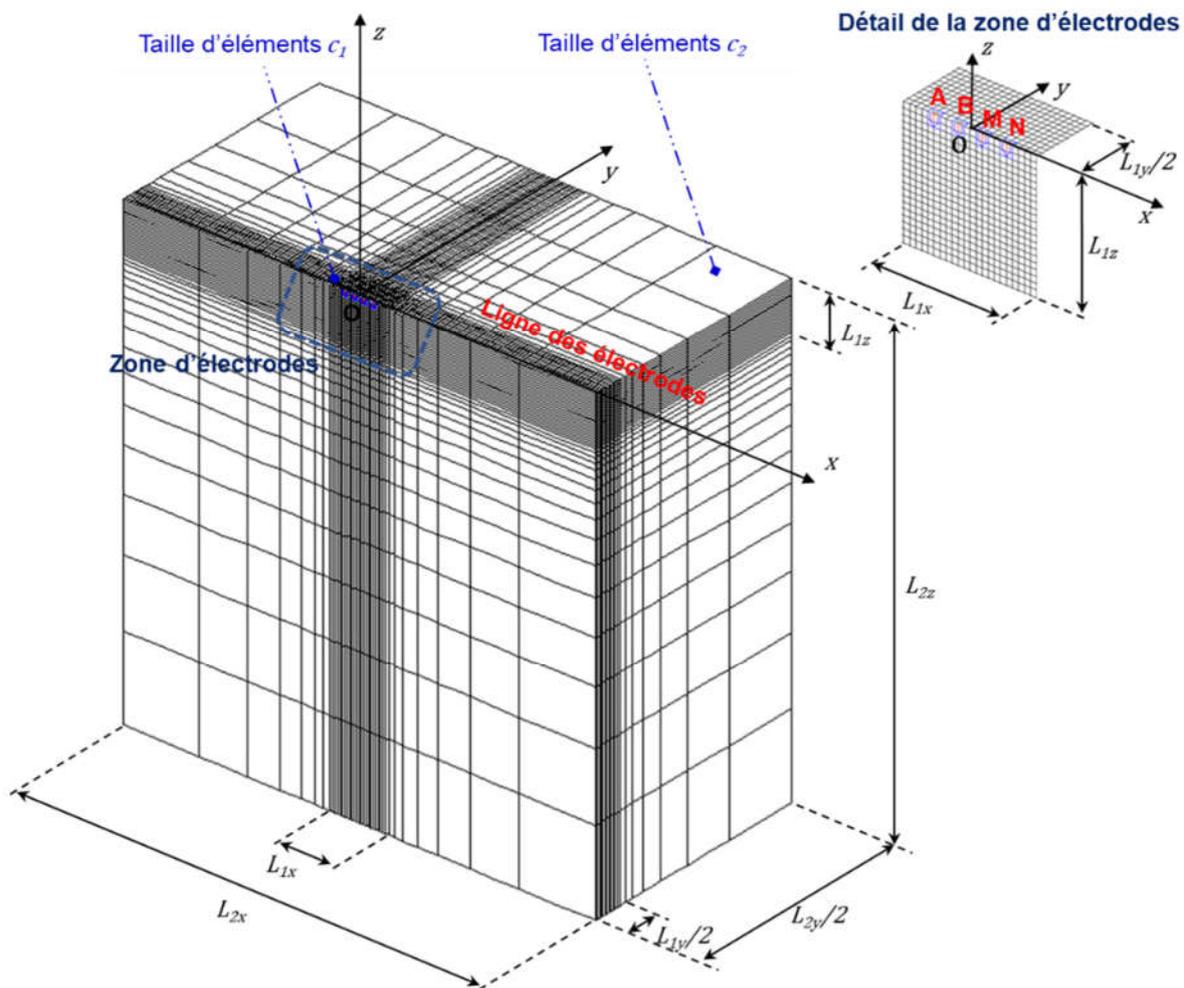


Figure II-13 : Maillage du problème d'injection par électrodes réelles en milieu « semi-infini »

Les potentiels relevés sur la ligne des électrodes réelles sont tracés et comparés avec l'évolution du potentiel analytique pour des injections ponctuelles (Figure II-14).

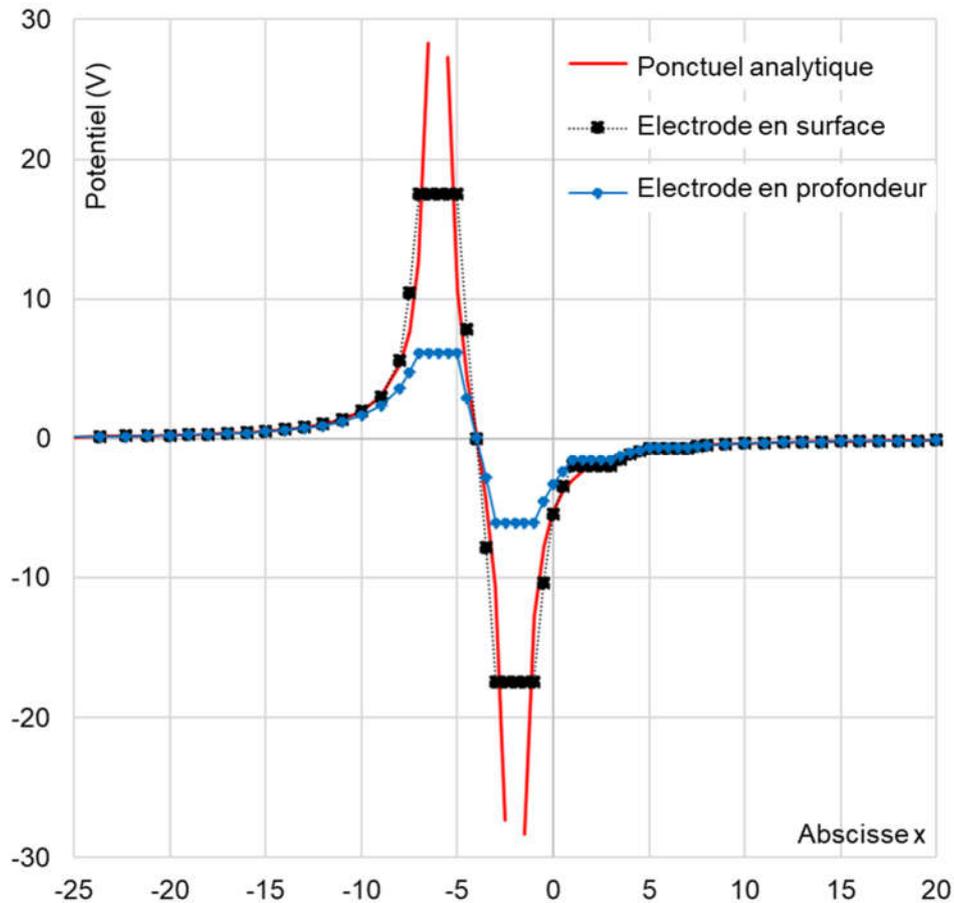


Figure II-14 : Distribution des potentiels sur la ligne d'électrodes, cas d'un quadripôle de type Wenner- β , rayon d'électrode $r_e=1$, hauteur $h=2$, espacement $a=4$

Les électrodes ont un rayon unitaire. Dans cet exemple, l'espacement est : $a=4$. Les électrodes en profondeur ont une hauteur $h=2$

La courbe de potentiel présente des plateaux sur les électrodes d'injection et de réception, puisque chacune de ces électrodes, étant considérée comme très conductrice, est un domaine équipotentiel. Plus la surface de contact entre l'électrode et le matériau est grande, plus la différence de potentiel au niveau des électrodes d'injection est faible pour une intensité d'injection I_{AB} donnée. En revanche la différence de potentiel V_{MN} semble peu affectée par les dimensions des électrodes.

Pour aller plus loin dans l'analyse, l'influence de la géométrie réelle des électrodes par rapport au cas de l'injection ponctuelle va être mise en évidence par le biais des facteurs géométriques K . Les trois types de quadripôles étudiés sont les configurations Wenner α , β et γ .

Le Tableau II-4 confirme un point bien prévisible. D'une manière générale, les facteurs géométriques réels s'éloignent d'autant plus des valeurs du cas ponctuel que les dimensions des électrodes sont grandes

Tableau II-4 : Facteurs géométriques équivalents de différentes configurations d'électrodes réelles

$I_{AB}=1(A)$; $\rho=1(\Omega m)$; $a=4(cm)$; Type d'élément : CU20

Dimension d'électrodes		Esurf				Eprof $\frac{h_e}{r_e}=2$			
		$\frac{a}{r_e}=12$	$\frac{a}{r_e}=8$	$\frac{a}{r_e}=4$	$\frac{a}{r_e}=3$	$\frac{a}{r_e}=12$	$\frac{a}{r_e}=8$	$\frac{a}{r_e}=4$	$\frac{a}{r_e}=3$
Wenner β	K_{ponctuel}	226.19	150.80	75.40	56.55	226.19	150.8	75.40	56.55
	$K_{\text{réel}}$	225.49	149.68	75.21	57.29	235.19	165.11	111.45	112.12
	écart (%)	-0.31%	-0.74%	-0.25%	1.31%	3.98%	9.49%	47.8%	98.2%
Wenner α	K_{ponctuel}	75.40	50.27	25.13	18.85	75.40	50.27	25.13	18.85
	$K_{\text{réel}}$	75.09	49.87	24.63	18.28	77.33	53.32	31.79	27.62
	écart (%)	-0.41%	-0.75%	-1.99%	-3.01%	2.56%	6.08%	26.49%	46.50%
Wenner γ	K_{ponctuel}	113.10	75.40	37.70	28.27	113.10	75.40	37.70	28.27
	$K_{\text{réel}}$	112.58	74.79	36.63	26.85	115.20	78.76	44.48	36.64
	écart (%)	-0.45%	-0.8%	-2.84%	-5.03%	1.86%	4.46%	17.98%	29.59%

Pour ce qui concerne les électrodes en surface, l'écart du facteur géométrique (entre le cas ponctuel et le cas réel) reste faible. Il est au maximum de l'ordre de 1% pour en montage en Wenner β , et respectivement de 3% et 5% pour les montages Wenner α et γ . Cet écart est en revanche beaucoup plus important pour des électrodes en profondeur, ce qui montre l'influence importante des surfaces latérales des électrodes cylindriques sur le champ de potentiel. Cette étude de tendance permet donc de faire un choix en toute connaissance de cause entre une modélisation des quadripôles par des électrodes ponctuelles ou réelles, ceci pour des dimensions et écartements d'électrodes donnés et en fonction du niveau d'exactitude de calcul souhaité.

II.1.3. Quadripôle dans un milieu fini homogène

II.1.3.1. Influence des frontières en milieu fini homogène

Contrairement à son application classique dans le cadre de la reconnaissance des sols, la tomographie électrique appliquée à des échantillons de petite taille met en jeu des champs de potentiels qui sont perturbés par la présence de bords libres. Ceux-ci peuvent être situés à une distance des électrodes du même ordre de grandeur que l'espacement de ces dernières. Une étude de sensibilité permet donc de quantifier l'influence de ces bords libres sur le facteur géométrique et, par extension, d'apporter des éléments sur la profondeur d'investigation des différents quadripôles.

a. Electrodes ponctuelles

L'étude porte, dans un premier temps, sur un quadripôle d'électrodes ponctuelles centré sur le plan de symétrie du domaine. Le principe du maillage est présenté en Figure II-15. Les distances de troncature du domaine suivant les directions x et y respectent le critère d'un milieu infini : $L_{2x}=L_{2y}/2=50 \times a$, a désignant l'espacement entre électrodes. La distance de troncature du domaine en profondeur L_{2z} est variable entre $0.5 \times a$ et $50 \times a$. Une étude équivalente a été menée en fixant une profondeur $L_{2z}=50 \times a$ et en faisant varier $L_{2y}/2$ dans le même intervalle. Elle a évidemment donné les mêmes résultats par raison de symétrie.

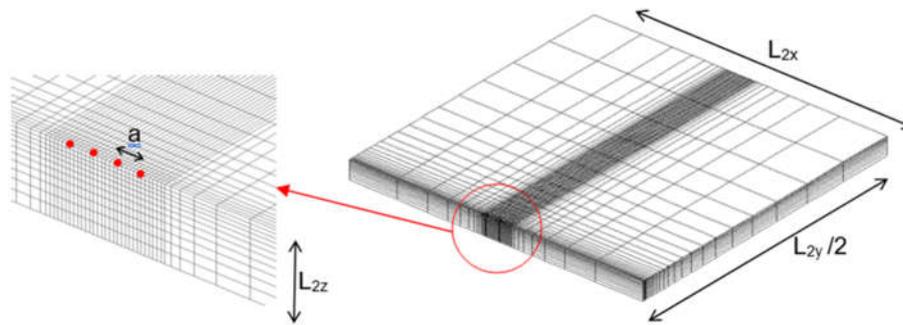


Figure II-15 : Maillage pour l'étude de l'influence des bords libres à proximité d'un quadripôle d'électrodes ponctuelles

Par rapport au cas d'un milieu semi infini, l'effet d'un bord libre au voisinage d'un quadripôle d'électrodes ponctuelles ne devient globalement sensible que pour une distance inférieure à 5 fois l'espacement entre électrodes, Figure II-16. Pour la configuration Wenner β , le rapprochement du bord libre provoque une légère augmentation du facteur géométrique de l'ordre de 4%, suivie d'une diminution rapide lorsque le bord libre est à une distance inférieure à l'intervalle entre électrodes. En revanche, pour les configurations Wenner α et γ , la variation du facteur géométrique est monotone et débute significativement dès que le bord libre se rapproche d'une distance de 3 espacements entre électrodes. Ceci tend à montrer que les configurations Wenner α et γ seraient à même de détecter des hétérogénéités de matériau plus profondes que ce que permettrait la configuration Wenner β qui n'est, elle, sensible qu'aux propriétés d'une couche superficielle de matériau dont l'épaisseur n'excède pas l'entraxe des électrodes.

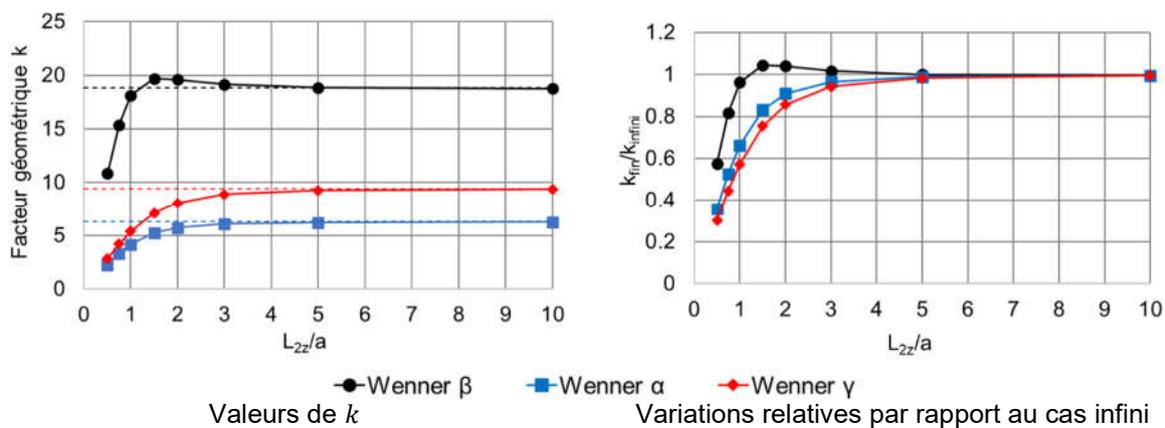


Figure II-16 : Influence de la proximité d'un bord libre sur les facteurs géométriques dans le cas des électrodes ponctuelles

b. Electrodes réelles

Une étude similaire peut être conduite en considérant cette fois des électrodes réelles (Esurd ou Eprof). Le rayon r_e des électrodes est unitaire. L'espacement choisi $a = 6$ est d'un ordre de grandeur représentatif des cas pratiques qui seront traités par la suite. La distance de troncature L_{2y} respecte les conditions d'un milieu semi infini. Dans le cas des électrodes en profondeur, le rapport hauteur/rayon est égal à 2. La Figure II-17 représente les champs de potentiel pour trois configurations de quadripôles dans le cas $L_{2z} = 2a$, ainsi que l'influence de la profondeur de troncature L_{2z} . Cette influence est mise en évidence par des courbes donnant le rapport entre le facteur géométrique réel et le facteur géométrique théorique pour des électrodes ponctuelles dans un milieu semi-infini.

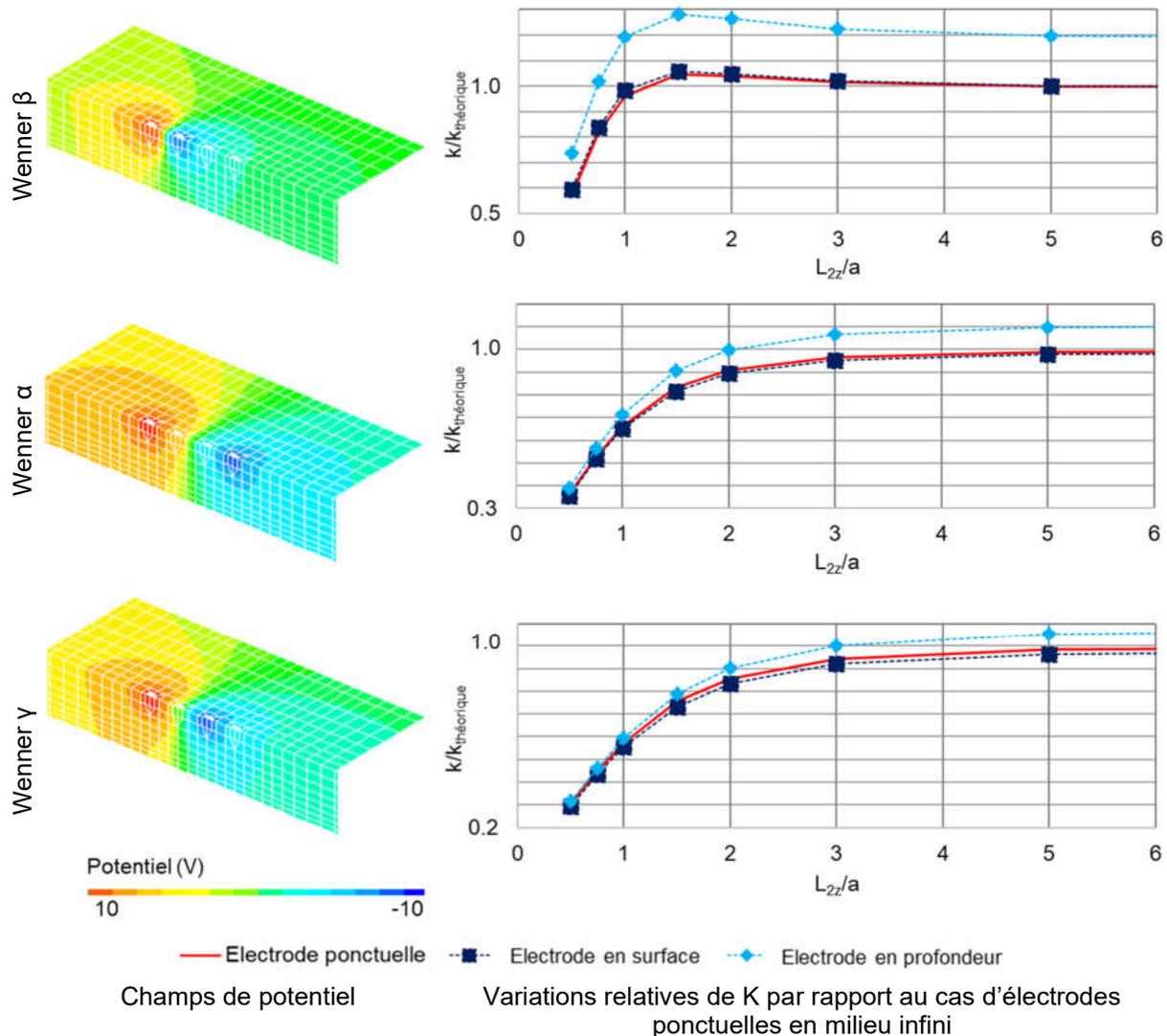


Figure II-17 : Influence de la proximité d'un bord libre profond sur les facteurs géométriques dans le cas des électrodes réelles.

Comme précédemment, l'étude met en évidence des résultats assez proches si l'on compare des électrodes ponctuelles avec des électrodes en surface, quelle que soit la distance de troncature. Pour des électrodes cylindriques en profondeur (avec $h/r_e=2$), le facteur géométrique est augmenté de l'ordre de 20% par rapport au cas ponctuel pour un rapport $a/r_e=6$.

II.1.3.2. Quadripôle dans un milieu fini

L'étude qui suit porte sur la modélisation d'une configuration proche des conditions expérimentales à venir. Il s'agit d'un quadripôle placé à la surface d'un parallélépipède dont les dimensions sont du même ordre de grandeur que l'emprise totale du quadripôle.

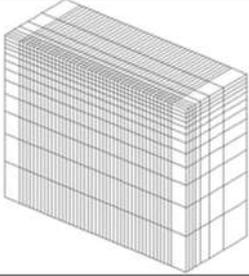
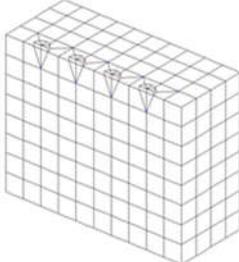
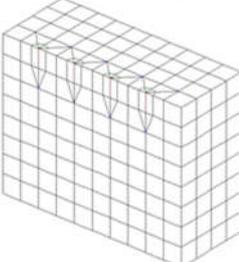
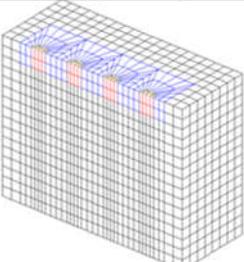
Le domaine étudié est un pavé de dimensions $50 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$. L'espacement entre les électrodes est de 10 mm. Divers types d'électrodes sont considérés :

- Électrodes ponctuelles,
- Électrodes en surface de 2 mm de rayon,

- Électrodes en profondeur de 2 mm de rayon et 5 mm de hauteur. Pour ce cas, deux techniques de discrétisation sont testées :
 - Par incorporation des électrodes et de leur enrobage dans une trame d'éléments parallélépipédiques,
 - Par extrusion du maillage de surface.

Les facteurs géométriques sont calculés pour chacun de ces cas de figure, pour les trois types de configurations Wenner β , α et γ , Tableau II-5.

Tableau II-5 : Facteurs géométriques K de quadripôles dans un pavé de dimensions finies

		Wenner β	Wenner α	Wenner γ	Temps de calcul
Electrodes ponctuelles, milieu semi-infini		188.496	62.832	94.248	
Ponctuelles Éléments CU20 de 1 mm de côté au voisinage des électrodes		222.688 (+18% par rapport au cas semi- ∞)	51.205 (-18.5% par rapport au cas semi- ∞)	66.496 (-29% par rapport au cas semi- ∞)	2.13 s
Esurf Trame d'éléments CU20 de 5 mm de côté		220.463 (-1% par rapport au cas ponctuel)	50.578 (-1.2% par rapport au cas ponctuel)	65.637 (-1.3% par rapport au cas ponctuel)	0.09 s
Eprof (maillage par incorporation) Trame d'éléments CU20 de 5 mm de côté		328.942 (+47.7% par rapport au cas ponctuel)	61.598 (+20.3% par rapport au cas ponctuel)	75.791 (+14% par rapport au cas ponctuel)	0.09 s
Eprof (maillage par extrusion) Trame d'éléments CU20 de 2.5 mm de côté		324.825 (+45.9% par rapport au cas ponctuel)	61.226 (+19.6% par rapport au cas ponctuel)	75.446 (+13.5% par rapport au cas ponctuel)	2.56 s

La modélisation par des électrodes ponctuelles montre l'influence conjuguée de la proximité des bords libres dans les deux directions Oy et Oz, par comparaison avec la solution théorique en milieu semi infini. Les distances de troncature respectives sont $\frac{L_{2y}}{2} = 2a$ et $L_{2z} = 4a$. On retrouve les tendances présentées en Figure II-17, à savoir une augmentation du facteur géométrique pour le cas Wenner β , et une diminution pour les cas Wenner α et γ .

Nous constatons que la valeur du facteur géométrique des électrodes en surface est très proche du cas ponctuel. En revanche, la différence entre le cas Eprof et ponctuel rend indispensable de modéliser des électrodes réelles. Le maillage par incorporation est suffisant pour une précision acceptable à condition de considérer, comme référence, le maillage extrudé fin. Le temps de calcul du cas ponctuel est trop long en raison de la nécessité de mailler finement. Enfin, le maillage par incorporation dans la trame est très efficace par rapport au maillage extrudé avec un calcul très rapide et une précision quasi identique.

II.2. Dispositif expérimental – Résistivimètre Syscal Jr.

Dans cette partie, nous présentons le dispositif de mesure expérimentale employant le résistivimètre Syscal Junior associé à un dispositif de multiplexage.

II.2.1. Caractéristiques de base

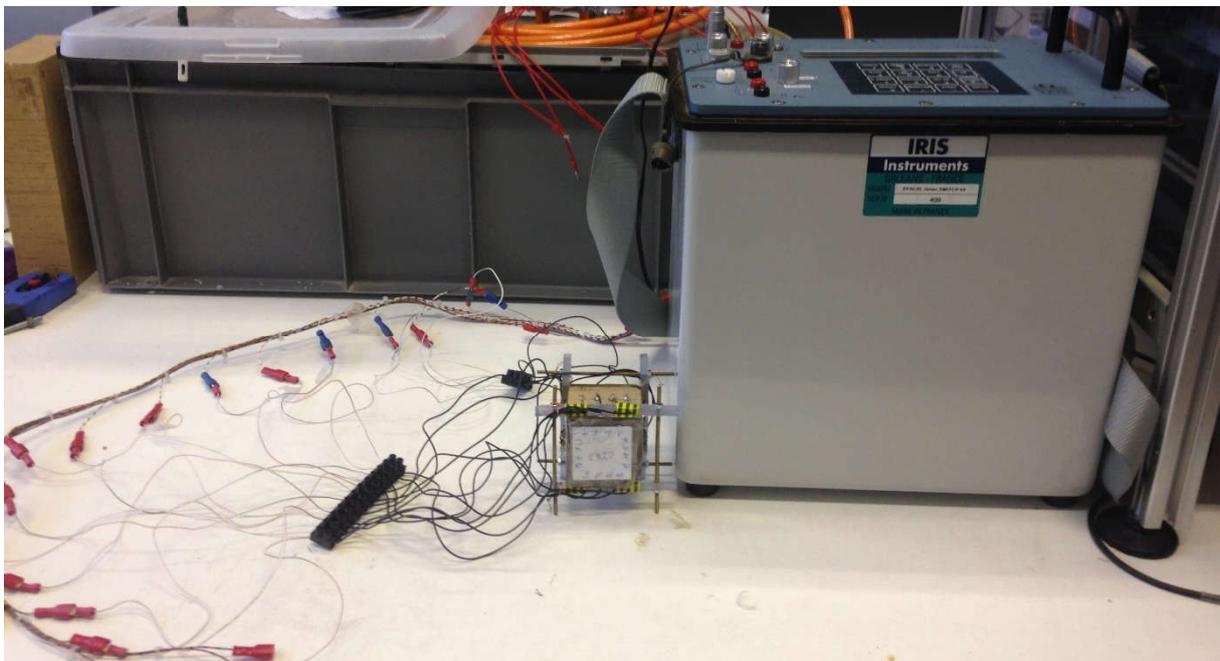


Figure II-18 : Résistivimètre Syscal Junior Switch-48

Le résistivimètre utilisé dans cette étude est un Syscal Junior Switch-48 d'Iris Instruments qui est un appareil polyvalent de sondage, de profilage et d'imagerie de résistivité et de polarisation provoquée. Typiquement, ce résistivimètre a été conçu pour l'exploration intensive du sous-sol à l'aide des méthodes électriques à courant continu. Les variations de la résistivité avec la profondeur (sondage électrique vertical), les variations latérales observées le long de profils (profil électrique) et la chargeabilité (Polarisation Provoquée) sont étudiées. Un courant I est envoyé dans le matériau par l'intermédiaire de deux électrodes (notées A et B - électrodes connectées à la partie émettrice). Le courant crée une distribution d'équipotentiels permettant de mesurer une différence de potentiel V entre deux autres électrodes, (notées M et N - électrodes connectées à la partie réceptrice). La résistivité est alors définie par l'équation (I-62). La tension, le courant et la puissance maximaux de sortie sont respectivement de 400V, 1250mA et 100W, (SYSCAL_SWITCH_V_11.5++_2005)

Les différents modes disponibles dans le résistivimètre (Figure II-19) sont :

- **Rho mode** (injection alternative d'une succession d'impulsions de courant positives et négatives) : Un courant entre les électrodes A, B est injecté, la différence de potentiel entre les électrodes M, N est mesurée et la résistivité apparente est ainsi calculée.
- **Rho & IP mode** (injection alternative d'une succession d'impulsions de courant positives et négatives avec des coupures entre chaque) : La résistivité apparente et les effets de polarisation sont vérifiés à chaque temps de mesure.
- **Multi-Electrode** (système de commutation automatique utilisant un réseau d'électrodes raccordé à des câbles de type « flûte sismique ») : Les modes « Rho » et « Rho & IP » peuvent être utilisés pour réaliser des mesures. A l'aide du logiciel ELECTRE II, des séquences de mesure sont créées par rapport à la configuration de ce mode. On sélectionne tout d'abord un faisceau de câbles, lequel est constitué de plusieurs segments. On définit ensuite les paramètres d'acquisition (déviatoin standard Q_{max} , nombre minimum et maximum d'impulsions effectives, durée d'injection, mode V_{MN} ou V_{AB} demandé) ainsi que les paramètres géométriques de la séquence (configuration d'électrodes, espacement, niveaux de profondeur). Avant de charger la séquence dans le Syscal Junior Switch-48, on peut visualiser la distribution des points de report des mesures qui seront réalisées ainsi que le nombre total de points. La mesure de résistance de prise est réalisée sur les différents dipôles relatifs à la séquence en cours.

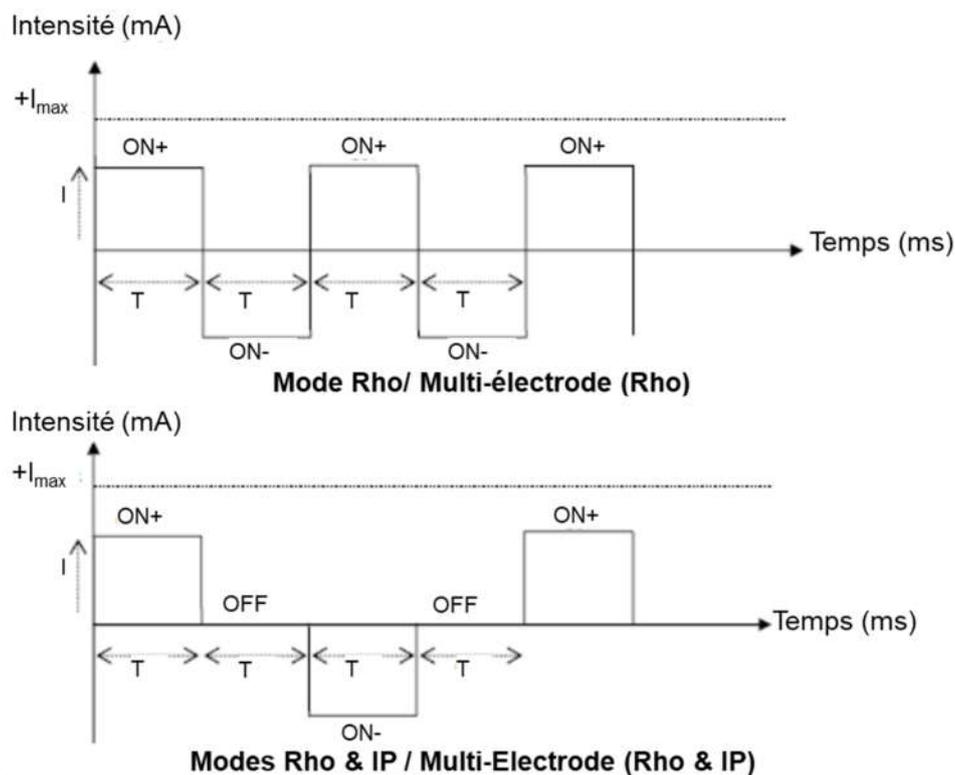


Figure II-19 : Formes du courant

Avant chaque lancement de mesures, il est nécessaire de choisir les paramètres suivants :

- le mode de multiplexage (Rho ou Rho & IP) ;
- la durée d'injection : 250 (incompatible avec le mode Rho & IP), 500, 1000 ou 2000ms

- le nombre d'impulsions effectives minimum et maximum appliquées sont celui initial et final de chaque acquisition effectuée. En les combinant avec la durée d'injection, on peut calculer la durée moyenne par point de mesure.
- la déviation standard du rapport V/I acceptée en %

Nous pouvons également choisir la valeur V_{MN} souhaitée : V_{MN} minimum ; 50 mV ; 150 mV ; 300 mV ou V_{MN} maximum. Les valeurs de courant d'injection et de tension s'établiront alors automatiquement en fonction de ce paramètre.

Les données mesurées peuvent être transférées du résistivimètre à une station d'acquisition à l'aide du logiciel PROSYS et exportées vers les logiciels Res2DInv ou Res3DInv afin de réaliser des interprétations 2D ou 3D. Les données sont listées ligne par ligne selon la structure suivante :

- numéro du point de données (correspondant à la zone mémoire du résistivimètre) ;
- réseau d'électrodes ;
- quatre paramètres d'espacement (X) (correspondant au réseau d'électrodes, en m) ;
- valeur de résistivité calculée automatiquement par le résistivimètre (en $\Omega.m$) ;
- déviation standard (facteur de qualité, en %) ;
- valeur de chargeabilité globale, paramètre de polarisation induite (en mV / V) ;
- polarisation spontanée (mesurée juste avant l'injection, en mV) ;
- tension primaire mesurée (ΔV_{MN} en mV) ;
- intensité du courant injecté (I_{AB} en mA).

II.2.2. Calibres 1250 et 50mA

Pour des matériaux de résistivité élevée tels que le bois, l'intensité du courant pouvant être injecté devient très faible, et ce, même pour une tension V_{AB} maximale de 400 V. Cette intensité s'approche de la valeur de résolution de l'ampèremètre dans la configuration standard de l'appareil Syscal Junior. L'exactitude de la mesure d'intensité devient donc problématique. A notre demande, le fabricant a installé un module diviseur de courant permettant de réduire la gamme d'injection (mode) de 1250mA à 50mA, tout en améliorant la résolution de 10 μ A à 0,4 μ A. En mode 50mA, il convient donc de diviser par 25 l'intensité I_{AB} indiquée par l'appareil pour obtenir l'intensité effectivement injectée. Pour la terre crue moins résistive que le bois, si on remarque toutefois de faibles intensités, le mode 50mA sera privilégié.

II.3. Détermination de la relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau

II.3.1. Multiplexage par une succession de 24 quadripôles

On considère un pavé de dimensions 50 \times 40 \times 40 mm³ équipé de 4 électrodes (dernière configuration considérée dans l'étude reportée dans le Tableau II-5. La technique de discrétisation est l'extrusion du maillage de surface. L'espacement entre les électrodes, le rayon des électrodes et leur profondeur d'enfoncement sont respectivement de 10 mm, 2 mm et 5 mm, Figure II-20. En se basant sur ces 4 électrodes, on peut créer jusqu'à 24 quadripôles. Pour le modèle direct, un courant $I_{AB}=1A$ est injecté dans un matériau de résistivité homogène

$\rho=1 \Omega\text{m}$. Les valeurs modélisées du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ selon chaque quadripôle sont consignées sur la Figure II-21.

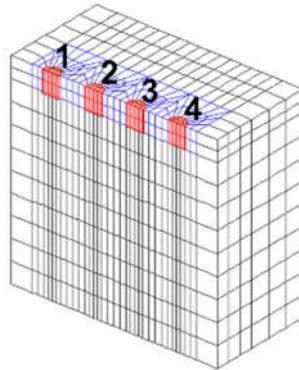
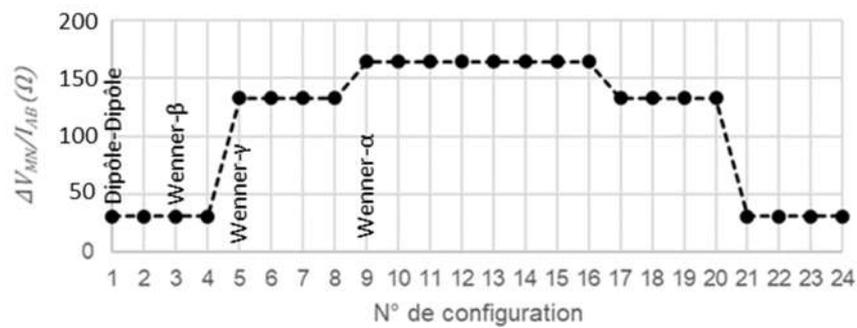


Figure II-20 : Maillage par l'extrusion de surface du pavé 50×40×40 mm³



N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	1	1	2	2	1	1	3	3	1	1	4	4	2	2	3	3	2	2	4	4	3	3	4	4
B	2	2	1	1	3	3	1	1	4	4	1	1	3	3	2	2	4	4	2	2	4	4	3	3
M	3	4	3	4	2	4	2	4	2	3	2	3	1	4	1	4	1	3	1	3	1	2	1	2
N	4	3	4	3	4	2	4	2	3	2	3	2	4	1	4	1	3	1	3	1	2	1	2	1

Figure II-21 : Valeurs de modélisation de $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ de 24 quadripôles

Un pavé de terre crue de mêmes dimensions, désigné **Standard**, est prélevé d'une brique étudiée par Laou (2017) dont les caractéristiques sont présentés dans l'Annexe 1. Quatre électrodes sont réalisées par coulage (dans des espaces pré-perçés) d'un alliage fondu composé de 99.3 % d'étain (Sn) et de 0.7 % de cuivre (Cu) qui permet la connexion des câbles électriques, Figure II-22.

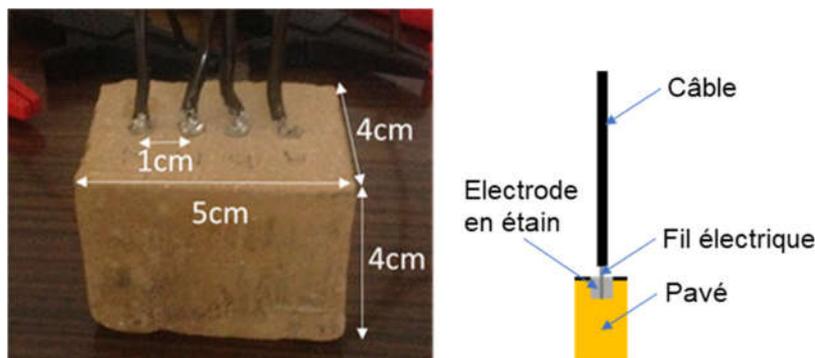


Figure II-22 : Pavé de terre crue **Standard** et disposition de 4 électrodes

Les mesures expérimentales sont menées en employant les deux calibres (50 mA / 1250 mA) avec des temps d'injection de 250 ; 500 ; 1000 et 2000ms. Les résultats de la modélisation

étudiée antérieurement sont repris. Les rapports $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ des deux modes expérimentaux et de la modélisation sont comparés selon chaque quadripôle. On modifie la valeur de résistivité homogène du modèle numérique afin de décaler la courbe du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ de modélisation de manière qu'elle tende vers les courbes expérimentales, Figure II-24.

II.3.2. Mesures sous différentes teneurs en eau

Le protocole de conditionnement est choisi afin d'obtenir une désorption. L'échantillon est mis dans un dessiccateur. L'humidité relative et la température sont mesurées par un thermo-hygromètre (Figure II-23). L'humidité relative initiale dans ce dessiccateur est de 100%HR. En employant différentes solutions salines (NF EN ISO 12571, 2013), nous imposons des seuils hydriques à 70%HR, 60%HR, 50%HR, 40%HR et 20%HR.

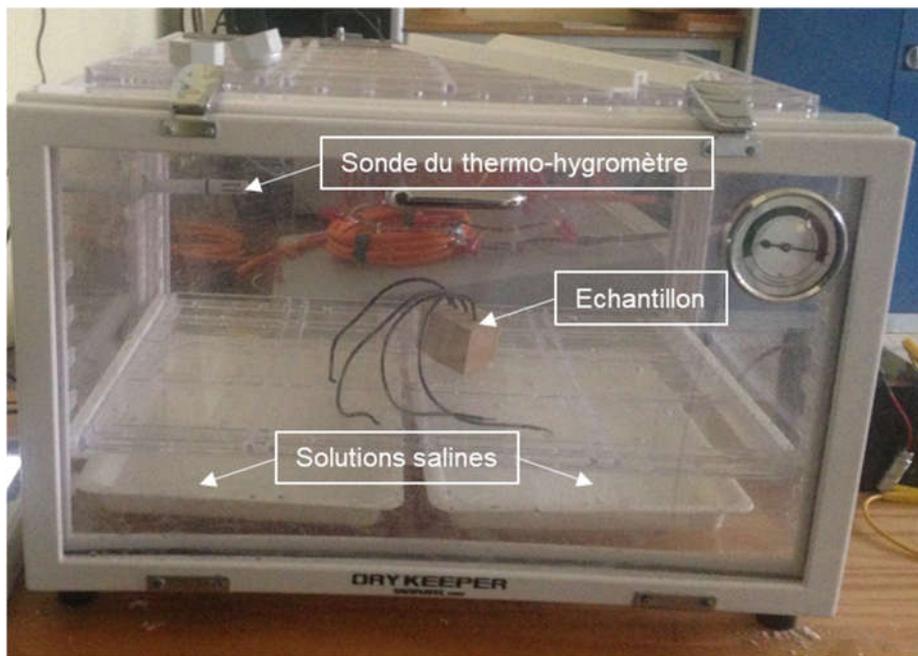


Figure II-23 : Dessiccateur pour le conditionnement de l'échantillon

Les courbes du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ pour les 24 quadripôles sont tracées pour les données expérimentales de mode 50mA et de mode 1250mA, Figure II-24.

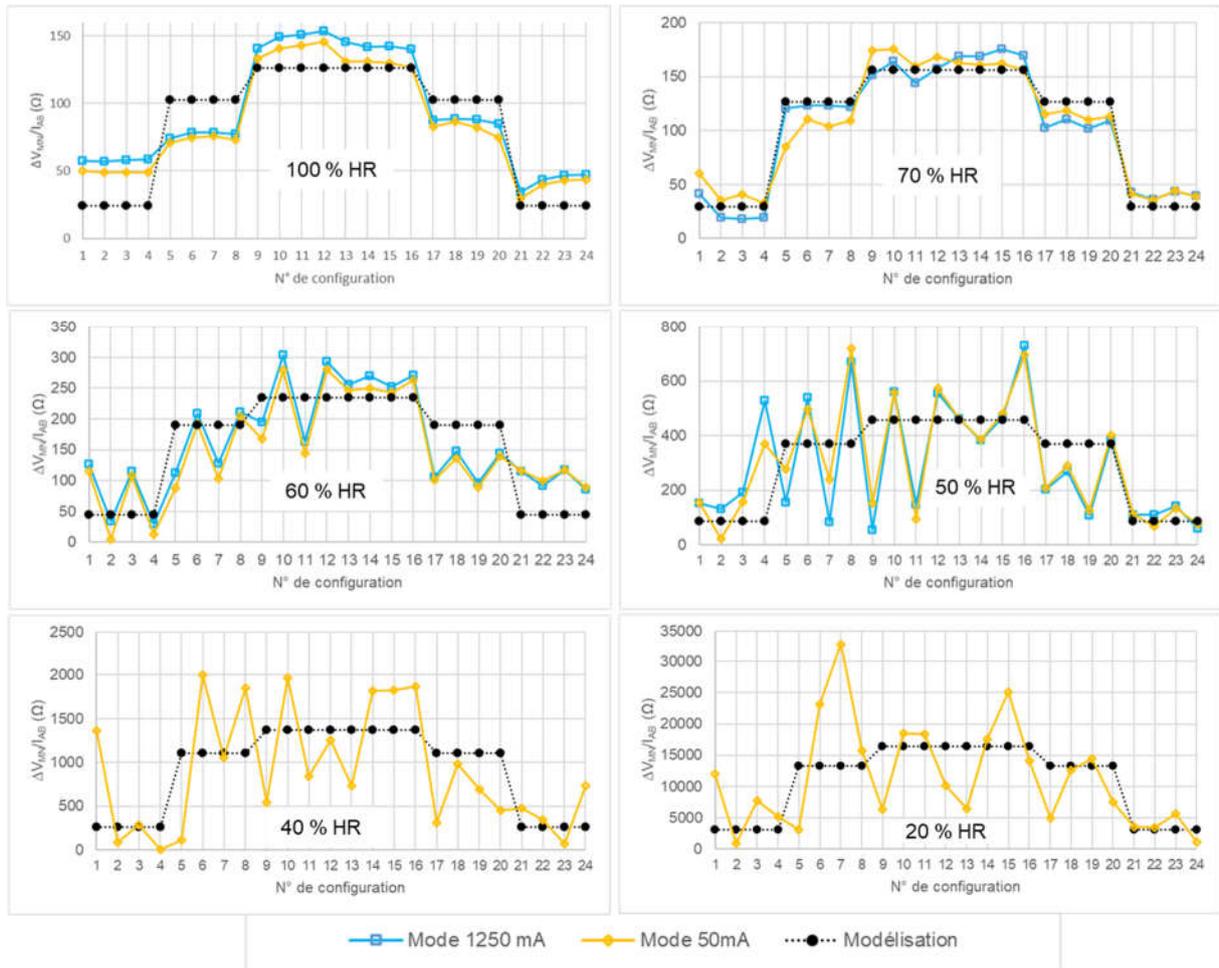


Figure II-24 : Résistances apparentes aux différences HR de 2 modes (1250mA/50mA) et de la modélisation

Pour les humidités relatives 100%HR et 70%HR ces courbes peuvent être quasiment superposées et nous pouvons décaler les valeurs de la modélisation pour s'en approcher. A partir de 60%HR et 50%HR, les courbes expérimentales ne sont plus stables et ne peuvent plus se superposer avec la modélisation. Enfin, au-delà de HR40%, le mode de 1250mA n'est même plus utilisable pour mesurer $\Delta V_{MN}/I_{AB}$.

La résistivité apparente homogène de tous les quadripôles est déduite selon l'équation suivante :

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{num} = K \frac{\Delta V_{num}}{I_{num}} \\ \rho_{exp} = K \frac{\Delta V_{exp}}{I_{exp}} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\rho_{num}}{\rho_{exp}} = \frac{\Delta V_{num}}{I_{num}} \cdot \frac{I_{exp}}{\Delta V_{exp}} \Rightarrow \rho_{exp} = \rho_{num} \frac{I_{num}}{I_{exp}} \cdot \frac{\Delta V_{exp}}{\Delta V_{num}} \quad (II-4)$$

Où, $\rho_{num} = 1 \Omega m$: résistivité du modèle numérique ;

$I_{num} = 1 A$: courant injecté dans le modèle numérique ;

ΔV_{num} : différence de potentielle calculée par le modèle numérique ;

ΔV_{exp} : différence de potentielle mesurée par le résistivimètre ;

I_{exp} : courant mesuré par le résistivimètre.

Théoriquement, pour une humidité relative donnée, les valeurs de la résistivité devraient être les mêmes quel que soit le type de quadripôles. Néanmoins nous constatons que seule la configuration en dipôle-dipôle conduit à des résultats stables et robustes sur toute la gamme de teneur en eau explorée. La fonction de la résistivité homogène du Dipôle-Dipôle par rapport à l'humidité relative est présentée en échelle logarithme sur la Figure II-25. On note une augmentation rapide de la résistivité de la terre crue lorsque le matériau est dans un environnement de plus en plus sec.

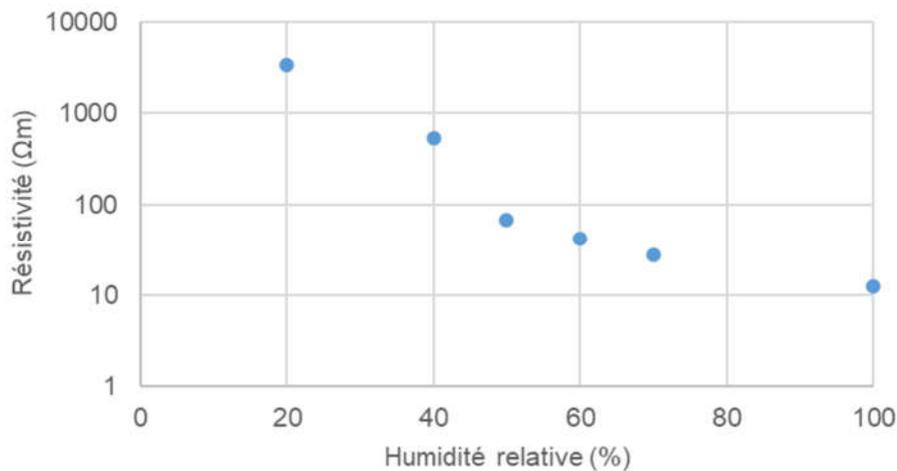


Figure II-25 : Relation entre la résistivité en échelle logarithme et l'humidité relative du quadripôle Dipôle-Dipôle pour le pavé Standard à 4 électrodes

La loi de passage est retrouvée en établissant la variation de résistivité électrique en fonction de la teneur en eau, Figure II 27. Plus la teneur en eau est faible, plus la résistivité électrique augmente fortement, satisfaisant la variation générale de la résistivité comme vu dans la littérature.

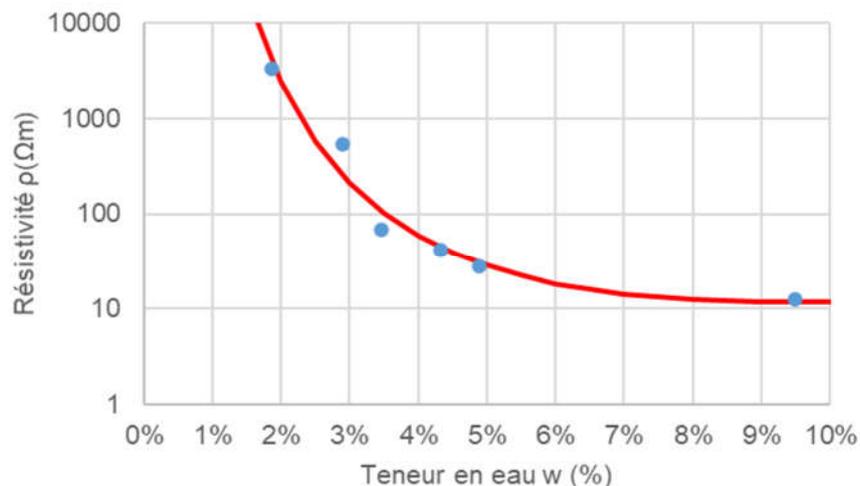


Figure II-26 : Relation entre la résistivité en échelle logarithme et la teneur en eau du quadripôle Dipôle-Dipôle pour le pavé Standard à 4 électrodes

Une fonction exponentielle permet ainsi d'interpoler, les points de mesure et répond à l'expression suivante :

$$\rho = e^{2.228 \ln^2(w) + 10.539 \ln(w) + 14.922} \quad (\text{II-5})$$

Ces premières mesures montrent cependant les difficultés à déterminer des résistivités en dessous de 70% d'humidité relative de l'ambiance. Cela provient certainement de deux effets concomitants, à savoir, une résistivité locale importante et de grandes lignes de courant. Une idée, pour détourner cette difficulté, est de proposer d'autres stratégies de positionnement des quadripôles pour forcer les lignes de courant à être plus directes comme, par exemple, le ceinturage.

II.4. Prise de mesure par ceinturage d'électrodes

Nous considérons à présent une disposition des électrodes disposées en ceinturage autour de l'échantillon afin d'obtenir un plus grand nombre de quadripôles en exploitant, plus particulièrement, des flux de courant traversant afin de compléter les résultats obtenus précédemment en employant un unique quadripôle.

II.4.1. Montage expérimental

Des cubes de dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ sont prélevés à 3 endroits différents (A, B, C) de la brique (Annexe 1). Nous repérons, pour chaque cube, les directions d'orthotropie selon le sens d'extrusion comme indiqué en Figure II-27.

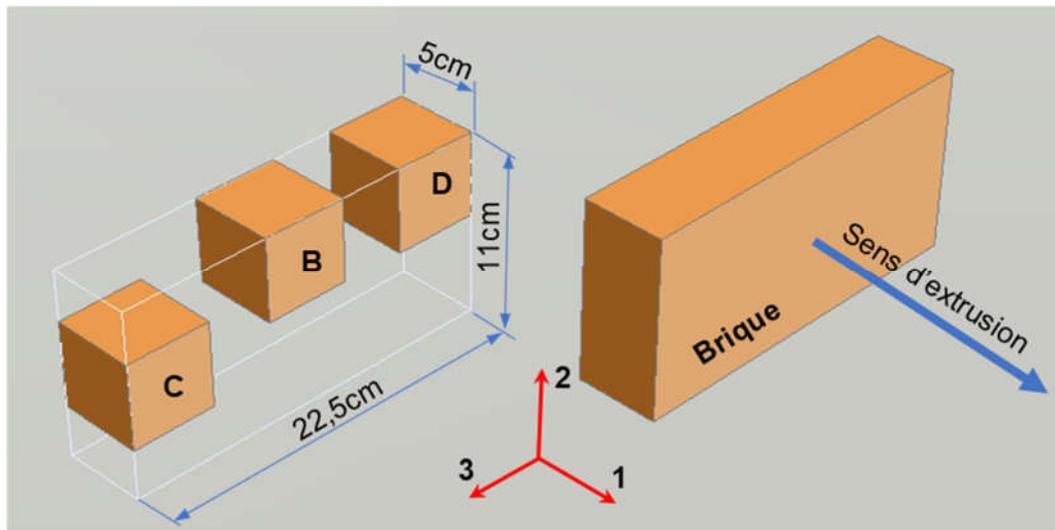


Figure II-27 : Emplacements des prélèvements des cubes dans la brique et directions d'orthotropie

Notre travail fait suite aux travaux de thèse de Nguyen (2014) qui utilisait, pour électrodes, des clous enfoncés dans le bois. Cependant, comme on ne peut pas utiliser la même technique dans notre matériau friable, on utilise la technique présentée précédemment des électrodes en étain coulé dans des cavités pré-percées. Le contact médiocre entre les électrodes en étain et la terre crue, ainsi que les variations dimensionnelles non-uniformes de ces matériaux sous l'effet des variations d'hygrométrie, posent le problème pratique du contact précaire des électrodes par décollement. Une solution proposée est le remplacement des électrodes encastrées par des électrodes en surface maintenues par des ressorts. On présente ici les détails de mise en œuvre pratique des deux types d'électrodes.

16 électrodes sont disposées en ceinturage. Les cubes sont notés selon la partie prélevée et leur plan perpendiculaire au sens d'orthotropie. Par exemple, en Figure II-28, le cube C3 est prélevé depuis la partie C, le plan des électrodes étant perpendiculaire au sens 3.

Puisque ces cubes sont prévus pour servir également à des études en régime transitoire bidimensionnel, deux faces opposées de chaque cube sont étanchéifiées par un film plastique alimentaire.

II.4.1.1. Electrodes en profondeur

16 électrodes en étain sont insérées sur le pourtour d'un plan de symétrie de l'échantillon avec un écartement de 1cm, une profondeur de 0,3cm et un rayon de 0,15cm. En raison du contact non durable entre les électrodes métalliques et la terre crue, un cadre est préparé pour assurer le maintien des câbles durant les mesures, Figure II-28

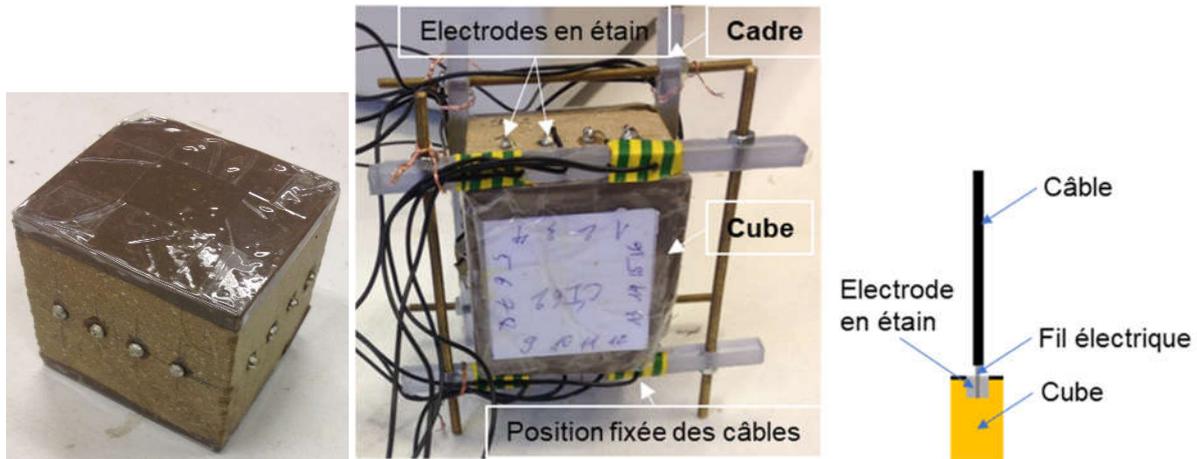


Figure II-28 : Montage expérimental par ceinturage d'électrodes en profondeur

II.4.1.2. Electrodes en surface

Le montage utilise un support équipé de clous et de ressorts. L'électrode de contact surfacique est une tête de clou en acier de 0.25cm de diamètre, connectée via une cosse électrique. Afin d'assurer le contact entre les électrodes et la surface de l'échantillon, on utilise un système de ressort, une plaque en plastique de réaction et un écrou assurant le serrage. La position des électrodes correspond à celles placées en profondeur, Figure II-29 et Figure II-30.

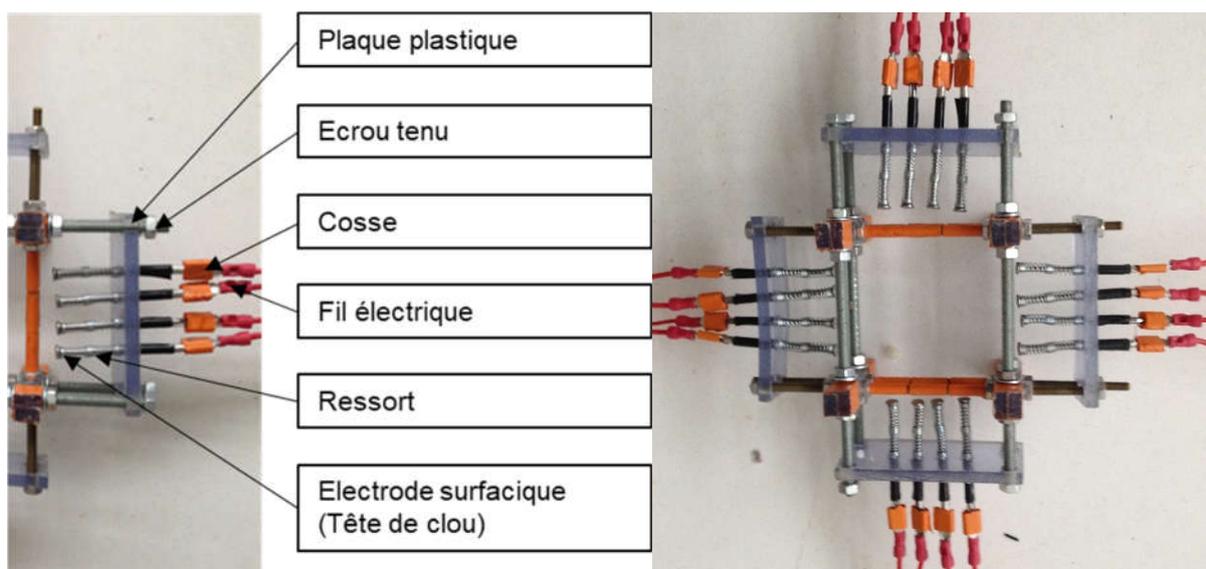


Figure II-29 : Composition du support des électrodes en surface et montage complet

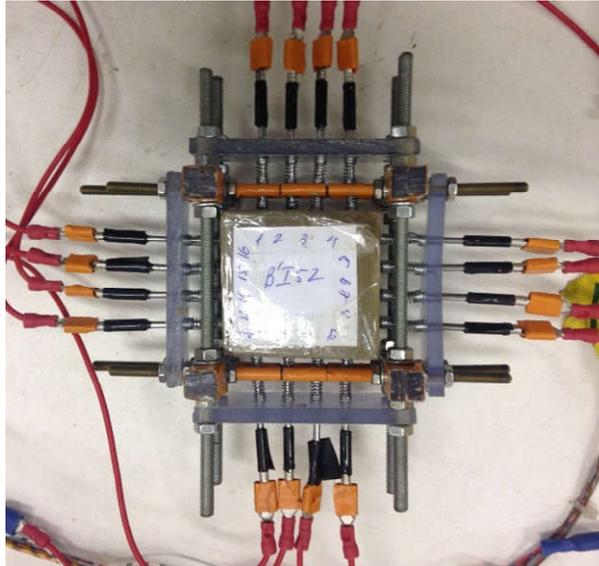


Figure II-30 : Montage final des électrodes en ceinturage

II.4.2. Maillage éléments finis

La modélisation de l'ensemble des configurations est effectuée selon les dimensions réelles de l'échantillon et des électrodes. Pour les électrodes en profondeur, le maillage total (échantillon et électrodes) est préconisé car la solution par extrusion n'est pas applicable. En raison de la symétrie, il suffit de ne mailler qu'une moitié du domaine limitée par la section transversale passant par le plan des électrodes. Celles-ci sont disposées autour de cette section. Des éléments parallélépipédiques sont donc plus pertinents. La numérotation des électrodes est la même pour les deux configurations comme indiquée en Figure II-31.

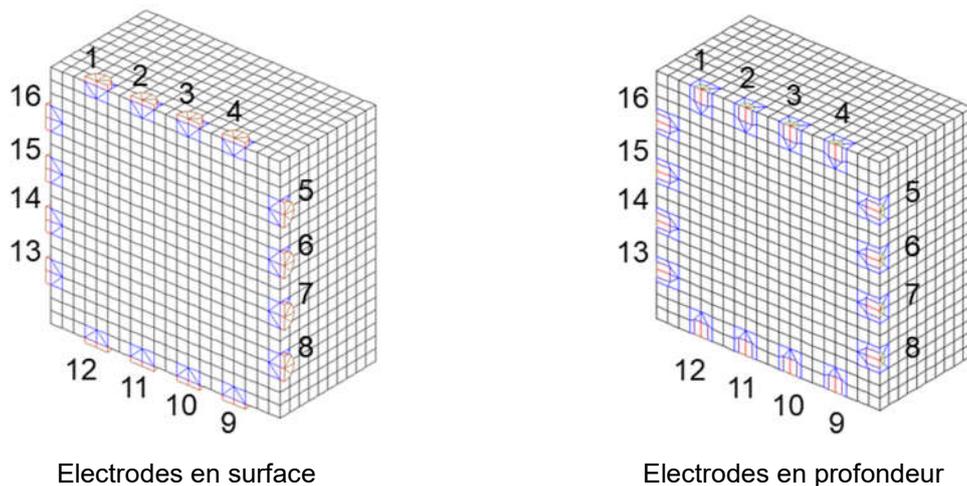


Figure II-31 : Maillage du cube de terre crue en ceinturage et numérotation des électrodes

Pour un champ uniforme de résistivité $\rho=1\Omega\text{m}$ donné, ΔV_{MN} , I_{AB} et $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ sont calculées en suivant la séquence des mesures effectuées pour l'identification de la valeur de résistivité réelle du matériau.

II.4.3. Choix d'un jeu de quadripôles non redondants

Nous constatons (dans l'exemple de la Figure II-21) que certains quadripôles sont réversibles: D'une manière plus générale, considérons 4 électrodes quelconques i, j, k, l sur lesquelles on applique différentes configurations de quadripôles par rotations successives d'indices

présentées au Tableau II-6 Ces 8 quadripôles conduisent à un rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ identique en valeur absolue. Les quadripôles de même couleur dans ce tableau donnent un rapport de même signe. Cette propriété est satisfaite dans tous les cas, que le champ de conductivité soit homogène ou non.

Tableau II-6 : Réversibilité des quadripôles

		Electrodes			
		<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Quadripôles	A	B	M	N	
	B	A	N	M	
	B	A	M	N	
	A	B	N	M	
	M	N	A	B	
	N	M	B	A	
	M	N	B	A	
	N	M	A	B	

Dans nos choix de multiplexage, si nous voulons limiter le temps de mesure et le temps d'inversion, il faut éliminer ces doublons qui sont redondants. De plus, dans le processus d'inversion, un doublon donne davantage de poids à la mesure dupliquée. Une inversion avec un nombre important de quadripôles, mais comportant beaucoup de doublons, pourrait tendre vers un système indéterminé (infinité de solutions, par pénurie d'informations utiles).

II.4.4. Mesures expérimentales

Une séquence de 136 quadripôles est programmée. Le détail de ces quadripôles, ainsi qu'un exemple des valeurs théoriques et expérimentales des rapports $\Delta V_{MN}/I_{AB}$, sont présentés dans l'Annexe 3 - Tableau A 7. Même si les doublons de quadripôles évoqués plus haut ont été évités, le classement par ordre croissant des rapports théoriques permet d'identifier aisément des familles de quadripôles identiques, et ce, en raison de la symétrie du dispositif.

Une première série de quadripôles consiste à déployer des configurations de type dipôle-dipôle avec différents pas sur le pourtour de la section, de la même manière qu'on le ferait en ligne pour une prospection géotechnique. Un deuxième type de quadripôles consiste à traverser l'échantillon par les lignes de courant et à mesurer la différence de potentiel le long d'une ligne parallèle, Figure II-32.

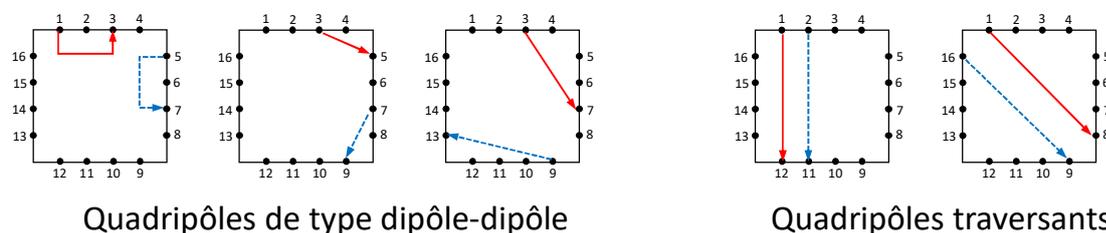


Figure II-32 : Quelques exemples de quadripôles

Dans ces conditions, les deux modes d'injection (50mA et 1250mA) du résistivimètre sont utilisés. Afin d'éviter l'influence de la polarisation provoquée, le temps d'injection est lui toujours fixé à 2000ms.

a. Cubes à électrodes en profondeur, sous conditions ambiantes proches de 40%HR :

Les échantillons C1, C2, C3 (Figure II-28) sont placés sous conditions ambiantes. Après avoir relevé l'humidité relative de l'ambiance, nous déterminons leur teneur en eau par pesée de leur masse sèche. Les valeurs sont reportées dans le Tableau II-7.

b. Cubes à électrodes en surface et en profondeur à la condition stabilisée de 70%HR :

Le cube B1 à électrodes en surface (Figure II-30) et le cube C3 à électrodes en profondeur (Figure II-28) sont placés dans une enceinte climatique à 70% d'humidité relative jusqu'à stabilisation de leur masse. Après stabilisation et séquences de mesure, la teneur en eau est également déduite par pesée de leur masse sèche. Les valeurs sont également reportées dans le Tableau II-7.

Tableau II-7 : Valeurs de la teneur en eau

	Ambiance			HR70%	
	C1	C2	C3	B1	C3
$w(\%)$	2.50	2.53	2.96	4.07	3.99

II.4.5. Analyse directe et confrontation entre résultats expérimentaux et numériques

Un champ uniforme de résistivité unitaire est appliqué au modèle. Les valeurs modélisées de ΔV_{MN} , I_{AB} et $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ sont calculées en suivant la séquence des mesures appliquées pour identifier la valeur de résistivité réelle du matériau.

Toutes les valeurs mesurées et modélisées du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ sont relevées pour comparaison et traitement. Afin de mieux voir la différence entre ces deux séries de valeurs, les quadripôles sont classés selon l'augmentation des valeurs modélisées du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$. La Figure II-33 présente les résultats obtenus pour le cube C1 à l'ambiance.

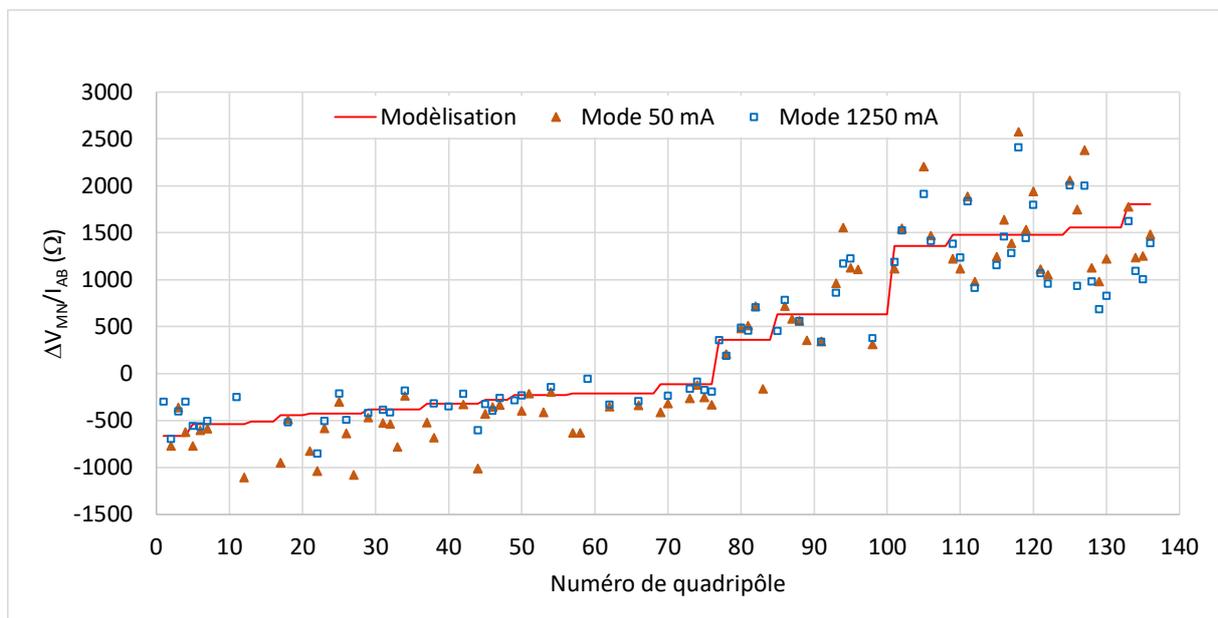


Figure II-33 : Confrontation entre résultats expérimentaux et numériques du cube C1 à l'ambiance

Le critère de la déviation standard maximal des mesures est choisi avant chaque traitement des données (ici à 5). De la même façon que lors du traitement des données du pavé **Standard**, les valeurs expérimentales de déviation supérieures à celle maximale sont rejetées.

Par ailleurs, il est apparu que certains points très éloignés du nuage étaient systématiquement associés à l'utilisation d'une même électrode (n°15) et ceci pour les différents cubes, ce qui amène à penser que le dysfonctionnement provient du brin du faisceau de câbles lui-même. Tous les quadripôles impliquant une électrode raccordée à ce brin ont donc été éliminés.

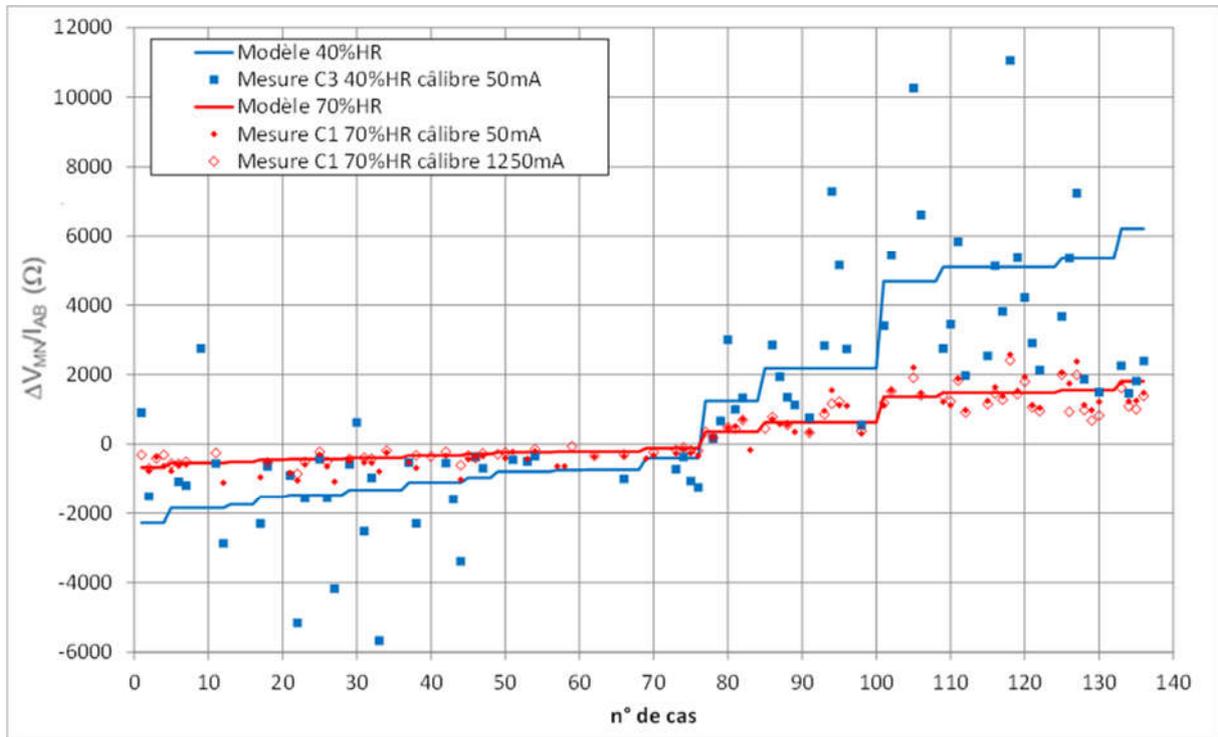


Figure II-34 : Comparaison des résultats de multiplexage sur cubes pour différentes teneurs en eau

Les écarts du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ entre les données mesurées et modélisées sont calculés, ce qui permet d'établir la fonction objectif au sens des moindres carrées. La résistivité homogène du cube en ceinturage est identifiée en minimisant cette fonction par le **Solveur** d'Excel.

Les valeurs de résistivité déterminées en fonction de la teneur en eau sont présentées dans le Tableau II-8.

Tableau II-8 : : Valeurs de résistivité déterminée

	Ambiance			HR70%	
	C1	C2	C3	B1	C3
$w(\%)$	2.50	2.53	2.96	4.07	3.99
$\rho(\Omega m)$	228.6	277.4	182.7	62.3	51.1

Nous sommes donc en mesure de compléter le graphique définissant la loi de passage exprimée par l'équation (II-5) la Figure II-26. Ainsi, la Figure II-35 permet de conclure que les nouveaux points s'inscrivent bien dans cette loi de passage en renforçant les données au voisinage du 'coude' caractéristique de la loi exponentielle entre 2% et 8% de taux d'humidité.

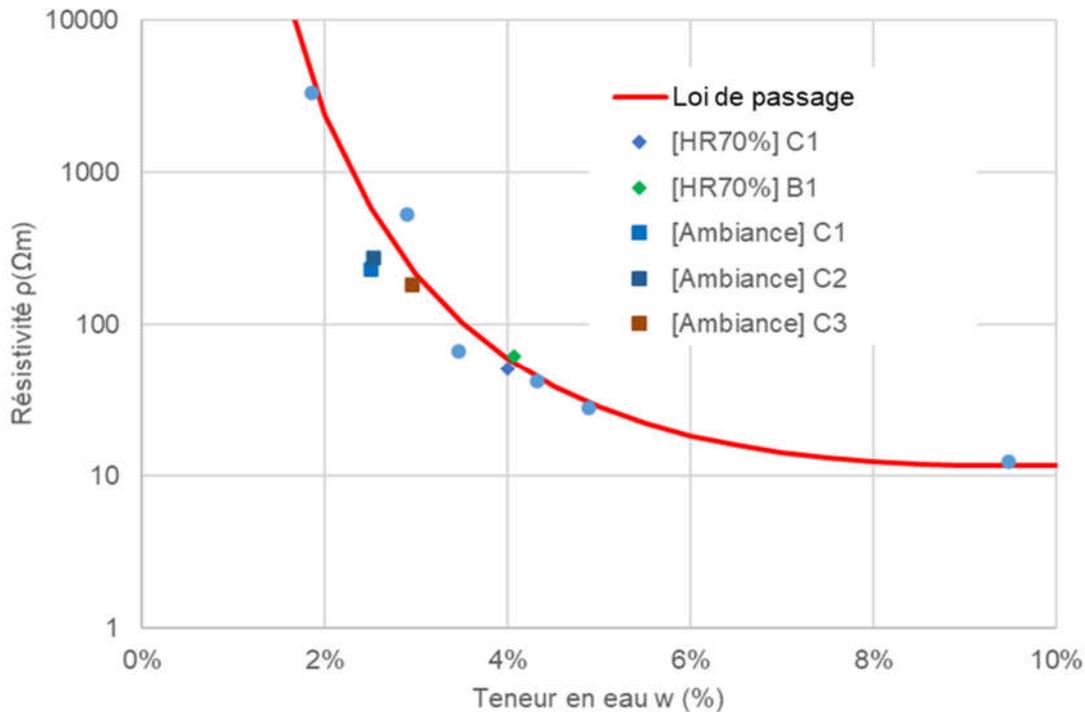


Figure II-35 : Points expérimentaux sur la courbe de la loi de passage

II.5. Conclusion

L'algorithme d'inversion numérique visé repose, d'une part, sur des mesures croisées d'humidité et, d'autre part, sur un calcul direct par éléments finis de la résistivité apparente basée sur l'approche quadripôle. Une étude paramétrique poussée du calcul direct a permis de développer une stratégie robuste et convergente du calcul direct avec l'ensemble des stratégies de discrétisation du principe d'injection par électrodes et de leur proche voisinage, le tout permettant une utilisation 'pratique' pour simuler des alignements de quadripôles dans un milieu semi-infini homogène ou dans une approche par ceinturage. Une étude sur la finesse des maillages, des éléments finis employés, et ce, au regard de la précision de calcul et de sa convergence et vis-à-vis des temps de résolution raisonnables en vue d'intégrer le calcul dans une boucle imputée au multiplexage expérimental. Également, la discrétisation d'électrodes surfaciques et volumiques a été abordée.

Par l'emploi optimisé du résistivimètre Syscal Junior et de son multiplexeur, des premières mesures sur terre crue sont effectuées en ambiance stabilisée. Pour des teneurs en eau supérieures à 2%, les premiers résultats montrent une bonne correspondance entre le calcul numérique et la mesure, ce qui correspond à des ambiances climatiques supérieures ou égales à 40%HR. Pour cette application, l'optimisation entre modèle et mesure a été réalisée en employant l'algorithme du solveur implémenté dans le logiciel Excel. En revanche, en dessous de cette humidité, la mesure montre vite ses limites physiques. Une deuxième étude employant la technique de ceinturage a été utilisée afin d'optimiser les lignes de courant dont la longueur peut être également une limite physique dans la mesure de la résistivité apparente. Pourtant, les mesures effectuées et le calcul direct a permis d'identifier la loi de passage exponentielle entre résistivité et teneur en eau.

L'état homogène en teneur en eau est un cas d'école nécessaire pour calibrer l'ensemble de la chaîne de mesure et le modèle numérique. Cependant, le monitoring d'ouvrages nécessite

d'adapter l'approche à des régimes transitoires caractérisés par une distribution hétérogène de la teneur en eau et donc de la résistivité. Si le principe de la mesure et du calcul direct n'est pas remis en cause, l'algorithme d'optimisation par résistivité scalaire homogène demande à être remplacé par une approche par analyse inverse pouvant intégrer des champs de résistivité homogènes et hétérogènes. Cela fait l'objet du troisième chapitre.

Chapitre III. Méthode d'inversion pour des états hydriques hétérogènes

Introduction

Tout d'abord, nous allons procéder à la validation de l'algorithme d'analyse inverse : faisant suite aux travaux de thèse de Tuan Anh NGUYEN, s'appuyant sur un champ de conductivité constant par éléments, un nouvel algorithme est développé en appliquant le choix des nœuds maîtres de conductivité et des paramètres itératifs afin d'accélérer et d'optimiser la convergence de l'inversion. Un modèle simple en ceinturage est développé afin de tester cet algorithme d'analyse inverse pour valider des résultats :

- dans un premier temps de multiplexages numériques de champs de résistivité constants et concentriques,
- dans un second temps d'un multiplexage expérimental.

A partir de ces résultats, on peut estimer et comprendre le rôle du paramètre d'amortissement de Levenberg Marquardt et choisir la combinaison la plus efficace des quadripôles.

La deuxième phase a pour objectif d'étudier des gradients hydriques. Dans ces conditions, une brique de terre crue ceinturée est placée en régime hydrique transitoire. Un modèle de transfert thermo-hydrique estime la diffusion dans le domaine hygroscopique et identifie le coefficient de perméabilité apparent. Le montage expérimental est fabriqué avec des électrodes surfaciques en appliquant la combinaison choisie. L'algorithme d'analyse inverse, développé au deuxième chapitre, est mis en œuvre sur la base de champs hydriques calculés.

III.1. Etat des lieux

III.1.1. Maillage et multiplexage

Nous reprenons le protocole de mesure électrique en deux dimensions de Nguyen (2014) sur la section transverse d'un échantillon de Douglas de dimensions $95 \times 95 \times 95 \text{ mm}^3$. Il repose sur un ceinturage de 20 électrodes réparties, de façon uniforme, sur les 4 faces avec un écartement de 1,5cm et un enfoncement de 1cm comme le précise la Figure III-1.

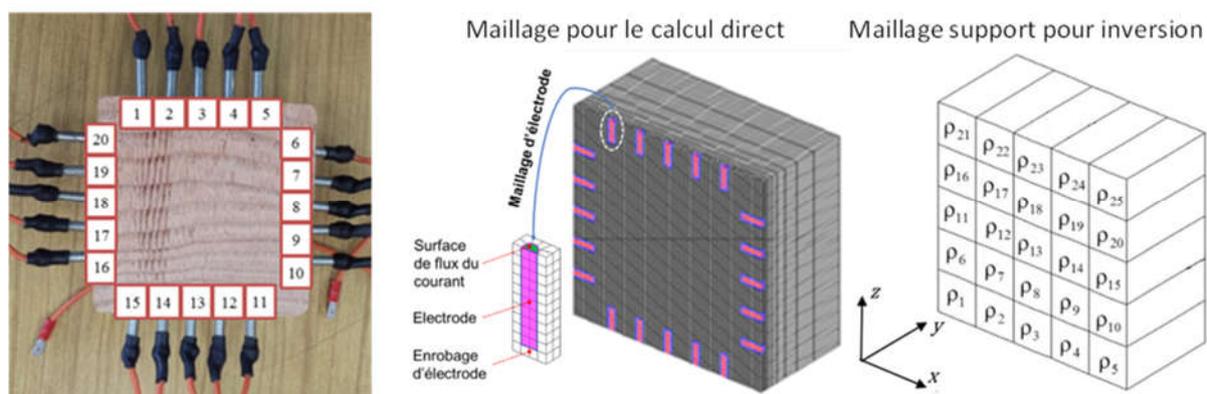


Figure III-1 : Principe du ceinturage et discrétisation éléments finis

Des quadripôles en configuration dipôle-dipôle sont utilisés selon un multiplexage qui repose sur 620 quadripôles regroupant toutes les combinaisons possibles.

Deux discrétisations par éléments finis sont réalisées. La première discrétisation est développée pour le calcul direct intégrant le maillage des électrodes. Concernant le support éléments finis pour la procédure d'inversion, il repose sur un maillage beaucoup moins dense

composé de 25 éléments que nous appellerons éléments maîtres. La résistivité (et donc la conductivité électrique) de chaque élément maître est considérée constante et appliquée aux points de Gauss de l'élément. L'ensemble de ces résistivités représente les inconnues à identifier par méthode inverse, le nombre d'inconnues correspondant au nombre d'éléments finis. Les résistances $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ (Ω) mesurées sont également représentées sous la forme d'un vecteur de données d de m composantes, égal au nombre de quadripôles. Le passage du maillage 'calcul direct' au maillage 'inversion' se fait par projection et interpolation du champ de conductivité.

III.1.2. Modélisation directe et algorithme d'inversion

L'ensemble de la modélisation repose sur un problème bidimensionnel. Dans ces conditions, le champ de conductivité devient une fonction à deux variables géométriques, à savoir les coordonnées x et z des points ou des nœuds considérés. En considérant un gradient nul dans la direction y , le champs de conductivité peut prendre la forme suivante :

$$\sigma = \sigma_0 + (\sigma_{\max} - \sigma_0) \left[1 - \frac{X^2 + Z^2}{2 \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right] \quad (\text{III-1})$$

Dans le cas d'une désorption, nous supposons que la conductivité électrique est minimale au coin de l'échantillon $\sigma_0 = 0,01$ (S/m) et est maximale au centre $\sigma_{\max} = 0,2$ (S/m). Une représentation du champ de conductivité est présentée en Figure III-2.

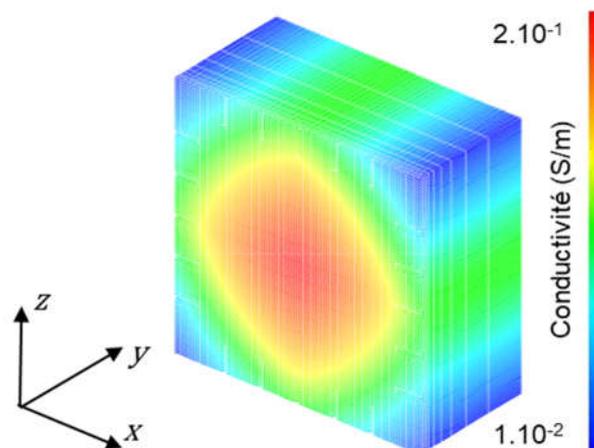


Figure III-2 : Champ de conductivité bidimensionnel

Dans les travaux de Nguyen, le modèle d'inversion repose sur l'algorithme de Levenberg (Figure I-53). La matrice jacobienne J de taille $m \times n$ est calculée par approximation de la dérivée, et ce, de la façon suivante :

$$J_{j,i} = \frac{\phi_j(x_i + \epsilon_i) - \phi_j(x_i)}{\epsilon_i} \quad (\text{III-2})$$

Avec $\epsilon_i = 1.5 \cdot 10^{-2}$

Le critère d'arrêt se base sur la variation des paramètres entre deux itérations successives est défini selon l'expression suivante :

$$\left| \frac{x_{k+1} - x_k}{x_k} \right| \leq c_1 \quad (\text{III-3})$$

Généralement, une itération consiste à calculer le nouveau vecteur de conductivités inconnues x_{k+1} à partir de l'ancien x_k par la relation (I-74) avec $\alpha_k=1$ de telle sorte que la mise à jour du vecteur se fasse selon l'expression suivante :

$$x_{k+1} = x_k + p \quad (\text{III-4})$$

Le vecteur de correction p et la matrice jacobienne J sont définis, respectivement, par (I-91) et (III-2). Le processus d'inversion repose sur les étapes suivantes :

Dans un premier temps, nous partons sur un champ de conductivité homogène (par exemple $5 \cdot 10^{-3}$ S/m). Un calcul direct est effectué en employant les 620 quadripôles appelés par le multiplexage. L'algorithme est mis en œuvre sur la base d'une mesure dite 'expérimentale' mais qui est en réalité le résultat du calcul numérique issu du multiplexage sur le champ de conductivité construit selon l'expression III.1 et représenté en Figure III-2. Nous l'appellerons solution de référence. Après 10 itérations, nous obtenons la cartographie de conductivité visualisée en Figure III-3.

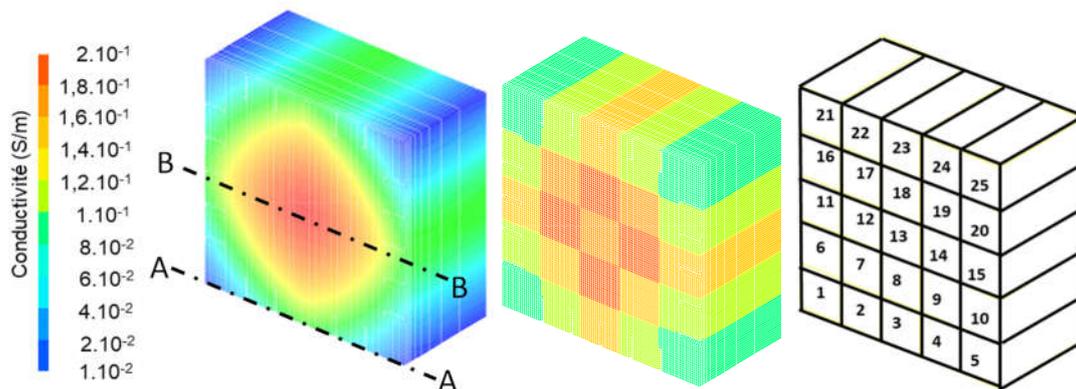


Figure III-3 : Champ identifié élémentaire à la 10^{ème} itération de l'échantillon à 20 électrodes

Dans un premier temps, nous observons que le champ de conductivité est discontinu. Cela provient principalement de l'emploi des points de Gauss comme support de conductivité qui rend, en quelque sorte, le champ de conductivité non dérivable. Ce fait se traduit également par une conductivité à cœur non cohérente par rapport au gradient attendu et à la solution de référence recherchée. Cette observation est validée lorsque nous projetons le champ obtenu sur un segment de bordure (Profil A-A) et un segment passant à cœur (Profil B-B), Figure III-4:

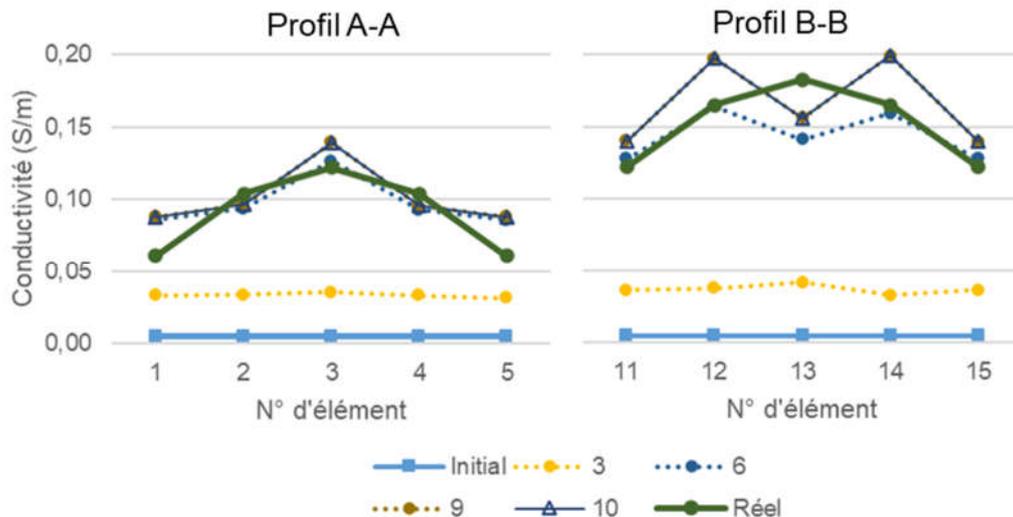


Figure III-4 : Variation itérative des valeurs de conductivité de l'échantillon de Nguyen (2014)

Cette première approche, basée sur les travaux de Nguyen (2014) met en évidence plusieurs écueils :

- L'utilisation des éléments maîtres ne permet pas de converger vers des champs variables continus,
- Après convergence de l'algorithme, les gradients de conductivité ne suivent pas la solution de référence
- Le maillage employé pour le calcul direct reste trop dense vis-à-vis de temps de calcul trop importants, incompatibles avec une utilisation rationnelle de la méthode.
- Le temps de calcul est impacté par les 620 quadripôles sollicités.

En raison de ces lacunes, nous proposons les améliorations suivantes :

- Optimiser la discrétisation éléments finis pour le calcul direct selon l'étude menée au chapitre précédent,
- Projeter le champ de conductivité inconnu sur les nœuds du maillage au lieu des points de Gauss,
- Profiter des acquis du chapitre 2 pour optimiser le maillage du modèle et changer les inconnues par éléments par des inconnues aux nœuds.
- Optimiser le multiplexage : réduire le nombre de quadripôles sans dégrader la richesse de l'information.

III.2. Mise au point d'un nouvel algorithme

III.2.1. Des éléments maîtres aux nœuds maîtres

Dans un premier temps, la résolution du problème directe repose sur un nouveau maillage. La simplification du maillage des électrodes permet de limiter le nombre d'éléments dans l'épaisseur afin d'assurer une non-dégénérescence des éléments, Figure III-5.

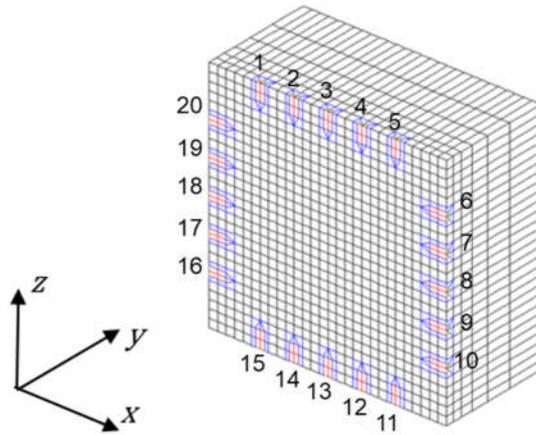


Figure III-5 : Nouveau maillage de l'échantillon à 20 électrodes

Sur le maillage plus grossier, supportant l'inversion, la cartographie des conductivités définie aux nœuds permet d'obtenir une continuité des champs d'un élément à l'autre. Les grandeurs entrant dans le calcul de la jacobienne sont donc les résistivités définies aux nœuds de ce maillage. Nous les appellerons désormais les nœuds 'maîtres'. Le résultat obtenu se projette sur le maillage fin. On peut envisager une distribution linéaire par élément (CUB8) ou quadratique (CU20). Nous passons ainsi de 25 éléments maîtres (Figure III-3) à 36 nœuds maîtres (Figure III-6).

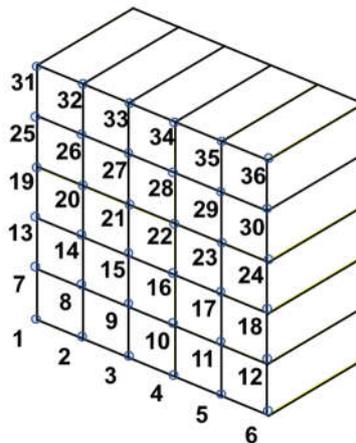


Figure III-6 : Nœuds maîtres de la résistivité sur le maillage grossier de l'échantillon à 20 électrodes

III.2.2. Résultats d'inversions d'un multiplexage théorique : échantillon à électrodes en profondeur

De la même façon, on applique le nouveau maillage et les inconnus aux nœuds pour l'échantillon à 20 électrodes encastrées de Nguyen (2014), et ce, avec le multiplexage de 620 quadripôles et le champ de référence projeté sur le nouveau maillage, Figure III-2.

Sur cette nouvelle base, l'algorithme d'inversion est de nouveau appliqué. Après 10 itérations, nous obtenons le champ de conductivité électrique présenté en Figure III-7. Également, les profils en bordure est a cœur présentent une bien meilleur convergence avec le champs de référence.

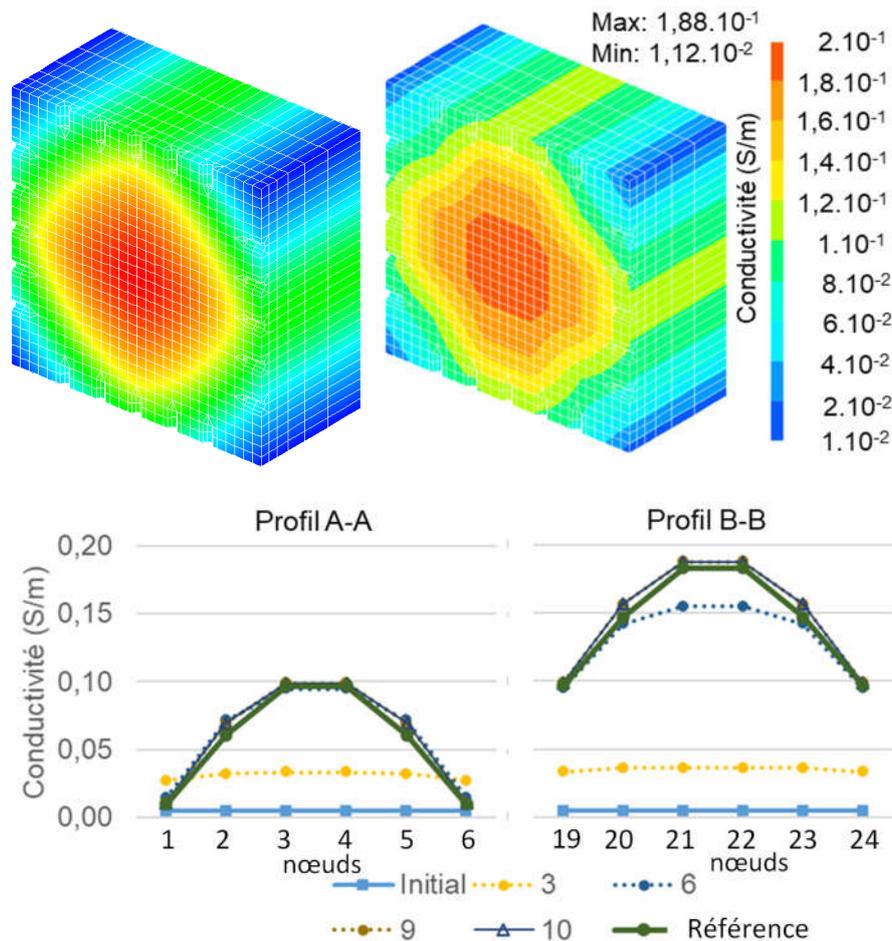


Figure III-7 : Champ identifié des nœuds à la 10^{ème} itération pour l'échantillon à 20 électrodes et variation itérative des valeurs de conductivité des nœuds maîtres

Le passage d'éléments maîtres à nœuds maîtres permet de corriger une grande partie des lacunes mentionnées précédemment.

III.2.3. Résultats d'inversion d'un multiplexage théorique : cubes à électrodes en surface.

Nous étudions les cubes à 16 électrodes et avec un multiplexage de 136 quadripôles présentés dans le Chapitre II. Nous testons le nouvel algorithme sur ces cubes avec des électrodes en surface, Figure II-31. Dans un premier temps, on crée le champ à identifier pour les « données expérimentales » sur ces maillages, Figure III-9. Nous proposons ici, un maillage grossier à 25 nœuds (16 éléments) possédant un nœud au cœur du cube, Figure III-8.

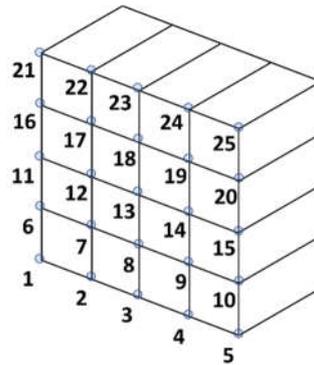


Figure III-8 : Nœuds maîtres de la résistivité sur le maillage grossier de l'échantillon à 16 électrodes
 Le champ initial de conductivité est toujours choisi homogène à une valeur de 5.10^{-3} (S/m).
 Après 10 itérations, la cartographie de conductivité identifié et ses variations itératives sont
 présentées en Figure III-9.

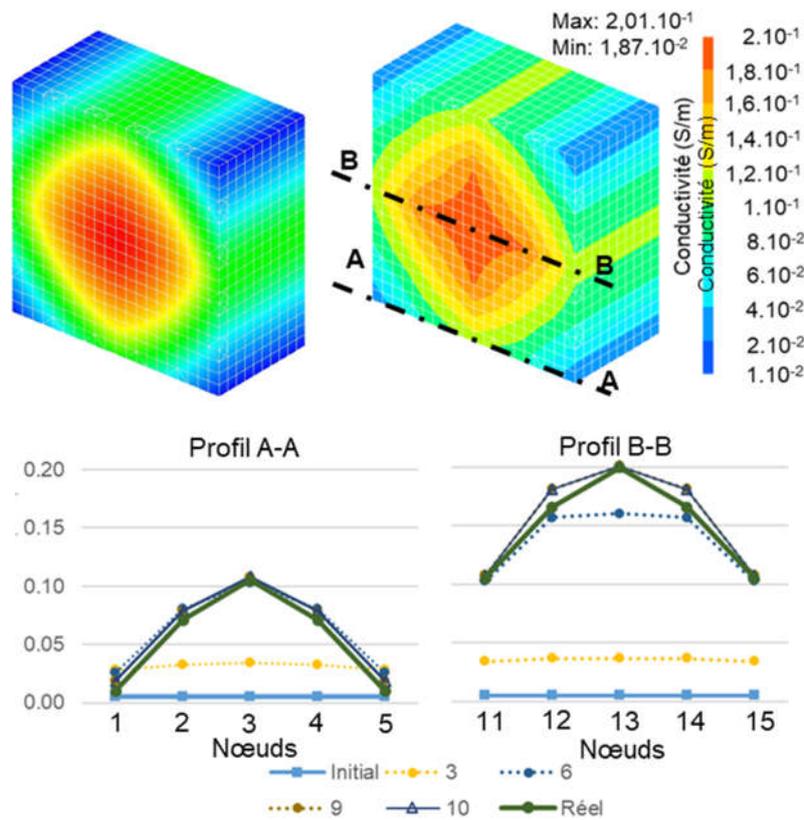


Figure III-9 : Champ identifié après 10 itérations

L'analyse inverse employant les nœuds maîtres, le champ de conductivité identifié tend également vers la solution de référence. De plus, si nous comparons les résultats obtenus avec des électrodes superficielles et enfoncées, après 10 itérations, les résultats sont très proches (Figure III-10)

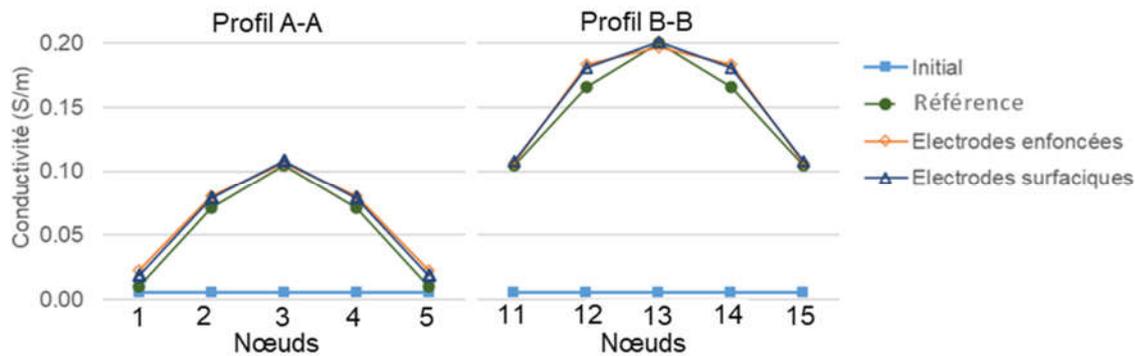


Figure III-10 : Comparaison des valeurs de conductivité à la 10^{ème} itération entre des cubes aux électrodes enfoncées et surfaciques

III.3. Optimisation du multiplexage

Les multiplexages effectués jusqu'à présent consistaient à déployer systématiquement sur la couronne d'électrodes des quadripôles de type dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger, avec comme valeurs variables a et n (voir Tableau I-2). Cette technique conduisait à un nombre de quadripôles conséquent (620 pour le cube à 20 électrodes, 144 pour le cube à 16 électrodes), ce qui pénalise le temps d'inversion. L'objectif ici est d'analyser la sensibilité des différents quadripôles à des hétérogénéités de champ de conductivité. Ceci doit permettre de choisir un assortiment de quadripôles réduit en nombre tout en présentant une efficacité pour la détection des gradients de conductivité de la surface vers le cœur de l'échantillon.

III.3.1. Modèle électrique

Le modèle choisi pour cette étude est la brique de terre crue de dimensions $22.5 \times 11 \times 5 \text{ cm}^3$. Cette géométrie sera utilisée dans les développements à venir. Elle est ceinturée de 20 électrodes de surface comme indiqué en Figure III-11. 7 électrodes sont réparties sur chaque grand côté et 3 sur chaque petit côté. L'espacement entre électrodes est de 1.25 cm. En raison de la symétrie, on modélise une moitié du domaine, le plan de symétrie contenant les électrodes.

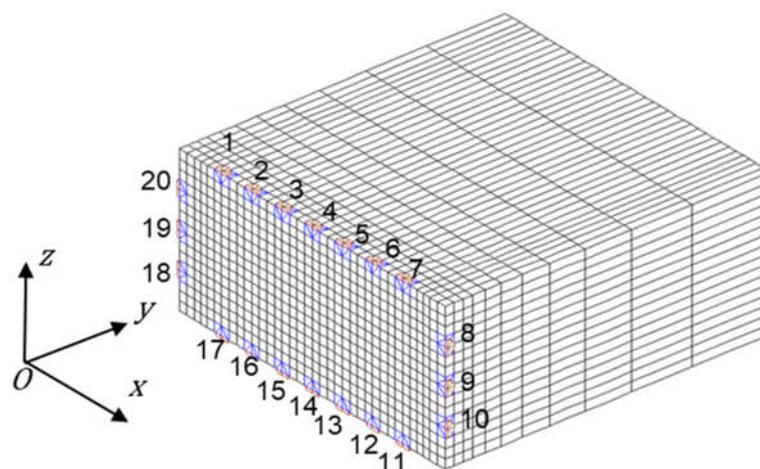


Figure III-11 : Maillage de la brique entière en ceinturation et numérotation des électrodes en surface

Un champ 2D hétérogène peut être créé dans la section droite xOz de la brique. Ce champ reste invariant suivant la direction y . Il est constitué de 2 zones homogènes : une zone rectangulaire intérieure, centrée sur la brique, de résistivité ρ_{int} et une zone extérieure de résistivité ρ_{ext} .

Afin de pouvoir facilement étudier tous types de combinaison ABMN, les fichiers Cast3M effectuent le calcul pour 145 combinaisons AB possibles. Il en existe en réalité d'autres, mais elles peuvent s'obtenir par symétrie à partir de l'une des 145 citées plus haut (à condition bien entendu que le champ de conductivité soit symétrique par rapport aux plans xOy et yOz). Pour chacune de ces 145 combinaisons AB, les potentiels sur les 20 électrodes sont calculés. Les différences de potentiel ΔV_{MN} peuvent alors se calculer a posteriori à partir de ces potentiels. Ceci permet d'avoir l'information sur n'importe quelle combinaison ABMN, à partir d'un nombre réduit de calculs Cast3M.

III.3.2. Profondeur d'investigation des quadripôles « de surface »

Nous considérons un champ hétérogène unidimensionnel constitué de trois strates : une strate intérieure centrée, de hauteur $(2 \times L_{cz})$ variable entre 0 et 0,05 m, et deux strates extérieures, Figure III-12. Les résistivités ρ_{int} et ρ_{ext} sont choisies respectivement à 200 et 20 Ωm correspondant à une reprise d'humidité.

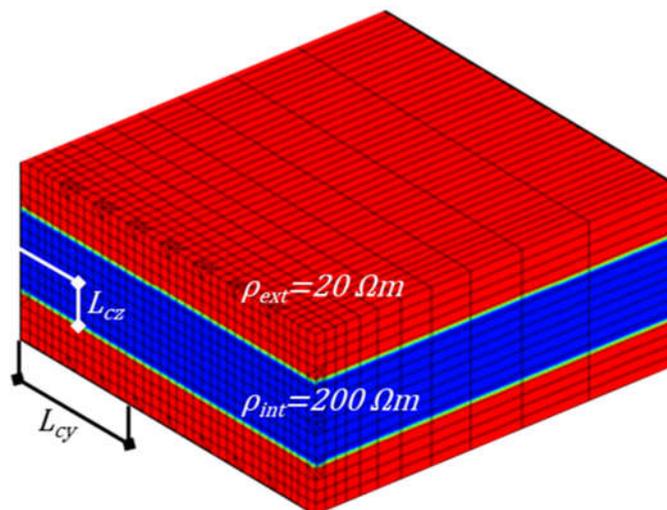


Figure III-12 : Champ hétérogène 1D de résistivité

Nous étudions la profondeur d'investigation de dipôles-dipôles, Wenner- α , Wenner- β et Wenner- γ . Les quadripôles sont appliqués sur la face supérieure de la brique, de la manière la plus centrée possible. On étudie l'influence de L_{cz} sur la résistance $\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$. Les quadripôles ABMN choisis sont 3456, 2356, 2367, 2534, 2435 et 1634. A titre indicatif, les premières lignes du tableau III-1 montrent, pour un champ homogène, l'influence des bords libres du domaine sur le facteur géométrique, par rapport au cas d'un milieu semi-infini. L'évolution de $\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$ en fonction de L_{cz} selon chaque quadripôle est montrée dans la deuxième partie du Tableau III-1 et la Figure III-13. L'influence de L_{cz} sur la variation relative de résistance $\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$ par rapport au cas homogène est également tracée à la Figure III-14.

Tableau III-1 : Evolution de $\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$ en fonction de L_{CZ} pour différents types de quadripôles

Type de quadripôle	Wenner- β	Dipôle-dipôle a-2a-a	Dipôle-dipôle a-3a-a	Wenner- α	Wenner- γ	Wenner Schlumberger 2a-a-2a
Electrodes ABMN	3456	2356	2367	2534	2435	1634
Disposition et espacement	ABMN a-a-a	ABMN a-2a-a	ABMN a-3a-a	AMBN a-a-a	AMNB a-a-a	AMNB 2a-a-2a
k théorique (milieu homogène ∞)	0,236	0,942	2,356	0,079	0,118	0,236
k numérique (milieu homogène fini)	0,239	1,021	2,997	0,075	0,109	0,198
Ecart de k	1,2%	8,3%	27,2%	-4,8%	-7,6%	-16,1%
L_{CZ}	$\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$					
Homogène $L_{CZ} = 0$	-83,8	-19,6	-6,7	267,6	183,8	101,2
0,002	-82,0	-20,0	-7,6	286,5	204,6	124,2
0,004	-82,3	-20,3	-7,8	287,0	204,7	124,1
0,006	-81,2	-20,6	-8,2	301,1	219,9	140,5
0,008	-81,6	-22,1	-9,2	322,6	241,0	161,6
0,010	-82,5	-23,1	-9,7	329,5	247,0	166,8
0,012	-84,7	-25,4	-11,0	358,8	274,2	192,2
0,014	-87,0	-27,0	-11,8	372,7	285,7	201,5
0,016	-100,8	-34,5	-15,2	454,1	353,3	256,1
0,018	-122,8	-43,9	-19,3	561,5	438,7	320,5
0,020	-139,0	-49,7	-21,7	625,3	486,3	352,4
0,022	-256,4	-89,4	-37,6	1070,2	813,8	565,8
0,024	-602,1	-182,9	-68,1	2151,4	1549,3	961,2
0,025	-838,4	-196,0	-66,7	2676,2	1837,8	1011,6

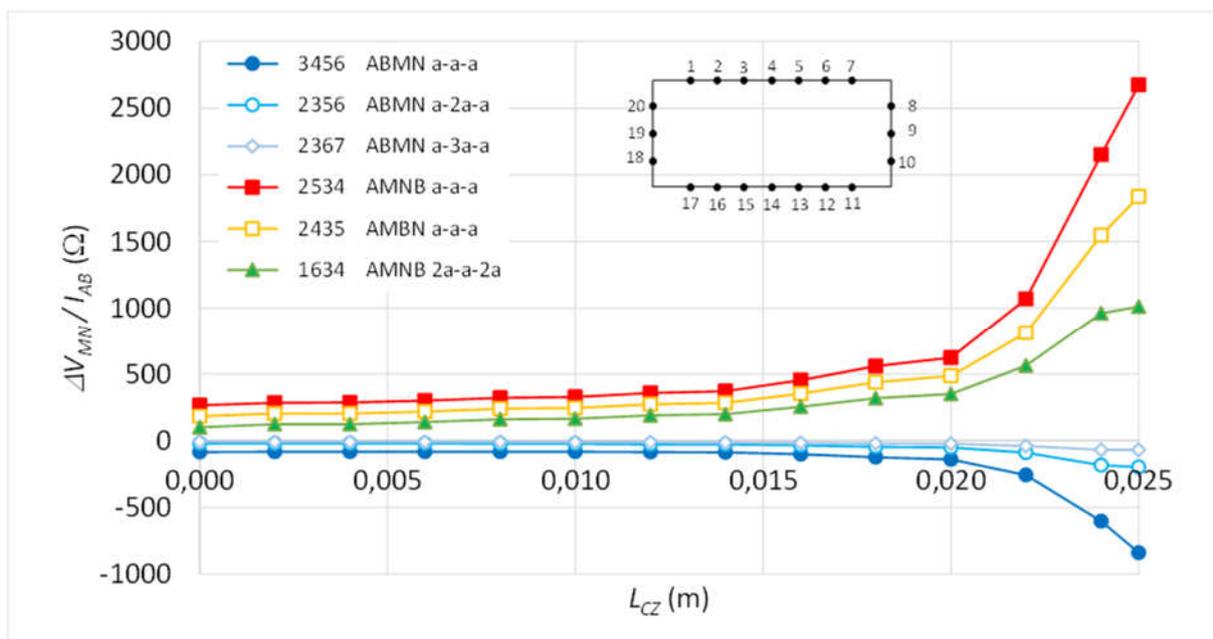


Figure III-13 : Rappports $\frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}}$ en fonction de L_{CZ} pour différents quadripôles de surface

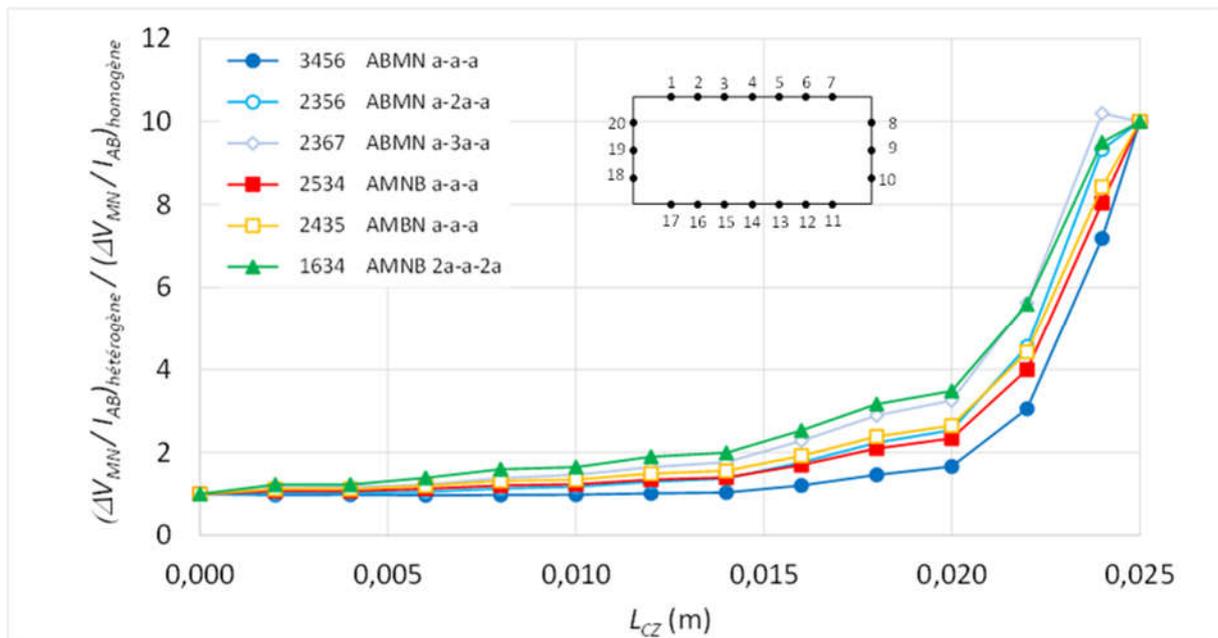


Figure III-14 : Influence de L_{CZ} sur la variation relative de résistance apparente par rapport au cas homogène

La profondeur d'investigation d'un Wenner- β (ABMN a-a-a) est très faible (de l'ordre de 5 à 10mm). Cependant, le rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ est significatif. Ce quadripôle est donc très efficace pour révéler la distribution périphérique des résistivités de surface. Une bonne profondeur d'investigation de l'ordre de 15 à 20 mm serait obtenue avec un dipôle-dipôle (ABMN a-3a-a). En revanche, le rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ étant beaucoup plus faible, nous risquons, sur des applications expérimentales de n'obtenir qu'un bruit de mesure.

précédent avec un Wenner Schlumberger (AMNB 2a-a-2a), et ce, avec un rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ beaucoup plus important. Une profondeur d'investigation intermédiaire peut être obtenue par des Wenner- γ (AMBN a-a-a) ou Wenner- α (AMNB a-a-a), pouvant donner des informations à des profondeurs de 5 à 15 mm, avec un rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ très intéressant. Les trois types de quadripôles, retenus en définitive pour l'étude des gradients proches de la surface, sont présentés, Figure III-15

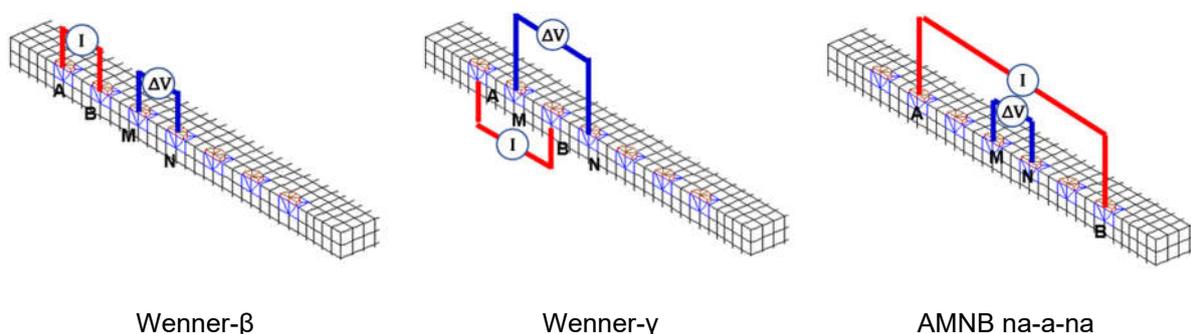


Figure III-15 : Quadripôles « de surface » choisis pour le multiplexage en surface

III.3.3. Discrimination des hétérogénéités profondes par des quadripôles traversants

Cette étude s'appuie sur un champ de conductivité hétérogène similaire aux champs précédents dont la strate intérieure (d'une résistivité 10 fois plus grande que les deux strates

extérieures) occupe les $\frac{2}{5}$ de la hauteur ($L_{CZ} = 0.01\text{ m}$). Dans la Figure III-16, chaque groupe de 20 points représente les potentiels obtenus sur les 20 électrodes, et ce, pour une combinaison d'injection d'intensité unitaire AB donnée. Si l'on considère une injection avec $A=3$, on constate que les électrodes B (pour lesquelles le contraste de potentiel entre le cas homogène et le cas homogène est le plus important) sont celles qui sont positionnées sur la face opposée à A (électrodes 11 à 17). Ceci démontre la bonne aptitude des injections AB traversantes pour détecter les hétérogénéités internes de résistivité. En revanche, pour des positions de B sur la même face que A (B entre 4 et 7), le contraste est très faible, ce qui confirme la faible efficacité des quadripôles de type Wenner pour accéder à l'information en profondeur.

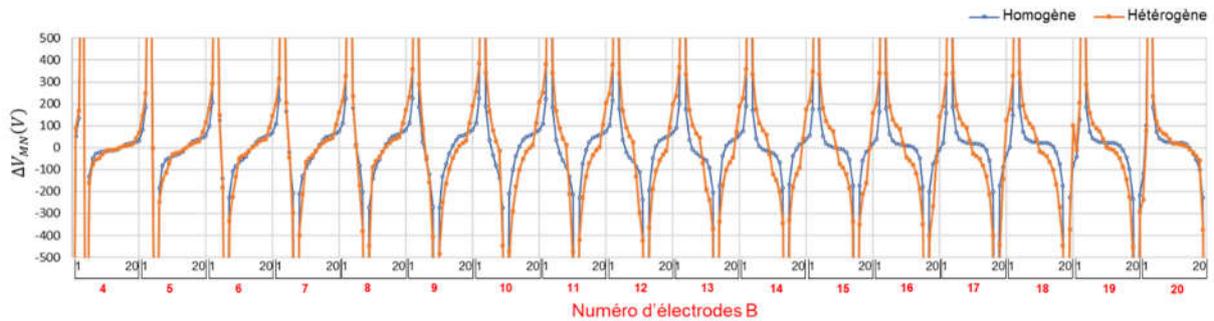


Figure III-16 : Potentiels aux électrodes en fonction de l'électrode B ($A=3$)

Ces résultats ne montrent cependant que l'amplitude avec laquelle les potentiels (par rapport à la référence $V=0$ imposée au loin) sont affectés. Il reste à choisir les couples MN pour lesquels les différences de potentiel ΔV_{MN} sont les plus marquées. La Figure III-17 présente l'exemple du dipôle traversant $A=3$, $B=15$:

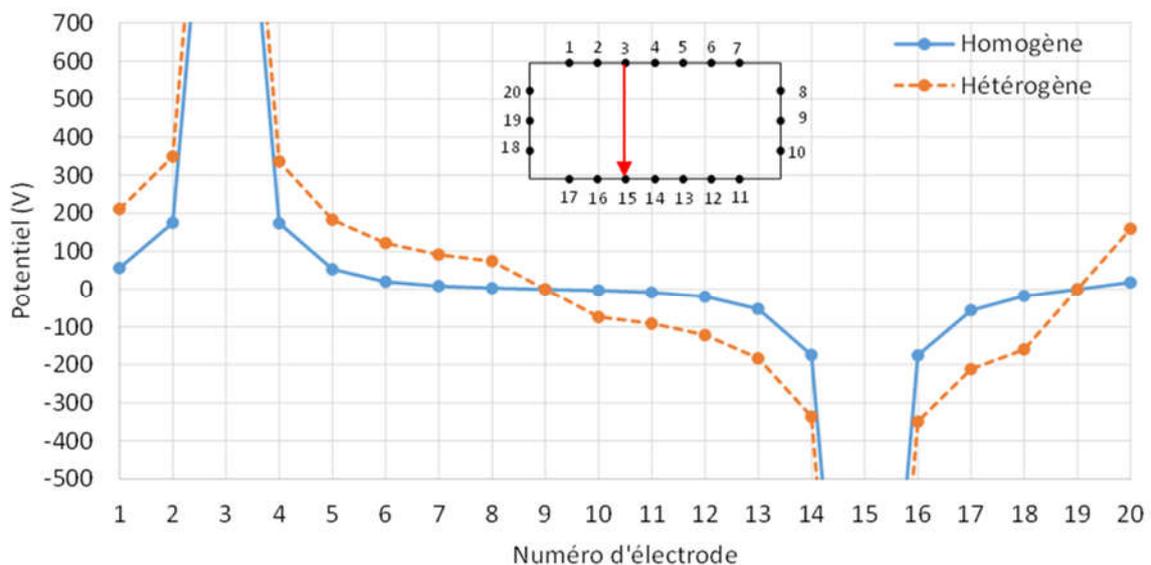


Figure III-17 Potentiels aux électrodes (injection en $A=3$ et $B=15$)

Les potentiels les plus perturbées par le champ hétérogène se trouvent sur des points voisins immédiats de A et B : les points 2, 16, 4 et 14. Ainsi par exemple, pour le dipôle $M-N = 2-16$, on a pour le champ homogène ΔV_{MN} de 351V et pour le champ hétérogène ΔV_{MN} de 698V, soit une perturbation $\Delta(\Delta V_{MN})$ de 347V.

Des dipôles MN inclinés proches ont des perturbations plus faibles ($M-N = 5-14 = 4-13$) donnant une différence de potentiel $\Delta(\Delta V_{MN})$ de 292 V.

Des dipôles MN parallèles et plus éloignés ont des perturbations encore plus faibles ($M-N = 5-13$) induisant une différence de potentiel $\Delta(\Delta V_{MN}) =$ de 261 V.

M	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		0	-19	155	-7	25	53	72	84	155	226	238	257	285	317	155	329	310	296	155	14
2		19	0	174	12	43	72	91	103	174	245	257	276	304	336	174	347	329	315	174	32
3		-155	-174	0	-162	-130	-102	-83	-71	0	71	83	102	130	162	0	174	155	141	0	-141
4		7	-12	162	0	32	60	79	91	162	233	245	264	292	324	162	336	317	303	162	21
5		-25	-43	130	-32	0	28	47	59	130	201	213	232	261	292	130	304	285	272	130	-11
6		-53	-72	102	-60	-28	0	19	31	102	173	185	204	232	264	102	276	257	243	102	-39
7		-72	-91	83	-79	-47	-19	0	12	83	154	166	185	213	245	83	257	238	224	83	-58
8		-84	-103	71	-91	-59	-31	-12	0	71	142	154	173	201	233	71	245	226	212	71	-70
9		-155	-174	0	-162	-130	-102	-83	-71	0	71	83	102	130	162	0	174	155	141	0	-141
10		-226	-245	-71	-233	-201	-173	-154	-142	-71	0	12	31	59	91	-71	103	84	70	-71	-212
11		-238	-257	-83	-245	-213	-185	-166	-154	-83	-12	0	19	47	79	-83	91	72	58	-83	-224
12		-257	-276	-102	-264	-232	-204	-185	-173	-102	-31	-19	0	28	60	-102	72	53	39	-102	-243
13		-285	-304	-130	-292	-261	-232	-213	-201	-130	-59	-47	-28	0	32	-130	43	25	11	-130	-272
14		-317	-336	-162	-324	-292	-264	-245	-233	-162	-91	-79	-60	-32	0	-162	12	-7	-21	-162	-303
15		-155	-174	0	-162	-130	-102	-83	-71	0	71	83	102	130	162	0	174	155	141	0	-141
16		-329	-347	-174	-336	-304	-276	-257	-245	-174	-103	-91	-72	-43	-12	-174	0	-19	-32	-174	-315
17		-310	-329	-155	-317	-285	-257	-238	-226	-155	-84	-72	-53	-25	7	-155	19	0	-14	-155	-296
18		-296	-315	-141	-303	-272	-243	-224	-212	-141	-70	-58	-39	-11	21	-141	32	14	0	-141	-283
19		-155	-174	0	-162	-130	-102	-83	-71	0	71	83	102	130	162	0	174	155	141	0	-141
20		-14	-32	141	-21	11	39	58	70	141	212	224	243	272	303	141	315	296	283	141	0

Figure III-18 : Ecart de ΔV_{MN} entre le cas homogène et le cas hétérogène

Toujours en champ de conductivité unidimensionnel, on étudie l'apport des quadripôles traversants. Vis-à-vis de ces quadripôles, des résultats très proches peuvent être obtenus pour deux configurations de champs de résistivités différentes, conduisant à une même résistance surfacique de l'échantillon suivant la direction Oz. Considérons l'exemple des deux configurations suivantes :

- Hétérogène 1 : couche centrale de faible épaisseur avec une résistivité très contrastée
- Hétérogène 2 : couche centrale de forte épaisseur, avec une résistivité plus faiblement contrastée.

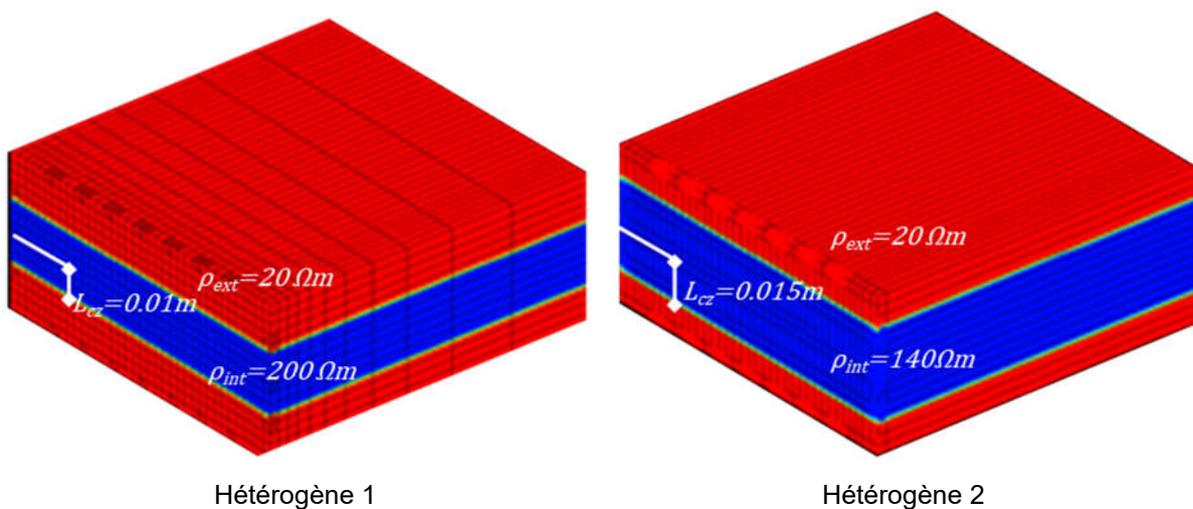


Figure III-19 : Deux configurations de champs de résistivité différentes

Nous reprenons le cas d'une injection traversante (A=3, B=15). Comme attendu, l'écart des tensions aux électrodes d'injection ΔV_{AB} entre les deux cas hétérogènes est assez faible (4.9%), Tableau III-2.

Tableau III-2 : Potentiels pour des électrodes d'injection traversante A=3 ; B=15

Potentiel aux électrodes (V)				Différence de potentiel aux dipôles récepteurs (V)			
N° électrode	V _{homogène}	V _{hétérogène 1}	V _{hétérogène 2}		Hétérogène 1	Hétérogène 2	Ecart
1	56	211	252				
2	175	349	420	ΔV_{3-15}	3905	4095	4.9%
3	1772	1953	2048	ΔV_{4-14}	672	811	20.6%
4	174	336	405	ΔV_{5-13}	366	437	19.3%
5	53	183	219	ΔV_{6-12}	244	276	13.4%
6	20	122	138	ΔV_{7-11}	184	198	7.6%
7	8	92	99				
8	3	74	68				
9	0	0	0				
10	-3	-74	-68				
11	-8	-92	-99				
12	-20	-122	-138				
13	-53	-183	-219				
14	-174	-336	-405				
15	-1772	-1953	-2048				
16	-175	-349	-420				
17	-56	-211	-252				
18	-18	-160	-163				
19	0	0	0				
20	18	160	163				

Cet écart est plus marqué pour la tension ΔV_{MN} du couple d'électrodes parallèle traversant le plus proche (M=4, N=14), avec 20.6% d'écart. Cet écart diminue ensuite progressivement lorsqu'on éloigne le couple MN. Des quadripôles traversants, impliquant des dipôles AB et MN contigus (Figure III-20), sont donc efficaces pour discriminer des répartitions différentes de champs de résistivité profonds, même si celles-ci conduisent à des résistances globales identiques entre faces.

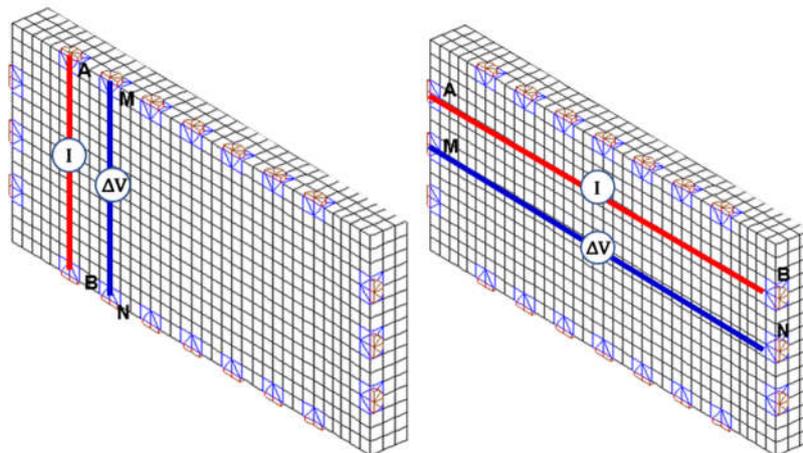


Figure III-20 : Quadripôles traversants choisis pour le multiplexage

III.3.4. Quadripôles diagonaux de coins

Nous avons noté une sensibilité importante des quadripôles traversants. Afin d'ajouter des lignes de courant traversant inclinées dans le modèle, on ajoute à présent des quadripôles particuliers pour explorer des zones proches des coins de l'échantillon (Figure III-21).

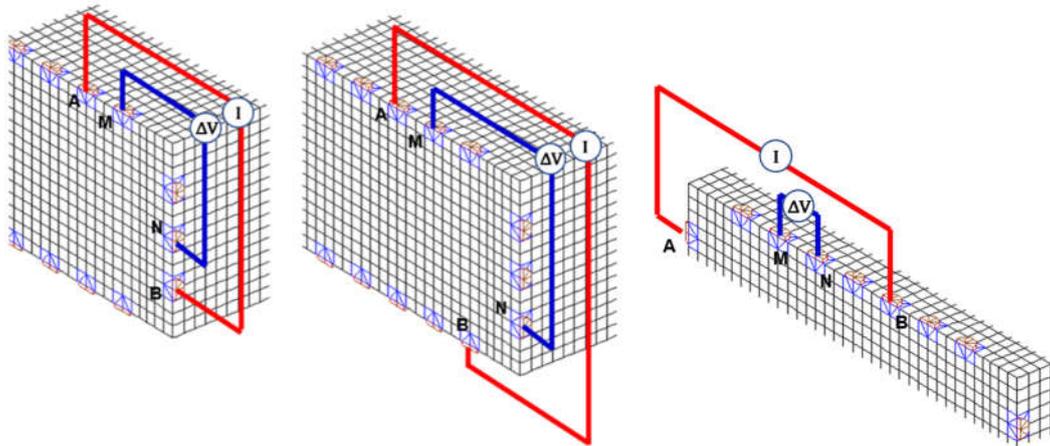


Figure III-21 : Quadripôles diagonaux du multiplexage

Pour étudier la sensibilité de ces quadripôles aux champs bidimensionnels qui apparaissent au voisinage des coins, nous considérons un champ de résistivité hétérogène discontinu analogue à celui présenté Figure III-12, mais avec une hétérogénéité centrale qui se présente cette fois-ci sous une forme rectangulaire, et non sous la forme d'une strate (Figure III-22).

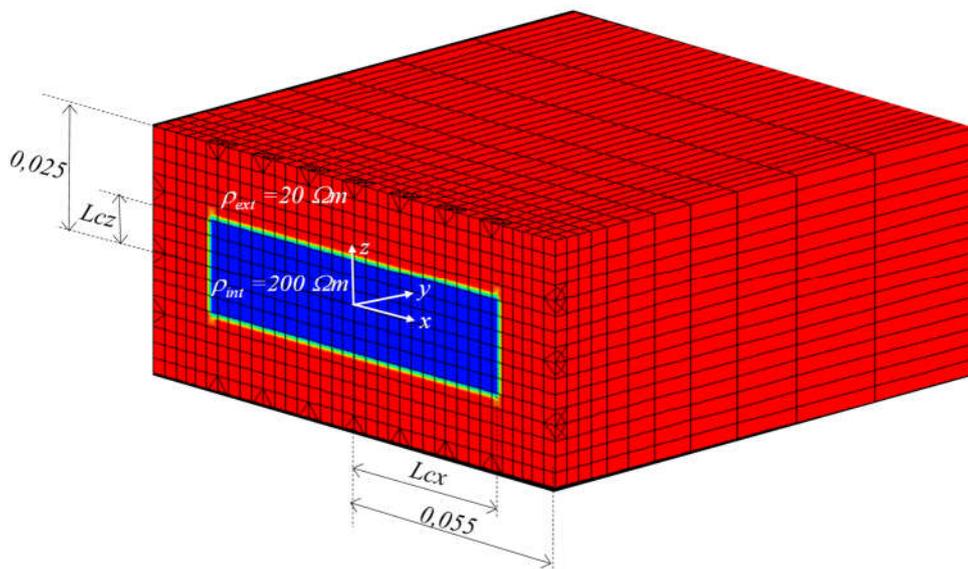


Figure III-22 : Champ hétérogène 2D de résistivité

La Figure III-23 montre, pour deux quadripôles diagonaux situés près d'un angle, l'influence de l'étendue du rectangle central de forte résistivité sur le rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$. Celle-ci est sensible à partir d'une faible hauteur du rectangle, et devient d'autant plus marquée que sa largeur est importante. Bien que ces quadripôles, de type AMNB a-na-a ne soient pas répertoriés dans les cas de figure classiques utilisés en géotechnique (Tableau I-2), nous pouvons en attendre des informations utiles dans le cadre d'une analyse inverse, notamment pour qualifier des champs hétérogènes bidimensionnels au voisinage de coins.

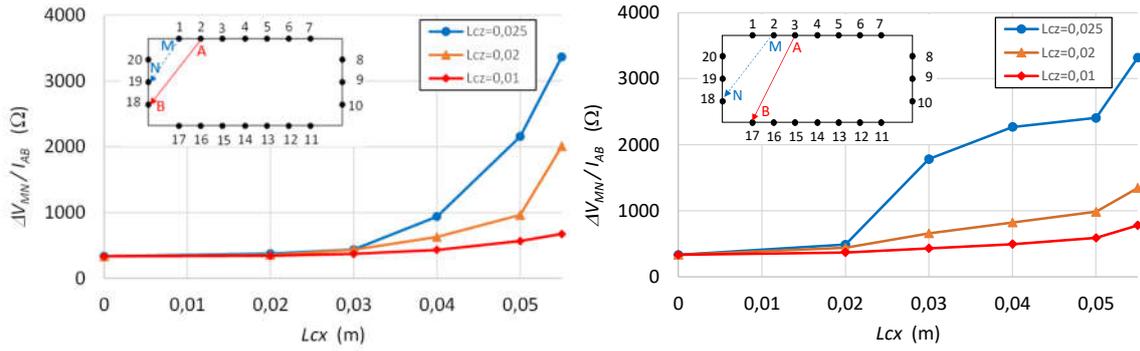


Figure III-23 : Influence d'un champ de résistivité hétérogène sur des quadripôles diagonaux

III.3.5. Choix et classification des quadripôles pour le multiplexage

En combinant des quadripôles étudiés ci-dessus, on a le multiplexage pour la brique entière. En outre, on applique ce procédé de création du multiplexage pour les cubes à 16 électrodes (Figure II-31). De plus, afin de pouvoir valider strictement ce multiplexage optimisé, nous appliquons également la méthodologie sur l'échantillon à 20 électrodes de Nguyen (2014) comme indiqué en (Figure III-6). Nous avons ainsi 3 types différents de multiplexage selon le nombre et la distribution des électrodes de chaque objet étudié (Tableau III-3).

Tableau III-3 : Choix du multiplexages appliqués

Echantillon de Nguyen (2014) 20 électrodes, 64 quadripôles				Cube 16 électrodes, 54 quadripôles								Brique entière 20 électrodes, 64 quadripôles																															
A	B	M	N	A	B	M	N	A	B	M	N	A	B	M	N	A	B	M	N	A	B	M	N	A	B	M	N																
Wenner-β				Wenner-γ				Traversant				Wenner-β				Wenner-γ				Traversant z																							
1	2	3	4	1	3	2	4	1	15	2	14	1	2	3	4	1	3	2	4	1	12	2	11	1	2	3	4	1	3	2	4	1	17	2	16								
2	3	4	5	2	4	3	5	2	14	3	13	2	3	4	5	2	4	3	5	2	11	3	10	2	3	4	5	2	4	3	5	2	16	3	15								
3	4	5	6	3	5	4	6	3	4	12	3	13	3	4	5	6	3	5	4	6	3	4	9	3	10	3	4	5	6	3	5	4	6	3	15	4	14						
4	5	6	7	4	6	5	7	4	5	11	4	12	4	5	6	7	4	6	5	7	4	5	16	6	15	4	5	6	7	4	6	5	7	4	13	4	14						
5	6	7	8	5	7	6	8	5	6	20	7	19	5	6	7	8	5	7	6	8	5	6	15	7	14	5	6	7	8	5	7	6	8	5	12	5	13						
6	7	8	9	6	8	7	9	6	7	19	8	18	6	7	8	9	6	8	7	9	6	7	14	8	13	6	7	8	9	6	8	7	9	6	11	6	12						
7	8	9	10	7	9	8	10	7	8	18	9	17	7	8	9	10	7	9	8	10	7	8	13	9	12	7	8	9	10	7	9	8	10	Traversant x									
8	9	10	11	8	10	9	11	8	10	17	9	16	8	9	10	11	8	10	9	11	8	9	12	10	11	8	9	10	11	8	10	9	11	8	10	19	9						
9	10	11	12	9	11	10	12	Diagonal				Diagonal				9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12				
10	11	12	13	10	12	11	13	3	11	4	10	10	11	12	13	10	12	11	13	2	9	3	8	10	11	12	13	10	12	11	13	10	12	11	13	10	12	11	13	Diagonal 1			
11	12	13	14	11	13	12	14	3	15	2	16	11	12	13	14	11	13	12	14	3	12	2	13	11	12	13	14	11	13	12	14	11	13	12	14	11	13	12	14	11	13	12	14
12	13	14	15	12	14	13	15	8	20	7	1	12	13	14	15	12	14	13	15	6	13	7	12	12	13	14	15	12	14	13	15	12	14	13	15	12	14	13	15	12	14	13	15
13	14	15	16	13	15	14	16	8	16	9	15	13	14	15	16	13	15	14	16	7	16	6	1	13	14	15	16	13	15	14	16	13	15	14	16	13	15	14	16	13	15	14	16
14	15	16	17	14	16	15	17	13	5	12	6	14	15	16	1	14	16	15	1	10	1	11	16	14	15	16	17	14	16	15	17	14	16	15	17	14	16	15	17	14	16	15	17
15	16	17	18	15	17	16	18	13	1	14	20	15	16	1	2	15	1	16	2	11	4	10	5	15	16	17	18	15	17	16	18	15	17	16	18	15	17	16	18	15	17	16	18
16	17	18	19	16	18	17	19	18	6	19	5	16	1	2	3	16	2	1	3	14	5	15	4	16	17	18	19	16	18	17	19	16	18	17	19	16	18	17	19				
17	18	19	20	17	19	18	20	18	10	17	11									15	8	14	9	17	18	19	20	17	19	18	20	17	19	18	20	17	19	18	20				
18	19	20	1	18	20	19	1	2	18	1	19									2	14	1	15	18	19	20	1	18	20	19	1	18	20	19	1	18	20	19	1				
19	20	1	2	19	1	20	2	4	8	5	7									3	15	2	16	19	20	1	2	19	1	20	2	19	1	20	2	19	1	20	2				
20	1	2	3	20	2	1	3	7	3	6	4									6	2	5	3	20	1	2	3	20	2	1	3	20	1	2	3	20	1	2	3				
								9	13	10	12									7	3	6	4																				
								12	8	11	9									10	6	9	7																				
								14	18	15	17									11	7	10	8																				
								17	13	16	14									14	10	13	11																				
								19	3	20	2									15	11	14	12																				

III.3.5.1. Influence sur la qualité de l'inversion : échantillon à 20 électrodes

Dans un premier temps, nous testons le multiplexage optimisé sur l'échantillon de Nguyen (2014) comportant les 64 quadripôles du Tableau III-3 sur le champ à identifier illustré à la Figure III-7 Les résultats, après 10 itérations, sont présentés en Figure III-24

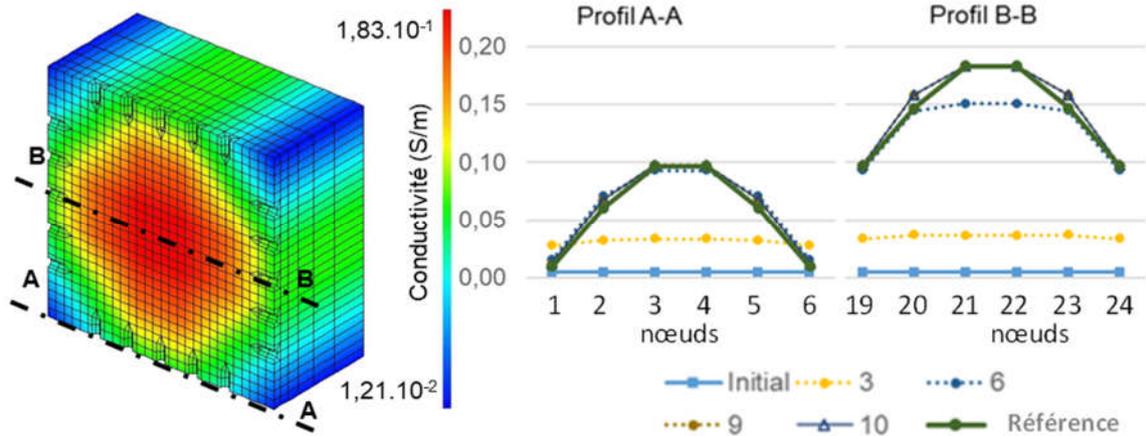


Figure III-24 : Champ identifié et variation itérative des valeurs de conductivité aux nœuds après 10 itérations (cas de l'échantillon à 20 électrodes et le multiplexage de 64 quadripôles)

Avec 64 quadripôles, nous constatons un résultat similaire qu'avec 620 quadripôles de dipôle-dipôle (Figure III-7). Ce résultat met en évidence une qualité d'analyse inverse équivalente mais avec un gain de temps de calcul significatif (environ 10 fois moins de quadripôles à simuler).

III.3.5.2. Influence sur la qualité de l'inversion : cube à 16 électrodes

Dans un second temps, nous testons le multiplexage optimisé à 54 quadripôles (au lieu des 136 que nous avons précédemment) sur deux cubes comportant, respectivement, 16 électrodes surfaciques et encastrées. Après 10 itérations, nous avons également des résultats similaires, Figure III-25 et Figure III-26

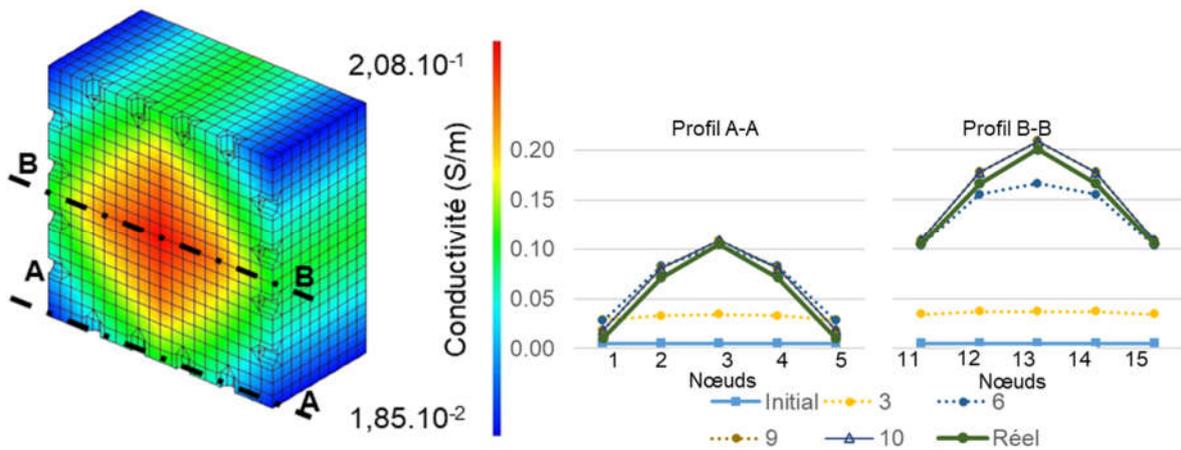


Figure III-25 : Champ identifié et variation itérative des valeurs de conductivité des nœuds à la 10ème itération du cube à 16 électrodes encastrées et le multiplexage de 66 quadripôles

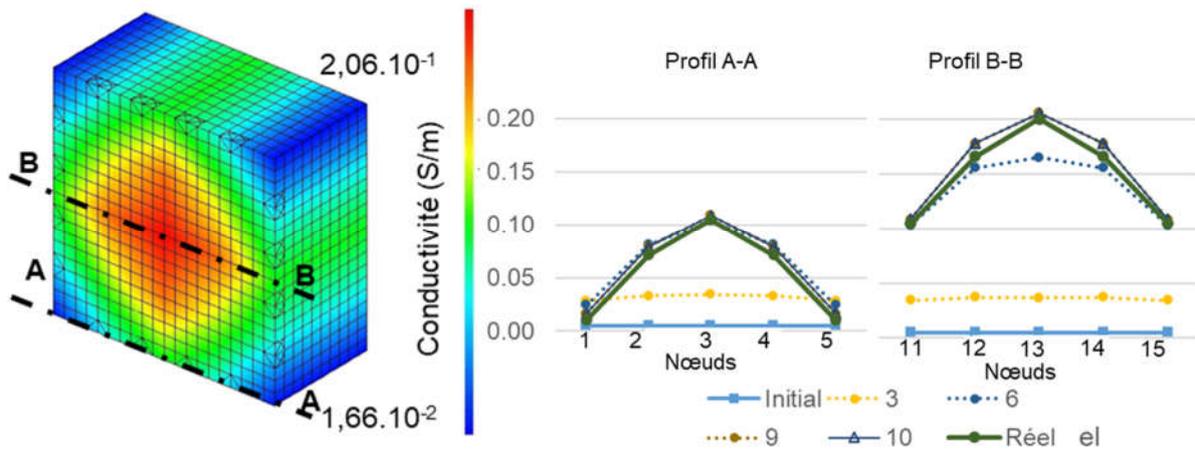


Figure III-26 : Champ identifié et variation itérative des valeurs de conductivité aux nœuds après 10 itérations (cas du cube à 16 électrodes surfaciques et multiplexage de 54 quadripôles)

III.4. Mise en œuvre de la tomographie électrique sur une brique en régime hydrique transitoire

III.4.1. Protocoles expérimentaux : Appareillage de la brique

Afin de mesurer la variation de la résistivité de la brique en terre crue (Annexe 1), le montage illustré dans la Figure III-27 est réalisé.

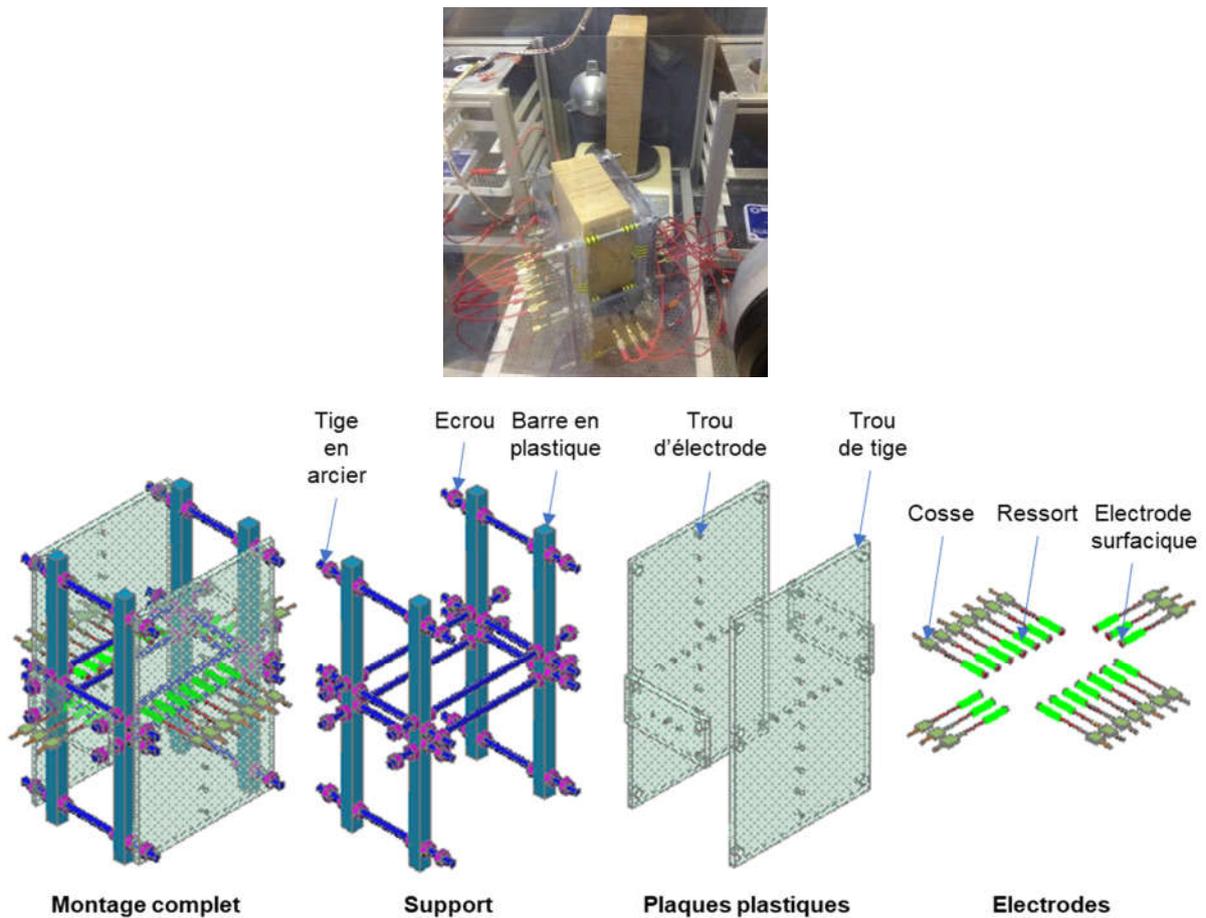


Figure III-27 : Montage en ceinturage de la brique entière

De la même façon que dans la Figure II-29, des électrodes surfaciques de diamètre 2,5mm tenues par les ressorts sont employées. Leur positionnement est assuré via des perçages réalisés sur les plaques plastiques qui sont, elles-mêmes, fixées sur un support en plastique et par des tiges en acier et des écrous, Figure III-27. La disposition des électrodes surfaciques sur la brique est également précisée.

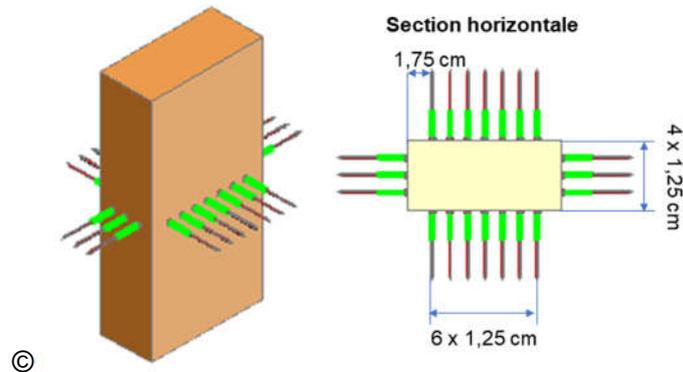


Figure III-28 : Disposition des électrodes en ceinturage de la brique entière

III.4.1.1. Conditionnement

Un dessiccateur sert au conditionnement de la brique. L'humidité relative intérieure est imposée via des sels disposés dans un plateau disposé au fond du dessiccateur (NF EN ISO 12571, 2013). L'ensemble du dispositif est présenté en Figure III-29

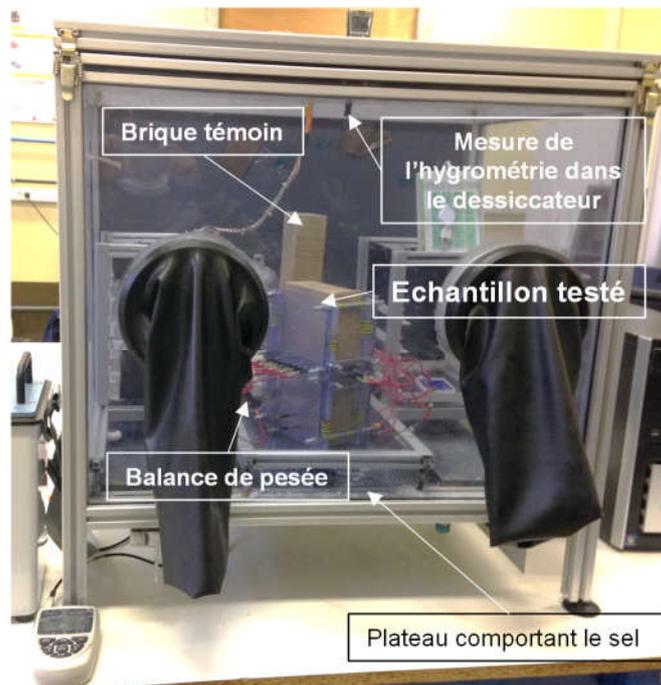


Figure III-29 : Dessiccateur de condition de la Brique

Initialement, les échantillons sont stabilisés dans une ambiance caractérisée par une humidité relative de 70%HR et une température de 20°C, Figure III-30. L'évolution de la teneur en eau moyenne est suivie par pesée régulière de l'échantillon, et ce, jusqu'à stabilisation de sa masse. Dans un second temps, on change le sel pour imposer une humidité relative proche de 30%HR. Les évolutions de l'humidité relative et la température dans le dessiccateur ainsi que de l'ambiance sont mesurées par deux thermo hygromètres. Bien que l'ambiance

thermique soit stable dans l'environnement du laboratoire, nous observons une élévation de la température de l'ordre de 5°C lors de phase de stabilisation de l'ambiance dans le dessiccateur étant expliqué par des phénomènes latents provenant de la dissolution du sel.

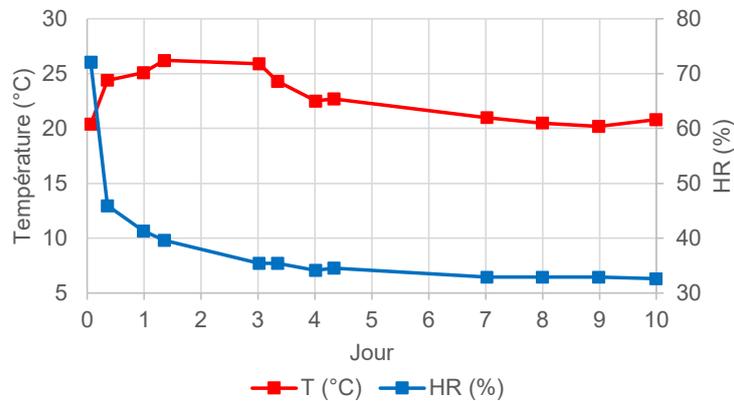


Figure III-30 : Evolution de l'Humidité Relative et de la température à l'intérieur du dessiccateur

Etant donné que l'échantillon testé est instrumenté pour les mesures électriques, l'évolution de l'humidité interne moyenne est déduite par pesée en continu de la masse d'une brique témoin, elle-même, placée dans le dessiccateur. L'évolution temporelle de la teneur en eau de la brique témoin est présentée en Figure III-31

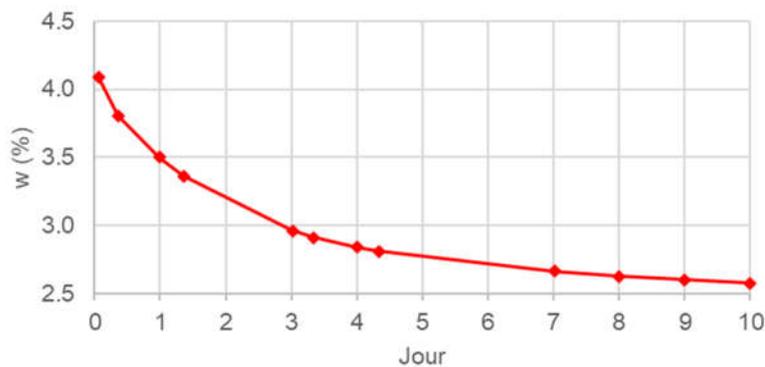


Figure III-31 : Evolution de la teneur en eau de la brique témoin

III.4.2. Modèles numériques hygrothermiques

Afin de tester les capacités de notre algorithme d'inversion dans des milieux à gradients hydriques, nous proposons de déterminer l'évolution temporelle théorique du champ de teneur en eau w dans la brique de terre crue. Pour cela, nous employons le modèle de transfert et de masse en considérant, comme conditions aux limites, les ambiances mesurées dans le dessiccateur en termes d'humidité relative et de température.

L'étape suivante est d'en déduire le champ de conductivité électrique via la loi de passage déterminée précédemment, puis de le projeter sur le maillage aux éléments finis.

Un calcul direct de multiplexage est réalisé en sollicitant les 64 quadripôles classés par familles topologiques. Le but est de comparer la courbe théorique du rapport V_{MN}/I_{AB} en fonction du numéro de quadripôle avec la courbe expérimentale. On est donc encore en amont de l'inversion. Si les courbes analytiques et expérimentales obtenues présentent de très grosses différences d'allure, l'inversion sera difficile. Cette approche permettra également de voir quels sont les quadripôles sensibles à un gradient de conductivité.

Il est utile de disposer de champs de résistivité réalistes représentatifs des diverses phases du séchage de la brique. Ces champs peuvent être générés grâce au modèle de diffusion hygrothermique développé au Laboratoire de GC2D (Laou 2017). Les intérêts de cette modélisation sont les suivants :

- Dans le cadre de calculs directs à partir d'un champ de résistivité théorique, elle permet d'obtenir des résultats de multiplexages théoriques qui sont confrontés à ceux du multiplexage expérimental.
- Pour la mise au point de la procédure d'inversion elle permet de créer des jeux de données de multiplexage non bruitées par des aléas expérimentaux.

A l'Annexe 2, nous utilisons le modèle hygrothermique pour calculer l'évolution du champ de teneur en eau w dans la brique, avec les conditions aux limites (ambiances T , HR) réelles de l'essai. La Figure III-32, montre que le modèle permet de reproduire l'évolution de l'humidité moyenne mesurée.

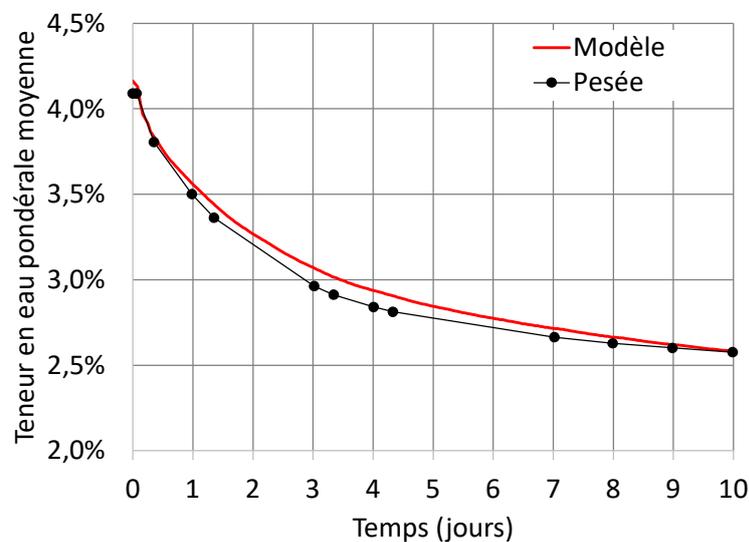


Figure III-32 : Evolution de la teneur en eau de la brique

Nous obtenons ainsi des champs continus réalistes. Prenons par exemple un temps de diffusion d'une journée. Dans ces conditions, Le champ de teneur en eau, issu du processus de diffusion, Figure III-33, est projeté sur le maillage dédié au calcul électrique direct,

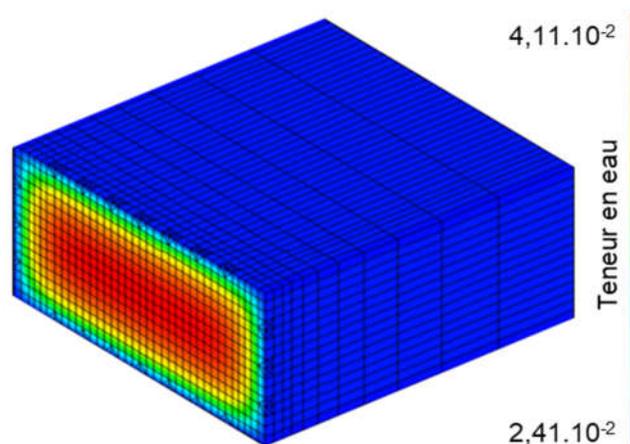


Figure III-33 : Champ 2D de teneur en eau à 1 jour, projeté sur le maillage « électrique »

Le champ de conductivité est calculé via la loi de passage donnée par l'équation (II-5). Cela se traduit par la conductivité tracée en Figure III-34.

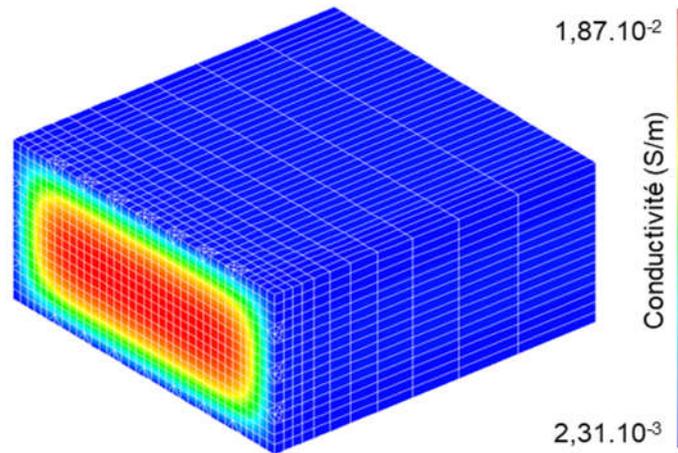


Figure III-34 : Champ 2D de conductivité à 1 jour

III.4.3. Etude de multiplexages à différentes phases du séchage

III.4.3.1. Simulation numérique

Nous montrons Figure III-35 les évolutions du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ pour les différents quadripôles au cours du séchage. A première vue, les courbes, correspondant à un état hétérogène, semblent plus ou moins homothétiques par rapport à celle de l'état initial, ce qui ne serait vrai en toute rigueur que pour des champs de conductivités homogènes.

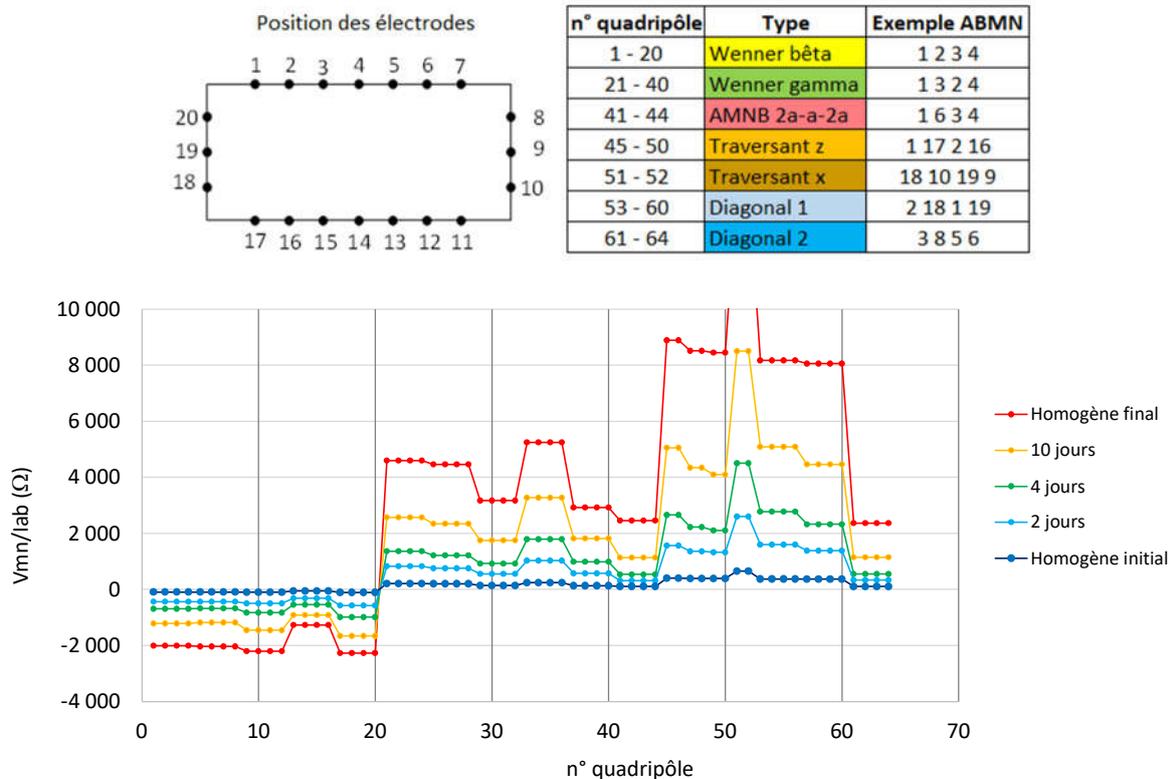


Figure III-35 : Rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ pour différents instants

Pour aller plus loin dans l'analyse, le tracé Figure III-36 des ratios $(\Delta V_{MN}/I_{AB})_{\text{hétérogène}} / (\Delta V_{MN}/I_{AB})_{\text{homogène}}$ montre en réalité que ces ratios ne sont pas constants. C'est dans la variation de ces ratios que réside l'information sur l'hétérogénéité du champ de résistivité. Il est à noter que l'amplitude de ces variations n'est pas très importante par rapport à la valeur moyenne du ratio. Ce point inspire quelques inquiétudes quant à l'aptitude de l'analyse inverse à détecter des champs hétérogènes, si les données expérimentales de multiplexage sont bruitées.

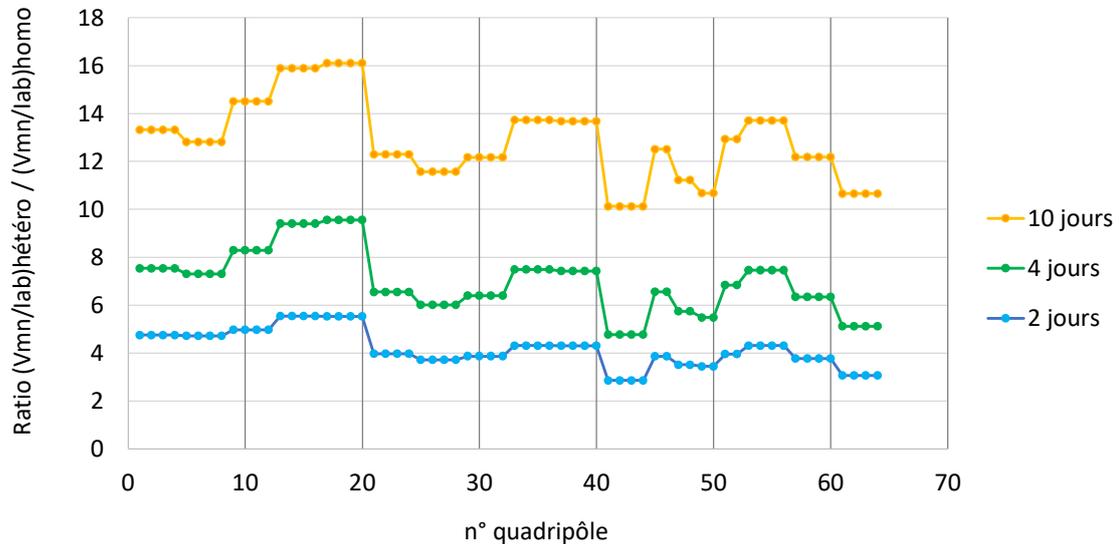


Figure III-36 : Ratios d'évolution de la résistivité apparente par rapport au cas homogène initial

III.4.3.2. Comparaison avec les résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons les premiers résultats de calcul direct sur la base de mesures expérimentales employant les mêmes séquences de multiplexage réalisées précédemment. Trois temps ont été retenus, à savoir, à l'état initial supposé homogène en humidité interne, puis après 1 journée et 10 journées de séchage. La Figure III-37 présente, à la fois, les résultats du calcul direct à l'état humide initial supposé à l'équilibre donc homogène ainsi qu'après une journée correspondant à une diminution de 0.5% de la teneur en eau. A l'état initial, les résultats montrent un calcul direct proche de la mesure, même si des écarts de résistivités apparentes sont observés. A ce stade de l'étude, nous pourrions mettre ces écarts sur le compte d'hétérogénéités en termes de distribution des sites de sorption ou de densité. En revanche, les résultats, après un jour de séchage, amplifient très largement les écarts entre le modèle direct et la mesure. Nous observons également des inversions de signe de résistivités qui seraient le signe d'une inversion de l'orientation des lignes de courant ou des effets de polarisation que notre modèle actuel ne prend pas en compte. Enfin, en surface des échantillons, l'humidité interne peut chuter au-delà des possibilités physiques de la mesure, ce qui pourrait expliquer les pics de mesure qui peuvent faire penser à des mesures de résistivité dans le bruit expérimental en intensité.

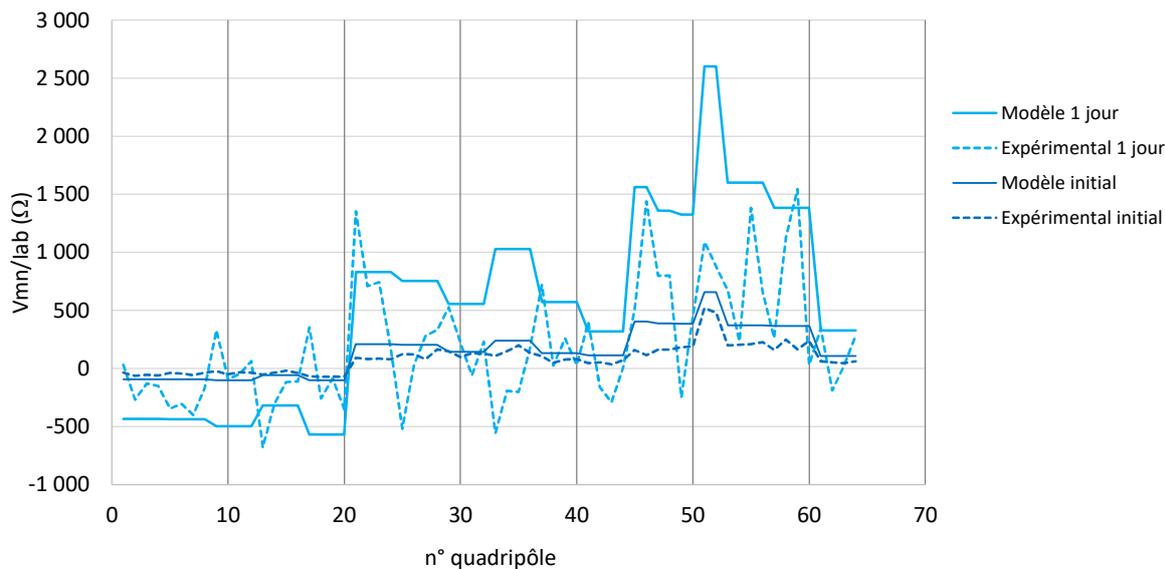


Figure III-37 : Comparaisons entre modèle direct et mesures en début de séchage

Ces premiers résultats sont malheureusement confortés au regard des comparaisons à 9 jours correspondant à une baisse moyenne de 1,5% de l'humidité interne. Enfin, des problèmes de contact des sondes peuvent également compliquer la mesure, cette perte de contact pouvant être le fait du retrait de la terre crue en séchage, problème que nous avons déjà rencontré au chapitre précédent.

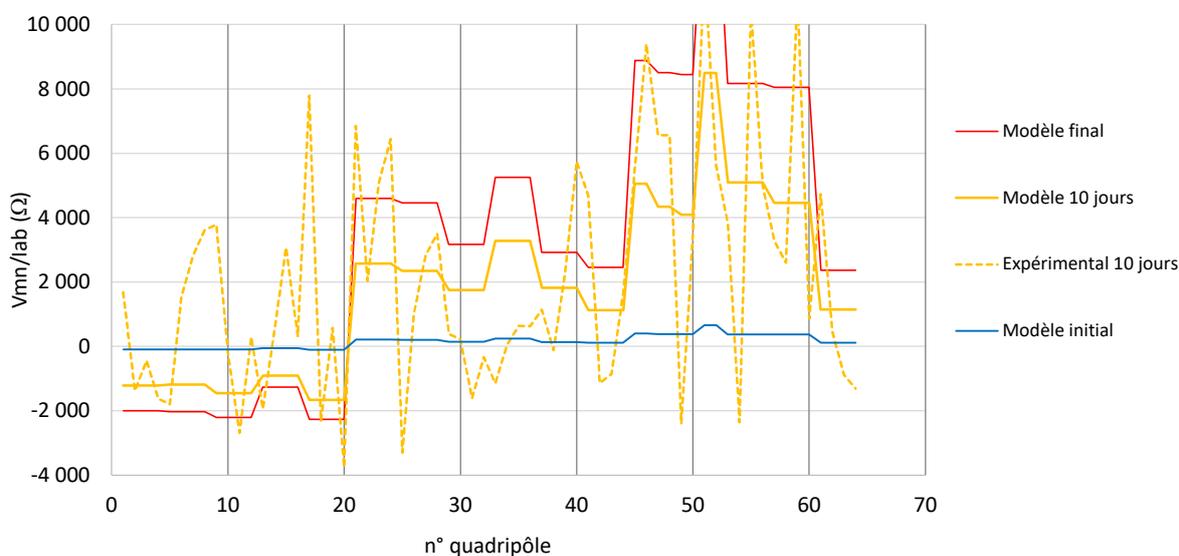


Figure III-38 : Comparaisons entre modèle direct et mesures en fin de séchage

Selon ces dernières observations, l'analyse inverse, qui fait l'objet de la suite de l'étude, va concerner uniquement des champs calculés mais ne pourra être appliquée que sur les mesures expérimentales à l'état initial sans gradient d'humidité.

III.4.4. Analyse inverse

III.4.4.1. Inversions à partir d'un multiplexage obtenu numériquement

Au regard des conclusions précédentes sur les résultats en calcul direct, nous optons, dans un premier temps de valoriser notre algorithme d'inversion sur des champs hydriques calculés en substituant un multiplexage numérique au multiplexage expérimental. En basant sur le modèle hygrothermique (Annexe 2) qui nous fournit un champ hydrique de référence pour l'analyse inverse, Figure III-34. L'analyse inverse est initialement alimentée par une conductivité homogène de 10^{-3} (S/m). Après 5 itérations, l'algorithme converge vers le champ résistif présent en Figure III-39, ce qui confirme un bon comportement théorique de notre approche.

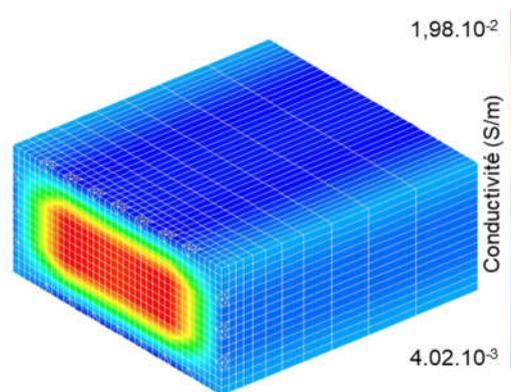


Figure III-39 : Champ de résistivité identifié après 5 itérations

III.4.4.2. Inversions à partir d'un multiplexage expérimental : optimisation des paramètres de Levenberg Marquardt pour l'état initial

Nous étudions ici la méthode de Levenberg-Marquadt en optimisant le facteur d'amortissement avec, comme le point du départ, l'équation Nous suivons le synoptique des opérations matricielles sur un pas de calcul comme présenté en Figure III-40

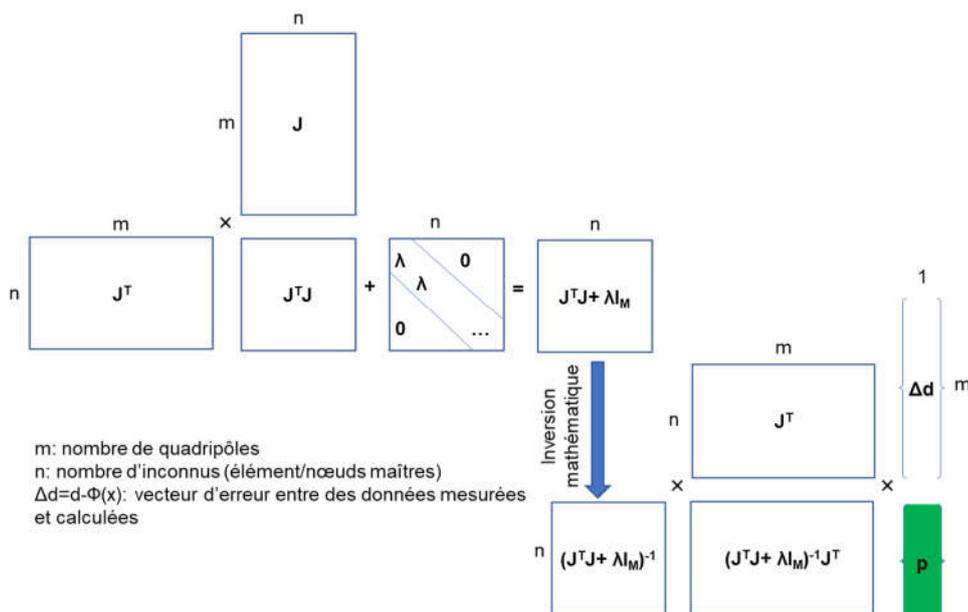


Figure III-40 : Synoptique des opérations matricielles sur un pas de calcul

Afin d'estimer le champ de résistivité à partir des données de l'état expérimental initial, nous commençons par un modèle homogène initial de conductivité 8.10^{-2} (S/m) qui en est suffisamment proche. Nous testons plusieurs valeurs constantes du facteur d'amortissement pour l'inversion (Figure III-41) Nous constatons que le choix de la valeur du facteur d'amortissement a une influence notable sur la conductivité identifiée.

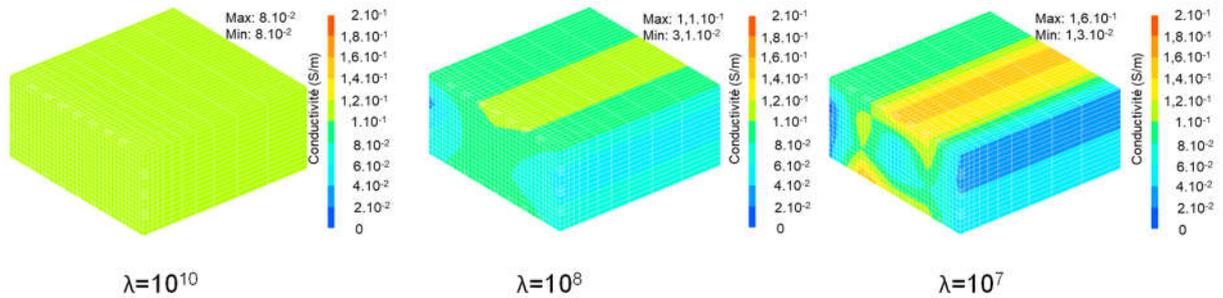


Figure III-41 : Champ de conductivité identifié selon plusieurs valeurs du facteur d'amortissement

Nous proposons donc un facteur d'amortissement 'dynamique' égal à chaque itération à la valeur maximale de la diagonale de la matrice $[J^T J]$. Le champ de conductivité finalement identifié est présenté Figure III-42.

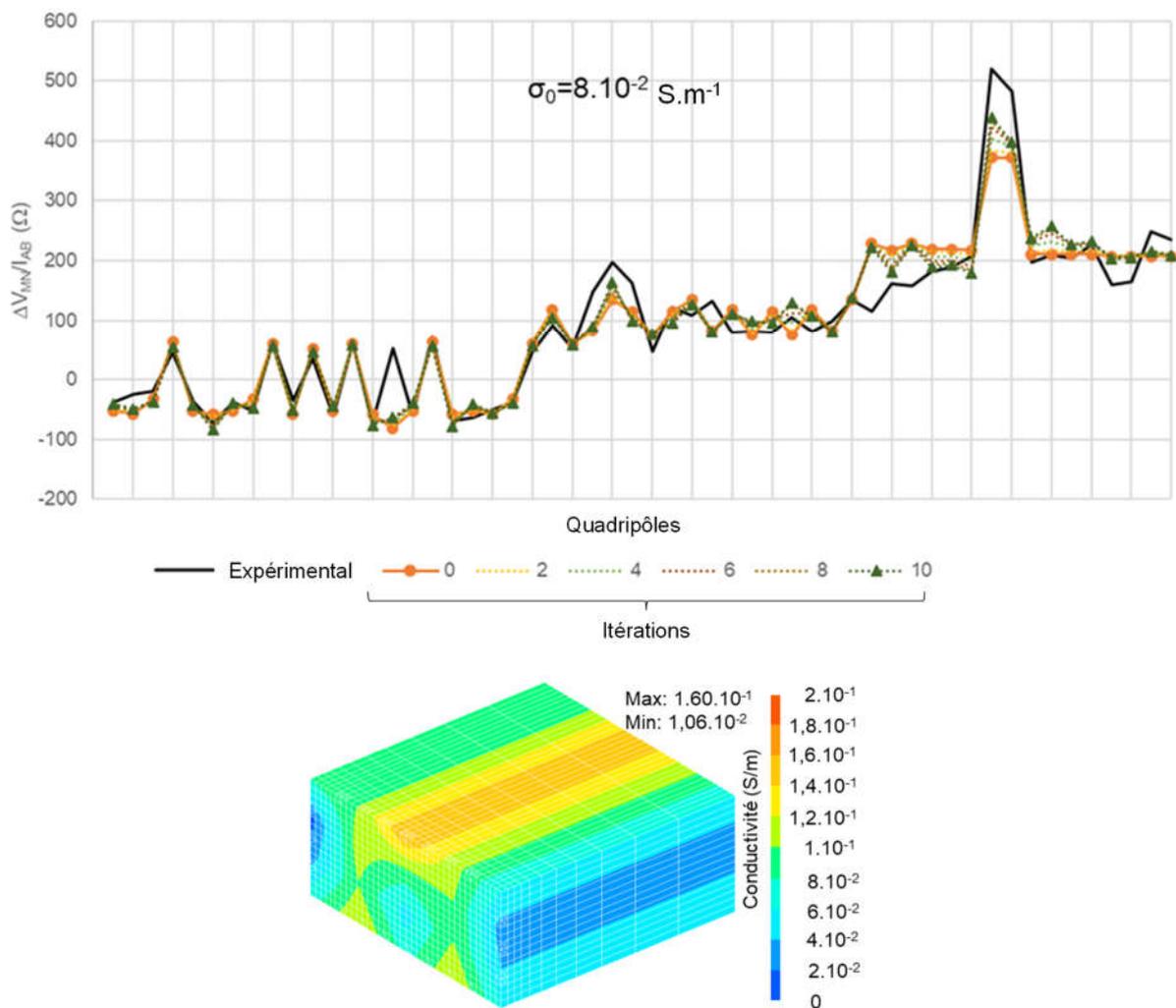


Figure III-42 : Evolution du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ et champ identifié de la conductivité avec $\lambda = \max\{\text{dia}[J^T J]\}$ à itération 10

Nous regardons à présent l'influence de la conductivité homogène initiale avec deux valeurs plus éloignées : $2 \cdot 10^{-2}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ (S/m) afin de confirmer le bon fonctionnement de l'algorithme d'inversion (Figure III-43).

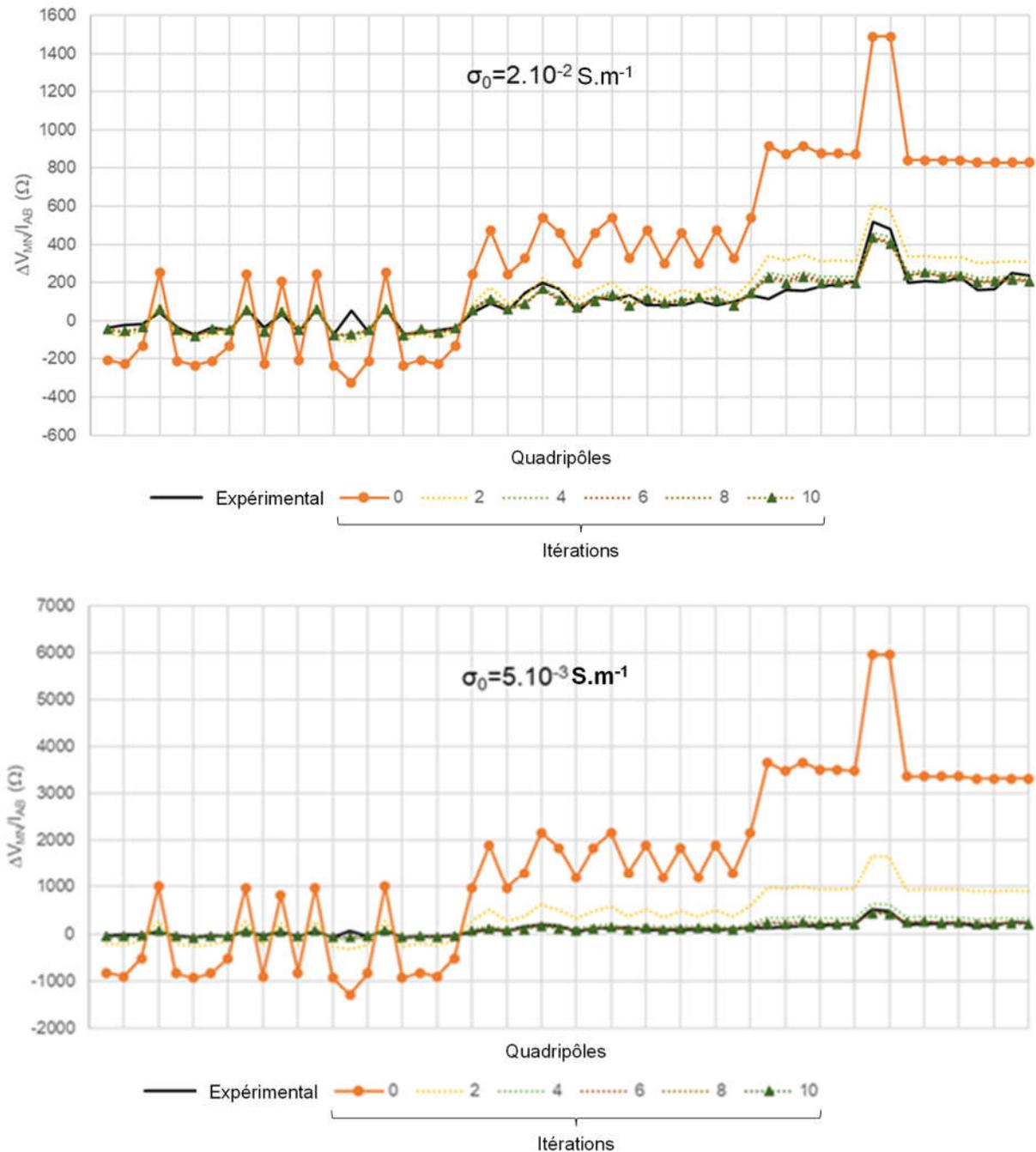


Figure III-43 : Evolution du rapport $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ pour les deux valeurs de conductivités initiales

La teneur en eau moyenne de la brique est estimée à 4.1%. Et la résistivité moyenne identifiée est de $12,4 \Omega \cdot \text{m}$.

Conclusion

Ce travail a développé du calcul direct par éléments finis en optimisant, d'une part, le support éléments finis (finesse du maillage, discrétisation des sondes d'injection de courant) permettant le calcul électrique direct. Également, la transmission des résultats de ce calcul

direct sur un maillage adapté au processus d'inversion a été travaillé. Sur la base des travaux de , notre étude a montré que l'utilisation des nœuds maîtres dans la projection du champ de conductivité donnait des résultats plus satisfaisants, en termes de gradients de conductivité, que la méthode par éléments maîtres développée précédemment.

L'ensemble de l'outil numérique a ensuite été employé pour optimiser les séquences de multiplexage, d'une part en étudiant la pertinence des différents quadripôles employés et, d'autre part en déduisant un choix et une classification de ces quadripôles vis-à-vis des amplitudes de résistivités apparentes mesurées.

En complément des premières mesures expérimentales réalisées au chapitre II dans des conditions hydriques homogènes, une campagne expérimentale a été menée en générant des gradients hydriques par séchage d'une brique de terre crue. Le dispositif expérimental a été défini avec un soin particulier porté sur les méthodes d'intégration des sondes électriques. Dans un premier temps, la modélisation du calcul direct a été menée en employant une simulation numérique du transfert de masse et de chaleur. Ces premiers résultats, comparés aux mesures expérimentales, ont permis de mettre en évidence les difficultés expérimentales liées aux mesures lorsque les lignes de courant traversent des milieux à très faible conductivité induisant des mesures très bruitées en mauvaise concordance avec les prédictions du modèle. Cette étude a permis de mettre en avant d'autres verrous scientifiques liés certainement à l'hétérogénéité du matériau à travers sa densité et la distribution des sites de sorption induisant des hétérogénéités de conductivité que le modèle n'est pas capable de reproduire.

Enfin, l'étude du protocole d'inversion est présentée. Dans le cadre du modèle d'inversion de Levenberg-Marquadt, tout un travail d'optimisation a été mené afin de s'assurer d'une convergence raisonnable de l'algorithme. Ce dernier a été testé sur la base de champs hydriques calculés et se caractérise par un comportement que nous pouvons qualifier de robuste. Par contre, force est de constater que les résultats d'inversion sur la base de mesures expérimentales demeurent aujourd'hui insatisfaisants. Mais cela nous permettra d'émettre des perspectives constructives pour donner une suite à ce travail.

Conclusion

Ce travail de thèse a permis de développer l'ensemble de la chaîne stratégique afin de définir l'état hydrique dans une section transversale d'un matériau hygroscopique employant, comme mesure physique, la tomographie résistive. Si cet outil a été pensé, initialement, pour le monitoring des ouvrages en bois, ce travail s'est focalisé sur une étude de faisabilité employant la terre crue comme matériau 'modèle'. Cette chaîne stratégique est composée de plusieurs mailles, à savoir, la mesure à proprement parler, la modélisation physique des lignes de courant et la déduction des potentiels via l'utilisation de quadripôles et, enfin, une méthode d'analyse inverse reliant mesures et modélisation. Ce travail représente le troisième opus dans cette thématique scientifique initiée par le laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité et a permis de répondre à de nombreuses questions et de nombreux verrous scientifiques mis en avant lors des travaux de thèse de Nguyen en 2017, même si des barrières physiques et matérielles demeurent aujourd'hui ne permettant pas de proposer un outil de terrain opérationnel.

Concernant le modèle physique, une étude paramétrique détaillée a permis de consolider les savoirs sur la méthode de discrétiser, avec efficacité (temps de calcul vs précision des résultats), le milieu par éléments finis en focalisant sur le maillage des sondes d'injection de courant (injection en semi-profondeur ou en surface), en étudiant les effets de bord induits par un milieu fini. Le modèle physique reposant sur une loi d'Ohm en régime établi, les effets d'hétérogénéité, induits par les gradients d'humidité, ont été intégrés dans la modélisation. Ce modèle, en soutien à la mesure expérimentale, a été employé afin d'optimiser l'emplacement des quadripôles afin d'obtenir suffisamment de points de mesure sans alourdir l'expérimentation et le calcul par un multiplexage surabondant.

La mesure expérimentale repose sur l'utilisation du matériel Syscal Junior amélioré, intégrant un système de multiplexage relié à une nappe de connexion pouvant comporter jusqu'à 24 sondes d'injection de courant et de mesure de potentiel, et permettant de lancer des mesures de résistivité apparentes en employant une multitude de combinaisons de couples dipôle-dipôle. Dans un premier temps, toute une étude a été menée pour définir les meilleures méthodes d'implantation des sondes dans le matériau en prenant en compte les risques de pertes de contact induits par les effets de retrait-gonflement du matériau lorsqu'il est sujet à des cinétiques de désorption et d'adsorption. Un important travail de mise au point expérimentale a été réalisé. Des premiers tests d'injection, dans des conditions d'humidité haute, ont permis de mettre en évidence une concordance entre les différentes mesures issues du multiplexage et la modélisation physique via une loi de passage entre humidité interne et résistivité. Ce travail s'est déroulé sur la base d'échantillons de terre crue placés dans un dessiccateur et stabilisés sous différentes humidités relatives. Si ces premiers résultats ont été encourageants à haute humidité relative, ils ont montré cependant des limites physiques ou matérielles dans la mesure, lorsque la teneur en eau devenait trop basse (en deçà de 2% d'humidité interne correspondant à une humidité relative de conditionnement de 40%), ce qui induisait un calcul de résistivité noyé dans le bruit de mesure.

Les méthodes d'inversion développées reposent sur un algorithme itératif permettant d'optimiser des champs de résistivité ou de conductivité calculés par modélisation physique en concordance avec les mesures expérimentales. Le travail a permis de développer des schémas d'inversion basés sur les méthodes de Gauss-Newton et de Levenberg-Marquardt. Une étude d'optimisation du processus de convergence a été menée dans ce travail en aboutissant à une robustesse de l'inversion testée sur des champs de résistivité homogènes et hétérogènes. Afin de dissocier les difficultés liées à la mesure expérimentale,

ce travail de modélisation a été mené sur la base de champs de résistivité calculés. Nous sommes convaincus, aujourd'hui, d'avoir un outil d'inversion opérationnel. En revanche, la performance de l'inversion numérique est contrainte par la qualité de la mesure. Or, nous avons montré que la mesure était perfectible lorsque l'humidité interne était basse, induisant des résistivités très importantes. De ce fait, les derniers résultats mettent en exergue, non seulement, que l'inversion ne converge pas lorsque la mesure est trop bruitée par une résistivité trop grande, mais également que l'inversion ne converge pas dans les zones où l'humidité reste importante. Ce dernier cas peut s'expliquer par le fait que la ligne de courant peut être 'virtuellement' coupée lorsque, ponctuellement, elle traverse une zone trop sèche. Ce dernier constat de relatif échec nous permet cependant de rebondir et de tirer de ce travail (à la fois de modélisation et de mesures expérimentales) plusieurs pistes de valorisation.

Ce travail nous a démontré que l'approche était viable et pertinente pour la mesure de l'humidité interne lorsque le matériau se trouve dans des conditions hydriques élevées. L'ensemble de ce travail devra être valorisé et expérimenté dans le domaine de la surveillance des ouvrages placés en ambiances extérieures sous intempéries. Dans ce contexte, si ces conditions d'emploi ne concernant pas forcément la terre crue, elles peuvent concerner d'autres matériaux hygroscopiques de construction comme le bois. L'ensemble de ce travail pourra, à court terme, être valorisé et appliqué aux travaux de thèse d'Hafsa (2021) en y apportant les acquis concernant l'optimisation du multiplexage et la méthode d'inversion développée et améliorée.

Pour répondre à la difficulté de mettre en œuvre une inversion pertinente lorsque les sections présentent des gradients d'humidité allant de zones humides à des zones sèches, il serait intéressant de développer une méthode hybride incluant des données mesurées, lorsque la résistivité est calculable de façon fiable (au-delà du bruit de mesure) et intégrant des données calculées à partir d'un champ d'humidité issus d'un calcul de transfert de masse ; ce que nous avons employé pour valider la méthode d'inversion avec des champs hétérogènes. Cette approche plus globale permettrait ainsi d'y associer un algorithme d'optimisation des propriétés de diffusion du milieu pour, à plus long terme, proposer du calcul prédictif d'évolution de l'humidité pour prévenir, dans une démarche de diagnostic et de surveillance d'ouvrages, l'apparitions d'avaries (développements biologiques en zones humides et développement de fissures en zones sèches).

Enfin , la méthode d'inversion développée durant ces années de thèse représente un outil robuste qui pourrait être employé pour d'autres méthodes de contrôle non destructif. Faisons, par exemple, référence aux travaux de Zhang (2021). Il a été développé un modèle numérique de propagation d'ondes ultrasonores dans un milieu hétérogène et hygrosensible ainsi qu'une stratégie de mesure permettant de 'balayer' les sections transversales pour prendre en compte l'hétérogénéité matérielle et hydrique du milieu. La méthode d'inversion développée dans ce travail doit pouvoir s'appliquer à cet outil en 'remplaçant' ou en complétant les mesure de résistivité par des mesures de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores. Une démarche semblable pourrait être proposée en employant la méthode de propagation d'ondes électromagnétiques sensible à la teneur en eau du milieu.

Références bibliographiques

- Aalil, I., Beck, K., Brunetaud, X., Cherkaoui, K., Chaaba, A., and Al-Mukhtar, M. (2016). Deterioration analysis of building calcarenite stone in the House of Venus in the archaeological site of Volubilis (Morocco). *Construction and Building Materials* 125, 1127–1141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.005>.
- AASHTO T 358 (2015). Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (Washington, D.C. 20001: American Association of State Highway and Transportation Officials).
- Achchaq, F., Marmoret, L., and Beji, H. (2007). Diffusion de la vapeur d'eau dans un matériau fibreux en condition isotherme. In JITH 2007, J.-J. BEZIAN, ed. (Albi, France: ENSTIMAC), p. 5p.
- Ahn, H.-Y., Lim, H.-D., Ahn, H.-B., and Kim, J.-H. (1993). Electrical resistivity monitoring of simulated piping and hydraulic fracturing within a dam structure. 6. .
- Allinson, D., and Hall, M. (2010). Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings* 42, 845–852. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.005>.
- Al-Omari, A., Beck, K., Brunetaud, X., Török, Á., and Al-Mukhtar, M. (2015). Critical degree of saturation: A control factor of freeze–thaw damage of porous limestones at Castle of Chambord, France. *Engineering Geology* 185, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.018>.
- Andrade, C., and González, J.A. (1978). Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Materials and Corrosion* 29, 515–519. <https://doi.org/10.1002/maco.19780290804>.
- Archie, G.E. (1942). The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Transactions of the AIME* 146, 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>.
- Azarsa, P., and Gupta, R. (2017). Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering* 2017, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>.
- Batayneh, A.T. (2005). 2D Electrical Imaging of an LNAPL Contamination, Al Amiriyya Fuel Station, Jordan. *Journal of Applied Sciences* 5. <https://doi.org/10.3923/jas.2005.52.59>.
- Beck, K., Al-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., and Rautureau, M. (2003). Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire valley—France. *Building and Environment* 38, 1151–1162. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00074-X).
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T., and Hogland, H. (2000). DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. *Environmental Geology* 39, 360–371. <https://doi.org/10.1007/s002540050015>.
- Bhatt, S., and Jain, P.K. (2014). Correlation between electrical resistivity and water content of sand – a statistical approach. 7. .
- Binley, A., Hubbard, S.S., Huisman, J.A., Revil, A., Robinson, D.A., Singha, K., and Slater, L.D. (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface

processes over multiple scales. *Water Resour. Res.* 51, 3837–3866. <https://doi.org/10.1002/2015WR017016>.

Björngrim, N., Hagman, O., and Wang, X. (Alice) (2016). Moisture Content Monitoring of a Timber Footbridge. *BioResources* 11, 3904–3913. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3904-3913>.

Björngrim, N., Fjellström, P.-A., and Hagman, O. (2017). Resistance Measurements to Find High Moisture Content Inclusions Adapted for Large Timber Bridge Cross-Sections. *BioResources* 12, 3570–3582. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3570-3582>.

Blass, J.H., and Carmen, S. (2017). *Timber Engineering - Principles for Design* (KIT Scientific Publishing).

Bottraud, J.C., Bornand, M., and Servat, E. (1984). Mesures de Resistivité et Etude du comportement aronomique d'un sol. 295–308. .

Brischke, C., Rapp, A.O., Bayerbach, R., Morsing, N., Fynholm, P., and Welzbacher, C.R. (2008). Monitoring the “material climate” of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings. *Building and Environment* 43, 1575–1582. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.001>.

Bu, Y., and Weiss, J. (2014). The influence of alkali content on the electrical resistivity and transport properties of cementitious materials. *Cement and Concrete Composites* 51, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.008>.

Bui, Q.-B., Hans, S., Morel, J.-C., and Mollion, V. (2011). Influence of water on the mechanical characteristics of rammed-earth material. (Chianciano Terme, Tuscany, Italy), pp. 565–576.

Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., and Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials* 54, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>.

Butler, J., Roper, T.J., and Clark, A.J. (1994). Investigation of badger (*Meles meles*) setts using soil resistivity measurements. *Journal of Zoology* 232, 409–418. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1994.tb01582.x>.

Campbell, R.B., Bower, C.A., and Richards, L.A. (1949). Change of Electrical Conductivity With Temperature and the Relation of Osmotic Pressure to Electrical Conductivity and Ion Concentration for Soil Extracts¹. *Soil Science Society of America Journal* 13, 66–69. <https://doi.org/10.2136/sssaj1949.036159950013000C0010x>.

Carll, C., and TenWolde, A. (1996). Accuracy of Wood Resistance Sensors for Measurement of Humidity. *J. Test. Eval.* 24, 154. <https://doi.org/10.1520/JTE11296J>.

Carmeliet, J., and Abeele, K.V.D. (2004). Poromechanical approach describing the moisture influence on the non-linear quasi-static and dynamic behaviour of porous building materials. *Materials and Structures* 37, 10. .

Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., Kuras, O., Ford, J.R., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Pennington, C.V.L., Weller, A.L., Hobbs, P.R.N., and Ogilvy, R.D. (2011). Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks, Cleveland Basin, UK. 13. .

Chambers, J.E., Gunn, D.A., Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Haslam, E., Holyoake, S., Kirkham, M., Kuras, O., Merritt, A., and Wragg, J. (2014). 4D electrical resistivity tomography

monitoring of soil moisture dynamics in an operational railway embankment. *Near Surface Geophysics* 12, 61–72. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013002>.

Chen, C.-T., Chang, J.-J., and Yeih, W. (2014). The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. *Construction and Building Materials* 71, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.009>.

Cherblanc, F., Berthonneau, J., Bromblet, P., and Huon, V. (2016). Influence of Water Content on the Mechanical Behaviour of Limestone: Role of the Clay Minerals Content. *Rock Mech Rock Eng* 49, 2033–2042. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0911-y>.

Clark, J.D., and Williams, J.W. (1933). The Electrical Conductivity of Commercial Dielectrics and its Variation with Temperature. *J. Phys. Chem.* 37, 119–131. <https://doi.org/10.1021/j150343a015>.

Colas, E., Mertz, J.D., Thomachot-Schneider, C., Barbin, V., and Rassineux, F. (2011). Influence of the clay coating properties on the dilation behavior of sandstones. *Applied Clay Science* 52, 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.02.026>.

Collet-Foucault, F. (2004). Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux. These de doctorat. Rennes, INSA.

Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Jun Cui, Y., Tabbagh, A., and Charlery, Y. (2006). Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics* 60, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.02.003>.

Coyle, A.T., Spragg, R.P., Suraneni, P., Amir Khanian, A.N., and Weiss, W.J. (2018). Comparison of Linear Temperature Corrections and Activation Energy Temperature Corrections for Electrical Resistivity Measurements of Concrete. *Adv. Civ. Eng. Matls.* 7, 20170135. <https://doi.org/10.1520/ACEM20170135>.

Dahlin, T., Sjö Dahl, P., and Johansson, S. (2008). A guide to resistivity investigation and monitoring of embankment dams (Torleif: Torleif).

Daian, J.-F. (1986). Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux: étude expérimentale du mortier de ciment. Université de Grenoble.

De Carlo, L., Perri, M.T., Caputo, M.C., Deiana, R., Vurro, M., and Cassiani, G. (2013). Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method. *Journal of Applied Geophysics* 98, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.07.010>.

Delgado, M.C.J., and Guerrero, I.C. (2006). Earth building in Spain. *Construction and Building Materials* 20, 679–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006>.

Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., and Winter, S. (2015a). Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *J Civil Struct Health Monit* 5, 115–127. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>.

Dietsch, P., Gamper, A., Merk, M., and Winter, S. (2015b). Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures. *J Civil Struct Health Monit* 5, 153–165. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0083-6>.

Dondi, M., Principi, P., Raimondo, M., and Zanarini, G. (2003). Water vapour permeability of clay bricks. *Construction and Building Materials* 17, 253–258. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00117-4).

- Drain-Josserand, A., Taverdet, J.L., and Vergnaud, J.M. (1989). Modelling the process of moisture absorption in three dimensions by wood samples of various shapes: cubic, parallelepipedic. *Wood Sci. Technol.* 23, 259–271. <https://doi.org/10.1007/BF00367739>.
- El Faycal, F. (2013). Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. Ecole Centrale de Lille.
- Eller, H., and Denoth, A. (1996). A capacitive soil moisture sensor. *Journal of Hydrology* 185, 137–146. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03003-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03003-4).
- Feliu, S., Andrade, C., González, J.A., and Alonso, C. (1996). A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete. *Mat. Struct.* 29, 362–365. <https://doi.org/10.1007/BF02486344>.
- Ferreira, M., and Jalali, S. (2006). Quality control based on electrical resistivity measurements. 8. .
- Forsen, H., and Tarvainen, V. (2000). Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters (VTT Technical Research Centre of Finland).
- Frandsen, P.E., Jonasson, K., Nielsen, H.B., and Tingleff, O. (2004). Unconstrained Optimization.
- Franke, B., Franke, S., Müller, A., Vogel, M., Scharmacher, F., and Tannert, T. (2013). Long Term Monitoring of Timber Bridges - Assessment and Results. *AMR* 778, 749–756. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.749>.
- Franzen, C., and Mirwald, P.W. (2004). Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity. *Env Geol* 46. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1040-1>.
- Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., and Taya, N. (1999). The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology* 54, 43–53. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00060-5).
- Gardner, C.M.K., Dean, T.J., and Cooper, J.D. (1998). Soil Water Content Measurement with a High-Frequency Capacitance Sensor. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71, 395–403. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0338>.
- Garzon, A.J., Sanchez, J., Andrade, C., Rebolledo, N., Menéndez, E., and Fullera, J. (2014). Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars. *Cement and Concrete Composites* 53, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013>.
- Ghosh, P., and Tran, Q. (2015). Influence of parameters on surface resistivity of concrete. *Cement and Concrete Composites* 62, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.06.003>.
- Giao, P.H., Chung, S.G., Kim, D.Y., and Tanaka, H. (2003). Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics* 52, 157–175. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(03\)00002-8](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(03)00002-8).
- Gjorv, O.E. (2013). Durability design and quality assurance of major concrete infrastructure. *Advances in Concrete Construction* 1, 45–63. <https://doi.org/10.12989/ACC.2013.1.1.045>.

- Glass, S.V., and Zelinka, S.L. (2010). Physical Properties and Moisture Relations of Wood. In *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, (Madison, Wisconsin: CreateSpace Independent Publishing Platform; Centennial edition), p.
- Gowers, K.R., and Millard, S.G. (1999). Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique. *MJ* 96. <https://doi.org/10.14359/655>.
- Goyal, V.C., GUPTA, P.K., SETH, S.M., and SINGH, V.N. (1996). Estimation of temporal changes in soil moisture using resistivity method. 8. .
- Guillaud, H., and Houben, H. (2015). *Traité de construction en terre* (Marseille: Parenthèses).
- Guitard, D. (1987). *Mécanique du matériau bois & composites* (Cépaduès).
- Güneyisi, E., Özturan, T., and Gesoğlu, M. (2005). A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions. *Cement and Concrete Composites* 27, 449–461. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.05.006>.
- Gunn, D.A., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Dijkstra, T.A., Haslam, E., Kirkham, M., Wragg, J., Holyoake, S., et al. (2015). Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials* 92, 82–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.007>.
- Hall, M., and Allinson, D. (2009). Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering* 29, 740–747. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.03.051>.
- Hartley, J., and Marchant, J. (1995). *Methods of Determining the Moisture Content of Wood* (State Forests of New South Wales).
- Hassine, M.A., Beck, K., Brunetaud, X., and Al-Mukhtar, M. (2018). Use of electrical resistance measurement to assess the water saturation profile in porous limestones during capillary imbibition. *Construction and Building Materials* 165, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.238>.
- Hen-Jones, R.M., Hughes, P.N., Stirling, R.A., Glendinning, S., Chambers, J.E., Gunn, D.A., and Cui, Y.J. (2017). Seasonal effects on geophysical–geotechnical relationships and their implications for electrical resistivity tomography monitoring of slopes. *Acta Geotech.* 12, 1159–1173. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0523-7>.
- Hesse, A., Jolivet, A., and Tabbagh, A. (1986). New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. *GEOPHYSICS* 51, 585–594. <https://doi.org/10.1190/1.1442113>.
- Hola, A., Matkowski, Z., and Hola, J. (2017). Analysis of the Moisture Content of Masonry Walls in Historical Buildings Using the Basement of a Medieval Town Hall as an Example. *Procedia Engineering* 172, 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.041>.
- Hola, J., Matkowski, Z., Schabowicz, K., Sikora, J., Nita, K., and Wójtowicz, S. (2012). Identification of moisture content in brick walls by means of impedance tomography. *COMPEL* 31, 1774–1792. <https://doi.org/10.1108/03321641211267119>.
- Hornbostel, K., Larsen, C.K., and Geiker, M.R. (2013). Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. *Cement and Concrete Composites* 39, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019>.

ISO 8301 (1991). Isolation thermique. Détermination de la résistance thermique et des propriétés connexes en régime stationnaire. Méthode fluxmétrique.

James, W.L. (1963). Electric moisture meters for wood (Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory).

Julio-Betancourt, G.A., and Hooton, R.D. (2004). Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes. *Cement and Concrete Research* 34, 1007–1015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.012>.

Karhunen, K., Seppänen, A., Lehtikoinen, A., Monteiro, P.J.M., and Kaipio, J.P. (2010a). Electrical Resistance Tomography imaging of concrete. *Cement and Concrete Research* 40, 137–145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.023>.

Karhunen, K., Seppänen, A., Lehtikoinen, A., Blunt, J., Kaipio, J.P., and Monteiro, P.J.M. (2010b). Electrical Resistance Tomography for Assessment of Cracks in Concrete. *MJ* 107. <https://doi.org/10.14359/51663973>.

Kasal, B., and Lear, G. (2011). Moisture measurement. In *In Situ Assessment of Structural Timber*, (Dordrecht: Springer Netherlands), p.

Kloppmann, W., Bromblet, P., Vallet, J.M., Vergès-Belmin, V., Rolland, O., Guerrot, C., and Gosselin, C. (2011). Building materials as intrinsic sources of sulphate: A hidden face of salt weathering of historical monuments investigated through multi-isotope tracing (B, O, S). *Science of The Total Environment* 409, 1658–1669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.008>.

Koda, E., Tkaczyk, A., Lech, M., and Osiński, P. (2017). Application of Electrical Resistivity Data Sets for the Evaluation of the Pollution Concentration Level within Landfill Subsoil. *Applied Sciences* 7, 262. <https://doi.org/10.3390/app7030262>.

Kollmann, F.F.P., and Côté, W.A. (1968). *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).

Kowalczyk, S., Zawrzykraj, P., and Mieszkowski, R. (2015). Application of electrical resistivity tomography in assessing complex soil conditions. *GQ* 59. <https://doi.org/10.7306/gq.1172>.

Krus, M., and Holm, A. (1999). Simple Methods to approximate the liquid transport coefficients describing the absorption and drying. 8. .

Künzel, H.M. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters* (Stuttgart: IRB Verlag).

Lamotte, M., Bruand, A., Dabas, M., Donfack, P., Gabalda, G., Hesse, A., Humbel, F.X., and Robain, H. (1994). Distribution d'un horizon à forte cohésion au sein d'une couverture de sol aride du Nord-Cameroun : apport d'une prospection électrique (Distribution of hardpan in soil cover of arid zones. Data from a geoelectrical survey in northern Cameroon). 11. .

Laou, L. (2017). *Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermohydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation*. Theses. Université de Limoges.

Laou, L., Aubert, J.E., Yotte, S., Maillard, P., and Ulmet, L. (2021). Hygroscopic and mechanical behaviour of earth bricks. *Mater Struct* 54, 116. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01701-1>.

- Lataste, J.F., Sirieix, C., Breyse, D., and Frappa, M. (2003). Electrical resistivity measurement applied to cracking assessment on reinforced concrete structures in civil engineering. *NDT & E International* 36, 383–394. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00013-6).
- Laurent, J.-P. (1987). Propriétés thermiques du matériau terre. *Cahiers Du CSTB Cahier 2156*, 17 pages. .
- Layssi, H., Ghods, P., Alizadeh, A.R., and Salehi, M. (2015). Electrical Resistivity of Concrete. 7. .
- Lech, M., Fronczyk, J., Radziemska, M., Sieczka, A., Garbulewski, K., Koda, E., and Lechowics, Z. (2016). Monitoring of total dissolved solids on agricultural lands using electrical conductivity measurements. *Appl Ecol Env Res* 14, 285–295. https://doi.org/10.15666/aeer/1404_285295.
- Lech, M., Skutnik, Z., Bajda, M., and Markowska-Lech, K. (2020). Applications of Electrical Resistivity Surveys in Solving Selected Geotechnical and Environmental Problems. *Applied Sciences* 10, 2263. <https://doi.org/10.3390/app10072263>.
- Lecieux, Y., Schoefs, F., Bonnet, S., Lecieux, T., and Lopes, S.P. (2015). Quantification and uncertainty analysis of a structural monitoring device: detection of chloride in concrete using DC electrical resistivity measurement. *Nondestructive Testing and Evaluation* 30, 216–232. <https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1029476>.
- León y León, C.A. (1998). New perspectives in mercury porosimetry. *Advances in Colloid and Interface Science* 76–77, 341–372. [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(98\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00052-9).
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics* 2, 164–168. <https://doi.org/10.1090/qam/10666>.
- Li, H., Perrin, M., Eyma, F., Jacob, X., and Gibiat, V. (2018). Moisture content monitoring in glulam structures by embedded sensors via electrical methods. *Wood Sci Technol* 52, 733–752. <https://doi.org/10.1007/s00226-018-0989-y>.
- Lim, Y.-C., Noguchi, T., and Lee, H.-S. (2009). Mathematical Modeling for Corrosion Environment Estimation Based on Concrete Resistivity Measurement Directly above Reinforcement. *ISIJ Int.* 49, 92–99. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.92>.
- Lim, Y.-C., Noguchi, T., and Cho, C.-G. (2015). A quantitative analysis of the geometric effects of reinforcement in concrete resistivity measurement above reinforcement. *Construction and Building Materials* 83, 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.045>.
- Lim, Y.-C., Noguchi, T., and Cho, C.-G. (2018). Mathematical modeling for quantitative estimation of geometric effects of nearby rebar in electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Composites* 90, 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.013>.
- Loke, M.H. (2000). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys.
- Loke, M.H. (2001). Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 129. .
- Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., and Wilkinson, P.B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95, 135–156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>.

- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press).
- Luo, Z., Guan, H., and Zhang, X. (2019). The temperature effect and correction models for using electrical resistivity to estimate wood moisture variations. *Journal of Hydrology* 578, 124022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124022>.
- Madsen, K., Nielsen, H.B., and Tingleff, O. (2004). *Methods for Non-Linear Least Squares Problems* (Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark).
- Maillard, P., and Aubert, J.E. (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials* 63, 56–61. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>.
- Manfoumbi Boussougou, N. (2012). Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement.
- Marescot, L. (2004). Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis. Université de Nantes & Université de Lausanne.
- Marescot, L. (2008). Imagerie électrique pour géologues. 73. .
- Marquardt, D.W. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* 11, 431–441. .
- Martinho, E., and Dionísio, A. (2014). Main geophysical techniques used for non-destructive evaluation in cultural built heritage: a review. *J. Geophys. Eng.* 11, 053001. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/11/5/053001>.
- McCarter, W.J. (1984). The electrical resistivity characteristics of compacted clays. *Géotechnique* 34, 263–267. <https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.2.263>.
- McCarter, W.J., Starrs, G., Kandasami, S., Jones, R., and Chrisp, M. (2009). Electrode Configurations for Resistivity Measurements on Concrete. *MJ* 106. <https://doi.org/10.14359/56550>.
- Medjelekh, D. (2015). Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygroscopiques. Génie civil /Architecture Bioclimatique. Université de Limoges & Université de Constantine 3.
- Medjelekh, D., Ulmet, L., Gouny, F., Fouchal, F., Nait-Ali, B., Maillard, P., and Dubois, F. (2016). Characterization of the coupled hygrothermal behavior of unfired clay masonries: Numerical and experimental aspects. *Building and Environment* 110, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.037>.
- Merakeb, S. (2006). Couplage hygromécanique dans le processus de diffusion dans le bois.
- Merritt, A.J., Chambers, J.E., Murphy, W., Wilkinson, P.B., West, L.J., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Kirkham, M., and Dixon, N. (2013). 3D ground model development for an active landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods. *Landslides* 11, 537–550. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0409-1>.
- Michot, D., Dorigny, A., and Benderitter, Y. (2001). Mise en évidence par résistivité électrique des écoulements préférentiels et de l'assèchement par le maïs d'un CALCISOL de Beauce

irrigué. *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 332, 29–36. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)01498-1](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01498-1).

Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoulaud, B., King, D., and Tabbagh, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography: SOIL WATER STUDY USING ELECTRICAL RESISTIVITY. *Water Resour. Res.* 39. <https://doi.org/10.1029/2002WR001581>.

Minke, G. (2013). *Building With Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture* (Birkhäuser).

Moevus, M., Anger, R., and Fontaine, L. (2012). Hygro-thermo-mechanical properties of earthen materials for construction: a literature review. In *Terra 2012, XIth International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage*, (Lima, Peru), p.

Mondelli, G., Giacheti, H., and Elis, V. (2010). The Use of Resistivity for Detecting MSW Contamination Plumes in a Tropical Soil Site.

Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., and Walker, P. (2001). Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36, 1119–1126. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8).

Morris, W., Moreno, E.I., and Sagüés, A.A. (1996). Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe. *Cement and Concrete Research* 26, 1779–1787. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00175-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00175-5).

NF EN 1745 (2020). *Maçonnerie et éléments de maçonnerie — Méthodes pour la détermination des propriétés thermiques*.

NF EN 13183-2 (2002). *Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : Estimation par méthode électrique par résistance*.

NF EN 13183-3 (2005). *Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 3 : Estimation par méthode capacitive*.

NF EN ISO 12571 (2013). *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique*.

NF EN ISO 12572 (2016). *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau - Méthode de la coupelle*.

NF EN ISO 15148 (2003). *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination du coefficient d'absorption d'eau par immersion partielle*.

Nguyen, T.A. (2014). *Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois*. PhD Thesis. Limoges.

Nguyen, A.Q., Klysz, G., Deby, F., and Balayssac, J.P. (2018). Assessment of the electrochemical state of steel reinforcement in water saturated concrete by resistivity measurement. *Construction and Building Materials* 171, 455–466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.155>.

Nguyen, V.G., Nguyen, B.D., Le, N.T., and Hida, N. (2013). Geophysical techniques to aquifer locating and monitoring for industrial zones in North Hanoi, Vietnam. *Acta Geophys.* 61, 1573–1597. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0147-8>.

- Nielsen, H.B. (1999). Damping parameter in Marquardt's method. . . Introduction 16. .
- Niemz, P., and Mannes, D. (2012). Non-destructive testing of wood and wood-based materials. *Journal of Cultural Heritage* 13, S26–S34. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.001>.
- Noborio, K. (2001). Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 31, 213–237. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00184-8).
- Norberg, P. (2000). Monitoring wood moisture content using the WETCORR method - Part 2: Calibration and validation. 6. .
- Nowroozi, A.A., Horrocks, S.B., and Henderson, P. (1999). Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics* 42, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00004-X).
- Ochs, J., and Klitzsch, N. (2020). Considerations regarding small-scale surface and borehole-to-surface electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics* 172, 103862. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103862>.
- Osterminski, K., Polder, R.B., and Schiessl, P. (2012). Long term behaviour of the resistivity of concrete. 20. .
- Palacky, G.J. (1987). Clay mapping using electromagnetic methods. FB 5. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.1987015>.
- Pavlík, Z., Žumár, J., Medved, I., and Černý, R. (2012). Water Vapor Adsorption in Porous Building Materials: Experimental Measurement and Theoretical Analysis. *Transp Porous Med* 91, 939–954. <https://doi.org/10.1007/s11242-011-9884-9>.
- Perrone, A., Lapenna, V., and Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews* 135, 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.002>.
- du Plooy, R., Palma Lopes, S., Villain, G., and Dérobert, X. (2013). Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT & E International* 54, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.11.007>.
- Polder, R.B. (2001). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation. *Construction and Building Materials* 15, 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1).
- Polder, R.B. (2009). Critical chloride content for reinforced concrete and its relationship to concrete resistivity. *Materials and Corrosion* 60, 623–630. <https://doi.org/10.1002/maco.200905302>.
- Polder, R.B., and Peelen, W.H.A. (2002). Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. *Cement and Concrete Composites* 24, 427–435. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00074-9).
- Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, Ø., Gulikers, J., Weidert, R., and Raupach, M. (2000). Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Mat. Struct.* 33, 603–611. <https://doi.org/10.1007/BF02480599>.

Pousette, A., and Fjellström, P.-A. (2016). Experiences from timber bridge inspections in Sweden – examples of influence of moisture (SP Sveriges Tekniska Forsknings Institut).

Presuel-Moreno, F., Liu, Y., and Wu, Y.-Y. (2013). Numerical modeling of the effects of rebar presence and/or multilayered concrete resistivity on the apparent resistivity measured via the Wenner method. *Construction and Building Materials* 48, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.053>.

Priou, J., Lecieux, Y., Chevreuil, M., Gaillard, V., and Lupi, C. (2018). Mesure de résistivité in-situ dans un ouvrage en béton armé avec un capteur Wenner noyé. 5. .

Raimondo, M., Dondi, M., Mazzanti, F., Stefanizzi, P., and Bondi, P. (2007). Equilibrium moisture content of clay bricks: The influence of the porous structure. *Building and Environment* 42, 926–932. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.017>.

Rajabipour, F., and Weiss, J. (2007). Electrical conductivity of drying cement paste. *Mater Struct* 40, 1143–1160. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9211-z>.

Ramezaniapour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., and Moodi, F. (2011). Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength. *Construction and Building Materials* 25, 2472–2479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.069>.

Ranganathan, A. (2004). The Levenberg-Marquardt Algorithm. 5. .

Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK: John Wiley & Sons, Ltd).

Rhoades, J.D., Raats, P.A.C., and Prather, R.J. (1976). Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 40, 651–655. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000050017x>.

Robain, H., Descloitres, M., Ritz, M., and Atangana, Q.Y. (1996). A multiscale electrical survey of a lateritic soil system in the rain forest of Cameroon. *Journal of Applied Geophysics* 34, 237–253. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)00023-2).

Rouquerol, J., Avnir, D., Fairbridge, C.W., Everett, D.H., Haynes, J.M., Pernicone, N., Ramsay, J.D.F., Sing, K.S.W., and Unger, K.K. (1994). Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). *Pure and Applied Chemistry* 66, 1739–1758. <https://doi.org/10.1351/pac199466081739>.

Rozenbaum, O., Anne, S., and Rouet, J.-L. (2014). Modification and modeling of water ingress in limestone after application of a biocalcification treatment. *Construction and Building Materials* 70, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.038>.

Russell, E.J.F., and Barker, R.D. (2010). Electrical properties of clay in relation to moisture loss. *Near Surface Geophysics* 8, 173–180. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2010001>.

Rymarczyk, T., Kłosowski, G., and Kozłowski, E. (2018a). A Non-Destructive System Based on Electrical Tomography and Machine Learning to Analyze the Moisture of Buildings. *Sensors* 18, 2285. <https://doi.org/10.3390/s18072285>.

Rymarczyk, T., Tchórzewski, P., and Sikora, J. (2018b). Detect Dampness in Building Walls by Solving the Inverse Problem in Electrical Impedance Tomography. 9. .

Rymarczyk, T., Szumowski, J., Adamkiewicz, P., Tchorzewski, P., and Sikora, J. (2018c). Moisture Wall Inspection Using Electrical Tomography Measurements. *ELECTROTECHNICAL REVIEW* 1, 99–102. <https://doi.org/10.15199/48.2018.01.25>.

Sabbağ, N., and Uyanık, O. (2018). Determination of the reinforced concrete strength by apparent resistivity depending on the curing conditions. *Journal of Applied Geophysics* 155, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.03.007>.

Sadowski, Ł. (2010). New non-destructive method for linear polarisation resistance corrosion rate measurement. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 10, 109–116. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60053-3](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60053-3).

Saheb, M., Chabas, A., Mertz, J.-D., Colas, E., Rozenbaum, O., Sizun, J.-P., Nowak, S., Gentaz, L., and Verney-Carron, A. (2016). Weathering of limestone after several decades in an urban environment. *Corrosion Science* 111, 742–752. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.06.015>.

Salehi, M., Ghods, P., and Burkan Isgor, O. (2016). Numerical investigation of the role of embedded reinforcement mesh on electrical resistivity measurements of concrete using the Wenner probe technique. *Mater Struct* 49, 301–316. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0498-x>.

Samouëlian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., and Bruand, A. (2003). Electrical Resistivity Imaging for Detecting Soil Cracking at the Centimetric Scale. *Soil Science Society of America Journal* 67, 1319. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1319>.

Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., and Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83, 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>.

Sanchez, J., Andrade, C., Torres, J., Rebolledo, N., and Fullea, J. (2017). Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements. *Mater Struct* 50, 41. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0884-7>.

Sandoz, J.L. (1993). Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology* 27. <https://doi.org/10.1007/BF00192223>.

Sass, O. (2005). Rock moisture measurements: techniques, results, and implications for weathering. *Earth Surf. Process. Landforms* 30, 359–374. <https://doi.org/10.1002/esp.1214>.

Sass, O., and Viles, H.A. (2006). How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls. *Journal of Cultural Heritage* 7, 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.08.001>.

Sass, O., and Viles, H.A. (2010). Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK. *Journal of Applied Geophysics* 70, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.11.006>.

Shevnin, V., Mousatov, A., Ryjov, A., and Delgado-Rodriguez, O. (2007). Estimation of clay content in soil based on resistivity modelling and laboratory measurements. *Geophysical Prospecting* 11. .

Siau, J.F. (1984). *Transport Processes in Wood* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).

Siegesmund, S., Snethlage, R., Brimblecombe, P., Charola, A.E., Dürrast, H., Siedel, H., Siegesmund, S., Snethlage, R., Steiger, M., Sterflinger, K., et al. (2011). *Stone in architecture: properties, durability* (Berlin: Springer).

Simpson, W.T. (1993). Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*). *Wood Sci. Technol.* 27. <https://doi.org/10.1007/BF00193863>.

Simpson, W., and TenWolde, A. (1999). Physical Properties and Moisture Relations of Wood. In *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material.*, p.

Sjödahl, P. (2006). Resistivity investigation and monitoring for detection of internal erosion and anomalous seepage in embankment dams.

Sjödahl, P., Dahlin, T., Johansson, S., and Loke, M.H. (2008). Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. *Journal of Applied Geophysics* 65, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.07.003>.

Sjödahl, P., Dahlin, T., and Johansson, S. (2009). Embankment Dam Seepage Evaluation from Resistivity Monitoring Data. *Near Surface Geophysics* 7, 463–474. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20146268>.

Sjödahl, P., Dahlin, T., and Johansson, S. (2010). Using the resistivity method for leakage detection in a blind test at the Røssvatn embankment dam test facility in Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 69, 643–658. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0314-y>.

Skaar, C. (1988). *Wood-Water Relations* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg).

Smyl, D. (2020). Electrical tomography for characterizing transport properties in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials* 244, 118299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118299>.

Sommers, L.E., Gilmour, C.M., Wildung, R.E., and Beck, S.M. (2015). The Effect of Water Potential on Decomposition Processes in Soils. In *SSSA Special Publications*, J.F. Parr, W.R. Gardner, and L.F. Elliott, eds. (Madison, WI, USA: Soil Science Society of America), pp. 97–117.

Souffaché, B., Kessouri, P., Blanc, P., Thiesson, J., and Tabbagh, A. (2016). First Investigations of In Situ Electrical Properties of Limestone Blocks of Ancient Monuments: Limestone blocks of ancient monuments. *Archaeometry* 58, 705–721. <https://doi.org/10.1111/arcm.12204>.

Spragg, R., Villani, C., Snyder, K., Bentz, D., Bullard, J.W., and Weiss, J. (2013a). Factors that Influence Electrical Resistivity Measurements in Cementitious Systems. *Transportation Research Record* 2342, 90–98. <https://doi.org/10.3141/2342-11>.

Spragg, R., Bu, Y., Snyder, K., Bentz, D., and Weiss, J. (2013b). *Electrical Testing of Cement-Based Materials: Role of Testing Techniques, Sample Conditioning* (Purdue University).

Spragg, R., Qiao, C., Barrett, T., and Weiss, J. (2016). Assessing a concrete's resistance to chloride ion ingress using the formation factor. In *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, (Elsevier), pp. 211–238.

Spragg, R., Jones, S., Bu, Y., Lu, Y., Bentz, D., Snyder, K., and Weiss, J. (2017). Leaching of conductive species: Implications to measurements of electrical resistivity. *Cement and Concrete Composites* 79, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.003>.

Stamm, A.J. (1927). The Electrical Resistance of Wood as a Measure of Its Moisture Content. *Ind. Eng. Chem.* 19, 1021–1025. <https://doi.org/10.1021/ie50213a022>.

Stamm, A.J. (1929). The fiber-saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.* 1, 94–97. <https://doi.org/10.1021/ac50066a021>.

SYSCAL SWITCH (V 11.5++) (2005). Résistivimètre à commutation de tension automatique et à commutation d'électrodes intégrée (IRIS INSTRUMENTS).

Trappe, J., and Kneisel, C. (2019). Geophysical and Sedimentological Investigations of Peatlands for the Assessment of Lithology and Subsurface Water Pathways. *Geosciences* 9, 118. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030118>.

Van Dam, J.C., and Meulenkaamp, J.J. (1967). Some results of the geo-electrical resistivity method in ground water investigation in the Netherlands*. *Geophys Prospect* 15, 92–115. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1967.tb01775.x>.

Verdet, C., Sirieix, C., Anguy, Y., Clément, R., and Gaborieau, C. (2017). Influence de l'enfoncement des électrodes sur un profil de Tomographie de Résistivité Electrique.

Verdet, C., Sirieix, C., Anguy, Y., Gaborieau, C., and Clément, R. (2020). Étude et correction de l'effet des électrodes pour les mesures TRE à petite échelle et application. *Academic Journal of Civil Engineering* 38, 68–71. .

Voss, A., Hosseini, P., Pour-Ghaz, M., Vauhkonen, M., and Seppänen, A. (2019). Three-dimensional electrical capacitance tomography – A tool for characterizing moisture transport properties of cement-based materials. *Materials & Design* 181, 107967. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107967>.

Walbert, C. (2015). Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti: étude du comportement hydromécanique. *Matériaux*. Cergy Pontoise.

Ward, S.H. (1987). Electrical Methods in Geophysical Prospecting. In *Geophysics - Field Measurements*, (Elsevier), pp. 265–375.

Waxman, M.H., and Smits, L.J.M. (1968). Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands. *Society of Petroleum Engineers Journal* 8, 107–122. <https://doi.org/10.2118/1863-A>.

Weiss, J., Snyder, K., Bullard, J., and Bentz, D. (2013). Using a Saturation Function to Interpret the Electrical Properties of Partially Saturated Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 1097–1106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000549](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000549).

Xiao, L., and Li, Z. (2008). Early-age hydration of fresh concrete monitored by non-contact electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Research* 38, 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.027>.

Xiao, L., Li, Z., and Wei, X. (2007). Selection of superplasticizer in concrete mix design by measuring the early electrical resistivities of pastes. *Cement and Concrete Composites* 29, 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.015>.

Yamakawa, Y., Kosugi, K., Masaoka, N., Sumida, J., Tani, M., and Mizuyama, T. (2012). Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered

granitic hillslope. *Geomorphology* 145–146, 56–69.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.035>.

Yaramanci, U. (2000). Geoelectric exploration and monitoring in rock salt for the safety assessment of underground waste disposal sites. *Journal of Applied Geophysics* 44, 181–196.
[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00013-0).

Zhang, X. (2021). Surveillance et Auscultation des Ouvrages en bois par Identification des Champs Hydrique et Mécanique: Couplage des Méthodes Acoustiques et Electromagnétiques. phdthesis. Université de Limoges.

Zhang, J., and Li, Z. (2009). Application of GEM Equation in Microstructure Characterization of Cement-Based Materials. *J. Mater. Civ. Eng.* 21, 648–656.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:11\(648\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:11(648)).

Zhang, W., and Zhang, Y. (2017). Apparatus for monitoring the resistivity of the hydration of cement cured at high temperature. *Instrumentation Science & Technology* 45, 151–162.
<https://doi.org/10.1080/10739149.2016.1210635>.

Zohdy, A.A.R., Eaton, G.P., and Mabey, D.R. (1974). Application of surface geophysics to ground-water investigations. In *Collection of Environmental Data*, p. 66.

Annexes

Annexe 1. Caractéristiques de la Brique de terre crue	154
Annexe 1.1. Caractérisations structurales et physico-chimiques	154
Annexe 1.2. Caractérisation des propriétés thermo-hydriques	156
Annexe 2. Modèle hygrothermique	161
Annexe 2.1. Présentation du modèle hygrothermique	161
Annexe 2.2. Modélisation de la phase de séchage de la brique	161
Annexe 3. Multiplexage de 136 quadripôles pour cube en ceinturage.....	165

Annexe 1. Caractéristiques de la Brique de terre crue

Annexe 1.1. Caractérisations structurales et physico-chimiques

La brique de terre crue considérée, issue d'une briqueterie du Sud-Ouest de la France est une des deux types étudiées par Laou (2017). Elle est façonnée par extrusion sous vide d'air : le mélange est poussé à travers une filière sous forme d'une carotte continue à section rectangulaire à l'aide d'une vis sans fin. La brique a été extrudée suivant le sens de sa hauteur posée (Figure A 1). Ce processus d'extrusion génère une certaine anisotropie liée à l'orientation des plaques d'argile. Cela provoque donc une différence des propriétés hydriques, thermiques et mécaniques suivant deux sens distincts : le sens perpendiculaire et le sens parallèle à la direction d'extrusion.

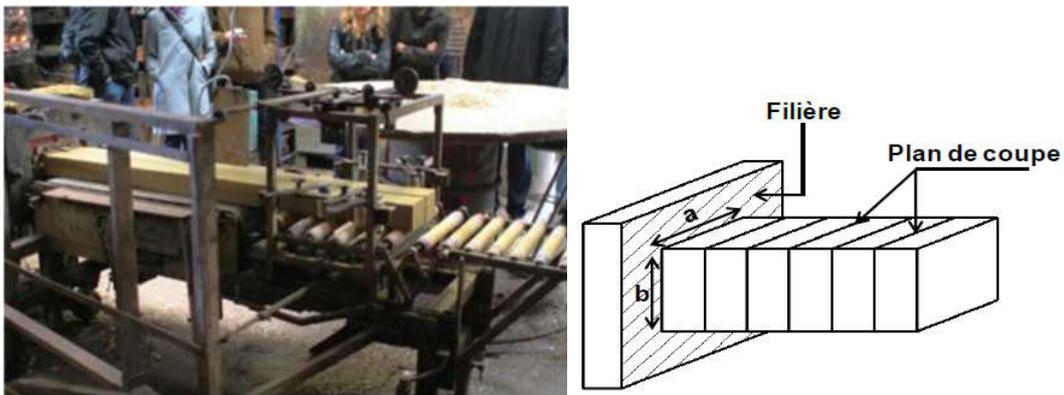


Figure A 1 : Façonnage de la brique, sens d'extrusion et plan de coupe

La composition minéralogique de la brique a été définie qualitativement par diffraction des rayons X (DRX) en se fondant sur l'interaction entre les rayons X et la matière (**Error! Reference source not found.**)

La composition chimique est déterminée par l'analyse chimique issue des données de fluorescence X réalisée au Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction à Clamart. Les pourcentages massiques d'oxyde de brique sont reportés dans le Tableau A 1, ainsi que la perte au feu correspondant à la perte de masse des échantillons après une calcination à 1050 °C.

Tableau A 1 : Compositions chimiques des mélanges utilisés dans la fabrication de brique

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₃	Perte au feu à 1050 °C	TOTAL
47,2%	13,6%	13,0%	5,6%	2,3%	2,3%	0,7%	0,3%	0,1%	15,6%	100%

La brique est observée et analysée par un microscope électronique à balayage jusqu'à l'échelle nanométrique qui montre une organisation hétérogène assez dense des grains (Figure A 2) grâce à la fabrication sous vide d'air. La masse volumique de 2200 kg/m³ se révèle assez comparable à celles de la terre cuite et du béton plein lourd, qui sont respectivement de 2100 kg/m³ et de 2300 kg/m³.

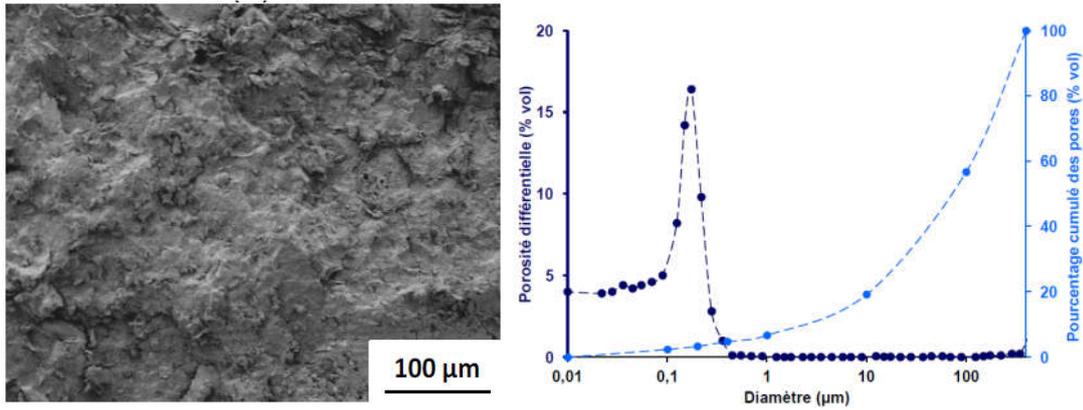


Figure A 2 : Morphologie et taille des particules argileuses de la brique et distributions en taille des pores.

La plasticité est définie par les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité. Le Tableau A 2 reporte les valeurs des indicateurs qui montrent la plasticité moyenne de cette brique.

Tableau A 2 : Limites d'Atterberg et indice de plasticité à 400 µm

Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	Indice de plasticité I_P (%)
42,9	20,0	22,9

La valeur au bleu de méthylène VBS détermine la surface totale d'échange ionique entre la fraction argileuse et les molécules du bleu méthylène. La surface spécifique caractérisant les phénomènes de retrait/ gonflement et la capacité d'absorption est obtenue à partir des essais au bleu de méthylène et de porosimètre à mercure, Tableau A 3.

Tableau A 3 : Surface spécifiques obtenues par différentes techniques.

Surface spécifiques – VBS (m^2/g)	Surface spécifiques – Porosimètre (m^2/g)
11	10

La porosité volumique différentielle et le pourcentage cumulé de tailles de la brique sont représentés sur la Figure A 2. La porosité totale est de 20,8%.

La courbe granulométrique présentée à la Figure A 3 montre une bonne gradation et une grande proportion de particules fines. Avec la fraction limoneuse de 42,8%, d'argiles de 46,6% et de sable de 10,6%, la brique est classifiée selon l'abaque triangulaire de Taylor dont chaque sommet représente un des trois éléments : argile (<2 µm), limon (2 ÷ 50 µm) et sable (>50 µm) (Figure A 3)

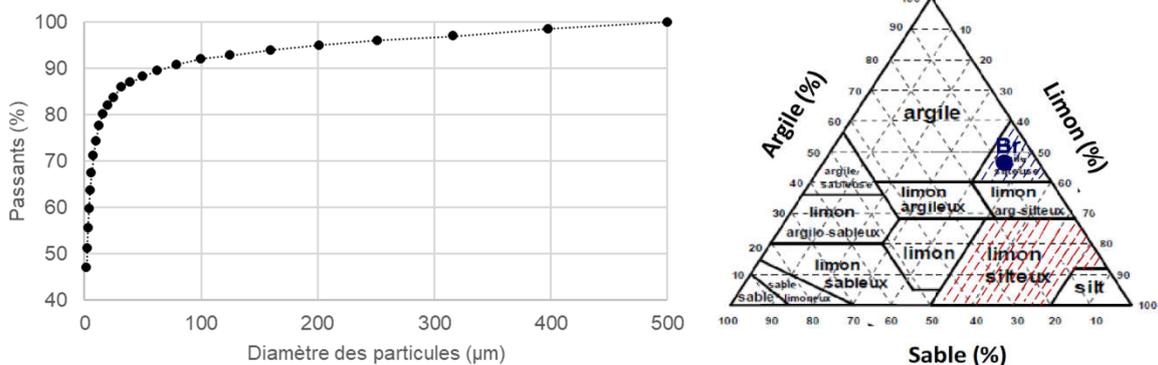
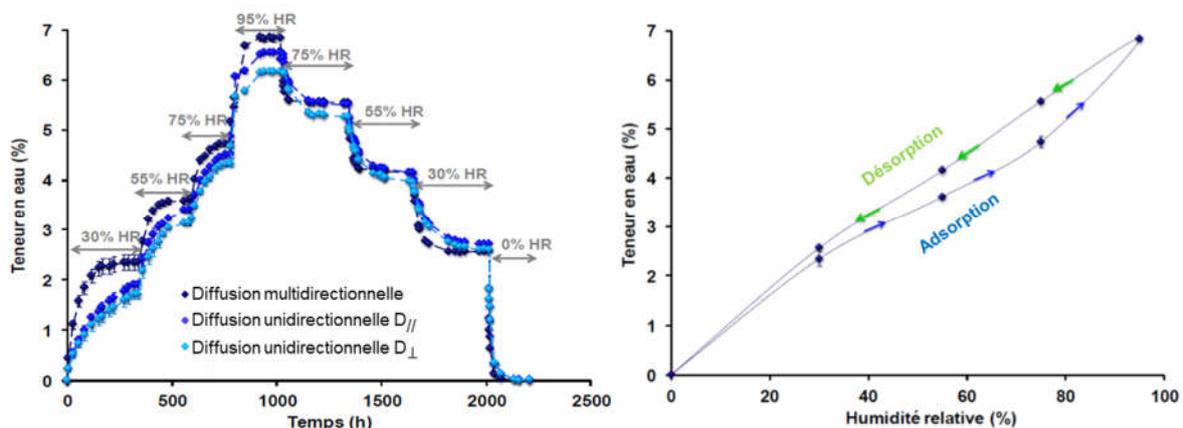


Figure A 3 Courbe granulométrique et classification triangulaire et classification triangulaire de la brique

Annexe 1.2. Caractérisation des propriétés thermo-hydriques

La Figure A 4 présente les courbes de sorption de la brique obtenues par LAOU (2017), à savoir la variation de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative de l'atmosphère ambiante, comprise entre 0 et 95 % HR. Des échantillons cubiques de 40 mm de côté sont tout d'abord séchés à 105°C jusqu'à ce que leur masse soit invariable, ce qui correspond au point 0% HR. La brique est ensuite conditionnée à température constante (23°C) sous des paliers croissants d'humidité relative successifs (30, 55, 75, 95% HR). A chaque palier d'humidité la teneur en eau massique w est déterminée en pesant périodiquement les éprouvettes jusqu'à stabilisation de la masse. Cette phase d'adsorption est suivie par une phase de désorption, qui passe par les mêmes paliers d'humidité relative successifs, mais en ordre inverse. Au point 95% HR, la teneur en eau de la brique est de 6,3%, ce qui est important comparativement à celles de la maçonnerie en terre cuite et du béton cellulaire, qui sont respectivement de 0,6% et 4,2% (Minke 2013 ; Pavlík & al. 2012).

Afin de caractériser la capacité d'adsorption de la vapeur d'eau selon deux directions de diffusion : parallèle $D_{//}$ et perpendiculaire D_{\perp} , la Figure A 4 reporte la cinétique de sorption complète des deux briques dans le cas de diffusion multidirectionnelle et unidirectionnelle. La cinétique d'absorption de la brique dans le cas de la diffusion multidirectionnelle atteint l'équilibre hygroscopique plus rapidement que dans les cas de diffusion unidirectionnelle ($D_{//}$ et D_{\perp}). La diffusion parallèle $D_{//}$ a une cinétique d'adsorption légèrement plus rapide que perpendiculaire D_{\perp} . Le phénomène d'anisotropie a été abordé par Maillard & Aubert (2014) qui ont présenté la dépendance de l'aptitude de diffusion de la vapeur d'eau en fonction de l'orientation des plaquettes d'argile des briques extrudées.



La brique a un caractère hygroscopique élevé en raison de la répartition de la taille prépondérante de ses pores et d'une quantité volumétrique de micropores importante (Dondi & al. 2003 ; Raimondo & al. 2007). L'hystérésis entre la phase d'adsorption et de désorption des isothermes de sorption est due à l'effet de la « bouteille d'encre » dans les pores (Daian 1986) et la différence de forces capillaires lors de la phase d'adsorption et de désorption (León y León 1998). L'absorption et la désorption se distinguent clairement sous les fortes humidités relatives (> 80% HR). Cela signifie que la rentrée de l'eau est plus facile que sa sortie dans le réseau poreux du fait des forces capillaires (El Faycal 2013).

En se basant sur l'approche thermodynamique de Merakeb (2006), les équations des isothermes de sorption s'écrivent de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Adsorption} & \quad w = w_s \exp[\varphi_a \cdot \ln(\text{HR}) \cdot \exp(a_a \cdot \text{HR})] \\ \text{Désorption} & \quad w = w_s \exp[\varphi_d \cdot \ln(\text{HR}) \cdot \exp(a_d \cdot \text{HR})] \end{aligned} \quad (\text{A } 1)$$

w_s désigne la teneur en eau d'équilibre pour une humidité relative à saturation (100% HR). φ_a et φ_d sont des paramètres thermodynamiques, a_a et a_d sont des constantes de calibration correspondant respectivement aux phases d'adsorption (indice a) et de désorption (indice d). Reprenant les isothermes de sorption établies par Laou (2017), nous avons identifié les valeurs de ces paramètres par minimisation des écarts entre la courbe théorique et les données mesurées, au sens des moindres carrés (Tableau A 4 et Figure A 5)

Tableau A 4 : Paramètres des isothermes de sorption de la brique

$w_s=0,0757$	Adsorption		Désorption	
	$a_a=1,107$	$\varphi_a=0,689$	$a_d=0,402$	$\varphi_d=0,802$

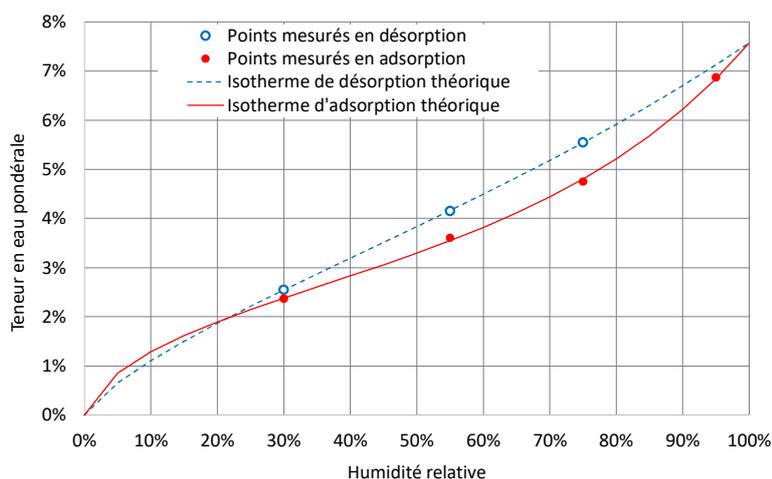


Figure A 5 : Courbes de sorption théoriques identifiées

Perméabilité hydrique

La perméabilité apparente (phase vapeur + phase liquide) désigne, conformément à la loi de Fick, le rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité de surface et par unité de temps sous l'action d'une différence de pression de vapeur d'eau, maintenue constante de part et d'autre du matériau. Grâce à la « méthode de la coupelle » (NF EN ISO 12572 - 2016), la perméabilité apparente δ_{app} du matériau est identifiée en fonction du flux de vapeur. Le facteur de résistance à la vapeur d'eau μ est défini comme étant le rapport entre la perméabilité à la vapeur de l'air immobile à pression atmosphérique et 23°C ($1,875 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$) et celle du matériau. Ce facteur représente de manière simple la capacité du matériau à s'opposer à la diffusion de vapeur. La forte capacité d'adsorption de la teneur des argiles provoque une meilleure aptitude de diffusion de la vapeur d'eau et une perméabilité apparente importante. De plus, ces propriétés dépendent également de la porosité (taux et taille de pores, connectivité, répartition de taille des pores) (Achchaq & al. 2007). Deux conditions sont considérées : sèche (0÷55% HR) et humide (55÷95% HR). Les valeurs de la

perméabilité apparente δ_{app} et du facteur de résistance à la vapeur d'eau μ de la brique sont consignées dans le Tableau A 5. La perméabilité en condition humide est plus élevée qu'en condition sèche. La forte hygroscopicité confère à la brique une propriété de non-linéarité de la perméabilité apparente. Le facteur de résistance est diminué dans le domaine de la zone capillaire où le déplacement de l'humidité à travers le matériau accélère. La résistance de diffusion à la vapeur de la brique est beaucoup plus faible que celle du béton de construction ($\mu=130$) mais comparable à celles du béton cellulaire ($6 < \mu < 15$), du béton de granulats légers ($5 < \mu < 15$) ou du plâtre ($7 < \mu < 9$).

Tableau A 5 : Perméabilité apparente et facteur de résistance de diffusion à la vapeur d'eau en conditions sèches et humides de la brique

Condition sèche		Condition humide	
$\delta \cdot 10^{-11}$ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	μ	$\delta \cdot 10^{-11}$ (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹)	μ
1,01	18,56	2,01	9,32

Pour un processus de diffusion non-linéaire, Droin-Josserand & al. (1989) ont défini l'expression de la perméabilité apparente en fonction de la teneur en eau :

$$\delta^* = \delta_0 \exp(k.w) \quad (A 2)$$

δ_0 désigne la perméabilité à l'état anhydre et k est le coefficient de non linéarité. En appliquant l'algorithme de simplexe (Nguyen 2014) qui est une des méthodes inverses au sens des moindres carrés, Laou (2017) a exploité les cinétiques des phases transitoires de plusieurs paliers d'adsorption pour identifier les paramètres de perméabilité apparente δ_0 et k .

Nous avons repris l'identification de ces paramètres de perméabilité δ_0 et k_0 par la méthode du simplexe uniquement sur les paliers qui nous intéressent, à savoir entre 30% et 75%HR, et en étendant la méthode également aux paliers de désorption. La Figure A 6 montre une bonne corrélation entre les cinétiques de sorption modélisées avec les paramètres identifiés et les cinétiques expérimentales.

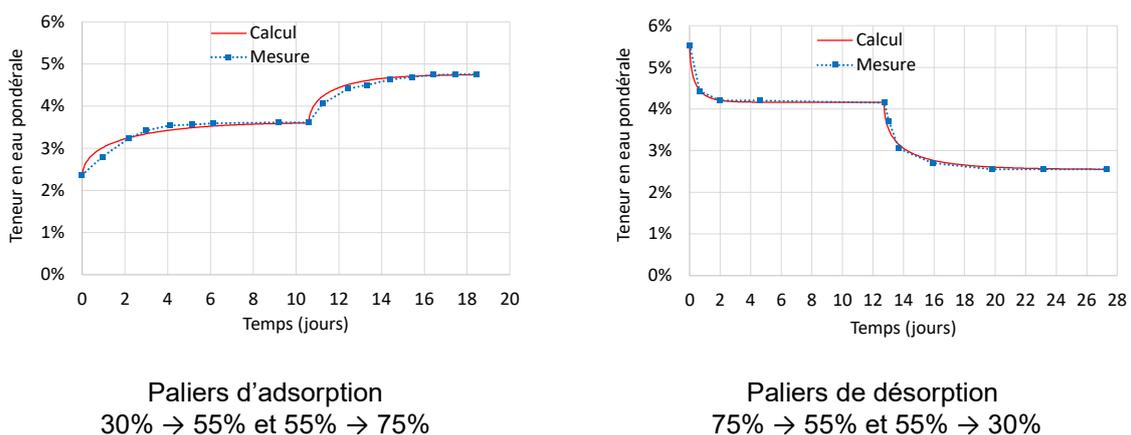


Figure A 6 : Paliers de sorption servant à l'identification de la perméabilité

Les paramètres δ_0 et k sont identifiés pour chacun des paliers, ce qui permet de vérifier la continuité des segments de courbe (Figure A 7). Un jeu de paramètres unique est alors identifié pour la plage complète de teneur en eau considérée.

$$\delta_{ads}^* = 6,32 \times 10^{-13} \exp(72.w) \quad \delta_{dés}^* = 7,84 \times 10^{-13} \exp(95.w) \quad (A 3)$$

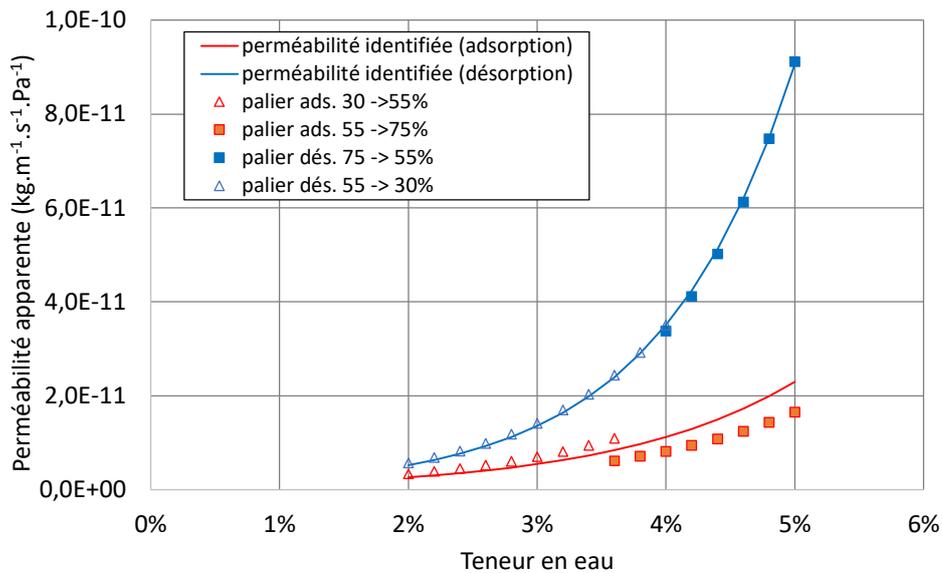


Figure A 7 : Perméabilité apparente identifiée sur cinétique des paliers de sorption

Cette méthode d'identification de la perméabilité apparente conduit habituellement à des paramètres très proches entre l'adsorption et la désorption. C'était le cas pour un béton de bois ou un autre type de brique de terre crue (Medjelekh 2015 ; Laou 2017). La brique utilisée ici se singularise par des perméabilités très différentes en fonction du sens de sorption. Cette nouvelle observation pose question quant à la validité du modèle sur cette brique.

Propriétés thermiques

La conductivité thermique en fonction de la teneur en eau de la brique est identifiée par la méthode du disque chaud (Maillard & Aubert 2014) suivant les deux directions de diffusion $D_{//}$ et D_{\perp} . La Figure A 8 illustre la tendance linéaire de l'état hydrique sur la conductivité thermique apparente de la brique avec la méthode du disque chaud. La loi de conductivité thermique issue des résultats du disque chaud pour la brique est présentée à l'équation (A 4). De plus, la conductivité thermique parallèle $D_{//}$ est légèrement plus faible à celle perpendiculaire D_{\perp} parce que les plaquettes d'argile inhibent le flux de chaleur dans la brique.

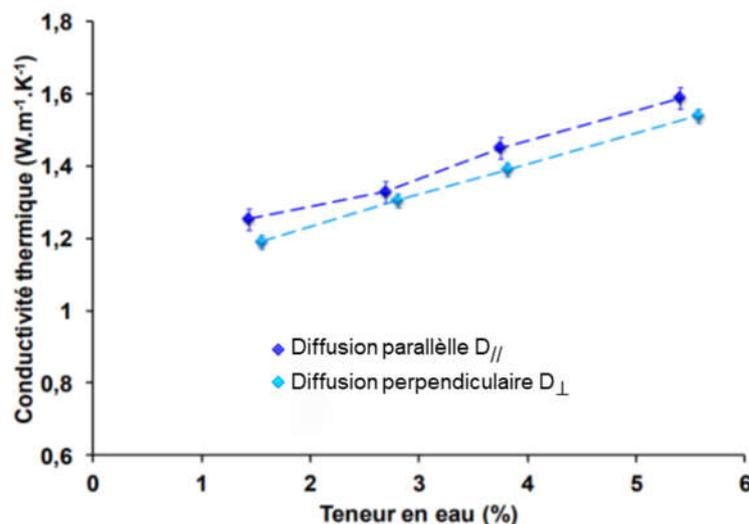


Figure A 8 : Conductivité thermique en fonction de l'humidité relative de la brique avec la méthode du disque chaud

$$\lambda_T = 8,64w + 1,06 \quad (A\ 4)$$

La chaleur spécifique, ou capacité thermique massique est la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer. Elle est une fonction linéaire de la teneur en eau. Lors du remplissage de l'eau dans les micropores d'air, l'humidité interne augmente, en revanche la proportion d'air diminue (NF EN 1745-2020 ; Moevus & al. 2012 ; Delgado & Guerrero 2006 ; Laurent 1987). En effet, la chaleur spécifique de la brique varie de 956,36 J.kg⁻¹.K⁻¹ (état anhydre) à 1129,31 J.kg⁻¹.K⁻¹ (4,1% de teneur en eau). Donc, la relation entre la capacité thermique C_p et la teneur en eau w s'exprime suivant l'équation :

$$C_p = 4180w + 956,36 \quad (A\ 5)$$

En conclusion, pour le calcul du modèle hygrothermique, les propriétés de la brique sont synthétisées selon le Tableau A 6

Tableau A 6 : Synthèse des propriétés de la Brique pour le calcul du modèle thermo-hydrigue

Masse volumique anhydre [kg.m ⁻³]	$\rho_s = 2200$		
Capacité thermique [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	$C_p = 4180w + 956,36$		
Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	$\lambda_T = 8,64.w + 1,06$		
Paramètres des isothermes de sorption	$w_s = 0,0757$	Adsorption $a_a = 1,107$ $\varphi_a = 0,689$	Désorption $a_d = 0,402$ $\varphi_d = 0,802$
Perméabilité apparente [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹ .Pa ⁻¹]	$\delta_{ads}^* = 6,32 \times 10^{-13} \exp(72.w)$ $\delta_{dés}^* = 7,84 \times 10^{-13} \exp(95.w)$		

Annexe 2. Modèle hygrothermique

Annexe 2.1. Présentation du modèle hygrothermique

Le modèle hygrothermique utilisé a été développé au Laboratoire GC2D, dans l'environnement aux éléments finis Cast3M (Medjelekh & al. 2016; Laou 2017). La Figure A 9 résume les équations de bilans utilisées pour le traitement du problème transitoire de transferts couplés de chaleur et de masse.

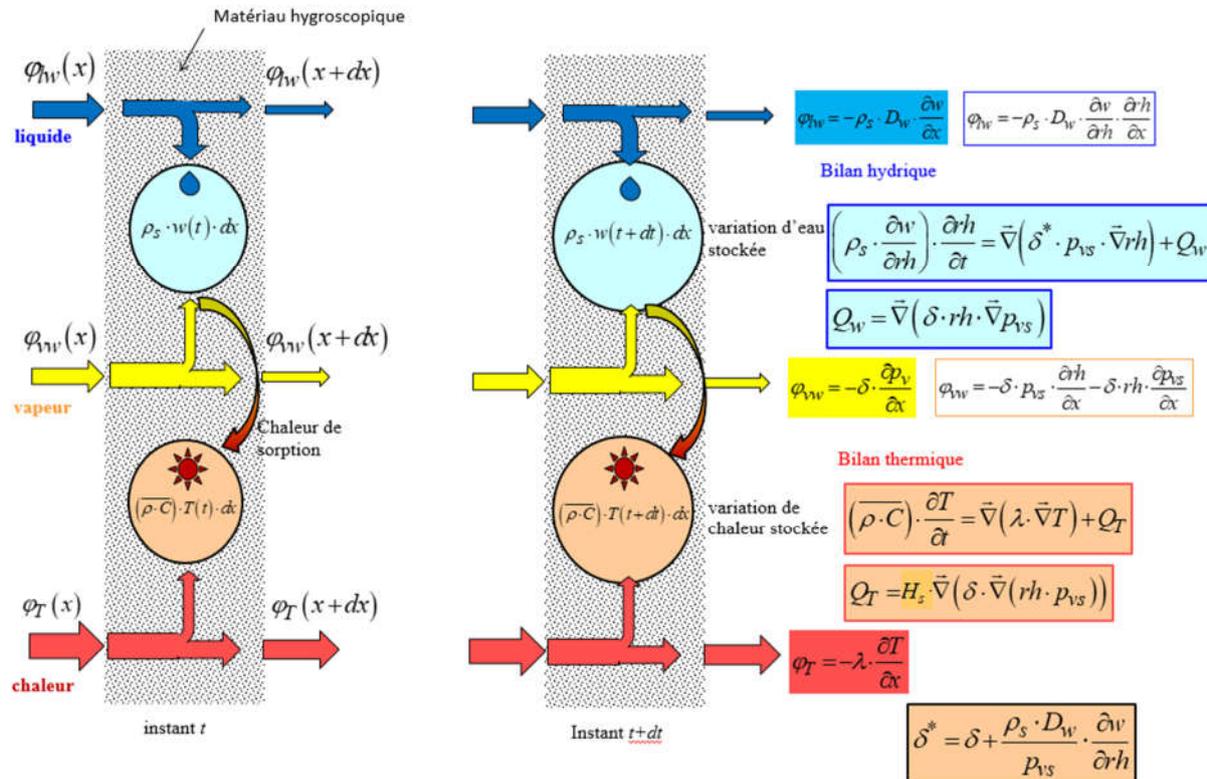


Figure A 9 : Modèle hygrothermique

Annexe 2.2. Modélisation de la phase de séchage de la brique

Le point d'équilibre initial de la brique témoin sous une humidité relative mesurée moyenne de 72,1%HR a été obtenu par pesée. Comme ce point est obtenu par une adsorption monotone à partir d'un état anhydre, celui-ci devrait théoriquement se trouver sur l'isotherme d'adsorption. Or, comme le montre la Figure A 10, ce point est situé assez nettement en dessous de l'isotherme d'adsorption théorique. Cet écart peut être attribué à la dispersion des points d'équilibre de fin de paliers de sorption constatée entre différents échantillons. Pour mener à bien le calcul, nous définissons donc une isotherme modifiée, passant exactement par le point initial, ce qui conduit à prendre un nouveau paramètre w_s égal à 0,068.

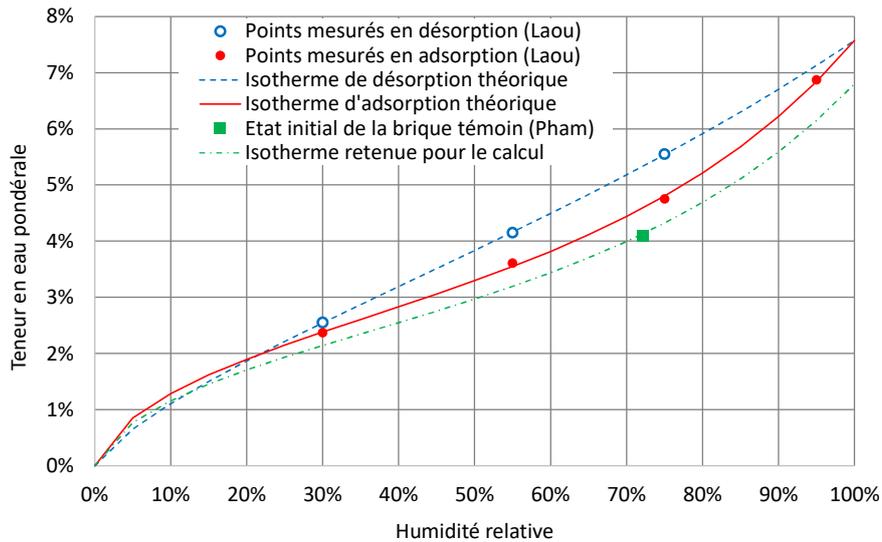


Figure A 10 : Isotherme de sorption modifiée passant par le point initial

Le calcul hygrothermique étant itératif et long, la recherche d'un maillage « économique » permet de réduire le temps de calcul. En raison des symétries, seulement 1/8^e de la brique est modélisé. Le maillage est plus raffiné à l'extérieur de la brique qu'au cœur, car c'est généralement près des bords extérieurs qu'apparaissent les gradients les plus forts.

La comparaison entre le modèle et le suivi par pesée de la brique témoin implique d'imposer les conditions aux limites d'ambiance extérieure sur trois faces, les autres faces du modèle représentant des plans de symétrie (Figure A 11). La Figure A 12 montre l'exemple du champ de teneur en eau en phase transitoire, obtenu au bout de 24h.

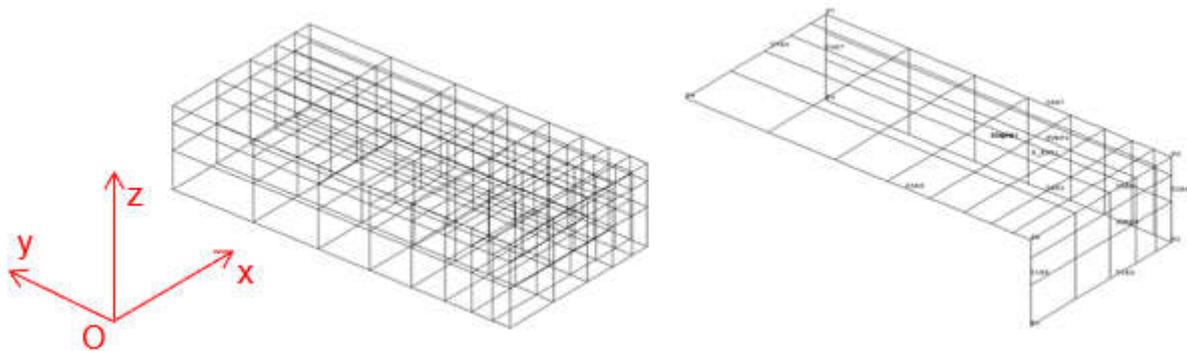


Figure A 11 : Maillage 1/8 de brique pour le calcul hygrothermique et surfaces d'application des conditions aux limites (T et HR ambiants) pour le cas 3D

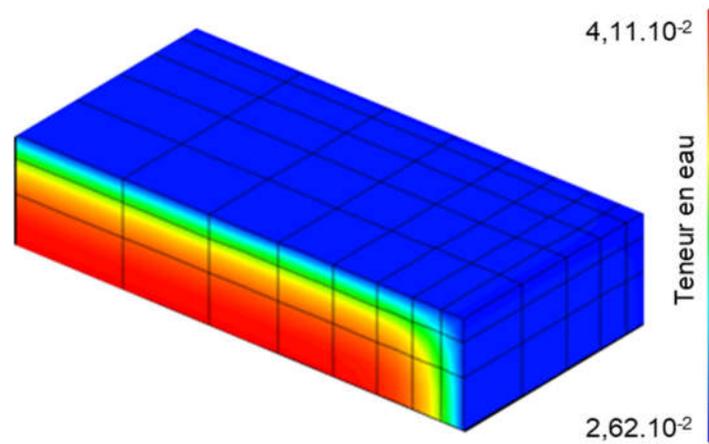


Figure A 12 : Champ 3D de teneur en eau à 1 jour, issu du calcul hygrothermique.

La Figure A 13 montre une bonne corrélation entre les évolutions calculées et mesurées de la teneur en eau moyenne de la brique, ce qui permet d'espérer un comportement globalement correct du modèle.

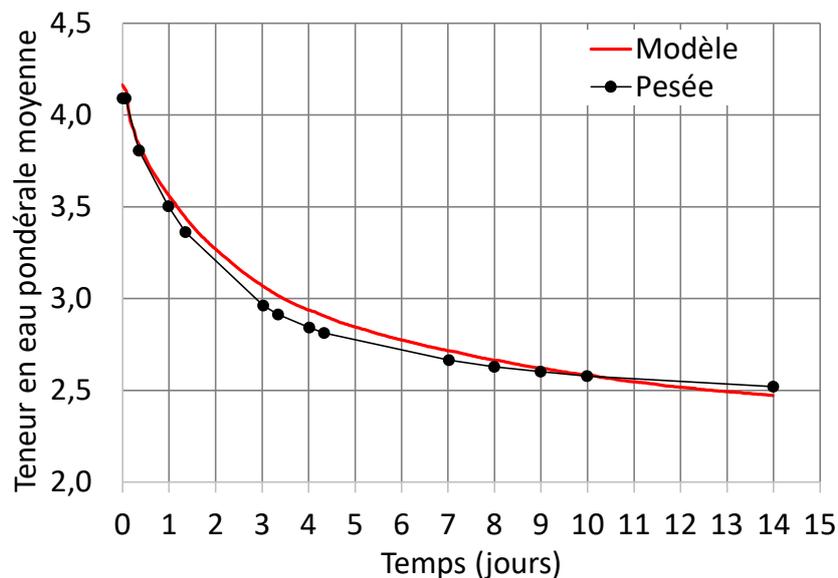


Figure A 13 Evolution de la teneur en eau de la brique : comparaison entre modèle et pesée.

Cependant, dans le cadre de l'analyse inverse du problème électrique, le cas d'un champ de résistivité 3D, pour lequel la résistivité est variable suivant la plus grande dimension de la brique, ne se prête pas à une inversion théorique rigoureuse. En effet, le maillage grossier d'éléments ou de nœuds maîtres est seulement 2D. Pour tester la robustesse de l'inversion, il est donc préférable de créer des champs hydriques théoriques 2D, ce qui reviendrait en pratique à étancher les 2 plus petites faces de la brique (Figure A 14). Une étude de sensibilité a montré que, compte tenu du caractère élancé de la brique dans la direction Oy perpendiculaire au plan du ceinturage, le choix d'une option 2D ou 3D pour le champ de résistivité n'avait pratiquement pas d'influence sur les rapports $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ des quadripôles.

Annexe 3. Multiplexage de 136 quadripôles pour cube en ceinturage

Tableau A 7 : Les mesures non disponibles correspondent à des quadripôles impliquant l'électrode n°15

Numéro de quadripole	Numéro de famille	$\Delta V_{MN}/I_{AB}$ (Ω) Modèle	Quadripôle				$\Delta V_{MN}/I_{AB}$ (Ω) Mesure		Schéma type
			A	B	M	N	50 mA	1250 mA	
1	1	-214,3	1	2	3	4	-632,4	Qmax	
2			5	6	7	8	-632,7	Qmax	
3			9	10	11	12	Qmax	-58,4	
4			13	14	15	16			
5	2	-228,9	2	3	4	5	Qmax	-286,8	
13			4	5	6	7	-413,9	Qmax	
6			6	7	8	9	-398,2	-233,3	
14			8	9	10	11	-197,4	-142,5	
7			10	11	12	13	-214,8	Qmax	
15			12	13	14	15			
8			14	15	16	1			
16	16	1	2	3	Qmax	Qmax			
9	3	-280,2	3	4	5	6	-428,5	-326,5	
10			7	8	9	10	-357,3	-398,4	
11			11	12	13	14	-334,1	-261,0	
12			15	16	1	2			
50	4	-212,8	1	3	5	7	Qmax	Qmax	
45			2	4	6	8	Qmax	Qmax	
48			5	7	9	11	-337,4	-295,2	
49			6	8	10	12	-350,4	-331,7	
53			9	11	13	15			
54			10	12	14	16	Qmax	Qmax	
57			13	15	1	3			
58	14	16	2	4	Qmax	Qmax			
46	5	-114,6	3	5	7	9	-412,6	Qmax	
47			4	6	8	10	-264,9	-162,6	
51			7	9	11	13	-319,3	-237,5	
52			8	10	12	14	-123,6	-88,0	
55			11	13	15	1			
56			12	14	16	2	-254,5	-176,9	
59			15	1	3	5			
60	16	2	4	6	-331,2	-193,3			
20	6	-663,8	1	4	5	8	Qmax	-301,2	
18			5	8	9	12	-771,2	-696,4	
21			9	12	13	16	-362,8	-405,5	
23			13	16	1	4	-623,1	-300,6	

32	7	-538,2	2	5	6	9	-772,6	-559,2	
31			4	7	8	11	-603,6	-564,3	
30			6	9	10	13	-585,2	-506,3	
29			8	11	12	15			
28			10	13	14	1	Qmax	Qmax	
27			12	15	16	3			
26			14	1	2	5	Qmax	-250,5	
25			16	3	4	7	-1105,4	Qmax	
17	8	-443,6	3	6	7	10	-949,4	Qmax	
19			7	10	11	14	-490,0	-520,3	
22			11	14	15	2			
24			15	2	3	6			
61	9	-321,1	1	5	7	11	-520,3	Qmax	
62			2	6	8	12	-683,5	-318,9	
65			5	9	11	15			
66			6	10	12	16	Qmax	-351,5	
69			9	13	15	3			
70			10	14	16	4	-329,7	-216,1	
73			13	1	3	7	Qmax	Qmax	
74	14	2	4	8	-1012,4	-605,0			
63	10	-384,7	3	7	9	13	-782,5	Qmax	
64			4	8	10	14	-470,6	-421,2	
67			7	11	13	1	-238,5	-183,6	
68			8	12	14	2	Qmax	Qmax	
71			11	15	1	5			
72			12	16	2	6	-526,4	-385,5	
75			15	3	5	9			
76	16	4	6	10	-538,5	-414,9			
78	11	-427,9	1	6	9	14	-824,6	Qmax	
79			3	8	11	16	-1039,4	-851,7	
80			5	10	13	2	-583,2	-505,5	
82			7	12	15	4			
83			9	14	1	6	-298,8	-214,5	
85			11	16	3	8	-637,1	-494,0	
86			13	2	5	10	-1078,4	Qmax	
88	15	4	7	12					
77	12	-509,1	2	7	10	15			
81			6	11	14	3	Qmax	Qmax	
84			10	15	2	7			
87			14	3	6	11	Qmax	Qmax	
125	13	360,7	1	12	4	9	Qmax	354,6	
97			4	9	1	12	206,0	188,3	
126			5	16	8	13	Qmax	Qmax	
98			8	13	5	16	481,8	488,1	
127			9	4	12	1	512,1	456,6	
99			12	1	9	4	715,8	704,0	
128			13	8	16	5	-163,3	Qmax	
100	16	5	13	8	Qmax	Qmax			

129	14	632,9	1	12	3	10	Qmax	452,9	
113			2	11	4	9	719,4	782,3	
109			3	10	1	12	581,5	Qmax	
93			4	9	2	11	558,7	556,2	
130			5	16	7	14	356,1	Qmax	
114			6	15	8	13			
110			7	14	5	16	342,6	336,5	
94			8	13	6	15			
131			9	4	11	2	962,5	858,1	
115			10	3	12	1	1554,4	1168,5	
111			11	2	9	4	1125,1	1226,2	
95			12	1	10	3	1109,9	Qmax	
132			13	8	15	6			
116			14	7	16	5	308,3	376,6	
112			15	6	13	8			
96			16	5	14	7	Qmax	Qmax	
133	15	1480,1	1	12	2	11	1222,8	1383,0	
121			2	11	1	12	1118,1	1232,5	
101			3	10	4	9	1886,8	1831,1	
89			4	9	3	10	979,4	911,8	
134			5	16	6	15			
122			6	15	5	16			
102			7	14	8	13	1244,0	1153,7	
90			8	13	7	14	1637,5	1457,2	
135			9	4	10	3	1385,8	1281,5	
123			10	3	9	4	2573,9	2408,0	
103			11	2	12	1	1532,2	1440,0	
91			12	1	11	2	1940,2	1797,4	
136			13	8	14	7	1111,7	1065,2	
124			14	7	13	8	1050,0	955,4	
104			15	6	16	5			
92			16	5	15	6			
117	16	1360,2	2	11	3	10	1115,5	1188,7	
105			3	10	2	11	1546,1	1524,4	
118			6	15	7	14			
106			7	14	6	15			
119			10	3	11	2	2204,8	1909,7	
107			11	2	10	3	1467,2	1410,6	
120			14	7	15	6			
108			15	6	14	7			
41	17	1553,5	1	10	2	9	2059,1	2004,7	
37			2	9	1	10	1744,3	930,7	
42			3	12	4	11	2377,7	1998,1	
38			4	11	3	12	1125,0	979,2	
43			5	14	6	13	980,1	682,8	
39			6	13	5	14	1220,5	826,1	
44			7	16	8	15			
40			8	15	7	16			
33	18	1806,1	1	8	16	9	1774,4	1621,3	
34			5	12	4	13	1234,1	1090,3	
35			9	16	8	1	1252,0	1004,2	
36			13	4	12	5	1480,9	1386,5	

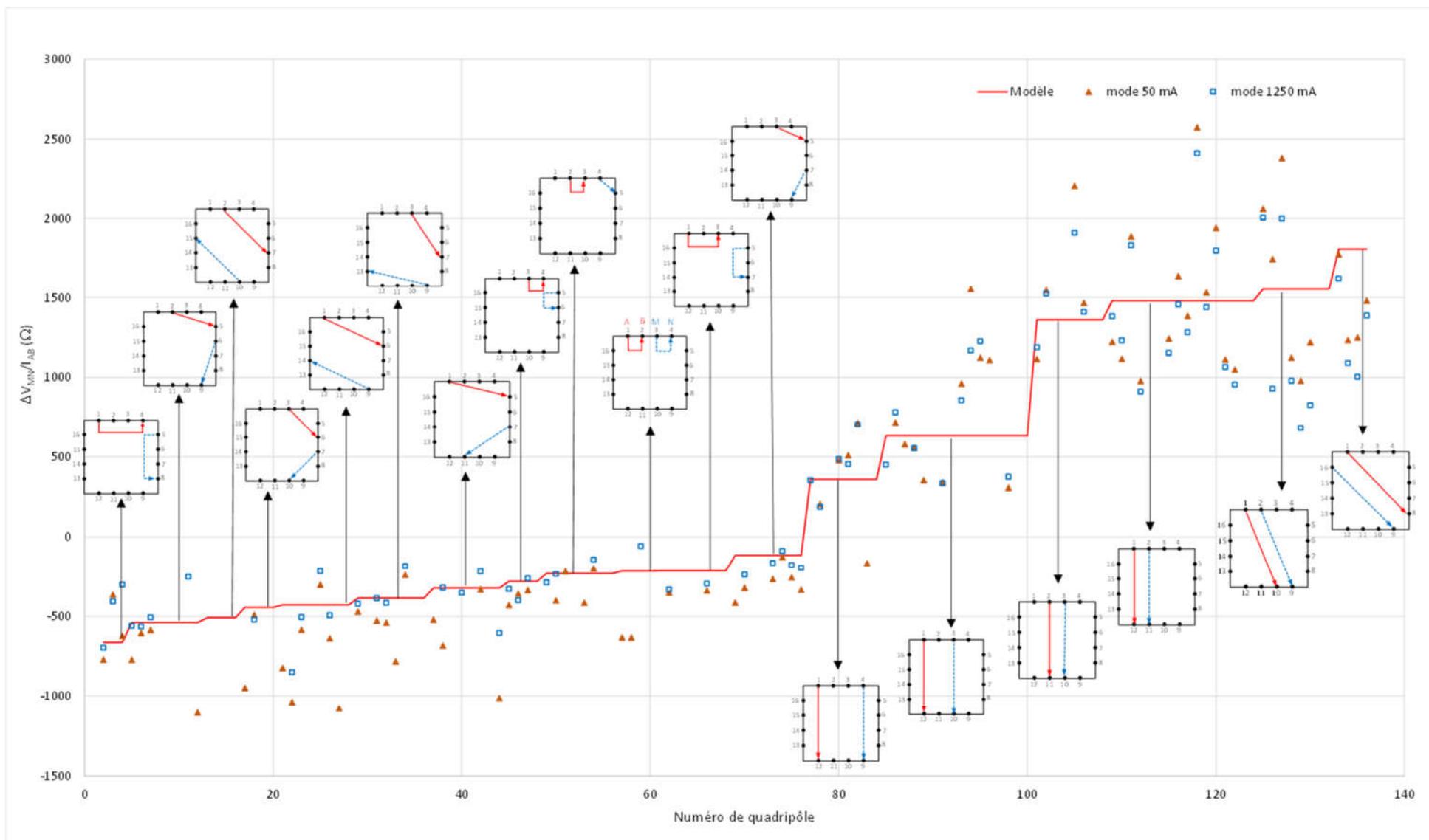


Figure A 17 : Données mesurées et modélisées de $\Delta V_{MN}/I_{AB}$ selon la configuration des quadripôles



Approche Résistive pour l'Évaluation des Champs Hydriques dans les Matériaux Hygroscopiques

Dans un contexte environnemental qui demande à pérenniser la durée de vie des structures, les gestionnaires d'ouvrages doivent être accompagnés dans la maintenance des ouvrages existants. Des démarches d'inspection périodique et de surveillance d'ouvrage reposent sur le développement de méthodes de contrôle non destructif afin d'avoir un retour, tout au long de la vie des ouvrages, sur des variables clés traduisant l'état mécanique et pathologique des structures. Dans le domaine des matériaux de construction hygroscopique, la surveillance de l'humidité interne demande à développer des outils spécifiques permettant d'identifier les profils hydriques dans les sections structurelles. La méthode étudiée dans ce travail de thèse concerne la tomographie électrique. Elle est basée sur la mesure de résistivité apparente aux bornes de quadripôles. Un multiplexage permet de multiplier les lignes de courant afin d'avoir un échantillonnage recouvrant la totalité d'une section transversale. L'ensemble de ces données est confronté à une modélisation par éléments finis de la conduction électrique en régime établi, et ce, en employant une méthode d'optimisation numérique basée sur les méthodes inverses de Gauss Newton et de Levenberg-Marquadt. Le matériau employé est la terre crue, ce qui permet d'avoir des régimes hydriques transitoires rapides. L'ensemble expérimental a permis de mettre en œuvre et de tester les algorithmes de mesures et d'inversion sur des champs hydriques homogènes et hétérogènes en phase de désorption. Ainsi, les profils 2D permettent, pour une section donnée, d'estimer le champ d'humidité interne en tout point et de proposer ainsi un suivi dans le temps des profils hydriques. Des inversions sur des champs hydriques simulés permettent de mettre en avant la robustesse de la démarche avant d'être confrontée à des champs réels.

Mots-clés : Monitoring hydrique, Mesures résistives, matériaux hygroscopiques, Analyse inverse

Resistive approach to characterise hydric fields in hygroscopic materials

In an environmental context that requires perpetuating the life span of constructions, the managers of structures must be accompanied in the maintenance of existing structures. Periodic inspection and monitoring approaches are based on the development of non-destructive testing methods to have feedback, throughout the life of the structures, on key variables reflecting the mechanical and pathological state of the structures. In the field of hygroscopic building materials, the monitoring of moisture content requires the development of specific tools to identify moisture profiles in structural sections. The method studied in this thesis concerns electrical tomography. It is based on the measurement of apparent resistivity at the terminals of quadrupoles. A multiplexing allows multiplying the current lines to have a sampling covering the whole cross section. All these data are confronted with a finite element modeling of the electrical conduction in a steady state, using a numerical optimization method based on the Gauss Newton and Levenberg-Marquadt inverse methods. The material used is raw earth, which allows for fast transient water regimes. The experimental set allowed to implement and test the measurements and inversion algorithms on homogeneous and heterogeneous water fields in desorption phase. Thus, the 2D profiles allow, for a given section, to estimate the internal moisture field at any point and to propose a follow-up in time of the water profiles. Inversions on simulated moisture content fields allow to highlight the robustness of the approach before being confronted with real fields.

Keywords : Hydric monitoring, resistive measurements, Hygroscopic materials, Inverse analysis

