



Thèse de Doctorat

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Cergy - Paris (CY)

Ecole doctorale Science et Ingénierie, Spécialité Génie Civil

Par

Oriol Sánchez Rovira

Imagerie des remontées capillaires au sein de pierres du patrimoine bâti : application au temple gallo-romain de Genainville

Présentée et soutenue publiquement le 26 février 2021

Composition du jury :

Rapporteur	Céline Thomachot-Schneider	MCF, HDR	Université de Reims Champagne-Ardenne - GEGENAA - EA 3795
Rapporteur	Kévin Beck	MCF, HDR	Ecole polytechnique d'Orléans - LaMé
Examineur	Catherine Davy	Professeure	Centrale Lille Institut - UCCS UMR CNRS 8181
Examineur	Béatrice Ledésert	Professeure	CY Cergy Paris Université – GEC EA 4506
Examineur	David Giovannacci	Ingénieur de Recherche	LRMH
Examineur	Daniel Bougeard	Professeur	École nationale supérieure Mines-Télécom Lille-Douai (IMT Lille Douai)
Co-directeur de thèse	Ronan Hébert	MCF, HDR	CY Cergy Paris Université – GEC EA 4506
Directeur de thèse	Yannick Mélinge	Professeur	LRMH
Invité	Jean-Didier Mertz	Ingénieur de Recherche	LRMH

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leurs conseils, et qui ont contribué à l'élaboration de ces travaux de recherche.

Ce projet de recherche a pu être mené à terme grâce au financement apporté par le LabEx PATRIMA, qui est un laboratoire d'excellence sous la gouvernance de la Fondation des Sciences du Patrimoine (FSP), et grâce à la collaboration entre le Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) et du Laboratoire géosciences et environnement Cergy (GEC) de l'Université Cergy-Paris (CY), ainsi que le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH).

Je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de thèse Yannick Mélinge du LRMH, et mon co-directeur de thèse, Ronan Hébert du GEC pour avoir dirigé cette thèse, ainsi que Jean-Didier Mertz du LRMH, David Giovannacci du LRMH, pour l'encadrement de ces travaux de recherche. Je vous remercie pour votre grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail, et de vous avoir montrée toujours à l'écoute et prêts à m'aider sur tout question professionnel ou personnel.

Je souhaite remercier également les différents membres du jury. Je remercie Céline Thomachot-Schneider de l'Université de Reims et Kévin Beck de l'École Polytechnique d'Orléans pour avoir accepté la tâche de rapporteurs de ce travail de thèse doctoral, ainsi que Catherine Davy de Centrale Lille Institut, Béatrice Ledéser du GEC, Daniel Bougeard École nationale supérieure Mines-Télécom Lille-Douai et David Giovannacci du LRMH d'avoir accepté d'examiner mon manuscrit.

Mes remerciements se dirigent aussi à l'archéologue responsable du site archéologique de Vaux-de-la-Celle Vivien Barrière (AGORA), qui nous a permis de récupérer les échantillons en provenance du temple Gallo-Romain présent dans le site, et qui ont devenu les matériaux de base utilisés dans ce travail de recherche. Je tiens à remercier aussi Didier Vermeersch, ancien archéologue au service départemental d'archéologie du Val-d'Oise responsable du site, pour les précieuses échanges qui m'ont permis de mieux comprendre les techniques de construction Romaines.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du LRMH, du L2MGC et du GEC pour leur accueil chaleureux au sein des différents laboratoire.

Je remercie aussi évidemment tous mes collègues thésards (actuels et anciens) Martin, George, Meriem, Emna, Yasser, Thanh Ha, Tahar, Claire, Pablo, Abdelaziz ... pour toujours être de bonne humeur et pour la bonne ambiance que vous apportez aux bureaux, ainsi que pour tous les bons moments qu'on a pu passer ou le cadre professionnel et amical.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement, ma famille, mes amis et ma compagne Justine pour leurs soutiens, leurs écoutes et leurs encouragements et aussi pour avoir eu une énorme patience tout au long de ces années. Je vous remercie du fond de mon cœur.

Table de matières

REMERCIEMENTS	I
TABLE DE MATIERES	II
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	XVII
RESUME	XIX
ABSTRACT	XXI
CHAPITRE I INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE II CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE.....	6
1. OBJET D'ETUDE	7
2. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	10
3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DU SITE	14
4. LE PHENOMENE DE REMONTEE CAPILLAIRE DANS LE MUR DU TEMPLE GALLO-ROMAIN DE GENAINVILLE.....	16
5. MATERIAUX ETUDIES.....	18
5.1. <i>Caractéristiques architecturales du Temple</i>	18
5.1.1 Fondations	18
5.1.2 Murs.....	18
5.2. <i>Choix des matériaux d'étude</i>	20
5.2.1 Les calcaires	20
5.2.1.1 Calcaire de type moellon	21
5.2.1.2 Les blocs calcaires dits de moyen appareil	21
5.2.2 Les briques d'argile cuite	22
5.2.3 Les mortiers	23
5.2.3.1 Les mortiers anciens	23
5.2.3.2 Les mortiers de restauration.....	25
6. ECHANTILLONNAGE ET ASSEMBLAGES CONSTRUCTIFS	25
CHAPITRE III CARACTERISATION PETROPHYSIQUE	30
1. PROPRIETES DE STOCKAGE.....	31
1.1. <i>Porosité ouverte ou connectée</i>	31
1.1.1 Protocole expérimental	31
1.2. <i>Porosité 48h</i>	32
1.2.1 Protocole expérimental	32
1.3. <i>Porosité par injection de mercure</i>	33
1.3.1 Protocole expérimental	33
2. PROPRIETES DE TRANSFERT.....	34
2.1. <i>Imbibition Capillaire</i>	34
2.1.1 Protocole expérimental	38
2.2. <i>Perméabilité</i>	38
2.2.1 Perméabilité à l'air	39
2.2.1.1 Protocole expérimental	39

2.2.2	Perméabilité à l'eau	40
2.2.2.1	Protocole expérimental	41
CHAPITRE IV METHODES D'IMAGERIE ELECTRIQUE ET THERMOGRAPHIE IR		42
1.	METHODE D'IMAGERIE ELECTRIQUE	43
1.1.	<i>Fondements théoriques de la méthode d'imagerie électrique</i>	43
1.1.1	Equations fondamentales de l'électromagnétisme	43
1.1.2	Notion de résistivité électrique.....	46
1.2.	<i>Protocole de mesure de la résistivité électrique</i>	47
1.2.1	Mesure ponctuelle de la résistivité électrique	47
1.2.2	Principe de la tomographie de résistivité électrique	48
1.3.	<i>Modélisation de la résistivité électrique des matériaux</i>	50
1.4.	<i>Equipement expérimental</i>	52
1.5.	<i>Développement d'outils de mesure adaptés</i>	53
1.5.1	Système d'acquisition électrique multi-électrode	53
1.5.2	Electrodes non invasives.....	56
2.	METHODE D'IMAGERIE PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE	60
2.1.	<i>Fondements théoriques de la thermographie infrarouge</i>	61
2.2.	<i>Protocoles de mesure de l'imagerie de thermographie IR</i>	64
2.3.	<i>Equipement expérimental</i>	65
CHAPITRE V VERS UNE MODELISATION PHENOMENOLOGIQUE DES TRANSFERTS D'EAU		67
1.	INTRODUCTION	68
2.	PROPRIETES DU RESEAU POREUX.....	69
2.1.	<i>Propriétés de stockage</i>	69
2.2.	<i>Résultats de porosité par injection de mercure</i>	71
2.3.	<i>Analyses des résultats de la caractérisation des propriétés de stockage</i>	75
3.	PROPRIETES DE TRANSFERT.....	75
3.1.	<i>Capillarité</i>	75
3.2.	<i>Perméabilité</i>	77
3.2.1	Perméabilité à l'air	77
3.2.2	Perméabilité à l'eau	79
3.3.	<i>Analyses des résultats de la caractérisation des propriétés de transfert</i>	80
4.	MODELES PHENOMENOLOGIQUES	81
4.1.	<i>Création des modèles</i>	81
4.2.	<i>Description des modèles</i>	81
4.2.1	Modèles de la partie en élévation du mur	82
4.2.2	Modèles de la partie des fondations du mur	82
CHAPITRE VI CALIBRATION DES SYSTEMES DE MESURE INDIRECTE DE LA TENEUR EN EAU		86
1.	CARACTERISATION EN CONDITION STATIQUE	87
1.1.	<i>Méthodologie employée</i>	87
1.2.	<i>Protocole expérimental</i>	87
1.3.	<i>Méthode surfacique : Thermographie infrarouge</i>	90
1.3.1	Traitement du signal thermique Infrarouge.....	90
1.3.2	Moyenne et écart type des distributions de température.....	95
1.3.3	Mode des distributions de température.....	96

1.3.4	Comparatif des modes et des moyennes des distributions de température	97
1.3.5	Dissymétrie des distributions de température	98
1.3.6	Aplatissement des distributions de température	99
1.3.7	Résultats de la variation de température des échantillons.....	101
1.4.	<i>Méthode volumique : Résistivité électrique</i>	102
1.4.1	Traitement du signal électrique	102
1.4.2	Résultats de la variation de résistivité électrique des échantillons.....	103
1.5.	<i>Calibration de la réponse thermique et électrique en fonction de la teneur dans le cadre statique</i> 104	
1.5.1	Résultats de la calibration matériau calcaire	105
1.5.2	Résultats de la calibration matériau de type brique	107
1.6.	<i>Synthèse des résultats de l'expérience de calibration dans le cadre statique</i>	109
2.	SUIVI DE LA DYNAMIQUE D'ÉVAPORATION – ESTIMATION DE LA ROBUSTESSE DE LA CALIBRATION DES METHODES D'IMAGERIE 110	
2.1.	<i>Protocole expérimental</i>	110
2.2.	<i>Traitements</i>	112
2.2.1	Traitement du signal électrique	112
2.2.2	Traitement du signal thermique	112
2.3.	<i>Résultats</i>	115
2.3.1	Comparatif électrodes invasives et non invasives.....	115
2.4.	<i>Interprétation des résultats de la désaturation dynamique</i>	117
2.4.1	Cas des calcaires	117
2.4.2	Cas des argiles cuites	120
2.4.3	Cas du mortier.....	123
2.5.	<i>Synthese des résultats de la désaturation dynamique</i>	126
3.	COMPARATIF DES APPROCHES STATIQUE ET DYNAMIQUE	127
3.1.	<i>Analyse des courbes par superposition</i>	127
3.1.1	Réponse infrarouge.....	127
3.1.2	Réponse électrique	129
3.2.	<i>Reconstruction des valeurs de désaturation dynamique à partir de la calibration statique</i>	130
3.2.1	Réponse infrarouge.....	130
3.2.1.1	Résultats de la reconstruction du signal thermique de la dynamique de désaturation à partir du modèle statique	130
3.2.2	Réponse électrique	131
3.2.2.1	Résultats de la reconstruction du signal électrique de la dynamique de désaturation à partir du modèle statique	131
3.3.	<i>Synthèses des résultats comparatifs</i>	133
CHAPITRE VII VERS UN SYSTEME POUR DES MESURES DYNAMIQUES		135
1.	IMBIBITION CAPILLAIRE SUR DES ASSEMBLAGES MULTICOUCHE.....	136
1.1.	<i>Introduction</i>	136
1.2.	<i>Protocole expérimental</i>	136
1.3.	<i>Traitement des mesures gravimétriques</i>	138
2.	DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU DES MATERIAUX PAR LA METHODE D'IMAGERIE IR.....	139
2.1.	<i>Traitement du signal IR mesuré sur les assemblages multicouches</i>	139
2.2.	<i>Présentation des résultats</i>	143
2.2.1	Assemblage CA-CA	144
2.2.2	Assemblage CAmHOM-BAC-CA	149

2.3.	<i>Synthèse des résultats obtenus par la méthode de thermographie infrarouge</i>	154
3.	DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU DES MATERIAUX PAR LA METHODE D'IMAGERIE ELECTRIQUE	155
3.1.	<i>Traitement du signal électrique mesuré sur les assemblages multicouches</i>	155
3.2.	<i>Présentation des résultats</i>	160
3.2.1	Assemblage CA-CA	160
3.2.2	Assemblage CAmHOM-BAc-CA	163
3.3.	<i>Synthèse des résultats obtenus avec la méthode électrique</i>	168
4.	COMPARATIF DES RESULTATS ELECTRIQUES ET DE THERMOGRAPHIE IR	169
5.	COMPARAISON DES RESULTATS AU REGARD DES MODELES PHENOMENOLOGIQUES	171
CHAPITRE VIII CONCLUSIONS		175
BIBLIOGRAPHIE		180
ANNEXE I SYSTEMES D'ACQUISITION TESTES POUR LA MESURE DE LA RESISTIVITE ELECTRIQUE		187
1.	SYSCAL JUNIOR	188
2.	SYSTEME D'ACQUISITION MSL DATASCAN.....	189
3.	OSCILLOSCOPE TIEPIE HS5	191
4.	SYNTHESE DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIFFERENTS SYSTEMES	192
ANNEXE II SYNTHESE DES ECHANTILLONS UTILISES POUR LA CARACTERISATION DES PROPRIETES PETROPHYSIQUES		194
ANNEXE III TRAITEMENTS NON RETENUS DE LA THERMOGRAPHIE IR		200
1.	TRAITEMENT N°1	201
2.	TRAITEMENT N°2	202
ANNEXE IV RESULTATS DE LA QUANTIFICATION TENEUR EN EAU PAR LES METHODES IMAGERIE IR ET ELECTRIQUE SUR LES ASSEMBLAGES MULTICOUCHES		205
1.	REPONSE THERMIQUE DES ASSEMBLAGES	206
1.1.	<i>Assemblage CAmHET-BAc-CA</i>	206
1.2.	<i>Assemblage CAmHET-BAf-CA</i>	210
1.3.	<i>Assemblage CAmHOM-BAf-CA</i>	214
1.4.	<i>Synthèse des résultats avec la thermographie infrarouge</i>	218
2.	REPONSE ELECTRIQUE DES ASSEMBLAGES	219
2.1.	<i>Assemblage CAmHET-BAc-CA</i>	219
2.2.	<i>Assemblage CAmHET-BAf-CA</i>	223
2.3.	<i>Assemblage CAmHOM-BAf-CA</i>	227
3.	COMPARATIF DES RESULTATS ELECTRIQUES ET DE THERMOGRAPHIE IR	232
4.	COMPARAISON DES RESULTATS VIS-A-VIS DES MODELES PHENOMENOLOGIQUES	234
ANNEXE V AMELIORATION DES ALGORITHMES DE TRAITEMENT DE THERMOGRAPHIE IR		239
1.	RAPPEL ALGORITHME ORIGINAL	240
2.	NOUVEAU ALGORITHME	240
2.1.	<i>Situation 1</i>	241
2.2.	<i>Situation 2</i>	242
2.3.	<i>Situation 3</i>	242
3.	AUTOMATISATION DU CHOIX DE LA TENEUR EN EAU LE PLUS PERTINENT	244

3.1.	<i>Algorithme de partitionnement k-mean</i>	244
3.1.1	Evaluation du nombre de partitionnements.....	244
3.2.	<i>Choix de la teneur en eau</i>	245
3.2.1	Conditions de l'algorithme 1.....	245
3.2.2	Conditions de l'algorithme 2.....	246
3.2.3	Conditions de l'algorithme 3.....	247
4.	ANALYSE ET PERSPECTIVES.....	249
ANNEXE VI CARACTERISATION DES MATERIAUX PAR MODELISATION NUMERIQUE		250
1.	INTRODUCTION.....	251
2.	RECONSTRUCTION DU MODELE 3D	251
3.	CARACTERISATION DES PROPRIETES PETROPHYSIQUES	253
4.	CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSIQUES.....	254

Liste des figures

<i>Figure 1 : Plan des vestiges des aménagements de l'aire sacrée correspondant à la deuxième phase de construction (II^{ème} siècle) (d'après [23])</i>	8
<i>Figure 2 : Plan des vestiges et des aménagements de la totalité du site correspondant à la deuxième phase de construction (II^{ème} siècle) (d'après [24])</i>	9
<i>Figure 3 : Vestiges du Temple Gallo-Romain de Vaux-de-la-Celle</i>	10
<i>Figure 4 : Localisation géographique du site archéologique des Vaux-de-la-Celle (Carte IGN)</i>	11
<i>Figure 5 : Détails de la carte géologique de la zone géographique sur laquelle se situe le site archéologique de Vaux-de-la-Celle [28]</i>	12
<i>Figure 6 : Profil stratigraphique des niveaux géologiques de la région de Genainville et localisation de la nappe phréatique et des niveaux dans lesquels se situent les vestiges archéologiques par rapport aux niveaux géologiques (modifié d'après [32])</i>	15
<i>Figure 7 : Différentes figures d'altération présentes sur les murs du temple du site archéologique des Vaux-de-la-Celle</i>	16
<i>Figure 8 : Figures d'altération sous forme d'efflorescences et détachements issues des phénomènes répétés des remontées capillaires</i>	17
<i>Figure 9 : Schéma de la section d'un mur du Temple Gallo-Romain et image du mur du temple et de ces fondations (Barrière, 2015)</i>	17
<i>Figure 10 : Exemple de construction d'un mur suivant la technique de opus vittatum mixtum (mur sud du Temple)</i>	19
<i>Figure 11: a) Blocs calcaires de type moellon utilisés sur la partie érigée des structures. b) Détail de l'apparence superficielle du bloc calcaire de type moellon</i>	21
<i>Figure 12 : a) Bloc calcaire de type moyen appareil utilisé pour les fondations des structures. b) Détail de l'apparence superficielle du bloc calcaire de type moyen appareil homogène (CAmHOM). c) Détail de l'apparence interne du bloc calcaire de type moyen appareil hétérogène (CAmHET)</i>	22
<i>Figure 13 :a) Exemple de l'utilisation des matériaux de type brique dans la structure du temple du site de Vaux-de-la-Celle. b) Détail de l'apparence des briques d'origine brunâtres (BAf). c) Détail de l'apparence des briques d'origine rougeâtres (BAc)</i>	23
<i>Figure 14 : Types de mortiers identifiés sur les vestiges du temple Gallo-Romain : 1. Mortier entre assises de briques 2. Mortier de blocage 3 et 4. Mortier entre assise de moellons et assise de briques (mortier de cœur) 5. Mortier de sols 6. Mortier de façades (enduits). (Modifiée d'après [35])</i>	24
<i>Figure 15 : a) Image du mortier de tuileau utilisé pour la pose des sols du temple du site de Genainville. b) Image du mortier de cœur utilisé comme liant principal au temple du site de Genainville</i>	24
<i>Figure 16 : a) Echantillon CA. b) Echantillon CAmHOM. c) Echantillon CAmHET. d) Echantillon MM. e) Echantillon BAc. f) Echantillon BAf</i>	25
<i>Figure 17 : Images des montages expérimentaux concernant les différents assemblages types</i>	26

<i>Figure 18 : Représentation et position des assemblages dans la structure du mur.</i>	<i>27</i>
<i>Figure 19 : Enceinte utilisée pour l'accélération de la carbonatation des mortiers.</i>	<i>28</i>
<i>Figure 20 : Diffractogrammes obtenus sur les échantillons de chaux. Chaque échantillon (1 à 13) correspond à une période de prélèvement.</i>	<i>28</i>
<i>Figure 21 : Mesures de l'évolution de la carbonatation de la chaux des mortiers en fonction du temps.</i>	<i>29</i>
<i>Figure 22 : Protocole expérimental pour la mesure de la porosité à 48h. (a) niveau d'eau à H/4 pendant 1h, (b) niveau d'eau à H/2 pendant 23h (c) niveau d'eau > H pendant 24h ; avec H la hauteur de l'échantillon.</i>	<i>32</i>
<i>Figure 23 : Schéma montrant la notion de mouillabilité.</i>	<i>34</i>
<i>Figure 24 : Schéma montrant le principe d'imbibition.</i>	<i>35</i>
<i>Figure 25 : Schéma montrant l'effet de la microstructure sur les courbes d'imbibition capillaire (Modifié d'après [52]).</i>	<i>37</i>
<i>Figure 26 : Schéma montrant le protocole de mesure et le calcul du coefficient d'imbibition capillaire.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 27 : Système de mesure de la perméabilité au gaz développé par Cydarex.</i>	<i>39</i>
<i>Figure 28 : Méthode triaxiale. Schéma du système mis en œuvre pour la mesure de la perméabilité à l'eau. P1 système de de contrôle de la pression de confinement. P2 : Système de contrôle de la pression d'entrée. P3 : système de contrôle de la pression de sortie. (1) Cellule triaxiale. (2) Vanne de pression d'entrée. (3) Vanne de pression de sortie. (4) Vanne de la pression de confinement. (5) Vanne d'ouverture/fermeture.</i>	<i>41</i>
<i>Figure 29 : Potentiel généré par l'injection de courant dans un milieu infini, homogène et isotrope (image d'après [63]).</i>	<i>45</i>
<i>Figure 30 : Potentiel généré par l'injection de courant dans un demi-espace homogène et isotrope (image d'après [63]).</i>	<i>46</i>
<i>Figure 31 : Représentation schématique de la mesure de la résistivité d'un échantillon (image d'après [63]). .</i>	<i>47</i>
<i>Figure 32 : a) Mesure de la résistivité électrique d'un échantillon en utilisant la méthode uni-axial. b) Mesure de la résistivité électrique d'un échantillon en utilisant la méthode quadripôle (Modifié d'après [66]).</i>	<i>48</i>
<i>Figure 33 : Dispositifs de mesure de la résistivité électrique d'un sol, avec A et B électrodes d'injection (de courant) et M et N électrodes de mesure (de potentiel) (image d'après [63]).</i>	<i>49</i>
<i>Figure 34 : Oscilloscope digital TiePie Handyscope HS5.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 35 : Représentation schématique montrant le mode de fonctionnement des relais reed (d'après [73]). ..</i>	<i>54</i>
<i>Figure 36 : Représentation schématique du microcontrôleur Arduino Mega 2560 Rev.3 avec la description des différents types de voies d'entrée et de sortie</i>	<i>55</i>
<i>Figure 37 : Représentation schématique du système d'acquisition développé montrant les connections entre les trois parties principales (microcontrôleur, matrice de relais et oscilloscope)</i>	<i>56</i>
<i>Figure 38 : Endommagement local (réversible) infligé sur les matériaux de construction du mur par les tests préliminaires utilisant électrodes de type ECG.</i>	<i>57</i>

<i>Figure 39 : a) Schéma montrant l'utilité du ressort pour appliquer une pression de contact similaire pour toutes les électrodes sur une surface irrégulière. b) Mauvais couplages entre électrode et mur du fait de la rugosité de surface. c) Amélioration du couplage en utilisant un embout en feutre souple.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 40 : a) Spécifications techniques des électrodes non-invasives utilisées. b) Electrode développée pour l'optimisation des mesures électriques sur des surfaces irrégulières.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure 41 : Test de sensibilité des électrodes développées et comparaison avec comparé aux électrodes ECG.</i>	<i>59</i>
<i>Figure 42 : Spectre électromagnétique avec détail de la bande spectrale infrarouge.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure 43 : Microbolomètre FLIR A655sc et spécifications techniques.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 44 : Schéma de réalisation d'un élément sensible (pixel) dans une matrice de détecteurs du microbolomètre (modifié d'après [93]).....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 45 : Types d'échantillon utilisés pour les analyses pétrophysiques : a) Echantillon cylindrique. b.1) Bloc à section carrée. b.2) Bloc à section rectangulaire. c) Chutes irrégulières de petite taille.</i>	<i>68</i>
<i>Figure 46 : Image en premier plan du CAMHET montrant les parties homogènes (nh) et les niveaux durcis (nd) correspondant à partie hétérogène.</i>	<i>71</i>
<i>Figure 47 : Identification de la distribution des tailles de pores par injection de mercure pour les différents matériaux de l'étude.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 48 : Analyse des propriétés de transfert d'eau au sein des matrices porales lors d'un essai de d'imbibition capillaire d'eau.</i>	<i>76</i>
<i>Figure 49 : Description du modèle phénoménologique.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 50 : Taille moyenne des échantillons parallélépipèdes de CA et BA.</i>	<i>88</i>
<i>Figure 51 : a) Saturation partielle des échantillons b)Enceinte hermétique utilisée pour homogénéiser la distribution de l'eau au sein des échantillons.....</i>	<i>89</i>
<i>Figure 52 : Electrode développée avec embout permettant d'épouser la surface des échantillons et utilisée pour les analyses de calibration de résistivité en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 53 : Illustration de la scène de mesure et exemple de thermogramme avec les trois régions d'intérêt identifiées sur l'échantillon (ROI 1, ROI 2 et ROI 3) et la région d'intérêt de référence.</i>	<i>91</i>
<i>Figure 54 : Description graphique des différents moments statistiques analyses pour la distribution des températures pour chaque ROI.....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 55 : Histogrammes des valeurs de la température pour les échantillons calcaires (CA) aux différentes teneur en eau pour les trois régions d'intérêt (ROI 1, ROI 2 et ROI 3) et la région d'intérêt de référence.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 56 : Histogrammes des valeurs de la température pour les échantillons briques (BA) aux différentes teneur en eau pour les trois régions d'intérêt (ROI 1, ROI 2 et ROI 3) et la région d'intérêt de référence.</i>	<i>94</i>
<i>Figure 57 : Représentation de l'évolution de la température moyenne en fonction de la teneur en eau, incluant l'intervalle d'erreur défini par l'écart type, des différentes ROI de l'échantillon calcaire (CA).</i>	<i>95</i>
<i>Figure 58 : Représentation des températures moyennes, avec l'intervalle d'erreur défini par l'écart type, des différentes ROI de l'échantillon de brique (BA).</i>	<i>95</i>

<i>Figure 59 : Représentation des modes de la répartition des températures des différentes ROIs de l'échantillon calcaire (CA).....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 60 : Représentation des modes de la répartition des températures des différentes ROIs de l'échantillon brique (BA).....</i>	<i>96</i>
<i>Figure 61 : Différence entre la moyenne et le mode des températures pour les différentes ROI des échantillons calcaires (CA).....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 62 : Différence entre la moyenne et le mode des températures pour les différentes ROI des échantillons briques (BA).....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 63 : Représentation des coefficients de dissymétrie des histogrammes de températures des différentes ROI. Mesures effectuées sur les échantillons de calcaire (CA).....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 64 : Représentation des coefficients de dissymétrie des histogrammes de températures des différentes ROI mesurées sur les échantillons de brique (BA).....</i>	<i>99</i>
<i>Figure 65 : Coefficients d'aplatissement des histogrammes des différentes ROI des échantillons de calcaire (CA).....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 66 : Coefficients d'aplatissement des histogrammes des différentes ROI des échantillons de brique (BA).....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 67 : Identification d'une loi de calibration statique de la méthode d'imagerie thermique IR pour l'identification de la teneur en eau contenue dans le calcaire et la brique.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 68 : Représentation graphique de l'évolution de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau des échantillons de calcaire CA et brique BA.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 69 : Modèle de calibration de la variation de température moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 70 : Modèle de calibration de la variation de la résistivité électrique moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 71 : Modèle de calibration de la variation de la résistivité électrique moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 72 : Modèle de calibration de la variation de la résistivité électrique moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 73 : Présentation des dispositifs de mesure utilisés lors de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation.....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 74 : Représentation de la méthode de traitement du signal électrique continu pour l'obtention des valeurs de la différence de potentiel électrique.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 75 : Exemple de thermogramme montrant la ROI de l'échantillon et de la référence et utilisé pour créer les signaux thermiques.....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 76 : Présentation du signal résultant après l'application du traitement n°3 comparé aux signaux de l'échantillon et de la référence d'origine.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure 77 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons BAc obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.....</i>	<i>115</i>

<i>Figure 78 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons CA obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.</i>	116
<i>Figure 79 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons CAMHOM obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.</i>	116
<i>Figure 80 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons CAMHET obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.</i>	116
<i>Figure 81 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi thermique de la dynamique de désaturation des matériaux calcaires .</i>	118
<i>Figure 82 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi électrique de la dynamique de désaturation des matériaux calcaires (utilisation des électrodes non invasives).</i>	118
<i>Figure 83 : Description phénoménologique des processus survenus pendant l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation pour les matériaux calcaires.</i>	120
<i>Figure 84 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi thermique de la dynamique de désaturation des matériaux de type briques (utilisation des électrodes non invasives).</i>	121
<i>Figure 85 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi électrique de la dynamique de désaturation des matériaux de type briques (utilisation des électrodes non invasives).</i>	121
<i>Figure 86 : Description phénoménologique des processus survenus pendant l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation pour les matériaux de type brique</i>	123
<i>Figure 87 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi thermique de la dynamique de désaturation du matériau de type mortier moderne (utilisation des électrodes non invasives).</i> ..	124
<i>Figure 88 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi électrique de la dynamique de désaturation du matériau de type mortier moderne (utilisation des électrodes non invasives).</i> ..	124
<i>Figure 89 : Description phénoménologique des processus survenus pendant l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation pour les matériaux de type mortier.</i>	126
<i>Figure 90 : Comparaison des résultats concernant la variation de température des expériences statique et dynamique pour les échantillons de type calcaire (CA)</i>	128
<i>Figure 91 : Comparaison des résultats concernant la variation de température des expériences statique et dynamique pour les échantillons de type brique antique foncée (BAf)</i>	128
<i>Figure 92 : Comparaison des résultats concernant la variation de résistivité électrique des expériences statique et dynamique pour le matériau de type calcaire (CA)</i>	129
<i>Figure 93 : Comparaison des résultats concernant la variation de résistivité électrique des expériences statique et dynamique pour le matériau de type brique (BA)</i>	129
<i>Figure 94 : Comparaison des résultats de la variation de la température en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Saturation calculée) et les valeurs réelles mesurés au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Saturation mesurée) pour les matériaux de type calcaire.</i>	130
<i>Figure 95 : Comparaison des résultats de la variation de la température en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Saturation calculée) et les valeurs réelles mesurés au cours de</i>	

<i>l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Saturation mesurée) pour les matériaux de type brique.</i>	131
<i>Figure 96 : Comparaison des résultats de la variation de la résistivité électrique en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Réponse électrique calculée (CA)) et les valeurs réelles mesurés au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Réponse électrique mesurée (CA)) pour les matériaux de type calcaire.</i>	132
<i>Figure 97 : Comparaison des résultats de la variation de la résistivité électrique en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Réponse électrique calculée (BA)) et les valeurs réelles mesurés au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Réponse électrique mesurée (BA)) pour les matériaux de type calcaire.</i>	132
<i>Figure 98 : Disposition de l'assemblage à l'intérieur de la chambre noire.</i>	137
<i>Figure 99 : a) Schéma montrant le moment de déclenchement des appareils de mesures. b) Schéma montrant le moment à partir duquel les mesures sont prises en compte.</i>	138
<i>Figure 100 : Schéma montrant la discrétisation des différents matériaux composant l'assemblage en plusieurs niveaux.</i>	139
<i>Figure 101 : Représentation des relations de calibration (température normalisée ; saturation) prises en compte pour les différents types de matériaux présents dans les différents assemblages étudiés.</i>	140
<i>Figure 102 : Organigramme des étapes de l'algorithme permettant de calculer la masse d'eau absorbée par l'assemblage par la méthode de thermographie IR.</i>	143
<i>Figure 103 : Schéma 3D de la disposition de l'assemblage par rapport à la position de la caméra thermique.</i>	144
<i>Figure 104 : a-b) Schémas montrant la discrétisation en niveaux des différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CA-CA montrant la discrétisation en niveaux.</i>	145
<i>Figure 105 : Evolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CA-CA.</i>	145
<i>Figure 106 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CA-CA.</i>	147
<i>Figure 107 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR de l'assemblage CA-CA.</i>	148
<i>Figure 108 : a-b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CAmHOM-BAc-CA montrant la discrétisation en niveaux.</i>	149
<i>Figure 109: Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	150
<i>Figure 110 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	152
<i>Figure 111 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	153

<i>Figure 112 : Exemple de la forme du signal électrique injecté et reçu avec schéma montrant les paires d'électrodes utilisées.</i>	156
<i>Figure 113 : Signal synthétique utilisé pour effectuer le calcul de la fonction d'inter-corrélation avec le signal injecté.</i>	157
<i>Figure 114 : Niveaux de corrélation entre le signal synthétique et le signal injecté.</i>	158
<i>Figure 115 : Résultat de la fonction enveloppe permettant de positionner les pics correspondant avec la corrélation maximale et donc avec le début de l'intervalle utilisé pour le calcul de la différence de potentiel.</i> .	159
<i>Figure 116 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CA-CA.</i>	160
<i>Figure 117 : Evolution de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CA-CA.</i>	161
<i>Figure 118 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de regression de l'assemblage CA-CA.</i>	162
<i>Figure 119 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CA-CA.</i>	162
<i>Figure 120 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	164
<i>Figure 121 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	165
<i>Figure 122 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de regression de l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	166
<i>Figure 123 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	167
<i>Figure 124 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CA-CA.</i>	170
<i>Figure 125 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	170
<i>Figure 126 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et par les thermogrammes de l'assemblage CA-CA.</i>	172
<i>Figure 127 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et par les thermogrammes de l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.</i>	173
<i>Figure 128 : (a) Signal d'injection adaptée aux mesures de polarisation spontané tandis que l'option (b) Signal d'injection adaptée aux mesures de la mesure de la résistivité électrique.</i>	188
<i>Figure 129 : Présentation du signal résultant après l'application du traitement n°1 comparé au signal de l'échantillon et le signal de la référence.</i>	202

<i>Figure 130 : Représentation du signal de l'échantillon et de la référence et la Transformée de Fourier montrant les raies fréquentielles communes entre les deux signaux.</i>	<i>203</i>
<i>Figure 131 : Représentation graphique du fonctionnement du filtre Band-Stop.</i>	<i>203</i>
<i>Figure 132 : Présentation du signal résultant après l'application du traitement n°2 comparé aux signaux de l'échantillon et de référence d'origine.</i>	<i>204</i>
<i>Figure 133 : a) Thermogramme de l'assemblage CAmHET-BAc-CA montrant la discrétisation en niveaux. b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage.</i>	<i>206</i>
<i>Figure 134: Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>207</i>
<i>Figure 135 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>208</i>
<i>Figure 136 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>209</i>
<i>Figure 137 : a-b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CAmHET-BAf-CA montrant la discrétisation en niveaux.</i>	<i>210</i>
<i>Figure 138: Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>211</i>
<i>Figure 139 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>213</i>
<i>Figure 140 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>214</i>
<i>Figure 141 : a-b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA montrant la discrétisation en niveaux.</i>	<i>215</i>
<i>Figure 142 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>215</i>
<i>Figure 143 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>217</i>
<i>Figure 144 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>218</i>
<i>Figure 145 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>220</i>
<i>Figure 146 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurées à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>221</i>

<i>Figure 147 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de regression de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>222</i>
<i>Figure 148 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>223</i>
<i>Figure 149 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>224</i>
<i>Figure 150 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>225</i>
<i>Figure 151 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de régression de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>226</i>
<i>Figure 152 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>227</i>
<i>Figure 153 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>228</i>
<i>Figure 154 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>229</i>
<i>Figure 155 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de régression de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>230</i>
<i>Figure 156 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>231</i>
<i>Figure 157 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>232</i>
<i>Figure 158 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>233</i>
<i>Figure 159 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.</i>	<i>233</i>
<i>Figure 160 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et celle montré par les thermogrammes de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.</i>	<i>235</i>
<i>Figure 161 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et celle montré par les thermogrammes de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>236</i>
<i>Figure 162 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et celle montré par les thermogrammes de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.</i>	<i>237</i>
<i>Figure 163 : Exemple représentant le cas où plusieurs valeurs similaires de teneur en eau peuvent être attribués à une valeur de température similaire.</i>	<i>241</i>

<i>Figure 164 : Histogramme montrant une distribution unimodale des valeurs de teneur en eau pour une température surfacique donnée.</i>	241
<i>Figure 165 : Exemple représentant le cas où une seule valeur de teneur en eau peut être attribué à un une seule valeur de température.</i>	242
<i>Figure 166 : Exemple représentant le cas où plusieurs valeurs distinctes de teneur en eau peuvent être attribués à un intervalle correspondant à une différence de température inférieur à 1%.</i>	243
<i>Figure 167 : Histogramme montrant une distribution bimodale des valeurs de teneur en eau pour une température surfacique moyenne d'un niveau donné.</i>	243
<i>Figure 168 : Exemple du choix du cluster retenu pour le calcul de la teneur en eau d'un niveau de l'assemblage pour un instant t_j.</i>	245
<i>Figure 169 : Résultats de la prise de masse d'eau calculé par la méthode de thermographie IR en utilisant les conditions des algorithmes 1.</i>	246
<i>Figure 170 : Résultats de la prise de masse d'eau calculé par la méthode de thermographie IR en utilisant les conditions des algorithmes 2.</i>	247
<i>Figure 171 : Choix des conditions utilisés pour l'algorithme par niveau (Niv1 à Niv72) lors de l'attribution de la teneur en eau calculée à partir température surfacique.</i>	248
<i>Figure 172 : Résultats de la prise de masse d'eau calculé par la méthode de thermographie IR en utilisant un code combinant les différentes conditions des algorithmes 1 et 2.</i>	249
<i>Figure 173 : a) Image et histogramme originels utilisés pour la création du modèle numérique, b) image et histogramme résultants de l'application de l'algorithme d'amélioration de contraste, c) image et histogramme résultants de l'application du filtre sur l'image avec le contraste amélioré et d) image binaire utilisée pour la reconstruction 3D.</i>	252
<i>Figure 174 : a) reconstruction 3D par la méthode de concaténation et b) reconstruction 3D par la méthode mathématique</i>	253

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Etat de l'art de la mesure de la teneur en eau (modifié d'après Giovannacci, 2017).....</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 2 : Synthèse des paramètres concernant les caractéristiques pétrophysiques définissant les propriétés de stockage.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 3 : Présentation des résultats de la porosité au mercure et de la distribution de la taille des pores.....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau 4 : Présentation des coefficients de capillarité des matériaux testés.</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 5 : Synthèse des résultats de perméabilité à l'air pour les différents matériaux étudiés.</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 6 : Présentation des résultats de la perméabilité à l'eau des matériaux.</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 7 : Identification des valeurs de saturation en eau pour les deux familles de minéraux.....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 8 : Présentation des coefficients du modèle mathématique permettant de reproduire les données de résistivités et de température expérimentales pour le matériau calcaire.....</i>	<i>105</i>
<i>Tableau 9 : Coefficients R^2 permettant de confirmer la validité de l'ajustement des modèles reproduisant les données thermiques et électriques du matériau calcaire.</i>	<i>106</i>
<i>Tableau 10 : Présentation des coefficients du modèle mathématique permettant de reproduire les données de résistivités et de température expérimentales pour le matériau calcaire.....</i>	<i>107</i>
<i>Tableau 11 : Coefficients R^2 permettant de confirmer la validité de l'ajustement des modèles reproduisant les données thermiques et électriques du matériau de type brique.....</i>	<i>108</i>
<i>Tableau 12 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CA-CA.</i>	<i>146</i>
<i>Tableau 13 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHOM-BAc-CA.</i>	<i>151</i>
<i>Tableau 14 : Synthèse des résultats sur la validité du modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesurée avec la méthode IR et l'erreur moyenne absolue permettant de comparer la teneur en eau mesurée avec la méthode IR et la teneur en eau réelle.....</i>	<i>154</i>
<i>Tableau 15 : Dénombrement et dimensions des différents niveaux discrétisés représentant la totalité de l'assemblage CA-CA.</i>	<i>160</i>
<i>Tableau 16 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHOM-BAc-CA.</i>	<i>164</i>
<i>Tableau 17 : Synthèse des résultats sur la validité du modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesuré avec la méthode IR et l'erreur moyen absolu permettant de comparer la teneur en eau mesuré avec la méthode IR et la teneur en eau réelle.....</i>	<i>169</i>
<i>Tableau 18 : Image de de système d'acquisitions Syscal Junior de IRIS Instruments et les spécifications techniques de l'appareil.....</i>	<i>189</i>
<i>Tableau 19 : Image de de système d'acquisitions Datascan 7321 et les spécifications techniques de l'appareil.</i>	<i>190</i>

<i>Tableau 20 : Image de de l'oscilloscope TiePie HS5 et les spécifications techniques de l'appareil.</i>	<i>191</i>
<i>Tableau 21 : Synthèse des avantages et inconvénients des différents systèmes d'acquisition et appareils décrits dans cet Annexe.....</i>	<i>192</i>
<i>Tableau 22 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHET-BAc-CA.....</i>	<i>208</i>
<i>Tableau 23 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHET-BAf-CA.....</i>	<i>212</i>
<i>Tableau 24 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.....</i>	<i>216</i>
<i>Tableau 25 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHET-BAc-CA.....</i>	<i>220</i>
<i>Tableau 26 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHET-BAf-CA.....</i>	<i>224</i>
<i>Tableau 27 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.....</i>	<i>228</i>

Résumé

Dans le domaine de la préservation des matériaux du patrimoine bâti, l'eau constitue le principal facteur à l'origine de désordres souvent irréversibles. Les mécanismes impliqués correspondent à la cristallisation de sels véhiculés sous forme ionique par les phénomènes de remontées capillaires, à des désordres mécaniques induits par le gonflement d'argiles, ou par la prolifération des micro-organismes imputables à un excès d'humidité persistante.

Depuis de nombreuses années, les acteurs qui œuvrent pour intégrer les sciences du patrimoine dans les concepts de restauration durable, s'intéressent aux méthodes de mesure de la teneur en eau, en privilégiant les méthodes peu intrusives. A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode simple, précise et fiable de mesure de la teneur en eau en contrôle non destructif. C'est ce défi que ce travail de thèse se propose de relever à l'aide de méthodes d'imageries couplées de tomographie électrique et de thermographie infrarouge, appliquées aux matériaux de construction du site archéologique des Vaux de la Celle.

La tomographie électrique permet la mesure de la variation spatiale et/ou temporelle des propriétés électriques liées à la distribution de l'eau dans le volume du matériau considéré, tandis que la thermographie infrarouge fournit les conditions limites au moyen de thermogrammes de surface. La complémentarité des méthodes est mise en valeur à partir des résultats issus des différentes expériences effectuées au cours de cette étude.

Afin de mieux appréhender la problématique complexe des remontées capillaires dans les matériaux constituant le temple Gallo-Romain des Vaux de la Celle, il a été nécessaire de caractériser les principaux matériaux constituant les murs du temple. Dans un premier temps, un effort particulier a été apporté à l'identification puis à l'échantillonnage des différents matériaux originels, en collaboration avec l'équipe d'archéologues en charge du site.

Au cours de l'étude des propriétés pétrophysiques essentielles de ces matériaux, une attention toute particulière a été apportée aux paramètres liés au stockage et au transport de l'eau. Enfin, cette étude a permis de proposer un modèle phénoménologique du transfert de l'eau dans les murs et intégrant les spécificités microstructurales des matériaux assemblés.

Une fois cette étape accomplie, le travail s'est porté sur les techniques proposées et leur optimisation. Ce travail d'optimisation a alors conduit à la mise au point d'une loi de calibration empirique des réponses électriques et de thermographie infrarouge pour chaque matériau en fonction de la teneur en eau. Ces lois de calibration ont été obtenues aussi bien dans un cadre statique, que dans des conditions où les mécanismes de transfert induit des variations rapides de la teneur en eau. La complémentarité des deux techniques est mise en exergue par leur domaine de fiabilité respectif et pour la gamme des valeurs de teneurs en eau potentiellement mesurable *in situ*.

Afin de s'approcher au plus près des conditions du site, des assemblages reproduisant des sections de murs du temple ont été réalisés, avec les différents matériaux provenant du site. Les lois de

calibration déduites précédemment ont alors été appliquées sur ces « fac-similés » afin de mesurer la teneur en eau au cours d'expériences d'imbibition en environnement contrôlé.

La méthode électrique et la thermographie IR sont ainsi utilisées au cours de ces expériences afin d'éprouver et de confirmer leur complémentarité pour mesurer la teneur en eau et sa distribution au sein des matériaux. A partir des résultats obtenus, il apparaît clairement que l'utilisation de ces deux méthodes permet la mesure non destructive de la teneur en eau dans des structures composites simulant une portion de mur gallo-romain. La prochaine étape pour valider la robustesse de la méthodologie développée à l'échelle du laboratoire est désormais sa mise en place sur le terrain.

Abstract

Conservation scientists working on immovable cultural heritage identified water as the main factor at the origin of irreversible damages on stone. Within the different mechanisms involved, the three most common are the crystallisation of salts transported in ionic form by capillary rise, the mechanical disorders induced by the swelling of clays, the growth of micro-organisms due to persistent high water content.

For many years, conservation scientists working on the sustainable restoration concepts have been interested in inhibiting or limiting the change in water content in stone, which can occur due to capillary rise or endogenous condensation. The first step towards it is to measure the change in water content in the stone. In order to do so, development of non-destructive methods for measuring the water content is required. To our knowledge, at this point of time, there does not exist a simple, precise and reliable method for such measurement in a non-destructive manner.

To solve this challenge, this thesis proposes the use of coupled non-destructive methods, the electric tomography and the infrared thermography. These methods were applied to the materials of the archaeological site of Vaux de la Celle.

Electrical tomography allows for measurement of the spatial and/or temporal variation of the electrical properties in the volume of the inspected material, which are linked to the distribution of water in the volume of the material. Infrared thermography provides the thermal boundary conditions by means of surface thermograms. The apparent temperature of the surface can be also linked to the water content. Complementarity of the methods is highlighted by the results of the various experiments conducted during this study.

In order to better understand the complex problem of the water distribution in the Gallo-Roman temple of Vaux de la Celle, the main materials constituting the walls of the temple need to be fully characterized. Therefore, the first step was to identify and then sample the various original materials, in collaboration with the team of archaeologists in charge of the site.

The parameters related to the storage and transport of water in these collected materials are mainly investigated during the petrophysical study. As a result, a phenomenological model of the water transfer in the walls is proposed, which incorporates the microstructural specificities of the materials.

Once this step had been completed, the work focused on the proposed techniques and their optimisation. This optimisation work led to the development of empirical calibration laws for each material as a function of water content. These calibration laws were obtained both in a static mode for a wide range of controlled water content, while dynamic mode was obtained by rapid variations of water content. As a result, the complementarity of the two techniques is highlighted by the range of water content values potentially measurable and their respective ranges of reliability.

To get to the field conditions as close as possible, make-up models were made reproducing wall elements of the temple with different materials sampled on the site. The models were used for imbibition experiments in a controlled environment. The calibration laws deduced previously were then applied to measure the water content. Based on the results obtained during this study, it is evident that the use of the two methods allows the non-destructive measurement of water content in composite structures. The next step is to validate the robustness of the methodology developed in the laboratory conditions by implementing it on the field.

CHAPITRE I

Introduction

Dans le domaine des sciences du patrimoine, les questions concernant la conservation et l'endommagement des structures bâties nécessitent une approche pluridisciplinaire.

Au cours de leur histoire, les structures bâties sont soumises à des phénomènes externes dus à l'interaction avec l'environnement qui produisent des endommagements, soit à cause de leur vieillissement naturel inévitable ou d'évènements particuliers. Les matériaux de construction peuvent être affectés par trois principaux types d'altération :

- les altérations physiques qui peuvent être induites par des actions mécaniques au sein de la structure du matériau de construction ;
- les altérations chimiques induites par des réactions chimiques au sein du squelette solide des matériaux de construction ;
- les altérations d'origine biologique affectant l'apparence et l'intégrité structurale de l'ouvrage.

Tous ces types d'altérations pouvant affecter les matériaux ont en commun le facteur eau. En effet, une grande partie des phénomènes qui induisent des dégradations sur les matériaux de construction sont directement liées aux effets de l'eau. L'eau va être porteuse de solutions au sein de la matrice lors des phénomènes de remontées capillaires ; l'eau peut provoquer le gonflement des argiles ; l'eau gélive va provoquer des dégâts importants et, enfin, l'eau est essentielle à la prolifération des organismes microbiologiques ; ...

C'est en ce sens que l'amélioration des connaissances pour la préservation du patrimoine bâti porte un intérêt spécial aux méthodes permettant d'effectuer des mesures qualitatives et quantitatives de la variation de la teneur en eau au sein des structures. A ce jour, les protocoles aptes à quantifier la teneur en eau de manière précise font appel à des méthodes destructives à l'origine d'endommagements locaux. Cependant, il existe dans la littérature toute une panoplie de méthodes non-destructives ou faiblement intrusives permettant de caractériser la teneur en eau de manière qualitative, voir semi-quantitative. Dans la norme BS EN 16682 [1], il est présenté un travail important sous forme de synthèse de l'état de l'art sur les différentes méthodes de caractérisation de la teneur en eau. Les différentes méthodes recensées sont présentées dans le Tableau 1 en rapportant une clé du principe de la mesure et en distinguant les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

Tableau 1 : Etat de l'art de la mesure de la teneur en eau (modifié d'après Giovannacci, 2017).

Type de mesure	Technique de contrôle	Principe de la mesure	Avantages	Inconvénients	Références
Non-destructives	Radiométrie photométrique	Émission infra-rouge après excitation thermique	Méthodes précises	Impact environnemental de la mesure	[2]
	Radiographie X	Atténuation d'un flux (transmis et réfléchi) de rayonnement électromagnétique, X ou γ		Inadapté du fait du principe même de la mesure (l'onde transmise est inaccessible)	[3–5]
	Résonance Magnétique Nucléaire	Réponse à une excitation magnétique		Système inadapté au milieu à fort taux d'humidité (la pérennité du matériel n'est pas assurée)	[6]
	Ultrasons	Perturbation d'une onde acoustique		<i>Dynamique trop faible</i> , perte d'information (onde transmise inaccessible)	[7]
	Micro-ondes	Perturbations d'une onde		Méthodes rapides	Méthode adaptée pour les milieux fluides
Faiblement intrusives	Mesures capacitives	Variation de fréquence	Facile à mettre en place, aucune connaissance requise du milieu	Nécessite <i>a priori</i> un contact parfait entre le substrat et les sondes	[9–11]
	Mesures résistives	Mesure d'une différence de potentiel		<i>Manque de sensibilité aux fortes teneurs en eau</i> , système très sensible aux sels	[12]

	TDR (réflectométrie électro- magnétique)	Décalage entrée / sortie		Nécessite un contact parfait entre le substrat et les sondes, <i>faible efficacité sur substrat dur</i>	[12–17]
	Fibre optique	Extensomètre isolé (mesure de la déformation)		Prototype <i>inadapté</i> pour une roche	[18]
	Sonde neutron	Mesure d'une tension issue d'une cellule photoélectrique	Méthodes rapides et précises	Problèmes de sécurité et de coût	[19]

Outre l'aspect mesure, nos travaux doivent d'emblée intégrer la difficulté d'opérer des prélèvements ou d'aménagement du positionnement des systèmes de mesures de par l'aspect patrimonial protégé des objets d'études. Dans la mesure du possible, une finalité des travaux devrait être l'adaptabilité pour des mesures directes sur site ; ce qui implique un/des systèmes robustes, fiables et d'appropriation aisée. Bien évidemment, si le facteur coût peut être « optimisé », avec une bonne précision de mesure, c'est un point à ne pas négliger. Après, la possibilité d'obtenir des données ponctuelles ou multidimensionnelles amène aux considérations actuelles de gestion, interprétation et stockage des données. Sans être, à ce stade exhaustif, nous avons là quelques éléments clés qui ont servi de guide au développement de systèmes et de méthodes d'emploi. Les travaux de recherche se sont focalisés sur l'étude de la complémentarité des méthodes non invasives afin de définir un protocole de mesure de la teneur en eau au sein des matériaux de construction.

L'objet d'étude choisi pour tester les différentes méthodes utilisées dans ce travail de recherche est un temple Gallo-Romain faisant partie du site archéologique de Genainville. Les matériaux de construction de ce temple, récupérés lors de fouilles antérieures, ont servi aux différentes expériences afin de tester les performances de méthodes d'imagerie non-invasives.

Au cours de ces travaux de recherche, les méthodes d'imagerie électrique et infrarouge ont été utilisées pour mesurer la quantité et la variation de la teneur en eau des matériaux de construction du temple Gallo-Romain de Genainville avec l'objectif de développer un protocole afin d'effectuer des mesures quantitatives par ces méthodes non-destructives.

Le manuscrit se compose de six chapitres distincts et ce premier chapitre permet d'introduire la thématique de ce travail de recherche.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du site Archéologique de Genainville. La première partie du chapitre concerne la description de la partie architecturale des structures principales du site. Cette description est une synthèse bibliographique issue de rapports archéologiques et autres textes. La deuxième partie est dédiée à l'histoire, au contexte géologique

et géographique du temple et des autres structures érigées du site. Il devient ainsi possible de comprendre les caractéristiques morphologiques particulières du site bien avant l'époque de sa construction et jusqu'à aujourd'hui. Une troisième partie est consacrée à la description des caractéristiques hydrogéologiques particulières du site archéologique. C'est dans cette partie qu'est exposée la problématique environnementale principale qui affecte le site. La partie clôturant ce chapitre porte sur la méthodologie d'échantillonnage retenue, prenant en compte les contraintes spécifiques au regard du statut particulier du site.

Le troisième chapitre est une synthèse bibliographique des différentes méthodes utilisées dans ce travail de recherche. La première partie est consacrée aux méthodes de mesure petrophysiques permettant de caractériser les propriétés de stockage et de transfert des principaux matériaux de construction du temple.

Le quatrième chapitre expose les principes scientifiques des méthodes d'imagerie électrique et d'imagerie infrarouge et se termine par la présentation des différents systèmes d'acquisition, appareils et autres outils utilisés pour mener à bien l'ensemble du plan expérimental.

Le cinquième chapitre expose les résultats des différentes expériences permettant de caractériser les propriétés physiques et de transfert des matériaux de construction testés. La synthèse des résultats de ce chapitre permet de présenter un modèle phénoménologique attendu pour des sections de murs du temple Gallo-Romain sous l'effet des phénomènes d'imbibition/désaturation.

Le sixième chapitre est consacré aux expériences relatives aux méthodes d'imagerie électrique et infrarouge. La première partie du chapitre traite de la calibration permettant de définir les limites des méthodes dans un cadre statique où la teneur en eau est fixée et maintenue constante. Une deuxième partie est consacrée aux tests préliminaires effectués sur les différents matériaux afin de caractériser les limites d'utilisation des différents appareils dans un cadre où une dynamique de désaturation est imposée. Ce chapitre se termine par la présentation des essais conduits sur des échantillons analogues du mur du temple soumis à des contraintes hydriques contrôlées.

Le chapitre sept est dédié à la mesure de la teneur en eau sur les structures du patrimoine bâti, développé au cours de ce travail de recherche. Il s'agit d'une mise en situation des protocoles et méthodes de mesures en considérant un processus d'imbibition contrôlé sur des maquettes d'assemblages des matériaux du site. Ces travaux ont imposé le développement et la fiabilisation d'outils d'interprétation des données avec l'objectif d'évaluer pour chaque méthode faiblement invasive et en combinaison la quantité d'eau accumulée au sein des différents éléments des maquettes.

Finalement, les conclusions que suscite un tel travail viennent clôturer le document.

CHAPITRE II

Contexte et problématique

1. Objet d'étude

Les méthodes d'imagerie électrique et de thermographie IR pour la mesure de la teneur en eau sont testées sur des matériaux en provenance du site archéologique Gallo-Romain des Vaux-de-la-Celle, ensemble classé et protégé au titre des Monuments Historiques (MH) depuis 1941.

Actuellement, le site des Vaux-de-la-Celle [20,21] est constitué des vestiges d'un théâtre et d'un temple, flanqué au sud de bassins et précédé d'une voie dallée conduisant à sa façade Est. Des aménagements généraux et quelques bâtiments secondaires construits sur plusieurs périodes pendant l'occupation Romaine de la Gaule peuvent également y être trouvés.

Non obstant l'importance des vestiges datant de l'époque Gallo-Romaine, le site des Vaux-de-la-Celle est caractérisé par la présence de vestiges bien plus anciens. En effet, ce site archéologique porte les traces d'occupations successives dès la préhistoire.

Les témoins de l'occupation à l'époque préhistorique ont été mise en évidence par les fouilles des archéologues dans les niveaux profonds dans le temple même, galerie Ouest, ou aux abords immédiats à l'Ouest du temple, qui ont donné lieu à la découverte de silex taillés [22].

Sans continuité chronologique avec ce qui précède, des nouvelles traces d'occupation datant de l'époque protohistorique ont été mise en évidence dans la zone à l'Est du temple. Les fouilles archéologiques dans cette zone ont donné lieu à des découvertes plus importantes et plus précises, celles de sépultures constituant un véritable cimetière qu'il est vraisemblable de dater de la fin de l'époque de Hallstatt et du début de l'époque de La Tène [22].

L'occupation Gallo-Romaine est directement liée à l'existence de la source d'eau, qui alimente encore les bassins, et qui est à l'évidence, à l'origine du sanctuaire.

La période Gallo-Romaine est caractérisée par deux phases de construction. La première phase de construction datant du I^{er} siècle a établi les bases qui ont conduit à la création du complexe religieux/culturel de grande ampleur. La seule structure que l'on peut associer à cette première phase est une mare avec l'aménagement de berges construites avec des blocs calcaires et un déversoir fait de deux « imbrices » accolées par leurs grands côtés.

La deuxième phase de construction date du II^{ème} siècle. C'est au cours de cette phase que les principales structures ont été érigées, faisant du site archéologique de Vaux-de-la-Celle un des sites gallo-romains les plus importants d'Ile-de-France [22].

Ce complexe architectural, présenté à la Figure 1 [23] montrant l'aire sacrée, est entouré d'un péribole dont le côté oriental est occupé par le portique qui constitue l'accès principal à l'aire sacrée.

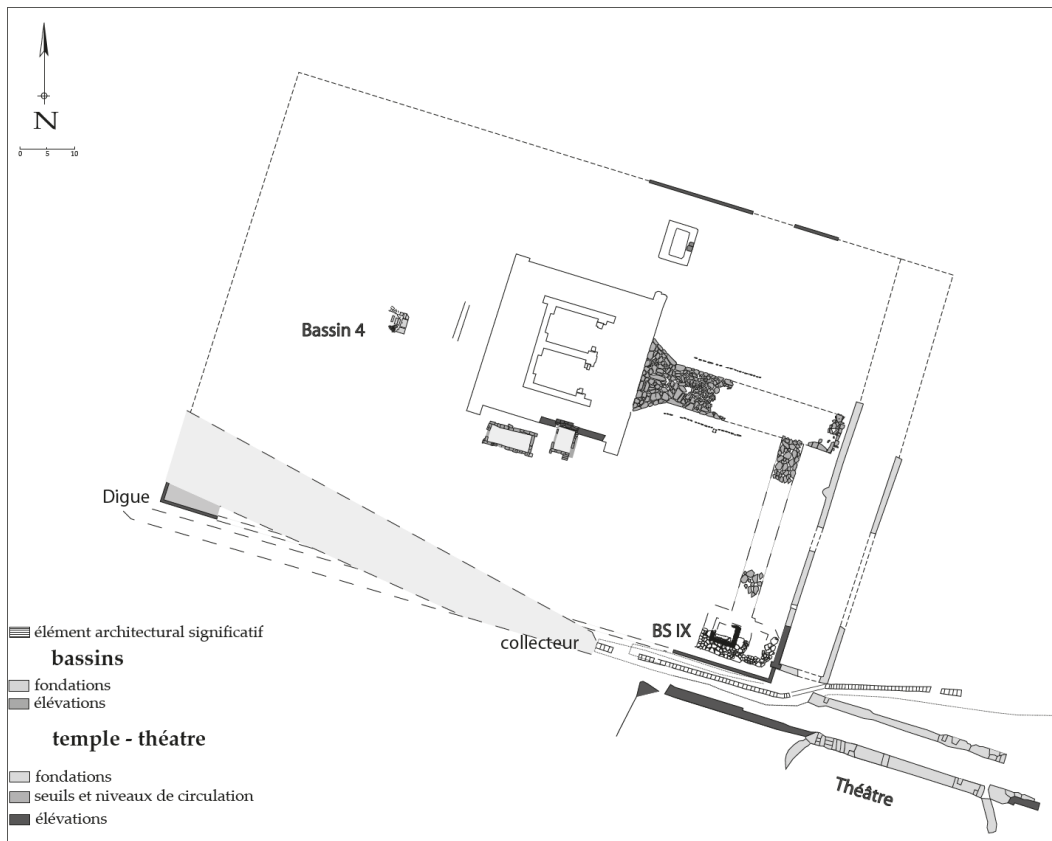


Figure 1 : Plan des vestiges des aménagements de l'aire sacrée correspondant à la deuxième phase de construction (II^{ème} siècle) (d'après [23])

C'est aussi au cours de cette phase qu'ont été érigés les autres édifices ou aménagements généraux présents sur le plan de la Figure 2 [24]. Notamment, le théâtre, qui de par sa taille est un des ouvrages les plus importants du site, ainsi que le Grand Collecteur faisant partie du système de drainage du site et plusieurs bâtiments à usage d'habitation.

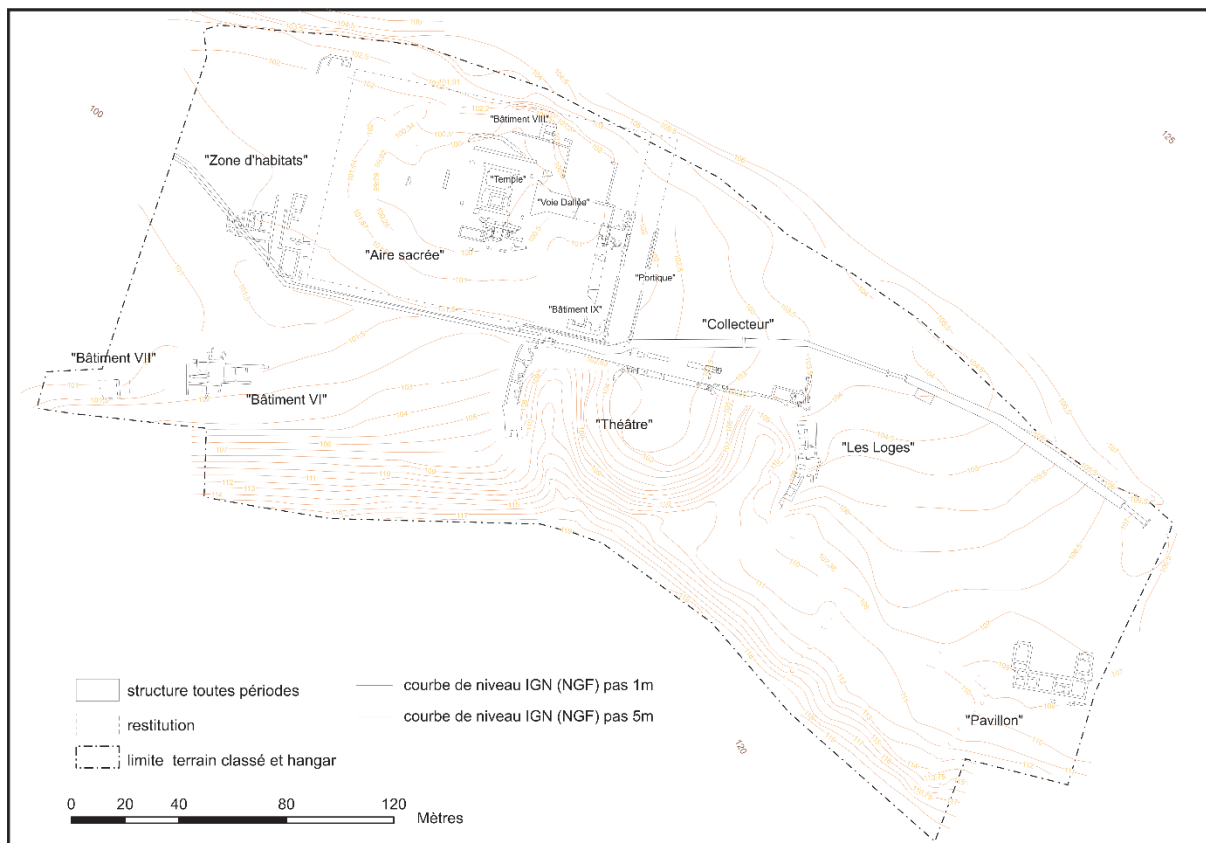


Figure 2 : Plan des vestiges et des aménagements de la totalité du site correspondant à la deuxième phase de construction (II^{ème} siècle) (d'après [24])

Le Temple gallo-romain datant du II^{ème} siècle, construit pendant la deuxième phase des travaux est l'objet principal de ce projet. Redécouvert en 1935, il constitue la pièce centrale du complexe religieux présent sur place [25]. La limite extérieure de cette aire sacrée est définie par un mur péribole présentant un tracé rectangulaire de 111m de longueur et de 77m de largeur dont les côtés ont la même orientation que ceux du Temple auquel il correspond.

L'entrée à l'aire sacrée se fait par la section Est où est érigé un bâtiment allongé caractérisant le portique. En effet, pour se rendre au temple par la voie dallée, il était nécessaire de traverser le portique qui symbolise l'accès à l'aire sacrée. Cet édifice se caractérise par l'existence d'une porte de grande dimension dans le mur Est de celui-ci, dans l'axe de la voie dallée, faisant office d'accès principal.

Le monument le plus important de l'aire sacrée est le Temple, dont de nombreux vestiges subsistent encore. Ce Temple (Figure 3) est constitué par deux *cellae* accolées. La section du bâtiment, étant proche du carré, mesure 27,5 m dans le sens Nord-Sud et environ 28 m dans le sens Est-Ouest dans sa section extérieure.

Les murs latéraux et internes sont construits selon la technique connue sous le nom d'*opus vittatum mixtum*, dont la caractéristique principale est l'alternance des niveaux en petit appareil avec chaînages de briques [26, 27]. Les fouilles archéologiques ont montré que la façade principale,

ouverte vers l'Est et la façade arrière, dont il ne reste rien en élévation, était construite avec des éléments en grand appareil richement orné [24, 25].

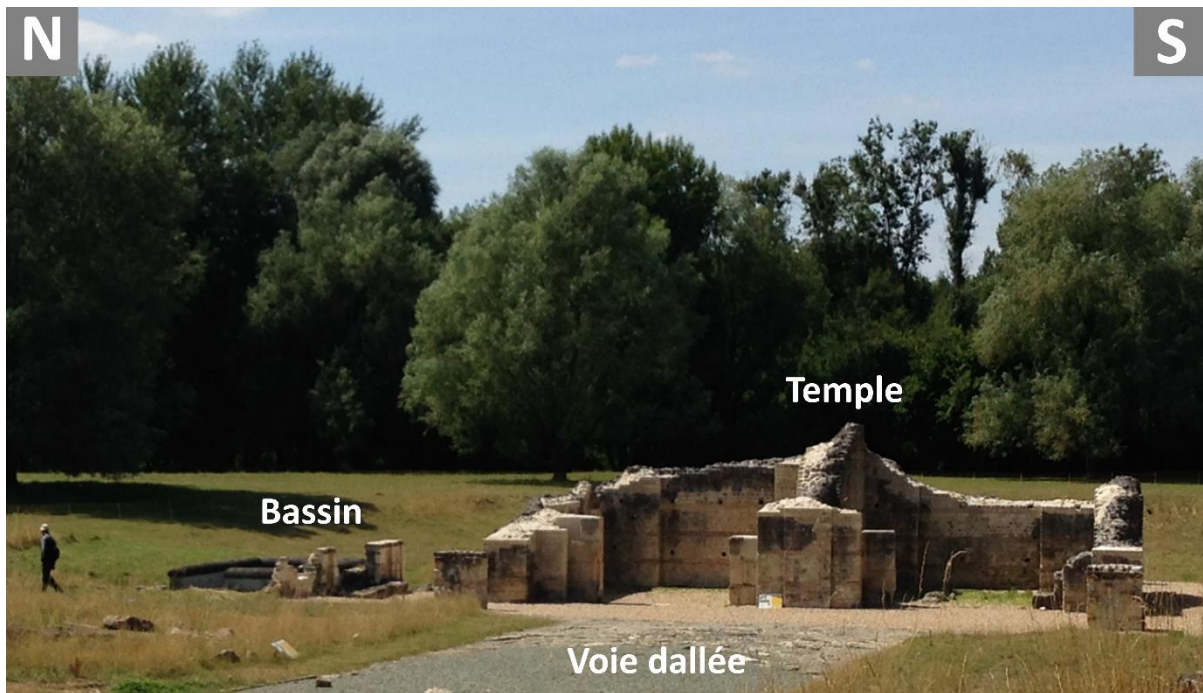


Figure 3 : Vestiges du Temple Gallo-Romain de Vaux-de-la-Celle.

2. Localisation géographique et contexte géologique du site archéologique

L'ensemble archéologique des Vaux-de-la-Celle occupe un site en fond de vallée à l'ouest du Vexin français, à 1,5 km à l'Est du village de Genainville et 3,5 km au sud de Magny-en-Vexin (Figure 4). Le ru de Genainville, qui prend sa source 500 m en aval du site, est tributaire de l'Aubette de Magny, elle-même affluente de l'Epte. Il fait donc partie du système de drains relativement courts qui entaillent vigoureusement le rebord occidental du plateau avant de rejoindre l'Epte et la Seine.

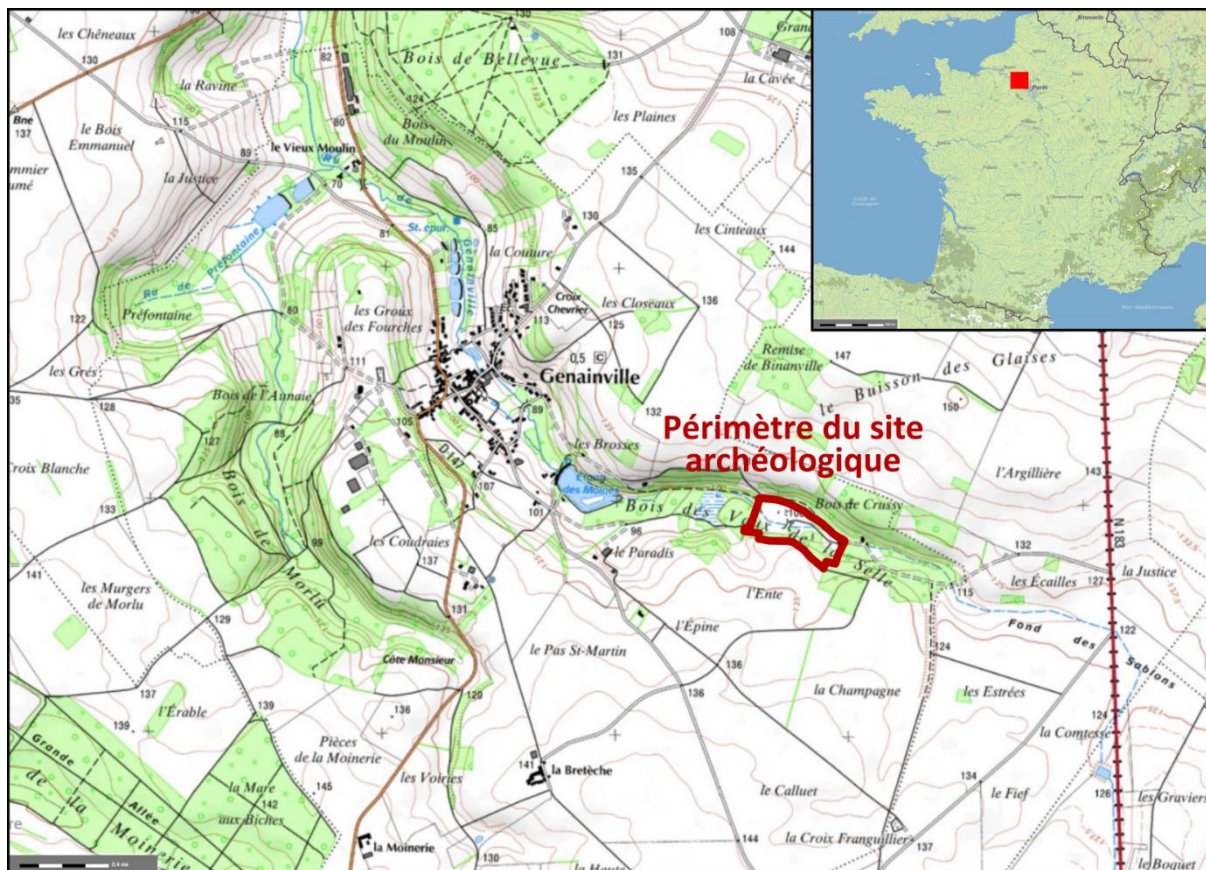
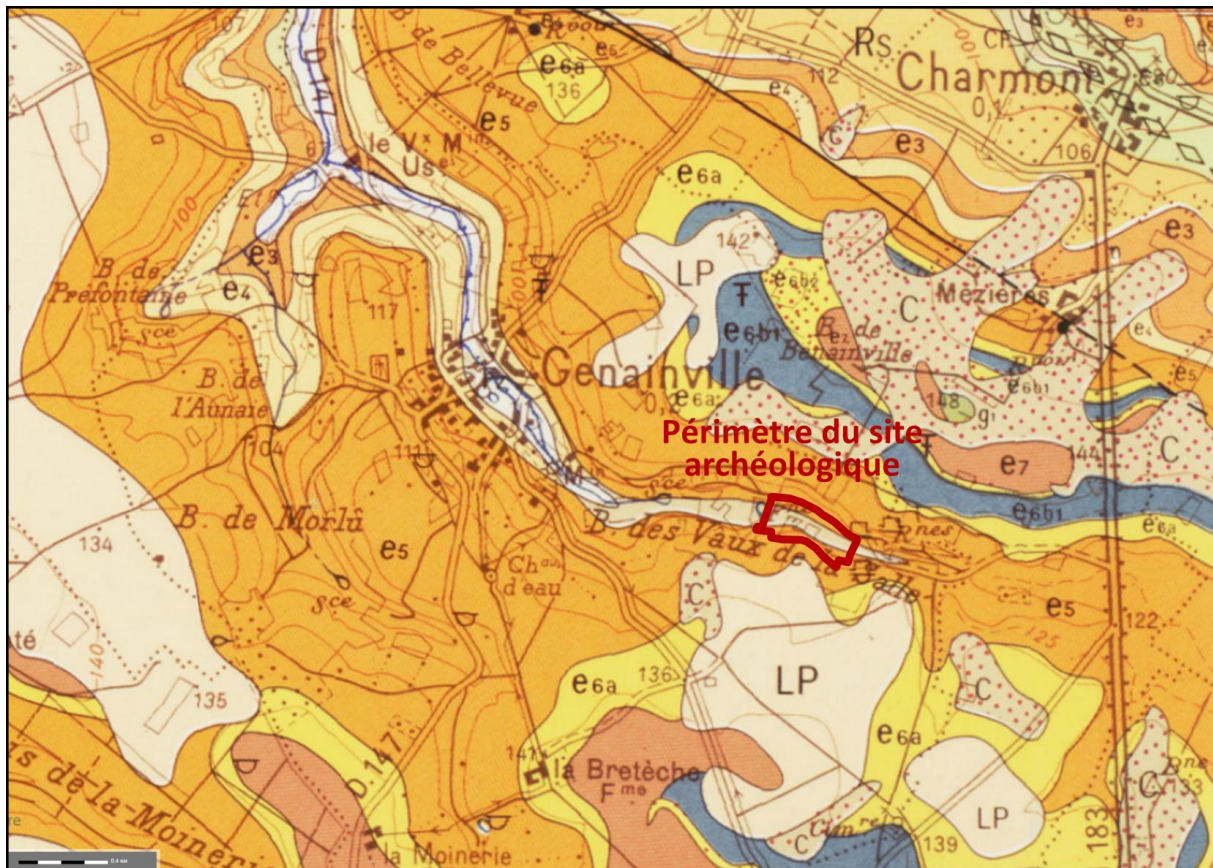


Figure 4 : Localisation géographique du site archéologique des Vaux-de-la-Celle (Carte IGN).

L'histoire géologique qui a façonné la zone dans laquelle se situe le site archéologique de Vaux-de-la-Celle se caractérise par une succession d'événements de sédimentation et d'érosion survenus dans une période de 85 millions d'années [28, 29]. Les informations fournies par le BRGM [28] permettent d'identifier les terrains géologiques de la zone de Genainville dans laquelle se situe le site (Figure 5).



e ₃	Yprésien inférieur Argile plastique bariolée	e ₇	Bartonien supérieur Calcaire de Champigny
e ₄	Yprésien supérieur Sables de Cuise	R _S	Argile résiduelle à silex
e ₅	Lutétien Calcaire grossier	LP	Limon des plateaux
e _{6a}	Bartonien inférieur Sables d'Au vers et de Beauchamp	C	Dépôts de pente à silex ou à meulière
e _{6b1}	Bartonien moyen Calcaire de Saint-Ouen		

Figure 5 : Détails de la carte géologique de la zone géographique sur laquelle se situe le site archéologique de Vaux-de-la-Celle [28].

Les descriptions des terrains géologiques et les codes alphanumériques permettant de les identifier ont été reprises de la notice géologique de Mantes-la-Jolie [28]. Les terrains géologiques affleurants sur la zone où se situe le site archéologique correspondent aux couches géologiques suivantes :

e3. Yprésien inférieur (Sparnacien) : Argile plastique bariolée.

La sédimentation caractérisant l'Yprésien inférieur (Sparnacien) correspond principalement à des niveaux constitués de matériaux argileux. Les niveaux argileux Sparnacien débutent par des couches d'argile plastique (smectites) d'origine continentale, et postérieurement, avec des influences marines. L'argile plastique est à dominance de kaolinite avec un peu d'illite. Des aiguilles de gypse y sont fréquemment rencontrées.

e4. Yprésien supérieur (Cuisien) : Sables de Cuise.

A l'Yprésien supérieur (Cuisien) une transgression marine progressive conduit aux dépôts de sables argileux qui se poursuit avec l'envahissement par la mer de la totalité du Bassin Parisien avant une courte émergence à la fin du Cuisien ayant par origine une phase tectonique importante affectant tout le Bassin de Paris.

Le Sable de Cuise est jaunâtre, argileux (montmorillonite), micacé, légèrement glauconieux, localement grésifié dans le Vexin où on rencontre des blocs mamelonnés de grès roussâtre qui en proviennent.

e5. Lutétien : Calcaire grossier.

Au Lutétien inférieur, un nouveau phénomène de transgression marine, érode dans un premier temps tout ou partie des sables Cuisiens sur les hauts fonds en creusant des chenaux où des sables grossiers avec de vastes stratifications obliques sont déposés. La transgression marine s'affirme progressivement et atteint son maximum au Lutétien moyen. Cette période est caractérisée par un changement de la nature des dépôts sédimentaires qui deviennent plus carbonatés (calcaires à *Nummulites laevigatus*) [30]. Au Lutétien supérieur, se produit un phénomène de régression marine induisant un changement dans le régime sédimentaire favorisant davantage les dépôts lagunaires, interrompu par de brèves incursions marines, marquées principalement par des marnes et caillasses.

Les couches affleurantes sur le site sont celles du Lutétien moyen à faciès zoogène correspondant à un calcaire bioclastique légèrement quartzeux et glauconieux à ciment sparitique. Le minéral argileux est un interstratifié glauconite-smectite. Epais de 20 à 30 m, il a été largement exploité pour pierre à bâtir, généralement en carrières souterraines aujourd'hui abandonnées. Il est fréquemment perforé par des puits et des galeries karstiques bien visibles à Genainville, dans les carrières souterraines de Vaux de la Celle.

e6a. Bartonien inférieur (Auversien) : Sables d'Auvers et de Beauchamp

Après l'épisode de régression marine de la fin du Lutétien, le Bartonien inférieur (Auversien) montre à la base des alternances de dépôts marneux lacustres, des dépôts sableux fluvio-lacustres et des dépôts sableux marins.

e6b1. Bartonien moyen (Marinésien) : Calcaire de Saint-Ouen.

La fin du Bartonien inférieur est caractérisée par une sédimentation laguno-lacustre avec des intercalations laguno-marines (calcaires et sables) au début du Bartonien moyen.

Les premiers dépôts du Bartonien moyen correspondent à des calcaires blanchâtres, crème ou brunâtre, parfois sublithographiques ou noduleux à empreintes de mollusques, avec persistance des argiles fibreuses, de l'illite et présence de silex.

e6b2. Bartonien moyen (Marinésien) : Sables de Cresnes.

Les niveaux calcaires du début du Bartonien moyen sont superposés par des sédiments marins sableux, accompagnés localement de galets de silex. Ils sont représentés par quelques mètres de sables jaunes, fins à stratification irrégulière.

e7. Bartonien supérieur (Ludien) : Calcaire de Champigny.

Les sables grésifiés du Bartonien moyen, sont recouverts au Bartonien supérieur (Ludien) par des dépôts de sables marins puis par des formations laguno-lacustres où prédominent les marnes.

Rs. Argile résiduelle à silex.

C'est un produit d'altération de la craie développé après l'exondation post-oligocène du Bassin de Paris sur les plateaux où affleure le Crétacé.

LP. Limon des plateaux.

Ce terme englobe deux formations distinctes :

- 1) Limon des plateaux proprement dit, situé surtout au sommet des plateaux, avec une épaisseur assez faible (environ 1 m), de texture sablo-argileuse ; sa granulométrie et sa composition pétrographique reflètent la nature du substratum ; ils peuvent contenir des petits fragments calcaires, ainsi que des grains de quartz repris des Sables de Lozère dans la partie ouest de la feuille. Ils reposent parfois sur les argiles à silex. Ils sont alors plus argileux et renferment des fragments de silex.
- 2) Loess, en placage sur les versants exposés à l'Est ou au Nord-Est.

C. Dépôts de pente à silex ou à meulière.

C'est une formation superficielle caillouteuse de pente dont le contenu pétrographique dépend du substratum : silex et fragments de craie sur Crétacé et sur argile à silex, petits galets noirs à proximité du Cuisien, fragments de Calcaire grossier enrobés parfois dans une matrice argilo-sableuse jaune, fragments de meulière ou de calcaire siliceux près des affleurements Ludiens et sannoisiens. S'y ajoutent, dans la partie ouest de la feuille, des Sables de Lozère, lorsque ces derniers sont bien représentés sur les plateaux. Dans le Vexin français, ils forment un vaste épandage entre Genainville et Charmont, au Nord de la butte d'Arthies, où à la meulière s'ajoutent les grès bartoniens. Les dépôts de pente ont une plus grande extension sur les versants exposés à l'Est et au Nord-Est.

3. Contexte hydrogéologique du site

Le site de Vaux-de-la-Celle est étroitement lié à l'omniprésence de l'eau. D'une part, les caractéristiques géomorphologiques du site sont directement en lien avec l'action de l'eau qui a façonné la vallée dans laquelle se situent les vestiges archéologiques, et d'autre part, la présence des sources naturelles dans ce lieu est le facteur déterminant de la création de ce complexe religieux et culturel Gallo-Romain [28].

Les eaux souterraines sont à l'origine des nombreuses sources présentes dans le site des Vaux-de-la-Celle, situées au toit des argiles sparnaciennes. Ce système d'eaux souterraines est contenu dans les niveaux perméables des sables cuisiens et des calcaires lutétiens et bartoniens surmontant les niveaux argileux imperméables sparnaciens.

La coupe stratigraphique présentée sur la Figure 6 introduit le contexte hydrogéologique caractérisant le site [31]. Il est défini par la présence d'une nappe phréatique, dont l'existence est directement liée à ce contexte géologique particulier qui a permis le stockage des eaux souterraines.

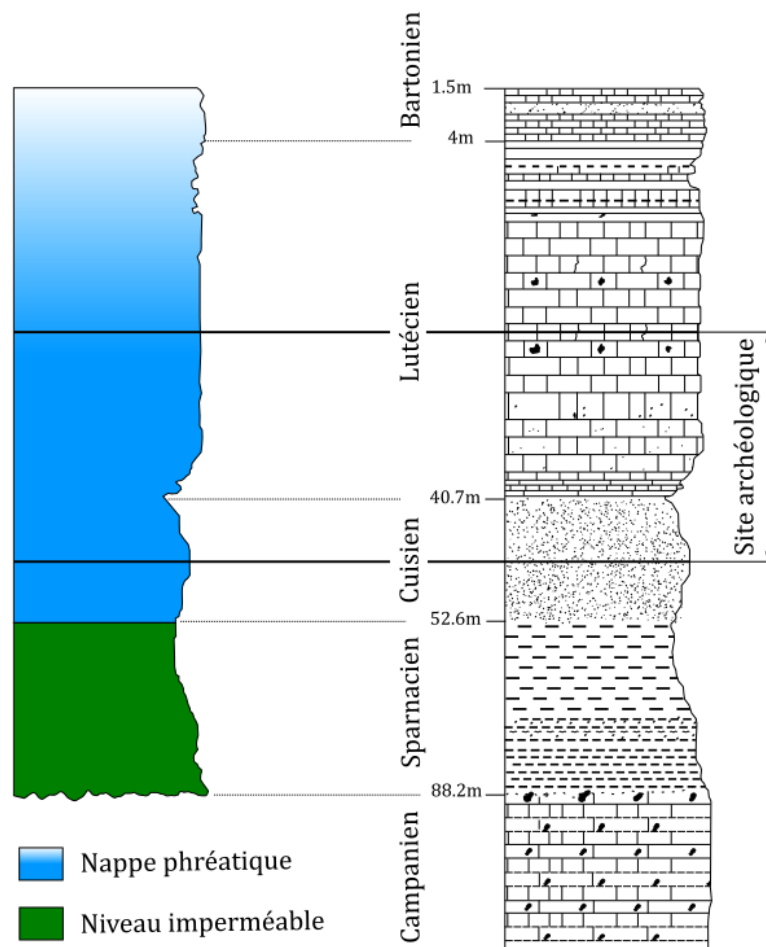


Figure 6 : Profil stratigraphique des niveaux géologiques de la région de Genainville et localisation de la nappe phréatique et des niveaux dans lesquels se situent les vestiges archéologiques par rapport aux niveaux géologiques (modifié d'après [32]).

L'incision de la vallée induite par l'action de l'érosion des niveaux topographiques les plus bas, atteint les couches de calcaire Bartonien et Lutécien et de grès Cuisiens abritant la nappe phréatique. Ce contexte géomorphologique particulier a comme conséquence l'affleurement de la nappe phréatique dans les niveaux les plus profonds de la vallée où le complexe religieux a été érigé.

Il est donc évident que le site des Vaux-de-Ia-Celle présente un intérêt hydrogéologique exceptionnel. En effet, l'existence de ce site doit son origine aux caractéristiques topographiques, géologiques et hydrogéologiques rencontrées dans la vallée de Genainville.

4. Le phénomène de remontée capillaire dans le mur du temple gallo-romain de Genainville

Le mur du temple Gallo-Romain montre différents types d'altérations pouvant être reliées à la présence de l'eau au sein de la structure (Figure 7).

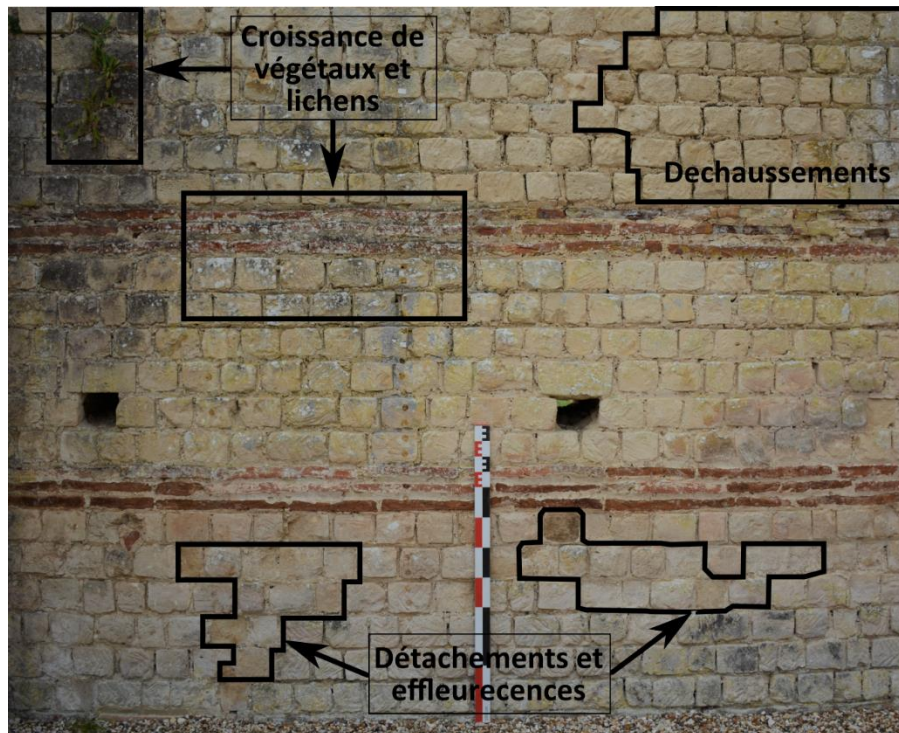


Figure 7 : Différentes figures d'altération présentes sur les murs du temple du site archéologique des Vaux-de-la-Celle.

Parmi les différentes figures d'altération visibles sur le mur, on observe des morphologies d'altération récurrentes sur la partie basale du mur correspondant à des efflorescences et sub-efflorescences pouvant entraîner des détachements [33].

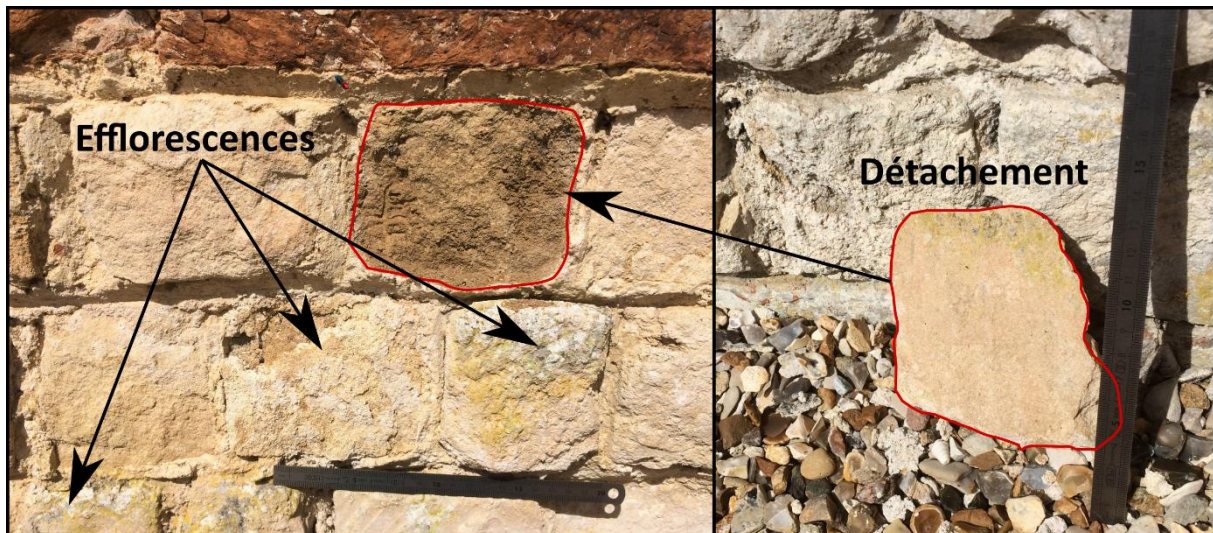


Figure 8 : Figures d'altération sous forme d'efflorescences et détachements issues des phénomènes répétés des remontées capillaires.

Ces figures d'altération sont en partie imputables aux variations cycliques de la teneur en eau. Du fait de leur localisation sur le mur, il est très probable que les variations de la teneur en eau à l'origine des endommagements soient une conséquence directe de phénomènes très fluctuants de remontées capillaires. Cette hypothèse est renforcée par l'existence d'une source d'eau en permanence à proximité, à savoir la nappe phréatique affleurante.

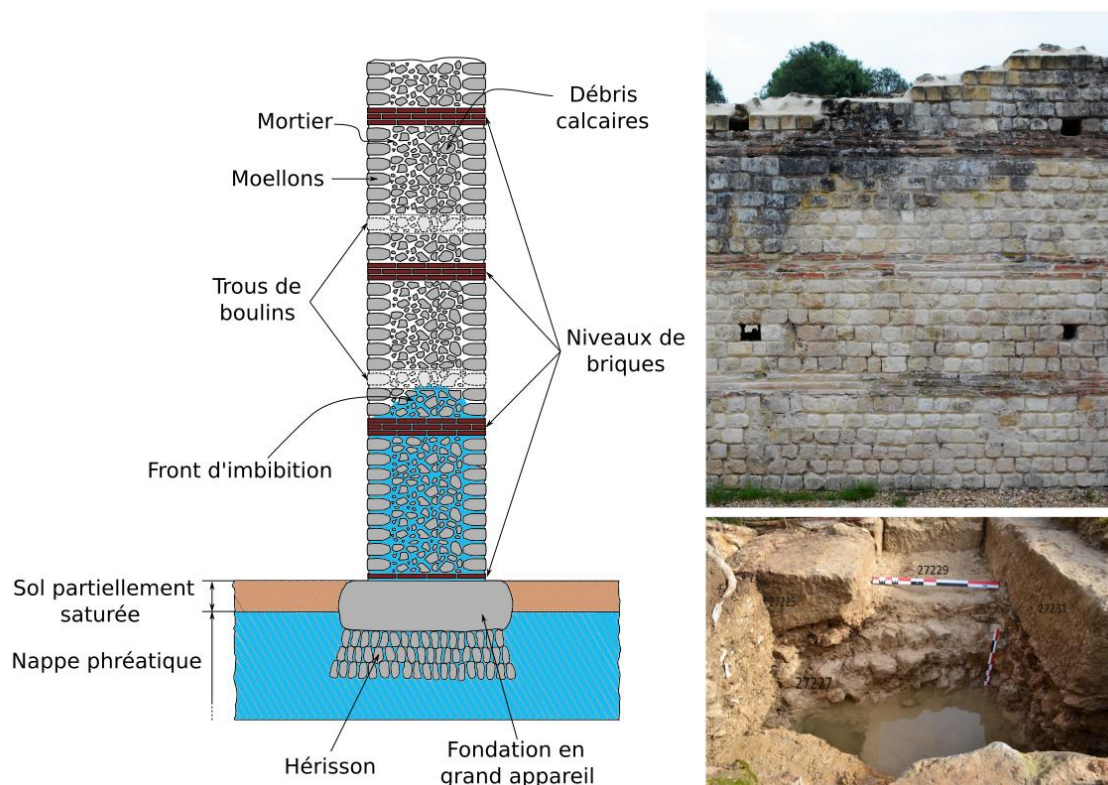


Figure 9 : Schéma de la section d'un mur du Temple Gallo-Romain et image du mur du temple et de ces fondations (Barrière, 2015).

Le Temple étant construit sur un terrain abritant une nappe affleurante, il existe une interaction évidente entre la nappe et la structure (Figure 9). Ce contexte hydrogéologique particulier a suscité les bases de la problématique traitée dans ce projet de recherche qui a pour objectif d'identifier les fluctuations de teneur en eau et sa distribution au sein des matériaux pierreux soumis à imbibition dans un contexte naturel.

Outre le fait que les fluctuations de la nappe constituent le moteur des phénomènes de succion capillaire, les propriétés pétrophysiques des matériaux constitutifs du mur sont déterminantes pour appréhender l'évolution des phénomènes d'imbibition de la structure maçonnée. C'est pour cette raison qu'une partie importante de ce projet de recherche se focalise sur l'étude des caractéristiques des différents matériaux constituant le mur.

5. Matériaux étudiés

Les phénomènes de remontée capillaire affectent le temple Gallo-Romain de Genainville dans son ensemble. Il est donc nécessaire d'en étudier les caractéristiques architecturales des structures. Cette analyse permettra alors de définir une stratégie d'échantillonnage optimisée.

5.1. Caractéristiques architecturales du Temple

5.1.1 Fondations

Les fondations supportant les murs des façades Est et Ouest sont constituées de gros blocs calcaires alignés sur deux rangées dont la largeur totale est d'environ 2 m. Ces gros blocs reposent sur un hérisson de pierres dures (pierres grossièrement taillées de forme trapézoïdale) posées de manière à ce que sa plus grande face et la plus étroite soit en contact avec les blocs de fondations.

Les fondations du mur latéral Sud sont constituées par des gros blocs calcaires débordant largement l de la base du mur. La présence de la fontaine naturelle est à l'origine de fragilités des sols dans cette zone. Pour pouvoir supporter le poids du bâtiment sur ce terrain fragile, la largeur des semelles calcaires est plus importante. La largeur moyenne de ces fondations est de plus de 2,50 m pour une élévation beaucoup plus réduite (dimension décimétrique).

Les autres murs du temple reposent sur une semelle composée de blocs en moyen appareil calcaires, bien taillés et superposés sur trois assises, débordant par rapport à la largeur du parement en élévation d'environ 8 cm. Les blocs en moyen appareil reposent sur un hérisson comparable à celui supportant les blocs des façades Est et Ouest.

5.1.2 Murs

La méthode constructive représentée sur la Figure 10 est connue sous le nom de *opus vittatum mixtum* [26, 27]. La particularité principale de ce type de construction réside dans l'alternance de maçonneries en petit appareil et des niveaux de briques de chaînage.



Figure 10 : Exemple de construction d'un mur suivant la technique de opus vittatum mixtum (mur sud du Temple).

Les éléments en petit appareil sont constitués de moellons calcaires réguliers à queue pyramidale tronquée. Les moellons courants présentent une face frontale carrée ou rectangulaire de 9 à 10 cm de côté et une longueur allant de 8 à 22 cm. Cependant, les extrémités des murs comportent des chaînes d'angle formées de moellons beaucoup plus longs, d'environ 50 à 60 cm disposés en besace. Ces moellons spéciaux montrent à leur surface des incisions en forme d'arêtes de poisson.

Les niveaux de briques de chaînage sont constitués par des briques de 3,5 cm d'épaisseur. La surface de ces briques a des dimensions variables, mais la majorité des briques a une surface de 32 x 47 cm². Cependant certaines parties du mur présentent des briques aux dimensions moins régulières, de 28-31,5 cm x 42-44 cm.

Les joints de mortier du parement ont généralement 1,5 cm d'épaisseur entre les assises de moellons et 2 cm entre les assises de briques.

La partie interne du mur est constitué d'un blocage de pierrailles et autres éléments de récupération assemblés par du mortier.

Quant aux briques, elles s'étendent en couches horizontales qui traversent le parement de part et d'autre, et sont posées à plat alternativement dans le sens longitudinal puis transversal, suivant la technique du chaînage.

Les trous de boulins qui traversent les murs ont une fonctionnalité pratique et servent à fixer les échafaudages lors de la construction du mur. En effet, lors de la construction de l'édifice, des

boulins posés en travers du mur étaient utilisés pour supporter des planches d'échafaudage permettant aux ouvriers de travailler en élévation. L'opération était renouvelée au fur et à mesure que le mur se montait.

5.2. Choix des matériaux d'étude

Le choix des matériaux est une étape cruciale qui va déterminer la suite du projet de recherche. En effet, il est important de s'assurer que les matériaux choisis pour effectuer les différentes expériences sont représentatifs du mur du Temple sur lequel est centré le projet de recherche.

La difficulté de cette étape est due à plusieurs facteurs. D'une part, les multiples restaurations qui ont eu lieu sur le site au cours des 50 dernières années font que l'identification des matériaux d'origine reste une tâche complexe. D'autre part, l'extraction d'échantillons est très contrôlée et limitée parce que le site est classé au titre des Monuments Historiques depuis 1941. Il a également fait l'objet d'une inscription parmi les 30 sites et monuments historiques du patrimoine national retenus pour sa représentativité au titre de la loi-programme de 1988 relative au patrimoine monumental.

La sélection des matériaux représentatifs est effectuée suite aux observations préliminaires [20, 26, 27] et prenant en compte les informations apportées par les archéologues V. Barrière et D. Vermeersch, en charge de différents études et des fouilles du site archéologique.

Ces observations et les échanges avec les archéologues ont permis de définir trois familles principales de matériaux. La première famille concerne les pierres calcaires qui correspondent au matériau de construction prédominant. La deuxième famille concerne les briques qui malgré leur quantité limitée dans la maçonnerie, ont un intérêt structural majeur du bâti. La troisième famille concerne le mortier qui est le matériau qui assure la cohésion des éléments de la structure.

Chaque famille regroupe différents matériaux qui malgré leur nature comparable, présentent des caractéristiques ou des propriétés différentes.

5.2.1 Les calcaires

La famille des pierres calcaires comporte deux grands types : les blocs de calcaire de type moellon et les blocs de moyen appareils utilisés pour les fondations.

Les constructeurs romains ont prélevé le calcaire dans les carrières excavées directement sur les flancs de la vallée où se situe le temple. Le calcaire des strates exploitées par les Gallo-Romains, correspondent aux couches du Lutétien moyen à faciès zoogène représenté par un calcaire bioclastique légèrement quartzeux et glauconieux à ciment sparitique. Ces niveaux exploités du stratotype Lutétien [30], se caractérisent par sa grande homogénéité dans son ensemble, à l'exception de niveaux plus indurés et parfois très fins présents dans certains blocs. Ces hétérogénéités sont représentées par le sous-ensemble des calcaires de moyen appareil hétérogène (CAmHET).

5.2.1.1 Calcaire de type moellon

Les blocs calcaires sous forme de moellon (CA) sont utilisés pour les murs en élévation selon la technique de construction de type *opus vittatum mixtum* décrit précédemment, Figure 11.

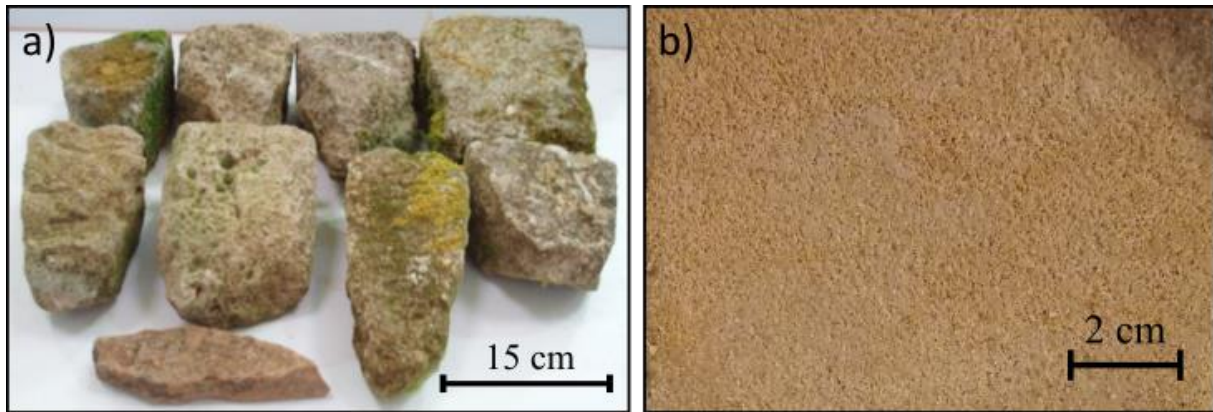


Figure 11: a) Blocs calcaires de type moellon utilisés sur la partie érigée des structures. b) Détail de l'apparence superficielle du bloc calcaire de type moellon.

5.2.1.2 Les blocs calcaires dits de moyen appareil

Utilisé pour les fondations du temple, ce type de blocs calcaires peut présenter des hétérogénéités locales. C'est pourquoi ces blocs ont été subdivisés (Figure 12) en blocs calcaires de type moyen appareil homogènes (CAmHOM), caractérisés par leur homogénéité, et en blocs calcaires de moyen appareil hétérogènes (CAmHET), également utilisés pour les fondations et qui présentent des hétérogénéités stratigraphiques visibles à l'œil nu.

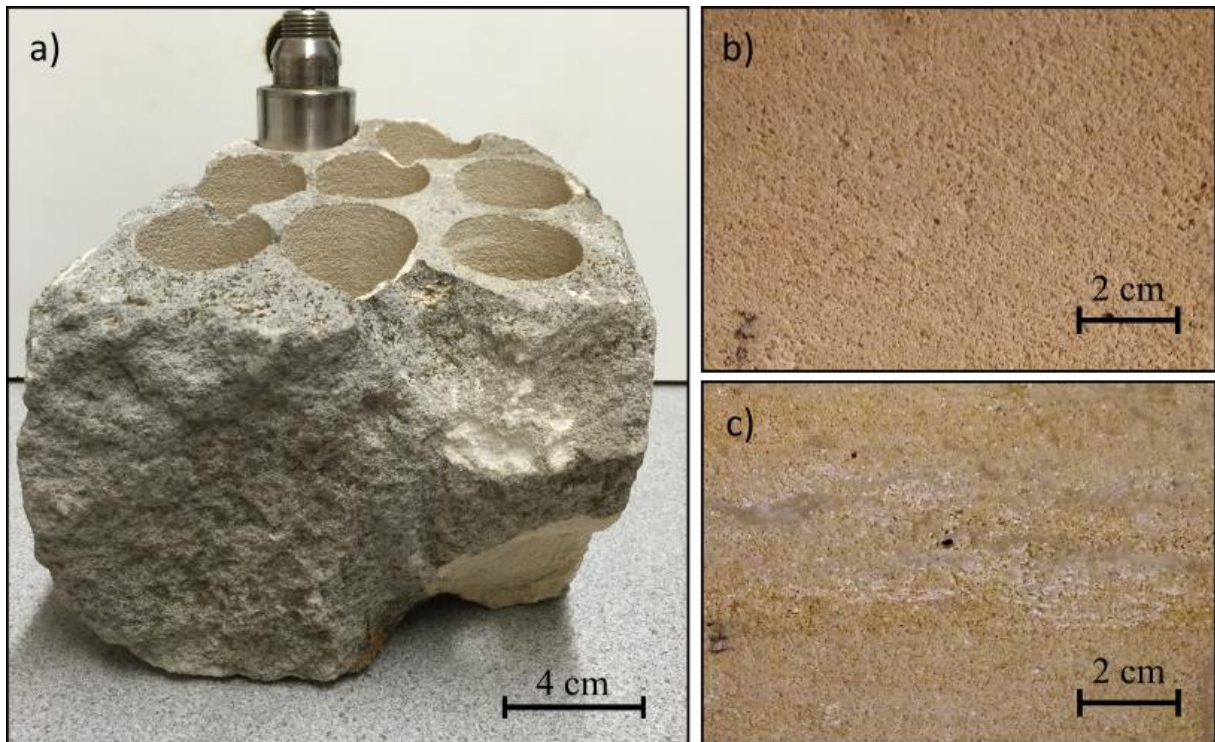


Figure 12 : a) Bloc calcaire de type moyen appareil utilisé pour les fondations des structures. b) Détail de l'apparence superficielle du bloc calcaire de type moyen appareil homogène (CAmHOM). c) Détail de l'apparence interne du bloc calcaire de type moyen appareil hétérogène (CAmHET).

5.2.2 Les briques d'argile cuite

Les briques originelles présentes dans les structures peuvent être différenciées selon deux caractères : la couleur et l'état de conservation. Etant donné qu'il est possible d'observer sur une même brique des teintes allant du rougeâtre clair au brunâtre foncé, cette différence peut plus probablement être attribuée au processus de cuisson plutôt qu'à une origine différente des matériaux constitutifs, d'où l'existence de deux qualités bien distinctes à l'échelle macroscopique.

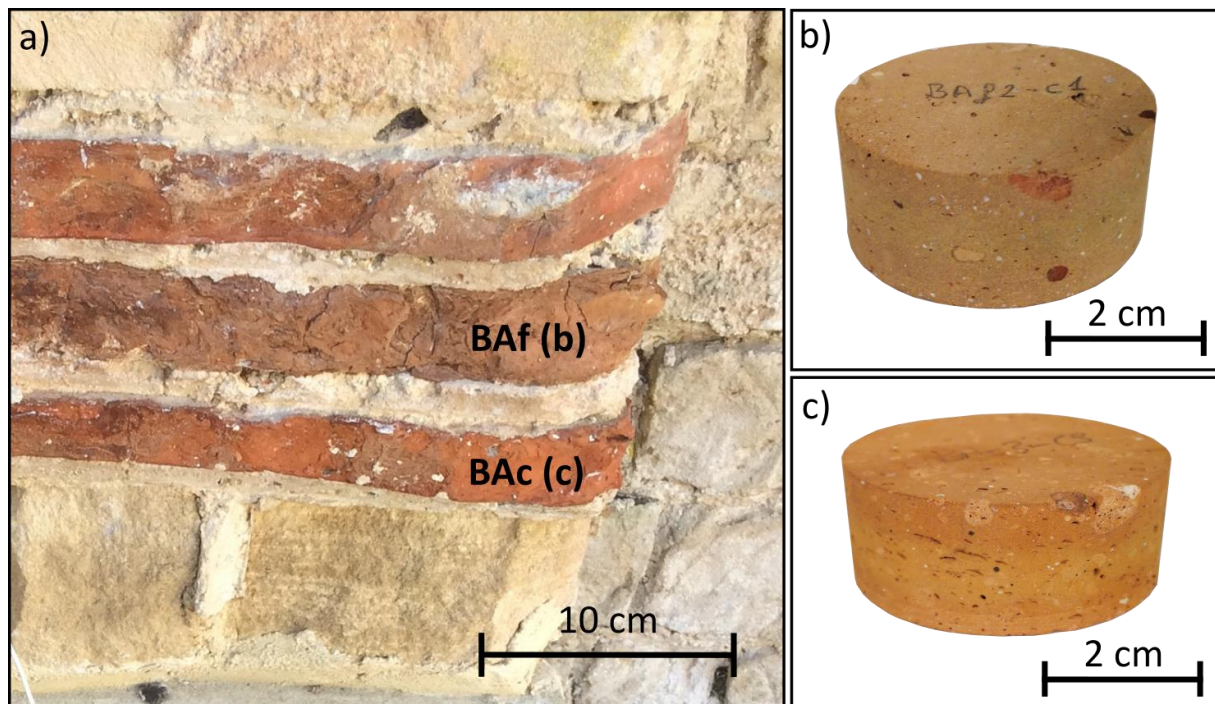


Figure 13 :a) Exemple de l'utilisation des matériaux de type brique dans la structure du temple du site de Vaux-de-la-Celle. b) Détail de l'apparence des briques d'origine brunâtres (BAf). c) Détail de l'apparence des briques d'origine rougeâtres (BAc).

La famille des briques, illustrée à la Figure 13, est composée par :

- Les briques anciennes ayant une coloration rougeâtre plus claire (BAc),
- Les briques anciennes ayant une coloration brunâtre plutôt foncée (BAf).

5.2.3 Les mortiers

5.2.3.1 Les mortiers anciens

Lors de la construction du temple, différentes qualités de mortier ont été utilisées. Les observations et analyses préliminaires ont montré l'utilisation d'au moins trois types de mortier.

A l'heure actuelle, plusieurs types peuvent être distingués dans les vestiges du temple. Selon leurs fonctions et/ou leurs zones de mise en œuvre, cinq catégories principales peuvent être observées (Figure 14).

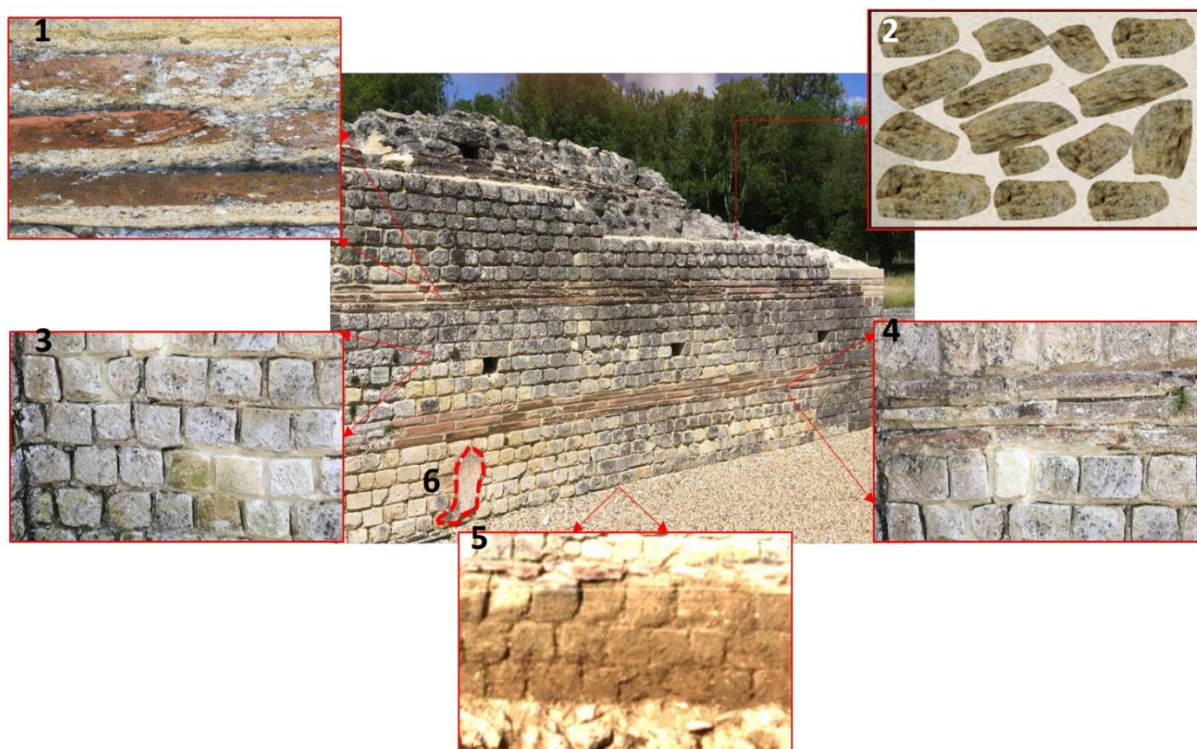


Figure 14 : Types de mortiers identifiés sur les vestiges du temple Gallo-Romain : 1. Mortier entre assises de briques 2. Mortier de blocage 3 et 4. Mortier entre assise de moellons et assise de briques (mortier de cœur) 5. Mortier de sols 6. Mortier de façades (enduits). (Modifiée d'après [35]).

Parmi les différents types de mortiers, seulement deux types de mortiers d'origine ont pu être récupérés dans des chutes répertoriées par les archéologues lors des fouilles à proximité du temple (Figure 15).

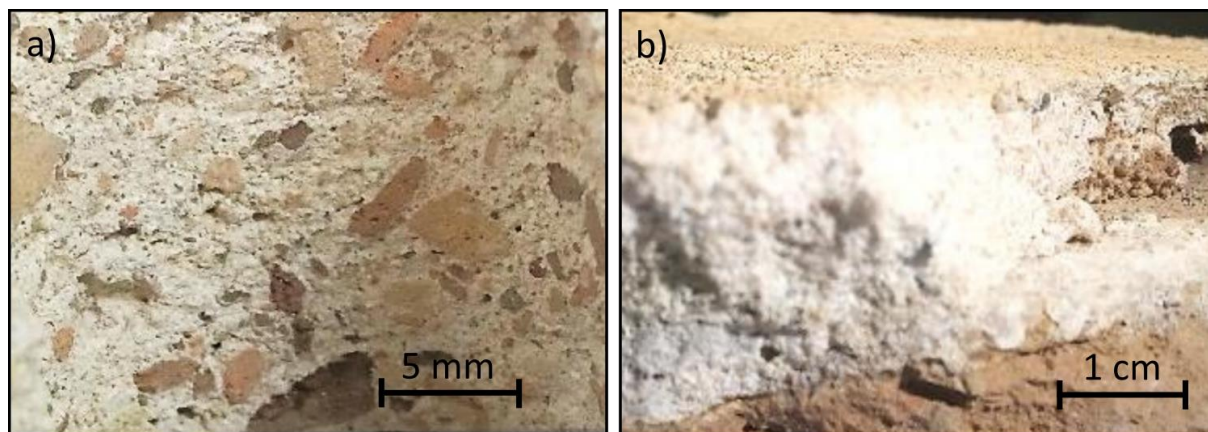


Figure 15 : a) Image du mortier de tuileau utilisé pour la pose des sols du temple du site de Genainville. b) Image du mortier de cœur utilisé comme liant principal au temple du site de Genainville.

Les mortiers de tuileau sont utilisés pour la pose des sols. Ils se caractérisent par la présence des fragments de tuileau de taille millimétrique à centimétrique. L'autre type de mortier correspond aux mortiers de cœur (mortier de pose et de hourdage) utilisés comme liant principal, permettant l'assemblage des composants des fondations et des parties érigées du temple. Ce mortier est identifié par le code MA (mortier ancien).

5.2.3.2 Les mortiers de restauration

Le mortier moderne (MM) a été conçu dans le cadre du projet et utilisé pour la confection d'assemblages d'échantillons utiles à certaines expériences. Pour cette opération, il a été nécessaire de développer un mortier ayant les propriétés pétrophysiques similaires au mortier d'origine. Cependant, du fait du manque d'analyse permettant de déterminer les propriétés pétrophysiques des mortiers de cœur ancien (MA) la formulation retenue pour la confection des mortiers modernes (MM) est celle utilisée par les restaurateurs ayant travaillé sur les différentes parties restaurées du temple, à savoir : un volume de chaux hydraulique (NHL 3.5) pour deux volumes de sable siliceux tamisé à 2,7 mm et un volume d'eau.

L'étude des travaux portant sur les mortiers de restauration [36] montrent l'importance du choix des mortiers pour une restauration durable. Dans le cas des mortiers de restauration utilisés pour ce travail de recherche, des analyses présentées récemment dans les travaux de Van Balen [37] ont mis en exergue certaines différences entre les mortiers d'origine (MA) et les mortiers de restauration (MM). Néanmoins et malgré ces différences, la formulation du mortier MM n'a pas été changée car ce mortier fait partie intégrante de la structure depuis son utilisation lors des restaurations successives qui ont été menées sur la structure du temple.

6. Echantillonnage et assemblages constructifs

Malgré les difficultés à disposer librement des matériaux, nous avons construit le projet de recherche en focalisant les travaux sur les matériaux en distinguant la diversité, mais également en cherchant à reproduire à échelle réduite différentes parties représentatives du mur. Le volume de matériaux en provenance du site étant très limité, l'échantillonnage a été optimisé afin de disposer d'un maximum d'échantillons pour mettre en œuvre les différentes expériences. Les blocs et les chutes de matériaux ont été directement fournis par les archéologues et correspondent aux vestiges récupérés lors des différents chantiers de fouilles. Le volume total de matériaux mis à disposition a permis d'extraire entre 3 et 7 carottes de 4 cm de diamètre selon le matériau (Figure 16).

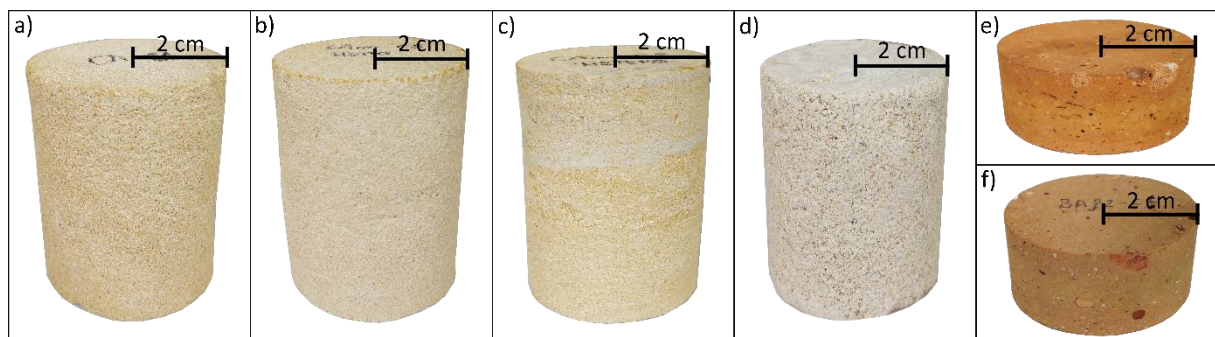


Figure 16 : a) Echantillon CA. b) Echantillon CAmHOM. c) Echantillon CAmHET. d) Echantillon MM. e) Echantillon BAc. f) Echantillon BAF.

Tandis que la plupart des échantillons sont des éprouvettes cylindriques (carottes) de différentes tailles, des montages expérimentaux ont été construits en laboratoire afin de reproduire les assemblages de matériaux identifiés sur le site. Pour cette opération, le mortier moderne décrit précédemment a été utilisé.



Figure 17 : Images des montages expérimentaux concernant les différents assemblages types.

Sept assemblages expérimentaux ont été réalisés selon une disposition prédéfinie. L'épaisseur moyenne du mortier de joint est de 10 à 12 mm. Deux séries de rivets en aluminium disposés sur deux faces opposées selon deux génératrices verticales font office d'électrodes, nécessaires pour mettre en œuvre la méthode d'imagerie électrique. Trois types de montage sont présentés sur la Figure 17 ainsi que leur représentativité au sein de la structure du mur du temple sur la Figure 18. Les montages expérimentaux concernent :

- un assemblage CAMHOM / BAf / CA avec 46 électrodes (23 sur chaque côté),
- un assemblage CAMHET / BAf / CA avec 46 électrodes (23 sur chaque côté),
- un assemblage CAMHOM / BAc / CA avec 42 électrodes (21 sur chaque côté),
- un assemblage CAMHET / BAc / CA avec 42 électrodes (21 sur chaque côté),
- trois assemblages CA / CA 32 électrodes (16 sur chaque côté).

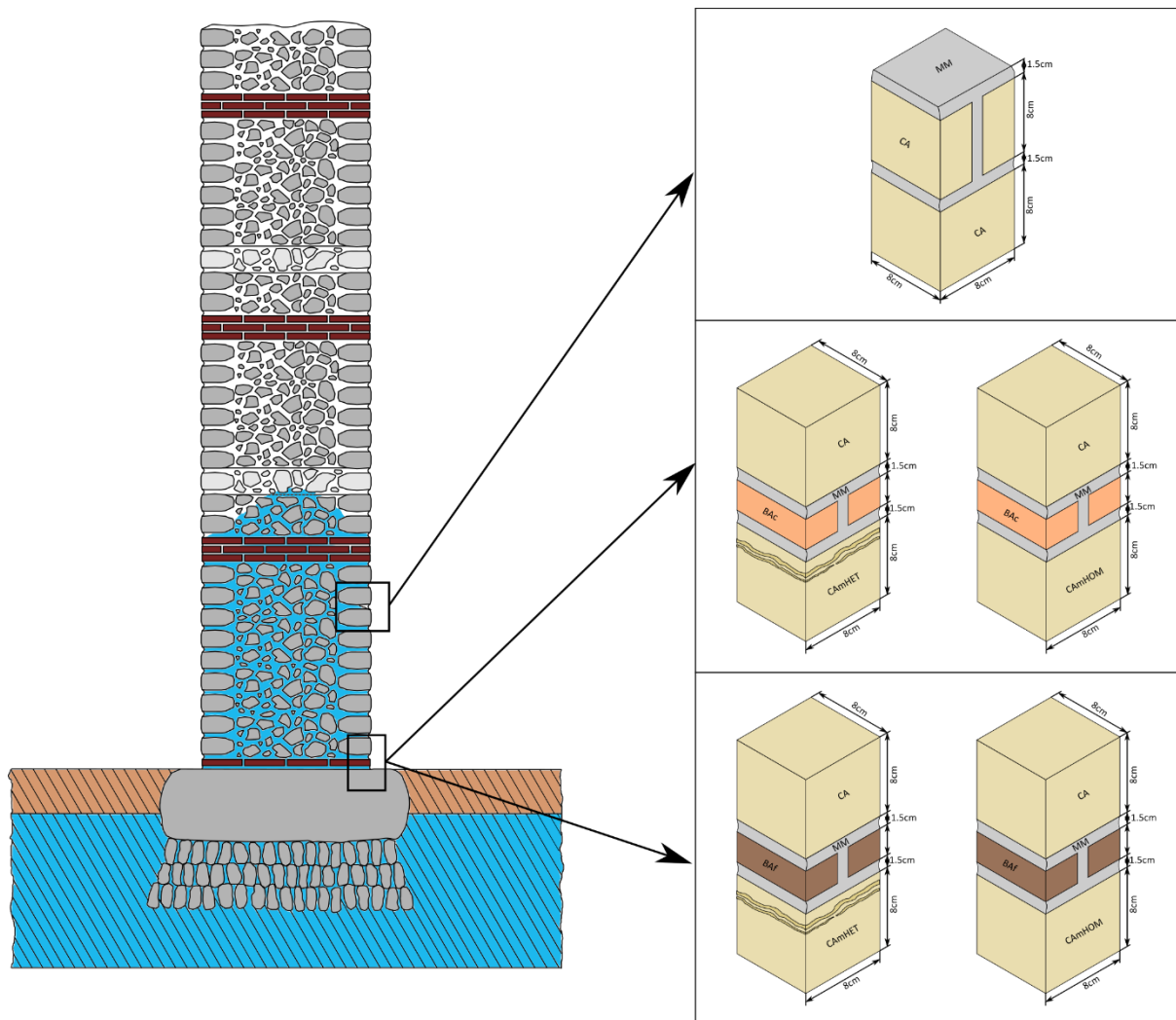


Figure 18 : Représentation et position des assemblages dans la structure du mur.

Après confection des assemblages multicouches, les éprouvettes sont placées dans une enceinte dans laquelle l'humidité relative et le taux de CO_2 sont maintenus volontairement élevés afin d'accélérer le processus de carbonatation du mortier [37]. Se basant sur ces travaux de modélisation de la carbonatation des mortiers de chaux, les conditions suivantes ($\text{HR} > 90\%$, $\text{CO}_2 \approx 0,5-1\%$ vol.) ont été retenues comme valeurs de consignes.

Treize échantillons de chaux, soumis aux mêmes conditions que les échantillons de mortier, sont placés dans l'enceinte et sont successivement prélevés afin d'évaluer l'état de carbonatation du mortier par diffractométrie des rayons X. La Figure 18 montre le dispositif expérimental, l'enceinte raccordée à une bouteille de CO_2 et les systèmes de mesure utilisés pour contrôler la température, l'humidité relative ainsi que le taux de CO_2 grâce à un contrôleur type Dräger.

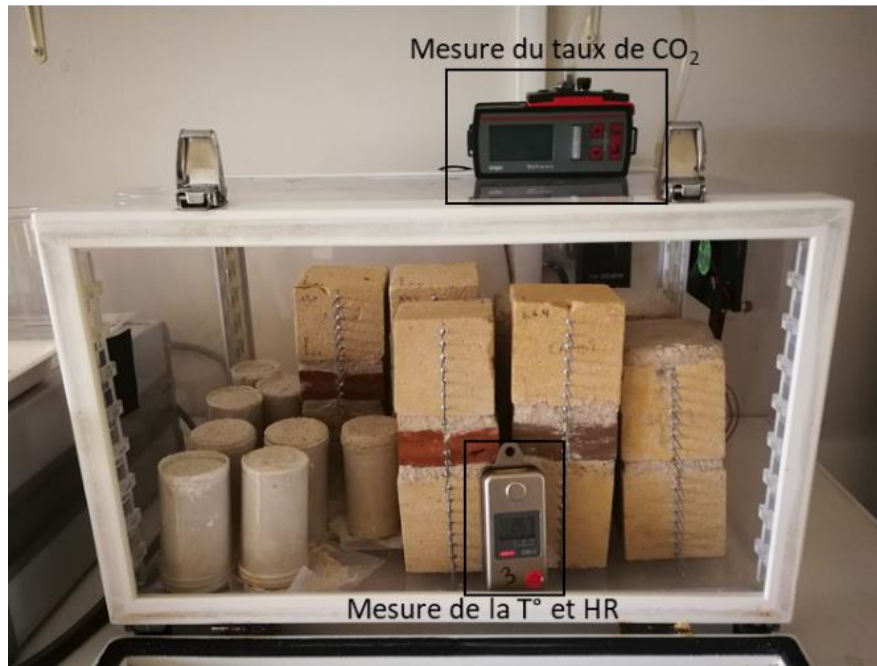


Figure 19 : Enceinte utilisée pour l'accélération de la carbonatation des mortiers.

Les résultats des treize analyses successives effectuées par diffractométrie sont présentés sur la Figure 20.

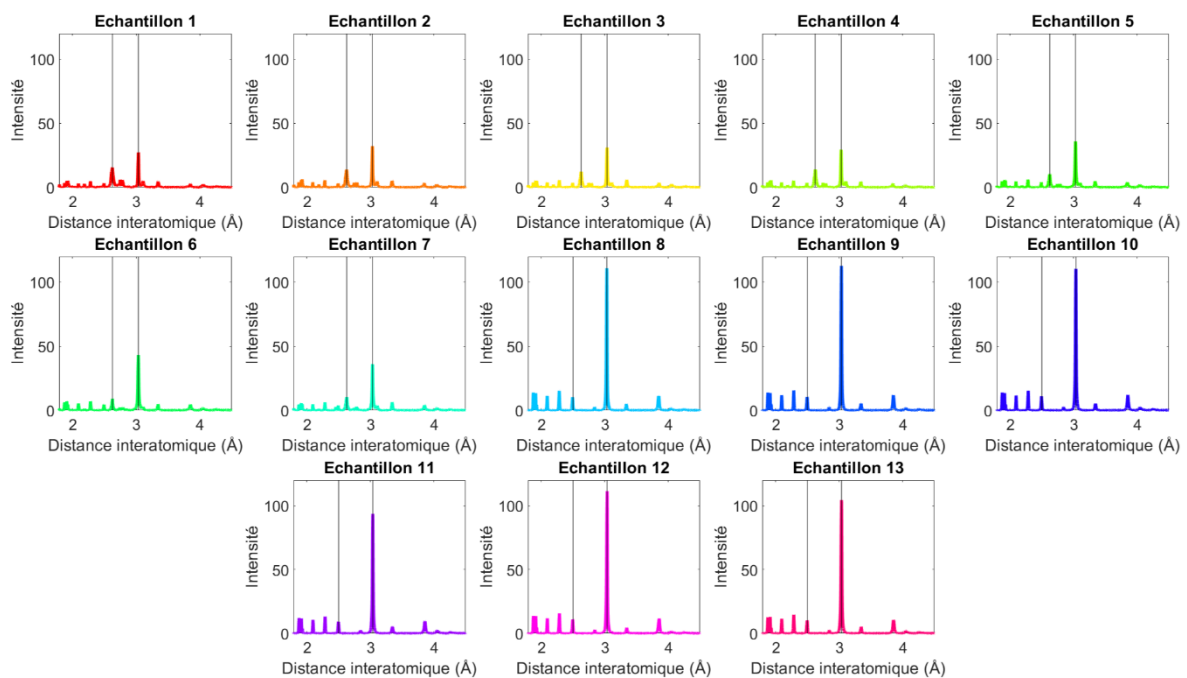


Figure 20 : Diffractogrammes obtenus sur les échantillons de chaux. Chaque échantillon (1 à 13) correspond à une période de prélèvement.

Les analyses par diffractométrie des rayons X permettent de comparer les raies caractéristiques de la calcite et de la portlandite. Après seuillage sur la ligne de base du diffractomètre, l'aire sous la courbe de chaque pic caractéristique est déterminée par la méthode des trapèzes (1) :

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (x_{n+1} - x_n)[f(x_n) + f(x_{n+1})] \quad (1)$$

Avec : $(x_{n+1} - x_n)$ étant l'espace entre chaque paire de points consécutif.

Il est ainsi possible de calculer la surface totale sous les raies caractéristiques de la calcite et la portlandite à partir de l'équation (2) :

$$S_{tot} = S_{cal} + S_{port} \quad (2)$$

Le rapport S_{cal}/S_{port} pour chacun des diffractogrammes permet de suivre l'évolution de la carbonatation (Figure 21)

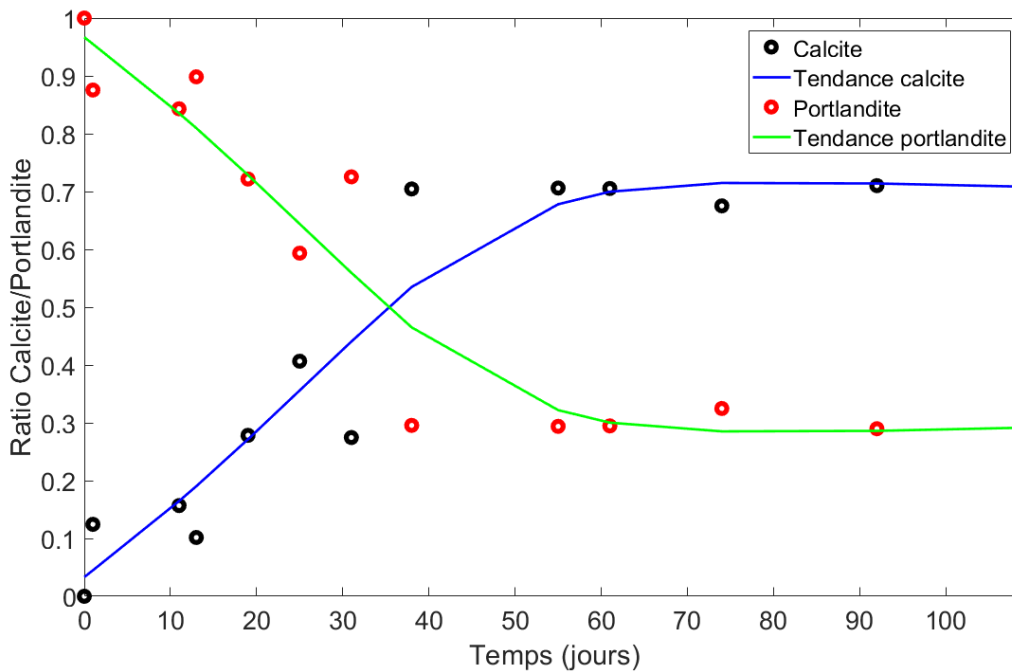


Figure 21 : Mesures de l'évolution de la carbonatation de la chaux des mortiers en fonction du temps.

Les mesures sur les échantillons de chaux permettent de comparer l'évolution des pics de la portlandite et de calcite en fonction du temps. Lors de la carbonatation du mortier, les pics de portlandite diminuent en faveur de ceux de la calcite. Pour les conditions expérimentales imposées, la carbonatation du mortier évolue au cours des 2 premiers mois après confection et semble se stabiliser au cours des 2 mois suivants pour atteindre la valeur de 70% de calcite et 30% de portlandite. Ces travaux préliminaires ont permis l'établissement du protocole de préparation des assemblages, depuis la sélection des éléments, la fabrication du mortier, la réalisation des assemblages, la gestion de la prise du mortier, l'instrumentation des assemblages et finalement la cure sous CO₂ pour atteindre un état représentatif et assurer la répétabilité de nos travaux.

CHAPITRE III

Caractérisation pétrophysique

1. Propriétés de stockage

Les matériaux de construction couramment utilisés sont des milieux poreux à base minérale. Le volume des vides va donc naturellement déterminer le volume d'eau maximal que peut contenir le matériau. La porosité correspondant au rapport entre le volume de vide et le volume total apparent. La majorité des propriétés pétrophysique des roches et autres matériaux poreux est fortement dépendante de la porosité. La porosité des roches peut aller de presque 0% (pour certaines roches cristallines) à plus de 50% (pour le tuffeau de Touraine par exemple).

Le concept de porosité est global et ne fournit donc pas d'informations concernant la taille des pores, leur distribution ou leur connectivité. Il est par conséquent nécessaire de clarifier certaines notions concernant le type de porosité afin de pouvoir interpréter les résultats des mesures permettant d'estimer ce paramètre.

Pour les matériaux consolidés, deux porosités peuvent être différenciées : la porosité connectée et la porosité occluse. La porosité ouverte ou connectée correspond à la fraction du réseau poreux qui montre une continuité géométrique d'un point donné à un autre au sein du réseau, même si le cheminement doit s'effectuer par des passages très étroits. La porosité occluse ou fermée, correspond à la partie de la porosité qui n'est pas connectée au réseau et avec l'extérieur et n'a donc aucun effet sur les propriétés de transfert de masse au sein des matériaux.

Finalement, il est nécessaire d'introduire le concept de porosité effective. La porosité effective est un paramètre dont la définition peut différer selon le domaine d'étude [38]. Dans le cadre de ce projet, la définition retenue correspond à la proportion de la porosité qui contribue au stockage et à l'écoulement du fluide en contact avec le milieu poreux. Cela implique que la porosité effective d'un matériau dépend de la structure du réseau poreux et des caractéristiques du fluide contenu dans le réseau poral.

1.1. Porosité ouverte ou connectée

La mesure de la porosité ouverte permet d'identifier le volume du matériau concernant l'espace vide susceptible d'affecter les propriétés de stockage et de transfert au sein des matériaux [39].

1.1.1 Protocole expérimental

Le protocole expérimental employé pour effectuer la mesure de la porosité ouverte est celui indiqué par la norme NF EN 1936 [40].

La première étape de l'expérience consiste à sécher les échantillons en les plaçant dans une étuve à 60°C. Des mesures gravimétriques sont effectuées régulièrement permettant de caractériser la désaturation des échantillons. La phase de séchage est terminée lorsque la masse de l'échantillon devient stable, ce qui garantit la désaturation totale des échantillons. La masse sèche est atteinte lorsque 2 pesées successives effectuée à 24h d'intervalle montrent une variation de masse inférieure à 1 pour 100.

Une fois la phase de séchage terminée, les échantillons sont placés dans un container relié à une pompe permettant de créer un vide primaire de 15 ± 5 mm Hg. Ce vide est maintenu pendant 24h pour permettre d'éliminer l'air contenu dans les pores. En parallèle, l'eau déminéralisée est dégazée dans un récipient de type erlenmeyer relié à une deuxième pompe à vide pendant 2h permet d'éliminer en partie le gaz dissout dans le fluide utilisé pour la saturation des échantillons. Cette étape permet donc d'améliorer notablement la fiabilité de la mesure.

Après le dégazage, l'eau est siphonnée de l'erlenmeyer au récipient contenant les échantillons *via* un conduit connectant les deux récipients. Le transfert de l'eau se fait progressivement pour permettre une imbibition depuis la base jusqu'à l'immersion totale de l'échantillon, tout en maintenant le vide dans le container. Une fois l'imbibition terminée, le vide est cassé et les échantillons sont laissés immergés à pression atmosphérique pendant 24h.

1.2. Porosité 48h

L'expérience de la porosité à 48h, est une estimation de la porosité libre ; elle permet de mesurer la porosité effective des matériaux qui correspond à la fraction de la porosité connectée qui est librement accessible à l'eau dans les conditions naturelles d'imbibition, c'est-à-dire à la pression atmosphérique [41]. Cette imbibition correspond à un régime d'imbibition diphasique eau/air qui dépend de la structure du réseau poreux.

1.2.1 Protocole expérimental

Cet essai est réalisé selon la norme NF B 10-504 [42] sur les mêmes échantillons analysés pour déterminer leurs porosités ouvertes.

Comme pour la méthode précédente, la première étape de l'expérience consiste à sécher les échantillons en les plaçant dans une étuve à 60°C en effectuant des mesures gravimétriques régulières afin de vérifier le séchage complet des échantillons.

Après séchage, les échantillons, préalablement refroidis jusqu'à la température ambiante, sont placés dans un conteneur fermé. Une première étape consiste à immerger les échantillons dans l'eau jusqu'à un quart de leur hauteur pendant 1h puis d'augmenter le niveau d'eau jusqu'à $H/2$ pendant 23h, H étant la hauteur de l'éprouvette. Finalement les échantillons sont immergés totalement pendant 24h de plus. (Figure 22)

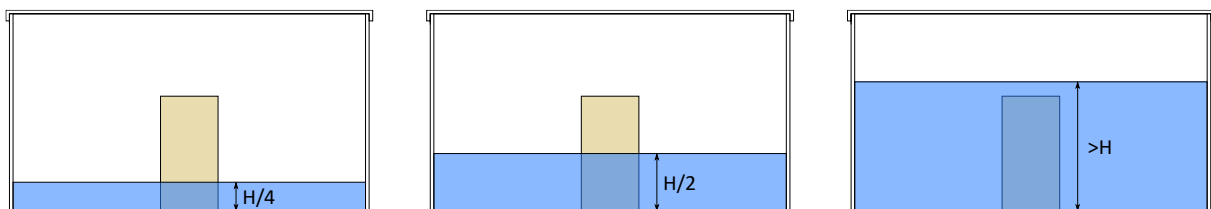


Figure 22 : Protocole expérimental pour la mesure de la porosité à 48h. (a) niveau d'eau à $H/4$ pendant 1h, (b) niveau d'eau à $H/2$ pendant 23h (c) niveau d'eau $> H$ pendant 24h ; avec H la hauteur de l'échantillon.

1.3. Porosité par injection de mercure

La porosimétrie par injection de mercure est une technique qui permet de caractériser la structure du réseau poral ouvert des matériaux et sa morphologie.

Cette technique d'analyse exploite deux caractéristiques particulières du mercure, à savoir, son caractère non mouillant et sa tension superficielle très élevée [43,44]. Du fait de ces propriétés particulières, le mercure ne pénètre pas spontanément dans les pores des matériaux. Pour ce faire, il faut appliquer une force externe pour assurer la pénétration du mercure dans le matériau. La pression nécessaire est inversement proportionnelle à la taille des pores. La relation entre la pression appliquée sur le mercure et la taille d'entrée des pores est explicitée par l'équation de Washburn (3) :

$$P = -\frac{4\gamma\cos\theta}{D} \quad (3)$$

Avec P, la pression appliquée ; γ , la tension superficielle du mercure ; θ correspond à l'angle de contact entre le mercure et la paroi des minéraux et D, le diamètre d'accès des pores.

Cette équation permet donc de déterminer la taille des pores pénétrés par le mercure pour une condition de pression donnée.

1.3.1 Protocole expérimental

L'essai de porosimétrie par injection de mercure se réalise en deux phases :

- Une phase dite « basse pression ». L'échantillon, placé dans le conteneur d'un pénétromètre, est soumis à un vide inférieur à 163 Pa (à 20°C, cette pression est inférieure à la pression de vapeur du mercure) afin d'évacuer l'air contenu dans l'échantillon. Une fois la pression minimale atteinte, une première goutte de mercure est introduite et sature le pénétromètre et l'échantillon en vapeur de mercure. Le mercure liquide est ensuite introduit. La pression est augmentée progressivement dans le pénétromètre, tandis que le volume de mercure qui pénètre dans l'échantillon est mesuré. Cette intrusion du mercure liquide dans les pores correspond à un drainage, c'est-à-dire au déplacement de la vapeur de mercure (fluide mouillant) par le mercure liquide (fluide non-mouillant). Lorsque la pression dans le pénétromètre atteint la pression atmosphérique (0,1013 MPa), les pores du milieu ayant une taille d'accès supérieure à 5 μm environ (en rayon) sont saturés de mercure.
- Une phase dite « haute pression », le pénétromètre est placé dans une chambre permettant d'appliquer une pression d'injection depuis la pression atmosphérique jusqu'à la valeur maximale d'environ 206 MPa. La pression d'injection est augmentée progressivement permettant au mercure de pénétrer dans des pores de plus en plus petits, accessibles par une taille d'accès allant théoriquement jusqu'à 3 nm.

2. Propriétés de transfert

Dans le cadre de ce projet, les propriétés de transfert sont identifiées à partir des mesures de perméabilité et d'imbibition capillaire des matériaux [45].

2.1. Imbibition Capillaire

La capillarité est une propriété intrinsèque d'un matériau qui définit sa capacité d'absorption par le biais des forces capillaires. La capillarité dépend directement de paramètres définis liés aux propriétés physiques du matériau et des liquides impliqués dans le processus d'imbibition capillaire. Lorsque deux fluides différents (un liquide et un gaz, ou deux liquides non miscibles) sont en contact avec une surface solide, la configuration d'équilibre dépend des valeurs relatives des tensions de surface entre les différents matériaux [46]. Dans le cas d'une interface solide/liquide en présence d'un gaz, l'équilibre au point triple détermine les énergies interfaciales liquide/solide, solide/gaz et liquide/gaz [46–49]. La tension interfaciale d'un liquide ou solide par rapport à l'air est habituellement appelée tension superficielle. L'interface fluide/solide est déterminée par la mouillabilité du fluide qui représente l'affinité du fluide pour le solide. L'état de mouillabilité en un instant donné d'un solide par un liquide est entièrement caractérisé par les tensions interfaciales respectives des corps en présence et par l'angle de contact entre le solide et le fluide. Comme le montre la Figure 23, un fluide mouillant présente un angle de contact θ proche de zéro contrairement au fluide non-mouillant, dont l'angle de raccordement θ est supérieur ou égal à 90° .

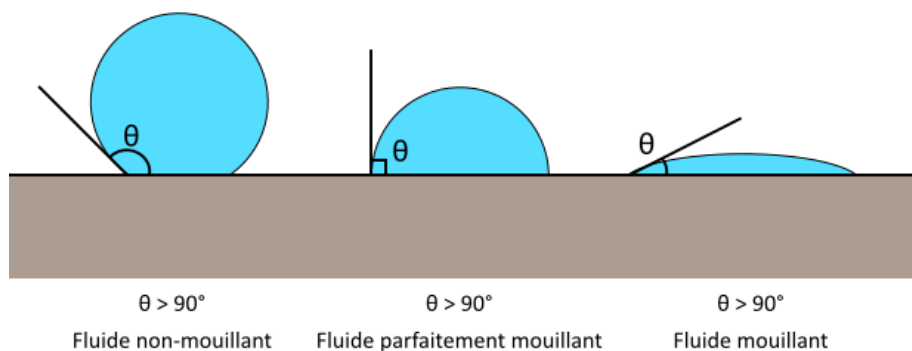


Figure 23 : Schéma montrant la notion de mouillabilité.

Dans le cas de l'interface eau/air, l'eau correspond au fluide mouillant tandis que l'air représente le fluide non-mouillant. Lors d'une imbibition par l'eau, en présence d'air à pression atmosphérique, la pression dans l'eau est inférieure à la pression dans l'air. Cette différence de pression existant de part et d'autre de la surface séparant deux fluides non miscibles, à l'intérieur d'un capillaire correspond à la pression capillaire (4). Ce paramètre est fonction de la courbure de l'interface eau/air à l'intérieur d'un capillaire à section non circulaire :

$$\Delta P_c = \gamma \left(\frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

Avec R_1 et R_2 , étant les deux rayons de courbures de la surface convexe du ménisque. Par convention, elles sont comptées positivement quand le centre de courbure est du côté inférieur.

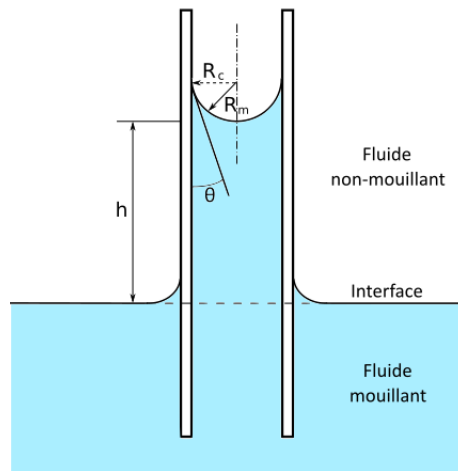


Figure 24 : Schéma montrant le principe d'imbibition.

Le rayon de courbure du ménisque, R_m , s'exprime en fonction du rayon du capillaire, r ou R_c (Figure 24), et de l'angle de contact θ . L'équation de Laplace, exprimée en fonction du rayon du capillaire devient alors, équation (5) :

$$P_c = \frac{2\gamma}{r} \cos\theta \quad (5)$$

L'imbibition capillaire se produit sous l'effet de la pression capillaire induite « par la préférence du solide pour un fluide », ou mouillabilité préférentielle, induisant le déplacement du fluide le moins mouillant par le fluide le plus mouillant, sans qu'une pression extérieure ne soit nécessaire.

Dans le cas des matériaux poreux et pour appréhender la cinématique de la succion capillaire, les pores peuvent être assimilés à des capillaires droits. Lorsque de tels matériaux sont mis en contact avec l'eau, l'interface eau/air au sein des capillaires est déformée par les forces de tension superficielle. L'angle de contact liquide/solide varie pour atteindre sa valeur d'équilibre. Compte tenu de la différence de pression eau/air au sein du capillaire, il existe un gradient de pression qui fait pénétrer l'eau à l'intérieur du capillaire. Cependant, entre le moment où le capillaire est introduit dans le réservoir et le moment où l'équilibre est atteint, la pression qui s'applique à l'interface diminue progressivement. Par conséquent, une décroissance de la vitesse d'écoulement au sein des capillaires est induite. La vitesse maximale d'écoulement au centre du capillaire est donnée par la loi de Poiseuille, (6) :

$$v_{max} = \frac{dP}{dh} \frac{r^2}{4\eta} \quad (6)$$

Avec η étant la viscosité dynamique du fluide [Pa.s].

Cette équation montre logiquement que la distribution de la taille des pores a une influence directe sur la cinétique d'imbibition. En effet, les réseaux poreux caractérisés par des tailles de pores importantes impliquent un déplacement du fluide plus rapide que les réseaux poreux ayant des petits pores. A partir de l'équation (5), le débit volumique au sein de capillaire peut être calculé (7) :

$$Q = \frac{\pi P_c r^4}{8 \eta h} = \frac{\pi \gamma \cos\theta r^3}{4 \eta h} \quad (7)$$

Le débit volumique, peut aussi être exprimé comme l'accroissement de volume par unité de temps et s'exprime sous la forme, (8) :

$$Q = \frac{dV}{dt} = \pi r^2 \frac{dh}{dt} \quad (8)$$

L'établissement de ces deux équations traduit un système différentiel exprimant la position du fluide au cours du temps, (9):

$$h \frac{dh}{dt} = \frac{\gamma \cos\theta r}{4 \eta} \quad (9)$$

La résolution de ce système différentiel (réalisée initialement par Washburn [50]) prend la forme suivante (10):

$$h = \sqrt{\frac{r \gamma \cos\theta}{2 \eta} t} \quad (10)$$

La position du fluide mouillant dans le capillaire est fonction de \sqrt{t} et de \sqrt{r} . Il est donc évident que dans un cas réel d'un matériau poreux avec une distribution variable de la taille des pores, la vitesse de pénétration de l'eau dans le réseau poreux est inégale pour chaque capillaire.

Le volume de fluide dans le capillaire à un instant t est défini par l'expression (11) :

$$V = \pi r^2 h \quad (11)$$

En introduisant cette expression dans l'équation de Washburn, il est possible de calculer le volume cumulé dans le tube par l'expression suivante (12) :

$$V = \pi r^2 \sqrt{\frac{r \gamma \cos\theta}{2 \eta} t} \quad (12)$$

Lors de l'établissement d'une cinétique d'imbibition capillaire, les progressions de h et de V sont suivies en fonction de la racine carrée du temps [45].

L'équation de Washburn met en avant le fait que l'imbibition d'un matériau par un fluide dépend directement de la géométrie de son réseau poreux, caractérisé par la taille des pores r_c , et les propriétés du fluide considéré (viscosité dynamique η et tension superficielle γ).

Lors des expériences d'imbibition par de l'eau, il est possible d'observer deux phénomènes distincts successifs. Durant une première phase qui correspond à la pénétration du fluide dans le matériau poreux sous l'effet des forces de capillarité, l'eau envahit progressivement la porosité librement accessible. Une deuxième phase, beaucoup plus lente, peut être observée une fois que la pénétration du fluide par les forces capillaires atteint sa limite. L'eau commence à remplir les espaces non envahis lors de l'imbibition ; ce sont les pores remplis d'air (porosité piégée) qui se saturent progressivement par diffusion et dissolution de l'air dans l'eau. La somme de la porosité libre et la porosité piégée correspond à la porosité connectée ou ouverte [51].

Le coefficient d'imbibition capillaire est déterminé par l'évolution de la prise de masse en fonction du temps mesuré au cours d'une expérience d'imbibition capillaire contrôlée. L'équation (13) permet de représenter l'évolution de masse d'eau absorbé.

$$\Delta W/S = C_{im}\sqrt{t} - W_0 \quad (13)$$

Avec, $\Delta W/S$ étant l'évolution de la masse surfacique ; C_{im} est le coefficient d'imbibition capillaire ; t le temps ; W_0 est la masse de l'échantillon à l'état initial (masse de l'échantillon sec).

Les courbes d'imbibition peuvent aussi fournir des informations concernant la géométrie du réseau poreux. En effet, lorsque le milieu poreux présente une porosité unimodale la courbe d'imbibition présente une seule rupture de pente, tandis que dans le cas d'une porosité multimodale ou à faible connectivité, la courbe caractéristique d'imbibition présente plusieurs ruptures de pente [52] comme le montre la Figure 25.

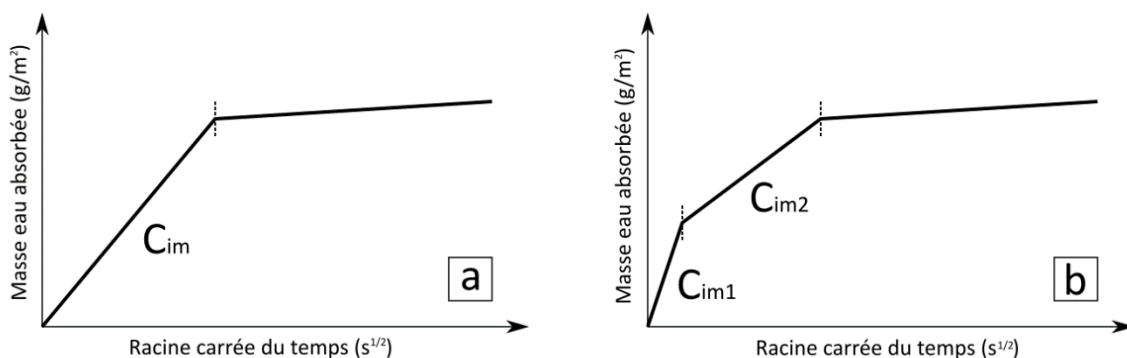


Figure 25 : Schéma montrant l'effet de la microstructure sur les courbes d'imbibition capillaire (Modifié d'après [52])

2.1.1 Protocole expérimental

L'essai d'imbibition capillaire est réalisé sur des échantillons cylindriques de 5 cm de diamètre ayant une hauteur de 8cm pour les calcaires et de ~ 3 cm d'hauteur pour les briques. Les pierres ont été carottées perpendiculairement au litage, et les briques, perpendiculairement à leur plan d'aplatissement (façonnage).

Les échantillons carottés ont été séchés à l'étuve à 65 °C jusqu'à ce que leur masse se stabilise. Après séchage, l'échantillon est placé hors de l'étuve à humidité relative ambiante et jusqu'à ce que sa température soit égale à la température ambiante.

Au cours de l'essai, la base de l'échantillon cylindrique est immergée dans de l'eau sur une hauteur de 3mm, maintenue constante au cours de l'essai. Le bac utilisé est suffisamment grand pour négliger les effets de la poussée d'Archimède et de l'évaporation au cours du temps. L'évolution de la masse est suivie grâce à une balance de précision connectée à un ordinateur. Le coefficient de capillarité C_{im} est déterminé *a posteriori* par le coefficient directeur de l'évolution de la masse en fonction de la racine carré du temps, Figure 26.

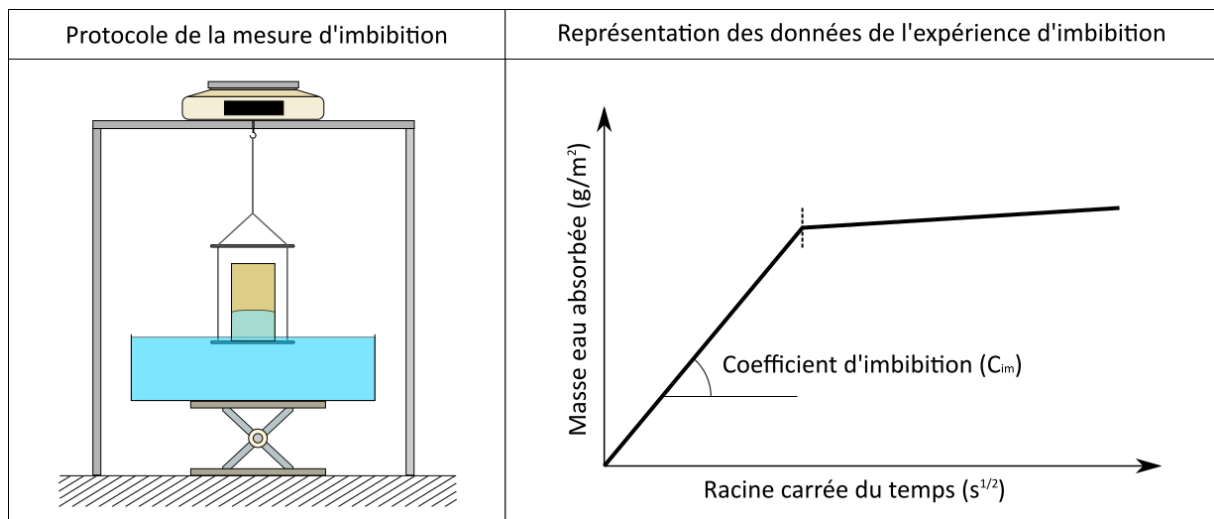


Figure 26 : Schéma montrant le protocole de mesure et le calcul du coefficient d'imbibition capillaire.

2.2. Perméabilité

La perméabilité d'un matériau représente son aptitude à se laisser traverser par un fluide. Dans son assertion usuelle, on entend ici la perméabilité intrinsèque qui dépend des propriétés microstructurales du milieu poreux et des conditions extérieures comme la nature du fluide circulant dans le réseau [52].

A l'échelle macroscopique, la loi qui décrit l'écoulement d'un fluide en milieu poreux est bien représentée par la loi de Darcy (14)

$$k = \frac{\eta Q L}{A \Delta p} \quad (14)$$

Avec η la viscosité de l'eau ; Q , le débit volumique ; L , la longueur de l'échantillon ; A , la section de l'échantillon et Δp , la différence de pression longitudinale.

2.2.1 Perméabilité à l'air

La mesure de la perméabilité à l'air est réalisée avec un système expérimental mis en œuvre au LRMH, Figure 27. Ce système permet de mesurer la perméabilité apparente au gaz de matériaux par simple contact, et de manière non destructive [53]. Il s'agit d'un système fonctionnant en régime permanent par injection de gaz (azote, air, etc.) et pouvant être couplé au logiciel de traitement Cydar™ développé par l'entreprise Cydarex. Ce prototype de mesure utilise le protocole opératoire similaire aux perméamètres à cellule de type Hassler, à savoir une mesure de débit volumique à charge constante mais en considérant une pression de confinement de « l'échantillon-équivalent », égale à la pression atmosphérique.

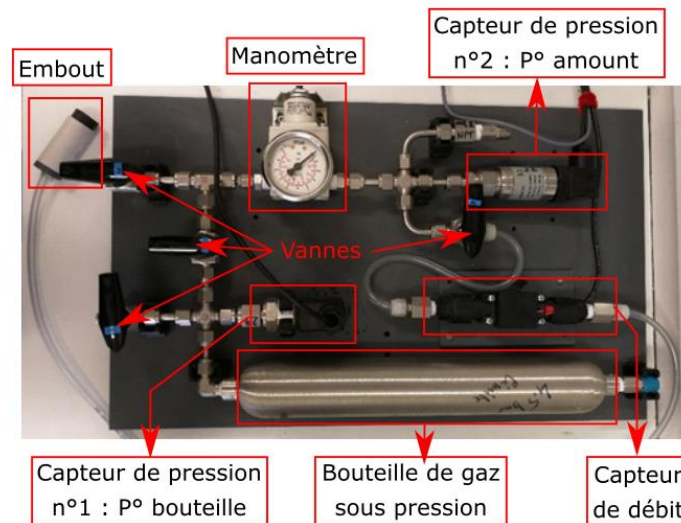


Figure 27 : Système de mesure de la perméabilité au gaz développé par Cydarex.

2.2.1.1 Protocole expérimental

Dans le cadre de cette étude, les essais sont réalisés avec de l'azote. L'injection du gaz dans le système est contrôlée par la vanne n°1. Le premier capteur de pression (P_{in}) mesure la pression du fluide entrant dans le système. Le second capteur de pression (P_{out}) mesure la pression du fluide sortant du système (en amont de l'embout).

Le capteur de débit est relié à l'embout par les mêmes connexions que le deuxième capteur de pression. Chaque capteur est connecté à une unité de contrôle, elle-même reliée à l'ordinateur par un câble USB, ce qui permet la transmission des données de pression et débit sur le PC. Toutes les mesures ont été réalisées avec une pression amont d'environ 150 mbar. Après avoir réglé la pression

en amont grâce au manomètre de l'appareil, la vanne n°4 peut être ouverte. L'embout est appliqué sur la surface de l'échantillon le plus fermement possible pour s'affranchir des éventuelles fuites à l'interface entre l'embout et la surface du matériau. L'équation qui régit l'écoulement de gaz au sein du matériau est donnée par (15) :

$$Q = \frac{K_g S (P_{in}^2 - P_{atm}^2)}{2\mu P_q L} \quad (15)$$

Avec Q, le débit d'azote ; K_g , la perméabilité intrinsèque ou apparente au gaz ; μ , la viscosité dynamique du fluide ; S, la section du matériau à travers laquelle s'écoule le fluide ; L, la longueur du matériau percolé ; P_{in} , la pression en amont ; P_{atm} , la pression atmosphérique et P_q , la pression fluide.

L'application de cette loi est valable uniquement en régime permanent. La pression en amont et le débit doivent être constants lors de la mesure. Grâce au logiciel Cydar™, il est possible de contrôler la stabilité et la constance de la valeur du débit et de la pression compte tenu de l'étendue de mesure et de la précision des capteurs. Un contrôle additionnel sur l'application de la loi d'écoulement de Darcy est mené en contrôlant la valeur du nombre de Reynold.

2.2.2 Perméabilité à l'eau

La mesure de perméabilité à l'eau est réalisée au moyen d'une cellule triaxiale en régime d'écoulement permanent, Figure 28. Lorsque l'échantillon est en place dans la cellule triaxiale et que le milieu est saturé, l'essai permet de générer un écoulement d'eau déminéralisé au travers de l'échantillon confiné via différentes valeurs du gradient de pression entre les extrémités de l'échantillon [54,55].

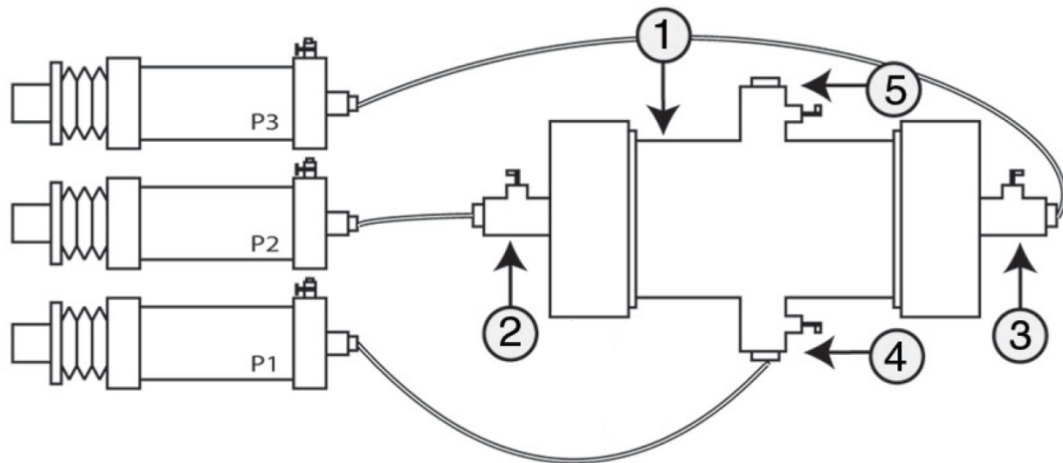


Figure 28 : Méthode triaxiale. Schéma du système mis en œuvre pour la mesure de la perméabilité à l'eau. P1 : système de de contrôle de la pression de confinement. P2 : Système de contrôle de la pression d'entrée. P3 : système de contrôle de la pression de sortie. (1) Cellule triaxiale. (2) Vanne de pression d'entrée. (3) Vanne de pression de sortie. (4) Vanne de la pression de confinement. (5) Vanne d'ouverture/fermeture.

2.2.2.1 Protocole expérimental

L'appareil représenté sur la Figure 28 est constitué de trois réservoirs d'eau connectés à une chambre triaxiale. Des moteurs pas à pas permettent de contrôler les changements de volume au sein des réservoirs et de programmer les pressions d'entrée et de sortie ainsi que la pression de confinement par le biais des écrans de contrôle.

Les types d'échantillons nécessaires pour effectuer les mesures sont définis par les caractéristiques de l'appareil de mesure. Dans le cas présent, il est nécessaire d'utiliser des échantillons cylindriques de 5cm de diamètre et de facteur d'élançement de 2.

De façon pratique, un disque poreux est posé sur le support de la base de la cellule triaxiale qui permet d'injecter l'eau. L'échantillon préalablement saturé au vide est placé sur le disque poreux avant de glisser une membrane de latex autour de l'échantillon et du support. Avant de réaliser l'essai, il est important d'éliminer les éventuelles bulles d'air emprisonnées au cours de la mise en œuvre. Après cette étape, un deuxième disque poreux et l'embout permettant le drainage est glissé dans la membrane sur la partie supérieure de l'échantillon. La membrane est fixée sur le socle et l'embout par des joints en caoutchouc.

La cellule triaxiale est fermée et remplie d'eau en restant attentif au non-emprisonnement de bulles d'air dans la cellule. L'essai peut débuter après avoir raccordé les contrôleurs volumiques d'entrée, de sortie et de confinement.

CHAPITRE IV
Méthodes d'imagerie électrique
et thermographie IR

1. Méthode d'imagerie électrique

Dans le cadre des analyses de la géophysique classique, les méthodes de prospection électrique regroupent des méthodes actives et des méthodes passives. Les méthodes actives, comme celle de la résistivité électrique et la polarisation provoquée, sont basées sur l'injection d'un courant dans le sous-sol. Au contraire les méthodes passives, comme celle du potentiel spontané, mesurent le champ électrique résultant de l'existence de courants électriques naturels présents dans le sous-sol. Parmi ces différentes méthodes d'imagerie électrique, dans ce projet de recherche, la méthode utilisée est celle d'imagerie de la résistivité électrique.

Les méthodes électriques actives, comme celle de l'imagerie de la résistivité électrique, sont utilisées depuis le XIX^{ème} siècle. Les bases théoriques découlent des travaux et des découvertes de Michael Faraday et James Clark Maxwell en électromagnétisme [56].

La méthode d'imagerie de la résistivité électrique est utilisée non seulement dans la géophysique appliquée mais aussi dans d'autres domaines. En effet, cette méthode est particulièrement polyvalente et complète et apporte des informations qui peuvent répondre à des nombreuses problématiques.

Parmi les différentes problématiques, la mesure de la teneur en eau au sein des matériaux poreux est une problématique très récurrente dans de nombreux domaines d'études. Ces études ont montré que la résistivité électrique et la teneur en eau des matériaux sont étroitement liées, et se caractérisent par une diminution de la résistivité électrique avec l'augmentation de la teneur en eau, le taux de diminution se réduisant pour les teneurs en eau élevées [57, 58]. La capacité de la méthode d'imagerie électrique pour caractériser la distribution de la teneur en eau au sein des matériaux a suscité l'intérêt de divers auteurs dans le cadre d'études sur la conservation du patrimoine bâti [59, 60].

Dans ce travail de recherche, l'utilisation de la méthode d'imagerie électrique a pour objectif de quantifier la teneur en eau réelle des matériaux de construction à partir de l'analyse de la variation de la résistivité électrique.

1.1. Fondements théoriques de la méthode d'imagerie électrique

1.1.1 Equations fondamentales de l'électromagnétisme

La théorie permettant de décrire le comportement d'un champ électromagnétique est fondée sur les quatre équations fondamentales proposées par Maxwell en 1864 [61]. Ces équations appelées les équations de Maxwell-Lorentz permettent de lier les variations du champ électrique E (V/m) aux variations :

- du champ magnétique H (A/m),
- du champ de déplacement D (C/m²),

- du champ d'induction magnétique B (Wb/m^2),
- de la densité de courant J (A/m^2).

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad \text{Equation d'induction de Faraday} \quad (16)$$

$$\nabla \times H - \frac{\partial D}{\partial t} = J \quad \text{Equation d'Ampère-Maxwell} \quad (17)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{Equation de conservation de la charge} \quad (18)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Equation de divergence de l'induction magnétique} \quad (19)$$

Avec ρ la densité volumique de charge électrique. La première équation de Maxwell-Lorentz montre comment le passage d'un flux magnétique dans un milieu entraîne la formation d'un champ électrique, tandis que la deuxième équation montre comment le passage d'un courant électrique dans un milieu entraîne la formation d'un champ magnétique. Cependant, dans les méthodes d'imagerie de résistivité électrique, les propriétés magnétiques sont ignorées. De plus, en utilisant un courant électrique bipolaire de basses fréquences qui peut être assimilé à un courant stationnaire, les dérivées temporelles des équations de Maxwell-Lorentz s'annulent en se simplifiant considérablement :

$$\nabla \times E = 0 \quad \text{Equation d'induction de Faraday} \quad (20)$$

$$\nabla \times H = J \quad \text{Equation d'Ampère-Maxwell} \quad (21)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad \text{Equation de conservation de la charge} \quad (22)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Equation de divergence de l'induction magnétique} \quad (23)$$

L'équation d'induction de Faraday (20, 24) assure l'existence d'un potentiel scalaire V . En effet, la force électrostatique présente les mêmes propriétés que la force gravitationnelle, à savoir qu'elle est conservative ce qui permet d'introduire tout naturellement les notions d'énergie et de potentiel électrostatique. La connaissance du potentiel suffit alors à décrire complètement les effets électriques. De plus, compte tenu de la difficulté à mesurer l'intensité du courant électrique pour caractériser le champ électrique dans un milieu, le champ de potentiel est préférentiellement mesuré. Et, parce que le champ électrique E est conservatif, il est possible de définir ce paramètre par la fonction gradient du champ de potentiel scalaire V :

$$E = -\nabla V \quad (24)$$

En absence de source de courant, l'équation $\nabla \cdot J = 0$ exprime le fait qu'il n'y a pas d'accumulation de charge dans le système. De plus, sachant que le champ de potentiel peut seulement être déterminé à partir de la différence de potentiel entre deux points, il est possible de

combiner la loi d'Ohm avec l'équation précédente. Cela permet de définir l'équation de Poisson (25) :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = 0 \quad (25)$$

Lorsque le milieu est homogène et que la résistivité électrique est constante, la variation de potentiel dans un espace homogène infini [62,63] est déterminée par la loi de Laplace.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (26)$$

Cependant, en présence d'une source de courant d'intensité I au point r_s (Figure 29), le potentiel électrique généré par une source de courant dans un espace homogène de résistivité ρ est donné par l'équation de Laplace qui prend la forme (27) :

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = -I \delta(r - r_s) \quad (27)$$

Avec I , l'intensité d'une source de courant électrique ; r_s , la position de cette source ; r , la position d'un point quelconque de l'espace et δ , la fonction de Dirac (ou le tenseur unité).

Dans plusieurs cas, le calcul de la variation de potentiel peut être réalisé analytiquement. Dans un espace infini, homogène et isotrope, les surfaces équipotentielles sont sphériques lorsque la source est ponctuelle et placée en surface. En supposant que le potentiel électrique à l'infini est égal à 0, la distribution radiale du potentiel électrique peut être exprimée par (28) :

$$V(r) = \frac{I \rho}{4 \pi r} \quad (28)$$

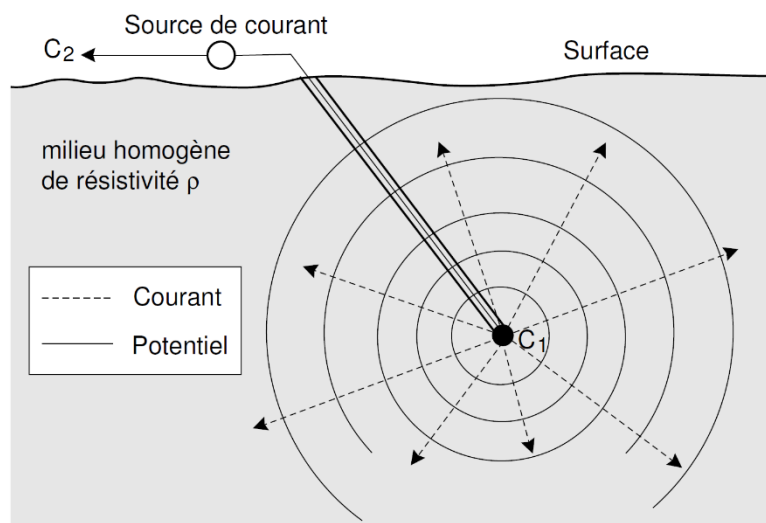


Figure 29 : Potentiel généré par l'injection de courant dans un milieu infini, homogène et isotrope (image d'après [63]).

Cette équation permet de calculer la distribution du champ de potentiel électrique lorsque des mesures sont réalisées en forage.

Lors de prospections électriques classiques, les mesures sont généralement réalisées en surface. Ce qui correspond à mesurer la variation du potentiel électrique à partir d'un point source dans un demi-espace homogène et isotrope [64]. Le cas d'un demi-espace infini homogène et isotrope permet de ramener l'équation précédente à :

$$V(r) = \frac{I \rho}{2 \pi r} \quad (29)$$

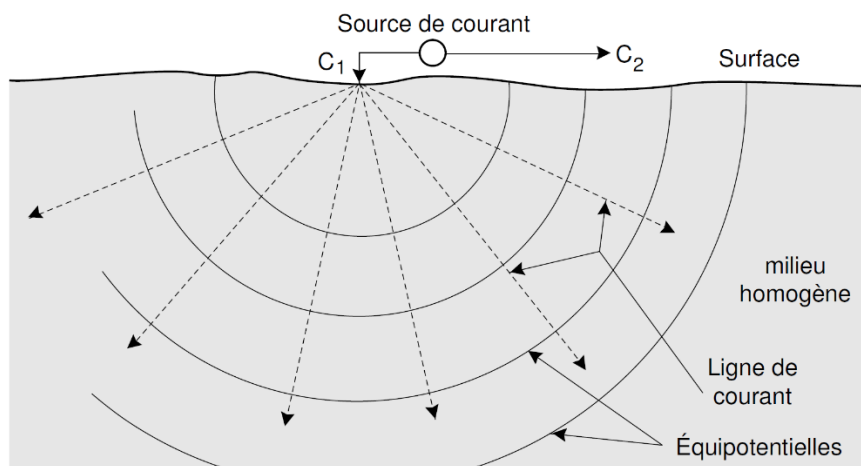


Figure 30 : Potentiel généré par l'injection de courant dans un demi-espace homogène et isotrope (image d'après [63]).

1.1.2 Notion de résistivité électrique

La méthode d'imagerie électrique tire parti des capacités de diffusion d'un champ électrique basse fréquence généré par la circulation d'un courant électrique [65]. La loi d'Ohm lie l'intensité I du courant électrique traversant un objet au potentiel électrique V mesuré à ces extrémités via la résistance électrique R . L'expression simplifiée de la loi d'Ohm est donnée par l'équation (30) :

$$R = \frac{V}{I} \quad (30)$$

La résistance électrique définit l'opposition au passage d'un courant électrique d'un matériau, et peut permettre de caractériser un matériau. Cependant, parce que la résistance électrique d'un matériau est dépendante de sa géométrie, ce paramètre n'est pas adapté pour permettre une caractérisation intrinsèque de la matière. En effet, un même matériau avec une géométrie différente donne des valeurs de la résistance, différentes. C'est pourquoi, afin de pouvoir caractériser les propriétés électriques des matériaux, il est nécessaire de s'affranchir de ces caractéristiques [63].

La résistivité électrique est une propriété intrinsèque aux matériaux qui est reliée à la résistance par l'équation (31) et Figure 31 :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (31)$$

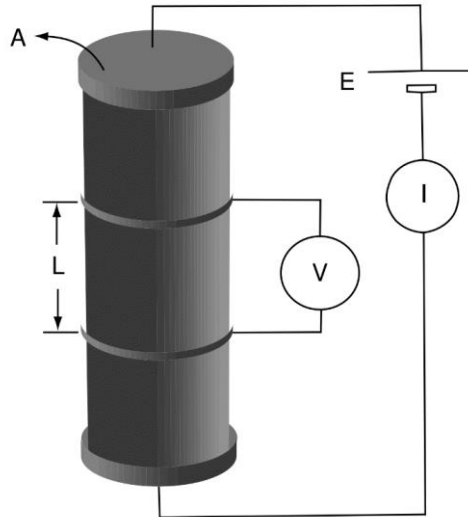


Figure 31 : Représentation schématique de la mesure de la résistivité d'un échantillon (image d'après [63]).

Dans sa forme générale, la loi d'Ohm prend la forme suivante (32) :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} \quad (32)$$

Avec \vec{j} , la densité de courant (courant par unité de surface traversée $J = I/A$ (ampères/m²)), et \vec{E} étant le champ électrique.

1.2. Protocole de mesure de la résistivité électrique

1.2.1 Mesure ponctuelle de la résistivité électrique

Ils existent différentes méthodes permettant d'effectuer une mesure ponctuelle de la résistivité électrique des matériaux. Les deux méthodes principales, correspondant à la méthode de mesure uni-axiale et la méthode de mesure par quadripôle électrique, sont présentées sur la Figure 32.

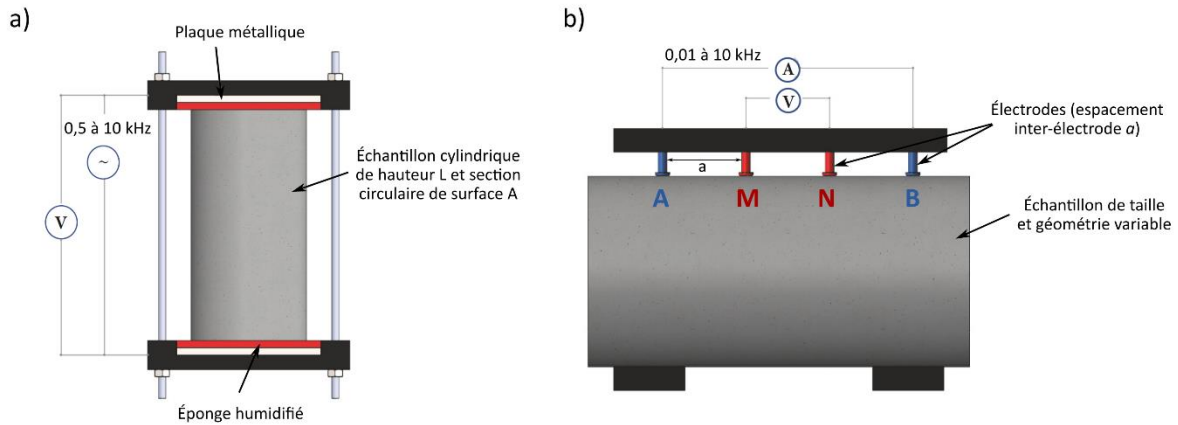


Figure 32 : a) Mesure de la résistivité électrique d'un échantillon en utilisant la méthode uni-axial. b) Mesure de la résistivité électrique d'un échantillon en utilisant la méthode quadripôle (Modifié d'après [66]).

La méthode dite uni-axiale est couramment utilisée pour des mesures sur des échantillons de taille réduite (de centimétrique à décimétrique). Cette méthode est la plus simple et ne nécessite que peu de matériel, et ne nécessite que deux électrodes dont la taille est identique à la surface de l'échantillon. La variation de potentiel est ensuite mesurée entre les deux extrémités et la valeur de la résistivité électrique peut être calculée en appliquant l'équation (31).

Dans le cas de la mesure de résistivité électrique par la méthode de type quadripôle, quatre électrodes sont utilisées, voir Figure 33. Les électrodes de courant A et B sont utilisées pour injecter le courant au sein de l'objet. L'électrode A crée une source de courant tandis que l'électrode B crée un puits de courant. La mesure de potentiel correspondant à la différence de potentiel entre deux points est effectuée sur les électrodes dites de mesure M et N. La résistivité de l'échantillon peut être calculée en utilisant l'équation (33).

$$\rho = 2 \pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (33)$$

Où, ρ est la résistivité électrique du matériau ; a est l'espacement inter-électrode ; ΔV est la différence de potentiel électrique entre les électrodes M et N ; I est l'intensité du courant injecté.

1.2.2 Principe de la tomographie de résistivité électrique

Le concept d'étude des propriétés internes d'un milieu en imposant un courant, en mesurant la distribution du potentiel électrique et en modélisant la résistivité interne, n'est pas une idée nouvelle. Les premiers travaux sur le potentiel d'application de la tomographie de résistivité électrique ont été écrits dans les années 1930 permettant seulement d'interpréter des systèmes simples à deux couches horizontales [67].

C'est vers la fin des années 1970 avec l'apparition et la démocratisation des ordinateurs que la tomographie de résistivité électrique a été proposée indépendamment par Henderson et Webster

[68] pour l'imagerie médicale et par Lytle et Dines [69] comme outil d'imagerie géophysique. Depuis 1978, la puissance de calcul a considérablement augmentée pour permettre de grandes inversions tridimensionnelles de l'EIT. Dans le même temps, la durée de calcul a également diminué en raison de la mise en œuvre de meilleures méthodes d'obtention de la solution inverse. [70, 71].

Dans le cas de la tomographie classique, les mesures successives de résistivité électrique en surface sont effectuées par la méthode de type quadripôle, voir Figure 33. Une pseudo section est obtenue en déplaçant le quadripôle électrique sur les différentes électrodes puis en répétant le processus en changeant l'espacement inter-électrode. Le nombre d'électrodes, ainsi que leur agencement, définit le dispositif électrique utilisé. La configuration du dispositif est choisie selon la problématique de l'étude. En tomographie 2D de surface, les principaux dispositifs communément utilisés sont le Wenner, le Wenner-Schlumberger, le dipôle-dipôle, le pôle-dipôle et le pôle-pôle [63,72].

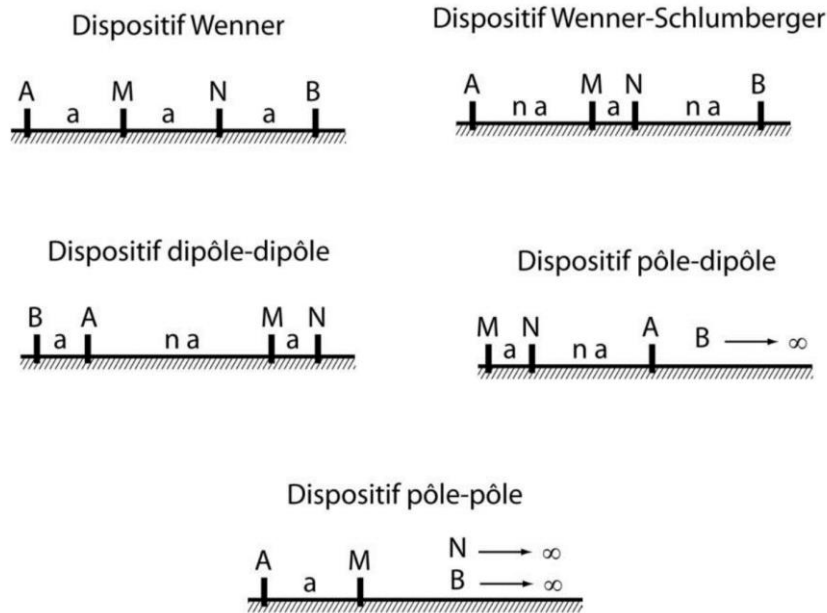


Figure 33 : Dispositifs de mesure de la résistivité électrique d'un sol, avec A et B électrodes d'injection (de courant) et M et N électrodes de mesure (de potentiel) (image d'après [63]).

Comme montré précédemment, l'expression de la différence de potentiel dans un demi-espace homogène peut être exprimée par l'équation (29). Lors de l'application de la tomographie électrique classique utilisant une de ces configurations d'électrodes, l'expression de la différence de potentiel est définie par l'équation (34).

$$\Delta V_{MN} = \frac{I \rho}{2 \pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad (34)$$

D'un point de vue pratique, un facteur k nommé facteur géométrique est utilisé afin de regrouper les termes impliquant la position et la géométrie du milieu ausculté. En conséquence, cette variable peut être calculée simplement à partir de la géométrie du dispositif d'acquisition et du milieu ausculté [63,73]. Dans le cas d'un demi-espace homogène et isotrope, et lorsque les électrodes sont placées en surface, le facteur géométrique vaut :

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (35)$$

Dans le cas où les électrodes sont positionnées de manière autre que celle décrite précédemment, il est possible de calculer la variation du potentiel électrique par la résolution du problème directe par des méthodes numériques.

1.3. Modélisation de la résistivité électrique des matériaux

Lors de l'application de la tomographie de la résistivité électrique, la difficulté principale correspond au calcul indirect de la répartition de la résistivité électrique réelle au sein de l'objet d'intérêt. En effet, dans le cas de la tomographie de résistivité électrique il est nécessaire de résoudre le problème inverse. Ce type de problème, correspond à la situation où les propriétés d'un milieu inaccessible à l'observation directe doivent être déterminées à partir d'observations faites à l'extérieur de celui-ci. Pour résoudre ce type de problèmes, il est nécessaire d'utiliser des outils mathématiques avancées qui permettent d'approximer la solution à la réalité du milieu. Afin de pouvoir estimer la distribution interne de la résistivité électrique il est donc nécessaire d'utiliser des outils numériques permettant d'effectuer les calculs probabilistes ou de minimisation couramment utilisée pour la résolution du problème inverse.

Il existe plusieurs logiciels permettant de résoudre le problème inverse dans le cadre de l'imagerie électrique. Le logiciel *Electrical Impedance and Diffused Optical Reconstruction Software* (EIDORS), utilisé au cours de ce projet de recherche, apporte une solution pour la caractérisation de la résistivité électrique des matériaux [74–76]. Ce logiciel est couramment utilisé dans le domaine médical et de la géophysique pour la reconstruction d'images représentant des tomographies d'impédance/résistivité électrique (EIT/ERT) à partir des données de différence de potentiel mesurées à la surface de l'objet par des électrodes.

Dans le cadre des méthodes d'imagerie EIT/ERT, la résolution du problème direct correspond à la prédiction des valeurs de la différence de potentiel entre des électrodes, sous les bases physiques établies par les équations de Maxwell (20)-(23), pour une distribution de conductivité électrique donnée, et dont la valeur de l'intensité de courant du signal injecté est connue [77].

En utilisant les valeurs du potentiel électrique ($V \in \mathbb{R}^{n_M}$) mesurées, la distribution de la conductivité estimée ($\hat{\sigma} \in \mathbb{R}^{n_N}$) peut être calculée en minimisant les erreurs entre le modèle et les mesures par

la méthode des moindres carrés, dont l'expression mathématique est présentée par l'équation (36) :

$$\hat{\sigma} = \underset{\sigma}{\operatorname{arg\,min}} \|V - f(\sigma)\|^2, \quad \text{avec } f(\sigma): D \subset \mathbb{R}^{n_N} \rightarrow \mathbb{R}^{n_M} \quad (36)$$

Le problème direct est représenté par la fonction $f(\sigma)$ qui permet de calculer la valeur du potentiel électrique à la surface d'un volume de distribution de conductivité électrique ($\hat{\sigma} \in \mathbb{R}^{n_N}$) donnée. La linéarisation de la fonction $f(\sigma)$ est représentée par l'équation (37) :

$$f(\sigma) \approx f(\sigma_0) + J(\sigma - \sigma_0), \quad \text{avec } J_{ij} = \left. \frac{\partial V_i}{\partial \sigma_j} \right|_{\sigma_0} \quad (37)$$

Avec J étant la matrice Jacobienne, aussi appelé matrice de sensibilité, car elle décrit comment les changements de conductivité vont affecter les changements de potentiel.

Contrairement au problème direct, le problème inverse correspond à la prédiction de la distribution interne de la conductivité électrique à partir des valeurs de potentiel électrique mesurées en surface.

$$\hat{\sigma}_d = \underset{\sigma_d}{\operatorname{arg\,min}} \{ \|V_d - J \sigma_d\|^2 W + \lambda^2 \|\sigma_d\|^2 R \} \quad (38)$$

Ou, J est la matrice Jacobienne ; W est la matrice poids ; λ est la valeur de l'hyperparamètre et R est la matrice de régularisation [78].

Il existe différents méthodes et algorithmes permettant de résoudre le problème inverse. Dans le cadre de ce projet de recherche, l'utilisation de la méthode de minimisation définie par l'algorithme Gauss-Newton a été privilégiée. L'algorithme Gauss-Newton débute avec une représentation modèle de la conductivité initiale dont l'ordre de grandeur doit être en adéquation avec le type de matériau ausculté. A partir de ce modèle initial, la différence de potentiel est calculée. La différence de potentiel calculée et celle mesurée sont comparées afin de redéfinir la matrice Jacobienne. Cette nouvelle matrice est utilisée dans l'itération suivante pour recalculer la différence de potentiel dans le nouveau modèle. Cette opération est répétée jusqu'à atteindre un niveau seuil d'erreur entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Les détails de l'algorithme sont synthétisés par Brinckerhoff [79] en dix étapes :

- 1) Obtenir des données expérimentales ou simulées,
- 2) Obtenir une première estimation de la conductivité, σ_0 . Cela peut être basé sur des informations a priori, ou par des mesures complémentaires,
- 3) Définir la valeur de l'hyperparamètre,
- 4) Résoudre le problème direct pour obtenir $f(\sigma)$,
- 5) Évaluer la règle d'arrêt : soit un nombre d'itérations prédéfini, soit une précision seuil, ou les deux,
- 6) Calculer $\Delta\sigma$, à partir de la matrice Jacobienne,
- 7) Mettre à jour la conductivité : $\sigma_{k+1} = \sigma_k + \Delta\sigma$,
- 8) Mettre à jour la matrice admittance utilisée pour résoudre le problème direct,
- 9) Mettre à jour la matrice Jacobienne,
- 10) Retour à l'étape 4.

1.4. Equipement experimental

Dans le cadre de ce projet de recherche, plusieurs systèmes d'acquisition permettant de caractériser les propriétés électriques des matériaux étudiés ont été utilisés. L'objectif est de tester différentes options pour effectuer les mesures et connaître les limites d'utilisation des différents appareils.

Certains des appareils testés dans ce projet sont des appareils développés par des entreprises privées et qui sont commercialisés. D'autres systèmes d'acquisition ont été développés dans le cadre de ce travail pour répondre à certaines contraintes et/ou spécificités des expériences mesurant les propriétés électriques des matériaux.

Dans cette section, seul l'appareil finalement choisi parmi ceux testés au cours de ce projet de recherche est décrit. Les autres appareils et systèmes d'acquisition qui ont été testés sont présentés en Annexe (c.f. *Annexe I : Systèmes d'acquisition testés pour la mesure de la résistivité électrique p.187*).

Le principal outil utilisé pour caractériser les propriétés électriques intrinsèques des matériaux étudiés est l'oscilloscope Handyscope HS5, montré sur la Figure 34 et commercialisé par TiePie Engineering.



Figure 34 : Oscilloscope digital TiePie Handyscope HS5

Ce système est composé de deux canaux d'entrée et d'un générateur de formes d'ondes arbitraires. Le générateur de formes d'ondes arbitraires permet de générer des signaux électriques dont la forme de l'onde, la fréquence et l'amplitude sont définies par l'opérateur. La fréquence des signaux générés peut être définie entre une plage allant de 1μ à 10MHz.

L'oscilloscope présente deux voies d'entrée de mesure. La résolution pour la digitalisation du signal peut être choisie entre 8 bits, 12 bits, 14 bits et 16 bits. La fréquence d'échantillonnage maximale est définie à 500 MHz (avec une largeur de bande de 250 MHz). La mémoire interne de l'oscilloscope permet de stocker jusqu'à $32 \cdot 10^6$ points mesurés sur un signal entrant. La plage de voltage mesurable est 24 V (entre -12 V et 12 V), avec une résolution de 3,7pV à 16 bits.

L'oscilloscope est connecté au PC de contrôle via une connexion USB. Le logiciel de contrôle fourni avec l'oscilloscope permet de choisir le mode de stockage et permet de définir les caractéristiques des signaux générés par le générateur de fonctions d'ondes intégré.

Ce système permet d'effectuer directement des mesures de résistivité électrique en utilisant la méthode des mesures uni-axiales. Ces mesures uni-axiales de la résistivité électrique des matériaux sont réalisées à partir d'une mesure ponctuelle de la différence de potentiel électrique entre les extrémités d'un échantillon. Divers auteurs ont utilisé la méthode de mesure uni-axiale de la résistivité électrique sur des matériaux poreux avec des dispositifs similaires McCarter (1984) et Fukue et coll. (1999) constitués d'une seule paire d'électrodes circulaires placées sur les côtés supérieur et inférieur d'un échantillon cylindrique. Les électrodes ayant le même diamètre que l'échantillon.

1.5. Développement d'outils de mesure adaptés

Les outils développés au cours de ce projet de recherche concernent d'une part, un système d'acquisition pour les mesures en configuration multi-électrode avec l'oscilloscope TiePie HS5, qui ne comprend que deux voies de mesure et une voie d'injection. D'autre part, la conception des électrodes permettant d'effectuer les mesures sans produire aucun endommagement local sur les matériaux étudiés.

1.5.1 Système d'acquisition électrique multi-électrode

Pour effectuer les mesures électriques sur les assemblages multicouches, il a été nécessaire de développer *ab initio* un système d'acquisition *ad-hoc* comprenant plusieurs électrodes. En effet, lors de l'imbibition capillaire de chaque assemblage il est nécessaire de pouvoir mesurer la variation de potentiel électrique entre les électrodes des deux côtés de l'assemblage sur les différents niveaux successifs.

Le système d'acquisition est composé de trois parties :

- un système d'injection et de mesure,
- une matrice d'interrupteurs,
- un microcontrôleur permettant de contrôler la matrice d'interrupteurs.

Le système d'injection et de mesure utilisé est un oscilloscope TiePie HS5 avec deux voies permettant d'effectuer des mesures, et un générateur de fonction d'ondes utilisé pour générer le signal d'injection.

Le système d'injection utilisé ne permet qu'une injection continue sur une seule voie. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser un système permettant de diriger le signal injecté vers les différentes électrodes d'une manière séquentielle permettant d'identifier à tout moment quel couple d'électrodes est utilisé pour chaque intervalle du signal enregistré.

Pour ce faire, une matrice d'interrupteurs constituée de 16 relais *reed* pilotés par un microcontrôleur a été développée. Comme montré sur la Figure 35, le relais *reed* est un type d'interrupteur contrôlé par une bobine, qui génère un faible champ électromagnétique qui induit la fermeture de l'interrupteur contenue dans une cellule remplie d'un gaz inerte [80].

Les relais reeds sont des interrupteurs a deux lames de matériau ferromagnétique, communément constitués d'environ 50% de fer et de 50% de nickel, et une enveloppe en verre qui sert à la fois à maintenir les lames métalliques en place et à fournir un joint hermétique qui empêche l'entrée de toute particule externe dans les zones de contact entre les deux lames ferromagnétiques. La zone de contact est donc enfermée dans une enveloppe hermétiquement scellée avec des gaz inertes préservant la zone d'aiguillage de la corrosion ainsi que des contaminants externes.

Les relais reed utilisés ont des contacts ouverts dans leur état normal. Comme représenté sur la Figure 35, si un champ magnétique est appliqué le long de l'axe des lames de l'interrupteur, le champ est intensifié dans les lames de l'interrupteur en raison de leur nature ferromagnétique, les contacts ouverts des lames de l'interrupteur sont attirés les uns vers les autres et les lames dévient pour combler l'écart. A partir d'une certaine amplitude de ce champ, les pales se rejoignent et un contact électrique est fait.

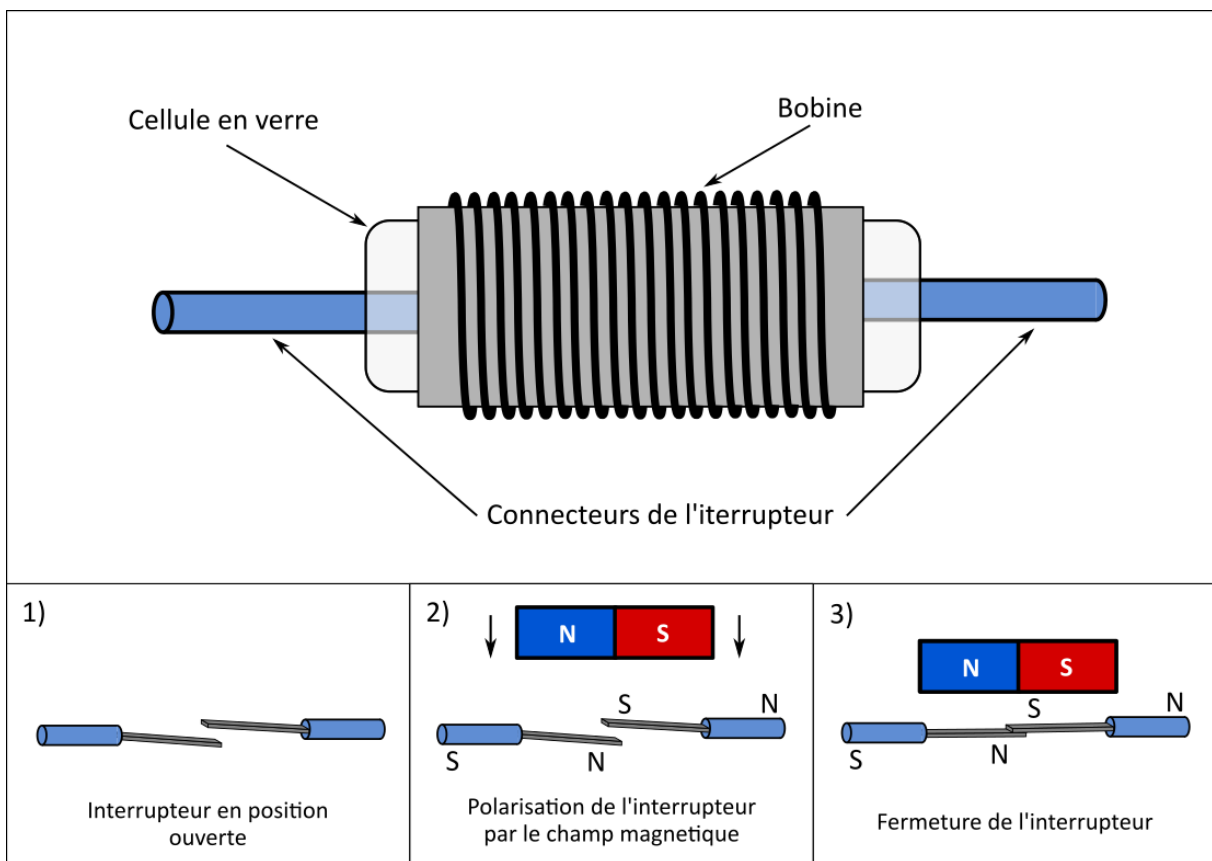


Figure 35 : Représentation schématique montrant le mode de fonctionnement des relais reed (d'après [73]).

Les relais reed utilisés sont des relais RS 291-9710. La bobine permettant d'effectuer le contact est actionnée par un courant DC de 5 V. L'intensité maximale tolérée par ce relais est de 1 A et le voltage maximal 200 V en DC ou 200 V entre le pic maximal et le pic minimal en AC. Une diode est placée entre le pôle positif et négatif de la bobine afin d'éviter l'action accidentel par des courants induits par le champ électromagnétique généré par la bobine.

Le contrôle des relais permettant le choix des électrodes d'injection et de mesure est réalisé par un microcontrôleur Arduino Mega 2560 Rev.3. Comme le montre la Figure 36, ce microcontrôleur

possède 56 broches d'Entrée/Sortie dont 16 entrées analogiques avec une résolution de 10 bits et 50 voies digitales, pouvant contrôler ou recevoir l'information d'une large variété d'appareils, capteurs et autres composants électroniques. L'intensité du courant maximale tolérée par les Entrées/Sorties est de 40 mA.

Ce microcontrôleur est composé d'un microprocesseur ATmega2560 cadencé à 16 MHz, avec une mémoire flash de 256 kB et une mémoire SRAM 8 kB.

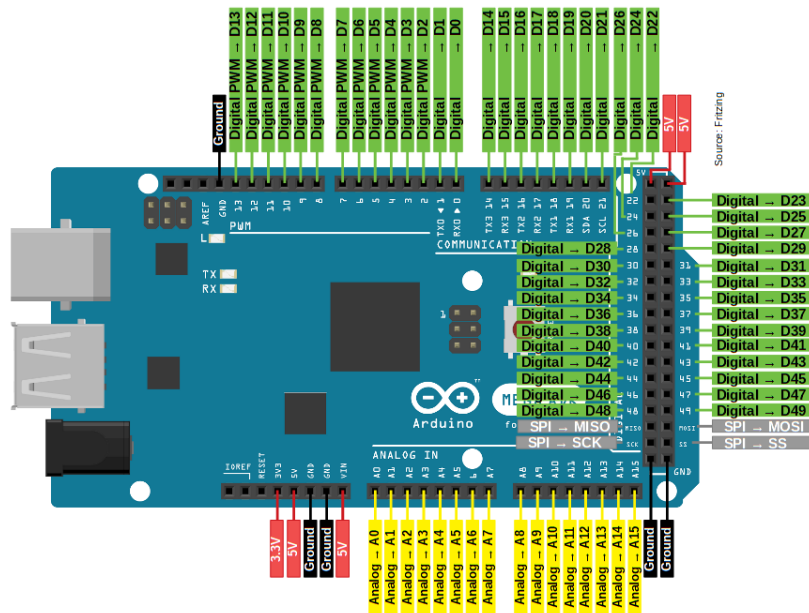


Figure 36 : Représentation schématique du microcontrôleur Arduino Mega 2560 Rev.3 avec la description des différents types de voies d'entrée et de sortie

L'avantage principal de l'utilisation de ce microcontrôleur est sa versatilité et la relative facilité d'utilisation de son environnement de programmation. En effet, pour effectuer le programme de la routine d'exécution, peut être utilisé le langage Arduino, très similaire au C et C++, ou toute autre langage de programmation comme Python, C, C++, Java, etc.

Le programme permettant de contrôler les relais est écrit en utilisant le langage de programmation Arduino.

La Figure 37 présente la manière dont sont connectées les trois parties du système d'acquisition développé.

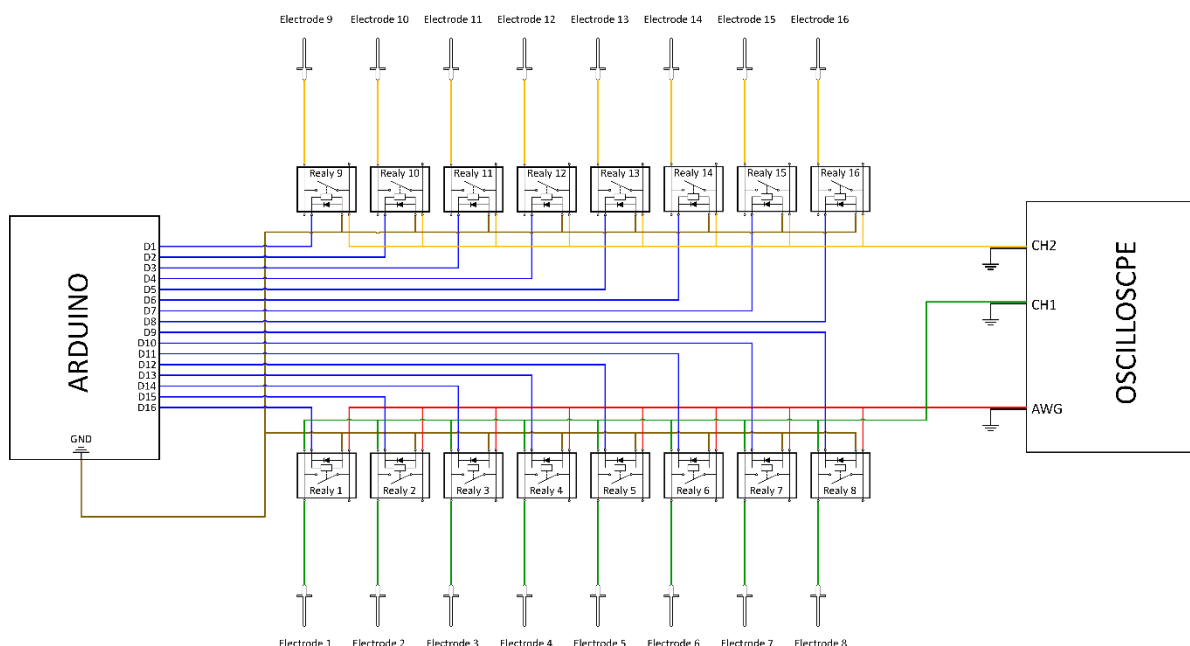


Figure 37 : Représentation schématique du système d'acquisition développé montrant les connexions entre les trois parties principales (microcontrôleur, matrice de relais et oscilloscope)

L'injection et la mesure du signal électrique sont effectuées avec l'oscilloscope TiePie HS5. La sortie de l'oscilloscope correspondant au générateur de fonctions d'ondes utilisé pour le signal d'injection est connecté aux entrées des interrupteurs des relais *reed* dont les sorties sont connectées aux huit premières électrodes. Le signal injecté est un signal carré de 12 V d'amplitude et une fréquence de 137 Hz dont l'intensité fixée par l'appareil est de 0,1 mA.

La voie 1 de l'oscilloscope est connectée entre la sortie des huit premiers relais, utilisés pour l'injection et les électrodes correspondantes.

La voie 2 de l'oscilloscope est utilisée pour mesurer la valeur de voltage dans les huit dernières électrodes utilisées pour la réception du signal. Elle est connectée sur l'entrée des relais *reed* dont la sortie est connectée aux électrodes numérotées de 9 à 16.

Les connecteurs des bobines des seize relais *reed* permettant de contrôler l'ouverture et la fermeture des interrupteurs, sont connectés à seize des cinquante sorties digitales de l'Arduino Mega.

Le microcontrôleur est programmé pour ouvrir les relais connectés aux électrodes de même hauteur et du côté opposé pendant une seconde. Après la fermeture d'un couple de relais, il se passe une seconde avant l'ouverture du couple de relais suivant. A la fin d'une section complète (8 couples d'électrodes) une pause de deux secondes est programmée avant l'ouverture du premier couple d'électrodes de la section suivante. Cette procédure permet de différencier les parties du signal correspondantes à chaque couple d'électrodes.

1.5.2 Electrodes non invasives

Une partie non négligeable du travail a été dédié au développement des électrodes non-invasives spécialement conçues pour effectuer des mesures de tomographie de resistivité électrique sur le

terrain. En effet, l'utilisation des électrodes classiques n'est pas envisageable dans le cas du patrimoine bâti elles sont classiquement constituées de barres d'acier insérées dans la structure préalablement perforée et ne sont donc pas adaptés car elles induisent des endommagements locaux.

L'étude de la littérature permet d'identifier des auteurs mettant en œuvre des électrodes de type ECG (Electro-Cardiogramme) utilisées dans l'imagerie médicale [60]. Ce type d'électrodes a été testé lors d'essais préliminaires pendant ces travaux de recherche. Cependant, l'utilisation de ce type d'électrodes peut laisser des traces visibles sur l'emplacement de l'électrode (Figure 38) car elles nécessitent un gel conducteur pour garantir le contact entre la partie conductrice de l'électrode et la surface du matériau. Bien que ces endommagements locaux soient complètement réversibles en nettoyant la surface à l'eau, il est préférable d'utiliser des électrodes ne laissant aucune trace après la mesure.

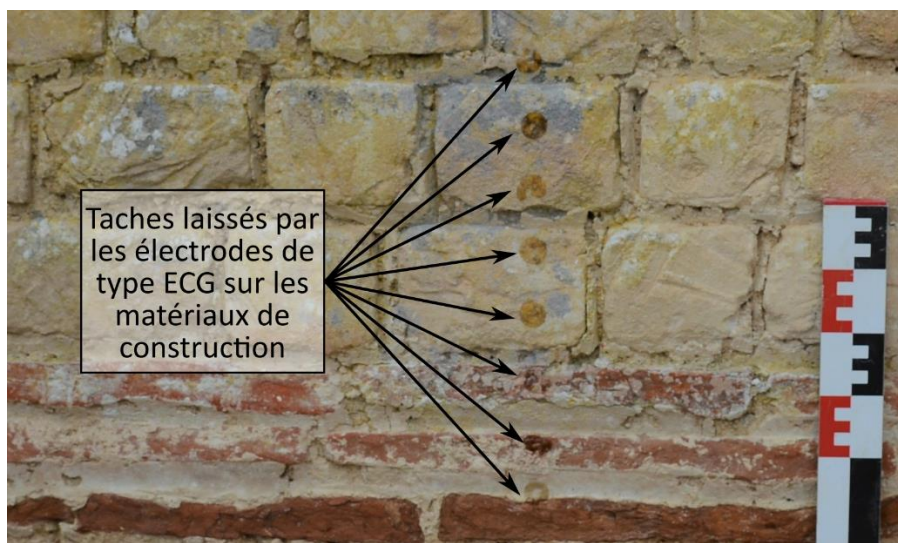


Figure 38 : Endommagement local (réversible) infligé sur les matériaux de construction du mur par les tests préliminaires utilisant électrodes de type ECG.

Les électrodes développées s'adaptent aux différentes contraintes de la mesure in-situ sur des structures du patrimoine bâti. La contrainte la plus importante concerne la préservation de l'intégrité de la structure sur laquelle sont effectuées les mesures.

De plus, la surface des murs peut être très irrégulière. Il est donc nécessaire de prévoir un système qui permet d'appliquer la même pression de contact pour toutes les électrodes utilisées pour la mesure. Comme le montre la Figure 39 l'utilisation d'un ressort au cœur de l'électrode permet d'adapter le niveau de pression et la position de l'embout par rapport à la fixation afin de maintenir les électrodes en contact avec le mur. Sur cette même figure, l'importance de l'utilisation des embouts en feutre de graphite souple est mise en exergue. En effet, la rugosité de surface peut affecter la surface de contact si les embouts des électrodes n'épousent pas parfaitement la surface. Un mauvais contact peut être à l'origine d'un ratio signal sur bruit faible. C'est pourquoi les embouts des électrodes sont revêtus en feutre de graphite souple permettant d'assurer un meilleur contact avec la structure.

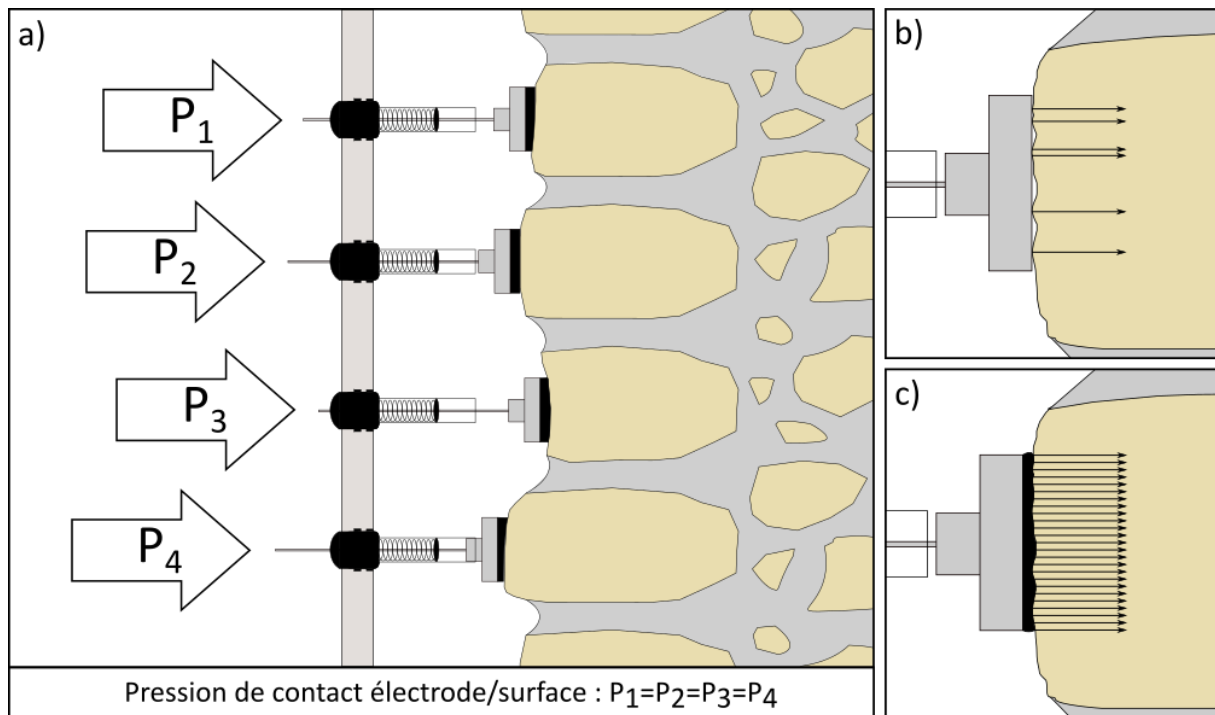


Figure 39 : a) Schéma montrant l'utilité du ressort pour appliquer une pression de contact similaire pour toutes les électrodes sur une surface irrégulière. b) Mauvais couplages entre électrode et mur du fait de la rugosité de surface. c) Amélioration du couplage en utilisant un embout en feutre souple.

Le corps central des électrodes développées est composé d'une tige filetée d'aluminium permettant la transmission du courant électrique. Il est protégé des contacts externes par un tube en PVC. Un presse-étoupe permet de maintenir les différentes parties ensemble.

Une des particularités de ces électrodes est la possibilité de moduler la surface de contact en fonction des besoins expérimentaux en adaptant la taille de l'embout. L'utilisation d'une tige filetée facilite l'adaptabilité du système, en permettant de visser un embout de la largeur souhaitée et donc de définir une surface de contact *ad hoc*. Les électrodes présentées sur la Figure 40 utilisent deux embouts de taille différente, un premier de 1cm de diamètre et un second de 2cm de diamètre. L'adjonction d'un feutre de graphite permet d'épouser au mieux les irrégularités de surface.

Ainsi, les électrodes développées ont été testées afin de déterminer leur performance concernant le rapport signal sur bruit tout en minimisant l'impact sur le substrat. La performance des électrodes développées sont comparés à celle des électrodes de type ECG [60].

Les premières électrodes testées sont des électrodes de type électrocardiogramme (ECG), Figure 40, qui sont constituées d'un disque de 1cm de diamètre inséré dans une couche de gel à base aqueuse définissant une surface de contact de 6,16 cm². Le gel de base aqueuse favorise le couplage entre l'électrode et la surface des matériaux.

Les deux autres électrodes testées, Figure 40, correspondent aux électrodes développées ici avec deux tailles d'embout différentes.

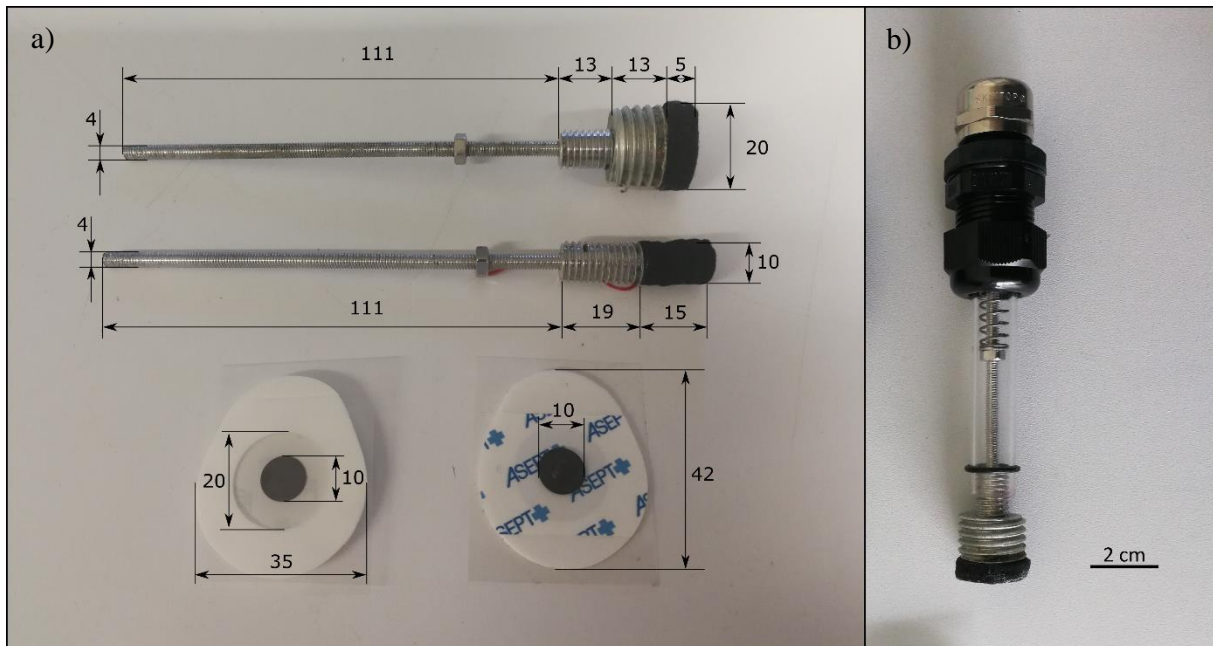


Figure 40 : a) Spécifications techniques des électrodes non-invasives utilisées. b) Electrode développée pour l'optimisation des mesures électriques sur des surfaces irrégulières.

Afin de comparer les performances, les électrodes développées et les électrodes ECG sont testées sur un matériau de construction de type calcaire CA en recourant à une configuration de type quadripôle de Wenner (cf. Chapitre 3). L'échantillon-test est un moellon de 27 cm de largeur, pour 8 cm de profondeur et 6 cm de hauteur. La Figure 41 montre les détails du protocole de mesure concernant la configuration des électrodes et la disposition de l'échantillon.

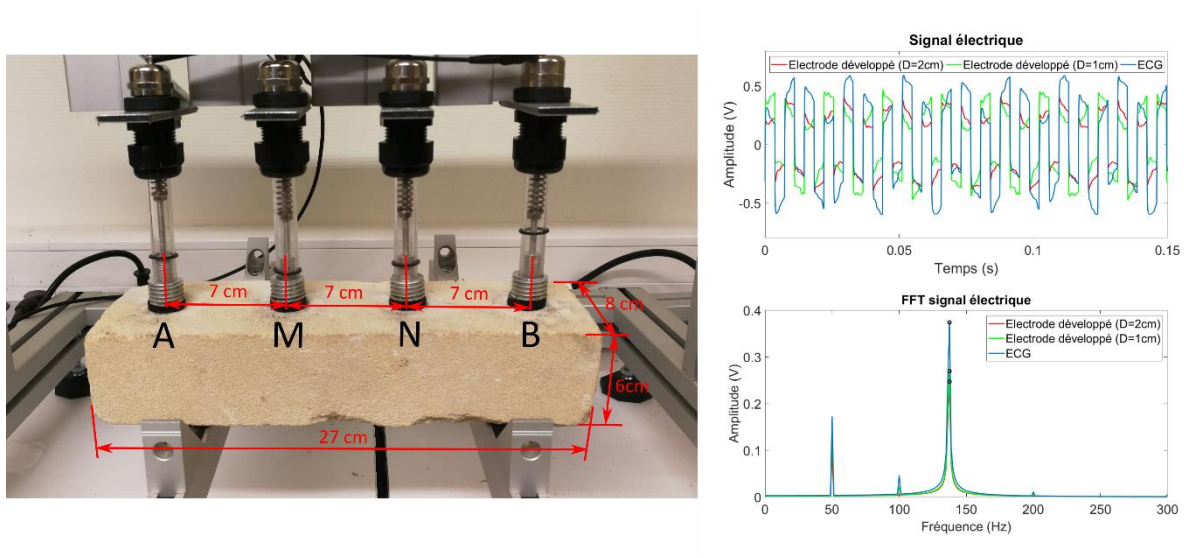


Figure 41 : Test de sensibilité des électrodes développées et comparaison avec comparé aux électrodes ECG.

Les résultats de ces mesures concernant les électrodes développées avec l'embout de 2 cm et 1 cm et les électrodes de type ECG montrent des résultats légèrement différents. Cette différence est probablement due à la différence de résistance de contact des différentes électrodes. Les électrodes de type ECG présentent une amplitude du signal plus importante que les électrodes développées.

Les électrodes développées ayant une surface d'appui plus importante, leur performance est plus faible que celles développées avec un embout de surface plus restreinte. Ce résultat est attribué au fait que les électrodes avec l'embout de 2 cm présentent une interface en plus car l'embout de 2 cm est visé directement sur l'embout de 1 cm.

2. Méthode d'imagerie par thermographie infrarouge

Avant même la publication des travaux de Max Planck sur la théorie des radiations, la mesure de la température a toujours été une question longuement étudiée par l'humanité. La première loi de la thermodynamique introduit le principe d'économie d'énergie et explique que tout processus consommant de l'énergie verra une grande partie de cette énergie se transformer en chaleur [81].

Ce n'est qu'au début du XX^{ème} siècle avec la publication des travaux de Max Planck, que le concept d'un rayonnement infrarouge dans l'échelle du spectre électromagnétique a été définitivement formulé permettant ainsi de distinguer cette région des régions concernant les rayonnements visibles (lumière visible) et les rayonnements radioélectriques du spectre électromagnétique.

Les études du rayonnement infrarouge et de son interaction avec la matière forment une branche étendue de l'optique. Une façon de générer le rayonnement infrarouge est simplement d'augmenter la température du corps adopté comme source. En fait, le rayonnement des corps chauffés est le processus de transfert de chaleur le plus répandu et le plus important rencontré dans la pratique.

Contrairement à l'échange de chaleur par conductivité et convection, les processus ne découlant que d'un contact direct entre les corps est régi en grande partie par des écarts de température, l'échange de chaleur radiatif se produit en l'absence de contact direct et dépend dans une large mesure du niveau de température du processus. L'échange radiatif de chaleur s'accompagne d'une conversion de l'énergie thermique en énergie des champs électromagnétiques. Lorsqu'elle est absorbée, cette énergie est à nouveau transformée, partiellement ou complètement, en énergie thermique [82]. Une technique permettant de mesurer le flux radiatif de chaleur est la thermographie infrarouge.

La thermographie infrarouge est une technique indirecte de mesure de l'humidité lorsqu'il s'agit de matériaux poreux. Cette technique est basée sur le fait que la présence d'eau à l'intérieur des pores des matériaux provoque des modifications de la température de surface dus aux échanges radiatifs entre l'eau dans les pores et l'environnement extérieur [2,83]. La thermographie infrarouge a été utilisée depuis plusieurs décennies pour obtenir des informations qualitatives de la distribution spatiale de la teneur en eau sur des matériaux de construction. En effet, la capacité de caractériser la répartition de l'eau à partir de thermogrammes obtenus de manière non-destructive et sans contact, fait de cette technique une méthode particulièrement puissante dans le cadre de la conservation du patrimoine bâti [2,84,85]. Cependant, les mesures qualitatives soulignent des problèmes d'interprétation parce que les zones humides peuvent, dans certains cas, montrer des

températures plus élevées que les zones sèches du fait de l'inertie thermique de l'eau comparée à l'inertie thermique de l'air contenu dans les parties sèches. C'est pour cela que certains auteurs ont effectué des travaux qui apportent des moyens d'exploiter les thermogrammes quantitativement en étudiant la relation entre le flux d'évaporation et la teneur en eau des matériaux [86]. Dans ce travail de recherche, l'utilisation de la thermographie IR a pour objectif de quantifier la teneur en eau réelle des matériaux de construction à partir des images thermiques obtenues par la caméra IR.

2.1. Fondements théoriques de la thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique d'imagerie, qui permet de « visualiser » directement les différences de température de la surface observée. Cette observation peut se faire en mode passif (thermographie passive), sans source de chaleur extérieure, ou en mode actif (thermographie stimulée), avec une source de chaleur extérieure qui « éclaire » la surface observée. L'analyse consiste alors à observer la façon dont la chaleur se diffuse dans le matériau.

En effet, lors de l'augmentation de la température d'un objet, induite par l'augmentation de l'agitation moléculaire en son sein, une libération d'énergie photonique est produite, généralement notée symboliquement W [81]. Il est possible de quantifier la valeur de l'énergie photonique émise par un corps par l'équation (39) :

$$W = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (39)$$

Avec : h , la constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$), c , la vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$) et λ , la longueur d'onde de l'onde électromagnétique émise (m).

Comme le montre la Figure 42, le spectre infrarouge émis par un corps couvre une large bande du spectre électromagnétique représenté par une variation de longueur couvrant quatre ordres de grandeur entre le début et la fin de l'intervalle IR.

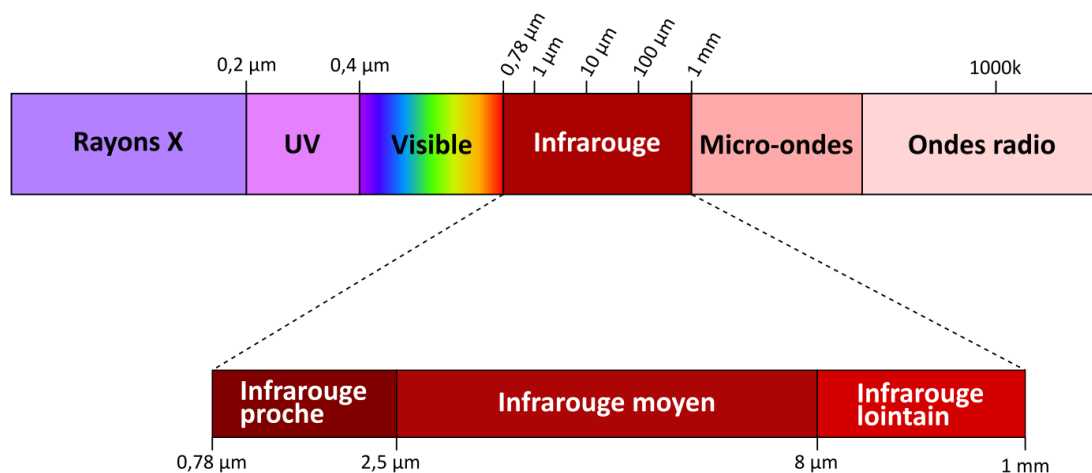


Figure 42 : Spectre électromagnétique avec détail de la bande spectrale infrarouge.

La bande spectrale correspondante aux radiations infrarouges correspond aux longueurs d'ondes allant de 780 nm à 1mm. Dans cette bande spectrale des radiations infrarouges, trois sous-groupes sont définis :

- Infrarouge proche : correspondant à une longueur d'onde allant de 0,78 μm à 2,5 μm .
- Infrarouge moyen : correspondant à une longueur d'onde allant de 2,5 μm à 8 μm ,
- Infrarouge lointain : correspondant à une longueur d'onde allant de 8 μm à 1 mm,

La première loi de Kirchhoff montre qu'à l'intérieur d'une cavité fermée et isotherme règne un champ de luminance isotrope qui est indépendant de la nature, de l'état de la surface et de la forme des parois. Ce champ de luminance n'est fonction que de la longueur d'onde. C'est cette luminance qui permet d'introduire la notion de corps noir. Le corps noir est défini comme un corps idéal qui se caractérise par le fait de l'absorption totale des rayonnements qui lui parviennent. De la même manière, le rayonnement du corps noir est isotrope dans tout le spectre. Cela permet donc d'affirmer qu'il est possible d'effectuer des mesures de température par radiométrie [87].

Dans le cas d'un corps réel, le flux de rayonnement, Φ , reçu depuis une source interagie de plusieurs manières avec le corps réel. Une partie du rayonnement est réfléchi, Φ_r , sur le corps, une autre partie est absorbée, Φ_a , et une dernière partie est transmise, Φ_t . Par conséquent, il est possible d'écrire, équations (40) et (41) :

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (40)$$

Que l'on peut encore écrire :

$$1 = \frac{\Phi_r}{\Phi} + \frac{\Phi_a}{\Phi} + \frac{\Phi_t}{\Phi} \quad (41)$$

Avec : $\Phi_r/\Phi = \rho$, le facteur de réflexion, $\Phi_a/\Phi = \alpha$, le facteur d'absorption et $\Phi_t/\Phi = \tau$, le facteur de transmission. Ce qui permet de simplifier l'équation (41) et obtenir l'équation (42) :

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (42)$$

Pour un corps donné, il convient de noter que sa température augmente en fonction du flux de rayonnement absorbé et que le flux émis est fonction de sa température. Une propriété importante en découle alors lorsque le corps est à l'équilibre. En effet, dans ce cas le corps émet un flux égal au flux absorbé et ainsi (43) :

$$\Phi_a = \Phi_e \quad (43)$$

Ce qui permet de définir la relation suivante :

$$\alpha = \varepsilon \quad (44)$$

Avec : ε , l'émissivité du corps. Cette égalité permet de réécrire la distribution du flux incident définie par l'équation (42) sous la forme suivante (45) :

$$1 = \rho + \varepsilon + \tau \quad (45)$$

En radiométrie, les objets étudiés correspondent généralement à des corps opaques qui se caractérisent par le fait que la transmittance peut être négligée. Dans ces conditions, l'équation (45) devient (46) :

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (46)$$

Le corps noir étant le corps absorbant idéal, par conséquent la totalité du rayonnement reçu est caractérisé pour avoir un facteur de réflexion nul et dans ce cas (47) :

$$\varepsilon = 1 \quad (47)$$

Le miroir parfait est également un corps idéal, car il réfléchit la totalité des rayonnements reçus, soit encore (48) :

$$\rho = 1 \quad (48)$$

C'est donc entre les cas idéaux des corps noirs et des miroirs parfaits que se situent les corps opaques correspondant aux objets solides étudiés par la méthode de la thermographie infrarouge.

Finalement, il est nécessaire d'introduire les corps semi-transparents qui peuvent être traversés par les rayonnements reçus. C'est le cas des gaz (atmosphère) et certains types de verre qui peuvent être à l'origine du bruitage des mesures sur les objets d'intérêt. Dans ce cas, l'équation adimensionnelle du flux électromagnétique incident devient l'équation (49) :

$$\varepsilon + \tau = 1 \quad (49)$$

Compte tenu des propriétés respectives des corps noirs et des corps réels pour une même température, le rayonnement émis par un corps réel est moindre que celui émis par un corps noir. L'émissivité est le rapport entre le rayonnement émis par le corps réel et celui émis par le corps noir. Par conséquent, en reportant cette propriété au cas de la mesure en recourant à la thermographie infrarouge, il convient de retenir que cette technique permet de caractériser la température d'un corps à partir de la mesure du flux émis. Cependant, il est très important de tenir compte de l'émissivité du corps considéré.

L'émissivité d'un corps peut varier selon certains paramètres. Comme son état de surface. Les surfaces rugueuses ont une émissivité plus importante que les surfaces lisses. De la même manière, les matériaux isolants présentent une émissivité plus importante que les matériaux conducteurs.

Le facteur de réflexion est un autre paramètre d'influence lors de mesures par thermographie infrarouge. Compte tenu du fait que les corps réels ont un facteur de réflexion non nul, les émissions en provenance des sources externes environnantes sont en partie réfléchies par les corps réels s'additionnant à celles émises par les corps réels.

Afin de caractériser les réflexions, le paramètre appelé température d'environnement radiatif est mesuré. En outre, pour effectuer des mesures par thermographie infrarouge, il convient que la température du milieu environnant le corps soit uniforme et ne soit pas en mesure de produire des réflexions multiples. Si ces précautions peuvent être validées, on admet en général que le milieu environnant le corps est assimilable à un corps noir.

Si la distance caméra-corps est importante, un autre paramètre affectant les mesures par thermographie infrarouge est le facteur de transmission moyen de l'atmosphère. En effet, l'atmosphère est un corps semi-transparent du flux émis par l'atmosphère. La part d'énergie ainsi induite s'ajoute à celle émise par le corps réel. Il est donc nécessaire de caractériser les différents paramètres qui vont déterminer le facteur de transmission moyen de l'atmosphère comme la distance de la caméra, le taux d'humidité relative et la température ambiante.

2.2. Protocoles de mesure de l'imagerie de thermographie IR

Les caméras IR avec détecteurs de type microbolomètre fonctionnent selon des principes non quantiques. Les détecteurs réagissent à l'énergie radiative émise par les matériaux d'une manière qui provoque un changement d'état du détecteur. Ce changement d'état induit une modification du signal électrique émis par le détecteur qui peut être interprété par les composants électroniques de la caméra IR. En effet, les caméras IR ne permettent pas de mesurer la température directement. La température représentée par la thermographie doit être déterminée à partir de l'analyse du flux radiatif de l'objet ainsi que ces paramètres cités précédemment. Par conséquent, l'émissivité de l'objet central des mesures est essentielle pour déterminer les températures apparentes qui se rapprochent le plus des températures surfaciques réelles. C'est la raison pour laquelle, afin d'obtenir les meilleurs résultats concernant la représentation du flux radiatif par des températures, il est utile de connaître précisément des valeurs de ces paramètres, parmi lesquels un des plus importants concerne l'émissivité.

Des tables d'émissivité sont disponibles pour une grande variété de substances communes. Toutefois, en cas de doute, des mesures doivent être effectuées pour obtenir les valeurs correctes. Certains auteurs comme Moropoulou et Avdelidis [84] ont présenté des travaux dans lesquels les valeurs d'émissivité de nombreux matériaux de construction et de structure, tels que les pierres, les plâtres, les mortiers, les marbres et les tesselles de mosaïques, ont été calculées conformément à l'approche standard pertinente de l'ASTM (American Society for Testing Material) et selon un protocole spécialement conçu pour des mesures empirique en laboratoire.

En fonction du type d'application pour laquelle est effectuée la mesure, deux approches différentes peuvent être utilisées. Les deux approches de base de cette technique d'imagerie sont la thermographie IR active et la thermographie IR passive [88, 89].

Contrairement à la thermographie active (pulsée ou modulée), la méthode passive informe sur le rayonnement thermique émis par la surface du corps d'essai dans son état naturel non perturbé. La méthode passive n'applique aucune source qui peut modifier la dynamique du processus physique

qui veut être observé. C'est le cas du suivi de l'évolution de la teneur en eau des matériaux au cours du temps à partir de l'analyse des températures surfaciques [85, 90]. Pour ce type d'application il est important de ne pas modifier le processus physique en cours en l'utilisation des sources thermiques externes [91] ; la méthode de thermographie IR passive est ainsi été retenue.

2.3. Equipement expérimental

L'équipement utilisé pour effectuer les mesures par thermographie infrarouge est un microbolomètre FLIR A655sc qui fait partie de la famille des caméras thermique à base de détecteurs non refroidis, cf. Figure 43.



Spécifications techniques	
Précision	±2 %
Type de détecteur	Microbolomètre non refroidi
Plage dynamique	16 bits
Sensibilité thermique	< 30 mK
Plage de températures standard	-40 °C à 150 °C 100 °C à 650 °C
Résolution (pixels)	640 × 480
Pas du détecteur	17 μm
Gamme spectrale	7,5 à 14,0 μm
Fréquence d'images	50 Hz

Figure 43 : Microbolomètre FLIR A655sc et spécifications techniques.

Le type de détecteur utilisé permet de déterminer la plage spectrale pour laquelle l'image thermique se forme [92]. Les détecteurs utilisés par les micro-bolomètres permettent seulement de créer des images thermiques correspondant aux radiations faisant partie de la bande spectrale de l'infrarouge lointain. Plus spécifiquement, ce type de caméra thermique est sensible aux radiations infrarouges dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 7,5 et 14μm.

Les détecteurs utilisés sont constitués par l'assemblage d'un absorbeur de flux infrarouge, d'un thermomètre et d'un isolant thermique associé à un circuit de lecture.

Le thermomètre du détecteur correspond au groupe de thermomètres électriques de type ferroélectriques utilisant une résistance d'oxyde de Vanadium. Ce type de détecteur est caractérisé pour avoir une sensibilité thermique inférieure à 30mK.

La résolution de l'image est déterminée par le nombre de détecteurs présents dans la caméra. Le modèle de camera IR utilisée comporte 307200 détecteurs qui sont positionnés sur une matrice de 640x480 permettant de créer une image thermique de même résolution en pixels. La Figure 44 montre les composants principaux des détecteurs et le positionnement spatial au sein du capteur [93].

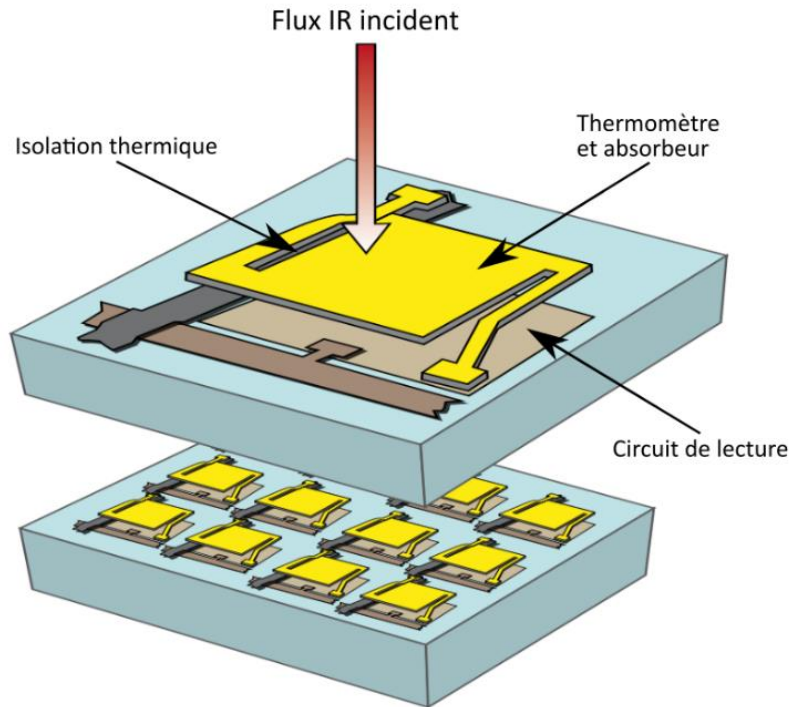


Figure 44 : Schéma de réalisation d'un élément sensible (pixel) dans une matrice de détecteurs du microbolomètre (modifié d'après [93]).

Le temps d'exposition, aussi connu comme la constante de temps thermique, est le paramètre qui détermine le temps minimal nécessaire à l'enregistrement d'une image thermique. Le temps d'exposition se distingue de la fréquence d'enregistrement des images qui permet, elle, de déterminer le nombre d'images par seconde qu'il est possible d'enregistrer par la caméra. Cependant, plus le temps d'exposition est faible, plus la fréquence d'enregistrement pourra être importante. Le modèle de caméra qui a été employé dans ce projet présente un temps d'exposition inférieur à 8 ms et la fréquence d'enregistrement des images est modulable de 1Hz à 50Hz.

Finalement, toutes les données obtenues par la caméra sont transmises en continu à un ordinateur qui permet d'effectuer les réglages et les traitements via le logiciel ResearchIR.

CHAPITRE V
Vers une modélisation
phénoménologique des
transferts d'eau

1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des mesures pétrophysiques sur les différents matériaux sont présentés, en vue de caractériser les propriétés de stockage et de transfert. Comme expliqué dans le Chapitre II, sept spécimens sont étudiés :

- CA : moellon calcaire ;
- CAMHET : calcaire moyen appareil hétérogène pour lequel on distingue :
 - CAMHET-nh : correspondant à la partie homogène du matériau ;
 - CAMHET-nd : correspondant aux niveaux durcis ou compactés du matériau ;
- CAMHOM : calcaire moyen appareil homogène ;
- BAc : brique ancienne claire ;
- BAF : brique ancienne foncée ;
- MA : mortier ancien ;
- MM : mortier moderne.

Les géométries des échantillons sont décrites sur la Figure 45 et dépend de la nature des essais réalisés.

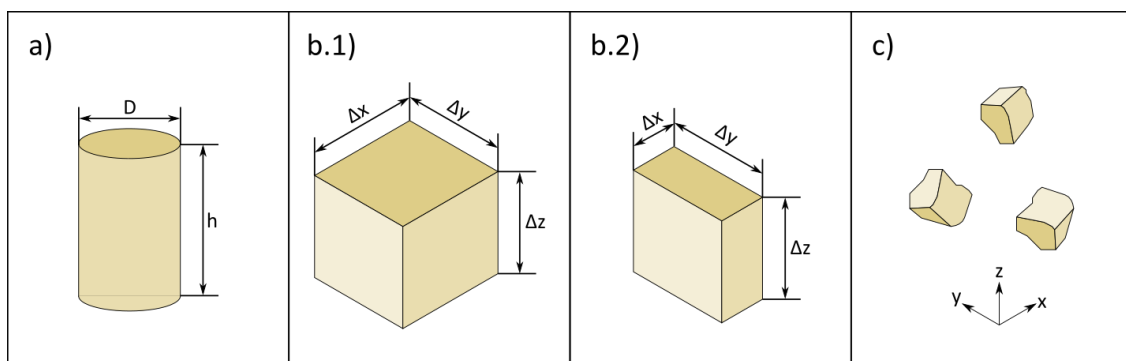


Figure 45 : Types d'échantillon utilisés pour les analyses pétrophysiques : a) Échantillon cylindrique. b.1) Bloc à section carrée. b.2) Bloc à section rectangulaire. c) Chutes irrégulières de petite taille.

La géométrie cylindrique est utilisée dans la plupart d'analyses pétrophysiques, à savoir les mesures de porosité totale, porosité $48h$, capillarité et perméabilité à l'air pour le mortier MM. Les échantillons à section rectangulaire, servent aux mesures de perméabilité à l'air. Finalement, les mesures de porosité par injection de mercure sont réalisées sur des chutes irrégulières extraites des parties de matériau restant.

Comme expliqué dans le chapitre 2, l'échantillonnage des différents matériaux résulte d'un processus complexe du fait que le site est classé Monument Historique. Le volume de matériau disponible est donc très réduit et peut différer selon le type de matériau. Ainsi, la complétude des caractérisations pétrophysiques présentées ne concerne pas l'ensemble des matériaux, comme par exemple le mortier ancien (MA). Pour ce matériau, le volume total à disposition a seulement permis d'effectuer des expériences de porosimétrie au mercure. Une synthèse du type et du nombre d'échantillons ayant été façonnés est précisé en Annexe (c.f. *Annexe II : Synthèse des échantillons p.194*).

Pour les autres matériaux, le nombre d'échantillons utilisé pour chaque expérience peut varier. Du fait du caractère relativement invasif de la perméabilité à l'eau, certains des échantillons cylindriques utilisés pour les expériences de porosité et capillarité ont été réservés pour mener d'autres expérimentations, présentées dans les chapitres suivants.

L'analyse des informations obtenues lors des essais de caractérisation des propriétés pétrophysiques permet d'accéder à une vision relativement complète du comportement de chacun des matériaux vis-à-vis d'une sollicitation hydrique externe.

A la fin de ce chapitre, un modèle phénoménologique est élaboré pour décrire le chemin préférentiel de l'eau le plus probable dans deux sections représentatives du mur du temple Gallo-Romain du site de Vaux-de-la-Celle.

2. Propriétés du réseau poreux

2.1. Propriétés de stockage

Les propriétés de stockage sont définies par les différents types de porosités analysées. D'une part, la porosité totale notée N_t et, d'autre part, la porosité à 48 heures, notée N_{48} . A partir des mesures de N_t et de N_{48} , il est possible de calculer la porosité piégée, N_p , qui est la quantité de vide correspondant aux pores non accessibles à l'eau dans les conditions naturelles de saturation [94, 95].

Ces différentes mesures permettent également de calculer le coefficient de Hirschwald [96] qui témoigne de la proportion (relative) de porosité librement accessible à l'eau.

Les différents résultats obtenus, en suivant les protocoles expérimentaux présentés dans le chapitre 3, sont regroupés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Synthèse des paramètres concernant les caractéristiques pétrophysiques définissant les propriétés de stockage.

Matériaux		Porosité totale (%)	Porosité 48h (%)	Porosité piégé (%)	Coefficient de Hirschwald
Type	Code				
Calcaire moellon	CA	41,9±2,4	33,3±2,6	8,6±3,5	0,79±0,11
Calcaire moyen appareil homogène	CAMHOM	42,3±1,5	34,1±1,3	8,2±2	0,81±0,06
Calcaire moyen appareil hétérogène	CAMHET	35,3±1,6	27,7±1,3	7,6±2,1	0,78±0,08
Brique ancienne claire	BAC	33,6±1	28,3±0,7	4,4±0,4	0,84±0,05
Brique ancienne foncée	BAf	35±0,3	30,6±0,3	5,3±1,2	0,87±0,02
Mortier de restauration	MM	30,3±0,3	26,8±0,4	3,5±0,7	0,88±0,02

Les matériaux comme le calcaire de moellon (CA) et le calcaire de moyen appareil homogène (CAMHOM) ayant les valeurs de porosité les plus élevées, correspondent aux matériaux ayant la plus grande capacité de stockage, tandis que le calcaire de moyen appareil hétérogène (CAMHET), la brique antique claire (BAC), la brique antique foncée (BAf) et le mortier moderne (MM) ayant une plus faible porosité correspondent aux matériaux présentant une plus faible capacité de stockage.

Concernant la porosité à 48h, les résultats présentés permettent de déterminer les capacités de stockage effectives (à pression ambiante). Les résultats montrent les mêmes caractéristiques des matériaux que celles montrées par les résultats de l'expérience de la porosité totale, avec le calcaire moellon (CA) et le calcaire de moyen appareil homogène (CAMHOM) ayant les valeurs de porosité les plus élevées, et le calcaire de moyen appareil hétérogène (CAMHET), la brique antique claire (BAC), la brique antique foncée (BAf) et le mortier moderne (MM) ayant une plus faible porosité.

D'une part, les résultats ici présentés permettent de définir les capacités de stockage des différents matériaux en provenance du temple Gallo-Romain de Genainville. D'autre part, les valeurs de porosité piégée et le coefficient de Hirschwald permettent d'apporter des informations sur le comportement des matériaux concernant les possibles effets de la gélifraction.

La porosité piégée, correspondant à la différence entre la porosité totale et la porosité 48h, montre des valeurs plus importantes pour les matériaux ayant une porosité plus élevée comme les calcaires (CA, CAMHOM et CAMHET). Au contraire les matériaux de ayant un plus faible capacité de stockage, comme les briques (BAC et BAf) et le mortier (MM), montrent des valeurs de porosité piégé plus faibles.

Pour ce qui concerne le coefficient de Hirschwald tous les matériaux présentent des valeurs proches de 0,8. Cependant, les matériaux calcaires (CA, CAmHOM et CAmHET) plus poreux présentent des coefficients plus faibles majoritairement en dessous de 0,8, tandis que les matériaux de type brique (BAc et BAf) et le mortier (MM) présentent des valeurs légèrement au-dessus de 0,8.

2.2. Résultats de porosité par injection de mercure

L'essai de porosimétrie par injection de mercure est la seule mesure qui a pu être réalisée sur tous les matériaux.

Pour ces analyses, en employant le matériau calcaire de type CAmHET, deux sous-catégories ont été différenciées. Comme montré sur la Figure 46, la partie hétérogène du matériau correspondant à un niveau durci (ou induré), est référencé sous le code CAmHET-nd. Cela permet de le différencier de la partie plus homogène du matériau caractéristique des strates de calcaire lutétien, noté CAmHET-nh.

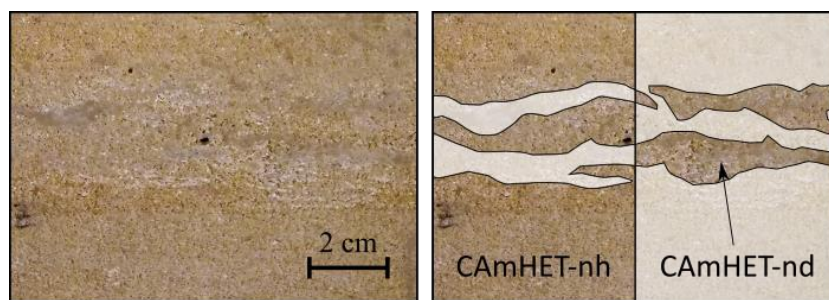


Figure 46 : Image en premier plan du CAmHET montrant les parties homogènes (nh) et les niveaux durcis (nd) correspondant à partie hétérogène.

Les résultats obtenus par porosimétrie au mercure (Tableau 3 et Figure 47) fournissent plusieurs informations, d'une part, la valeur de la porosité ouverte au mercure caractéristique du matériau et, d'autre part la répartition de la taille des pores des différents matériaux étudiés. C'est à partir de l'analyse de la distribution de la taille des pores que sont obtenues les données permettant de mieux comprendre le comportement des matériaux vis-à-vis des phénomènes de transfert, mais également quant à la capacité de stockage. L'aptitude au transfert est à mettre en lien avec la taille médiane des pores, d_{50} , et au pourcentage de pores selon leur taille [97,98]. L'analyse des pourcentages de tailles des pores se distingue par trois catégories :

- Taille inférieure à $0,1 \mu\text{m}$: cette catégorie correspond aux micro-pores susceptibles d'être affectés par la condensation capillaire spontanée en fonction de l'accroissement de l'humidité relative ambiante (eau endogène).

- Taille comprise entre 0,1 et 5 μm : cette catégorie correspond aux méso-pores dont la taille est suffisante pour participer à l'ascension capillaire.
- Taille supérieure à 5 μm : cette catégorie correspond aux macro-pores où le transport de l'eau est privilégié.

Tableau 3 : Présentation des résultats de la porosité au mercure et de la distribution de la taille des pores.

Matériaux		Porosité Hg (%)	Taille de pore médiane (μm)	Pourcentage de pore (%)		
Type	Code			< 0,1 μm	> 0,1 μm et < 5 μm	> 5 μm
Calcaire moellon	CA	40,1 \pm 2,8	16,89 \pm 4,62	6 \pm 0,8	28 \pm 6,9	66,1 \pm 7,6
Calcaire moyen appareil homogène	CAMHOM	40,1 \pm 2,3	12,11 \pm 2,54	5,2 \pm 0,4	32,7 \pm 0,5	62,1 \pm 4,7
Calcaire moyen appareil hétérogène	CAMHET-nh	41,4 \pm 4,1	9,66 \pm 0,6	5 \pm 0,4	36,2 \pm 3,4	58,8 \pm 3,7
Calcaire moyen appareil hétérogène	CAMHET-nd	25,2 \pm 2,9	7,81 \pm 1,35	10,3 \pm 2,8	46,6 \pm 3,2	43,1 \pm 4,8
Brique ancienne claire	BAC	31 \pm 1,7	0,52 \pm 0,03	43,5 \pm 4,1	53,8 \pm 4,4	2,7 \pm 0,4
Brique ancienne foncée	BAf	31,5 \pm 0,6	0,14 \pm 0,05	41 \pm 0,3	56,4 \pm 0,9	2,7 \pm 0,3
Mortier ancien	MA	36,7 \pm 2,8	0,95 \pm 0,64	16,4 \pm 1,4	64,7 \pm 1,2	18,9 \pm 0,7
Mortier moderne	MM	28,1 \pm 0,1	0,13 \pm 0,08	38 \pm 7,7	57,8 \pm 8,3	4,2 \pm 2,2

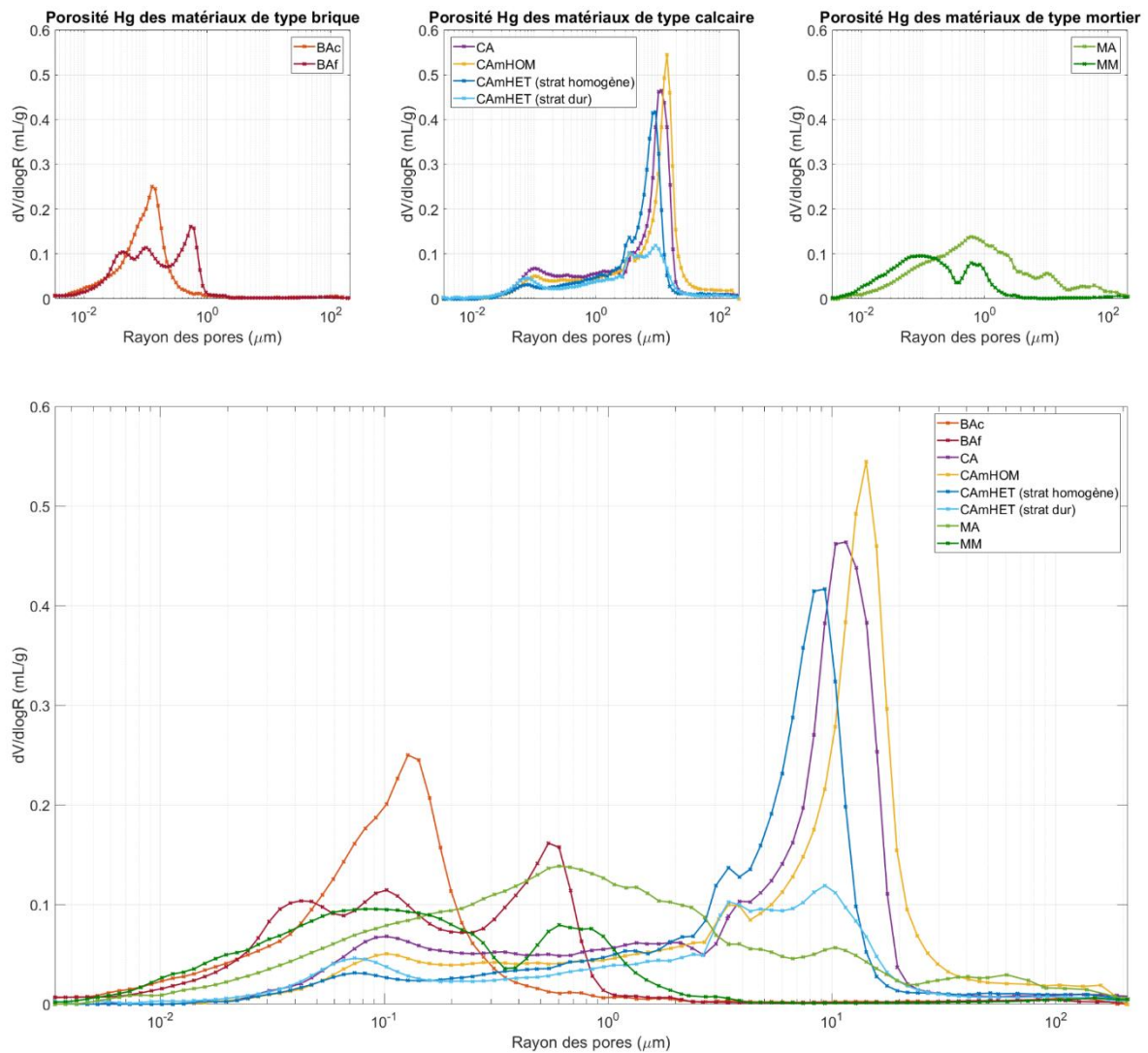


Figure 47 : Identification de la distribution des tailles de pores par injection de mercure pour les différents matériaux de l'étude.

La comparaison des deux séries de mesures effectuées avec de l'eau et du mercure montre un décalage systématique ; les valeurs de porosité au mercure sont légèrement inférieures mais restent dans le même ordre de grandeur. En termes de distribution de la taille des pores, les mesures montrent qu'une même famille de matériau se traduit par une tendance assez semblable, exception faite des mortiers. De manière générale, pour un même type de matériau, la dispersion de la taille des pores est très limitée. Cette régularité de la distribution de la taille des pores entre les échantillons d'un même matériau est mise en avant par les faibles écarts des tailles des pores médianes et par les faibles écarts de pourcentage entre les différentes catégories de tailles des pores d'un même matériau.

Le calcaire de type moellon (CA) présente un réseau caractérisé par un mode principal centré à $\sim 15 \mu\text{m}$ et un mode secondaire qui s'étale de manière homogène entre $0,1 \mu\text{m}$ et $2 \mu\text{m}$. La famille de

macro-pores est la plus importante avec un diamètre médian de $16,9 \pm 4,6 \mu\text{m}$. En outre, le calcul de répartition des tailles caractéristiques des pores montre que près des 2/3 du réseau poreux correspond à ces macro-pores.

Le calcaire moyen appareil homogène (CAmHOM) montre une distribution similaire à celle du calcaire de type moellon. Dans ce cas, le pic principal est centré à $\sim 15 \mu\text{m}$ et le pic secondaire est réparti de manière homogène entre $0,1 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$. Ce matériau est principalement constitué par des macro-pores à $62,1 \pm 4,7\%$ avec une taille médiane de $12,1 \pm 2,5 \mu\text{m}$.

Le calcaire hétérogène (CAmHET) se divise en deux groupes. Le premier groupe analysé correspond à la partie homogène du matériau (CAmHOM-nh) qui présente les mêmes caractéristiques que les matériaux calcaires déjà présentés. Il présente un pic principal vers $9 \mu\text{m}$ et une répartition homogène entre $0,05 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$. La taille médiane est centrée à $9,7 \pm 0,6 \mu\text{m}$ et il est composé majoritairement de macro-pores avec $58,8 \pm 3,7\%$ des pores de taille supérieure à $5 \mu\text{m}$. Le second groupe analysé correspond au niveau hétérogène du matériau (CAmHET_nd), qui distingue un horizon particulier plus dur et dense. Cette partie du matériau présente la même tendance que son homologue homogène mais avec une valeur moins importante du mode principal centré à $9 \mu\text{m}$. Bien que la taille médiane des pores, $7,8 \pm 1,4 \mu\text{m}$ soit proche de celle de son homologue homogène, la répartition des pourcentages définissant les trois catégories est plus étalée. Le calcul montre que la porosité se répartie en $10,3 \pm 2,8\%$ de micro-pores, $46,6 \pm 3,2\%$ de méso-pores et enfin $43,1 \pm 4,8\%$ de macro-pores.

Les matériaux de type brique correspondent aux matériaux présentant la plus faible porosité, mais également des répartitions de tailles de pores différentes au sein de cette même famille de matériau. Ainsi, la brique ancienne claire se caractérise par un réseau unimodal avec une famille de pores centrés à $0,13 \mu\text{m}$. Les calculs des pourcentages de répartition des tailles de pores montrent une répartition partagée entre des micro-pores de taille inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ et des méso-pores dont la taille est comprise entre $0,1 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$.

Par ailleurs, la brique ancienne foncée (BAf) montre un réseau poreux plurimodal caractérisé par 3 pics caractéristiques centrés à $0,04 \mu\text{m}$; $0,1 \mu\text{m}$ et $0,5 \mu\text{m}$. Comme pour la brique ancienne claire (BAc), le réseau poreux est distribué presque pour moitié entre les micro-pores inférieurs à $0,1 \mu\text{m}$ et les méso-pores (entre $0,1 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$).

Finalement, la famille des mortiers suggère des caractéristiques un peu différentes. Les mortiers anciens (MA) présentent un réseau unimodal avec une répartition très étalée de la taille des pores. La taille médiane des pores est $0,95 \pm 0,64 \mu\text{m}$ et le calcul des proportions de chaque catégorie montre la prédominance de méso-pores, correspondant à $64,7 \pm 1,2\%$ du réseau poreux.

Le mortier moderne (MM) présente un réseau bimodal avec des tailles d'accès aux pores centrées à $0,09$ et $0,67 \mu\text{m}$. La taille médiane des pores est de $0,13 \pm 0,08 \mu\text{m}$ et le calcul des proportions de chaque catégorie montre un réseau poreux principalement réparti entre micro-pores et méso-pores, respectivement égal à $38 \pm 7,7\%$ et $57,8 \pm 8,3\%$.

2.3. Analyses des résultats de la caractérisation des propriétés de stockage

Les résultats des différentes expériences permettant de caractériser les propriétés de stockage montrent des différences importantes de porosité entre les différentes familles de matériaux. En effet, les différentes expériences permettant de caractériser la porosité montrent que pour un type de structure comme le mur du temple Gallo-Romain de Genainville, les matériaux calcaires (CA, CAmHOM et CAmHET) et le mortier d'origine (MA) sont ceux qui permettent de stocker un plus grand volume d'eau plus. Au contraire les matériaux de type brique (BAc et BAf) ainsi que le mortier de restauration (MM) correspondent aux matériaux ayant les capacités de rétention d'eau plus limités.

Dans le cas de la porosité totale et de la porosité 48h il a été mis en avant la différence entre la capacité totale du volume de vide accessible et le volume réellement accessible à pression ambiante. Le volume de vide accessible à pression ambiante est retenu comme la valeur de porosité limite pouvant être saturé lors d'un phénomène d'imbibition.

Les mesures de porosité par injection de mercure montrent des résultats très similaires que ceux de la porosité totale. Pour le matériau CAmHET, la porosité par injection de mercure permet d'analyser séparément les capacités de stockage des niveaux durcis (CAmHET-nd) et celle de la partie homogène (CAmHOM).

Cette expérience permet aussi de caractériser la distribution de la taille des pores. Cela montre qu'il existe une relation entre la taille des pores et la capacité de stockage. En effet, parmi les différents matériaux analysés les matériaux ayant une plus grande capacité de stockage présentent majoritairement des macropores, tandis que les matériaux avec des capacités de stockage plus faibles présentent des distributions de tailles de pores plutôt composé de micropores et/ou mésopores.

3. Propriétés de transfert

3.1. Capillarité

L'analyse des propriétés de transfert est tout d'abord effectuée sur la base d'essais macroscopiques d'imbibition capillaire impliquant le caractère mouillant des matériaux et dont une illustration des résultats est présentée sur la Figure 48.

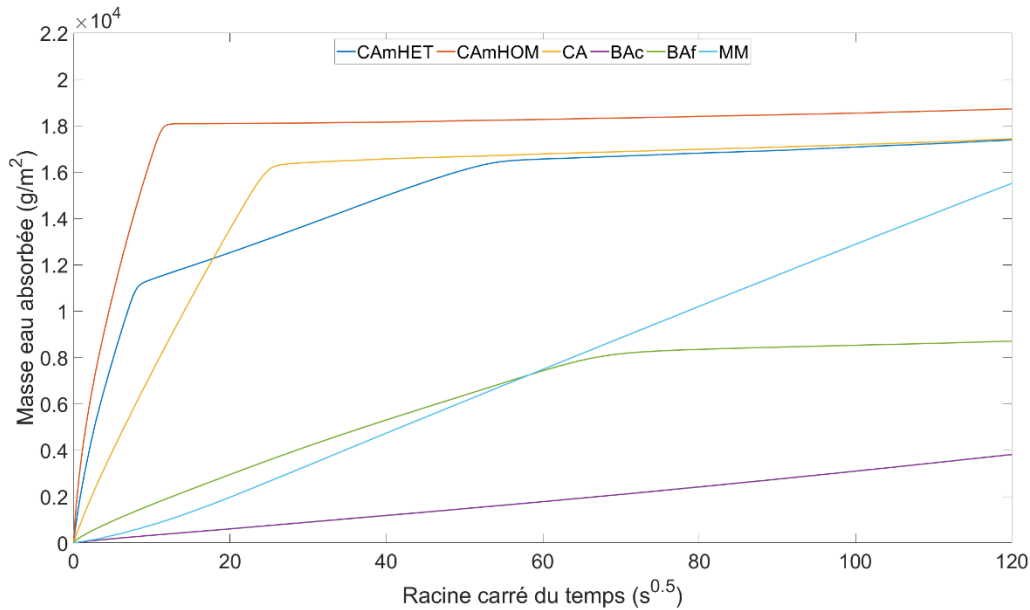


Figure 48 : Analyse des propriétés de transfert d'eau au sein des matrices poreuses lors d'un essai de d'imbibition capillaire d'eau.

Comme on peut s'y attendre à partir de la simple comparaison des valeurs de tailles de pores caractéristiques des différents matériaux, les résultats mettent en évidence deux groupes assez distincts :

- Les calcaires caractérisés par une forte capacité d'imbibition. Les valeurs recensées du coefficient de capillarité reportées dans le Tableau 4, montrent des ordres de grandeurs assez semblables,
- Les briques caractérisées par la plus faible capacité d'imbibition. Là encore, les ordres de grandeurs du coefficient de capillarité restent assez semblables (Tableau 4).

Quel que soit le matériau testé, le type de réponse (en racine carrée du temps) reste le même : une croissance quasi linéaire de la masse absorbée suivie d'un plateau marquant une forme de saturation. Une telle signature suggère un système poral bien connecté et la prédominance d'une taille de pores. On distingue néanmoins une exception, avec le calcaire hétérogène (CAMHET), pour lequel on distingue deux pentes distinctes avant le pseudo-plateau. Dans ce cas, la coexistence des deux dynamiques successives suggère un caractère stratifié du matériau caractérisé par des tailles de pores plus faibles dans la seconde strate.

Tableau 4 : Présentation des coefficients de capillarité des matériaux testés.

Matériaux		Coefficient d'imbibition ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-0,5}$)	
Type	Code		
Calcaire moellon	CA	936±321	
Calcaire moyen appareil homogène	CAMHOM	1004±246	
Calcaire moyen appareil hétérogène	CAMHET	992±189	150±38
Brique ancienne claire	BAC	34±11	
Brique ancienne foncée	BAF	120±9	
Mortier de restauration	MM	135±13	

Les résultats montrent des dynamiques d'imbibition très différentes entre les matériaux calcaire et les matériaux brique / mortier.

D'une part, les matériaux calcaires montrent des dynamiques d'imbibition très rapides avec des coefficients d'imbibition très élevés. Cependant, le matériau CAMHET montre une rupture de pente caractérisant la présence de deux réseaux poreux distinctes. La dynamique d'imbibition du réseau de pores principale est très proche de ceux des calcaires CA et CAMHOM, tandis que le réseau de la partie hétérogène de ce matériau présente une dynamique d'imbibition plus faible.

D'autre part, les matériaux de type brique (BAC et BAF) et le mortier moderne (MM) présentent une dynamique d'imbibition plus lente que les matériaux. Le brique BAF et le mortier MM présentent des dynamiques d'imbibition très similaires, tandis que la brique BAC présente la dynamique d'imbibition plus lente parmi tous les matériaux.

3.2. Perméabilité

Les essais menés par la percolation d'air et d'eau au travers des matrices porales permettent de définir les valeurs de perméabilité pour chaque matériau testé. Cependant, d'autres objectifs sont poursuivis, dont la caractérisation de la possible anisotropie pour les matériaux testés et distinguer l'effet mouillant sur le régime de percolation.

3.2.1 Perméabilité à l'air

Les mesures de perméabilité à l'air sont effectuées sur les blocs des différents matériaux utilisés pour construire les assemblages présentés dans le chapitre II. En plus de la détermination de la perméabilité à l'air, cette expérience a permis de caractériser l'anisotropie des différents matériaux. En effet, cette mesure non destructive permet d'envisager le comportement selon différentes directions spatiales des échantillons testés. Cette approche permet de comparer les résultats de

chaque matériau pour différentes directions spatiales susceptibles de mettre en évidence une éventuelle anisotropie du matériau pouvant affecter la dynamique des phénomènes de transfert.

Ce protocole de mesure mis en place permet d'évaluer la possible anisotropie des matériaux pouvant affecter les propriétés de transfert. En effet, grâce à cette procédure systématique de mesure de la perméabilité des matériaux sur chacun des trois différents plans XY, XZ et YZ, il est possible de caractériser les différences de perméabilité selon la direction spatiale du flux traversant.

Afin de quantifier l'anisotropie du matériau, le ratio entre la perméabilité verticale (K_z) et la perméabilité horizontale (K_h) a été calculé. La perméabilité horizontale est mesurée sur les plans XZ et YZ, tandis que la perméabilité verticale est mesurée sur les plans XY.

A partir des résultats obtenus pour les différents blocs constituant les différents assemblages, il est possible d'obtenir les valeurs moyennes de la perméabilité des différents matériaux analysés dans ce projet. Les valeurs de perméabilité K_v et K_h , ainsi que le ratio K_v/K_h pour les différents matériaux sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Synthèse des résultats de perméabilité à l'air pour les différents matériaux étudiés.

Matériaux		K_v (m ²)	K_h (m ²)	K_v/K_h
Type	Code			
Calcaire moellon	CA	$2,3.10^{-12} \pm 5,53.10^{-13}$	$2,46.10^{-12} \pm 4,91.10^{-13}$	$1,03 \pm 0,04$
Calcaire moyen appareil homogène	CAMHOM	$1,75.10^{-12} \pm 5,53.10^{-13}$	$1,74.10^{-12} \pm 5,1.10^{-13}$	$1 \pm 0,27$
Calcaire moyen appareil hétérogène	CAMHET	$7,25.10^{-13} \pm 2,65.10^{-13}$	$1,27.10^{-12} \pm 2,87.10^{-13}$	$0,57 \pm 0,17$
Brique ancienne claire	BAc	$4.10^{-15} \pm 1,04.10^{-15}$	$4,85.10^{-15} \pm 1,7.10^{-15}$	$0,83 \pm 0,17$
Brique ancienne foncée	BAf	$9,34.10^{-15} \pm 8,87.10^{-15}$	$2,79.10^{-14} \pm 2,91.10^{-15}$	$0,33 \pm 0,57$
Mortier moderne	MM	$1,09.10^{-13} \pm 4,41.10^{-15}$	$1,11.10^{-13} \pm 4,27.10^{-15}$	$0,98 \pm 0,12$

Les résultats montrent deux groupes distincts de matériaux par rapport à cette propriété de perméabilité à l'air. Les matériaux calcaires ayant les porosités et les tailles de pores les plus élevées présentent sans surprise des perméabilités plus importantes que les briques qui ont une porosité et des tailles de pores plus faibles. Le mortier, présente quant à lui, une perméabilité intermédiaire, qui malgré sa plus faible porosité, met en exergue une plus grande connectivité de son réseau poreux

et une distribution de tailles de pores couvrant un intervalle plus étendu que pour les autres matériaux.

Les ratios entre les résultats de perméabilité vertical et horizontal permettent de mieux visualiser une possible anisotropie qui pourrait affecter le phénomène de transfert. Dans le cas des calcaires le CA et le CAmHOM les valeurs du ratio kv/kh sont très proche de 1 montrant une très faible anisotropie. Cependant le calcaire CAmHET présente un ratio kv/kh de $0,57 \pm 0,17$ ce qui correspond avec une anisotropie modérée avec une perméabilité vertical plus importante que la perméabilité horizontale.

Pour ce qui concerne les matériaux de type brique les valeurs du ratio montrent des différences significatives entre les briques BA_c et les BA_f. En effet, les briques BA_c présentent un ratio kv/kh de $0,83 \pm 0,17$ ce qui correspond avec une anisotropie relativement faible caractérisé par une perméabilité verticale légèrement plus faible que la perméabilité horizontale. La brique BA_f présente un ratio kv/kh de $0,33 \pm 0,57$ ce qui correspond avec une perméabilité horizontale plus importante que la perméabilité verticale.

Finalement le mortier MM présente un ratio de $0,98 \pm 0,12$ qui correspond avec un matériau avec une faible anisotropie.

3.2.2 Perméabilité à l'eau

L'essai de caractérisation de la perméabilité à l'eau apporte des informations permettant de mieux comprendre la dynamique des phénomènes des transfert pouvant affecter les matériaux. En effet, en recourant à l'eau comparativement à l'air, on distingue l'influence du caractère mouillant du fluide, son éventuelle interaction avec certaines phases minérales sensibles à l'eau et sa capacité à impliquer plus ou moins, la totalité du réseau poreux des matériaux testés.

Les résultats relatifs aux mesures de perméabilité à l'eau sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Présentation des résultats de la perméabilité à l'eau des matériaux.

Matériaux		Perméabilité moyenne (m ²)	Ecart type de la perméabilité mesuré (m ²)
Type	Code		
Calcaire moellon	CA	$4,99 \cdot 10^{-13}$	$3,81 \cdot 10^{-15}$
Calcaire moyen appareil homogène	CAmHOM	$1,09 \cdot 10^{-14}$	$2,51 \cdot 10^{-16}$
Calcaire moyen appareil hétérogène	CAmHET	$3,44 \cdot 10^{-14}$	$8,72 \cdot 10^{-18}$
Brique ancien clair	BA _c	$1,89 \cdot 10^{-17}$	$2,45 \cdot 10^{-18}$
Brique ancien foncé	BA _f	$3,08 \cdot 10^{-16}$	$1,29 \cdot 10^{-17}$
Mortier moderne	MM	$9,77 \cdot 10^{-16}$	$2,26 \cdot 10^{-17}$

La capacité des matériaux, préalablement saturés en eau, à se laisser traverser par le même fluide de saturation est en bon accord avec les essais de capillarité. Les valeurs globales obtenues (c'est-à-dire à l'échelle du corps d'épreuve) confirment à nouveau les deux groupes déjà soulignés. Les calcaires présentent logiquement une perméabilité à l'eau plus élevée que les briques, qui présentent les valeurs de perméabilité les plus faibles. Les mortiers, quant à eux, présentent une perméabilité intermédiaire, légèrement plus proche de celle des briques que de celle des calcaires.

La confrontation des résultats obtenus par ces deux essais de perméabilité permet de comprendre le comportement des différents matériaux testés vis-à-vis des phénomènes de transfert. Les informations extraites de l'analyse des résultats de ces essais permettent de définir les interactions entre les différents matériaux soumis à des contraintes hydriques particulières. La mise en valeur des résultats fait l'objet du prochain chapitre, au travers d'une modélisation phénoménologique du transfert de l'eau dans ces matériaux.

3.3. Analyses des résultats de la caractérisation des propriétés de transfert

Les expériences de perméabilité à l'air et à l'eau et celle d'imbibition capillaire permettent de déterminer les paramètres de perméabilité et la capacité de succion des matériaux analysés.

Les matériaux calcaires présentent les capacités de transfert les plus importantes avec des perméabilités comprises entre $4,99 \cdot 10^{-13}$ et $3,44 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ pour l'eau, et entre $2,32 \cdot 10^{-12}$ et $1,27 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ pour l'air. Pour ce qui concerne la capacité de succion, ce type de matériaux présentent les coefficients d'imbibition les plus élevés compris entre 1204 et $636 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0,5}$. Pour le calcaire moyen appareil hétérogène (CAmHET) cette expérience montre deux ruptures de pente de la courbe d'imbibition. Ce type de comportement est observable pour des matériaux ayant deux types de réseau poreux avec des caractéristiques différentes. Cela est le cas du CAmHET qui présente des comportements de succion différent pour la partie homogène du matériau et pour les niveaux durcis correspondant à la partie hétérogène du matériau.

Les matériaux de type brique (BAc et BAf) et le mortier d'origine (MM) présentent des capacités de transfert similaires. En effet, la perméabilité et l'imbibition capillaire des briques et du mortier d'origine présentent des valeurs plus faibles que celles des matériaux calcaires, dont l'ordre de grandeur est comparable. Parmi ce groupe de matériaux celle présentant le facteur limitant plus important vis-à-vis du phénomène de transfert est le matériau de type brique BAc avec des valeurs de perméabilité de $4,85 \cdot 10^{-15}$ pour l'air et $1,89 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ pour l'eau, et un coefficient d'imbibition de $29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0,5}$.

Les résultats obtenus d'après les expériences de perméabilité et d'imbibition capillaire correspondent bien avec les résultats de porosité et distribution de la taille des pores présentés dans la section précédente. En effet, les matériaux présentant les capacités de stockage et la distribution de la taille des pores plus faibles présentent des capacités de transfert plus limités. Au contraire les matériaux avec la porosité et la taille des pores plus importante présentent des capacités de transfert plus favorables.

4. Modèles phénoménologiques

4.1. Création des modèles

L'analyse des propriétés pétrophysiques permet d'établir un modèle phénoménologique décrivant l'interaction de l'eau avec la structure bâtie [99–101]. Ce modèle tient compte des caractéristiques de construction particulières du temple gallo-romain étudié et à l'arrangement particulier des différents matériaux utilisés pour ériger cette structure.

Les modèles phénoménologiques décrits dans le cadre de cette thèse ont été synthétisés dans plusieurs configurations structurales particulières, représentées sur la Figure 49. D'une part, les modèles permettent d'interpréter les configurations des matériaux constituant la partie érigée des murs du temple qui se différencient par le type de liant présent dans la structure (MA ou MM) et d'autre part, les modèles permettent d'appréhender une section particulière des fondations et de la base des murs du temple, qui se différencie également par le type de liant présent dans la structure (MA ou MM).

Malgré le manque d'informations concernant le mortier d'origine (MA), il est possible d'avancer une hypothèse plausible sur le mortier antique (MA) concernant son comportement lors d'un phénomène d'imbibition capillaire d'eau. En effet, la distribution de la taille des pores du mortier MA est principalement caractérisée par la présence de mésopores et macropores, tandis que pour le mortier MM, la distribution de la taille des pores comprend principalement des micropores et des mésopores. C'est pour cette raison qu'une distinction des comportements des différentes sections du mur en fonction du type de mortier est importante.

D'après les observations de terrain et les investigations préliminaires réalisées sur le site archéologique, cinq modèles sont proposés pour représenter les possibles combinaisons de matériaux au sein du mur du temple Gallo-Romain. Quatre modèles correspondent à la partie des fondations du mur et un modèle à la partie en élévation. Chaque modèle est représenté deux fois en fonction du liant mortier utilisé.

4.2. Description des modèles

Les hypothèses du comportement des différents modèles présentés ont été élaborées en considérant les résultats des analyses de caractérisation pétrophysique des matériaux, elles-mêmes modulées des différentes relations entre les propriétés de stockage et de transfert [99–101]. Les principales propriétés de chaque matériau sont les suivantes :

- Calcaire moellon CA : Ce matériau très poreux est caractérisé par la présence de macropores et une forte perméabilité,
- Calcaire moyen appareil CAmHOM : Comme pour le calcaire CA, ce matériau est très poreux et se caractérise par la présence de macropores et une forte perméabilité,

- Calcaire moellon CAMHET : Ce matériau se caractérise par la présence de deux réseaux poreux distincts. Le réseau poreux principal montrant des caractéristiques très similaires à celles des calcaires CA et CAMHOM. Le réseau poreux « secondaire » correspondant aux niveaux durcis (zones hétérogènes ou anormales sur-compactées du matériau) qui est beaucoup moins poreux. La perméabilité de ce matériau est sensiblement réduite et est conditionnée par la présence de ce niveau durci.
- Brique ancienne claire BAc : matériau à très faible porosité, majoritairement constitué de micropores justifiant la faible perméabilité.
- Brique ancienne foncée BAF : matériau de faible porosité mais supérieure à celle des briques BAc. Ce matériau se caractérise par une répartition de taille de pores s'étalant partiellement dans le domaine des mésopores, justifiant ainsi une perméabilité légèrement plus élevée que celle des briques BAc.
- Mortiers anciens MA : matériaux très poreux montrant une répartition homogène et très étalée de la taille de pores,
- Mortiers modernes MM : moins poreux que le mortier MA, ce matériau se caractérise par une répartition de la taille de pores qui est plus proche de celle des briques, ce qui est en cohérence avec sa faible perméabilité.

4.2.1 Modèles de la partie en élévation du mur

Dans le cas des modèles représentant la partie en élévation du mur calcaire de type CA présente de caractéristiques petrophysiques favorisant une rapide ascension du front d'imbibition. En effet, ce type de matériau se caractérise par sa grande capacité de stockage, sa perméabilité élevée et une cinétique d'imbibition rapide favorisant le transfert ascensionnel de l'eau.

Pour ce qui concerne le mortier de pose MM et MA, ces matériaux représentent le facteur limitant au transfert ascensionnel de l'eau, et ceci, de manière plus marquée pour le mortier MM que pour le mortier MA.

4.2.2 Modèles de la partie des fondations du mur

Parmi les matériaux calcaires, le calcaire de type CA et CAMHOM présentent de caractéristiques petrophysiques très similaires qui favorisent une rapide ascension du front d'imbibition. Cependant, le calcaire de type CAMHET présente des niveaux durcis qui agissent comme un facteur limitant à l'ascension capillaire. Ainsi les configurations dans lesquelles le calcaire CAMHET est impliqué, sont susceptibles de subir un ralentissement significatif de l'imbibition lorsque le front d'imbibition atteint la partie hétérogène du matériau.

Dans le cas des briques une légère différence entre les briques BAc et BAF est probable ce qui conditionne fortement la vitesse de déplacement du front capillaire. La brique de type BAF présentant un coefficient d'imbibition très similaire à celui du mortier MM qui est plus élevée que

celle du type BAc, il se produit un ralentissement du front d'imbibition qui sera plus important pour les configurations utilisant des briques claires BAc que sur ceux utilisant le BAf.

Dans le cas des matériaux de type mortier, les modèles montrent une différence concernant l'avancement du front d'imbibition en fonction du temps. Le MA présente des capacités de transfert plus proches de celles du calcaire permettant une ascension capillaire plus rapide. Au contraire, le MM présente des propriétés plus proches de celles des briques dont les capacités de transfert d'eau sont plus restreintes.

Ainsi et d'une manière générale, ces modèles montrent que les matériaux calcaires CA et CAmHOM et le mortier d'origine MA représentent les matériaux dont les propriétés pétrophysiques sont propices au stockage et au transfert de l'eau, tandis que le calcaire CAmHET, les briques BAc et BAf, mais aussi le mortier moderne MM constituent les facteurs limitants au transfert par ascension capillaire.

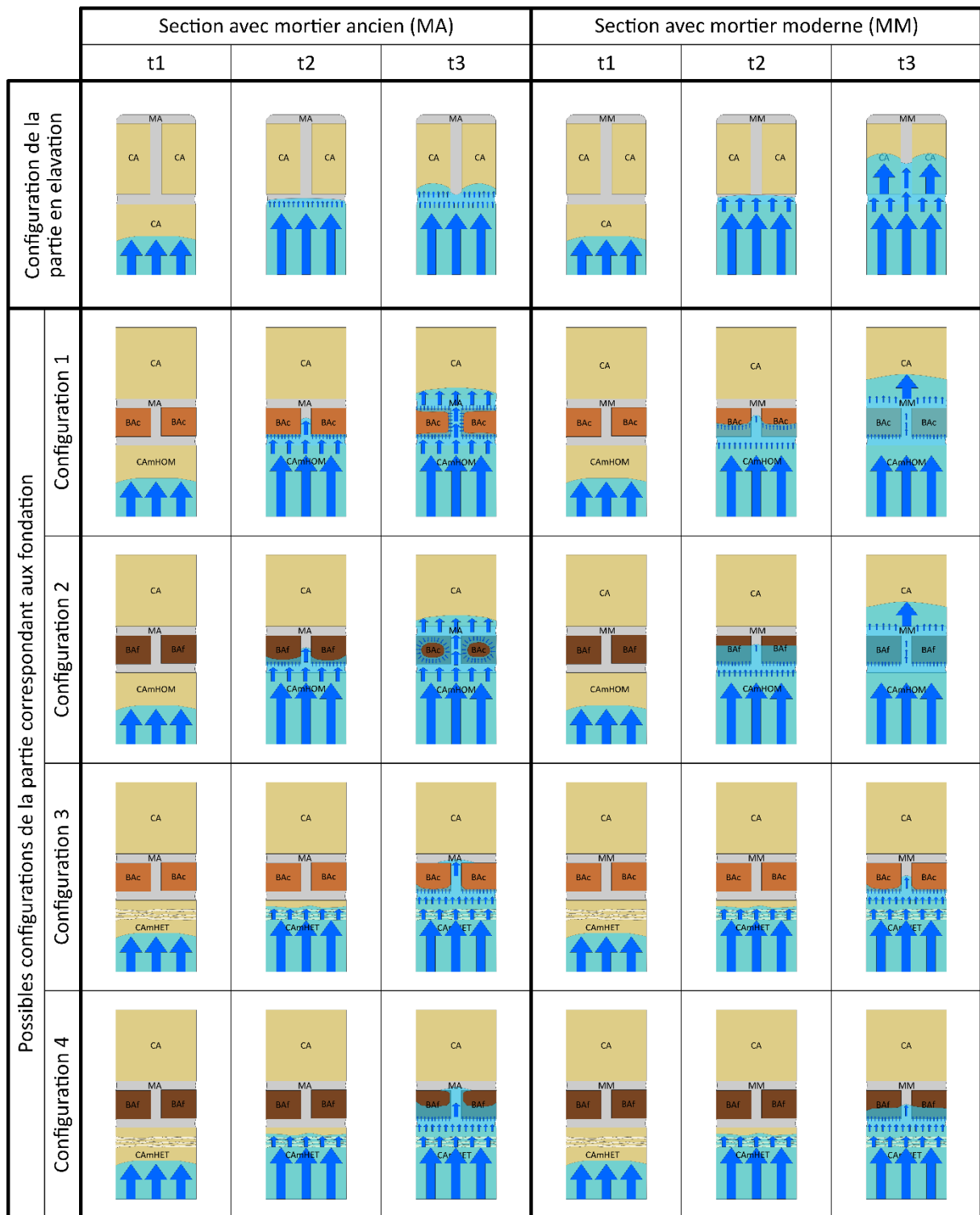


Figure 49 : Description du modèle phénoménologique.

D'une part, les modèles ici présentés ont été créés afin de respecter les informations apportées par les analyses pétrophysiques qui permettent de représenter différents scénarios de répartitions de l'eau au cours du temps en fonction des types de matériaux.

D'autre part, le type de matériaux utilisé dans les modèles ainsi que la disposition constructive des deux types de section de mur, est aussi basée sur les informations fournis par les observations in situ, les échanges avec les archéologues responsables du site et par l'analyse des rapports des différentes fouilles archéologiques et autres textes décrivant les caractéristiques architecturales particulières au temple du site de Genainville.

Les hypothèses sur la dynamique du transfert ascensionnel de l'eau présentées par ces modèles pourront être comparés aux résultats obtenus lors de l'application des méthodes d'imagerie électrique et thermique pendant une expérience d'imbibition sur des éprouvettes analogues aux configurations constructives du mur du temple, qui sera présentée au Chapitre VII.

CHAPITRE VI
Calibration des systèmes
de mesure indirecte
de la teneur en eau

1. Caractérisation en condition statique

1.1. Méthodologie employée

Dans le cadre de la caractérisation de la variation de la teneur en eau par des méthodes non invasives, deux voies sont poursuivies :

- Méthode surfacique : l'imagerie infrarouge de la surface des objets analysés,
- Méthode volumique : l'identification des propriétés électriques des objets analysés.

Le caractère complémentaire de ces deux techniques expérimentales est patent et porte sur deux approches distinctes. Néanmoins, la fiabilisation des mesures passe par une phase de calibration pour relier un indicateur thermique et/ou un indicateur électrique à la propriété physique cherchée ; la teneur en eau au sein des matrices minérales porales. A cette fin, différentes méthodologies ont été développées.

1.2. Protocole expérimental

Ces travaux de calibration permettent d'établir la relation, si elle existe, entre la teneur en eau des matériaux étudiés et la réponse thermique et électrique dans un cadre statique. Ici, le choix pris est de s'abstenir du caractère dynamique des phénomènes d'imbibition ou de désaturation afin d'étudier la relation directe entre la teneur en eau et la réponse thermique et électrique. Dans ce chapitre, en effet, la distribution de l'eau dans les matériaux est contrôlée et supposée homogène.

Comme précisé précédemment, le volume très réduit de matériau disponible en provenance du site archéologique de Genainville a conditionné le déroulement de ces travaux de recherche. Ainsi, cette expérience a été seulement effectuée pour le matériau de type CA comme représentant de la famille des calcaires, et par le matériau de type BAF comme représentant de la famille brique.

La famille des mortiers n'est pas représentée dans cette expérience. D'une part du fait d'un volume disponible (MA) extrêmement réduit qui nous a conduit à privilégier avec ce matériau la recherche d'une réponse seulement en condition plus dynamique. D'autre part, pour le mortier moderne (MM), cette expérience a été mise au point après la réalisation des gâchées de mortier originalement utilisé pour la création des assemblages multicouches et des échantillons utilisés sur les expériences de caractérisation des propriétés pétrophysiques. L'utilisation d'une deuxième gâchée de mortier MM pourrait biaiser les interprétations des résultats de cette expérience ; la préoccupation étant plus liée à la période de cure pour l'obtention d'un niveau semblable d'avancement de la carbonatation. De plus, afin de vérifier que les propriétés de stockage et de transfert du mortier issu d'une deuxième gâchée correspondent à celles de la première coulée il serait nécessaire de réexaminer ses caractéristiques pétrophysiques, ce qui n'a pu être envisagé compte tenu des contraintes de temps

entourant la réalisation du projet. Dans le chapitre final de cet ouvrage seront présentées des perspectives qui permettront de pallier le manque d'échantillons permettant de représenter la famille des mortiers pour la caractérisation en condition statique de la réponse infrarouge et électrique en fonction de la teneur en eau.

Les corps d'épreuve sont représentés par 11 échantillons parallélépipédiques de pierre calcaire (CA) et de briques (BA). Comme présenté sur la Figure 50), la taille moyenne des échantillons de calcaire (CA) est de $62,47 \pm 0,36$ mm de longueur, $38,66 \pm 0,36$ mm de largeur et $10,39 \pm 0,62$ mm d'épaisseur. Pour le matériau de type brique (BA) la taille moyenne des échantillons est de $49,04 \pm 0,97$ mm de longueur, $28,74 \pm 0,76$ mm de largeur et $10,09 \pm 0,73$ mm d'épaisseur.

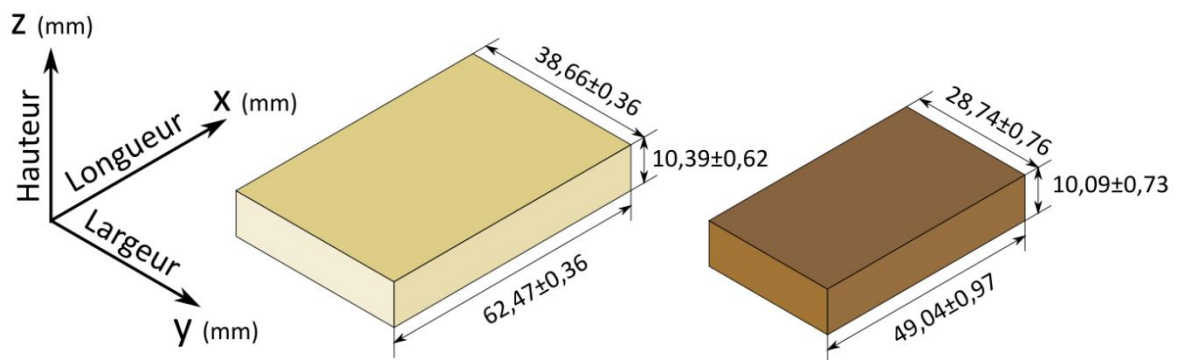


Figure 50 : Taille moyenne des échantillons parallélépipèdes de CA et BA.

Dans le cadre de cette thèse le terme de « teneur en eau » est utilisé pour désigner le pourcentage de porosité capillaire accessible à pression ambiante imbibé d'eau ; La gamme de teneur en eau est comprise entre 0% et 100%, avec 0%, la saturation minimale obtenue par la pesée de l'échantillon après un séchage en étuve et 100%, la saturation maximale obtenue selon protocole d'imbibition N48h [96].

Les échantillons préalablement séchés à l'étuve ont été imbibés de manière contrôlée à différentes teneurs en eau. Le processus d'imbibition est effectué à l'aide d'une pipette graduée qui permet d'apporter l'eau dans l'échantillon de manière contrôlée. Les échantillons sont partiellement saturés sur une balance de précision afin de contrôler de manière précise la masse d'eau absorbée. Après avoir été partiellement saturés, les échantillons sont placés dans une enceinte hermétique avec une humidité relative (HR) de 100% pendant une période de 15 jours pour homogénéiser la distribution de l'eau au sein du volume, Figure 51.

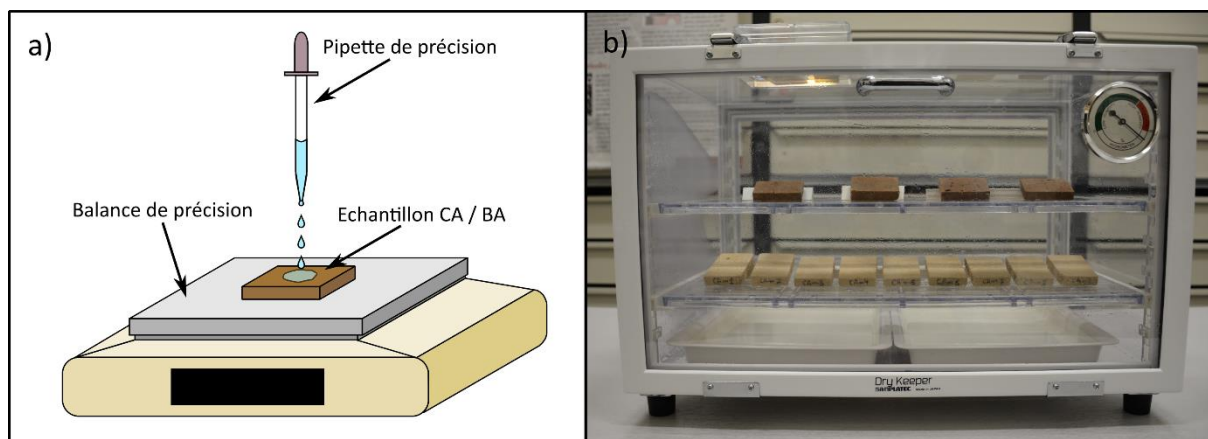


Figure 51 : a) Saturation partielle des échantillons b) Enceinte hermétique utilisée pour homogénéiser la distribution de l'eau au sein des échantillons.

A la fin de la période d'homogénéisation de la distribution en eau, au sein du réseau poreux, la saturation des différents échantillons correspond aux valeurs présentées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Identification des valeurs de saturation en eau pour les deux familles de minéraux.

Echantillon	Saturation (%)										
Briques	7,2	26,6	27,2	32,3	36,7	43,3	59,0	61,2	65,40	69,4	96,9
Calcaires	0	4,5	10,3	18,2	25,2	36,7	48,7	62,7	75,0	83,3	98,9

Les mesures thermiques et électriques sont effectuées dans une chambre noire spécialement développée pour les travaux afin de réduire le bruit thermique externe lors des mesures de thermographie infrarouge.

Pour effectuer les mesures, les échantillons sont sortis de l'enceinte climatique et positionnés rapidement dans la chambre noire entre deux électrodes *ad-hoc* (Figure 52). Le positionnement de l'échantillon est effectué avec des pinces en métal (placées à température ambiante) afin de limiter les mécanismes de transfert thermique. Les mesures sont effectuées pendant 10 secondes, afin de limiter l'interaction avec l'environnement. Après ce délai, l'échantillon est récupéré et pesé afin de contrôler toute perte d'eau survenue pendant le déroulement de l'expérience.



Figure 52 : Electrode développée avec embout permettant d'épouser la surface des échantillons et utilisée pour les analyses de calibration de résistivité en fonction de la teneur en eau.

1.3. Méthode surfacique : Thermographie infrarouge

1.3.1 Traitement du signal thermique Infrarouge

L'analyse statistique de la réponse thermique en fonction de la saturation des échantillons est effectuée à partir des thermogrammes enregistrés pour chaque échantillon. Dans les scènes thermiques utilisées, une référence constituée d'un réflecteur parfait (aluminium froissé) a été introduit. Cette référence dont le niveau d'émissivité est facilement contrôlable, permet de tenir compte des effets environnementaux qui peuvent affecter les mesures et de calibrer la température vraie.

Afin d'analyser les effets de bord sur les thermogrammes représentés sur la Figure 53, des régions d'intérêt (ROI) ont été définies. Elles représentent différentes portions de surface de l'échantillon.

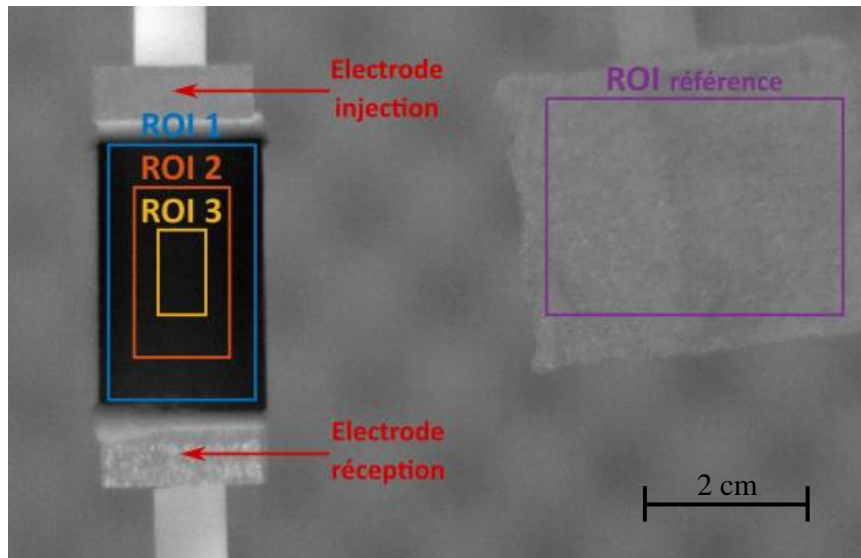


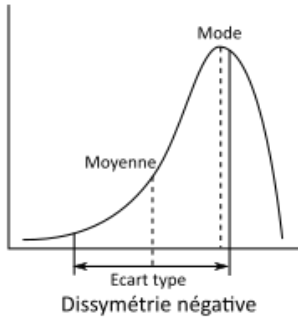
Figure 53 : Illustration de la scène de mesure et exemple de thermogramme avec les trois régions d'intérêt identifiées sur l'échantillon (ROI 1, ROI 2 et ROI 3) et la région d'intérêt de référence.

Les données thermiques des différentes ROI font l'objet d'une analyse statistique à partir des différents moments statistiques et autres variables comme :

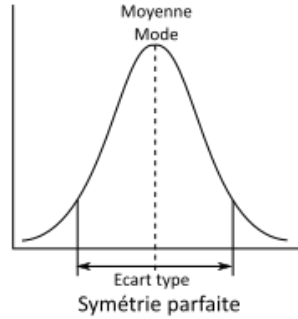
- Le mode, aussi appelé la valeur dominante, correspond à la valeur la plus représentative au sein de la population de valeurs de température définie par les différentes ROI. Le mode peut apporter des informations pour caractériser les répartitions. Les répartitions unimodales (ou multimodales avec un pic majeur) sont représentées par un mode. En fonction de la représentativité des modes complémentaires, ceux-ci sont intégrés ou pas dans l'analyse. Finalement une absence de mode permet d'interpréter la répartition comme uniforme.
- La moyenne correspond au moment statistique de 1^{er} ordre.
- L'écart type correspond au moment statistique de 2^{ème} ordre.
- La dissymétrie (ou skewness) correspond au moment statistique de 3^{ème} ordre, et sa valeur (nulle, positive ou négative) permet d'identifier le sens de la dissymétrie. Un coefficient nul correspond à une distribution parfaitement symétrique ; Un coefficient négatif indique un décalage de la répartition à la droite de la moyenne et un coefficient positif indique un décalage de la répartition à la gauche de la moyenne.
- L'aplatissement (aussi appelée kurtosis) correspond au moment statistique de 4^{ème} ordre et sa valeur permet de mesurer l'aplatissement d'un histogramme de répartition des valeurs d'une variable. L'aplatissement est une illustration de la représentativité d'un « événement ». Un coefficient d'aplatissement élevé indique que la distribution est plutôt pointue, tandis qu'un coefficient proche de zéro indique une distribution relativement aplatie. Dans le cas d'une répartition correspondant à une distribution normale (de Laplace-Gauss) le coefficient à une valeur de 3.

La Figure 54 permet de visualiser les concepts des paramètres et moments statistiques décrits précédemment.

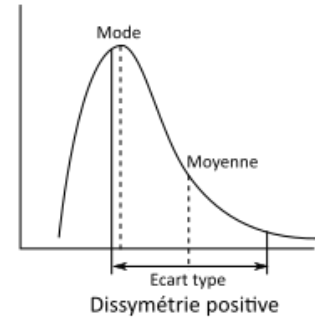
Distribution étendue à droite



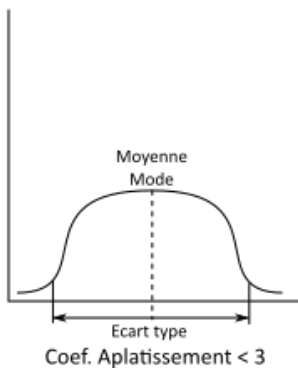
Distribution normale



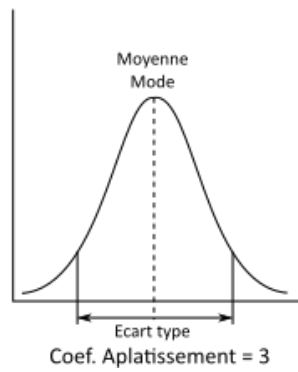
Distribution étendue à gauche



Distribution aplatie



Distribution normale



Distribution "pointue"

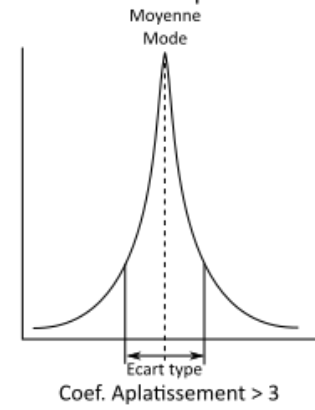


Figure 54 : Description graphique des différents moments statistiques analysés pour la distribution des températures pour chaque ROI.

Les histogrammes des valeurs de la température de surface (recalée) des différentes ROI de chaque matériau ayant une saturation prédéfinie sont présentés sur la Figure 55 et la Figure 56.

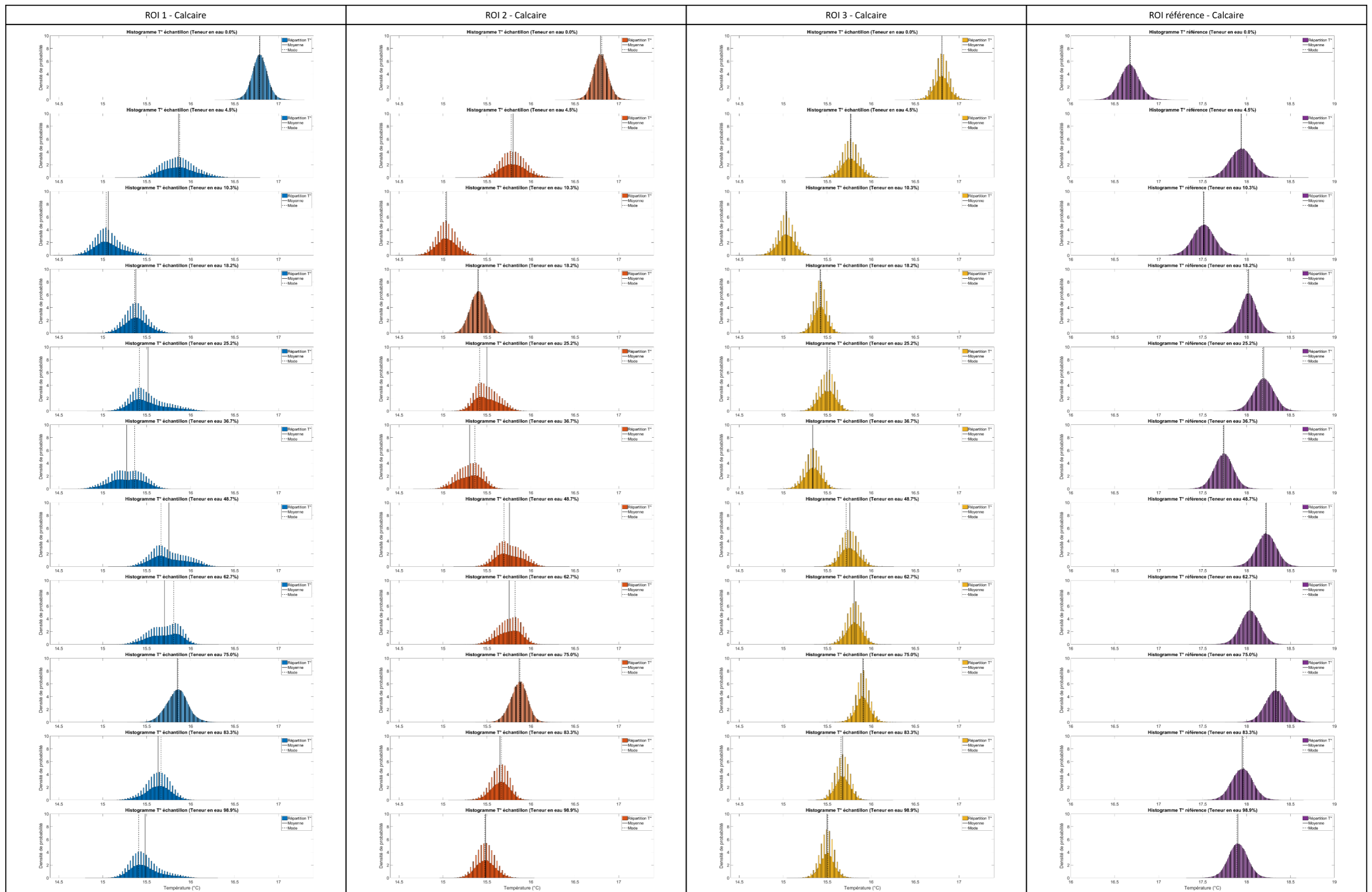


Figure 55 : Histogrammes des valeurs de la température pour les échantillons calcaires (CA) aux différentes teneur en eau pour les trois régions d'intérêt (ROI 1, ROI 2 et ROI 3) et la région d'intérêt de référence.

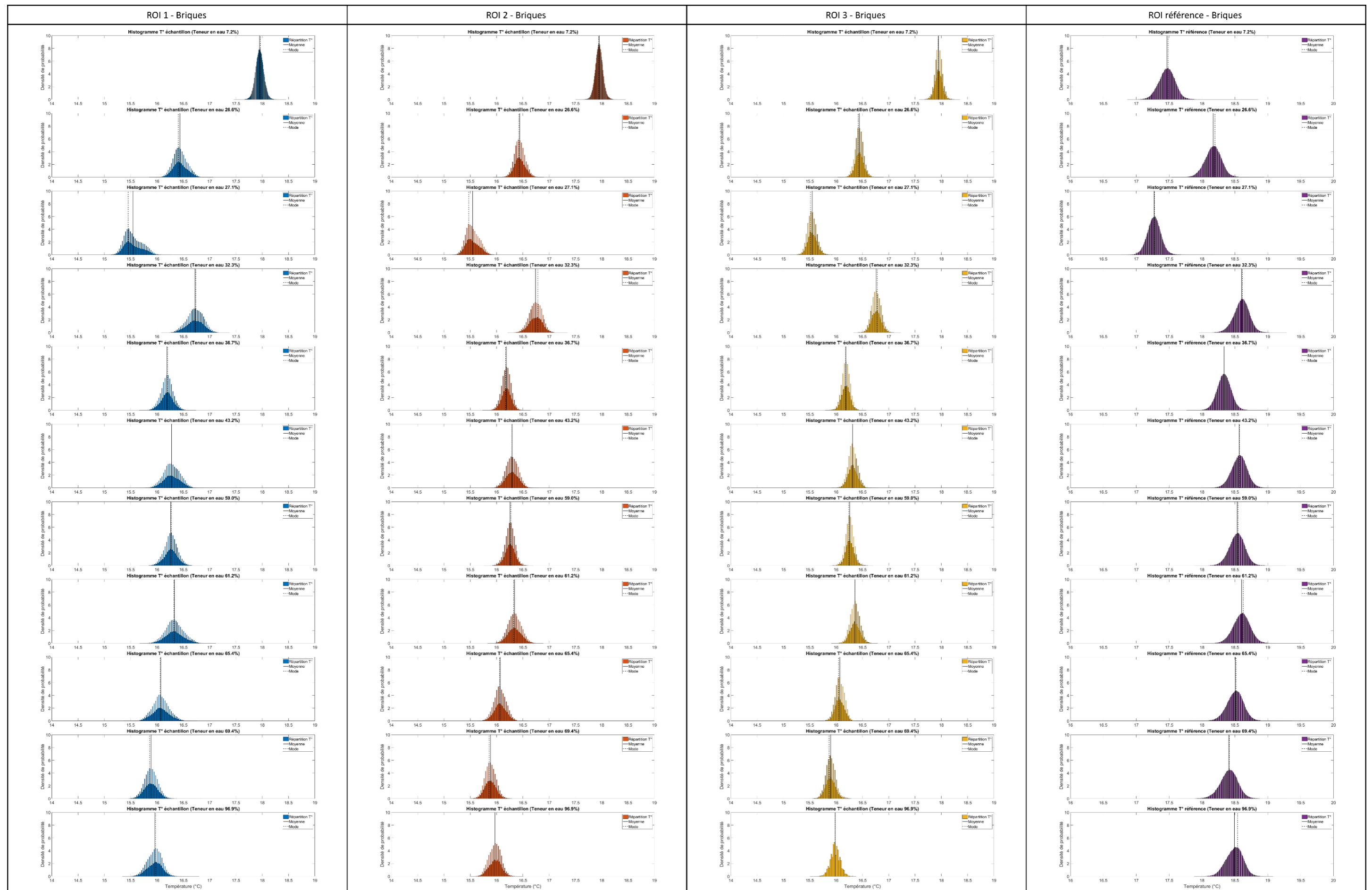


Figure 56 : Histogrammes des valeurs de la température pour les échantillons briques (BA) aux différentes teneur en eau pour les trois régions d'intérêt (ROI 1, ROI 2 et ROI 3) et la région d'intérêt de référence.

Ces résultats révèlent des distributions des classes de température majoritairement monomodales et plus ou moins dissymétrique pour les deux familles de matériaux testées. La référence, quant à elle, présente des histogrammes dont la densité de probabilité correspond à une loi de Laplace-Gauss.

1.3.2 Moyenne et écart type des distributions de température

Les résultats des valeurs moyennes et des écarts types des distributions des températures des différentes ROI représentés par les histogrammes sont présentés sur la Figure 57 pour les matériaux calcaires et sur la Figure 58 pour les matériaux de type brique.

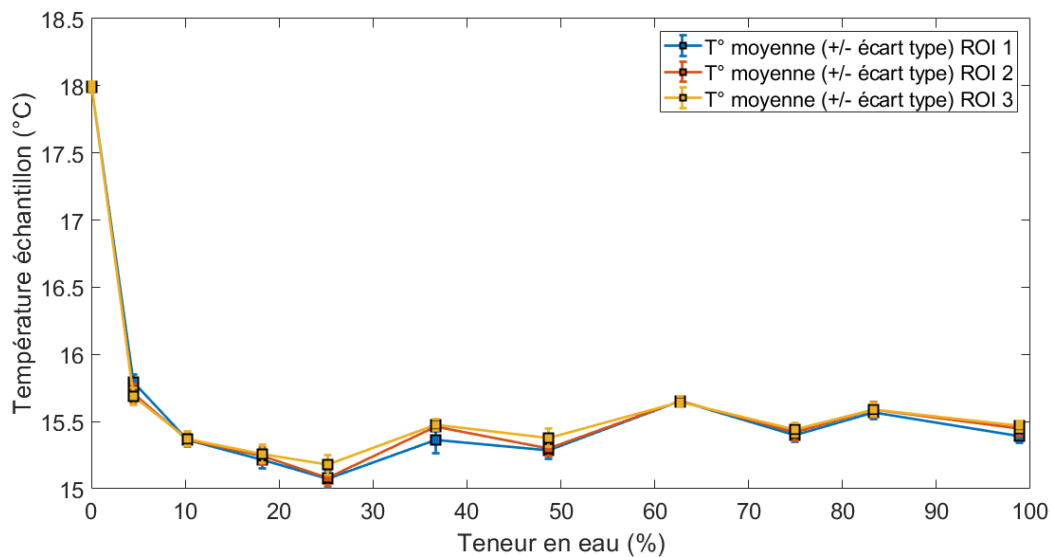


Figure 57 : Représentation de l'évolution de la température moyenne en fonction de la teneur en eau, incluant l'intervalle d'erreur défini par l'écart type, des différentes ROI de l'échantillon calcaire (CA).

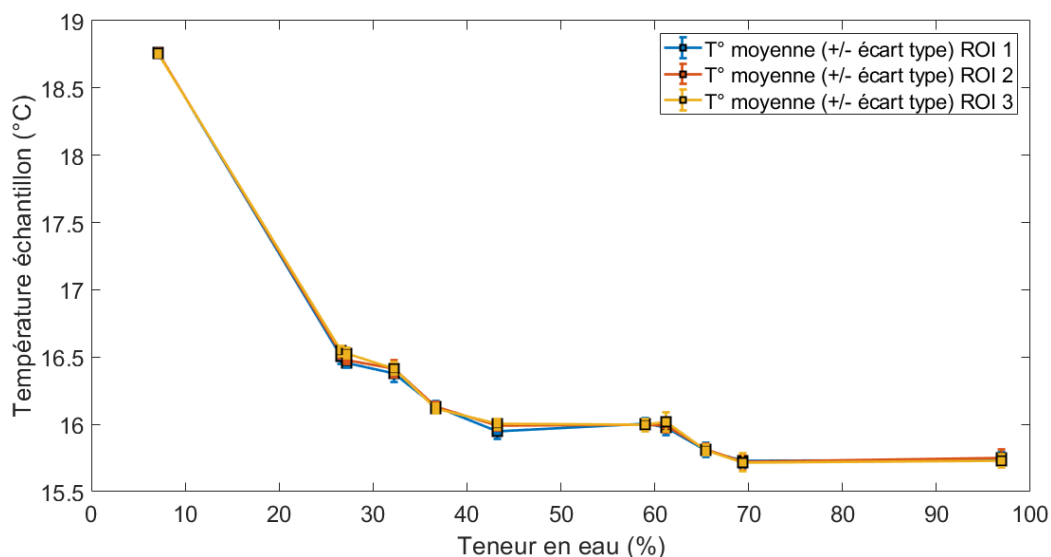


Figure 58 : Représentation des températures moyennes, avec l'intervalle d'erreur défini par l'écart type, des différentes ROI de l'échantillon de brique (BA).

1.3.3 Mode des distributions de température

De la même manière que pour la moyenne, les modes des histogrammes de la répartition de la température sont représentés afin de comparer les différentes valeurs de température représentative de chaque ROI. Les résultats des modes sont présentés sur la Figure 59 pour les matériaux calcaires et sur la Figure 60 pour les matériaux de type brique.

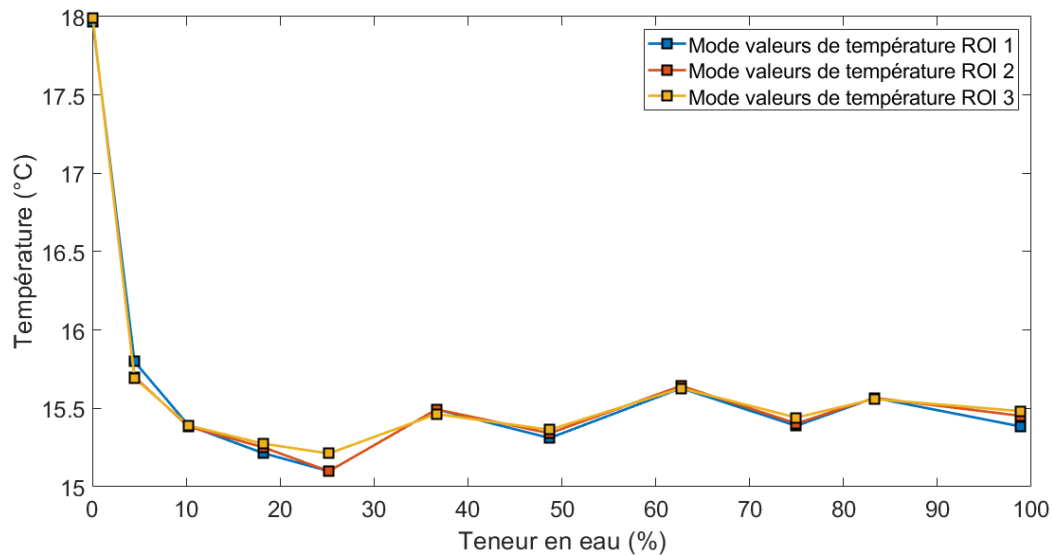


Figure 59 : Représentation des modes de la répartition des températures des différentes ROIs de l'échantillon calcaire (CA)

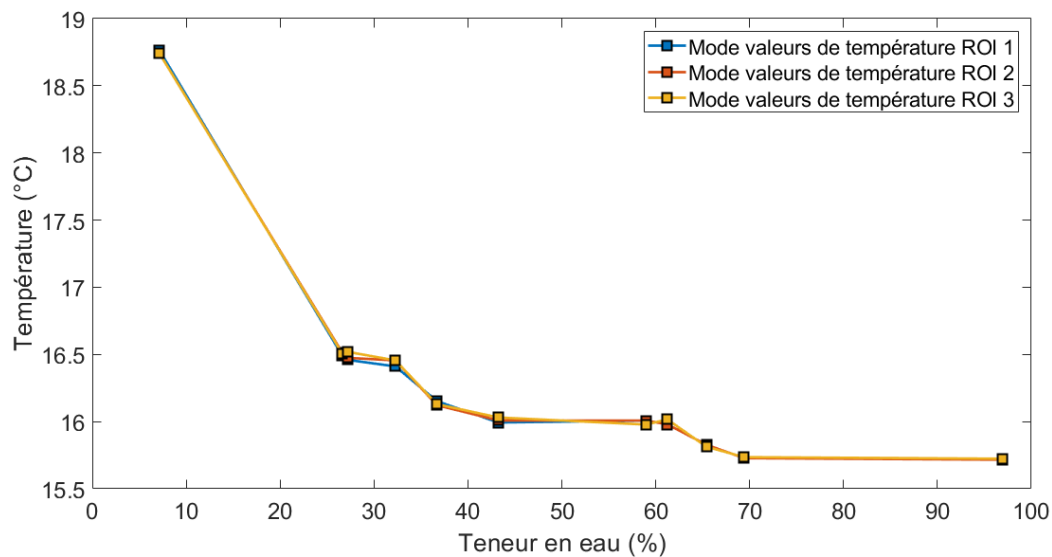


Figure 60 : Représentation des modes de la répartition des températures des différentes ROIs de l'échantillon brique (BA)

1.3.4 Comparatif des modes et des moyennes des distributions de température

Le mode et la moyenne de la répartition des températures des ROI des deux types de matériaux étudiés sont comparés. Pour cela les valeurs des modes sont soustraites aux valeurs moyennes pour tous les ROI et matériaux. La Figure 61 montre la différence entre les moyennes et les modes pour les matériaux de type calcaire et la Figure 62 montre la même information pour les matériaux de type brique.

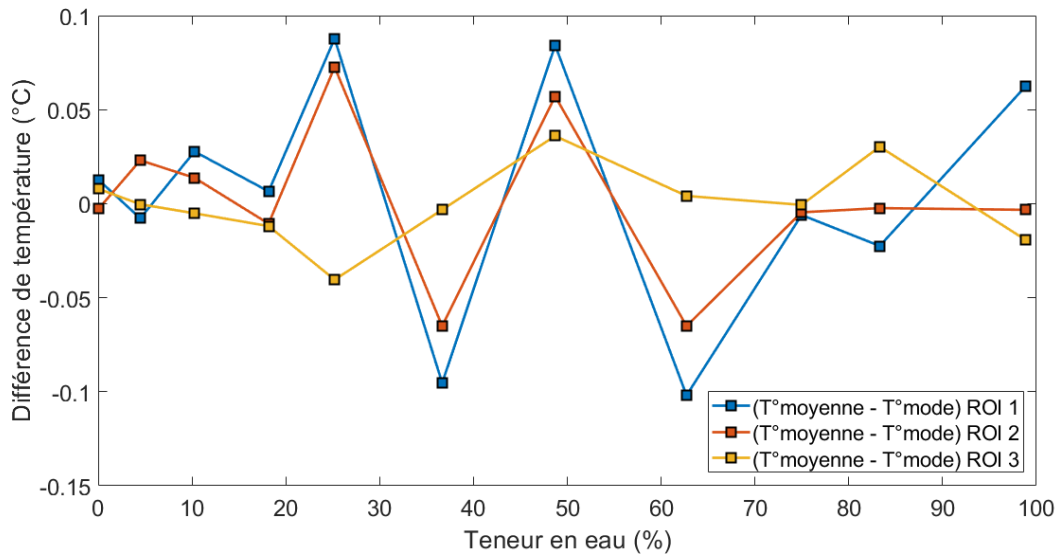


Figure 61 : Différence entre la moyenne et le mode des températures pour les différentes ROI des échantillons calcaires (CA)

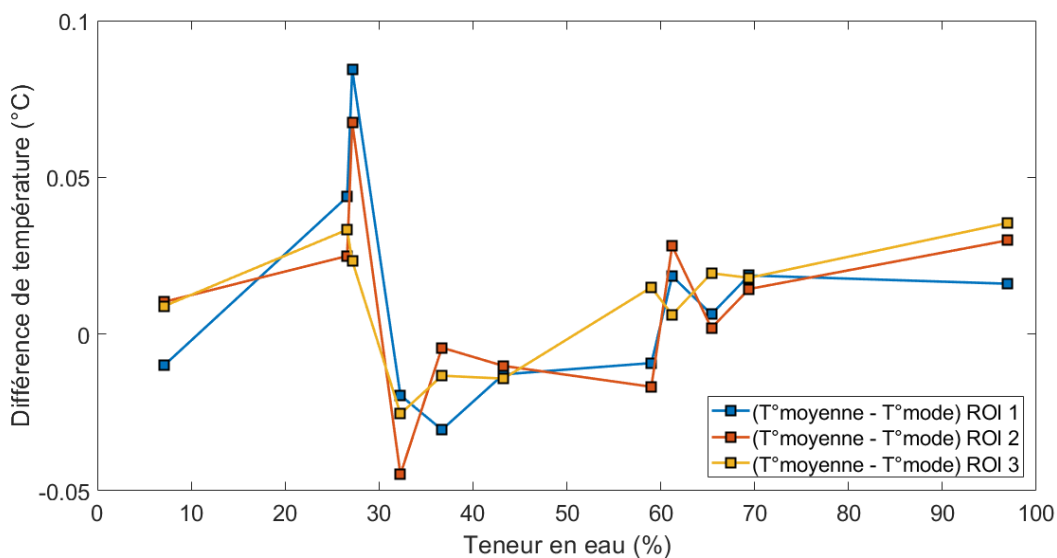


Figure 62 : Différence entre la moyenne et le mode des températures pour les différentes ROI des échantillons briques (BA)

La différence des moyennes et des modes des matériaux calcaires montre une très faible variation pour les différents ROI, avec la ROI 3 montrant la plus faible variation entre les valeurs moyennes et le mode des répartitions des températures.

Les résultats des comparatifs entre la moyenne et les modes des répartitions de température des histogrammes présentés confirment les premières observations des distributions de classe de température majoritairement monomodales. En conséquence, les paramètres retenus pour analyser la morphologie des densités de probabilité des histogrammes des différentes ROI sont les moments statistiques d'ordre 3 à 4, c'est à dire la dissymétrie et l'aplatissement.

1.3.5 Dissymétrie des distributions de température

Les résultats de l'analyse de la dissymétrie des densités de probabilité sont présentés sur la Figure 63 et la Figure 64 pour les échantillons de calcaire et les échantillons de brique respectivement.

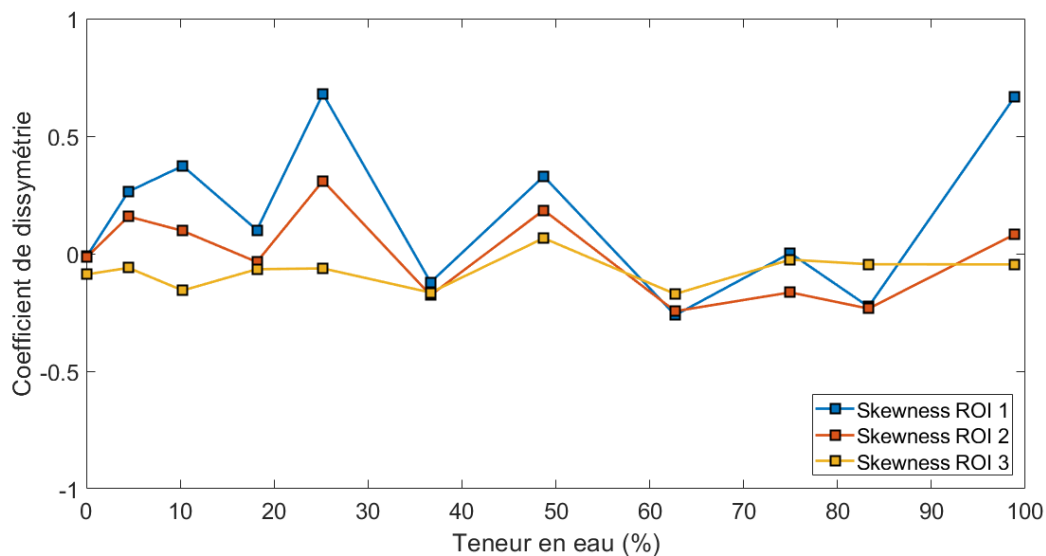


Figure 63 : Représentation des coefficients de dissymétrie des histogrammes de températures des différentes ROI. Mesures effectuées sur les échantillons de calcaire (CA)

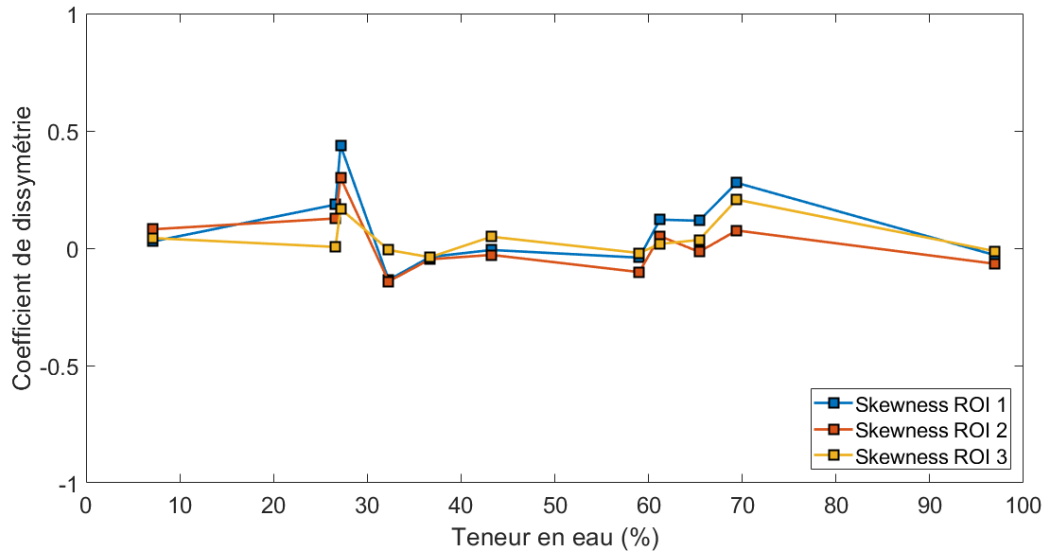


Figure 64 : Représentation des coefficients de dissymétrie des histogrammes de températures des différentes ROI mesurées sur les échantillons de brique (BA)

L'analyse de la dissymétrie des différents histogrammes présentés dans la Figure 63 pour les échantillons de calcaire et dans la Figure 64 pour les échantillons de brique, révèlent sa diminution entre ROI 1 et ROI 3.

- Les histogrammes des ROI 1 montrent une distribution modérément dissymétrique avec des coefficients compris entre -0,26 et 0,68 pour le matériau CA, et entre -0,14 et 0,28 pour le matériau BA,
- les histogrammes des ROI 2 montrent, quant à eux, une répartition faiblement dissymétrique avec des coefficients compris -0,23 entre 0,31 pour le matériau CA, et entre -0,14 et 0,3 pour le matériau BA
- finalement, les histogrammes des ROI 3 montrent une répartition symétrique avec des coefficients proches de zéro, avec des coefficients compris -0,17 et 0,07 pour le matériau CA, et entre -0,04 et 0,21 pour le matériau BA

Les écarts types des coefficients de dissymétrie par ROI présentés montrent une diminution avec la diminution de la surface des ROI avec un minimum pour la ROI 3 de 0,08. Assez logiquement, ce dernier cas permet de s'affranchir des effets de bords.

1.3.6 Aplatissement des distributions de température

Les résultats de l'analyse de l'aplatissement des densités de probabilité sont présentés sur la Figure 65 et Figure 66 pour les échantillons de calcaire et les échantillons de brique respectivement.

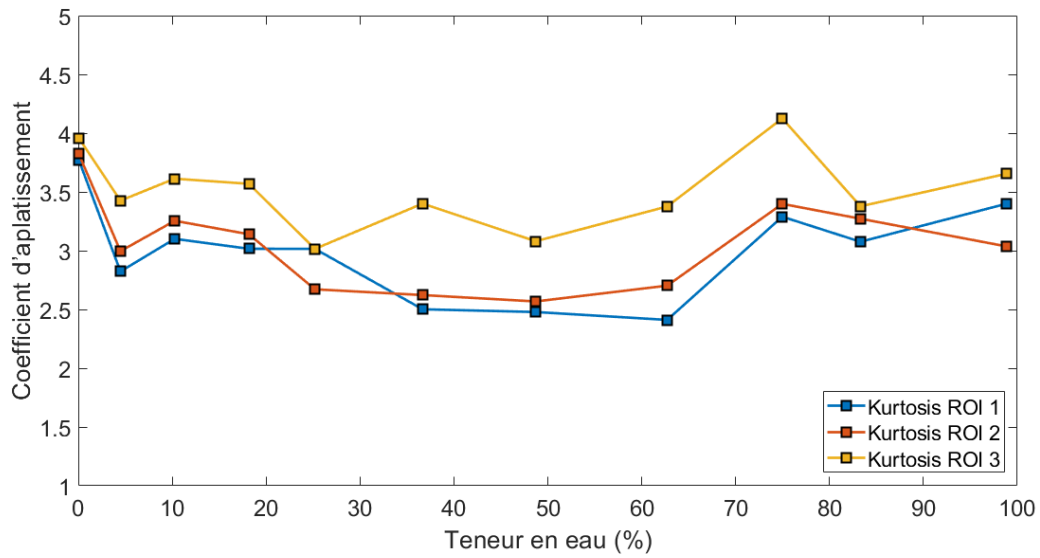


Figure 65 : Coefficients d'aplatissement des histogrammes des différentes ROI des échantillons de calcaire (CA)

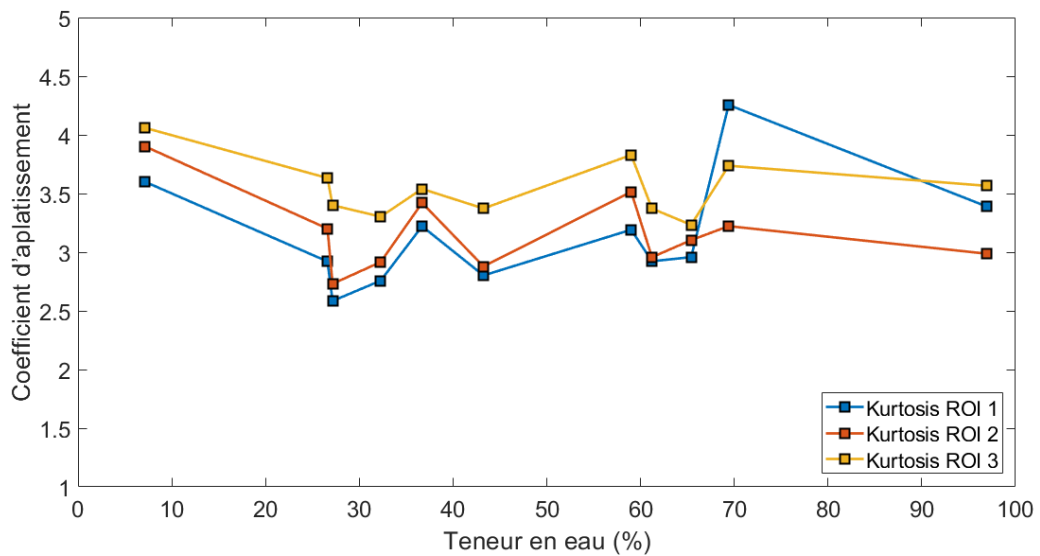


Figure 66 : Coefficients d'aplatissement des histogrammes des différentes ROI des échantillons de brique (BA)

Vis à vis de l'aplatissement des histogrammes des différentes ROI, il existe peu de différence des coefficients. En effet, sur la Figure 65 et la Figure 66, il est montré que pour les trois ROI analysées, tous les coefficients d'aplatissement sont compris entre 3 et 4 ce qui correspond à une répartition proche de la loi normale.

- Les histogrammes des ROI 1 montrent une distribution avec un faible aplatissement dissymétrique avec des coefficients compris entre 3,77 et 2,41 pour le matériau CA, et 3,6 et 2,58 pour le matériau BA,
- les histogrammes des ROI 2 montrent, quant à eux, une répartition avec un aplatissement modérée des coefficients compris 3,82 entre 2,57 pour le matériau CA, et entre 3,9 et 2,58 pour le matériau BA
- finalement, les histogrammes des ROI 3 montrent une répartition caractérisé par un aplatissement un peu plus important avec des coefficients compris 3,96 et 3,02 pour le matériau CA, et entre 4,06 et 3,30 pour le matériau BA

Malgré l'aplatissement plus important des distributions correspondant aux ROI 3, les écarts types des coefficients d'aplatissement pour le ROI 3 pour les échantillons CA et pour les échantillons BA, montrent une tendance plus stable que les ROI's ayant une surface d'analyse plus grande.

1.3.7 Résultats de la variation de température des échantillons

Finalement l'analyse des moyennes et des écarts types des températures calculées sur les différentes ROI montrent dans la Figure 57 et dans la Figure 58, des températures moyennes sensiblement plus basses et des écarts types plus importants pour les ROI ayant une plus grande surface.

Ces caractéristiques sont dues aux effets de bord qui se présentent sous la forme d'une baisse de la température au voisinage des bords que l'on peut attribuer à une évaporation préférentielle ou à une erreur de parallaxe.

Afin d'éviter les effets de bord, les valeurs de calibration entre la saturation de l'échantillon et la réponse IR sont définies par les températures moyennes calculées sur les ROI 3.

En résumé, ce travail montre que la taille des échantillons et l'environnement préparatoire sont corrects. Compte tenu des résultats obtenus, il semble que la répartition de l'eau est assez homogène et les effets de bords restent, à l'évidence, modiques. La diminution de la taille de la ROI induit principalement une symétrisation des histogrammes, mais les densités de probabilité peuvent être très convenablement modélisées par une loi de type Laplace-Gauss à deux paramètres : la valeur moyenne arithmétique, facilement calculable et l'écart type dont les valeurs ont montré que la valeur moyenne est très significative.

Finalement, c'est à partir des moyennes calculées sur la ROI 3 qu'une possible loi de passage entre la température caractéristique de chaque échantillon et une teneur en eau prédéfinie a été construite. La Figure 67 montre les moyennes résultantes de l'analyse des températures pour les matériaux de type brique et calcaire testés dans cette expérience.

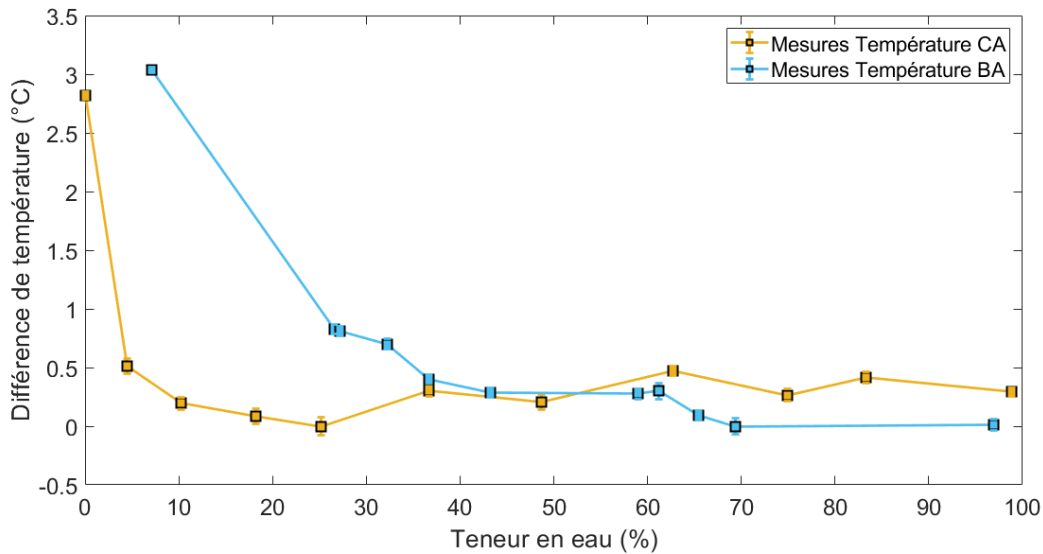


Figure 67 : Identification d'une loi de calibration statique de la méthode d'imagerie thermique IR pour l'identification de la teneur en eau contenue dans le calcaire et la brique

Comme nous l'avons indiqué, chaque valeur moyenne de l'indicateur température est entourée d'un écart type qui reste en deçà de 3%. Ces résultats montrent, en outre, que la tendance obtenue avec les échantillons de briques est très fonctionnelle et monotone. Le caractère monotone est bien marqué avec les échantillons de calcaire mais dans l'intervalle 0% ; 30%. Au-delà, un rebroussement est notable avec une faible discrimination de la teneur en eau.

1.4. Méthode volumique : Résistivité électrique

1.4.1 Traitement du signal électrique

Les signaux électriques mesurés avec l'oscilloscope TiePie HS5 et identifiant la différence de potentiel entre la partie supérieure et inférieure des échantillons de calcaire et de brique, correspondent au cumul de dix fonctions carrées alternées de 1 seconde chacune. L'amplitude moyenne de la partie du signal correspondant à la fréquence caractéristique de 137 Hz est obtenue à partir de la transformée de Fourier appliquée sur le cumul des dix fonctions carrées moyennées (en valeur absolue). Le calcul de la résistivité est rendu possible par la mesure de l'intensité du courant, elle-même obtenue à partir de la variation de potentiel électrique imposée à l'éprouvette via une résistance électrique de 100 k Ω (et application de la loi d'Ohm) montée en série sur le circuit électrique. Cette procédure a permis d'établir que le courant délivrée par l'oscilloscope pour un signal carré de 12V d'amplitude et 137Hz est de 11 μ A.

La valeur de résistivité électrique caractéristique à chaque échantillon est ensuite calculée à partir de l'équation (50) :

$$\rho = \frac{S}{h} \frac{dV}{I} \quad (50)$$

Avec S, la surface de l'échantillon en contact avec l'électrode (m²) ; h, la hauteur de l'échantillon (m) ; dV, la différence de potentiel électrique (V) et I, l'intensité du courant électrique (A).

1.4.2 Résultats de la variation de résistivité électrique des échantillons

A partir des différences de potentiel mesurés entre la partie supérieure et la partie inférieure des échantillons il a été possible de calculer la résistivité électrique du calcaire et de la brique pour les différents teneurs en eau dans le cadre statique.

Les résultats montrent des valeurs d'écart type plus importants pour les échantillons présentant des teneurs en eau plus faibles. En effet, la difficulté de transmission du signal électrique due au caractère résistif du calcaire et de la brique sèche fait que ceux-ci soient plus susceptibles aux effets indésirables du bruit externe.

Les écarts des moyennes des 10 signaux pour chaque échantillon diminuent considérablement pour les échantillons ayant un volume d'eau plus importants.

Les résultats concernant la relation existant entre la résistivité électrique et la teneur en eau pour les échantillons calcaires et pour les échantillons brique sont présentés sur la Figure 68.

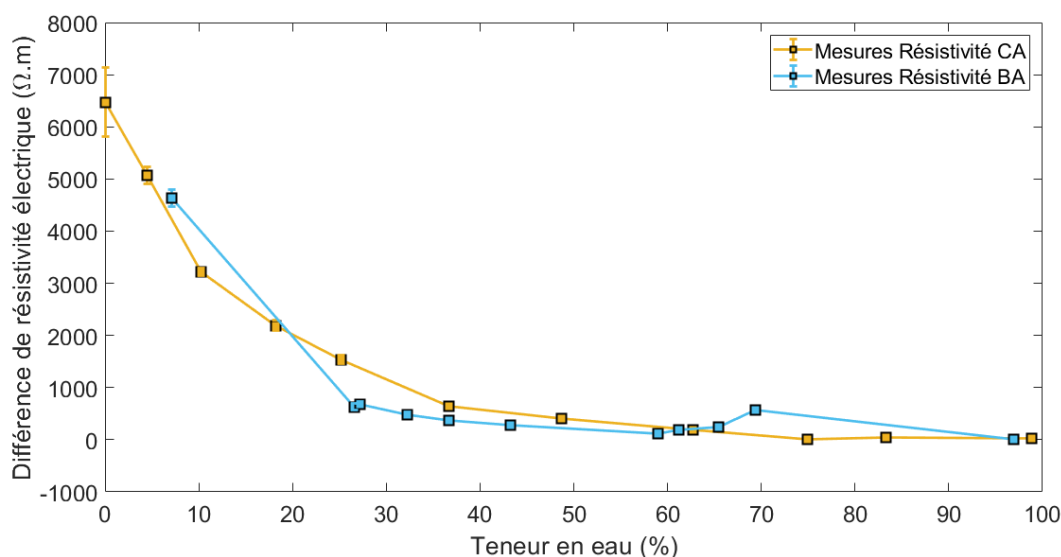


Figure 68 : Représentation graphique de l'évolution de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau des échantillons de calcaire CA et brique BA

Les valeurs moyennes de résistivité électrique présentent des écarts types variables pour les différentes teneurs en eau. Les résultats obtenus à partir des échantillons les plus secs présentent des écarts types plus importants. L'amplitude des écarts types de la résistivité diminue drastiquement pour des teneurs supérieures à 10%.

Les résultats obtenus montrent, en outre, que la tendance obtenue tant pour les échantillons brique comme pour les calcaires est très fonctionnelle et monotone.

1.5. Calibration de la réponse thermique et électrique en fonction de la teneur dans le cadre statique

Les résultats de ces travaux, représentés par la réponse thermique et électrique identifiées pour des teneurs en eau prédéfinies, ont été utilisés pour créer des modèles de calibration permettant d'estimer la réponse électrique et thermique pour tous les teneurs en eau imposés. Ces résultats permettent d'établir deux lois de calibration spécifique, une pour le calcaire et une pour la brique. De telles lois seront par la suite testées dans différents scénarios tests de transfert de l'eau au sein des matériaux pour éprouver la « solidité » de cette calibration statique, en vue d'un traitement des données de cas représentatifs de la réalité en condition plus dynamique.

Compte tenu de l'allure des résultats obtenus, différents essais de calage de modèles ont été opérés en appliquant un algorithme de régression non linéaire et une optimisation du coefficient de détermination. Le choix du modèle mathématique utilisé pour représenter les données est effectué parmi différents types de fonctions mathématiques exponentielle, puissance, hyperbolique, gaussienne et polynomiales.

- Modèle de calibration de la méthode thermique :

Après plusieurs tests, le modèle mathématique retenu est représenté par l'équation exponentielle suivante, équation (51) :

$$y = a e^{b x} + c e^{d x} \quad (51)$$

- Modèle de calibration de la méthode électriques :

A la différence des données obtenues avec les signaux thermiques, après plusieurs tests, le modèle mathématique retenu pour les modèles des signaux électrique est représenté par l'équation puissance (52) :

$$y = a x^b + c \quad (52)$$

La validité des modèles est déterminée par le coefficient de détermination R^2 (ou R-square). Ce coefficient est une mesure de la qualité de prédiction du modèle par rapport aux observations. L'équation du coefficient de détermination est la suivante, équation (53) :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (53)$$

Avec : x_i , la valeur mesurée ; \hat{x}_i , la valeur modélisée ; \hat{x} , la valeur moyenne et n le nombre d'éléments considérés pour ce calcul de confiance.

Un coefficient de confiance élevé peut être retenue comme une confirmation de la validité pour les lois de calibration mises en évidence. Il convient, cependant, de tester la solidité de telles relations afin de vérifier dans quelles conditions de tels modèles « statiques » sont applicables dans un cas dynamique.

1.5.1 Résultats de la calibration matériau calcaire

D'après les différents tests effectués avec les différentes fonctions mathématiques il a été choisi d'utiliser une équation exponentielle (54) pour la calibration de la méthode thermique et une équation puissance (55) pour la calibration de la méthode électrique. L'application d'un algorithme de régression non linéaire permet d'établir les paramètres suivants du modèle, Tableau 8. La comparaison du modèle thermique et électrique avec le champ de données est présentée sur la Figure 69 et Figure 70 respectivement.

Tableau 8 : Présentation des coefficients du modèle mathématique permettant de reproduire les données de résistivités et de température expérimentales pour le matériau calcaire.

Coefficients du modèle mathématique du calcaire		
Coefficients	Modèle thermique	Modèle électrique
a	$0,272 \pm 1,017$	$6,147 \cdot 10^3 \pm 1,391 \cdot 10^3$
b	$-0,748 \pm 1,22$	$-6,581 \cdot 10^{-2} \pm 1,878 \cdot 10^{-2}$
c	$-0,298 \pm 0,22$	$7,554 \cdot 10^2 \pm 1,448 \cdot 10^3$
d	-	$-7,841 \cdot 10^{-3} \pm 2,386 \cdot 10^{-2}$

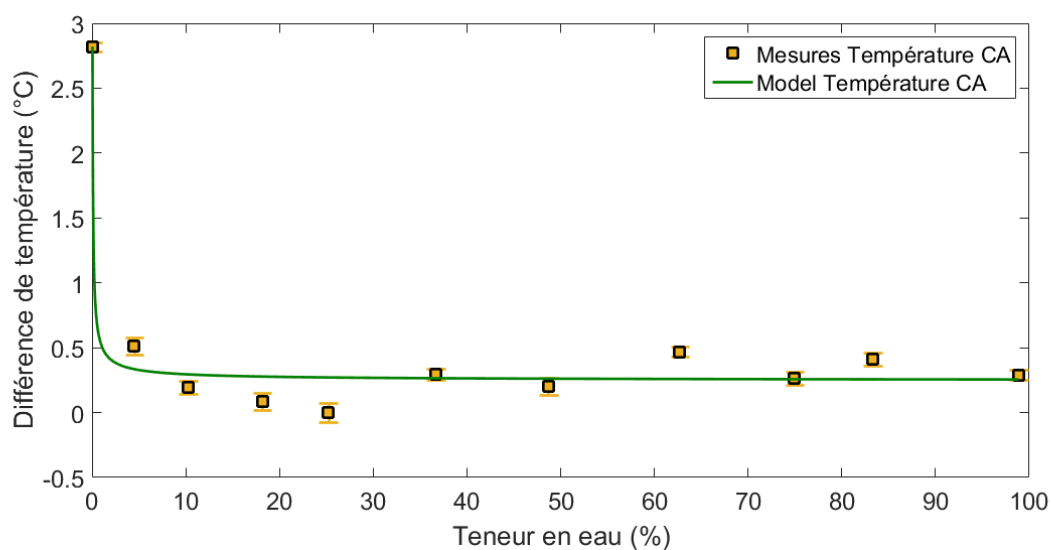


Figure 69 : Modèle de calibration de la variation de température moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau

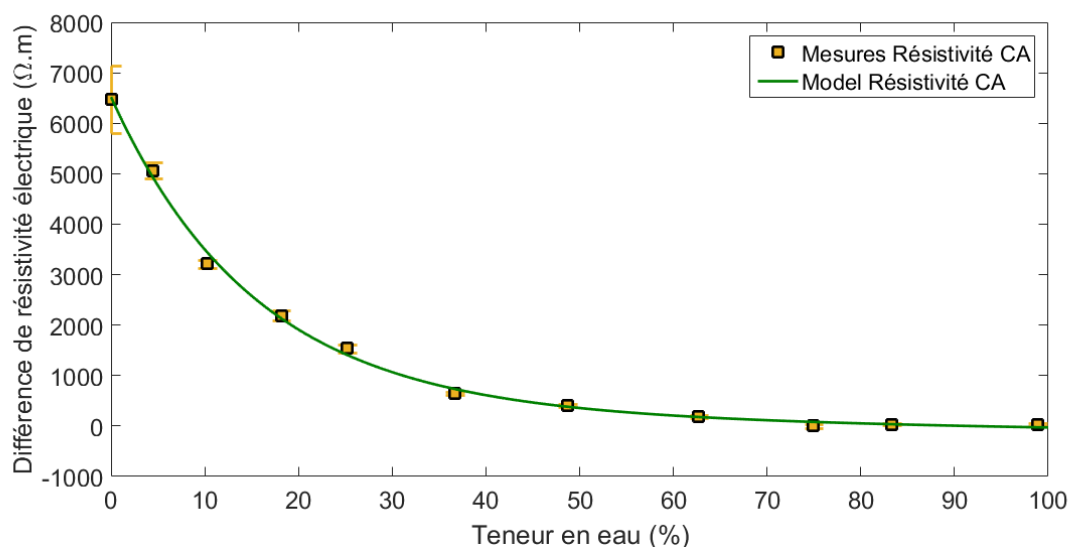


Figure 70 : Modèle de calibration de la variation de la résistivité électrique moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau

Le coefficient R^2 permettant de définir l’ajustement du modèle mathématique aux données mesurés pour le calcaire et la brique sont présentés sur le Tableau 9.

Tableau 9 : Coefficients R^2 permettant de confirmer la validité de l’ajustement des modèles reproduisant les données thermiques et électriques du matériau calcaire.

Validité de l’ajustement des modèles du calcaire (Coefficient R^2)	
Ajustement du modèle thermique	Ajustement du modèle électrique
0,963	0,998

L’application des indicateurs de la qualité des régressions montrent des résultats très acceptables compte tenu du champ de données mis en évidence tant par la méthode d’imagerie de thermographie IR comme pour la méthode d’imagerie électrique.

Cependant, les résultats présentés pour le calcaire montrent des comportements différents du signal thermique et électrique.

D’une part, l’évolution de la température en fonction de la teneur en eau montre une réduction drastique de la température avec une légère augmentation de la teneur en eau. Cependant, au-delà d’une teneur en eau supérieur à 10%, les données correspondant à l’évolution de la température en fonction de la teneur, mesurée sur les différents échantillons de calcaire, présentent des valeurs très similaires. Cette similitude entre les valeurs de température mesurées pour des teneurs en eau supérieurs à 10% réduit largement la sensibilité de la méthode de thermographie IR pour la mesure de la variation de la teneur en eau.

D’autre part, les mesures de la variation de la résistivité électrique en fonction de la teneur en eau présente une évolution plus progressive et soutenu de la résistivité avec l’augmentation du contenu en eau. En effet, les variations des valeurs de résistivité avec l’augmentation de la teneur en eau

montrent une évolution soutenue qui permet d'identifier la teneur en eau en fonction de la résistivité mesuré jusqu'à des contenus en eau supérieurs à 70%.

1.5.2 Résultats de la calibration matériau de type brique

Comme pour le calcaire, le matériau de type brique utilise une équation exponentielle (56) pour la calibration de la méthode thermique et une équation puissance (57) pour la calibration de la méthode électrique.

L'application d'un algorithme de régression non linéaire permet d'établir les paramètres suivants du modèle, Tableau 10. La comparaison du modèle thermique et électrique avec le champ de données est présentée sur la Figure 71 et Figure 72 respectivement.

Tableau 10 : Présentation des coefficients du modèle mathématique permettant de reproduire les données de résistivités et de température expérimentales pour le matériau calcaire.

Coefficients du modèle mathématique du calcaire		
Coefficients	Modèle thermique	Modèle électrique
a	$15,56 \pm 5,616$	$1,106 \cdot 10^4 \pm 6,329 \cdot 10^3$
b	$-0,746 \pm 0,238$	$-1,353 \cdot 10^{-1} \pm 1,055 \cdot 10^{-1}$
c	$-0,007 \pm 0,5$	$6,56 \cdot 10^2 \pm 1,098 \cdot 10^3$
d	-	$-7,257 \cdot 10^{-3} \pm 2,563 \cdot 10^{-2}$

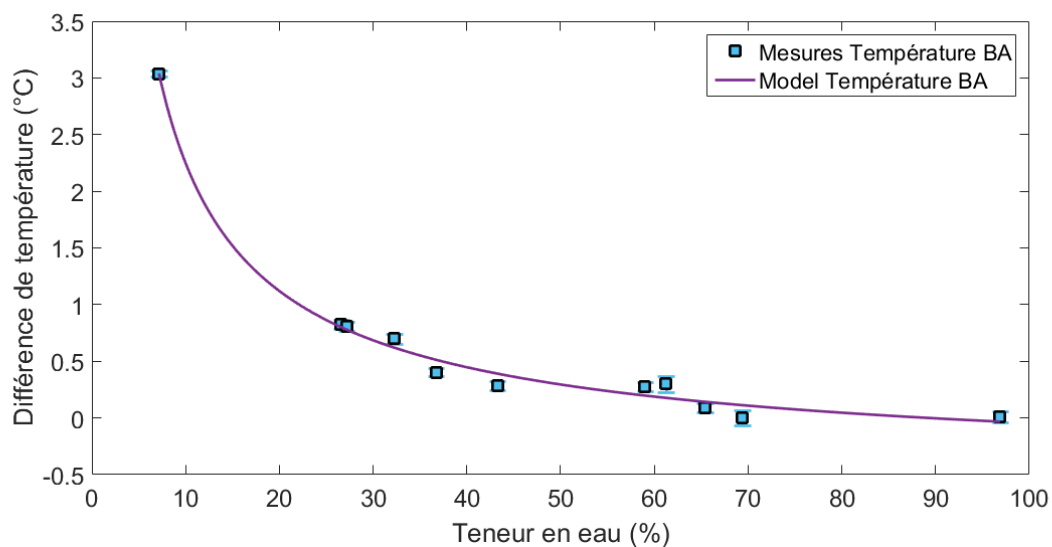


Figure 71 : Modèle de calibration de la variation de la résistivité électrique moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau

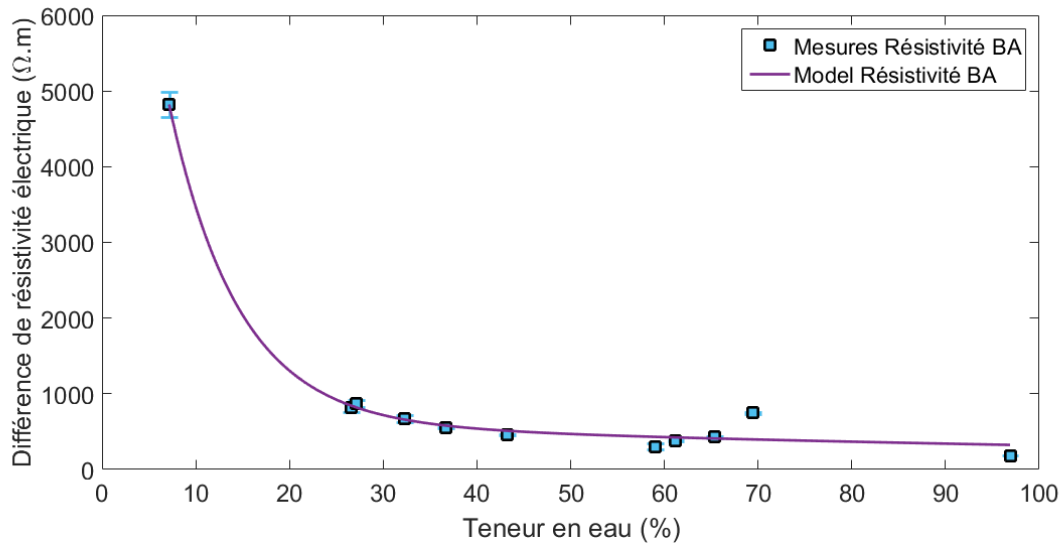


Figure 72 : Modèle de calibration de la variation de la résistivité électrique moyenne des échantillons en fonction de la teneur en eau

Le coefficient R^2 permettant de définir l'ajustement des modèles mathématique aux données thermiques et électriques mesurés pour la brique sont présentés sur le Tableau 11.

Tableau 11 : Coefficients R^2 permettant de confirmer la validité de l'ajustement des modèles reproduisant les données thermiques et électriques du matériau de type brique.

Validité de l'ajustement des modèles du calcaire (Coefficient R^2)	
Ajustement du modèle thermique	Ajustement du modèle électrique
0,9904	0,9903

L'application des indicateurs de la qualité des régressions montrent des résultats très acceptables compte tenu du champ de données mis en évidence tant par la méthode d'imagerie de thermographie IR comme pour la méthode d'imagerie électrique.

Les résultats présentés pour le calcaire montrent des comportements similaires tant pour le signal thermique comme pour le signal électrique.

Contrairement aux résultats obtenus pour le matériau calcaire, l'évolution de la température en fonction de la teneur en eau montre une réduction plus soutenue de la température avec l'augmentation de la teneur en eau. En effet, l'évolution de la température avec la diminution de la teneur en eau permet de déterminer avec précision la teneur en eau du matériau pour des teneurs en eau comprises entre 7% (eau endogène) et 97%.

Dans le cas de la méthode électrique, l'évolution de la résistivité avec l'augmentation de la teneur en eau montre une diminution plus rapide. Cette diminution rapide de la résistivité se produit pour des teneurs en eau comprises entre 7% (eau endogène) et 40%. L'évolution de la résistivité électrique pour des teneurs en eau supérieurs à 40% présentent de valeurs similaires correspondant avec une phase plateau des données représentés.

1.6. Synthèse des résultats de l'expérience de calibration dans le cadre statique

L'expérience de calibration thermique et électrique des matériaux dans le cadre statique nous apporte différentes informations.

Les modèles mathématiques choisis pour de calibration thermique et électrique permettent de représenter très fidèlement les données mesurées sur les échantillons. En effet, tous les modèles présentés montrent des coefficients R^2 supérieurs à 0,9. Cela montre la capacité remarquable des modèles pour représenter de manière continue l'évolution du signal thermique et électrique en fonction de la teneur en eau.

Concernant les matériaux calcaires, la différence de comportement des modèles de calibration thermique et électrique est non négligeable. En effet, l'évolution de la variation de température avec l'augmentation de la teneur en eau ne permet pas de déterminer avec précision les teneurs en eau supérieures à 10%. Cependant, l'évolution plus soutenue du modèle représentant la variation de résistivité en fonction de la teneur en eau permet d'attribuer une valeur de teneur en eau à une valeur de résistivité particulier pour des teneurs en eau contenus dans l'intervalle entre ~0% et 70%.

La différence de la capacité des deux méthodes d'imagerie pour la calibration de la teneur en eau statique pour le calcaire est due à ces caractéristiques microstructurales. Sachant que le flux radiatif émis est dépendant de la quantité d'eau exposé à l'atmosphère, pour les faibles valeurs de teneur en eau les matériaux plus poreux vont présenter une surface d'échange eau/atmosphère plus important que ceux dont les propriétés de stockage sont plus réduites. Par conséquent, les matériaux de type calcaire vont présenter une diminution plus rapide de la température avec une faible augmentation de la teneur en eau.

Contrairement au modèle thermique, les résultats concernant la réponse électrique du calcaire montrent une décroissance plus lente de la résistivité avec l'augmentation de la teneur en eau. Cette tendance plus soutenue peut s'expliquer par le fait que la conduction électrique se fait majoritairement par le volume eau contenu dans l'espace poral. De plus comme que l'eau est répartie de manière homogène au sein du matériaux, l'évolution de la résistivité est plutôt fonction du volume d'eau contenu dans l'espace poral.

Pour ce qui concerne le matériau de type brique, le comportement des modèles de calibration thermique et électrique sont très similaires. Les deux méthodes d'imagerie présentent une décroissance relativement rapide mais soutenue avec l'augmentation de la teneur en eau.

La diminution de la température pour la brique est moins rapide que pour le calcaire pour les faibles teneurs en eau. Cela peut s'expliquer par la différence de stockage de l'eau entre les deux matériaux. En effet, la différence de porosité entre le calcaire et la brique fait que le volume d'eau nécessaire pour atteindre un même niveau de teneur en eau est plus important pour le matériau calcaire (N_{48h} de 35%) que pour le matériau brique (N_{48h} entre 20% et 25%). Ainsi, les matériaux moins poreux comme la brique vont présenter une surface d'échange eau/atmosphère plus restreinte. Par

conséquent, les caractéristiques microstructurales de la brique vont présenter une évolution plus soutenue de la température que les matériaux de type calcaire.

Comme dans le cas du modèle thermique, les résultats concernant la réponse électrique de la brique montrent une décroissance soutenue de la résistivité avec l'augmentation de la teneur en eau. Cependant, pour ce type de matériau l'évolution du modèle électrique présente une sensibilité plus réduite que celle du modèle thermique pour les teneurs en eau élevées.

2. Suivi de la dynamique d'évaporation – estimation de la robustesse de la calibration des méthodes d'imagerie

2.1. Protocole expérimental

Outre l'aspect statique que représente la relation établie précédemment, il convient de vérifier sa représentativité et au besoin de prévoir sa correction dès lors qu'un processus dynamique devrait être pris en compte. Le premier scénario de test retenu permet de suivre la désaturation des matériaux étudiés par le biais des deux méthodes investiguées, électrique et thermographique, mais complétées par des mesures de perte de masse. Pour atteindre ces objectifs, un échantillon préalablement saturé en eau en suivant le protocole de la porosité à 48h est placé dans une chambre noire pour suivre les variations de potentiel électrique et de température de surface au cours du processus de désaturation par séchage. Les essais sont réalisés au moyen d'échantillons cylindriques de 2 cm de diamètre et de 2 à 4 cm de hauteur. En condition simultanée, un échantillon de même nature est placé sur une balance de précision afin de mesurer la perte de masse au cours de la désaturation. Des capteurs de température, d'humidité relative et de pression atmosphérique reliés à un système d'acquisition de données sont placés à l'intérieur de la chambre. Le banc d'essais est présenté sur la Figure 73. Pour ces essais, la température de la salle d'essais peut être modifiée ainsi que l'humidité relative.

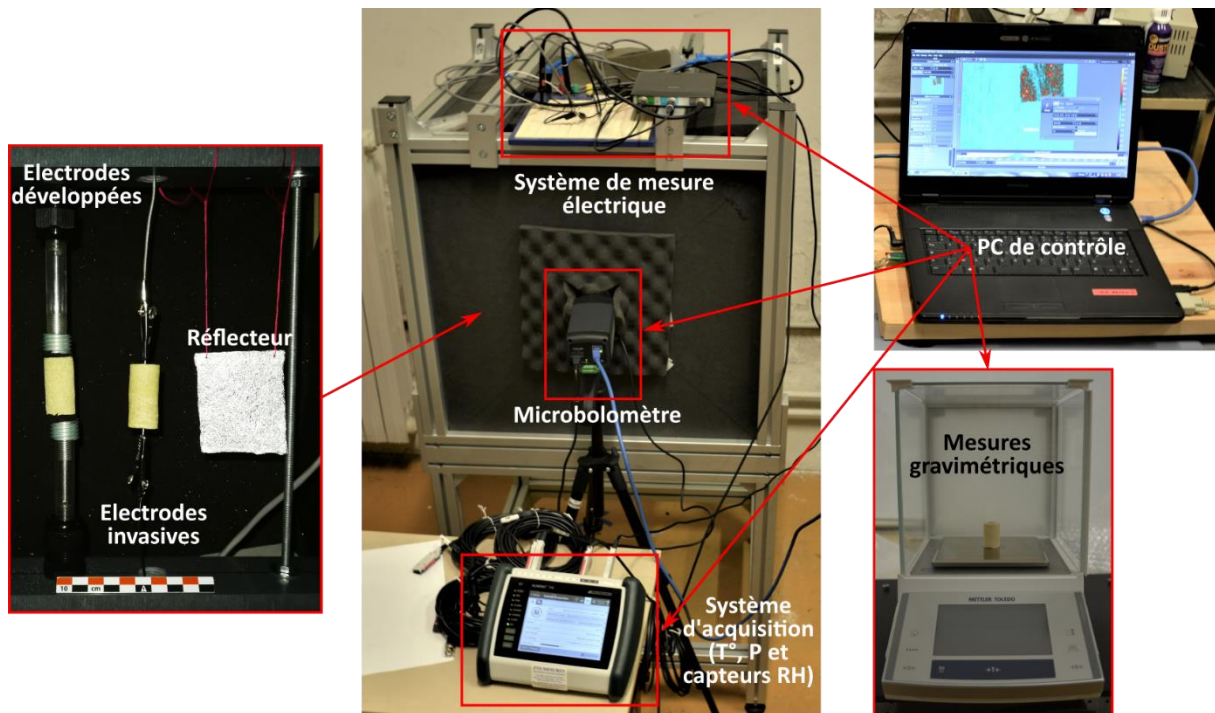


Figure 73 : Présentation des dispositifs de mesure utilisés lors de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation.

Concernant la méthode électrique, l'évolution de la désaturation est mesurée par l'analyse de la variation du signal carré injecté de 12V d'amplitude et 137Hz de fréquence.

Les mesures de la variation de potentiel électrique sont effectuées avec l'oscilloscope digital présenté précédemment (c.f. Chapitre III). L'oscilloscope a été réglé pour effectuer les mesures avec une résolution de 12 bits et une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz.

Lors de l'expérience, deux types d'électrodes ont été testés :

- des électrodes à caractère invasif constituées par des rivets en aluminium scellés sur 8mm de profondeur,
- des électrodes non invasives développées dans le cadre de cette thèse et qui permettent d'effectuer les mesures par contact superficiel.

Concernant la méthode d'imagerie infrarouge, le microbolomètre déjà présenté est utilisé pour suivre les variations de température apparente des échantillons via des thermogrammes avec une fréquence d'échantillonnage de 0,01Hz. En outre, afin de pouvoir recalibrer les variations de températures apparentes des échantillons au cours de la désaturation, il est nécessaire de mesurer une température de référence. Comme dans les expériences précédentes, la visualisation simultanée d'un réflecteur constitué d'aluminium froissé est réalisée. Le recalage des températures apparentes mesurées par imagerie infrarouge (58) est effectué grâce au capteur de température placé à l'intérieur de la surface réfléchive utilisée comme référence.

$$T_r^{IR} = T_a^{IR} - (\overline{T_a^{IR}} - \overline{T_r^o}) \quad (58)$$

Avec, T_r^{IR} , la température IR réelle (K), T_a^{IR} , la température IR apparente (K) et T_r° , la température mesurée par le capteur de température (thermocouple) (K).

2.2. Traitements

2.2.1 Traitement du signal électrique

Les signaux électriques obtenus avec l'oscilloscope sont découpés en intervalles consécutifs de 100 secondes. L'amplitude moyenne de la partie du signal correspondant à la fréquence caractéristique de 137 Hz est mesurée à partir de la transformée de Fourier appliquée sur chaque tronçon. Une illustration de ce traitement est présentée sur la Figure 74.

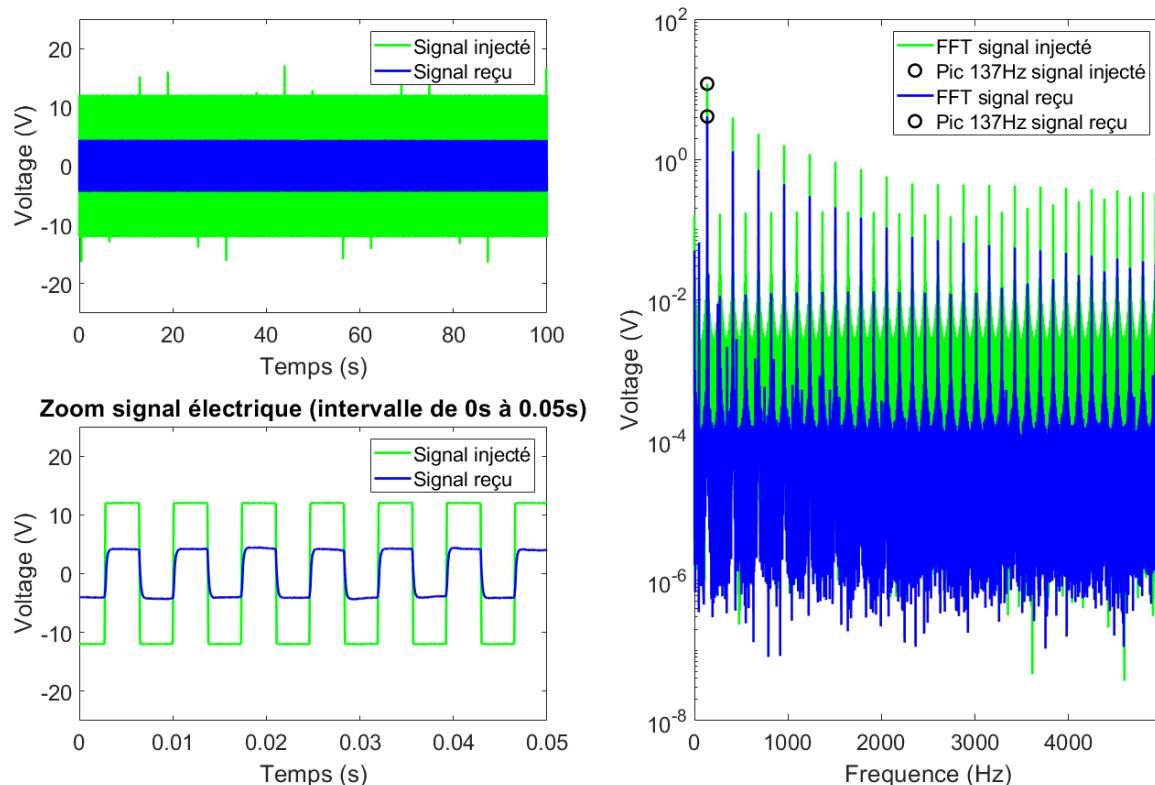


Figure 74 : Représentation de la méthode de traitement du signal électrique continu pour l'obtention des valeurs de la différence de potentiel électrique.

A l'image des travaux réalisés en condition statique, la mesure du courant électrique est réalisée à partir de la différence de potentiel injecté dans le circuit et traversant une résistance de 100 kOhm. Cette procédure permet d'établir que le courant délivré par l'oscilloscope pour un signal carré de 12V d'amplitude et 137Hz est de 11 μ A.

2.2.2 Traitement du signal thermique

L'évolution de la température à la surface de l'échantillon est mesurée sur la partie centrale de l'échantillon afin de minimiser les effets de bord pouvant affecter la valeur de température moyenne caractéristique. L'image présentée sur la Figure 75 montre un exemple de la scène thermique à

partir de laquelle sont calculées les valeurs de température de l'échantillon et de la référence au cours de l'expérience.

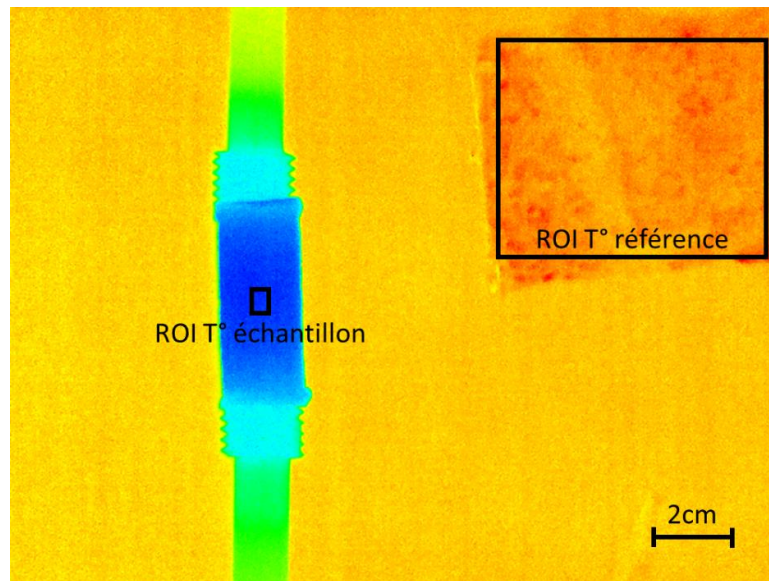


Figure 75 : Exemple de thermogramme montrant la ROI de l'échantillon et de la référence et utilisé pour créer les signaux thermiques

Des variations locales de la température environnante induisent une dérive importante sur la mesure par thermographie. A l'échelle de la journée, l'amplitude de la dérive peut être aussi importante que les variations de température de la cible (dans le cas de ces expériences, les variations de température environnementale enregistrées sont de l'ordre de 1 C°). Il est donc nécessaire de filtrer la partie du signal concernant les perturbations dues aux variations environnantes de la partie du signal concernant la variation de température au cours de la désaturation.

Plusieurs tests de traitement du signal thermique obtenu dans le cadre de l'expérience de désaturation (c.f. *Annexe III : Traitements non retenus de la thermographie IR p.200*). Finalement, le processus de traitement utilisé est un processus qui a été spécialement développé dans le cadre de ce projet de recherche pour minimiser les bruits indésirables de l'environnement du signal thermique enregistré.

La première étape de ce mode de filtrage est représentée par le calcul du ratio de la variation maximale de la température mesurée sur la référence et sur l'échantillon respectivement (59).

$$R_t = \frac{(\max(T_{Ref}) - \min(T_{Ref}))}{(\max(T_{Ech}) - \min(T_{Ech}))} \quad (59)$$

Afin de pouvoir mettre les courbes de température sur le même référentiel, la température normalisée de la ROI de référence est multipliée par R_t , (60) et (61).

$$T_{EchNorm} = \frac{(T_{Ech}(i) - \min(T_{Ech}))}{(\max(T_{Ech}) - \min(T_{Ech}))} \quad (60)$$

$$T_{RefNorm} = \frac{(T_{Ref}(i) - \min(T_{Ref}))}{(\max(T_{Ref}) - \min(T_{Ref}))} * Rt \quad (61)$$

Une fois que les variations de température sont normalisées sur le même référentiel, il est possible de soustraire les variations mesurées dans la ROI de référence du signal mesuré sur l'échantillon (62).

$$T_{EchNormCor} = T_{EchNorm} - T_{RefNorm} \quad (62)$$

Une fois que les variations environnementales du signal de l'échantillon normalisé sont éliminées, le signal corrigé est remis à l'échelle originale et représente les variations réelles de température dues exclusivement au phénomène de désaturation (63).

$$T_{EchCor} = T_{EchNormCor} * (\max(T_{Ech}) - \min(T_{Ech})) + \min(T_{Ech}) \quad (63)$$

Le résultat du traitement est présenté sur la Figure 76 comparé aux signaux originaux de l'échantillon et de la référence.

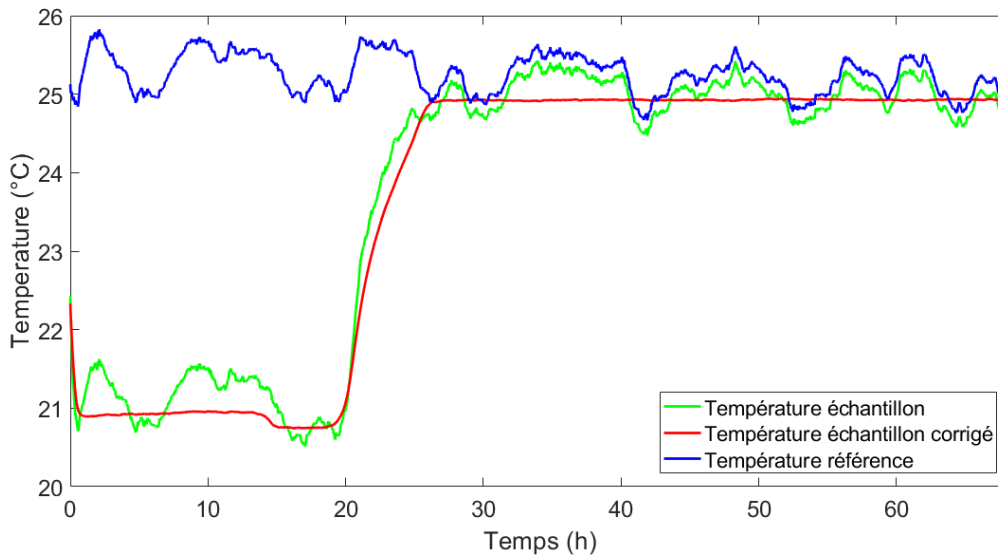


Figure 76 : Présentation du signal résultant après l'application du traitement n°3 comparé aux signaux de l'échantillon et de la référence d'origine.

Ce traitement montre les meilleurs résultats parmi les différents tests de traitement effectués. En effet, non seulement le bruit ambiant est fortement atténué mais il n'induit aucune modification significative de l'amplitude ou de l'allure de la courbe du signal d'origine mesuré sur l'échantillon.

Cela permet de préserver les caractéristiques intrinsèques des variations de la température propre à la désaturation en éliminant les effets externes indésirables. C'est pourquoi ce traitement a été choisi pour corriger les signaux thermiques mesurés pour tous les matériaux testés dans cette expérience.

2.3. Résultats

2.3.1 Comparatif électrodes invasives et non invasives

Après avoir opéré le traitement des signaux au moyen du scénario 3, les résultats sont présentés de la Figure 77 à la Figure 80, sous la forme de l'évolution du potentiel électrique et de la variation de la température en fonction de la saturation pour les différents matériaux testés avec les électrodes invasives et non invasives pour les matériaux retenus. A noter par ailleurs que les analyses des matériaux BAF et MM ont pu seulement être effectuées avec les électrodes non-invasives.

Afin de faciliter la comparaison des résultats, ceux-ci sont présentés sous forme de différence de température et différence de résistivité électrique. Cela est particulièrement souhaitable pour les résultats des mesures de thermographie IR. En effet, les échantillons sont saturés dans la même salle où sont effectuées les mesures afin d'assurer l'équilibre thermique entre l'environnement et l'échantillon. Cependant, entre deux expériences, les conditions thermiques de la salle peuvent varier légèrement. En utilisant des valeurs de différence de température au lieu de la température absolue, il est donc possible de comparer les variations de température entre deux échantillons sans tenir compte des possibles différences de températures initiales. Par rapport aux travaux réalisés en condition statique, une telle précaution s'impose du fait de la durée des essais qui sont sans comparaison avec les essais réalisés en condition statique pour lesquels les mesures sont faites au cours d'un bref instant (inférieur à 1 min) et où les variations des propriétés de l'environnement restent négligeables.

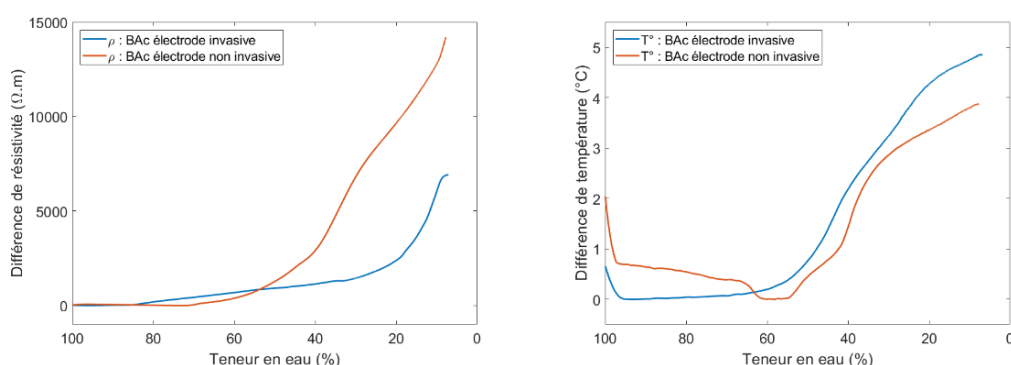


Figure 77 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons BAc obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.

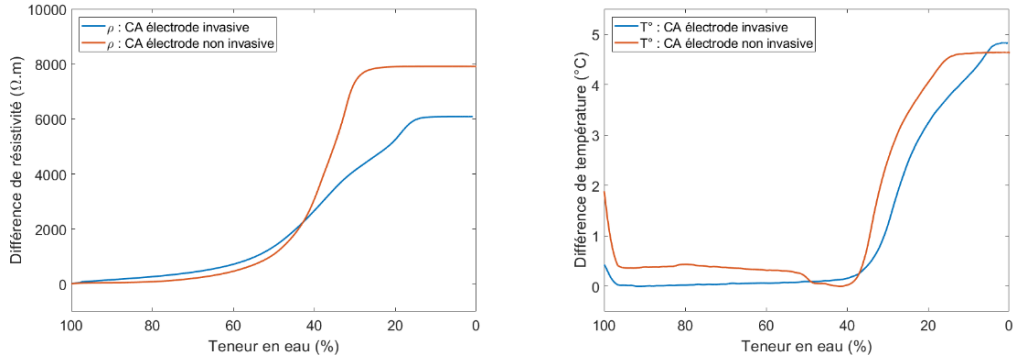


Figure 78 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons CA obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.

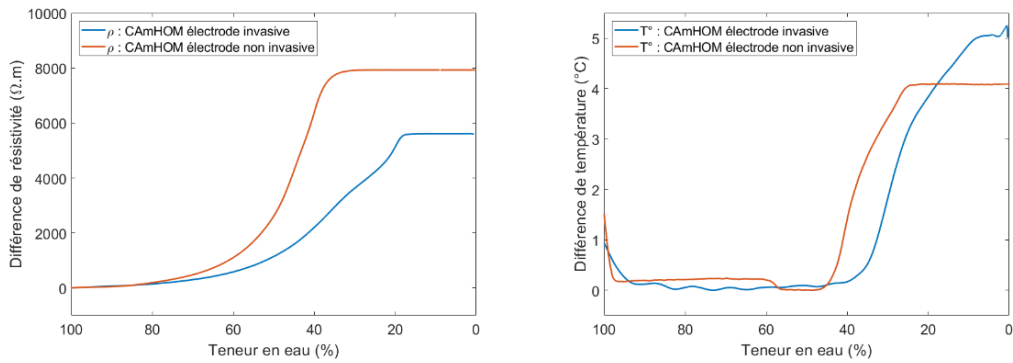


Figure 79 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons CAmHOM obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.

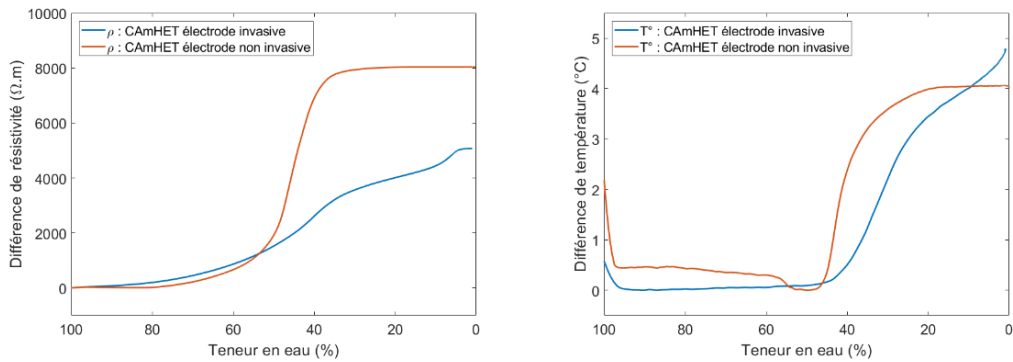


Figure 80 : Résultats des mesures du suivi de la dynamique de désaturation des échantillons CAmHET obtenus avec les électrodes invasives et les électrodes non-invasives.

Les résultats montrent que le recours à la technique électrique avec des électrodes invasives et non invasives semble impacter la méthode de thermographie IR. Les résultats des expériences de désaturation effectuées avec les électrodes invasives offrent un intervalle de saturation mesurable légèrement plus large que les résultats obtenus d'après les mesures effectuées avec les électrodes non-invasives.

Lorsque les mesures sont effectuées avec les électrodes invasives, l'intervalle de saturation pour lequel la méthode électrique offre des informations exploitables est compris entre ≈ 20 et $\approx 90\%$,

tandis qu'avec les électrodes non-invasives, l'intervalle de saturation pour lequel la méthode électrique offre des informations exploitables, est compris entre ≈ 35 et $\approx 90\%$.

En outre, les résultats montrent que l'utilisation des électrodes invasives ou non-invasives peut avoir un impact sur la sensibilité de la mesure de la méthode électrique. Les résultats des expériences de désaturation effectués avec les électrodes invasives offrent un intervalle de saturation mesurable plus large que les résultats obtenus d'après les mesures effectuées avec les électrodes non-invasives.

Tout d'abord, lorsque les mesures sont effectuées avec les électrodes invasives, l'intervalle de saturation pour lequel la méthode électrique offre des informations exploitables est compris entre ≈ 20 et $\approx 90\%$, tandis qu'avec les électrodes non-invasives, l'intervalle de saturation pour lequel la méthode électrique offre des informations exploitables, est compris entre ≈ 35 et $\approx 90\%$.

De plus, il est possible d'observer une différence non négligeable de la résistivité électrique mesurée avec les électrodes invasives et non invasives pour les faibles teneurs en eau. Pour un même matériau, la résistivité mesurée avec les électrodes non invasives montre des valeurs maximales plus élevées que celles mesurées avec les électrodes invasives.

Ces variations des résultats en fonction du type d'électrode peuvent s'expliquer par la nature poreuse et mouillée du feutre utilisé comme embout pour les électrodes non-invasives, qui compte tenu du faible volume de l'échantillon, peut affecter légèrement la distribution de l'eau au sein de l'échantillon. En outre, il est possible qu'un biais soit induit par le protocole de mesure qui nous impose de mesurer la variation de masse sur un échantillon en dehors de chambre noire pour que cette mesure ait un sens. Toutefois, un tel procédé ne nous permet pas d'être assuré que le séchage se produit de façon identique pour les trois échantillons. Ce compromis devra trouver une issue plus viable à l'avenir. Par ailleurs, outre le biais de mesure probable induit par la mesure de la variation de masse, l'organisation du réseau des lignes de courant est de toute façon différente entre les deux configurations de mesures. En effet, la distinction des électrodes introduit également une résistance de contact différente. Cette différence de résistance de contact additionnée à l'augmentation de la résistance des embouts des électrodes non invasives avec le séchage progressif des feutres permet d'expliquer la différence de la valeur de résistivité pour les faibles teneurs en eau. L'optimisation du développement des électrodes sera poursuivie lors des futurs travaux. Lors de ces travaux il va être envisagé d'effectuer des analyses concernant les différents paramètres pouvant affecter la mesure de résistivité avec les électrodes non-invasives.

2.4. Interprétation des résultats de la désaturation dynamique

2.4.1 Cas des calcaires

L'interprétation des résultats permet de définir le modèle phénoménologique de la désaturation. En effet, les différentes étapes obtenues pour la mesure de la désaturation, sur les différents échantillons calcaires, en utilisant les électrodes non-invasives sont mises en évidence sur la Figure 81 et la Figure 82.

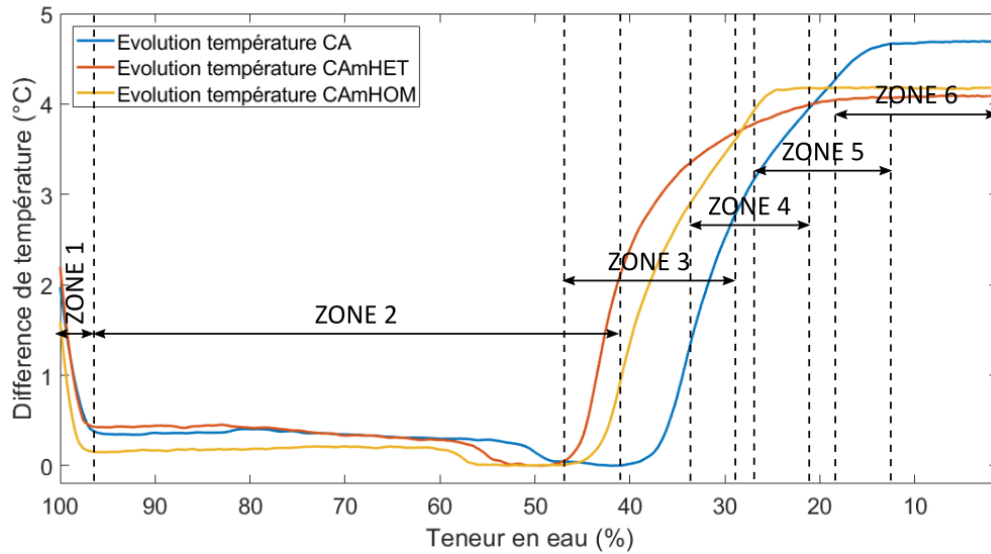


Figure 81 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi thermique de la dynamique de désaturation des matériaux calcaires .

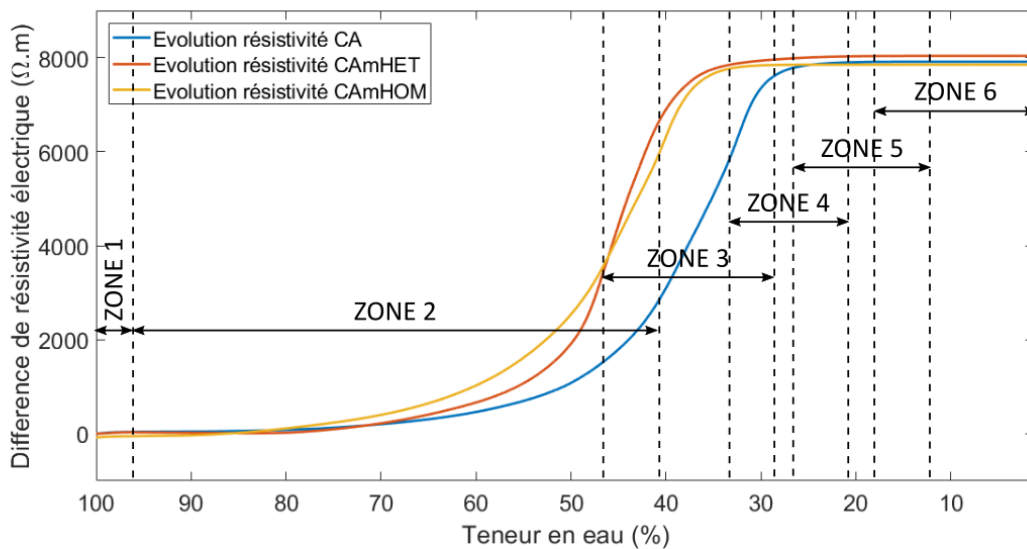


Figure 82 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi électrique de la dynamique de désaturation des matériaux calcaires (utilisation des électrodes non invasives).

Les résultats présentés sur la Figure 81 et la Figure 82 permettent d'identifier six étapes principales correspondant au modèle de la dynamique de désaturation. Les étapes du processus de transfert de masse présentées sur la Figure 83 correspondent aux différentes zones identifiées sur la courbe de désaturation :

ZONE 1 : une chute drastique de la température superficielle de l'échantillon est enregistrée. Il est vraisemblable d'attribuer cette brusque modification de l'équilibre thermique à un processus

d'évaporation du film d'eau qui enveloppe la surface de l'échantillon pendant les premiers moments de l'expérience.

ZONE 2 : Une très faible variation de température est observée à la surface de l'échantillon. Pour une telle situation, l'apport de la méthode thermique est peu significatif. C'est la variation du potentiel électrique qui apporte des informations représentatives de la perte d'eau. En effet, l'eau dans l'échantillon est redistribuée vers la surface, ce qui implique que la variation de la teneur en eau est observable dans le volume et pas en surface. Un tel processus, implique que l'eau agit comme une barrière thermique qui bloque l'évolution de la température de surface.

ZONE 3 : Les mesures de température comme celles de la variation de potentiel augmentent rapidement. Cela peut s'expliquer par la propagation du front d'assèchement depuis l'extérieur vers l'intérieur de l'échantillon, responsable de la perte progressive d'eau volumique.

ZONE 4 : Les mesures de température permettent de caractériser l'état partiellement saturé de l'échantillon. Les mesures par la méthode électrique n'apportent plus d'informations dues à la perte de la continuité électrique (répartition de l'eau sous forme de clusters).

ZONE 5 : Compte tenu de l'avancement du processus de séchage de l'échantillon, la disparition progressive de l'eau des clusters implique probablement la stabilisation de la variation de la température.

ZONE 6 : Les mesures de la température et électriques ne présentent plus aucune information car à ce stade l'eau présente au sein de l'échantillon est en faible quantité et répartie de façon très hétérogène.

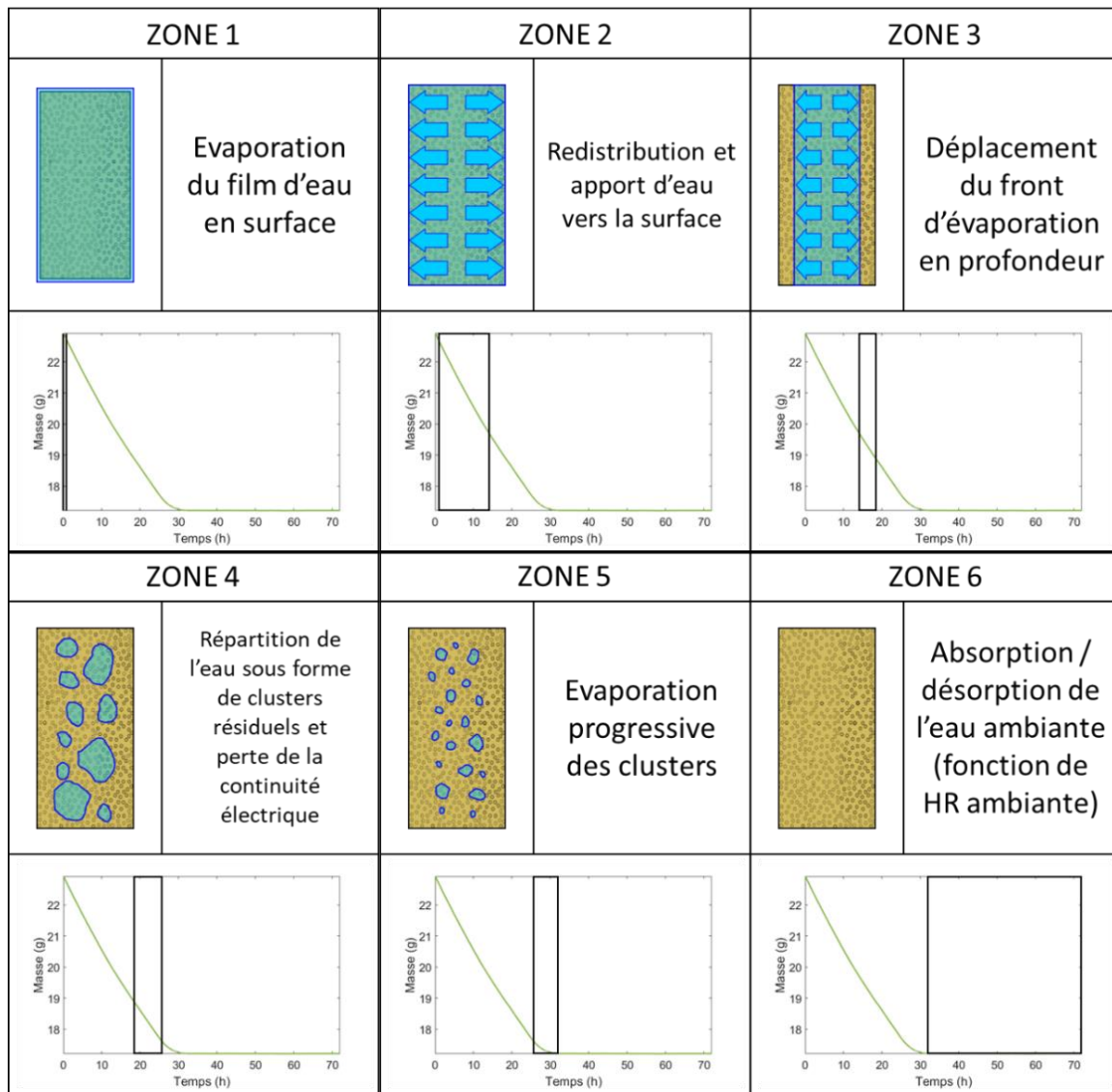


Figure 83 : Description phénoménologique des processus survenus pendant l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation pour les matériaux calcaires.

2.4.2 Cas des argiles cuites

Comme pour le cas du calcaire, les différentes étapes obtenues pour la mesure de la désaturation, sur les différents échantillons de briques, en utilisant les électrodes non-invasives de la dynamique de désaturation sont présentées sur la Figure 84 et la Figure 85.

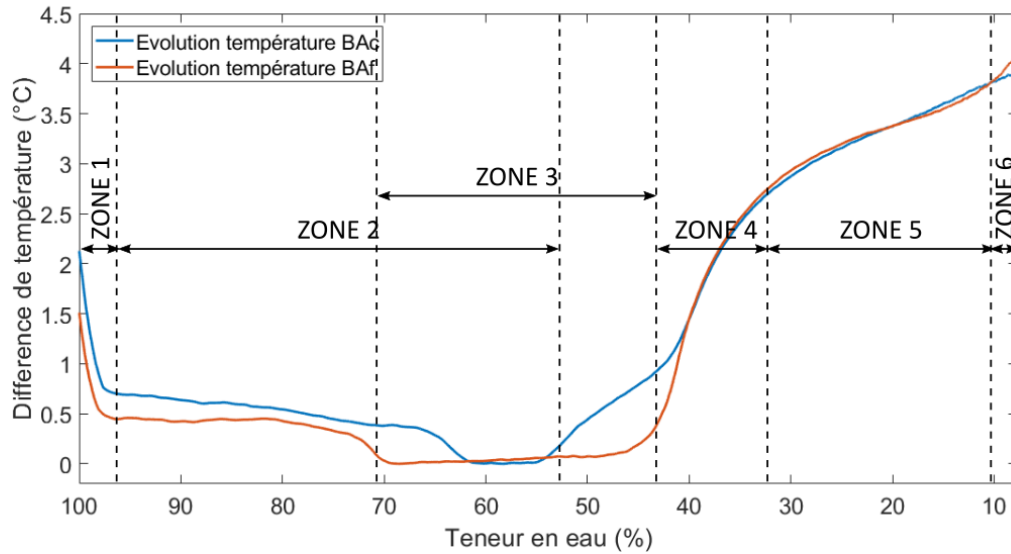


Figure 84 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi thermique de la dynamique de désaturation des matériaux de type briques (utilisation des électrodes non invasives).

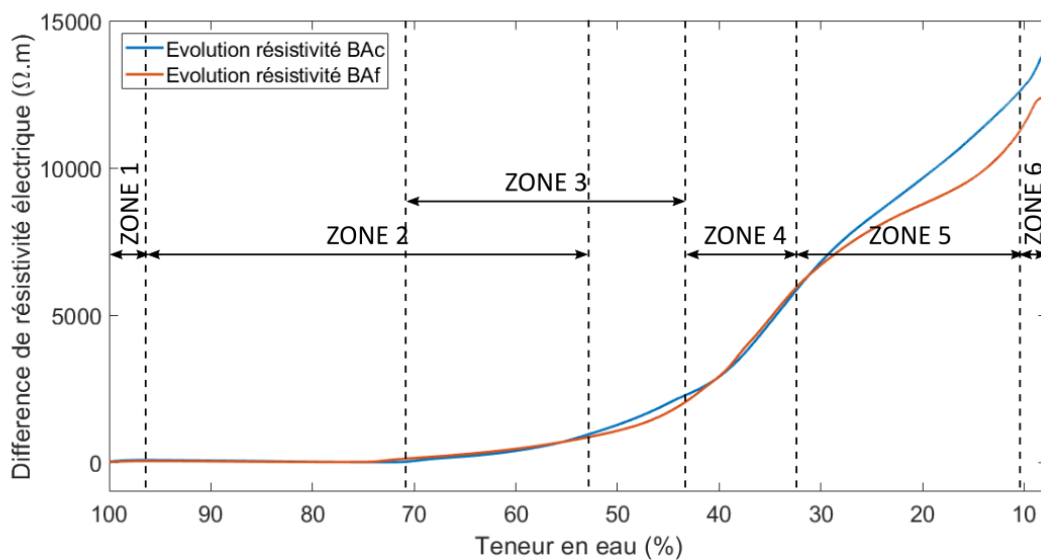


Figure 85 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi électrique de la dynamique de désaturation des matériaux de type briques (utilisation des électrodes non invasives).

Les résultats présentés sur la Figure 84 et la Figure 85 permettent d'identifier six étapes principales correspondant au modèle de la dynamique de désaturation. Les étapes du processus de transfert de masse présentées sur la Figure 86 correspondent aux différentes zones identifiées sur la courbe de désaturation :

ZONE 1 : Comme dans le cas des échantillons calcaires, une chute drastique de la température de surface de l'échantillon est enregistrée, que l'on peut attribuer à l'évaporation du film d'eau qui enveloppe la surface de l'échantillon cité précédemment.

ZONE 2 : La réponse thermique et électrique de l'échantillon présente les mêmes caractéristiques que les échantillons calcaires. En effet, aucune variation de température significative à la surface de l'échantillon n'est observée, et c'est la variation du potentiel électrique qui apporte des informations de la perte d'eau. Dans ce cas, l'eau dans l'échantillon est redistribuée vers la surface principalement par les pores de plus grande taille attribuées à des fissures dans le matériau. Comme dans le cas précédent, l'eau présente à la surface joue vraisemblablement un rôle de barrière thermique que le matériel actuellement disponible ne permet pas de contourner et les mécanismes de transfert affecte la répartition de l'eau dans le volume de façon sensible, ce que la méthode électrique semble montrer.

ZONE 3 : Les mesures de température comme celles de la variation de potentiel augmentent rapidement. Cela s'explique par la propagation du front d'assèchement vers l'intérieur de pores de plus grande taille, représentés par des fissures au sein de l'échantillon. Cet accroissement de la résistivité peut également être relié à la perte progressive d'eau dans le volume.

ZONE 4 : Les mesures de température comme celles de la variation de potentiel continuent à augmenter. En effet, malgré le retrait de l'eau dans les pores de plus grande taille, l'évaporation progressive au sein des micropores est reflétée par les variations thermiques mesurées. Malgré le retrait progressif de l'eau dans les micropores, la continuité électrique au sein du réseau poreux étant maintenue, il est possible d'obtenir des informations par la méthode électrique.

ZONE 5 : L'évaporation progressive de l'eau au sein des micropores continue vers l'intérieur du matériau. Malgré une probable diminution de la contribution des micropores saturés, il est possible de poursuivre le suivi de la désaturation par le signal thermique et électrique qui montrent une hausse régulière mais légèrement moins importante que dans la zone précédente (la continuité électrique est assurée par certaines micropores du réseau).

ZONE 6 : Les mesures thermographiques et électriques ne présentent plus aucune information car à ce stade, le volume d'eau au sein du matériau n'est plus suffisamment représentatif.

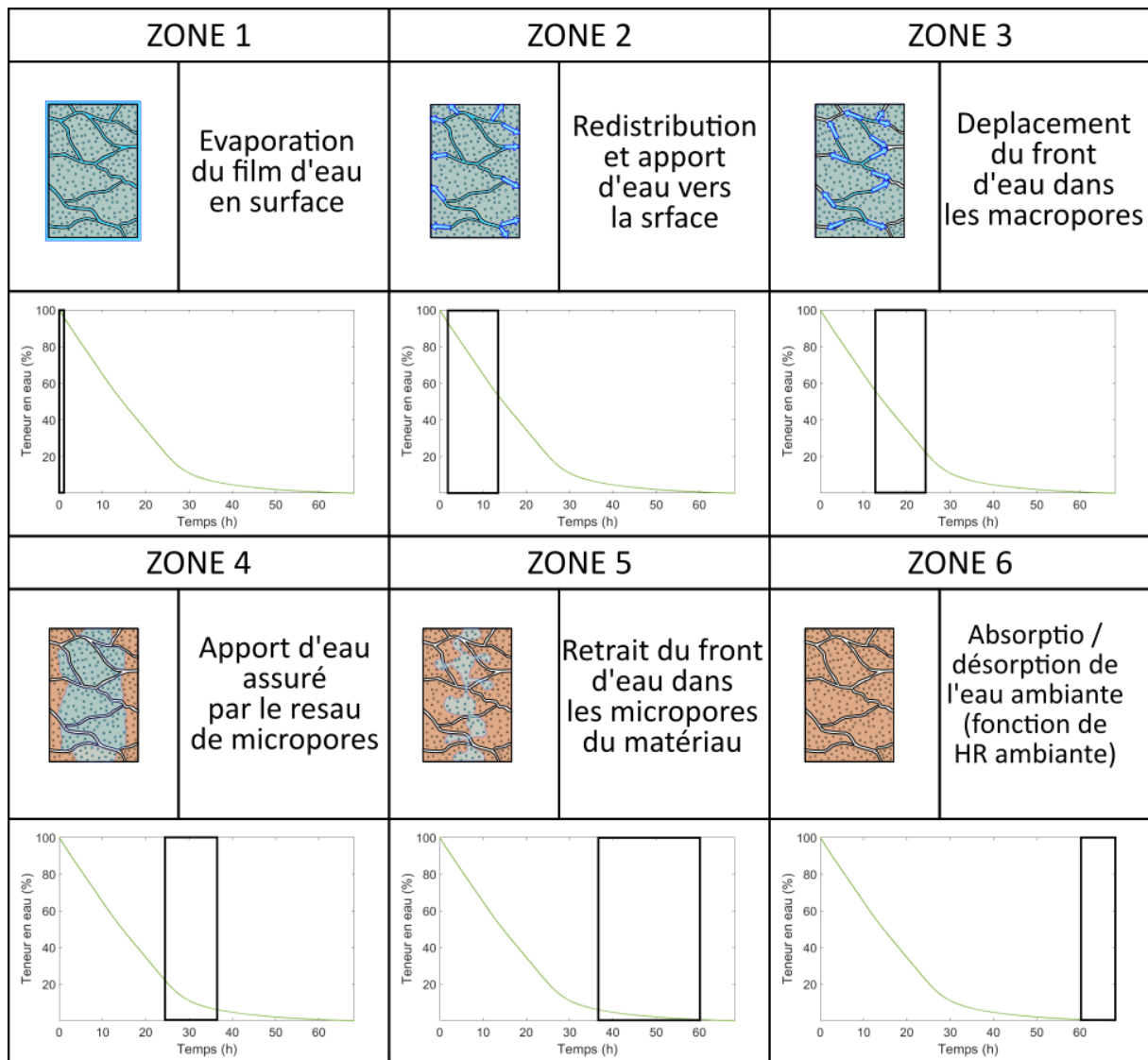


Figure 86 : Description phénoménologique des processus survenus pendant l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation pour les matériaux de type brique

2.4.3 Cas du mortier

Pour le mortier, les différentes étapes obtenues pour la mesure de la désaturation, en utilisant les électrodes non-invasives de la dynamique de désaturation sont présentées sur la Figure 87 et la Figure 88.

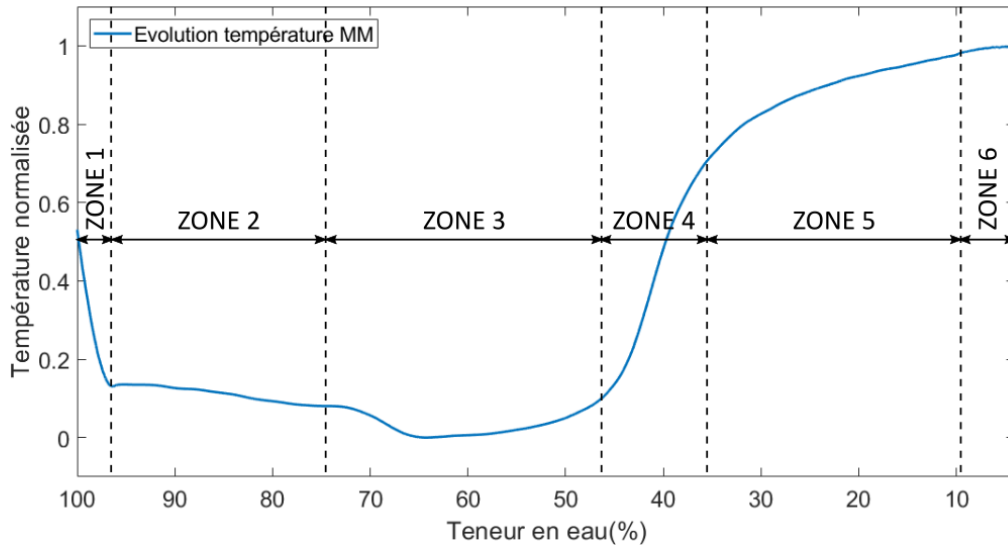


Figure 87 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi thermique de la dynamique de désaturation du matériau de type mortier moderne (utilisation des électrodes non invasives).

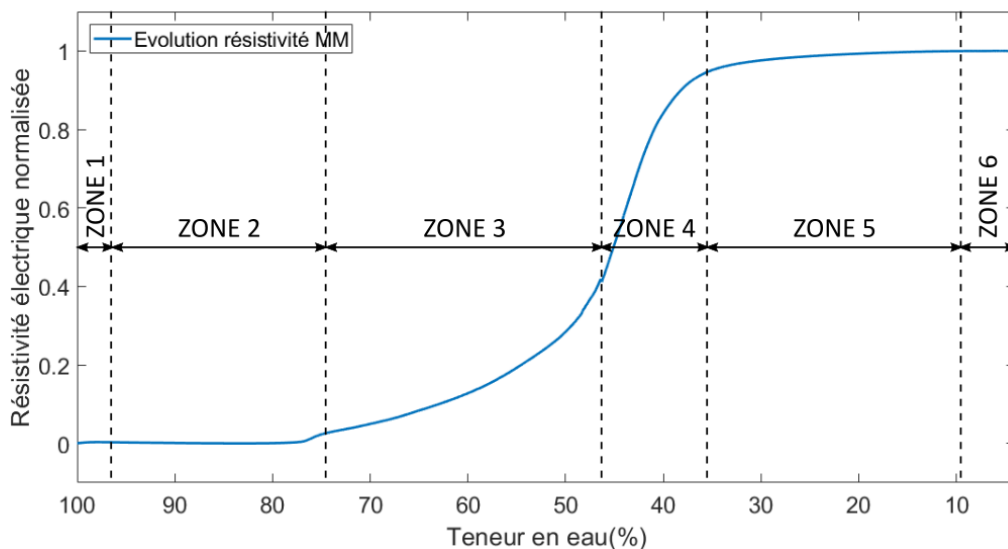


Figure 88 : Identification des zones principales d'occupation de l'eau induites lors du suivi électrique de la dynamique de désaturation du matériau de type mortier moderne (utilisation des électrodes non invasives).

Les résultats présentés sur la Figure 87 et la Figure 88 permettent d'identifier six étapes principales correspondant au modèle de la dynamique de désaturation. Les étapes du processus de transfert de masse présentées sur la Figure 89 correspondent aux différentes zones identifiées sur la courbe de désaturation :

ZONE 1 : Comme dans les cas des échantillons calcaires et les argiles cuites (briques), les premiers instants de l'expérience sont caractérisés par une chute drastique de la température de surface de l'échantillon. Comme pour les cas précédents, ce phénomène est attribué à l'évaporation du film d'eau qui enveloppe la surface de l'échantillon.

ZONE 2 : La réponse thermique et électrique de l'échantillon présente les mêmes caractéristiques que les échantillons calcaires et les argiles cuites. Comme pour les matériaux précédents, aucune variation de température significative à la surface de l'échantillon n'est observée. C'est la variation du potentiel électrique qui apporte des informations de la perte d'eau. Comme pour le cas du calcaire, l'eau dans l'échantillon est redistribuée vers la surface principalement par les pores de plus grande taille. De la même manière que pour les cas précédents, l'eau présente à la surface joue un rôle de barrière thermique. La méthode électrique semble montrer que les mécanismes de transfert affectent plus la répartition de l'eau dans le volume.

ZONE 3 : Les mesures de température augmentent légèrement tandis que la variation de potentiel augmente rapidement. Cela s'explique par la propagation du front d'assèchement vers l'intérieur des pores de plus grande taille tout en assurant un apport d'eau vers la surface par les micropores. Cet accroissement de la résistivité peut également être relié à la perte progressive d'eau dans le volume.

ZONE 4 : Les mesures de température comme celles de la variation de potentiel augmentent rapidement. En effet, malgré le retrait de l'eau dans les pores de plus grande taille, l'évaporation progressive au sein des micropores est reflétée par les variations thermiques mesurées. Malgré le retrait progressif de l'eau dans les micropores, la continuité électrique au sein du réseau poreux étant maintenue, il est possible d'obtenir des informations par la méthode électrique.

ZONE 5 : L'évaporation progressive de l'eau au sein des micropores continue vers l'intérieur du matériau. Malgré une probable diminution de la contribution des micropores saturés, il est possible de poursuivre le suivi de la désaturation par le signal thermique, qui montre une hausse régulière mais légèrement moins importante que dans la zone précédente. Les mesures par la méthode électrique n'apportent plus d'informations compte tenu de la perte de la continuité électrique (répartition de l'eau sous forme de clusters).

ZONE 6 : Les mesures thermographiques et électriques ne présentent plus aucune information car à ce stade, le volume d'eau au sein du matériau n'est plus suffisamment représentatif.

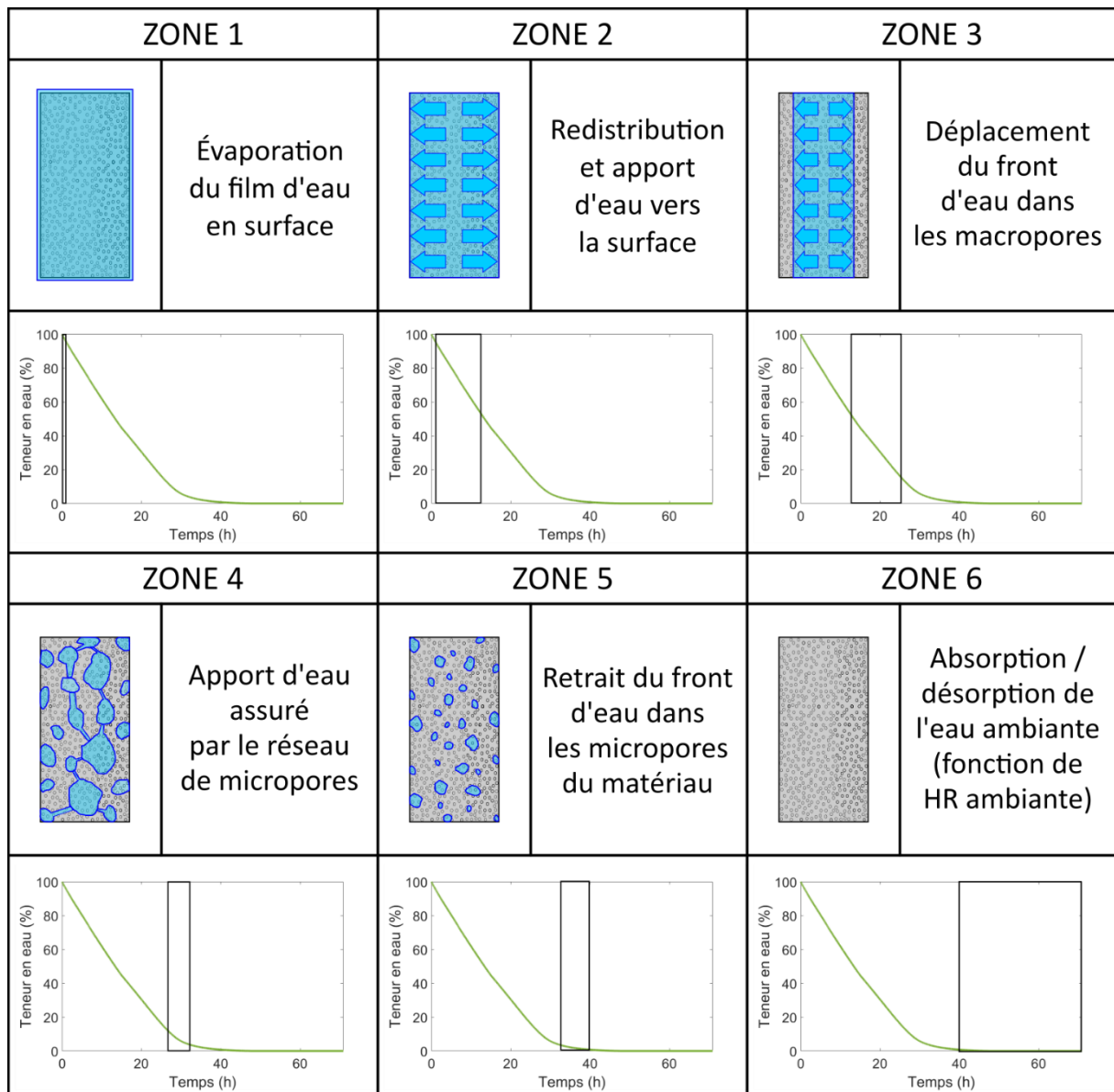


Figure 89 : Description phénoménologique des processus survenus pendant l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation pour les matériaux de type mortier.

2.5. Synthèse des résultats de la désaturation dynamique

Les résultats obtenus montrent que les différents matériaux présentent des dynamiques de désaturation différentes selon le type de matériau.

Les matériaux calcaires montrent une dynamique de séchage très similaire entre les différents échantillons. Le calcaire CA, CAMHET et CAMHOM présentent des dynamiques de séchage qui correspondent bien avec les propriétés de ce type de matériaux. En effet, ces grandes capacités de stockage et de transfert permettent une dynamique d'évaporation plus rapide.

Les matériaux de type brique montrent une dynamique de séchage plus lente que les matériaux calcaires. En effet, tant le brique BAc comme le BAf présentent des caractéristiques microstructurales qui limitent leur capacité de stockage et de transfert d'eau. En effet, la faible porosité et la taille réduite des pores, combiné à la faible perméabilité et les faibles coefficients d'imbibition permettent une dynamique de désaturation plus lente, présentant des phases de séchage où la continuité entre les différents clusters d'eau est assuré malgré une faible teneur en eau.

Les matériaux de type mortier moderne (MM) montre des dynamiques de séchage intermédiaires entre les matériaux calcaire et les matériaux de type brique. En effet, ce type de matériau montre une dynamique de désaturation plus lente similaire à celle du matériau de type brique. Cependant les résultats sur l'évolution de la résistivité électrique montrent une perte de la continuité entre les clusters d'eau en fin de séchage comme pour les matériaux calcaires.

3. Comparatif des approches statique et dynamique

Dans cette partie, nous abordons la représentativité de l'approche statique de la calibration pour interpréter des résultats d'un processus dynamique. Dans un premier temps, les courbes des expériences obtenues par des mesures de calibration statique sont superposées aux courbes obtenues en condition dynamique de désaturation pour les deux méthodes d'imagerie. Dans un deuxième temps, les valeurs de saturation attendues pour les variations de température et résistivité électrique, mesurées pendant l'expériences de désaturation dynamique, sont reconstruites en utilisant les courbes de calibration statique et comparées aux valeurs de saturation réelles mesurées pendant le processus dynamique de suivi de l'évaporation.

3.1. Analyse des courbes par superposition

3.1.1 Réponse infrarouge

Sur la Figure 90 et la Figure 91 sont présentés les résultats des deux expériences superposées sur un même graphique afin de pouvoir comparer l'évolution de la température pour les différents degrés de saturation des échantillons des matériaux calcaires (CA) et des briques anciennes (BA).

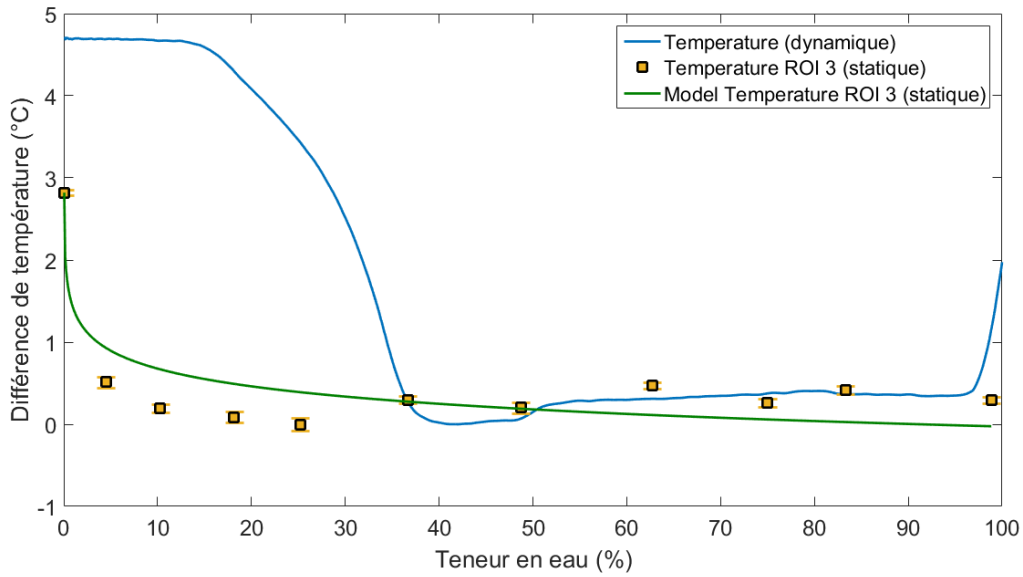


Figure 90 : Comparaison des résultats concernant la variation de température des expériences statique et dynamique pour les échantillons de type calcaire (CA)

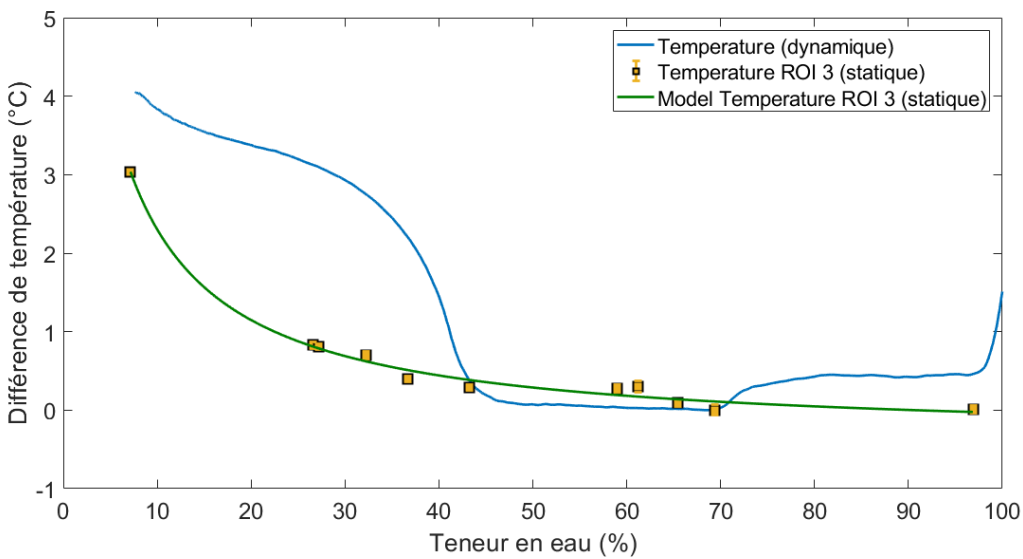


Figure 91 : Comparaison des résultats concernant la variation de température des expériences statique et dynamique pour les échantillons de type brique antique foncée (BAf)

La comparaison des résultats des deux expériences montre des différences significatives pour les faibles teneurs en eau. En effet, les résultats des courbes de calibration statique montrent une diminution de la température drastique entre 0% et ~20% de teneur en eau, tandis que pour les mesures de suivi de la dynamique de désaturation la diminution la plus importante se produit pour des teneurs en eau comprises entre ~20% et ~40%. Cette différence est particulièrement marquée pour les matériaux de type calcaire ou l'amplitude de la différence entre les deux résultats peut être de plus de 4°C à certains endroits.

3.1.2 Réponse électrique

Sur la Figure 92 et la Figure 93 sont présentés les résultats des deux expériences (calibration statique et dynamique de saturation) superposées sur un même graphique afin de pouvoir comparer l'évolution de la résistivité électrique pour les différents degrés de saturation des échantillons des matériaux calcaires (CA) et des briques anciennes (BA).

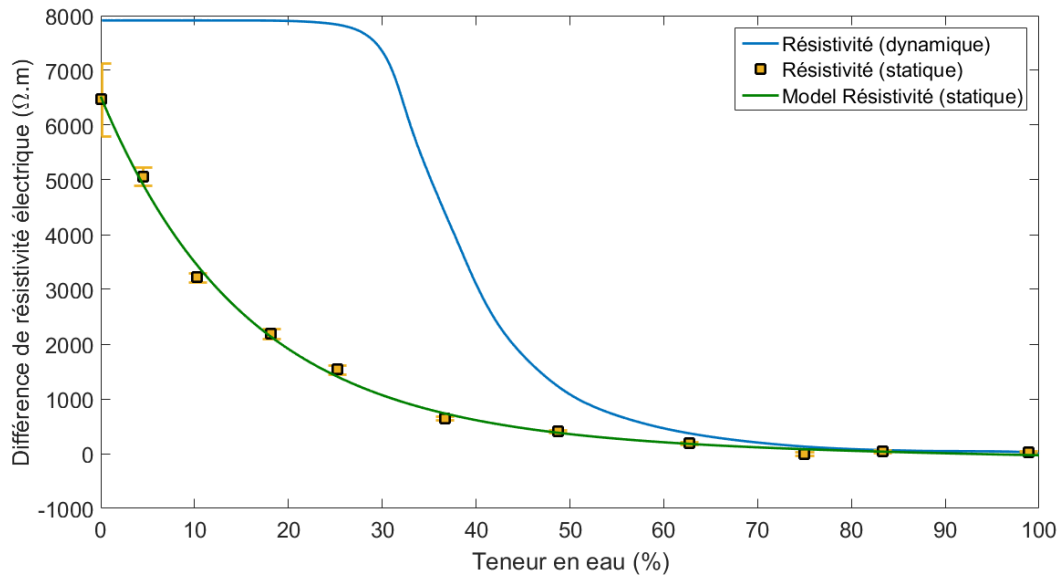


Figure 92 : Comparaison des résultats concernant la variation de résistivité électrique des expériences statique et dynamique pour le matériau de type calcaire (CA)

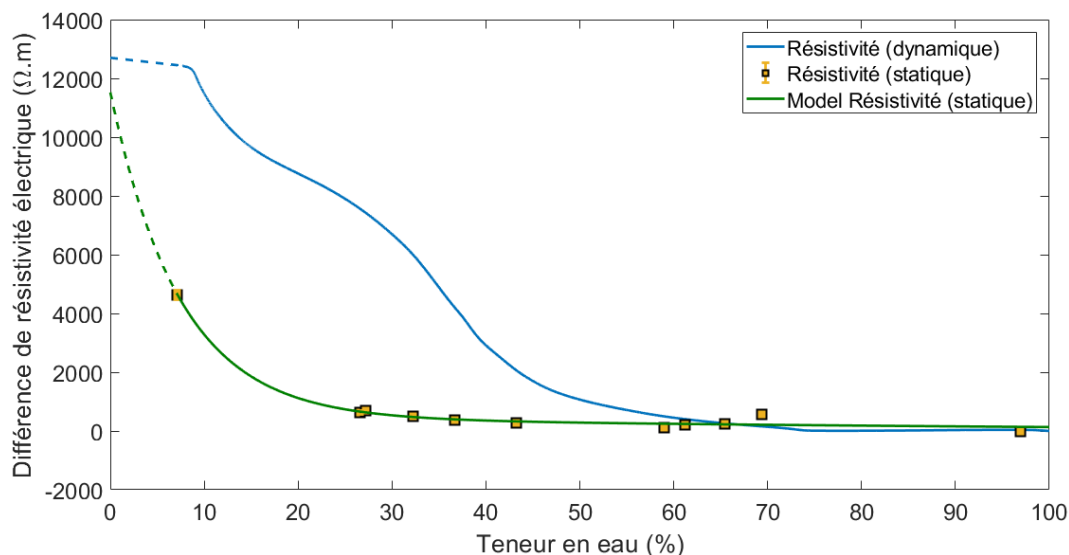


Figure 93 : Comparaison des résultats concernant la variation de résistivité électrique des expériences statique et dynamique pour le matériau de type brique (BA)

La comparaison des résultats des deux expériences montre des différences significatives pour les faibles teneurs en eau. En effet, les résultats des courbes de calibration statique montrent une diminution de la température drastique entre 0% et ~20% de teneur en eau, tandis que pour les mesures de suivi de la dynamique de désaturation la diminution la plus importante se produit pour

des teneurs en eau comprises entre ~20% et ~60%. Cette différence est particulièrement marquée pour les matériaux de type calcaire ou l'amplitude de la différence entre les deux résultats peut être d'environ 4000 $\Omega \cdot m$ pour une même valeur de teneur en eau (pour des teneurs en eau inférieures à 50%).

3.2. Reconstruction des valeurs de désaturation dynamique à partir de la calibration statique

Afin de mieux comprendre les différences entre les résultats des expériences de calibration statique avec l'expérience actuelle concernant la mesure de la dynamique de désaturation, les résultats de cette dernière expérience sont reconstruits en utilisant les courbes de calibration obtenues dans le cadre statique. Les résultats de la reconstruction sont comparés aux valeurs de variation de température et résistivité réelle mesurées au cours de l'expérience de désaturation.

3.2.1 Réponse infrarouge

3.2.1.1 Résultats de la reconstruction du signal thermique de la dynamique de désaturation à partir du modèle statique

Sur la Figure 94 et la Figure 95 sont présentés les résultats de la reconstruction de la température en fonction de la teneur en eau en utilisant les courbes de calibration statique comparés aux variations de la température en fonction de la teneur en eau mesurées pendant le processus dynamique de désaturation des matériaux calcaires (CA) et des briques anciennes (BA).

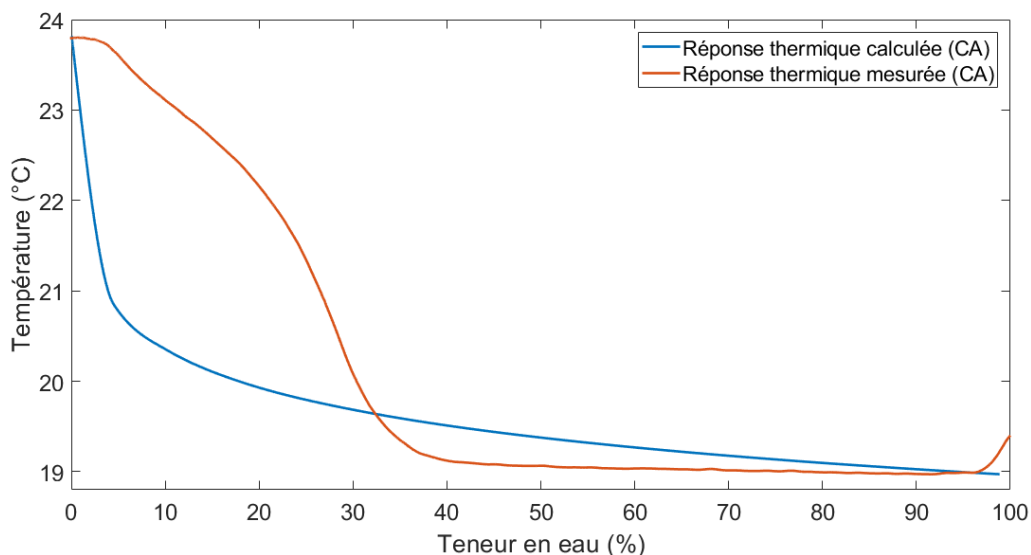


Figure 94 : Comparaison des résultats de la variation de la température en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Saturation calculée) et les valeurs réelles mesurées au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Saturation mesurée) pour les matériaux de type calcaire.

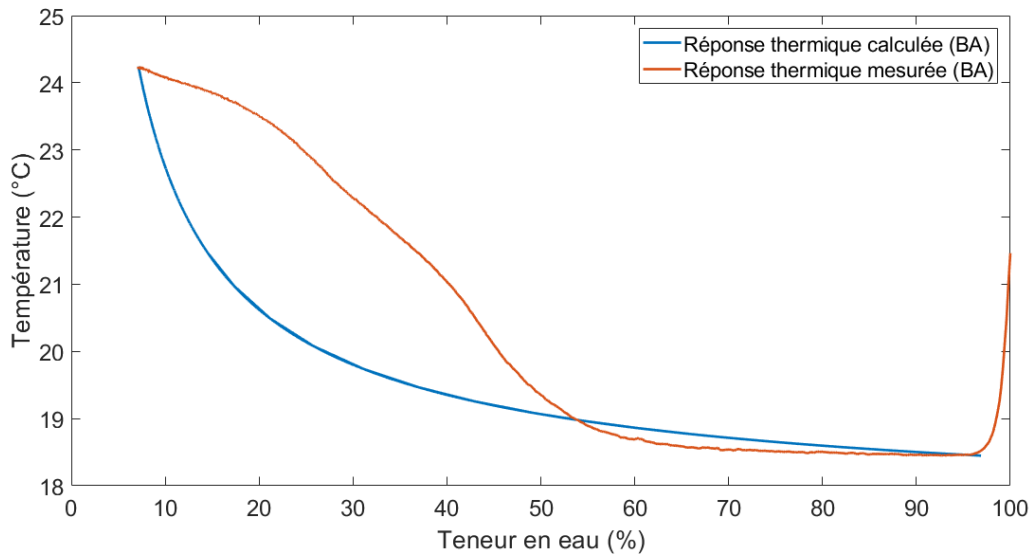


Figure 95 : Comparaison des résultats de la variation de la température en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Saturation calculée) et les valeurs réelles mesurés au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Saturation mesurée) pour les matériaux de type brique.

La reconstruction de la teneur en eau en fonction de la température en utilisant les courbes de calibration statique (saturation calculée) montrent certaines différences avec les teneurs en eau réelles pour les températures mesurées pendant l'expérience de suivi de désaturation (saturation mesurée). En effet, en utilisant les courbes de calibration statique pour la reconstruction, les températures calculées présentent des erreurs par rapport aux températures mesurées pour les faibles valeurs de teneur en eau. Cette différence entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées est plus importante pour les calcaires que pour les briques.

3.2.2 Réponse électrique

3.2.2.1 Résultats de la reconstruction du signal électrique de la dynamique de désaturation à partir du modèle statique

Sur la Figure 96 et la Figure 97 sont présentés les résultats de la reconstruction de la variation de résistivité électrique en fonction de la saturation en utilisant les courbes de calibration statique comparés aux données de variation de résistivité mesurées pendant le processus dynamique de désaturation des matériaux calcaires (CA) et des briques anciennes (BA).

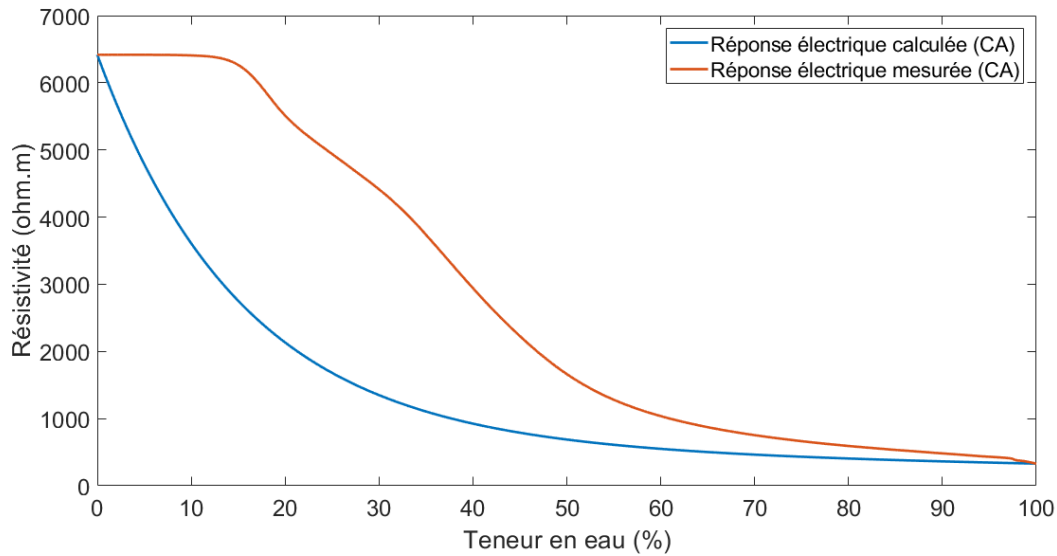


Figure 96 : Comparaison des résultats de la variation de la résistivité électrique en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Réponse électrique calculée (CA)) et les valeurs réelles mesurées au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Réponse électrique mesurée (CA)) pour les matériaux de type calcaire.

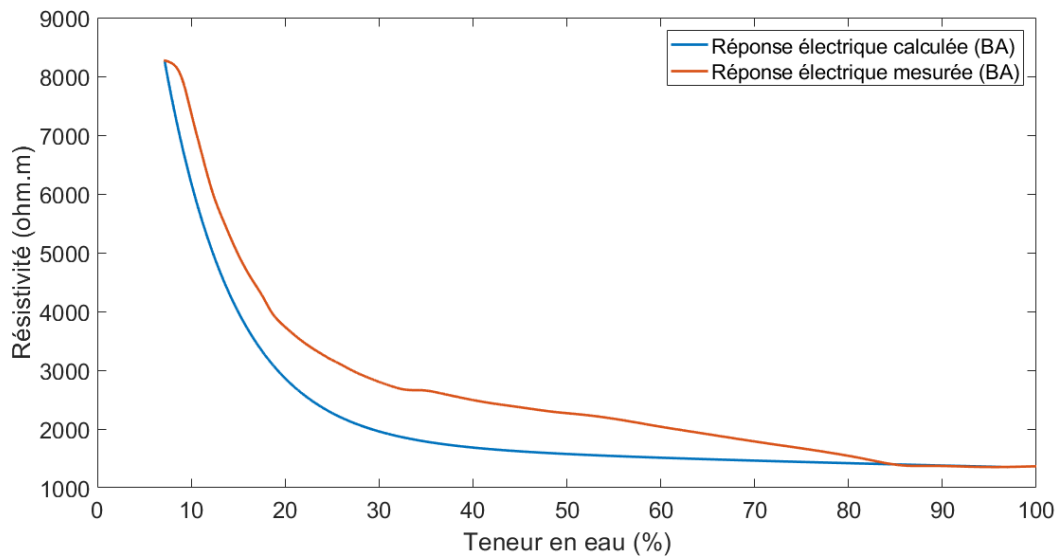


Figure 97 : Comparaison des résultats de la variation de la résistivité électrique en fonction de la saturation reconstruite à partir des courbes de calibration statique (Réponse électrique calculée (BA)) et les valeurs réelles mesurées au cours de l'expérience de suivi de la dynamique de désaturation (Réponse électrique mesurée (BA)) pour les matériaux de type calcaire.

Dans les cas des matériaux calcaires, la reconstruction de la teneur en eau en fonction de la résistivité électrique à partir des courbes de calibration statique (Réponse électrique calculée) montrent des différences par rapport aux valeurs de résistivité mesurées pour les faibles valeurs de teneur en eau. Cependant, la différence entre les valeurs de résistivité mesurées et valeurs calculées est beaucoup moins importante, présentant une tendance générale très similaire.

3.3. Synthèses des résultats comparatifs

Les différences entre les résultats des réponses thermiques et électriques entre les expériences effectuées dans un cadre statique et dynamique sont mises en avant par l'analyse comparative de ces résultats ainsi que par l'exercice de reproduction des données de l'expérience dynamique selon le modèle obtenu d'après l'expérience statique. Les différences des résultats entre les deux expériences concernent les valeurs à faible teneur en eau. Ces différences sont dues au fait que la répartition de l'eau varie en fonction de la teneur en eau dans l'expérience de désaturation tandis qu'elle est contrôlée dans le cas des mesures en statique. En effet, pour les faibles teneurs en eau pour les mesures en statique, la distribution spatiale de l'eau est homogène contrairement aux mesures en dynamique pour lesquelles la distribution spatiale de l'eau est hétérogène. Quand la répartition de l'eau est hétérogène la mesure surfacique de la température correspond à une valeur moyenne entre la partie sèche et la partie humide de l'échantillon. Lors que la partie humide se déplace vers l'intérieur de l'échantillon la valeur de température réelle mesuré à la surface de l'échantillon est de plus en plus affectée par la partie sèche en surface de l'échantillon.

La différence des résultats logiquement l'effet de la microstructure sur la dynamique de désaturation (porosité, distribution, connectivité).

Cette particularité est confirmée par la variation de la tendance d'évolution de température entre les matériaux calcaires (CA) et les briques (BA) lors des mesures de dynamique de saturation.

Cela est due au fait que le déplacement du front d'évaporation vers l'intérieur de l'échantillon favorise le remplissage de l'espace porale de la partie sèche par de l'air. L'air faisant effet d'isolant thermique, la mesure surfacique de la température sera plus affectée par l'effet isolant de la partie sèche de l'échantillon. Ainsi, pour des matériaux comme le calcaire présentant une plus grande porosité ($N_{48h} \approx 40\%$ et $r_{pores} \approx 10\mu m$) l'air contenu dans l'espace porale de la partie sèche de va être plus important que pour les matériaux de type brique ou l'espace porale restreinte permet le stockage d'un volume moindre d'air ($N_{48h} \approx 20\%$ et $10^{-3}\mu m \leq r_{pores} \leq 1\mu m$).

L'effet de la microstructure affecte aussi les mesures volumiques de résistivité électrique. Lors des mesures l'évolution de résistivité électrique en fonction de la teneur en eau dans le cadre dynamique. Les résultats des matériaux calcaires (CA) montrent un intervalle de résistivité électrique mesurable plus réduit que celle des briques (BA). En effet, les matériaux calcaires caractérisés par une grande porosité, majoritairement composés de macro-pores montrent une perte de l'homogénéité de la répartition de l'eau pour les faibles teneurs en eau. Au contraire les briques anciennes BA caractérisées par une faible porosité majoritairement composées de micro-pores maintiennent une répartition de l'eau homogène pour les faibles teneurs en eau.

Finalement, les résultats du modèle correspondant à reproduction des données de l'expérience dynamique selon le modèle obtenu d'après l'expérience statique montrent des différences évidentes avec les données obtenues pendant la mesure de désaturation. Ces différences mettent en avant l'importance de la répartition de l'eau au sein des matériaux vis-à-vis de la réponse thermique et électrique mesuré. Cela permet d'affirmer que la réponse thermique et électrique des matériaux lors

d'un phénomène de désaturation ne peut pas être reproduit avec un modèle basé sur des données obtenus dans un cadre statique où la répartition de l'eau est homogène.

CHAPITRE VII

Vers un système pour des mesures dynamiques

1. Imbibition capillaire sur des assemblages multicouche

1.1. Introduction

La mise en situation des méthodologies faiblement invasives est réalisée à l'échelle du laboratoire au moyen d'essais de remontée capillaire en utilisant des assemblages combinant les différentes associations de matériaux qui peuvent être observées sur le mur du temple Gallo-Romain du site de Vaux-de-la-Celle. Des mesures gravimétriques et d'imagerie électrique et par imagerie infrarouge ont été réalisées afin de suivre et reconstituer l'évolution de la teneur en eau au sein des assemblages multicouches. Les deux types d'assemblages présentés ont été sélectionnés car ils sont significatifs des deux types de sections de mur décrits par les modèles phénoménologiques (c.f. *Chapitre V - Modèles phénoménologiques p.81*). L'assemblage CA-CA représente la partie de mur en élévation, tandis que l'assemblage CAmHOM-BAC-CA a été retenu pour sa bonne représentation de la partie basale du mur correspondant aux fondations. Les résultats des analyses des autres assemblages sont présentés en Annexe (c.f. *Annexe III : Résultats de la quantification teneur en eau par les méthodes imagerie IR et électrique sur les assemblages multicouches p.206*).

Pour effectuer cette expérience, les données de calibration obtenues d'après la mesure de la dynamique de désaturation ont été utilisées de par la faible représentativité d'une calibration statique pour caractériser les écoulements résultants. Ce choix est en outre pris pour tenir compte des possibles hétérogénéités de la teneur en eau dans les zones atteintes par le front d'imbibition. De plus, le panel complet des matériaux est représenté par les calibrations de la dynamique de désaturation y compris les mortiers modernes.

1.2. Protocole expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 98. Il est mis en place dans la chambre noire spécialement développée pour limiter les bruits environnementaux. L'assemblage multicouche est posé sur un support amovible relié à une balance par l'intermédiaire d'un crochet et permettant d'assurer la mise en contact de la partie inférieure de l'échantillon avec l'eau. Un récipient de grand volume a été choisi afin que les effets d'évaporation et de la poussée d'Archimède soient négligeables.

Pour ces essais, nous assimilons le phénomène de remontée capillaire à un écoulement monodimensionnel d'un fluide newtonien incompressible en condition isotherme. L'écoulement est dépendant du temps mais est suffisamment lent pour admettre une approximation de l'imbibition par équilibre de tranches.

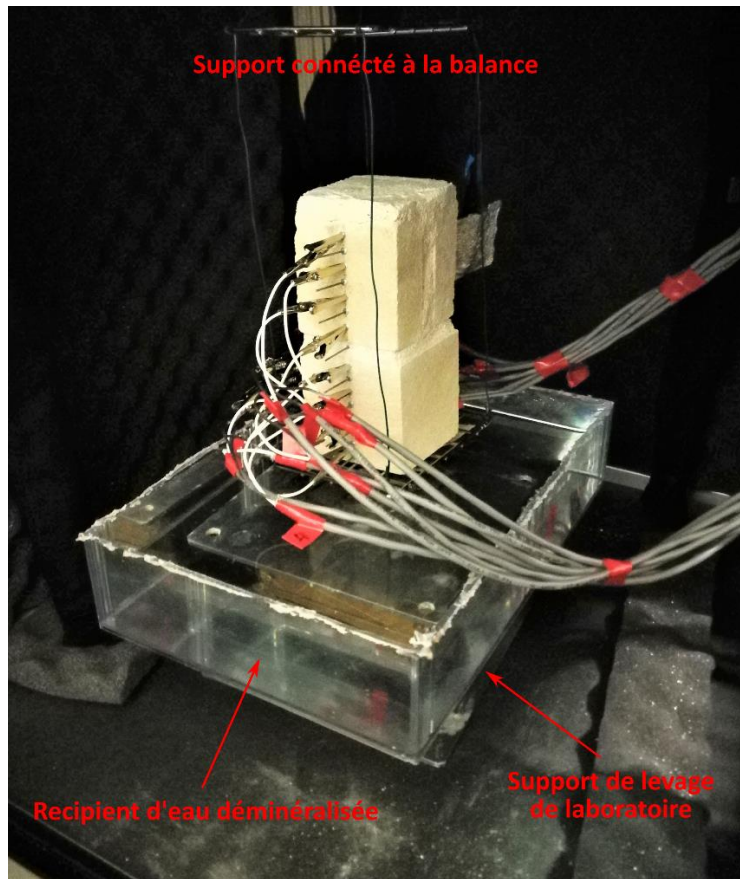


Figure 98 : Disposition de l'assemblage à l'intérieur de la chambre noire.

Une ouverture dans la partie frontale de la chambre noire permet de positionner la caméra thermique IR à une distance focale de 60 cm, et ainsi de cadrer la totalité de l'assemblage dans le thermogramme.

Les mesures d'imagerie électrique sont effectuées à partir des seize électrodes fixées de part et d'autre des côtés de chaque assemblage. Les électrodes sont alors connectées au système d'acquisition des données *ad hoc*.

Les mesures gravimétriques, les mesures électriques et les mesures de thermographie infrarouge sont pilotées par un PC de contrôle qui permet de :

- lancer les mesures,
- définir la fréquence d'acquisition des différentes données,
- stocker les données acquises au cours de l'expérience.

C'est après le lancement des mesures que le récipient rempli d'eau déminéralisée est soulevé jusqu'à immerger la base de l'assemblage sur une hauteur de 0,5 à 1 cm, assurant ainsi un contact continu avec l'eau.

En fonction du type d'assemblage utilisé dans l'expérience, une durée de trois à cinq jours est nécessaire pour que la quasi-totalité de la hauteur de l'assemblage soit imbibée.

1.3. Traitement des mesures gravimétriques

La mesure gravimétrique est prise comme référence pour toutes les expériences.

Cette mesure est également utilisée pour recalibrer les données des différentes méthodes de mesures. Comme le montre la Figure 99, le début de l'expérience correspond au moment où l'assemblage est mis en contact avec l'eau contenue dans le récipient. Les valeurs de masse sont représentées graphiquement afin de repérer le moment où la masse est minimale. Les valeurs précédant la mise en contact entre l'assemblage et l'eau sont ainsi écartées.

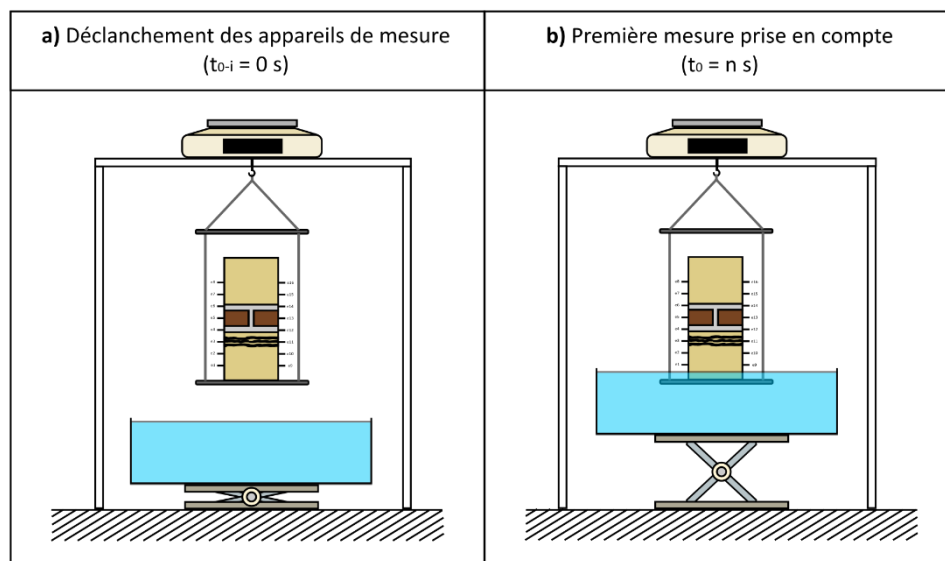
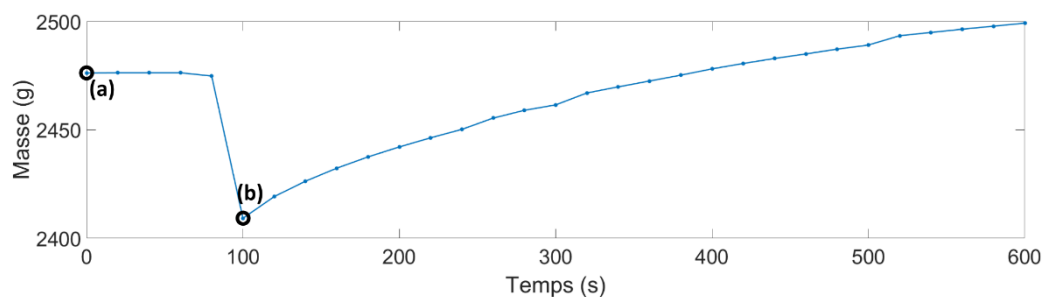


Figure 99 : a) Schéma montrant le moment de déclenchement des appareils de mesures. b) Schéma montrant le moment à partir duquel les mesures sont prises en compte.

Afin de mieux interpréter l'évolution de la prise de masse au cours de l'expérience d'imbibition, les valeurs enregistrées avec la balance sont converties en grammes d'eau absorbée par mètre carré de matériau.

2. Détermination de la teneur en eau des matériaux par la méthode d'imagerie IR

2.1. Traitement du signal IR mesuré sur les assemblages multicouches

Afin de pouvoir calculer la masse d'eau absorbée par les assemblages multicouches, ceux-ci ont été discrétisés en plusieurs niveaux de hauteur identique comme le montre la Figure 100.

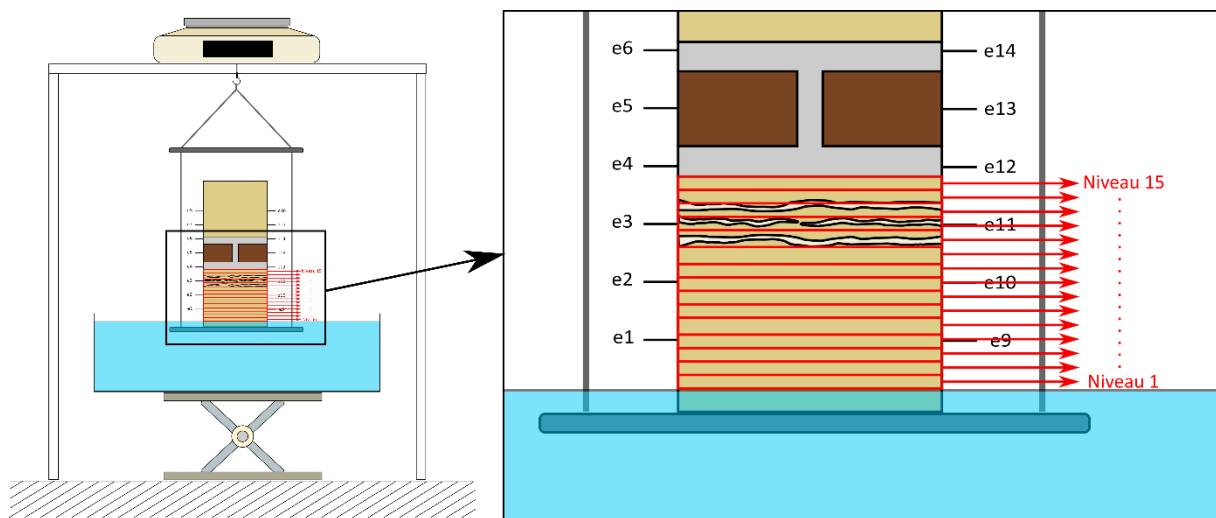


Figure 100 : Schéma montrant la discrétisation des différents matériaux composant l'assemblage en plusieurs niveaux.

La discrétisation selon la hauteur des échantillons permet d'approcher, pour chaque niveau, la masse d'eau contenue dans chaque unité de volume à partir des résultats obtenus au chapitre précédent sur les échantillons cylindriques en désaturation.

Les résultats des expériences de calibration ont permis de représenter la variation de la température attendue pour chaque matériau en fonction de la saturation. En faisant l'hypothèse que la quantité d'eau est répartie de façon homogène au cours du temps, et sachant que la saturation des matériaux de l'assemblage est considérée comme nulle au début de l'expérience, il est alors possible de déterminer la valeur de l'état de saturation en comparant les températures normalisées de l'expérience de calibration et celle mesurée sur chaque niveau du bloc calcaire à chaque instant de l'expérience.

Les niveaux de saturation mesurables ont été définis d'après les analyses des résultats de la calibration thermique effectuée dans le cadre de la dynamique de désaturation. La Figure 101, rappelle les modèles de calibration retenues pour chaque matériau étudié. Les modèles de calibration ont été normalisés pour effectuer les traitements.

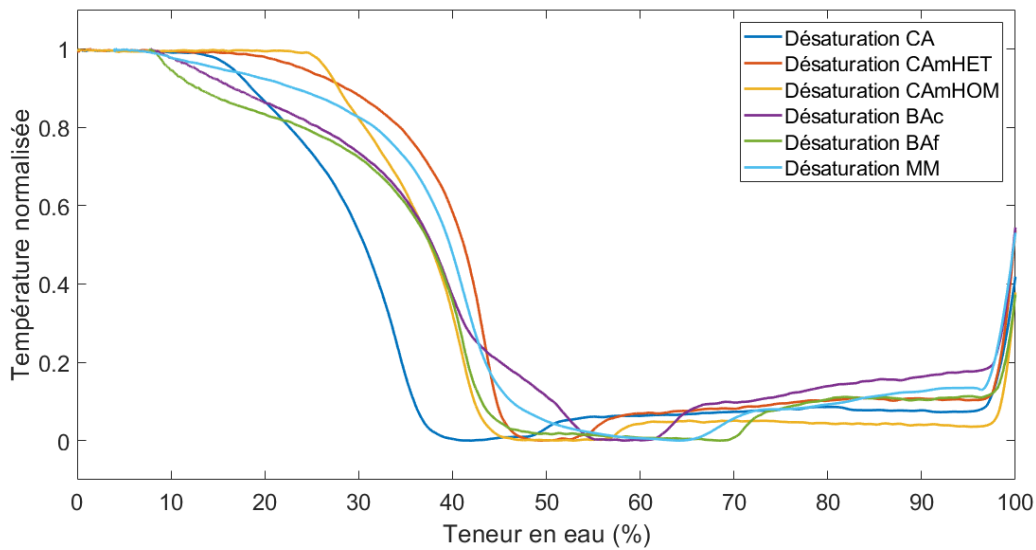


Figure 101 : Représentation des relations de calibration (température normalisée ; saturation) prises en compte pour les différents types de matériaux présents dans les différents assemblages étudiés.

Les équations (64), (65) et (66) synthétisent la méthode permettant de définir la saturation de chaque « tranche » et à chaque instant t_j sachant que t évolue de t_1 à t_N .

La première étape consiste à définir une variable correspondant au rapport R_j entre le minimum et le maximum de la différence de température minimale et maximale des différentes tranches Nb_i discrétisant un seul type de matériau (nombre de niveaux pour chaque matériau Nb : $Nb_1 \rightarrow Nb_M$).

$$R_j(i) = \frac{\min_j(\max(Tn_i) - \min(Tn_i))}{\max_j(\max(Tn_i) - \min(Tn_i))}, \text{ avec } i = 1, \dots, M \text{ et } j = 1, \dots, N \quad (64)$$

Avec : Tn_i , la température apparente mesurée pour les différents niveaux $i = 1, \dots, N$ au cours de l'expérience pendant laquelle ont été retenus $j = 1, \dots, M$ thermogrammes.

Le rapport ainsi calculé permet d'adapter la variation de la température normalisée des différents niveaux afin de conserver la proportionnalité d'amplitude des variations des températures entre les différents niveaux d'un même matériau. L'utilisation de ce *ratio* sur les valeurs de température des niveaux des assemblages permet de reconnaître les niveaux plus froids correspondant aux saturations maximales (pour chaque thermogramme pris à l'instant t_j) et corriger les possibles erreurs de température d'un même niveau saturé entre les différents thermogrammes. En effet, la valeur de la température moyenne pour un même niveau dont la saturation a été atteinte peut fluctuer légèrement d'un thermogramme au suivant. Ce ratio est exploité pour normaliser les températures entre les différents niveaux des différents thermogrammes afin que les valeurs de saturation soient calculées sur une même base de température.

Ici encore, l'hypothèse d'une variation monotone et continue de la température en fonction de la teneur en eau est formulée. Ainsi, le vecteur contenant les températures normalisées de l'expérience

de calibration, $\bar{T}cn$, peut être comparé à la température normalisée, Tnn_j , de chaque niveau i pour tous les thermogrammes j analysés au cours de l'expérience et pour chaque instant t_j , comme le montre l'équation (65) :

$$k_{min}(i, j) = arg \min_k [|\bar{T}cn - Tnn_j(i) R_j(i)|], \quad avec \quad j = 1, \dots, N \quad (65)$$

Avec : $k_{min}(i, j)$ étant l'indice du vecteur $\bar{T}cn$ pour lequel la différence de température avec la valeur $Tnn_j(i)$ est minimale.

Cela permet de définir la température de calibration, $Tcn(k_{min})$, qui se rapproche le plus de la température du niveau i de l'assemblage $Tnn_j(i)$. Etant donné que la température $Tcn(k_{min})$ peut être attribuée à une teneur en eau (d'après la relation entre température et saturation établie précédemment), il est possible de déterminer la valeur de saturation de chaque niveau défini sur l'assemblage à chaque instant t_j (équation (66)).

$$Wniv_j = Wcyl(k_{min}) \quad (66)$$

Avec : $Wniv_j$, la teneur en eau de chaque niveau de l'assemblage pour tous les thermogrammes j analysés au cours de l'expérience ; $Wcyl$, la teneur en eau attribuées aux valeurs de température de la courbe de calibration dynamique.

Les valeurs de saturation des différents niveaux en fonction du temps étant connues, la masse d'eau absorbée par l'assemblage peut alors être déduite. Dans un premier temps, le volume poral accessible par l'eau pour chaque niveau à pression atmosphérique est calculé. Le volume de vide accessible à pression ambiante V_{va} est calculé à partir de l'équation (67) :

$$V_{va} = a \cdot b \cdot h \cdot N_{48h} \quad (67)$$

Avec : a , b et h , la longueur, la largeur et la hauteur respectivement de chacun des niveaux divisant l'assemblage ; N_{48h} , la valeur de la porosité à 48h du matériau considéré à chaque niveau.

Pour ce calcul, l'hypothèse que le matériau en cours de traitement est homogène impose un volume accessible constant pour tous les niveaux de ce matériau.

Connaissant le degré de saturation et le volume de vide accessible à pression ambiante pour chaque niveau, il est alors possible de calculer la masse d'eau stockée, M_i , à chaque niveau en fonction du temps. Ainsi M_i peut être calculée par l'équation (68) :

$$M_i(t) = V_{va} \cdot W_{niv}(t) \cdot \rho_{eau} \quad (68)$$

Avec : W_{niv} , la teneur en eau des différents niveaux du bloc considérés, calculée à partir des images IR et ρ_{eau} , la masse volumique de l'eau dans les conditions de l'expérience.

Finalement, la masse d'eau totale absorbée par l'assemblage en fonction du temps, M_{tot} , est calculée à partir de la somme des valeurs de masse M_i des niveaux individuels, comme le montre l'équation (69).

$$M_{tot}(t) = \sum_{i=1}^M M_i(t) \quad (69)$$

Ainsi, la masse d'eau contenue dans chaque niveau peut donc être calculée en utilisant la valeur de saturation attribuée à chaque niveau et grâce à la connaissance du volume poral disponible représentatif de chaque matériau constitutif de l'assemblage. La masse totale au cours du temps peut être comparée à la mesure de la prise de masse mesurée au cours de l'imbibition. La Figure 102 montre le déroulement des étapes permettant de calculer la masse d'eau absorbée par l'assemblage au cours de l'expérience.

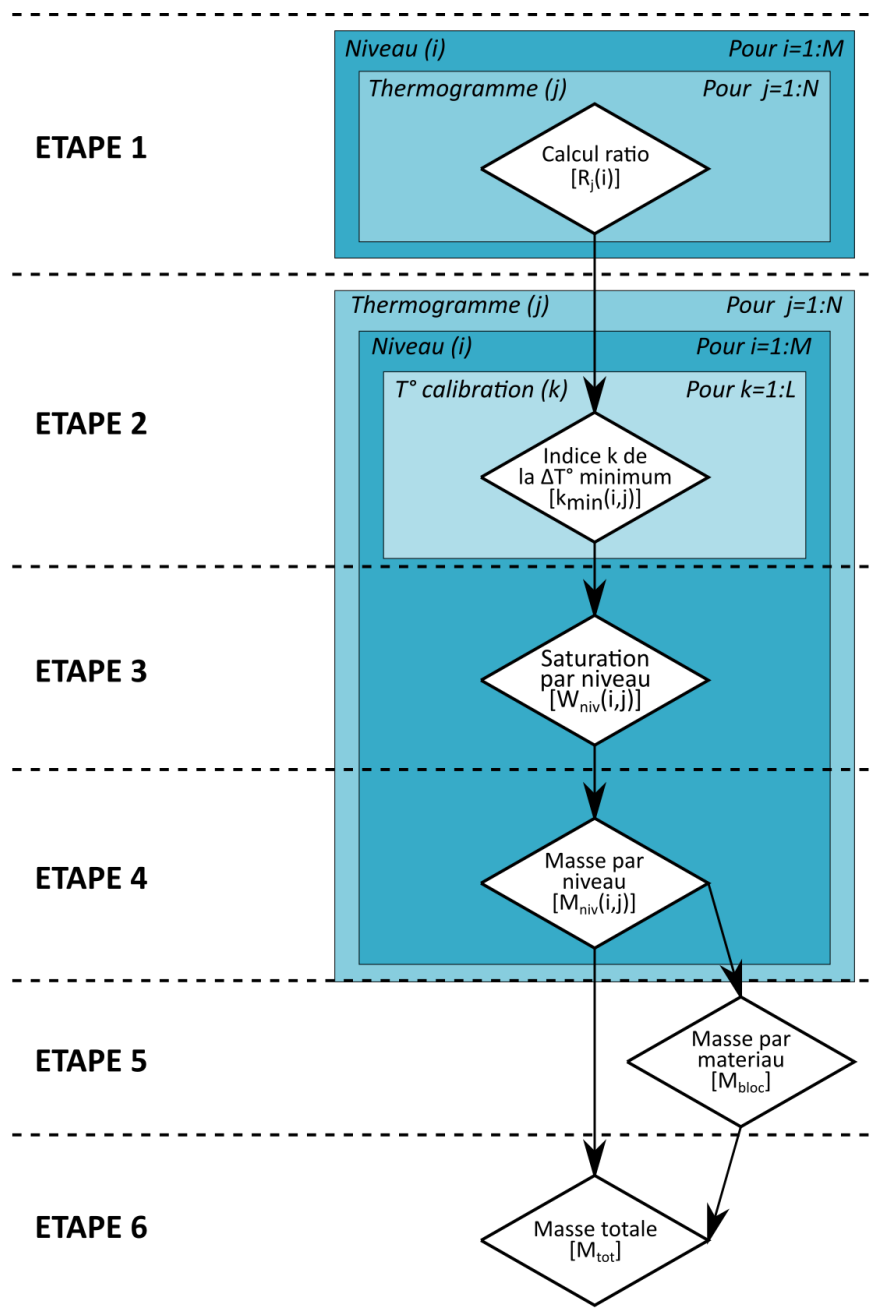


Figure 102 : Organigramme des étapes de l'algorithme permettant de calculer la masse d'eau absorbée par l'assemblage par la méthode de thermographie IR.

2.2. Présentation des résultats

Après avoir défini la méthode de traitement utilisée pour calculer la prise de masse par l'assemblage en utilisant la méthode d'imagerie IR, il est possible d'analyser les résultats des différents assemblages étudiés.

2.2.1 Assemblage CA-CA

Cet assemblage CA-CA représente assez bien une section de la partie érigée du mur. Il est composé d'un bloc de CA (calcaire de type moellon) surmonté par deux blocs de CA de plus petite taille, et assemblé par des joints en mortier (MM). Chaque élément de l'assemblage observable sur le plan de mesure xz, présenté sur la Figure 103, est discrétisé en plusieurs niveaux de 5 mm de hauteur. La hauteur totale de l'assemblage est discrétisée en soixante-douze niveaux.

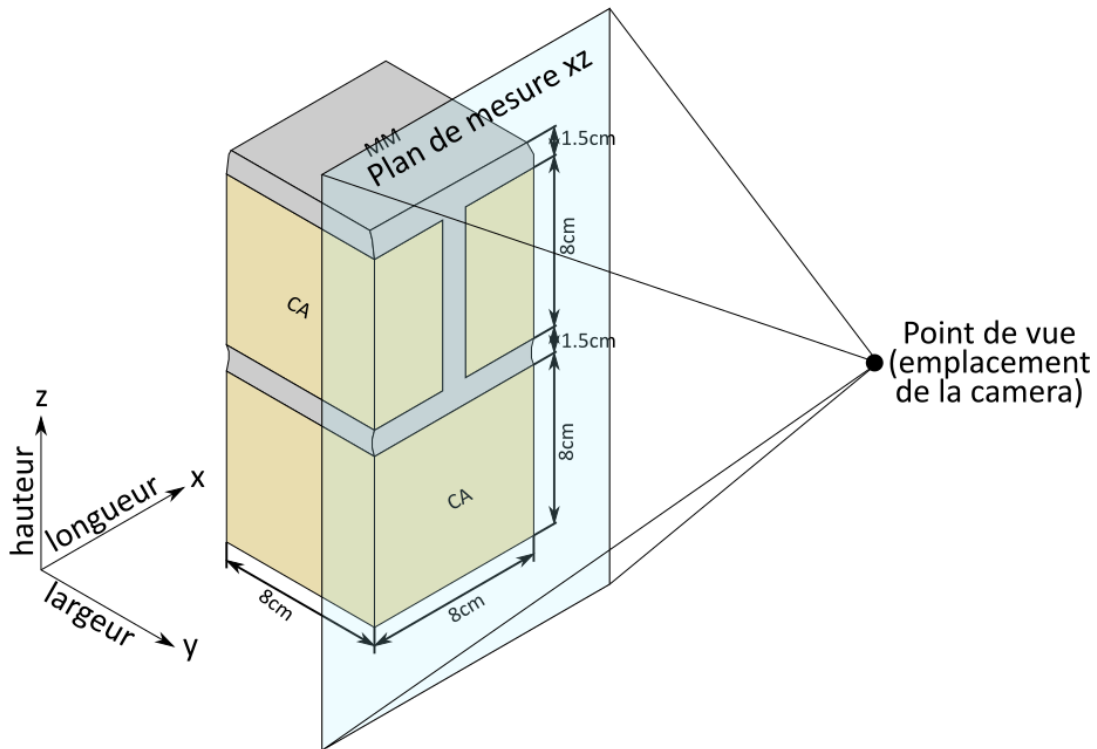


Figure 103 : Schéma 3D de la disposition de l'assemblage par rapport à la position de la caméra thermique.

Comme illustré sur la Figure 104, le bloc calcaire de la base de l'assemblage est décomposé en quinze niveaux allant du niveau 1 au niveau 15 d'une hauteur totale de 75 mm (soit 15 niveaux de 5 mm).

Chaque partie de l'assemblage s'étend sur une longueur de 80 mm. Le mortier est discrétisé en vingt-deux niveaux compris entre niveau le 16 et le niveau 38, chacun ayant une hauteur de 5 mm. La longueur des niveaux des joints de mortier horizontaux correspondant aux trois niveaux inférieurs et supérieurs est comprise entre 72,5 mm et 80 mm. La longueur des niveaux du joint de mortier vertical, compris entre le niveau 19 et le niveau 35 est de 13 mm. Finalement, chacun des deux blocs calcaires de la partie supérieure de l'assemblage est discrétisé en seize niveaux de 32 mm (chaque niveau présente une longueur de 32 mm). Les niveaux allant du niveau 39 au niveau

55 correspondent à la surface totale du bloc calcaire supérieur gauche et les niveaux 56 à 72 correspondent à la surface du bloc calcaire supérieur droit.

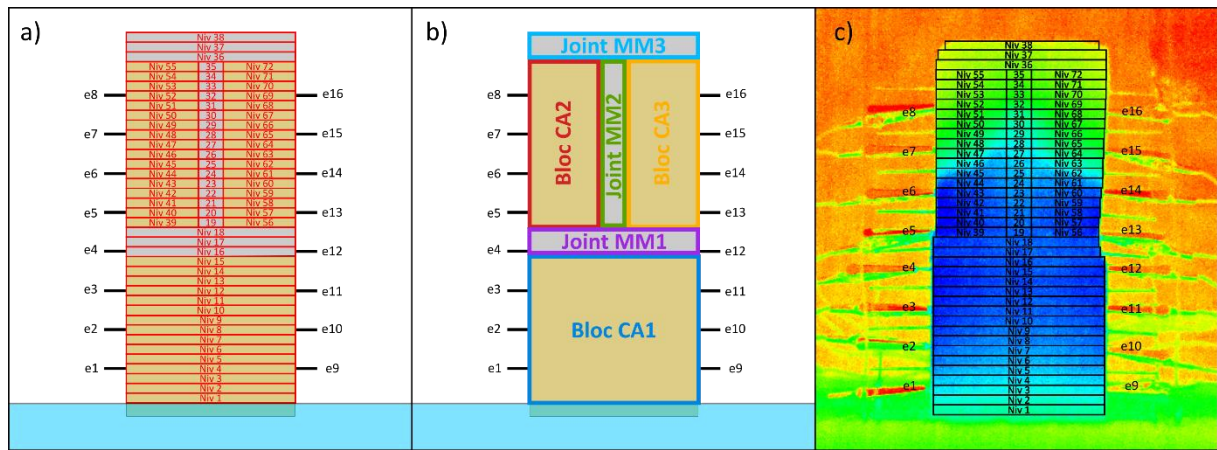


Figure 104 : a-b) Schémas montrant la discrétisation en niveaux des différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CA-CA montrant la discrétisation en niveaux.

La discrétisation en multiples niveaux de l'image thermique permet de calculer la contribution en eau absorbée de chaque volume unitaire de l'assemblage. La Figure 105 présente l'évolution de la masse d'eau absorbée par chaque partie de l'assemblage au cours de l'expérience d'imbibition.

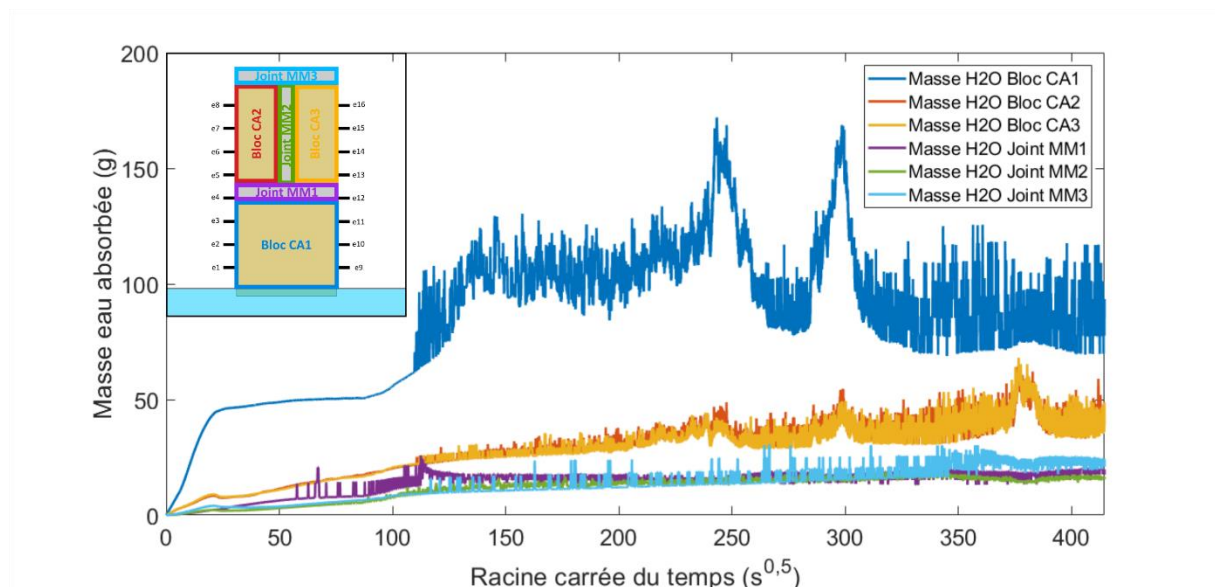
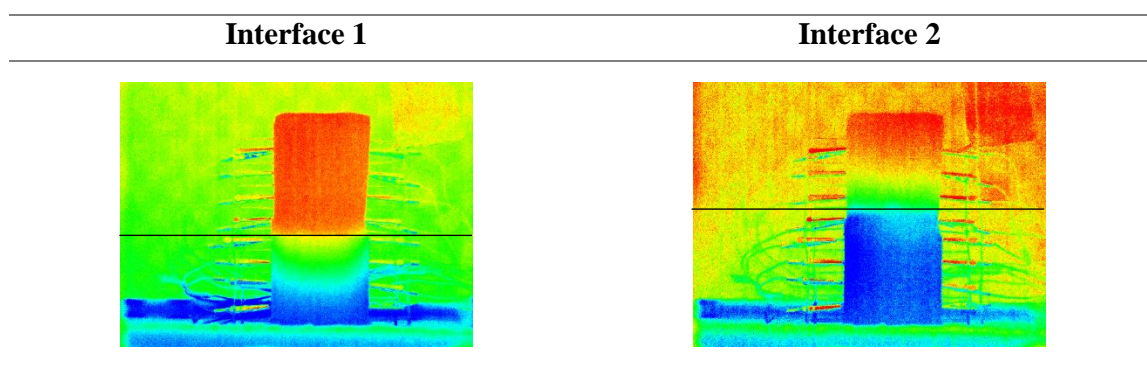


Figure 105 : Evolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CA-CA.

Les courbes concernant la prise de masse en eau des différents éléments constitutifs de l'assemblage analysé sont cohérentes avec les volumes et le modèle phénoménologique attendu pour une telle configuration. La courbe caractérisant la prise de masse du bloc CA met en évidence la capacité de stockage la plus importante. Cela est conforté par le fait que cet élément est le plus volumineux des différents matériaux constitutifs de l'assemblage et qu'il présente la porosité la plus élevée (~40%). Le matériau de type mortier dont le volume et la porosité sont plus restreints représente un stockage d'eau moins important que celui du bloc calcaire inférieur. Finalement, les blocs calcaires supérieurs montrent un apport d'eau presque identique. En effet, les courbes d'imbibition de ces deux blocs de CA sont presque superposées. Cela permet de souligner la qualité de réalisation de l'assemblage et l'homogénéité de sa structure pour matérialiser un front d'imbibition similaire des deux éléments.

L'analyse des thermogrammes suggère qu'il est possible d'identifier le moment où le front d'imbibition atteint les différentes interfaces correspondant aux surfaces de contact entre les matériaux. La progression du front d'imbibition est très rapide en début d'expérience. La première interface, délimitant la surface du bloc calcaire inférieur et du joint de mortier horizontal inférieur, est atteinte 9 minutes après le début de l'expérience. La deuxième interface entre le joint horizontal de mortier et les blocs de calcaire supérieurs est atteinte par le front d'imbibition 2 heures après le début de l'expérience. Au-delà de la deuxième interface, le front devient plus diffus ce qui témoigne d'un ralentissement de la vitesse d'absorption de l'assemblage. Les thermogrammes illustrant l'instant où le front atteint les différentes interfaces entre matériaux sont présentés dans le *Tableau 12*.

Tableau 12 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CA-CA.



L'évolution de la masse d'eau totale au cours de l'imbibition, mesurée avec la méthode gravimétrique, est comparée à celle de la masse d'eau mesurée avec la méthode d'imagerie de thermographie IR. Elle est présentée sur la *Figure 106*. Sur cette même courbe, figure le moment où le front d'imbibition atteint une interface délimitant la zone de contact entre matériaux.

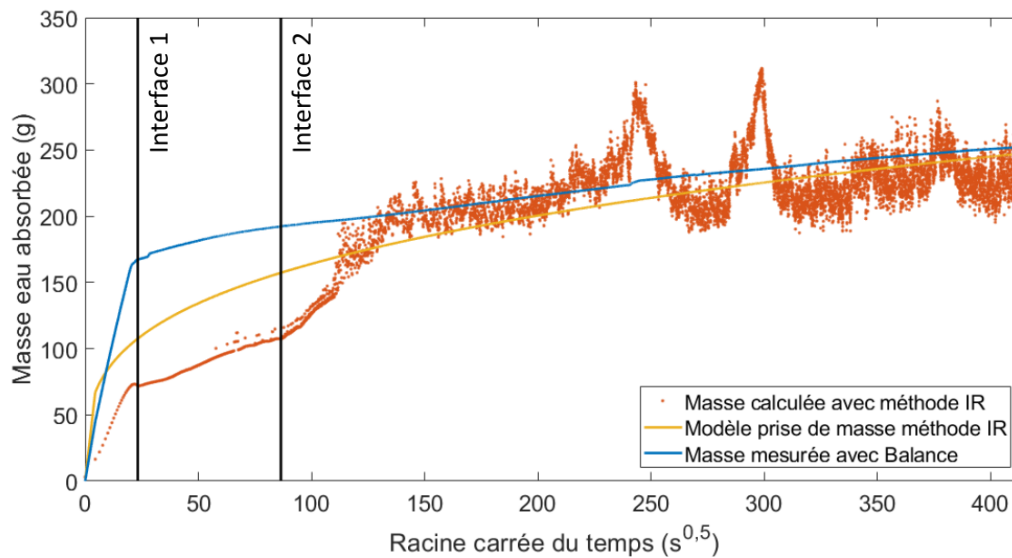


Figure 106 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CA-CA.

Ces résultats montrent une tendance générale très similaire, mais avec un offset au début de l'essai non négligeable. Pour quantifier l'offset, la méthode de la « *moyenne des erreurs absolues* » permettant de mesurer la différence entre deux jeux de données a été appliquée. Ce paramètre correspond à la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode IR et la méthode gravimétrique. Ce paramètre montre qu'en moyenne, les différences entre la masse IR et la masse réelle est de 23,15 g, soit 9% de la masse totale d'eau mesurée par méthode gravimétrique (252,4g).

Le modèle créé permet de représenter, par une équation mathématique, l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode IR (Modèle prise de masse méthode IR sur le graphique) avec un coefficient de corrélation R^2 égale à 0,57. Ce paramètre est plutôt faible et s'explique par la grande dispersion des valeurs de masse calculées à partir de la méthode de thermographie IR. Cependant, l'évolution de la tendance générale est très similaire aux résultats de référence. En effet, la valeur moyenne des erreurs absolues est de 13,22 g, ce qui correspond à une erreur absolue moyenne de 5,2% du pourcentage de la masse d'eau totale absorbée par l'assemblage. Cette faible différence entre le modèle et les valeurs de masse obtenues par la méthode gravimétrique permet d'affirmer que le modèle mathématique retenu pour modéliser les résultats de la mesure de la prise de masse pour cet assemblage est représentatif des valeurs mesurées. Comme le montre la Figure 107, l'amplitude des erreurs n'est pas constante au cours de l'expérience.

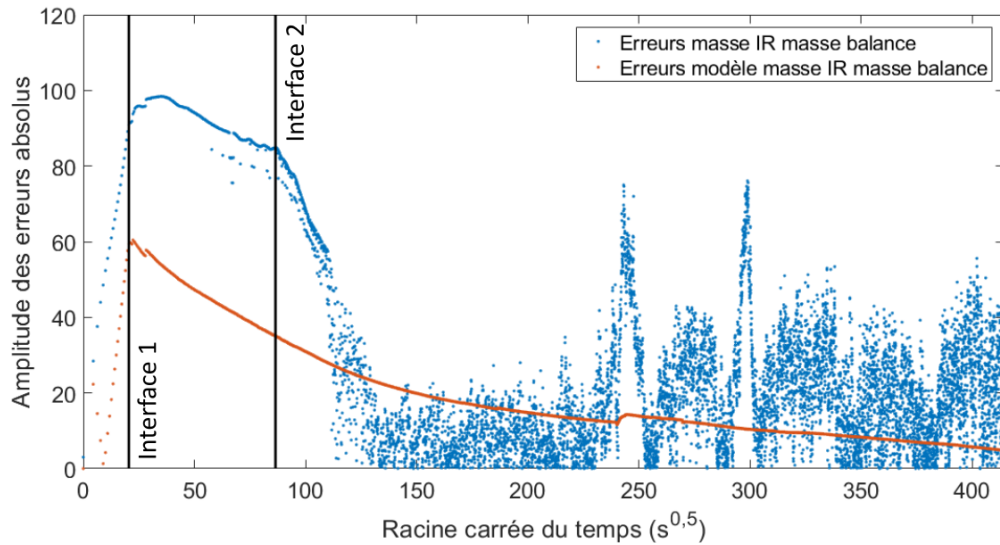


Figure 107 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR de l'assemblage CA-CA.

En effet, l'amplitude des erreurs augmente de manière rapide dès les premiers instants de l'expérience. Cette croissance rapide des erreurs atteint son maximum au moment où le front d'imbibition atteint la première interface calcaire/mortier. Après ce maximum caractérisé par l'arrivée du front à la première interface, il est possible d'observer une variation du comportement de l'amplitude des erreurs. En effet, pendant l'intervalle temporel correspondant à l'avancement du front entre la première et la deuxième interface, il est possible d'observer une décroissance relative de l'amplitude des erreurs. Après la deuxième interface, il se produit une décroissance drastique des erreurs jusqu'à une stabilisation relative qui se produit cinq heures environ après le début de l'expérience. Dans la suite de l'expérience, il est possible d'observer une évolution assez constante montrant une forte dispersion de l'amplitude des erreurs. Pour ce qui concerne l'évolution des erreurs absolues moyennes entre le modèle et les mesures gravimétriques, les résultats montrent une même tendance générale mais une amplitude beaucoup moins importante que pour les valeurs de masse calculées.

Les différences entre la masse d'eau absorbé et la masse d'eau calculée à partir de la méthode de thermographie IR sont particulièrement importantes entre la première et la deuxième interface, ce qui correspond à la traversé du front d'imbibition au sein du joint de mortier horizontal inférieur. Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de cette différence entre la masse d'eau mesuré et celle calculée.

Une des hypothèses les plus probables est que l'évolution du front d'imbibition ne soit pas homogène pendant la traversée de la première interface (interface CA/MM). Si la vitesse du front d'imbibition est plus importante au centre de l'échantillon il est possible que la mesure surfacique de la température, à partir de laquelle est calculée l'évolution de la masse d'eau absorbé, ne permet pas de tenir compte de la distribution de l'eau dans le volume de l'échantillon. Dans ce cas, le calcul de la masse d'eau par la méthode surfacique de thermographie IR pourrait sous-estimer la masse d'eau réelle contenu dans le volume de l'échantillon.

2.2.2 Assemblage CAmHOM-BAC-CA

Cet assemblage est composé d'un bloc CAmHOM (calcaire moyen appareil homogène) surmonté de deux blocs de BAc (brique ancienne claire) au-dessus desquels se trouve un bloc de CA (calcaire moellon), avec un liant de type mortier (MM) qui maintient l'ensemble.

Le bloc calcaire inférieur CAmHOM est décomposé en quinze niveaux de 5mm de hauteur chacun. Le mortier MM est décomposé en onze niveaux : le joint inférieur est composé de trois niveaux (deux de 5 mm et un de 25 mm de hauteur) ; le joint vertical est divisé en six niveaux de 5 mm de hauteur, 10 mm de largeur et s'étend tout le long de la largeur de l'assemblage. Le joint supérieur se compose de deux niveaux de 5 mm de hauteur et s'étend tout le long de la largeur de l'assemblage. Les briques BAc sont divisées chacune en six niveaux de 5 mm de hauteur, 35 mm de largeur et 80 mm de profondeur. Le bloc calcaire supérieur CA est divisé en seize niveaux de 5 mm de hauteur, comme illustré sur la *Figure 108*.

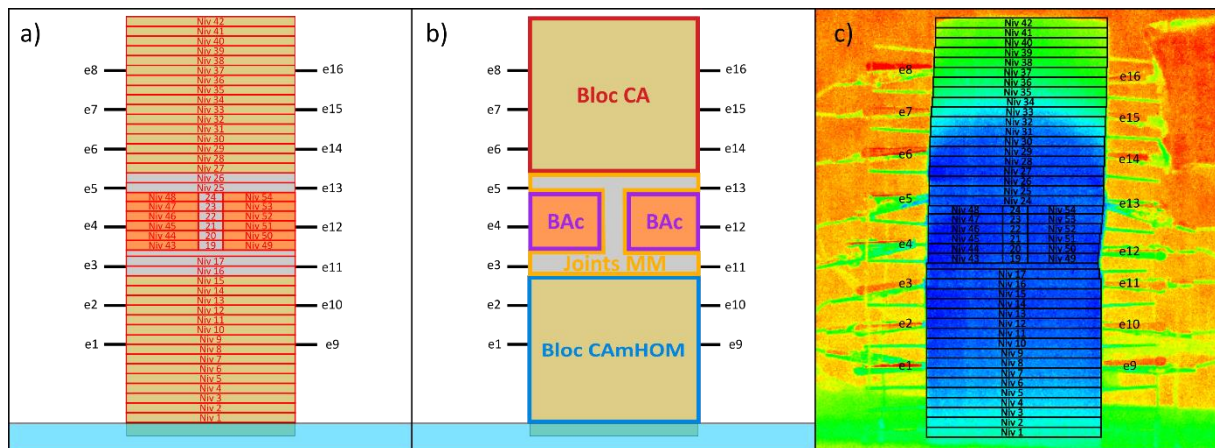


Figure 108 : a-b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CAmHOM-BAC-CA montrant la discrétisation en niveaux.

La prise de masse correspondant à l'absorption d'eau des différents matériaux composant cet assemblage, calculée avec la méthode d'imagerie IR, est représentée sur la *Figure 109*.

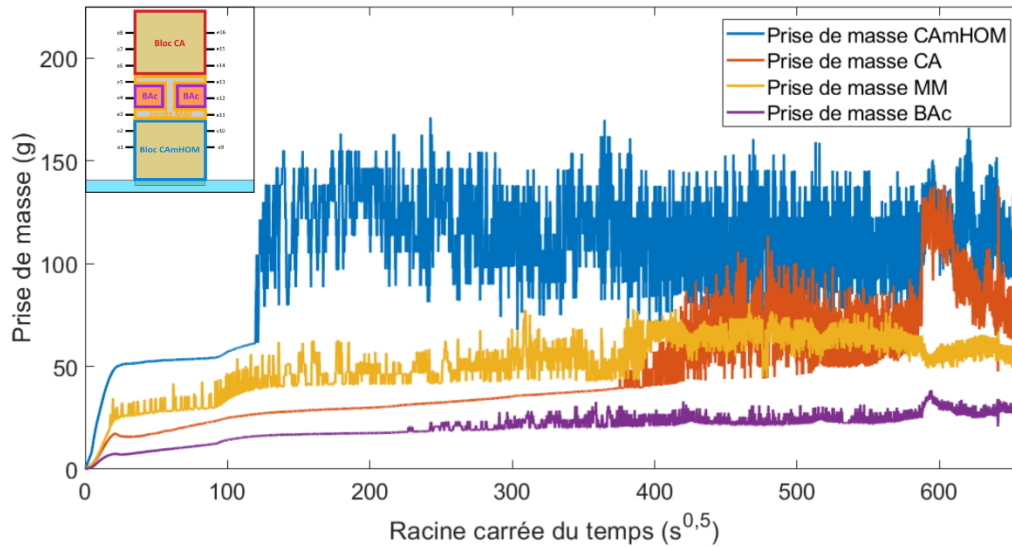


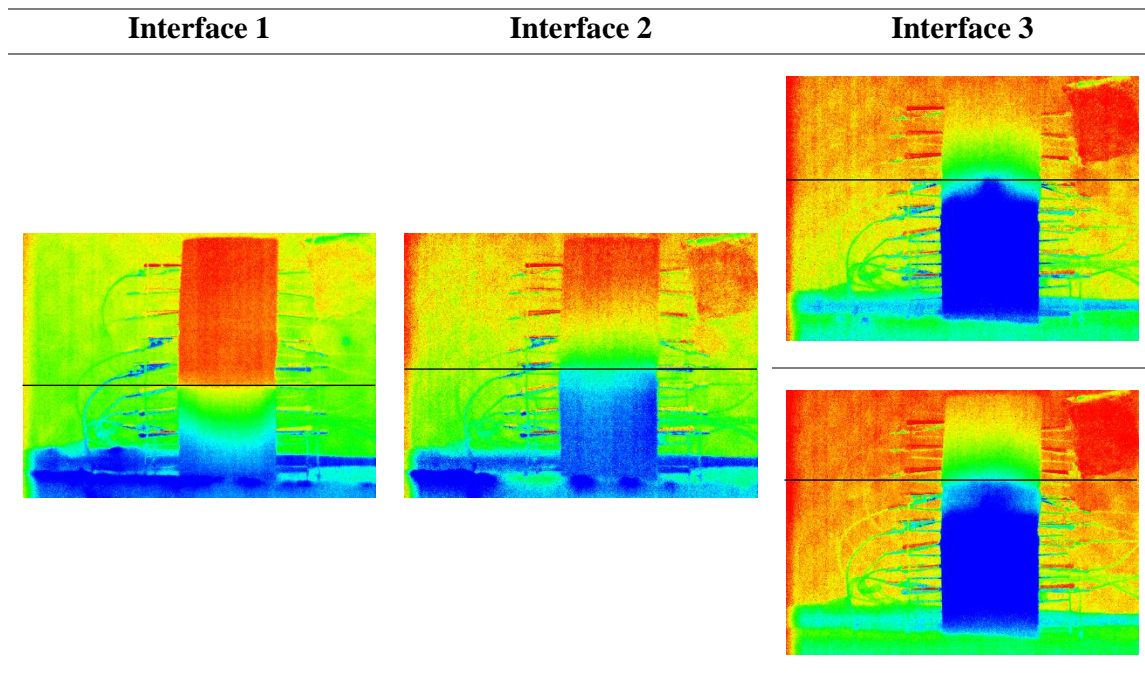
Figure 109: Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHOM-BAC-CA.

L'évolution de la prise de masse des différents éléments constitutifs de l'assemblage montre des résultats cohérents avec les volumes et la dynamique de transfert attendus pour une telle configuration. Par son grand volume, sa porosité importante et le contact direct avec la réserve d'eau, le bloc CAmHOM, à la base de l'assemblage, est l'élément qui détermine la plus grande capacité de stockage. La dynamique d'imbibition capillaire et donc de saturation progressive des autres matériaux (mortier MM, calcaire CA en position sommitale) diffère de la dynamique caractéristique mise en évidence pour l'assemblage CA-CA précédent. En effet, si le volume des matériaux et l'importance de leur porosité restent des facteurs essentiels de la dynamique, la présence de brique, moins poreuse et moins capillaire, contribue à limiter les volumes d'eau utilisables pour alimenter le calcaire CA sous-jacent. Il en découle, aux temps courts, une prise de masse en eau du calcaire CA qui est gouvernée par les propriétés de transfert du mortier MM, tendance qui s'atténue sur les temps longs, les quantités d'eau absorbées par le calcaire s'équilibrant avec les masses d'eau rendues disponibles après imbibition du mortier MM. De par sa localisation dans l'assemblage, les éléments en brique représentent des passages obligés pour le transfert de l'eau. La brique constitue donc une entrave à l'imbibition de l'eau, due non seulement à sa faible capacité de stockage mais aussi au frein qu'elle représente vis-à-vis du débit de l'eau.

Comme pour le cas précédent, l'analyse des thermogrammes permet d'identifier les moments où le front d'imbibition atteint les différentes interfaces correspondant aux surfaces de contact entre les différents matériaux. La progression du front d'imbibition est très rapide en début d'expérience. À l'image du cas présenté précédemment, la première interface délimitant le bloc calcaire inférieur et le joint de mortier horizontal inférieur, est atteinte en seulement 9 minutes. La deuxième interface entre le joint horizontal de mortier et les blocs de briques est atteinte par le front d'imbibition après 2 h 15 min d'expérience. L'arrivée du front à la troisième interface s'effectue sur un laps de temps plus étendu. Dus aux caractéristiques de la dynamique de transfert définies par la composition et la distribution des différents matériaux constituant l'assemblage, la troisième interface définissant le

contact entre le joint mortier supérieur et le calcaire (CA) s'effectue entre 4 h 5 min et 12 h 15 min. Au-delà de la troisième interface le front devient plus diffus ce qui correspond avec le ralentissement de la vitesse d'absorption de l'assemblage, qui intègre en outre, l'effet croissant de l'évaporation. L'analyse des thermogrammes montre, en outre, que le transfert de masse s'opère correctement selon la verticale ascendante de l'assemblage.

Tableau 13 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHOM-BAc-CA.



La comparaison des résultats de la prise de masse totale obtenue avec la méthode gravimétrique et la thermographie IR est présentée sur la Figure 110.

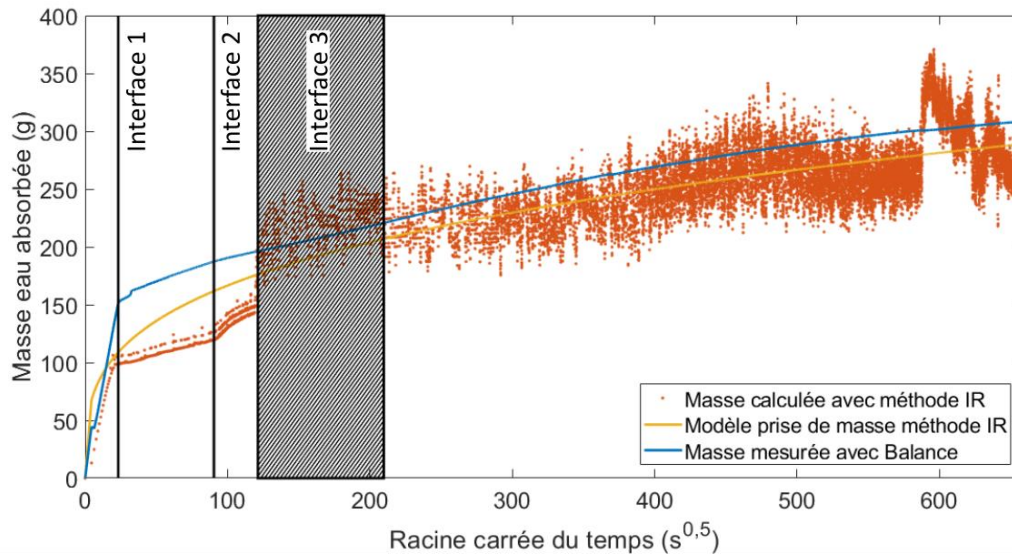


Figure 110 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAMHOM-BAC-CA.

Les résultats présentés sur l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode de thermographie IR, montrent une morphologie très similaire. Cependant, les valeurs de masse mesurée par la méthode de thermographie IR révèlent une grande dispersion qui devient plus importante après la troisième interface. Les deux courbes sont comparées à partir de la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode IR et la méthode gravimétrique. Ce paramètre montre qu'en moyenne, les différences entre la masse IR et la masse réelle est de 27,1 g, soit un écart moyen correspondant au 8,8% de la masse d'eau totale absorbée (308,3 g).

L'application du modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode IR (modèle prise de masse méthode IR sur le graphique) met en évidence un coefficient de corrélation R^2 égale à 0,64. Ce paramètre reste plutôt faible et s'explique par la grande dispersion des valeurs de masse calculées à partir de la méthode de thermographie IR. Cependant, la moyenne des erreurs absolues entre le modèle mathématique et l'évolution réelle de la prise de masse d'eau est de 19,57 g, soit 6,3% de la masse d'eau totale absorbée. Il est ainsi possible d'affirmer que le modèle mathématique retenu pour modéliser les résultats de la mesure de la prise de masse pour cet assemblage est représentatif des valeurs mesurées.

Sur la Figure 111 est présentée l'évolution des erreurs entre les données calculées et du modèle mathématique par rapport aux données réelles mesurées avec la balance.

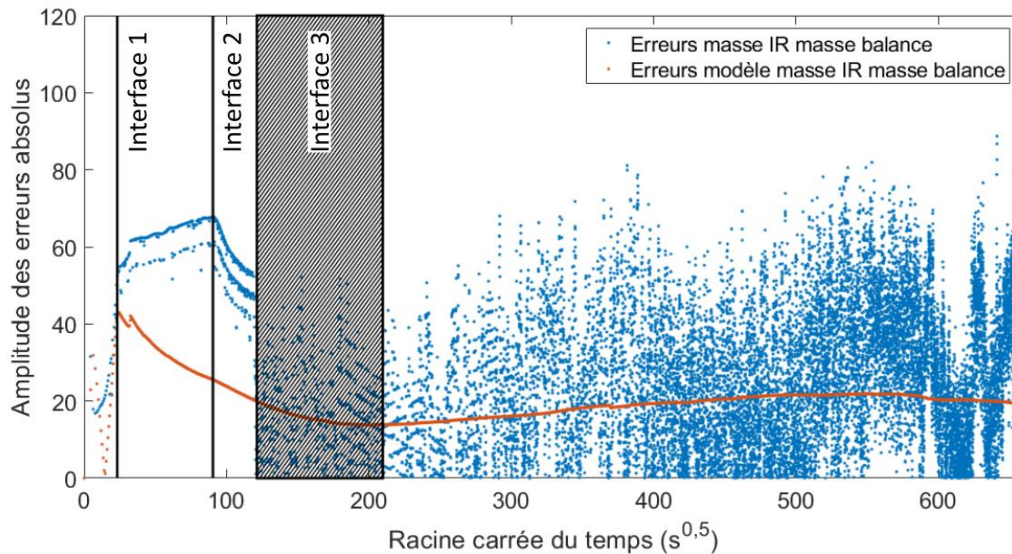


Figure 111 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAmHOM-BAc-CA.

Ces résultats montrent que l'amplitude des erreurs n'est pas constante au cours de l'expérience. Comme pour le cas précédent, l'amplitude des erreurs augmente rapidement dans les premiers instants de l'expérience. Cette croissance rapide des erreurs se poursuit jusqu'au moment de l'arrivée du front d'imbibition à la première interface CAmHOM / MM. Entre la première et la deuxième interface, l'amplitude des erreurs continue à augmenter mais avec une pente moins importante. Entre la deuxième et la troisième interface l'amplitude des erreurs décroît rapidement. Sur l'intervalle définissant l'interface trois, nous observons une augmentation de la dispersion des amplitudes des erreurs. Cette dispersion des erreurs se poursuit et s'accroît avec le temps jusqu'à la fin de l'expérience.

L'évolution de l'amplitude des erreurs du modèle mathématique montre une croissance rapide entre le début de l'expérience et l'arrivée du front à la première interface CAmHOM / MM. Cependant, à différence des données correspondant aux erreurs entre la masse d'eau calculée et mesurée, l'évolution des erreurs du modèle mathématique montre une décroissance soutenue pendant l'intervalle temporel compris entre l'interface 1 et 3.

Comme dans le cas précédent, les différences entre la masse d'eau absorbé et la masse d'eau calculée sont particulièrement importantes pendant la remontée du front d'imbibition au sein du joint de mortier horizontal inférieur, entre les interfaces 1 et 2.

Comme dans le cas précédent l'hypothèse retenue permettant d'expliquer les différences entre l'évolution de la masse d'eau mesurée et celle calculée à partir des données thermiques est que l'évolution du front d'imbibition ne soit pas homogène pendant la phase rapide de l'absorption. La différence entre le front d'imbibition observable depuis la surface et la morphologie réelle du front dans le volume peut induire des erreurs lors du calcul du volume d'eau contenu dans les matériaux.

2.3. Synthèse des résultats obtenus par la méthode de thermographie infrarouge

D'après les résultats présentés précédemment le système de mesure de la température surfacique par la méthode d'imagerie de thermographie infrarouge est globalement opérationnel.

Le caractère superficiel et passif de la mesure peut affecter la sensibilité et la précision de la méthode pour la caractérisation de la teneur en eau au sein des matériaux de construction. En effet, une des limites majeures de cette méthode est que malgré le caractère volumique des phénomènes de transfert ascensionnel, les informations pouvant être obtenus par cette méthode correspondent en grande partie à l'état superficiel de la structure analysé.

Comme il est signalé précédemment lors que le gradient du front d'imbibition n'évolue pas de manière uniforme au sein de la structure il peut se produire des erreurs d'estimation sur la teneur en eau réelle et sa distribution. Cette limite est inhérente à la méthode et c'est aussi la raison principale pour laquelle une méthode d'imagerie complémentaire est fortement recommandé.

Pour limiter d'avantage les erreurs entre les données de teneur en eau calculées et la teneur en eau réelle des matériaux une option possible est la mise en place d'une nouvelle expérience de calibration qui puisse permettre de mieux tenir compte de la rapidité du phénomène de transfert pendant la phase initiale de l'expérience d'imbibition.

Néanmoins, le protocole de mesure de la teneur en eau à partir de la méthode d'imagerie de thermographie IR présentée dans le cadre de ce projet de recherche montre des capacités globalement acceptables. Le Tableau 14 montre une synthèse des résultats présentés précédemment.

Tableau 14 : Synthèse des résultats sur la validité du modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesurée avec la méthode IR et l'erreur moyenne absolue permettant de comparer la teneur en eau mesurée avec la méthode IR et la teneur en eau réelle.

Assemblage	Erreur moyenne de la masse IR	Rapport entre l'erreur moyenne de la masse IR et la masse réelle maximale	Erreur moyenne du modèle de la masse IR	Rapport entre l'erreur moyenne du modèle de la masse IR et la masse réelle maximale	Coefficient R ² du modèle
CA-CA	23,15 g	9%	13,22 g	5%	0,57
CAMHOM-BAC-CA	27,10 g	9%	19,57 g	6%	0,64

Les résultats présentés précédemment montrent que les valeurs de prise de masse calculées à partir de la méthode de thermographie IR présentent peu d'erreur par rapport aux valeurs de prise de masse réelles mesurés par la méthode gravimétrique. En effet, les rapports entre l'erreur moyenne

de la masse calculée en utilisant la thermographie IR et la masse réelle maximale sont inférieurs à 10% pour tous les assemblages.

Les modèles mathématiques permettant de décrire l'évolution de prise de masse obtenus par la méthode de thermographie IR présentent une assez bonne concordance avec la prise de masse réelle. En effet, malgré le fait que les coefficients de corrélation entre le modèle et les données de masse IR soient faibles, les valeurs du modèle des masses calculées (modèle masse IR) présentent les plus faibles écarts avec les valeurs réelles de prise de masse, variant entre 2% et 6% selon l'assemblage. C'est pour cette raison que les valeurs de prise de masse utilisées pour comparer la validité de la mesure de prise de masse par la méthode d'imagerie de thermographie IR est effectué avec les données du modèle.

3. Détermination de la teneur en eau des matériaux par la méthode d'imagerie électrique

3.1. Traitement du signal électrique mesuré sur les assemblages multicouches

Les mesures de résistivité électrique ont été menées à l'aide d'un système d'acquisition avec switch programmable (*Chapitre IV - 1.5.1. Système d'acquisition électrique multi-électrode, p53*).

Les signaux, injecté et reçu, sur les différents couples d'électrodes pour chaque section sont enregistrés dans un même fichier. La programmation du switch permet d'obtenir un signal ordonné de façon à faciliter la lecture et le traitement.

Comme montré sur la Figure 112, le signal se présente sous la forme d'une succession d'impulsions d'une seconde d'intervalle pendant laquelle le signal carré de 12V d'amplitude et de 137 Hz de fréquence est injecté.

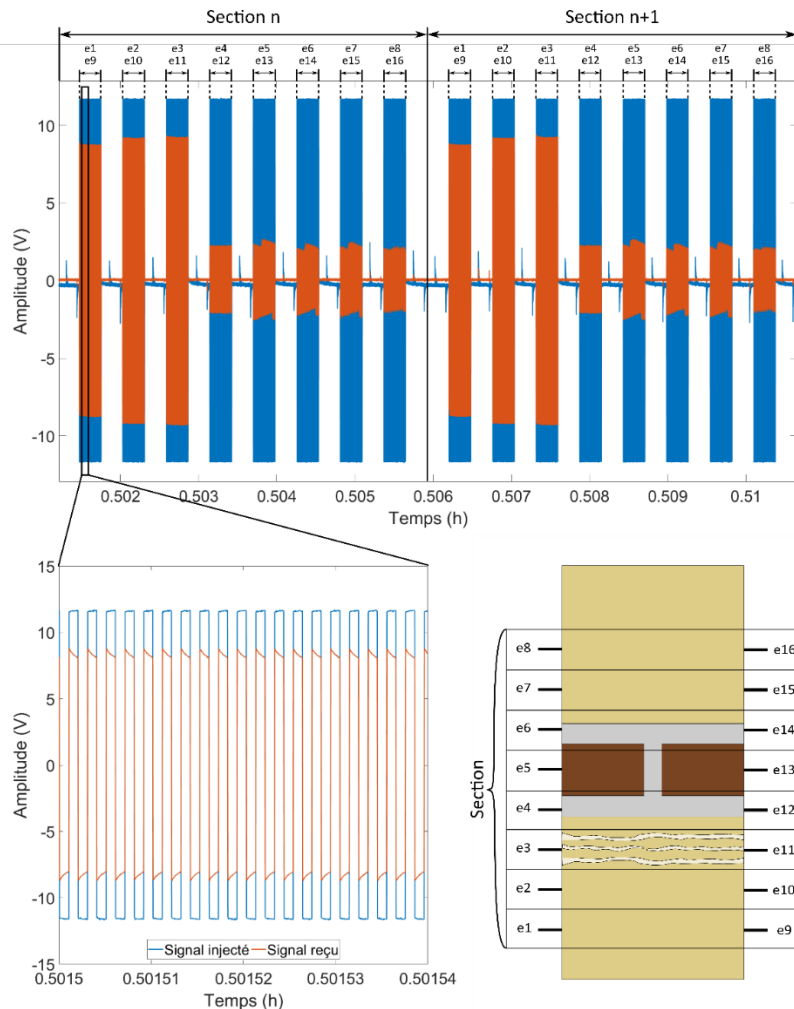


Figure 112 : Exemple de la forme du signal électrique injecté et reçu avec schéma montrant les paires d'électrodes utilisées.

Il est nécessaire de pouvoir identifier la partie du signal injecté et du signal reçu correspondant à chaque couple d'électrodes pour les différentes sections mesurées pendant toute l'expérience. A cette fin, une procédure automatique du traitement des données a été mise en œuvre et peut être résumée comme suit.

Pour pouvoir identifier la partie du signal correspondant à chaque couple d'électrodes, le signal injecté est comparé à un signal synthétique créée spécialement pour le traitement de ces données. Les parties du signal correspondant à chaque couple d'électrodes correspondent au maximum de vraisemblance entre le signal synthétique et le signal injecté. L'étude de la vraisemblance entre les deux signaux est réalisée par l'analyse d'une fonction d'intercorrélation. Pour cette opération, le signal synthétique est composé comme suit : La première seconde du signal synthétique correspond au signal carré de 12V d'amplitude et une fréquence de 137 Hz, tandis que le reste du signal est une suite de zéros, Figure 113.

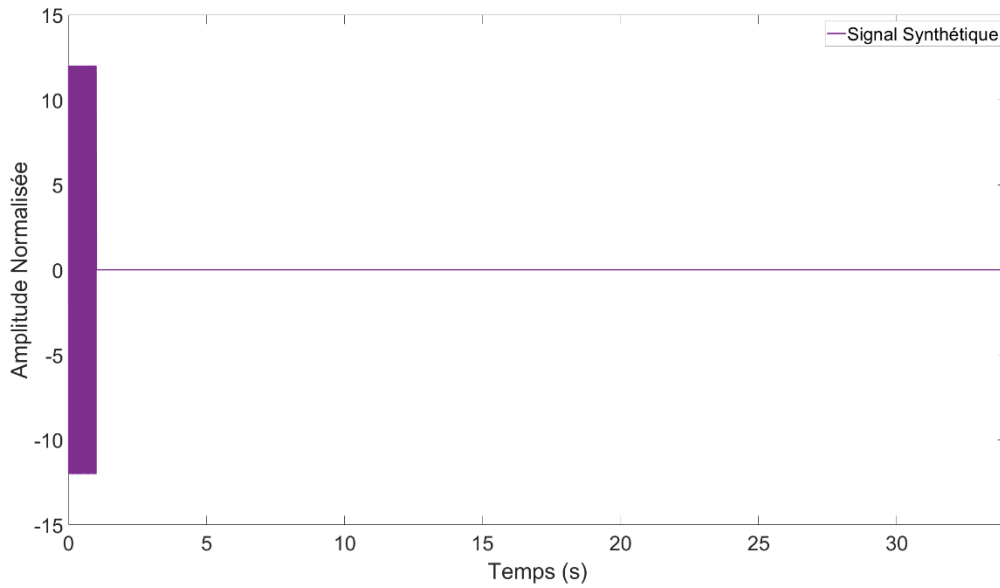


Figure 113 : Signal synthétique utilisé pour effectuer le calcul de la fonction d'inter-corrélation avec le signal injecté.

L'équation (70) utilisée pour rechercher le degré de corrélation entre les deux fonctions est :

$$(f * g)(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{f(t)}g(t + \tau)dt \quad (70)$$

Avec : $f(t)$, la fonction correspondant au signal injecté, $g(t)$, la fonction décrivant le signal synthétique et τ , un décalage de temps représenté par n fois l'inverse de la fréquence d'échantillonnage et n , un entier positif.

Ce calcul permet d'identifier les valeurs de τ pour lesquels la corrélation est maximum afin de pouvoir mesurer de façon optimum la différence de potentiel entre le signal injecté et le signal reçu.

Comme le montre la Figure 114 le résultat de la corrélation est une fonction caractérisée par une suite d'impulsions d'amplitude grandissante jusqu'à atteindre un maximum local au début de l'intervalle d'ouverture du passage du signal.

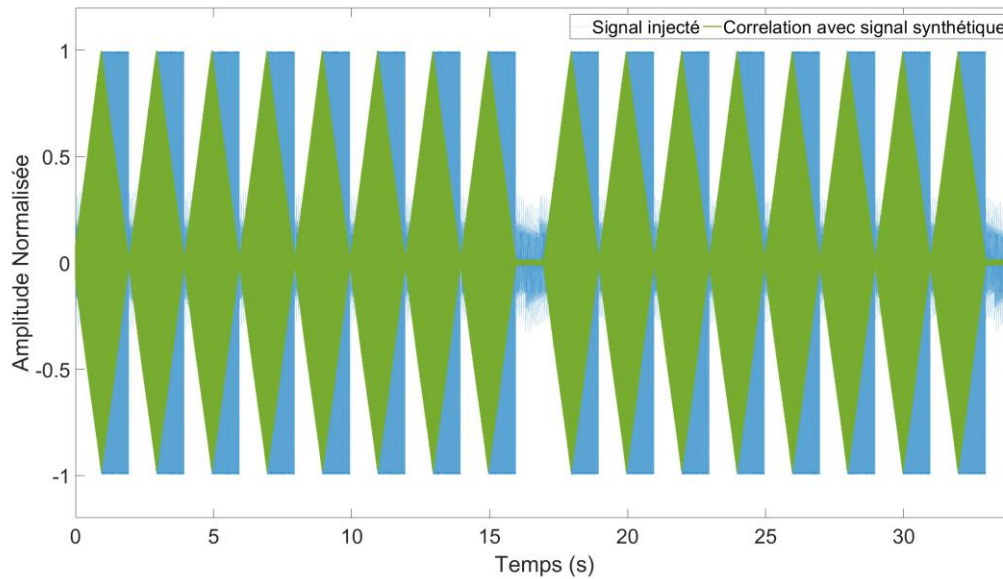


Figure 114 : Niveaux de corrélation entre le signal synthétique et le signal injecté.

Pour pouvoir identifier les maxima locaux correspondant avec le début des intervalles utilisé pour calculer la différence de potentiel, une fonction enveloppe est construite. La fonction enveloppe présentée par l'équation (71) est calculée à partir de la Transformée de Hilbert des résultats de la fonction de corrélation :

$$H\{u\}(t) = \frac{1}{\pi} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{u(t + \tau) - u(t - \tau)}{\tau} d\tau \quad (71)$$

Avec : $u(t)$ la fonction résultante du calcul de la corrélation entre le signal injecté et le signal synthétique.

La Figure 115 montre un exemple du résultat de la fonction enveloppe permettant d'identifier les points de corrélation maximums qui sont par la suite utilisés pour définir les intervalles du signal utilisés par le calcul de la différence de potentiel.

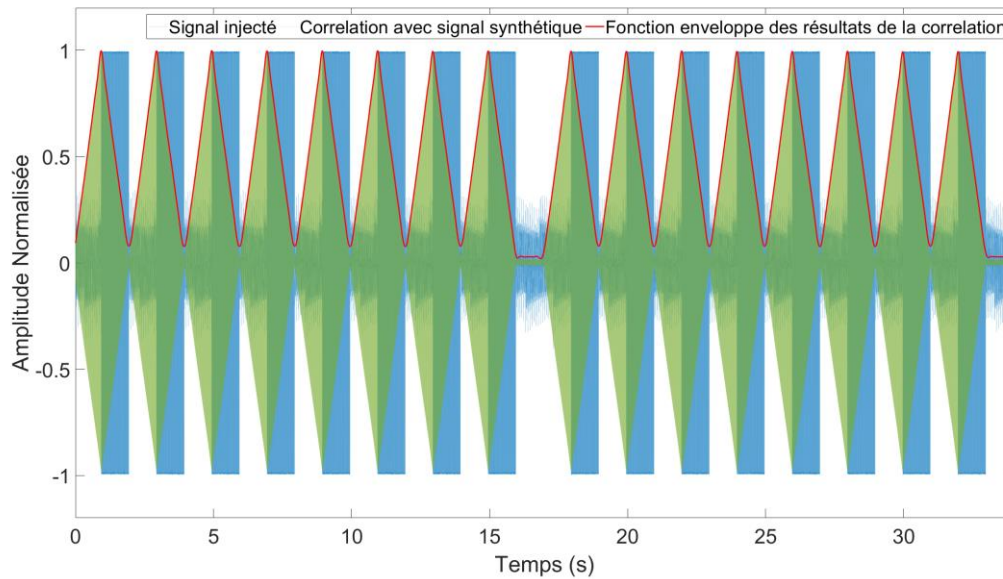


Figure 115 : Résultat de la fonction enveloppe permettant de positionner les pics correspondant avec la corrélation maximale et donc avec le début de l'intervalle utilisé pour le calcul de la différence de potentiel.

Après définition des différents intervalles du signal, la méthode de calcul présentée au *Chapitre IV – 2.2.1. Traitement électrique p.112* est à nouveau utilisée. Elle permet de déterminer les valeurs de différence de potentiel moyenne pour chaque intervalle à partir de l'amplitude du pic de la transformée de Fourier pour la fréquence de 137Hz.

L'évolution de la différence de potentiel électrique entre les différentes paires d'électrodes peut être utilisée pour calculer la masse d'eau contenue dans les matériaux.

L'assemblage est divisé en huit niveaux correspondant aux 8 couples d'électrodes. La valeur de la résistivité moyenne pour chaque niveau est calculée avec le code de calcul EIDORS. La comparaison de ces valeurs de résistivité avec celles liées à la teneur en eau issue de la courbe de calibration (mesurées lors de l'expérience de calibration dynamique avec les échantillons cylindriques), permet d'évaluer la saturation relative de chaque niveau. Comme pour la méthode IR, la prise de masse par niveau au cours de l'expérience, est alors calculée. La valeur totale de la prise de masse en fonction du temps par la méthode électrique est obtenue en additionnant la contribution de chaque niveau.

3.2. Présentation des résultats

3.2.1 Assemblage CA-CA

Le premier assemblage traité est le CA-CA, composé d'un bloc de CA (calcaire de type moellon) surmonté par deux blocs de CA de plus petite taille. L'ensemble est maintenu par des joints en mortier (MM). La Figure 116 montre comment l'assemblage a été discrétisé en huit niveaux correspondant avec les huit couples d'électrodes utilisés pour effectuer les mesures avec la méthode électrique.

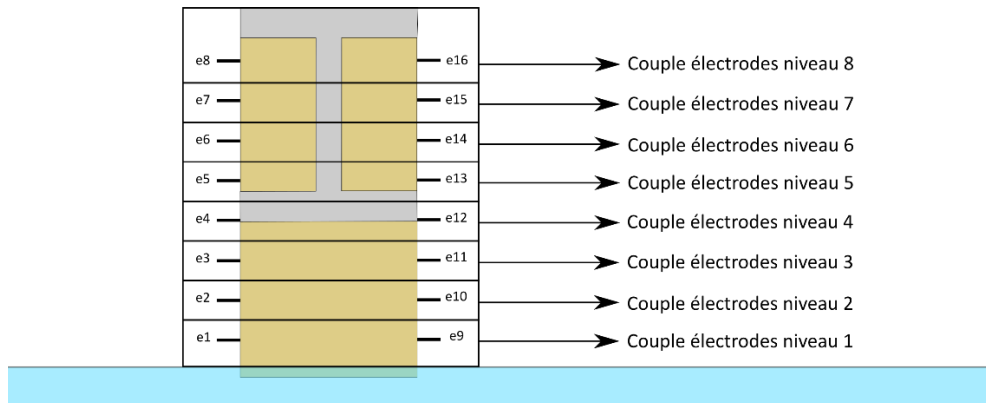


Figure 116 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CA-CA.

Les dimensions des volumes définissant les niveaux sur lesquels sont mesurés les variations de la résistivité électrique sont présentées au sein du Tableau 15.

Tableau 15 : Dénombrement et dimensions des différents niveaux discrétisés représentant la totalité de l'assemblage CA-CA.

Niveaux	Matériau	Dimensions		
		x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	CA	8	8	2,5
2	CA	8	8	2
3	CA	8	8	2
4	CA et MM	8	8	2
5	CA et MM	8	8	2
6	CA et MM	8	8	2
7	CA et MM	8	8	2
8	CA et MM	8	8	3

Les résultats de la prise de masse des différents niveaux de cet assemblage sont présentés sur la Figure 117.

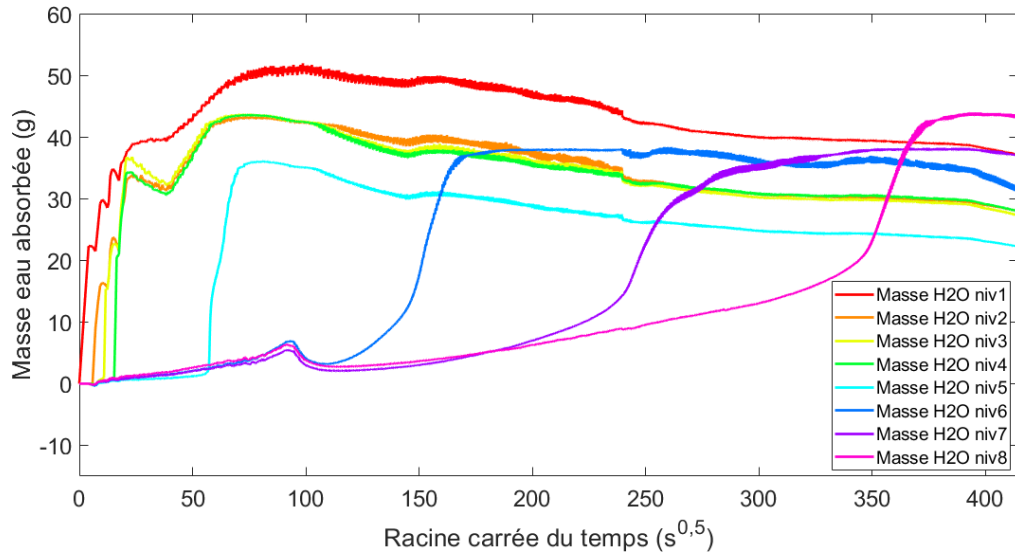


Figure 117 : Evolution de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CA-CA.

Les courbes représentatives de la prise de masse des différents niveaux montrent une évolution cohérente par rapport à leur position. Les niveaux inférieurs présentent une rupture de pente et atteignent leur maximum en début d'expérience, tandis que pour les niveaux supérieurs, le changement de pente se produit progressivement et plus tardivement jusqu'au dernier niveau. Ces ruptures de pente successives des courbes de prise de masse des différents niveaux est une signature de l'arrivée du front d'imbibition.

La somme des apports de masse des différents niveaux fournit l'évolution de la masse d'eau de la totalité de l'assemblage au cours du temps. La Figure 118 montre l'évolution de la prise de masse d'eau absorbée et mesurée à partir de la méthode d'imagerie électrique et du modèle mathématique (fonction de type puissance) qui s'ajuste au mieux à ces données, comparée à l'évolution de la prise de masse réelle mesurée par la méthode gravimétrique.

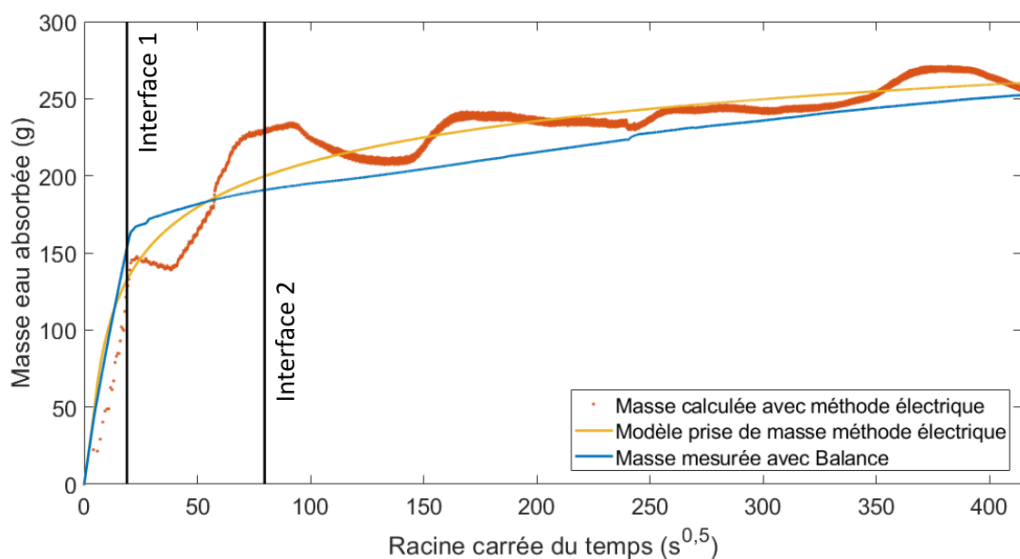


Figure 118 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de regression de l'assemblage CA-CA.

Les résultats présentés sur la Figure 118 correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique montre une tendance générale très similaire avec un faible offset se traduisant par une faible surestimation de la masse d'eau mesurée. Comme pour les résultats de prise de masse obtenus par la méthode IR, la quantification de l'offset est effectuée par la méthode de la « *moyenne des erreurs absolues* ». Dans ce cas, la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode électrique et la méthode gravimétrique est de 22,9 g ce qui correspond à une variation du 9% de la capacité de stockage maximale mesurée avec la méthode gravimétrique.

Le modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse calculée à partir des résultats de la mesure par la méthode électrique (Modèle prise de masse méthode électrique sur le graphique) présente un coefficient de corrélation $R^2 = 0,79$. La valeur du coefficient indique que le modèle mathématique retenu pour modéliser les résultats de la mesure de la prise de masse pour cet assemblage représente bien les données obtenues à partir de la mesure. En effet, l'évolution de la tendance générale est très similaire aux résultats de référence. En effet, la valeur moyenne des erreurs absolues est de 22 g. Cela correspond à une erreur absolue moyenne de 9% du pourcentage de la masse d'eau totale absorbée par l'assemblage. Cette faible différence entre le modèle et les valeurs de masse obtenue par la méthode gravimétrique suggère que le modèle mathématique retenu pour modéliser les résultats de la mesure de la prise de masse pour cet assemblage est représentatif des valeurs mesurées.

Comme le montre la Figure 107, l'amplitude des erreurs n'est pas constante au cours de l'expérience.

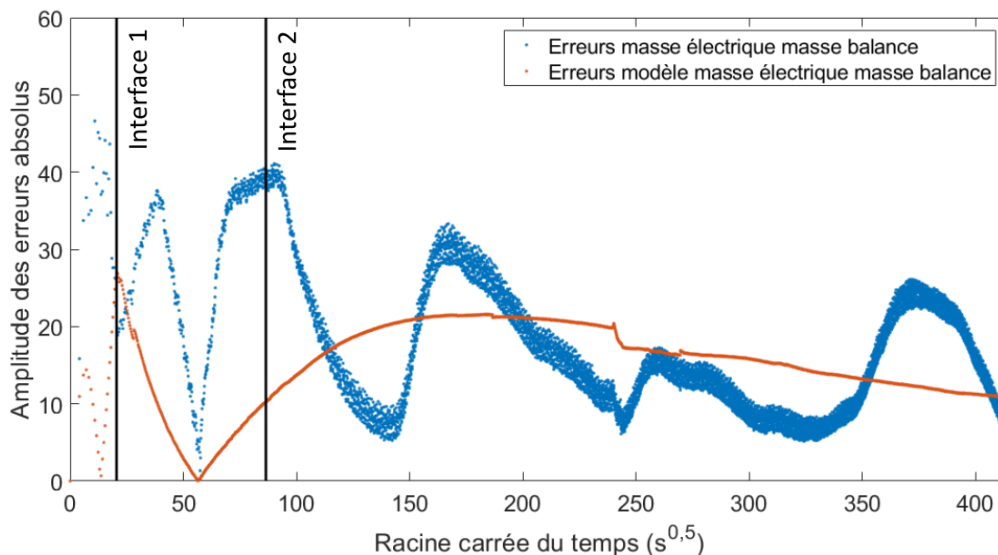


Figure 119 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CA-CA.

En effet, l'amplitude des erreurs augmente de manière rapide dans les premiers instants de l'expérience suivie d'une diminution relative jusqu'à l'arrivée de l'interface 1. Entre l'interface 1 et 2 l'évolution des erreurs est caractérisé par une augmentation suivie d'une diminution importante avant d'augmenter à nouveau avec le maximum correspondant à l'instant défini par l'arrivée du front sur l'interface 2. Au-delà de la deuxième interface, l'évolution des erreurs est caractérisée par une série d'augmentations et de diminutions représentant une variation au-dessus et au-dessous de la moyenne définie par le modèle mathématique le plus proche des données mesurées par la balance. Ainsi pour ce qui concerne l'évolution des erreurs absolues moyennes entre le modèle et les mesures gravimétriques, les résultats montrent une tendance générale très similaire avec beaucoup moins de variations abruptes et une amplitude moins importante que pour les valeurs de masse calculées. En effet, les erreurs du modèle augmentent dans les premiers instants présentant un maximum à l'instant défini par l'interface 1. Entre l'interface 1 et 2, l'amplitude des erreurs diminue jusqu'à atteindre le minimum global vers $2,8 \cdot 10^3$ s. Au-delà de cet instant, l'amplitude des erreurs augmente rapidement jusqu'à sa stabilisation vers $2 \cdot 10^4$ s. Entre cet instant et la fin de l'expérience, nous observons une diminution faible mais constante de l'amplitude des erreurs.

Les différences entre la masse d'eau absorbé et la masse d'eau calculée à partir de la méthode d'imagerie électrique sont particulièrement importantes peut après de l'arrivée du front à la première et autour de la deuxième interface.

Plusieurs hypothèses permettant d'expliquer les anomalies observées sont retenues. Une des hypothèses étudiées concerne une possible variation de la résistivité de contact des électrodes avec l'augmentation rapide de la teneur en eau. Cette variation peut être particulièrement importante avec l'augmentation rapide de la teneur en eau pour les niveaux inférieurs de l'assemblage. Une deuxième hypothèse envisagée concerne un possible problème de maillage. En effet, dus au fait au nombre restreint d'électrodes utilisés, la discrétisation de l'assemblage peut être insuffisante, ce qui peut induire des erreurs lors de l'inversion permettant d'estimer la résistivité électrique à partir de la variation de potentiel mesuré entre les couples d'électrodes.

3.2.2 Assemblage CAmHOM-BAc-CA

L'assemblage CAmHOM-BAc-CA est composé, en partie inférieure, d'un bloc de calcaire CAmHOM (calcaire moyen appareil homogène) surmonté par deux blocs de briques BAc et enfin un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joints de mortier MM. La Figure 120 présente la discrétisation de l'assemblage en huit niveaux distincts superposés équipés avec les huit couples d'électrodes utilisés pour effectuer les mesures selon la méthode électrique.

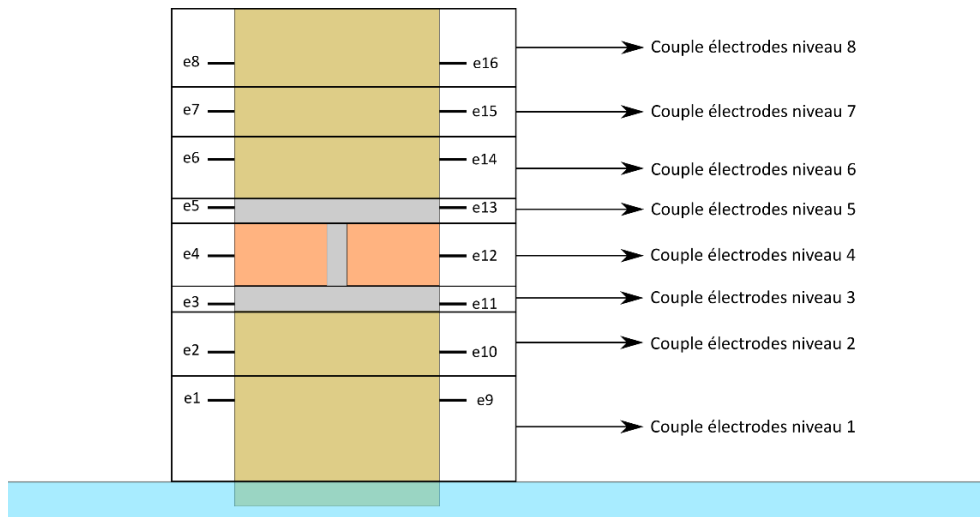


Figure 120 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAMHOM-BAC-CA.

La taille des volumes définissant les niveaux sur lesquels sont mesurées les variations de la résistivité électrique est présentée sur le Tableau 16.

Tableau 16 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHOM-BAC-CA.

Niveaux	Matériau	Dimensions		
		X (cm)	y (cm)	z (cm)
1	CAMHOM	8	8	4,5
2	CAMHOM	8	8	2,5
3	MM	8	8	1,25
4	BAC et MM	8	8	3
5	MM	8	8	1
6	CA	8	8	2,5
7	CA	8	8	2
8	CA	8	8	4,5

La discrétisation de l'assemblage permet dans ce cas d'analyser la contribution des différents matériaux constituant l'assemblage. La somme des valeurs de la prise de masse des différents niveaux correspondant aux différents matériaux permet l'obtention des résultats de la prise de masse par matériau. Ces résultats sont présentés sur la Figure 121.

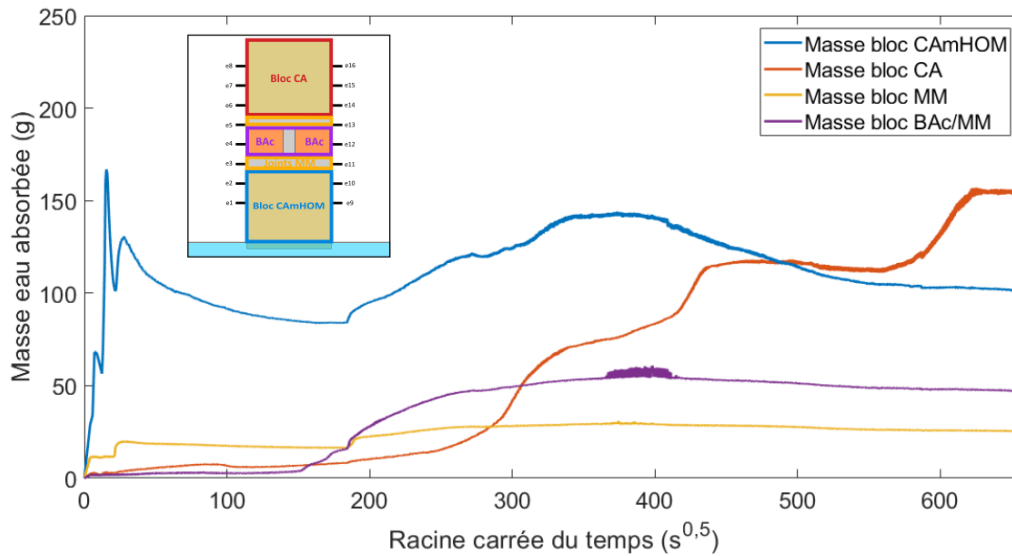


Figure 121 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAmHOM-BAç-CA.

Comme pour le cas précédent, les courbes de la prise de masse des différents matériaux montrent une évolution cohérente par rapport à la position des différents niveaux. Les matériaux inférieurs montrent une rupture de pente et atteignent leur maximum en début d'expérience, tandis que pour les niveaux supérieurs le changement de pente se produit progressivement jusqu'au dernier niveau du fait de la progression du front d'imbibition au cours de l'expérience. Cependant les courbes correspondant au CAmHOM, qui se situe à la base de l'assemblage, présentent des caractéristiques peu logiques en début de l'expérience. En effet, les premiers niveaux présentent un pic de masse dans les premiers instants de l'expérience suivi d'une diminution apparente de la masse puis une augmentation plus progressive jusqu'à sa stabilisation en milieu d'expérience.

La somme des apports de masse dans les différents matériaux fournit l'évolution de la masse d'eau de la totalité de l'assemblage au cours du temps. La Figure 122 montre l'évolution de la prise de masse d'eau absorbée et mesurée à partir de la méthode d'imagerie électrique et le modèle mathématique (fonction de type puissance) qui s'ajuste au mieux à ces données. Celui-ci est comparé à l'évolution de la prise de masse réelle mesurée par la méthode gravimétrique.

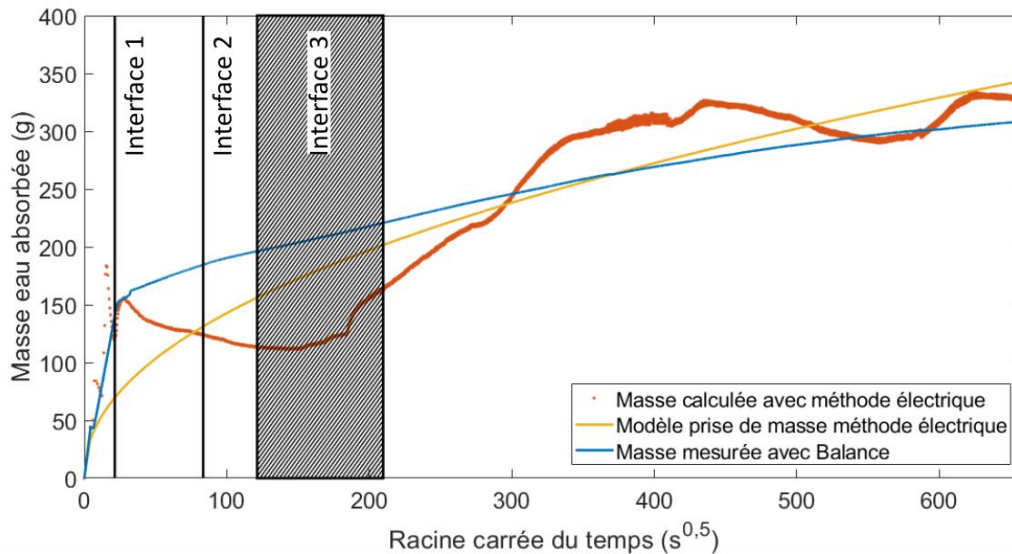


Figure 122 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de regression de l'assemblage CAMHOM-BAC-CA.

Les résultats présentés sur la Figure 122 correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique montrent que la morphologie de la courbe de prise de masse calculée à partir de la méthode électrique, ne correspond pas forcément avec celle de la mesure par méthode gravimétrique. Cette différence de morphologie entre les deux courbes se produit après un pic de prise de masse aux instants autour de l'interface 1 puis il est suivi par un offset se traduisant en une faible sous-estimation de la masse d'eau mesurée entre $\sim 1 \cdot 10^3$ s et $\sim 1 \cdot 10^5$ s suivi d'un offset se traduisant en une faible surestimation entre $\sim 3,5 \cdot 10^5$ s et la fin de l'expérience. Dans ce cas, la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode électrique et la méthode gravimétrique est de 53,24 g. Cette variation est assez élevée car elle correspond à 17% de la capacité de stockage maximale mesurée avec la méthode gravimétrique.

Le modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode électrique (modèle prise de masse méthode électrique sur le graphique) présente un coefficient de corrélation R^2 égale à 0,79 et l'évolution de la tendance générale reste assez similaire et cohérente avec les résultats. Cependant, la moyenne des erreurs absolues entre le modèle mathématique et l'évolution réelle de la prise de masse d'eau est de 50,12 g, soit 16% de la masse d'eau totale absorbée. Ce résultat, et bien qu'il soit moins important que pour les données mesurées par la méthode électrique, reste assez élevé. Cela montre que malgré une tendance similaire entre les deux courbes, certaines parties de la courbe présentent des différences de prise de masse non négligeables.

Sur la Figure 111 est présentée l'évolution des erreurs entre les données calculées et celles du modèle mathématique par rapport aux données réelles mesurées avec la balance.

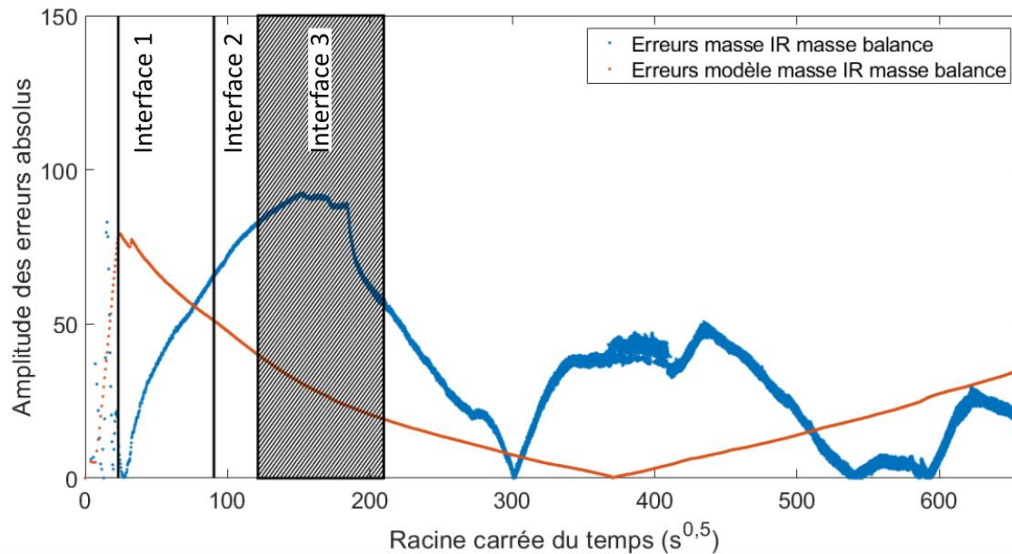


Figure 123 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAMHOM-BAC-CA.

Ces résultats montrent que l'amplitude des erreurs n'est pas constante au cours de l'expérience. L'amplitude des erreurs est assez aléatoire les premières minutes de l'expérience. A partir de la première interface, l'amplitude des erreurs augmente rapidement jusqu'à atteindre son maximum pendant l'intervalle définissant l'arrivée du front à l'interface 3. Entre la troisième interface et la fin de l'expérience, nous observons des diminutions et augmentations plus ou moins cycliques correspondant avec les anomalies traduisant des surestimations et sous-estimations des données mesurées par rapport aux données de prise de masse réelle.

Pour ce qui concerne les erreurs entre le modèle mathématique et les valeurs réelles (masse balance), il est possible d'observer une augmentation rapide jusqu'à l'instant défini par l'interface 1 où il atteint son maximum. Après la première interface, l'amplitude des erreurs diminue assez rapidement jusqu'à $\sim 1 \cdot 10^5$ où une erreur minimale est atteinte. Cette partie correspond avec la sous-estimation entre les données mesurées et les données réelles qui diminue progressivement jusqu'à $\sim 1 \cdot 10^5$. Au-delà de cet instant, l'erreur augmente à nouveau du fait de la surestimation du modèle par rapport aux données de prise de masse réelles.

Pour cet assemblage, les différences entre la masse d'eau absorbé et la masse d'eau calculée à partir de la méthode d'imagerie électrique augmentent rapidement depuis le début de l'expérience pour atteindre un maximum pendant le passage de la troisième interface.

Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de cette différence entre la masse d'eau mesuré et celle calculée.

Comme pour le cas du calcaire, les hypothèses les plus probables concernent une variation de la résistivité de contact des électrodes avec l'augmentation rapide de la teneur en eau et/ou un problème de maillage dus à la discrétisation insuffisante de l'assemblage avec un nombre restreint d'électrodes.

3.3. Synthèse des résultats obtenus avec la méthode électrique

En complément des mesures thermiques de la surface des assemblages par thermographie infrarouge, le système de mesure de la résistivité électrique locale en transmission est globalement opérationnel. Dans le cadre de cette partie du projet, nous n'avons pas pu transposer, à l'échelle macroscopique, la méthode électrique que par l'intermédiaire d'électrodes invasives. Le maillage n'est pas suffisamment fin, mais les ordres de grandeurs de l'eau absorbée dans ces assemblages complexes sont respectés. En outre, cette méthode volumique permet de reconstruire assez fidèlement la cinétique de prise de masse en eau. Toutefois, des variations de grandes amplitudes subsistent et brulent le signal intégral. Comme nous venons de le mentionner, la qualité du maillage peut être une cause de ces imperfections, de même que le choix des électrodes et la qualité du contact des électrodes dans leur logement. Par ailleurs, on ne peut pas non plus exclure une dérive de la résistance de contact de l'électrode avec une augmentation soudaine de la teneur en eau. En effet, le processus de calcul de la résistivité électrique avec EIDORS ne tient pas compte des possibles variations de cette résistance de contact. Comme pour la méthode IR, nous prévoyons à court terme de tester un processus de transfert de l'eau plus rapide que le séchage pour compléter les phases de calibration déjà testées. Il est sûrement important d'inclure dans la calibration un processus permettant de quantifier la variation de la résistance de contact des électrodes au cours de l'expérience. Une autre solution envisagée est d'utiliser des quadripôles électriques au lieu d'un simple couple d'électrodes pour effectuer les mesures de résistivité et calculer la saturation des matériaux. Cette amélioration permettrait de s'affranchir des possibles erreurs de calcul de la résistivité car dans une telle configuration, la modification des résistances de contact n'affecterait plus la mesure. Cependant, avec l'architecture du dispositif utilisé, le nombre de points de mesure possibles serait insuffisant pour mesurer les variations de saturation par matériaux.

Les résultats concernant la qualité de la corrélation entre le modèle et les données obtenues par la méthode électrique, ainsi que le coefficient définissant l'écart absolu moyen entre les données obtenues par la méthode électrique et les valeurs de teneur en eau réelles, sont présentés sur le Tableau 17.

Tableau 17 : Synthèse des résultats sur la validité du modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesuré avec la méthode IR et l'erreur moyen absolu permettant de comparer la teneur en eau mesuré avec la méthode IR et la teneur en eau réelle.

Assemblage	Erreur moyenne de la masse IR	Rapport entre l'erreur moyenne de la masse IR et la masse réelle maximale	Erreur moyenne du modèle de la masse IR	Rapport entre l'erreur moyenne du modèle de la masse IR et la masse réelle maximale	Coefficient R ² du modèle
CA-CA	22,89 g	9%	22,03 g	9%	0,79
CAMHOM-BAC-CA	53,24 g	17%	50,12 g	16%	0,79

Les résultats présentés précédemment montrent que les valeurs de prise de masse calculées à partir de la méthode d'imagerie électrique présentent des erreurs faibles à modérées par rapport aux valeurs de prise de masse réelles mesurées par la méthode gravimétrique. Ainsi, les rapports entre l'erreur moyenne de la masse calculée en utilisant la méthode d'imagerie électrique et la masse réelle maximale sont inférieurs à 20% pour tous les assemblages à l'exception de l'assemblage CAMHET-BAC-CA qui présente une erreur maximale de 22%.

Les modèles mathématiques permettant de décrire l'évolution de prise de masse obtenue par la méthode électrique présentent une tendance générale plus proche de la prise de masse réelle. En effet, malgré le fait que les coefficients de corrélation peuvent être relativement faibles pour certains assemblages, les valeurs du modèle des masses calculées (modèle masse électrique) présentent de plus faibles écarts avec les valeurs réelles de prise de masse. C'est la raison pour laquelle les valeurs de prise de masse utilisées pour comparer la validité de la mesure de prise de masse par la méthode d'imagerie électrique est effectuée avec les données du modèle.

4. Comparatif des résultats électriques et de thermographie IR

Les résultats obtenus par les expériences de suivi d'imbibition par la méthode électrique et de thermographie IR sur les assemblages montre la capacité de ces méthodes à déterminer la teneur en eau réelle dans un assemblage.

La Figure 124 et la Figure 125 permettent de comparer les résultats des méthodes d'imagerie IR et électrique comparativement à la méthode gravimétrique dans leur aptitude à mesurer des quantités d'eau pour les assemblages CA-CA et CAMHOM-BAC-CA respectivement.

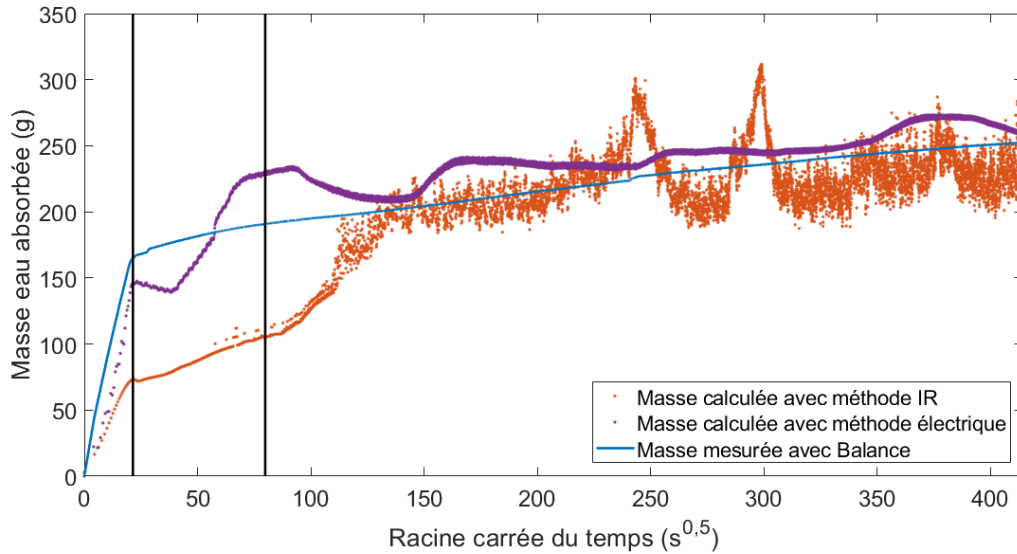


Figure 124 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CA-CA.

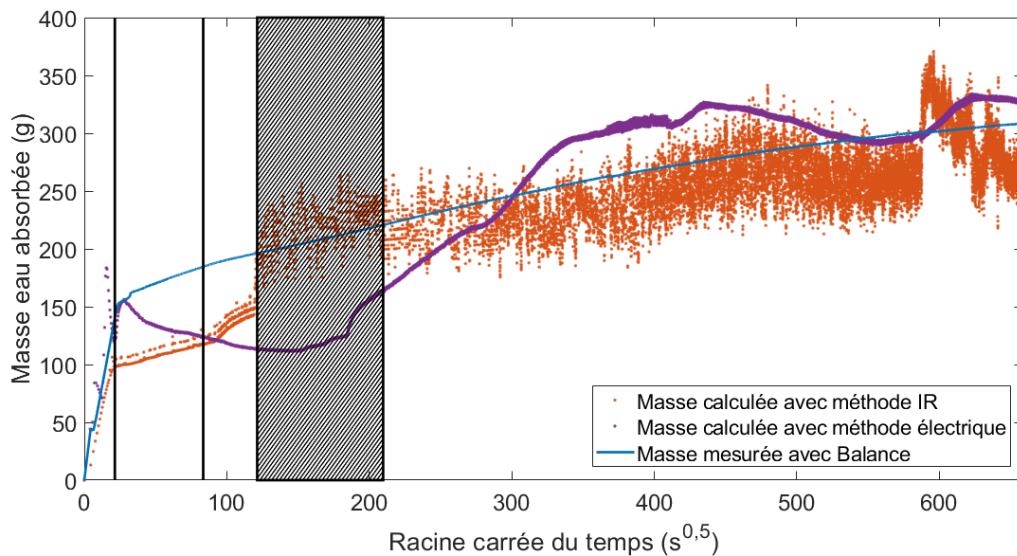


Figure 125 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAmHOM-BAC-CA.

Les mesures effectuées avec la méthode d'imagerie de thermographie IR présentent des performances similaires pour les deux types d'assemblages. Les résultats montrent une sous-estimation systématique de la masse d'eau absorbée pendant les premiers instants de l'imbibition. Au-delà de la deuxième interface la distribution des valeurs de la masse calculée présente une dispersion non négligeable. Malgré la dispersion importante les valeurs, la masse calculée suit une tendance très similaire à la masse réelle mesurée avec la balance.

La méthode électrique présente des résultats dont avec des performances encourageantes mais différentes selon le type d'assemblage. En effet, pour l'assemblage CA-CA, représentant la partie

en élévation du mur, les résultats de la masse calculée d'après les mesures électriques sont très proches de la masse d'eau réelle obtenus d'après les mesures gravimétriques. Cependant pour l'assemblage CAmHOM-BAc-CA, représentant la partie en basale du mur correspondant aux fondations, les résultats de la masse calculée d'après les mesures électriques présentent une anomalie caractérisée par une diminution apparente de la masse calculée entre la première et la dernière interface. Comme il est précisé dans la section présentant la synthèse des résultats relatifs aux mesures électriques, les causes de cette anomalie ne sont pas identifiées à ce stade. Cependant, il est envisagé d'effectuer une analyse approfondie des possibles causes à l'origine de ces résultats obtenus pour certains assemblages avec la méthode d'imagerie électrique.

5. Comparaison des résultats au regard des modèles phénoménologiques

Les résultats obtenus lors des expériences de suivi d'imbibition par la méthode électrique et de thermographie IR sur les assemblages permet aussi de caractériser le rôle des interfaces entre les blocs des assemblages vis-à-vis de l'évolution du front d'imbibition. La méthode électrique caractérise l'évolution du front dans le volume. La résolution de cette méthode est assez réduite (division de l'assemblage en huit niveaux) pour permettre un suivi précis de l'évolution du front. Au contraire la méthode d'imagerie de thermographie IR permet d'effectuer un suivi beaucoup plus détaillé de l'évolution du front par le biais des thermogrammes. Ainsi, les thermogrammes issus des mesures par la méthode d'imagerie IR effectués sur les assemblages permet de confronter la robustesse des hypothèses sur la dynamique de capillarité, mise en avant par les modèles phénoménologiques, pour les deux types de sections de mur testées.

La Figure 126 montre le comparatif entre les modèles phénoménologiques correspondant à la partie érigé du mur avec les thermogrammes montrant l'évolution réel du front d'imbibition pour l'assemblage CA-CA.

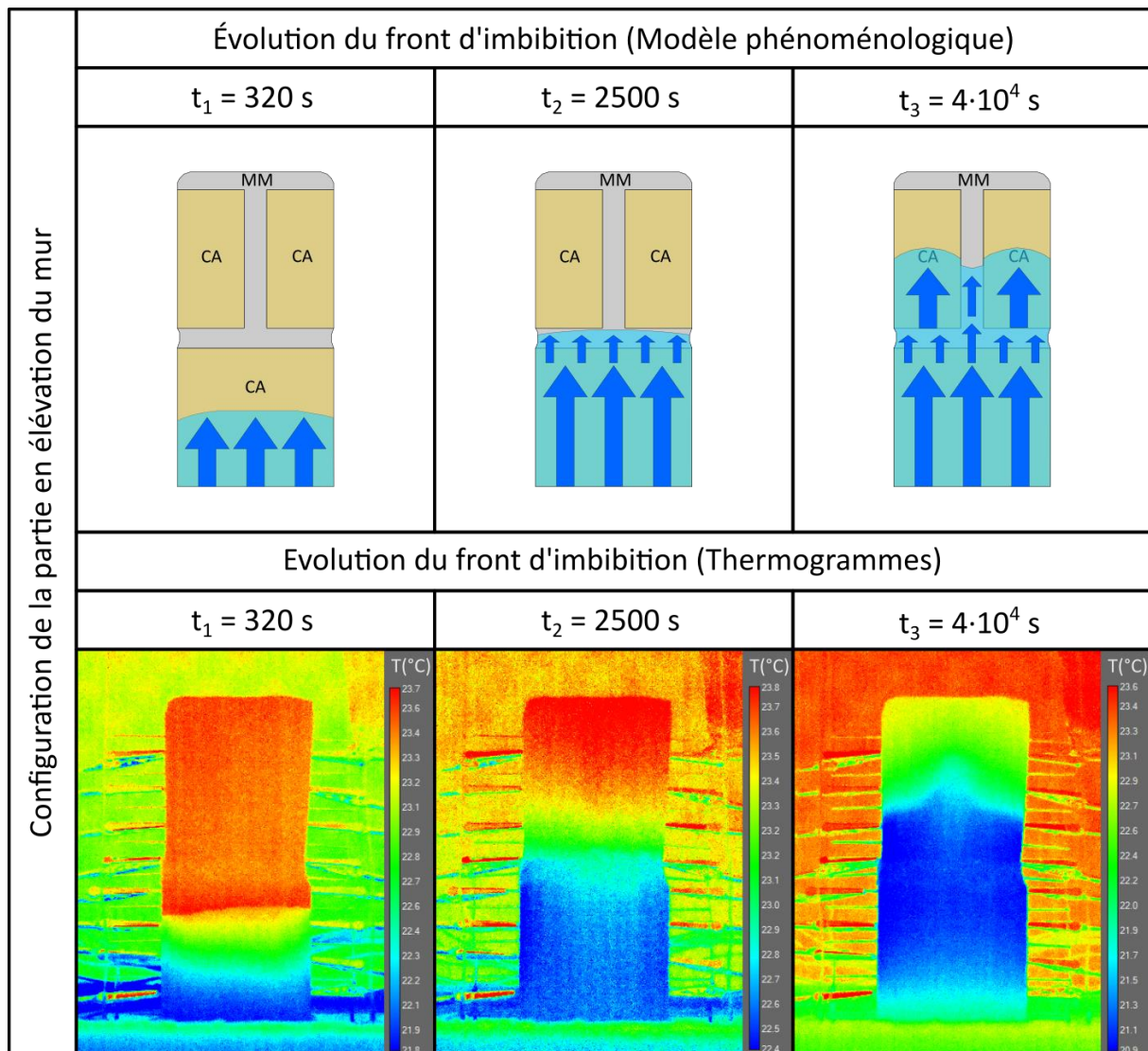


Figure 126 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et par les thermogrammes de l'assemblage CA-CA.

L'évolution des fronts d'imbibition des thermogrammes à t_1 et t_2 correspond bien aux modèles phénoménologiques présentés. Au contraire, le thermogramme à t_3 révèle une imbibition plus rapide sur le joint vertical de mortier que sur les blocs calcaires supérieurs. Une possible explication à cette divergence peut être que le chemin préférentiel de l'eau se produise dans l'entrefer que représente l'interface calcaire/mortier permettant ainsi, une ascension du front plus rapide que dans les blocs calcaires supérieurs.

L'espace temporel entre les différentes étapes de l'imbibition (t_1 , t_2 et t_3) permet de montrer comment les différents matériaux constituant l'assemblage interagissent vis-à-vis du front d'imbibition. En effet, la vitesse du front sur le matériau calcaire est importante, avec une imbibition presque totale du bloc inférieur à $t_1 = 320 \text{ s}$ (5 min et 20 secondes). A l'interface calcaire/mortier se produit un ralentissement important de l'avancée du front d'imbibition permettant seulement une imbibition partielle du joint mortier horizontal inférieur à $t_2 = 2500 \text{ s}$ (~42 min). Le mortier moderne

constitue pour cette configuration, une entrave à l'avancée du front et ralentit la distribution de l'eau vers les blocs calcaires supérieurs.

La Figure 127 montre le comparatif des modèles phénoménologiques avec les thermogrammes montrant l'évolution réel du front d'imbibition pour l'assemblage CAmmHOM-BAC-CA.

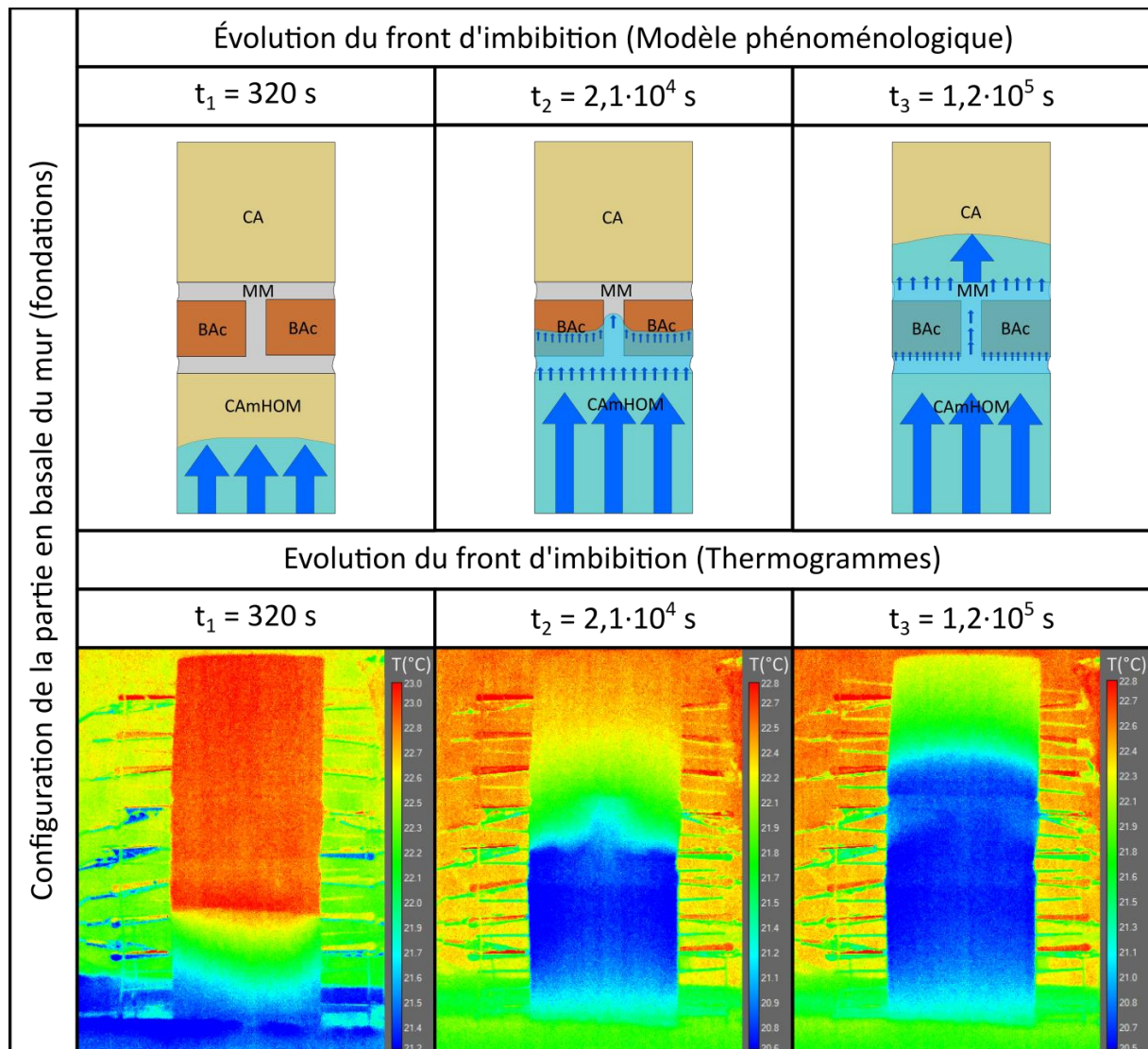


Figure 127 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et par les thermogrammes de l'assemblage CAmmHOM-BAC-CA.

L'évolution des fronts d'imbibition des thermogrammes correspondent bien avec les modèles phénoménologiques présentés. Les scènes thermiques permettent d'observer l'évolution du front d'imbibition pour l'assemblage CAmmHOM-BAC-CA. Comme dans les modèles phénoménologiques proposés, les matériaux calcaires, d'après leurs propriétés pétrophysiques,

permettent une absorption rapide. Les joints mortiers et les niveaux de briques freinent l'avancement normal du front d'imbibition.

D'une manière générale, les hypothèses suggérées par les modèles phénoménologiques correspondent bien avec les observations. Les calcaires de la partie basale correspondant aux fondations, vont permettre la remontée rapide du front d'imbibition. Cependant, cette remontée va être freinée par les premiers niveaux de briques et du mortier moderne. Ainsi, ces premiers niveaux de briques et du mortier moderne, vont ralentir de manière significative l'avancée du front vers la partie du mur en hauteur. Sur la partie en élévation du mur, l'avancée du front d'imbibition semble être gouvernée par les calcaires tandis que les joints de mortier moderne vont freiner la vitesse d'ascension.

CHAPITRE VIII

Conclusions

Arrivé au terme de ce travail, la mesure fiable de la teneur en eau constitue un axe de recherche important et privilégié pour répondre aux besoins directs du terrain dans le domaine de la conservation des matériaux poreux inorganiques du patrimoine monumental. A l'heure actuelle, les techniques absolues et effectivement mises en œuvre en pratique restent principalement destructives et font appel au prélèvement, à la pesée gravimétrique ou à la méthode de la bombe à carbure. Parmi les méthodes qui fournissent des informations relatives, seules quelques méthodes de surface et de subsurface ont suscité ces dernières années un regain d'intérêt au travers des mesures dites électriques, notamment en recherche archéologique. Le besoin de méthodes nouvelles, non destructives ou combinées et donnant accès à une information volumétrique est donc non seulement d'actualité mais également attendu.

La ligne directrice du travail présenté ici s'est inspirée de cette double attente, alliant la précision de la donnée et le respect au maximum de l'intégrité des matériaux étudiés. Lors de cet exercice essentiellement expérimental mais qui a nécessité quelques aspects numériques, notre approche empirique « dédiée » permet d'apporter des éléments concrets d'estimation de la teneur en eau de façon qualitative, mais surtout quantitative.

Dédiés, les travaux le sont pour le patrimoine bâti qui représente notre histoire, véhicule des savoirs faire, des exigences, mais reste fragile à cause des agressions du temps et, comme nous l'avons indiqué au chapitre un, en limitant aux effets de l'eau dont les conséquences en termes d'endommagement sont multiples.

Dédiés, les travaux le sont également puisqu'ils se concentrent sur les familles de matériaux de construction du site Gallo-romain de Genainville soumis à la dynamique et aux fluctuations de la nappe phréatique affleurante sous-jacente :

- Le calcaire homogène, que l'on retrouve principalement en élévation et dont la présence traduit bien la volonté d'un rendu esthétique à l'échelle du site ;
- Le calcaire hétérogène, qui participe du fait de cette hétérogénéité naturelle marquée par des horizons de compacité variée, à limiter les vitesses de transfert des solutions issues du sol ;
- Les argiles cuites représentées par la brique claire et la brique foncée, dont la localisation et les propriétés intrinsèques, conditionnent également la diminution des propriétés d'imbibition dans les soubassements des murs ;
- Les mortiers de pose d'origine et celui contemporain, introduits pour l'élaboration des assemblages.

Les propriétés de stockage et de transfert de l'eau des matériaux étudiés mettent en exergue des différences significatives de leurs microstructures, qui s'expriment par plusieurs ordres de grandeurs notamment concernant leur perméabilité. C'est également la prise en compte de cette diversité de matériaux qui rend crédible l'intérêt de l'étude, ouvrant la possibilité de son éventuelle transposition à d'autres sites ou monuments. De par l'aspect fragile et protégé du patrimoine bâti,

nos travaux ont ciblé des techniques de mesures faiblement intrusives via la polarisation électrique et l'imagerie infrarouge, en mettant en évidence leur complémentarité et l'intérêt de leur couplage.

A ce stade de l'avancement de nos travaux, la caractérisation initiale est indispensable pour la mise en évidence des volumes accessibles, aux transferts de masse potentiels et à l'identification des chemins préférentiels de circulation de l'eau. Ces différents éléments ont été nécessaires pour constituer une banque de données avec des facteurs communs des grandeurs physiques. Ces grandeurs de référence constituent les fondements en vue d'opérations de calages voire de recalages. Les échelles introduites pour ces analyses représentent bien au niveau du laboratoire, la méso-échelle et la macro-échelle via les maquettes constituées. Ces choix dimensionnels, potentiellement discutables, car ils exacerbent les effets d'hétérogénéités, permettent en revanche d'imposer assez facilement la distribution de l'eau en simulant des processus essentiellement monodimensionnels en englobant les effets d'anisotropie inhérents aux matériaux testés.

Les deux techniques de mesures sont ensuite présentées :

- En recourant à la thermographie infrarouge dans l'intervalle des longueurs d'ondes 7 mm – 14 mm et un microbolomètre offrant une sensibilité de mesure de 40 mK et une résolution spatiale de 480x680 pixels. L'exploitation des contrastes de flux radiatifs naturellement émis par un corps est mise à profit pour récolter des données au voisinage de la surface des corps étudiés en s'affranchissant de l'influence de l'atmosphère. Dans cette partie du projet, nous avons montré qu'il est possible d'établir une loi de passage entre la teneur en eau et une température de surface adimensionnée localisée. Un cadre méthodologique a été mis en œuvre pour identifier une température vraie de la surface du corps qui s'affranchi des variations de la température qu'impose en condition laboratoire le cycle diurne/nocturne. La calibration confronte l'indicateur température à des échantillons dont la teneur en eau est calibrée et homogénéisée entre 0% et la saturation totale (calibration statique), mais également en imposant un régime diffusif de séchage d'échantillons préalablement saturés à pression atmosphérique. Les relations établies pour chaque minéral n'est pas monotone ce qui complique son utilisation, mais les relations sont très fonctionnelles entre la grandeur cible et l'indicateur. Les compromis retenus introduisent un biais de mesure, identifié, qui fera l'objet d'un traitement adapté à court terme. Néanmoins, cette technique offre l'avantage d'une certaine simplicité, est facilement portable et permet de construire des champs de données bidimensionnels.
- En recourant à l'identification des propriétés électriques locales des matériaux en imposant un signal continu par impulsion courte et répétée ce qui permet de se prémunir contre un risque de transfert de masse par effet de polarisation. Deux types d'électrodes ont été finalement testés dans ce travail, une faiblement intrusive développée au cours du projet et une intrusive que l'on retrouve dans les travaux de la littérature. Nos protocoles s'appuient le principe du montage quadripôle et la calibration de la méthode permet d'estimer la résistivité électrique en transmission (via un couple d'électrodes) pour la majeure partie des

essais. De la même façon que pour la méthode IR, les lois de calibration sont établies de façon fonctionnelle entre la teneur en eau et la résistivité électrique. Ces lois offrent l'avantage d'une évolution monotone. Une distinction entre les réponses du système intrusif et non intrusif est montrée ; qui tient vraisemblablement à l'organisation du réseau des lignes de courant en fonction des électrodes employées, mais également au compromis retenus pour effectuer les essais (évoqué avec la mesure IR). La multiplication des couples d'électrodes font de la méthode une technique d'imagerie. Par ailleurs, cette technique volumique s'avère complémentaire à la méthode de surface avec des domaines de validité qui (i) se recouvrent et (ii) se complètent.

Finalement, nous avons montré que les deux méthodes sont complémentaires par les domaines de validité des degrés de saturation facilement accessible et le point fort tient dans la combinaison d'une investigation surface-volume. A ce stade, même si des améliorations à court terme sont attendues, nous disposons d'une technique expérimentale permettant d'établir un bilan qualitatif et quantitatif de l'eau présente dans des corps d'épreuve. L'adaptabilité est une réalité, même s'il convient de bien connaître les propriétés du milieu analysé. Les données prélevées et interprétées permettent d'établir un bilan de l'organisation de l'écoulement dans un système. Le lourd cadre méthodologique a été fiabilisée et constitue un fort acquit.

La mise en situation des méthodes sur les assemblages maquettes à l'échelle démontre le caractère opérationnel du travail et des algorithmes mis en œuvre pour aller au-delà du cadre étalonnage qui permet de prendre en compte les hétérogénéités induites par le processus d'imbibition capillaire et en particulier par le processus de transfert de masse non pris en compte jusqu'ici pour la calibration, ce qui renforce l'intérêt de la démarche. Cette partie du travail qui introduit des effets d'interfaces démontre la capacité du système pour établir un bilan des masses accumulées de façon correcte. L'extension de ce travail aux différentes combinaisons d'assemblage offrira de multiples possibilités d'éprouver les techniques et de mettre en évidence les processus « locaux » d'écoulement. Dans ce contexte, l'Annexe V (*ANNEXE V – Amélioration des algorithmes de traitement de thermographie IR p.239*) présente les améliorations encore en cours notamment en matière d'algorithmes de traitement des données devraient notablement améliorer l'interprétation des processus physiques. Finalement, l'Annexe VI (*ANNEXE VI - Caractérisation des matériaux par modélisation numérique p.250*) présente les perspectives de l'utilisation des méthodes de caractérisation des propriétés de transfert et de stockage par des méthodes numériques. Ces méthodes ont le potentiel de pouvoir réduire grandement le volume de matériau actuellement utilisé pour les phases de calibration. De plus, ces modèles peuvent être élargies pour créer des sections de mur numériques. Cela permettra de représenter des modèles phénoménologiques tridimensionnels et de calculer le signal électrique et thermique attendu pour un modèle tel. Les signaux électriques et thermiques calculées sur le modèle numérique pourront ensuite être comparés aux données mesurées sur les assemblages.

Néanmoins, nous disposons aujourd'hui des éléments nécessaires pour éprouver notre système à la pleine échelle en testant la combinaison des techniques sur le site archéologique de Genainville. Cette étape est indispensable pour alimenter le processus itératif pour l'optimisation de la méthode

de mesure de la teneur en eau et pour fiabiliser l'interprétation physique des écoulements. A ce stade de l'analyse, nous serons confrontés à la problématique des sels solubles qui constitue la prochaine étape de nos travaux. Les travaux de fiabilisation porteront également sur l'amélioration de la portabilité afin de pouvoir mettre à disposition une version de l'outil pour que les opérateurs puissent facilement s'approprier son utilisation et se concentrer prioritairement sur les données interprétées.

Bibliographie

- [1] European Committee for Standardization, EUROPEAN STANDARD EN 16682 : Conservation of cultural heritage – Methods of measurement of moisture content in materials constituting immovable cultural heritage, Brussels, 2017.
- [2] D. Defer, J. Shen, S. Lassue, B. Duthoit, Non-destructive testing of a building wall by studying natural thermal signals, *Energy Build.* 34 (2002) 63–69. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00086-X).
- [3] A. Ishakoğlu, A.F. Baytaş, Measurement and evaluation of saturations for water, ethanol and a light non-aqueous phase liquid in a porous medium by gamma attenuation, *Appl. Radiat. Isot.* 56 (2002) 601–606. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(01\)00264-0](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00264-0).
- [4] A. Lambert, G. WACHÉ, J. RIVENEZ, Les contrôles non destructifs: Généralités, CETIM, Centre technique des industries mécaniques, 1994.
- [5] P. Jacobs, E. Sevens, M. Kunnen, Principles of computerised X-ray tomography and applications to building materials, *Sci. Total Environ.* 167 (1995) 161–170. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04577-N](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04577-N).
- [6] C. Porteneuve, Caractérisation de bétons par résonance magnétique nucléaire : application à l'étude de l'altération par l'eau, Université Paris VI, 2001.
- [7] T. Yu, Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton pour l'amélioration du diagnostic des structures de génie civil, Université d'Aix-Marseille, 2018.
- [8] R. Lençrerot, Outils de modélisation et d'imagerie pour un scanner micro-onde : Application au contrôle de la teneur en eau d'une colonne de sol, Université Paul Cézanne - Aix-Marseille III, 2009.
- [9] A. Chanzy, J.C. Gaudu, Mesure de la teneur en eau du sol par les humidimètres capacitifs (soil moisture measurement using capacitance probe), 2000.
- [10] T. Fen-Chong, A. Fabbri, J.-P. Guilbaud, O. Coussy, Determination of liquid water content and dielectric constant in porous media by the capacitive method, *Comptes Rendus Mécanique.* 332 (2004) 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2004.02.028>.
- [11] J. Gaudu, J. Mathieu, J. Fumanal, L. Bruckler, A. Chanzy, P. Bertuzzi, P. Stengel, R. Guennelon, Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : analyse des facteurs influençant la mesure, *Agronomie.* 13 (1993) 57–73. <https://doi.org/10.1051/agro:19930105>.
- [12] A.S. Lotfi, Méthodologie de contrôle de l'homogénéité et de la perméabilité des barrières argileuses, INSA de LYON (URGC- Géotechnique), 2003.
- [13] J.-P. Laurent, P. Ruelle, L. Delage, N. Bréda, A. Chanzy, C. Chevallier, On the use of the TDR trime-tube system for profiling water content in soils, 2001.
- [14] L.K. Heng, G. Cayci, K.U.C. Tuk, J.L. Arrillaga, Comparison of soil moisture sensors between neutron probe , Diviner 2000 and TDR under tomato crops, *WCSS Bangkok.* (2002) 1–9. <https://doi.org/10.1.1.4.8895>.

- [15] A. Cerepi, L. Humbert, R. Burlot, P. Pouchan, Détermination de la teneur en eau d'un milieu poreux non saturé en utilisant Time Domain Reflectometry, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 57 (1998) 69–78. <https://doi.org/10.1007/s100640050023>.
- [16] Y. HAMED, G. SAMY, M. PERSSON, Evaluation of the WET sensor compared to time domain reflectometry, *Hydrol. Sci. J.* 51 (2006) 671–681. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.671>.
- [17] C. Nichol, L. Smith, R. Beckie, Time domain reflectometry measurements of water content in coarse waste rock, *Can. Geotech. J.* 40 (2003) 137–148. <https://doi.org/10.1139/t02-097>.
- [18] P. Kronenberg, Construction material monitoring with “optical hair” hygrometers, *École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL)*, 2002.
- [19] J.-P. Laurent, Profiling water content in soils with TDR: comparison with the neutron probe technique, Grenoble, France, 2003.
- [20] D. Vermeersch, V. Barrière, À la romaine! résidence privée, construction publique en Gaule du Nord, in: ARCHEA (Ed.), 2016: p. 157.
- [21] AEVA, Genainville – présentation du site, (2008).
- [22] D. Vermeersch, Le complexe religieux des Vaux-de-la-Celle à Genainville (95) : nouvelle proposition de phasage du sanctuaire d'après les dernières fouilles, in: *Etudier Les Lieux Culte Gaule Romaine*, 2009.
- [23] M. Chupin, Approche critique des reliefs sculptés du sanctuaire des Vaux-de-la-Celle (Genainville, Val-d'Oise), Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [24] V. Barrière, PCR « Urbanisme et architecture : le site des Vaux-de-la-celle », 2015.
- [25] P.-H. Mitard, Le sanctuaire Gallo-Romain des Vaux-de-la-Celle à Genainville (Val-d'Oise), Centre de Recherches Archéologiques du Vexin Français, Guiry-en-Vexin, 1993.
- [26] H. Dessales, *Petit catalogue des techniques de la construction romaine.*, (n.d.) p.21.
- [27] J.-P. Adam, *La construction romaine - Matériaux et techniques*, 6ème édit, 1984.
- [28] BRGM, Carte géologique 1/50 000, feuille de : MANTESLA-JOLIE, (1974).
- [29] Patrimoine géologique du Val d'Oise, (2007) 42.
- [30] D. Merle, P. De Wever, *Stratotype Lutétien : un livre pour faire connaître le patrimoine géologique*, 2008.
- [31] E. Leveau, G. Badinier, A. Bialkowski, V. Bault, J. Borde, R. Follet, A. Laurent, R. Dufrenoy, Fiche Entité BD-LISA NV2 113AQ, 2012.
- [32] C. Garnier, A. Dessevre, Evaluation du risque de non atteinte des objectifs de bon état qualitatif et quantitatif des masses d'eau souterraines du bassin Seine Normandie, in: *Géologie Hydrogéologie Du Bassin Paris. Avancées Perspect.*, Paris, 2004: pp. 201–219.
- [33] V. Verges-Belmin, *Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Monuments and Sites XV*, 2008. <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/16616>.
- [34] H. Dessales, *Petit catalogue des techniques de construction romaine*, (2007) 6.

- [35] S. Akkouche, Caractérisation du mortier antique sur lame mince, Université Paris Diderot, Paris XII-Créteil et Ecole des Ponts, 2018.
- [36] L. Schueremans, Ö. Cizer, E. Janssens, G. Serré, K. Van Balen, Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 4338–4350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.008>.
- [37] K. Van Balen, D. Van Gemert, Modelling lime mortar carbonation, *Mater. Struct.* 27 (1994) 393–398. <https://doi.org/10.1007/BF02473442>.
- [38] B. Zinszner, A geoscientist's guide to petrophysics, 2007.
- [39] Y. Li, W. Dong, H. Li, Z. Li, Method of Vacuum Water Absorption to Determine the Porosity of Hardened Concrete, *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.* 4 (2015) 282–286. <https://doi.org/10.18178/ijscer.4.3.282-286>.
- [40] AFNOR, Norme NF EN 1936 Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale, 2007.
- [41] U. Kuila, D.K. McCarty, A. Derkowski, T.B. Fischer, M. Prasad, Total porosity measurement in gas shales by the water immersion porosimetry (WIP) method, *Fuel.* 117 (2014) 1115–1129. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.073>.
- [42] NF B 10-504 (1973) Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure du coefficient d'absorption d'eau, n.d.
- [43] F. Metz, D. Knöfel, Systematic mercury porosimetry investigations on sandstones, *Mater. Struct.* 25 (1992) 127–136. <https://doi.org/10.1007/BF02472425>.
- [44] P.A. Webb, An Introduction To The Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data, *Micrometrics Instrum. Corp.* (2001) 23. <https://doi.org/10.1177/004057368303900411>.
- [45] B. Rousset, Transferts par capillarité et évaporation dans des roches. Rôle des structures de porosité., Strasbourg I - Université Louis Pasteur, 2001.
- [46] R. Defay, I. Prigogine, Surface Tension and Adsorption, Wiley, Michigan, 1966.
- [47] J.-F. Joanny, Le mouillage, quelques problèmes statiques et dynamiques, Université Paris VI, 1985.
- [48] Y. GUEGUEN, V. PALCIAUKAS, Introduction à la physique des roches, Univ. Louis-Pasteur, inst. phys. globe, Strasbourg, France, Paris, 1992.
- [49] J. Bico, Mécanismes d'imprégnation : Surfaces texturées, Bigouttes, Poreux., Université de Paris VI, 2000.
- [50] E.W. Washburn, The Dynamics of Capillary Flow, *Phys. Rev.* 17 (1921) 273–283. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273>.
- [51] S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, J. Elsen, Microscopic analysis of imbibition processes in oolitic limestone, *Geophys. Res. Lett.* 27 (2000) 3533–3536. <https://doi.org/10.1029/1999GL008471>.
- [52] J. Mertz, Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès, 1991.

- [53] E. Colas, J. Mertz, R. Lenormand, A. Ben Yahmed, Evaluation d'une méthode de mesure *_in situ_* et non destructive de la perméabilité à l'air des matériaux poreux du patrimoine architectural bâti, in: *Instrum. Portable*, Editions des archives contemporaines, 2019: pp. 177–197. <https://doi.org/10.17184/eac.2463>.
- [54] S. Galvan, C. Pla, N. Cueto, J. Martínez-Martínez, M.A. García-del-Cura, D. Benavente, A comparison of experimental methods for measuring water permeability of porous building rocks, *Mater. Construcción*. 64 (2014) e028. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.06213>.
- [55] E.J. Murray, Procedure for the Determination of the Permeability of Clayey Soils in a Triaxial Cell Using the Accelerated Permeability Test, 2002.
- [56] D.K. Butler, *Near-Surface Geophysics*, 2005th ed., Society of Exploration Geophysicists, 2005. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801719>.
- [57] W.J. McCarter, The electrical resistivity characteristics of compacted clays, *Géotechnique*. 34 (1984) 263–267. <https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.2.263>.
- [58] M. Fukue, T. Minato, H. Horibe, N. Taya, The micro-structures of clay given by resistivity measurements, *Eng. Geol.* 54 (1999) 43–53. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00060-5).
- [59] O. Sass, H.A. Viles, Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK, *J. Appl. Geophys.* 70 (2010) 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.11.006>.
- [60] O. Sass, H.A. Viles, How wet are these walls? Testing a novel technique for measuring moisture in ruined walls, *J. Cult. Herit.* 7 (2006) 257–263. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.08.001>.
- [61] J.C. Maxwell, VIII. A dynamical theory of the electromagnetic field, *Philos. Trans. R. Soc. London*. 155 (1865) 459–512. <https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>.
- [62] M.S. Greenhalgh, DC RESISTIVITY MODELLING AND SENSITIVITY ANALYSIS IN ANISOTROPIC MEDIA, University of Adelaide, 2008.
- [63] G. Fabien-Ouellet, Notes de cours : Les méthodes à conduction de courant DC, (2018) 37.
- [64] R. Wait, *Geo-Electromagnetism*, Elsevier, 1982. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-730880-7.X5001-7>.
- [65] Y. Fargier, Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux, 2011.
- [66] P. Azarsa, R. Gupta, Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2017 (2017) 1–30. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>.
- [67] L.B. Slichter, The Interpretation of the Resistivity Prospecting Method for Horizontal Structures, *Physics (College. Park. Md)*. 4 (1933) 307–322. <https://doi.org/10.1063/1.1745198>.
- [68] R.P. Henderson, J.G. Webster, An Impedance Camera for Spatially Specific

- Measurements of the Thorax, *IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-25* (1978) 250–254. <https://doi.org/10.1109/TBME.1978.326329>.
- [69] R.J. Lytle, K.A. Dines, *Impedance camera: a system for determining the spatial variation of electrical conductivity*, Livermore, CA, 1978. <https://doi.org/10.2172/6753686>.
- [70] A. Kemna, A. Binley, A. Ramirez, W. Daily, *Complex resistivity tomography for environmental applications*, *Chem. Eng. J.* 77 (2000) 11–18. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(99\)00135-7](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00135-7).
- [71] R.W. Stacey, *Electrical impedance tomography*, (2006).
- [72] W.M. Telford, L.P. Geldart, R.E. Sheriff, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 1990. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>.
- [73] E. Cardarelli, G. De Donno, *Innovation in Near-Surface Geophysics*, Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03364-8>.
- [74] A. Adler, W.R.B. Lionheart, *Uses and abuses of EIDORS: an extensible software base for EIT*, *Physiol. Meas.* 27 (2006) S25–S42. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/27/5/S03>.
- [75] A. Adler, W.R.B. Lionheart, *EIDORS: Towards a community-based extensible software base for EIT*, 6th Conf. Biomed. Appl. Electr. Impedance Tomogr. London, UK. (2005) 1–4. <https://doi.org/10.1.1.414.7996>.
- [76] N. Polydorides, W.R.B. Lionheart, *A Matlab toolkit for three-dimensional electrical impedance tomography: a contribution to the Electrical Impedance and Diffuse Optical Reconstruction Software project*, *Meas. Sci. Technol.* 13 (2002) 1871–1883. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/13/12/310>.
- [77] N. Polydorides, *Image reconstruction algorithms for soft field tomography*, University of Manchester Institute of Science and Technology, 2002.
- [78] M.R. Islam, M.A. Kiber, *Electrical Impedance Tomography imaging using Gauss-Newton algorithm*, in: 2014 Int. Conf. Informatics, Electron. Vis., IEEE, 2014: pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2014.6850719>.
- [79] M. Brinckerhoff, *Comparison of Electrical Impedance Tomography Reconstruction Algorithms With EIDORS Reconstruction Software*, Clemson University, 2018.
- [80] Electronicnotes, *Reed Relay & Reed Switch*, (n.d.). https://www.electronic-notes.com/articles/electronic_components/electrical-electronic-relay/what-is-a-reed-relay.php.
- [81] X.P. V. Maldague, *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Springer London, London, 1993. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1995-1>.
- [82] M.A. Bramson, *Infrared Radiation : A Handbook for Applications*, Université de l'État de Pennsylvanie, 1968. [https://doi.org/10.1016/0022-2860\(71\)87023-0](https://doi.org/10.1016/0022-2860(71)87023-0).
- [83] A. Moropoulou, N.P. Avdelidis, G. Haralampopoulos, S. Anagnostopoulou, *Detection of moisture in porous materials by infrared thermography*, in: X.P. Maldague, A.E. Rozlosnik (Eds.), *J. Am. Stat. Assoc.*, 2002: pp. 324–332. <https://doi.org/10.1117/12.459581>.

- [84] N. Avdelidis, A. Moropoulou, Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *J. Cult. Herit.* 5 (2004) 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2003.07.002>.
- [85] J. Spodek, E. Rosina, Application of Infrared Thermography to Historic Building Investigation, *J. Archit. Conserv.* 15 (2009) 65–81. <https://doi.org/10.1080/13556207.2009.10785040>.
- [86] E. Grinzato, N. Ludwig, G. Cadelano, M. Bertucci, M. Gargano, P. Bison, Infrared thermography for moisture detection: A laboratory study and in-situ test, *Mater. Eval.* 69 (2011) 97–104.
- [87] D. Pajani, Thermographie - Principes et mesure, Tech. l'ingénieur Mes. Température Généralités, Échelles Température Étalonnage. base docum (2013).
- [88] S. Bagavathiappan, B.B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, T. Jayakumar, Infrared thermography for condition monitoring--A review, *Infrared Phys. & Technol.* 60 (2013) 35–55.
- [89] P. Theodorakeas, E. Cheilakou, E. Ftikou, M. Kouli, Passive and active infrared thermography: An overview of applications for the inspection of mosaic structures, in: *J. Phys. Conf. Ser.*, 2015: p. 12061.
- [90] N. Ludwig, E. Rosina, Moisture detection through thermographic measurements of transpiration, in: *Thermosense XIX An Int. Conf. Therm. Sens. Imaging Diagnostic Appl.*, 1997: pp. 78–86.
- [91] E. Barreira, R.M.S.F. Almeida, J.M.P.Q. Delgado, Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components, *Constr. Build. Mater.* 110 (2016) 251–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026>.
- [92] FLIR Systems, User's manual FLIR A6xx series, (2017) 104. <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-c2-user-manual.pdf>.
- [93] FLIR, Technical Note - Uncooled detectors for thermal imaging cameras, (2011).
- [94] G. Fronteau, Comportements tégénétiques des principaux calcaires de Champagne-Ardenne, en relation avec leur faciès de dépôt et leur séquençage diagénétique, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2000.
- [95] A. Prick, Critical Degree of Saturation as a Threshold Moisture Level in Frost Weathering of Limestones, *Permafr. Periglac. Process.* 8 (1997) 91–99. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199701\)8:1<91::AID-PPP238>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199701)8:1<91::AID-PPP238>3.0.CO;2-4).
- [96] J. Hirschwald, Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung, *Nature.* 89 (1912) 344–345. <https://doi.org/10.1038/089344a0>.
- [97] N. Petheri, U. Raimo, The role of pore properties of rocks in the decay problem of building stones, in: Maricos & Kouris eds (Ed.), *Géologie Des Trav. Anciens Des Monum. Sites Hist.*, Rotterdam, 1988: pp. 809–813.
- [98] S. Yu, C.T. Oguchi, Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones, *Eng. Geol.* 115 (2010) 226–236. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.007>.
- [99] C. Pla, S. Galvañ, J. Martinez-martinez, N. Cueto, M. Angeles, D. Ciencias, D. Tierra,

- M. Ambiente, U. De Alicante, S. Vicente, Experimental relationship between water permeability and capillarity imbibition in porous rocks, *Rev. La Soc. Esp. Mineral.* 19 (2014) 14–15.
- [100] D. Benavente, P. Lock, M.Á. Del-Cura, O. Salvador, Predicting the Capillary Imbibition of Porous Rocks from Microstructure, *Transp. Porous Media.* 49 (2002) 59–76. <https://doi.org/10.1023/A:1016047122877>.
- [101] D. Benavente, G.G.-H. Cultrone, The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones, *Eur. J. Mineral.* 20 (2008) 673–685. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1850>.
- [102] MEASURESOFTECH, Datascan Installation and User Guide, (n.d.).

ANNEXE I
Systèmes d'acquisition testés
pour la mesure de
la résistivité électrique

1. Syscal Junior

Le Syscal Junior Switch est développé et commercialisé par IRIS Instruments. Cet appareil est conçu comme un résistivimètre de terrain utilisé pour l'imagerie de résistivité électrique et de polarisation provoquée.

Compatible avec l'acquisition des données lors des mesures multi-électrodes : Nécessite l'utilisation d'une matrice d'interrupteurs 24 (Switch-24), 48 (Switch 48) ou 72 (Switch 72)

Le Syscal Junior Switch permet l'utilisation de deux types de signaux d'injection pouvant être générés par l'émetteur. La Figure 128 montre les deux types de signal pouvant être générés. L'option (a) est mieux adaptée pour des mesures de polarisation spontanée tandis que l'option (b) est plutôt adaptée à la mesure de la résistivité électrique.

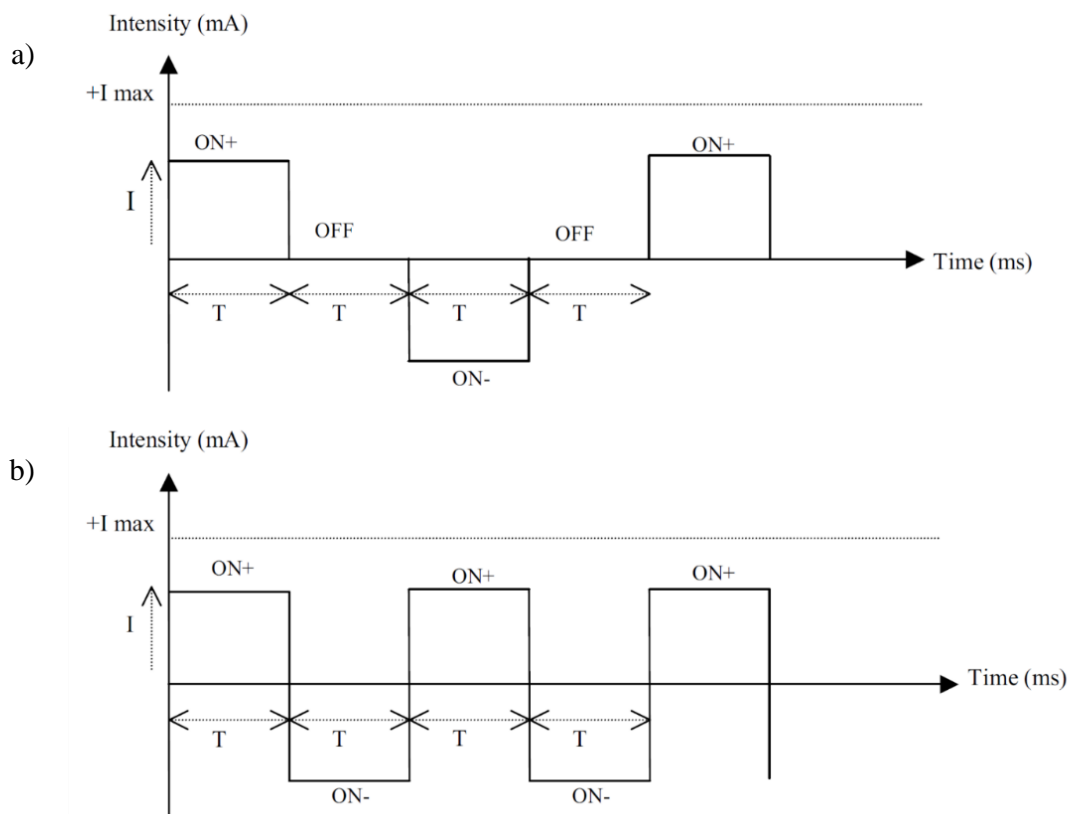



Figure 128 : (a) Signal d'injection adaptée aux mesures de polarisation spontanée tandis que l'option (b) Signal d'injection adaptée aux mesures de la mesure de la résistivité électrique.

Le protocole d'acquisition doit être prédéfini en amont par le biais du logiciel COMSYSPro de IRIS Instruments. Ce logiciel permet de définir les différents paramètres nécessaires pour effectuer la mesure. Il faut définir la fréquence du signal d'injection, l'intensité du courant, l'espacement inter-électrode, le type de configuration choisie pour le quadripôle.

Les données acquises sont stockées dans la mémoire interne qui peut stocker jusqu'à 999 points de mesures. Les données stockées sont transférées vers un ordinateur et sauvegardées dans le format désiré avec le logiciel dédié *Prosys II*.

Les caractéristiques principales de ce système de mesure sont synthétisées dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Image de de système d'acquisitions Syscal Junior de IRIS Instruments et les spécifications techniques de l'appareil.

	Emetteur	
	Tension	0 - 800 Vpp
	Courant	0 - 1250 mA
	Puissance	Convertisseur DC/DC 100W autocontrôlé
	Batterie	12V
	Récepteur	
	Durée de l'impulsion	250ms, 500ms, 1s, 2s, 4s, 8s
	Nb. voies	2 ou 24 / 48 / 72 avec switch
	Résolution / Précision	1 μ V / 0.2%
	Stockage	44800 mesures

Cet appareil est plutôt adapté pour des applications géophysiques, tels que le suivi de pollution, le contrôle de salinité, la détermination de profondeur du socle, l'imagerie des socles altérés et la recherche d'eau souterraine (profondeur et épaisseur des aquifères). Cependant lors de l'utilisation du Syscal dans un contexte de forte résistance, l'appareil peut montrer certaines difficultés de mesures.

2. Système d'acquisition MSL Datascan

Un autre système d'acquisition dont l'utilisation a été envisagée pour effectuer les mesures des propriétés électriques est le système Datascan 7321 produit et commercialisé par Measurement Systems Ltd.

Ce type de système ne permet pas de générer le signal d'injection car il ne possède aucun système d'émission intégré. En effet, ce système est plutôt conçu comme un système permettant de connecter des capteurs aux ordinateurs standards pour la surveillance en temps réel et l'acquisition de données. Il est compatible avec un grand nombre de capteurs, comme des convertisseurs 4-


20mA, des thermocouples, capteurs de résistance, etc. Cependant, il est aussi possible d'effectuer des mesures directes de potentiels électriques à partir d'entrées analogiques [102].

L'appareil principale est constitué de 8 voies d'entrée analogiques permettant d'enregistrer des différents types de signaux. Cependant il est possible d'augmenter le nombre de voix disponibles avec des modules. Chaque module Datascan 7021 permet d'augmenter par 8 le nombre de voix jusqu'à un total de 256.

Les systèmes Datascan sont configurés et contrôlés à l'aide de commandes simples basées sur ASCII transmises via un connecteur série. Il est possible de créer des applications personnalisées basées sur un langage de programmation standard tel que Visual Basic, C ou C++. Les systèmes Datascan permettent aussi l'utilisation de logiciels comme Orchestrator, DasyLab, LabView et autres pour la configuration de l'appareil et la visualisation des mesures.

Les caractéristiques principales de ce système de mesure sont synthétisées dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Image de de système d'acquisitions Datascan 7321 et les spécifications techniques de l'appareil.

			Caractéristiques générales	
			Nb. de voix	8 (extensible jusqu'à 256)
Type de capteurs	Tension DC, thermocouples, 4-20 mA			
Capacités de mesure (voltage DC)				
Gamme de voltage	Résolution			
	16 bits	14 bits		
10 V	320 μ V	1.28 mV		
1.3V,	40 μ V	160 μ V		
150mV	5 μ V	20 μ V		
20mV	0.625 μ V	2.5 μ V		

Le système Datascan est spécialement conçu pour des applications dans le domaine industriel et scientifique. Ce type de systèmes est particulièrement adapté pour effectuer des mesures avec des capteurs pour des application ou la vitesse de mesure n'est pas la priorité principale. En effet, la fréquence d'enregistrement peut varier en fonction du type de montage et du nombre de modules constituant le système d'acquisition. En effet, dans la pratique la fréquence d'échantillonnage maximale est d'environ 1 Hz. Ce type de fréquence d'échantillonnage est trop faible pour effectuer des mesures de variation de résistivité électrique car les signaux électriques utilisés pendant les

expériences effectuées dans le cadre de ce projet de recherche, correspondent à des signaux carrés dont la fréquence du signal est de 137 Hz.


3. Oscilloscope TiePie HS5

Le système Handyscope HS5 est un oscilloscope digital commercialisé par TiePie. Ce système de mesure est composé d'un générateur de fonction d'onde permettant de générer différents types de signaux électriques, et d'un système de mesure avec deux voies d'entrée permettant d'effectuer deux mesures simultanément.

Le logiciel Multi Channel spécialement conçu par TiePie est fourni avec le système Handyscope HS5. Ce logiciel permet de contrôler et programmer le générateur de fonction d'onde et le système d'acquisition.

Les caractéristiques principales de ce système de mesure sont synthétisées dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Image de de l'oscilloscope TiePie HS5 et les spécifications techniques de l'appareil.

	Récepteur	
	Résolution / Précision	8, 12, 14, 16 bit / 0.25% - 0.1 %
	Fréquence d'échantillonnage	500 MSa/s
	Bande passante maximale	250 MHz
	Générateur de fonction d'onde (émetteur)	
	Plage de tension générée	-12 V à 12 V (24 Vpp)
	Fréquence	1 μ Hz à 40 MHz
	Intensité du courant	10 μ A
	Type de signal (fonction)	Sinus, carré, triangulaire, pulse et arbitraire
	Résolution / Précision	14 bit / 0,4 %

Ce système est très versatile et facile d'utilisation. Cependant, il ne permet pas d'effectuer des mesures multi-électrodes directement. Pour pouvoir effectuer des mesures de la variation de la résistivité électrique avec plus de deux électrodes il est nécessaire de développer un système de switch matriciel. Un tel système peut être utilisé pour switcher la fonction des différentes électrodes

en fonction d'un protocole prédéfini permettant de contrôler l'ouverture et la fermeture des différents interrupteurs constituant le switch matriciel.

4. Synthèse des avantages et inconvénients des différents systèmes

Chaque appareil testé au cours de ce projet de recherche présente différents avantages et des inconvénients par rapport aux autres. En effet, les différents systèmes testés ont été conçus pour des applications particulières et donc présentent des capacités de mesure qui peuvent différer. Les avantages et les inconvénients des différents systèmes de mesure testés sont présentés sur le Tableau 21.


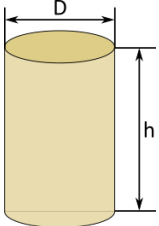
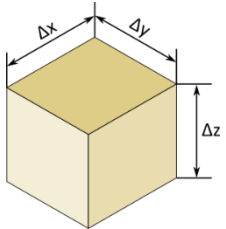
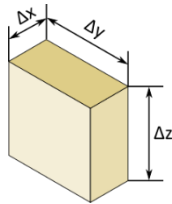
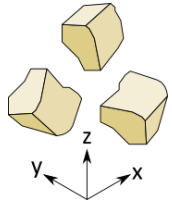
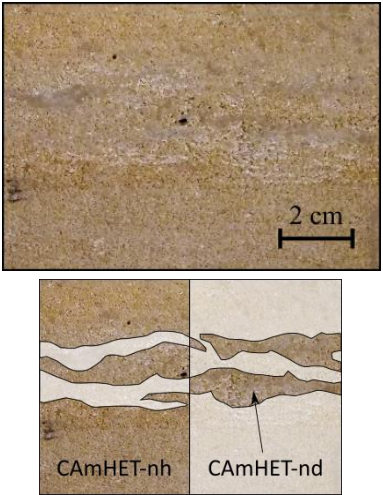
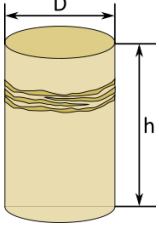
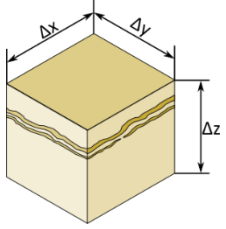
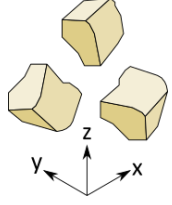
Tableau 21 : Synthèse des avantages et inconvénients des différents systèmes d'acquisition et appareils décrits dans cet Annexe.


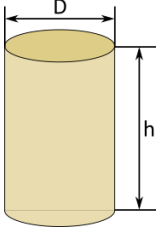
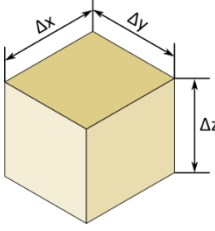
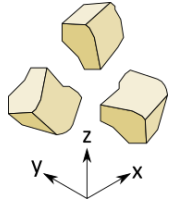
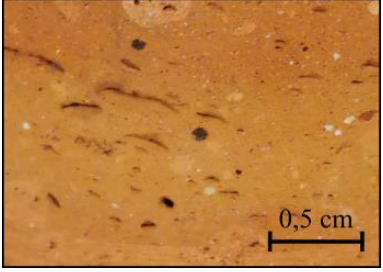
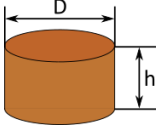
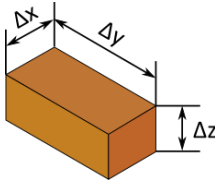
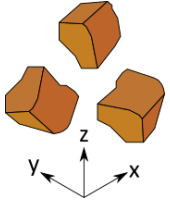
Système	Avantages	Inconvénients
Syscal Junior Switch	<ul style="list-style-type: none"> Facilité d'utilisation Emetteur de signal intégré Mesures multi-électrodes Choix de l'intensité du courant 	<ul style="list-style-type: none"> Mesures non retenues pour des matériaux très résistifs Choix limité de la fréquence de signal injecté
Datascan 7321	<ul style="list-style-type: none"> Facilité d'ampliation du nombre de voies (conception en modules) Nombre de voies maximale très élevée (256 entrées analogique) 	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'utilisation d'un appareil externe pour générer le signal d'injection Programmation de l'appareil peut intuitive Fréquence d'échantillonnage faible (1 Hz)
Handyscope HS5	<ul style="list-style-type: none"> Facilité d'utilisation Emetteur de signal intégré Générateur de fonction d'onde permettant de choisir parmi un grand éventail de paramètres pour générer le signal électrique 	<ul style="list-style-type: none"> Ne permet pas d'effectuer des mesures multi-électrodes de manière directe L'intensité du courant électrique est fixé par l'appareil

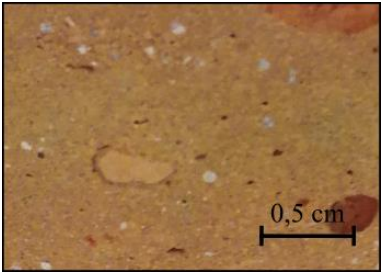
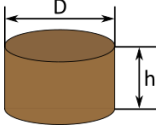
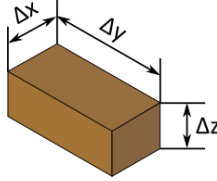
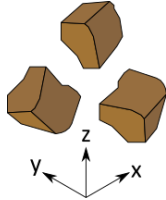
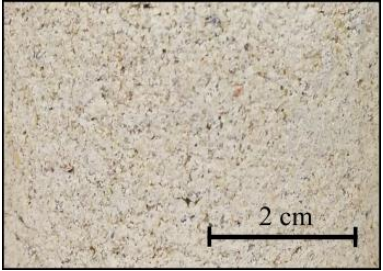
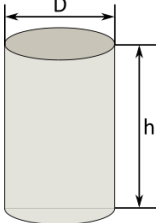
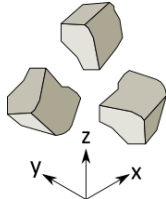
Comme il est montré dans le chapitre IV le choix final du système de mesure utilisé au cours de ce projet de recherche correspond à l'oscilloscope Handyscope HS5 commercialisé par TiePie. Malgré le fait qu'il a été nécessaire de développer un système de switch matriciel pour son utilisation dans un cadre de mesure multi-électrode, l'utilisation du Handyscope HS5 permet d'obtenir des données de meilleure qualité du fait de sa grande résolution et précision de mesure. De plus, le système est très facile d'utilisation grâce à l'interface graphique très intuitive du logiciel de contrôle *Multi Channel*

ANNEXE II

**Synthèse des échantillons
utilisés pour la caractérisation
des propriétés pétrophysiques**

Matériau		Type d'échantillon							
Calcaire moellon (CA)		Cylindre		Bloc 1		Bloc 2		Chutes irrégulières	
									
		D (mm)	50,82 ± 0,2	Δx (mm)	80,51 ± 1,85	Δx (mm)	3,6 ± 2,51	Volume	~1 cm ³
		H (mm)	65,8 ± 1,18	Δy (mm)	83,08 ± 1,17	Δy (mm)	80,64 ± 0,3		
		Nb. totale échantillons	7	Δz (mm)	79,86 ± 2,36	Δz (mm)	81,45 ± 0,68	Nb. totale échantillons	3
Nb. totale échantillons	5			Nb. totale échantillons	2				
Matériau		Type d'échantillon							
Calcaire moellon (CA)		Cylindre		Bloc 1		Bloc 2		Chutes irrégulières	
						-			
		D (mm)	51,01 ± 0,74	Δx (mm)	79,23 ± 0,56	Δx (mm)	-	Volume	~1 cm ³
		H (mm)	65,67 ± 0,63	Δy (mm)	80,12 ± 2,28	Δy (mm)	-		
		Nb. totale échantillons	4	Δz (mm)	85,45 ± 6,52	Δz (mm)	-	Nb. totale échantillons	nh
Nb. totale échantillons	2			Nb. totale échantillons	0	nd	3		
Matériau		Type d'échantillon							

Calcaire moellon (CA)	Cylindre	Bloc 1	Bloc 2	Chutes irrégulières				
			-					
	D (mm)	50,82 ± 0,1	Δx (mm)	8	Δx (mm)	-	Volume	~1 cm ³
	H (mm)	66,2 ± 0,71	Δy (mm)	8	Δy (mm)	-		
	Nb. totale échantillons	4	Δz (mm)	8	Δz (mm)	-	Nb. totale échantillons	3
Nb. totale échantillons			2	Nb. totale échantillons	0			
Matériau	Type d'échantillon							
Calcaire moellon (CA)	Cylindre	Bloc 1	Bloc 2	Chutes irrégulières				
		-						
	D (mm)	51,11 ± 0,6	Δx (mm)	-	Δx (mm)	30,31 ± 0,16	Volume	~1 cm ³
	H (mm)	19,68 ± 2,49	Δy (mm)	-	Δy (mm)	79,8 ± 1,79		
	Nb. totale échantillons	3	Δz (mm)	-	Δz (mm)	24,45 ± 3,4	Nb. totale échantillons	3
Nb. totale échantillons			0	Nb. totale échantillons	4			
Matériau	Type d'échantillon							
Calcaire moellon (CA)	Cylindre	Bloc 1	Bloc 2	Chutes irrégulières				

			-					
	D (mm)	51,08 ± 0,1	Δx (mm)	-	Δx (mm)	30,63 ± 0,21	Volume	~1 cm ³
	H (mm)	25,91 ± 2,6	Δy (mm)	-	Δy (mm)	80,2 ± 0,09		
	Nb. totale échantillons	3	Δz (mm)	-	Δz (mm)	30,62 ± 4,04	Nb. totale échantillons	3
Nb. totale échantillons			0	Nb. totale échantillons	4			
Matériau	Type d'échantillon							
Calcaire moellon (CA)	Cylindre	Bloc 1	Bloc 2	Chutes irrégulières				
			-		-			
	D (mm)	50 ± 0,01	Δx (mm)	-	Δx (mm)	-	Volume	~1 cm ³
	H (mm)	72,8 ± 0,25	Δy (mm)	-	Δy (mm)	-		
	Nb. totale échantillons	7	Δz (mm)	-	Δz (mm)	-	Nb. totale échantillons	3
Nb. totale échantillons			0	Nb. totale échantillons	0			
Matériau	Type d'échantillon							
Calcaire moellon (CA)	Cylindre	Bloc 1	Bloc 2	Chutes irrégulières				



D (mm)	-	Δx (mm)	-	Δx (mm)	-	Volume	~1 cm ³
H (mm)	-	Δy (mm)	-	Δy (mm)	-		
Nb. totale échantillons	0	Δz (mm)	-	Δz (mm)	-	Nb. totale échantillons	3
		Nb. totale échantillons	0	Nb. totale échantillons	0		

ANNEXE III
Traitements non retenus de
la thermographie IR

1. Traitement n°1

Un premier test est effectué en utilisant une méthode d'élimination du bruit. A cette fin, le spectre normalisé de la température de référence (mesure sur l'aluminium froissé) est soustrait du spectre normalisé de la Température de l'échantillon afin d'obtenir le spectre de la Température de l'échantillon corrigé.

La première étape consiste à calculer les valeurs de température normalisée de l'échantillon ($T_{EchNorm}$) (72) et de la référence ($T_{RefNorm}$) (73) :

$$T_{EchNorm} = \frac{(T_{Ech}(i) - \min(T_{Ech}))}{(\max(T_{Ech}) - \min(T_{Ech}))} \quad (72)$$

$$T_{RefNorm} = \frac{(T_{Ref}(i) - \min(T_{Ref}))}{(\max(T_{Ref}) - \min(T_{Ref}))} \quad (73)$$

Le signal de température de la référence est par la suite (73) soustrait du signal de température de l'échantillon dans le domaine spectral. Le signal résultant est repassé au domaine temporel obtenant ainsi le signal de l'échantillon normalisé et corrigé (74) :

$$T_{EchCorNorm} = \text{fft}^{-1} \left(\text{fft}(T_{EchNorm}) - \text{fft}(T_{RefNorm}) \right) \quad (74)$$

Le signal normalisé et corrigé est recalé en température, ce qui finalise le traitement des données (75) :

$$T_{EchCor} = T_{EchNormCor} * (\max(T_{Ech}) - \min(T_{Ech})) + \min(T_{Ech}) \quad (75)$$

Finalement, le signal corrigé est superposé aux signaux initiaux de l'échantillon et de la référence, afin d'apprécier qualitativement l'effet du traitement, Figure 129.

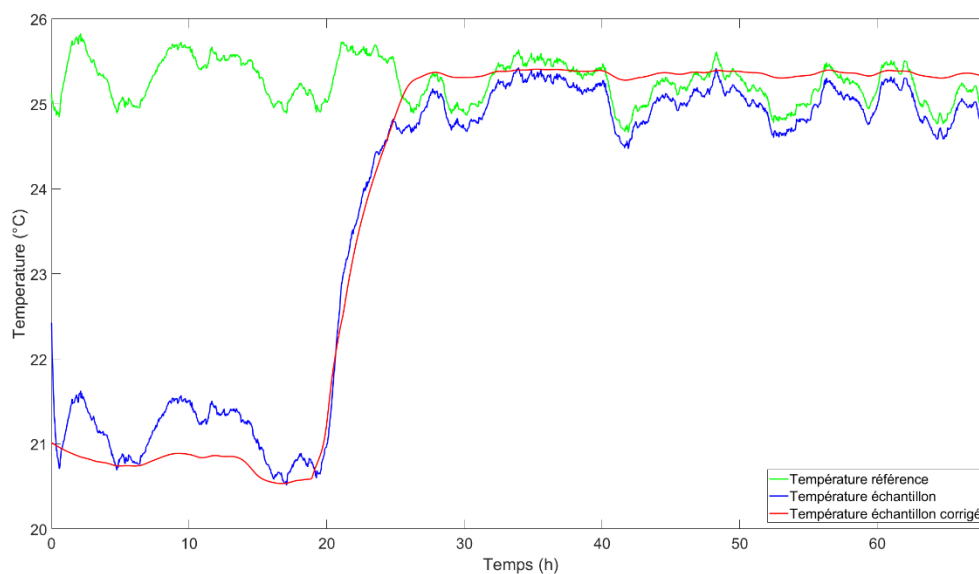


Figure 129 : Présentation du signal résultant après l'application du traitement n°1 comparé au signal de l'échantillon et le signal de la référence.

Cette méthode montre une bonne capacité de traitement du bruit en éliminant les variations indésirables mesurées à la surface de l'échantillon et corrélées à celles mesurées sur la référence. Cependant, nous notons que cet algorithme induit systématiquement une augmentation indésirable de l'amplitude thermique du signal d'origine.

2. Traitement n°2

La deuxième méthode de filtrage testée consiste à analyser les raies de fréquences communes détectées sur les densités spectrales de puissance de la température référence et de la température échantillon. Dès lors que des domaines fréquentiels communs sont identifiés pour les deux types de signaux, un filtre est créé et son application permet d'atténuer les effets du bruit de l'environnement de mesures. L'illustration de ce mode de traitement est présentée sur la Figure 130.

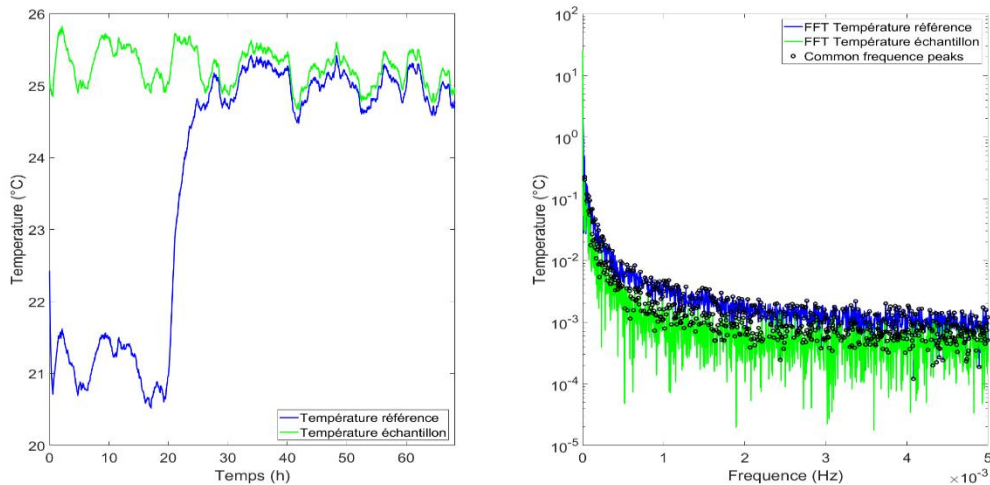


Figure 130 : Représentation du signal de l'échantillon et de la référence et la Transformée de Fourier montrant les raies fréquentielles communes entre les deux signaux.

Le filtre choisi pour atténuer les fréquences caractéristiques du signal de référence sur le signal de l'échantillon est un filtre de type Band-Stop. Comme indiqué sur la Figure 131, ce type de filtre, également connu sous le nom de filtre de rejet de bande, laisse passer toutes les fréquences à l'exception de celles d'une bande d'arrêt spécifiée qui sont grandement atténuées.

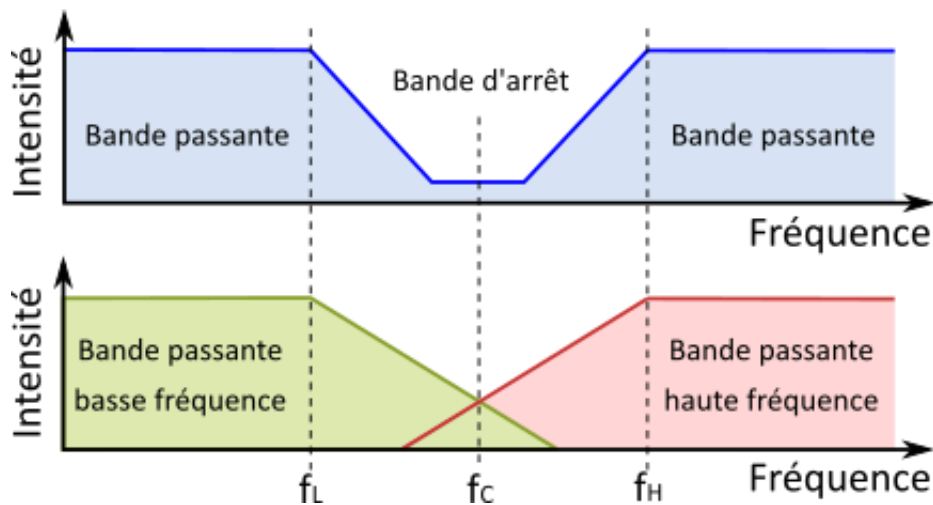


Figure 131 : Représentation graphique du fonctionnement du filtre Band-Stop.

Dans le cas présent, la bande d'arrêt est représentée par un filtre Notch, une forme très sélective du filtre d'arrêt de bande (Band-Stop) qui peut être utilisé pour rejeter une seule ou une très petite bande de fréquences plutôt qu'une bande passante entière de différentes fréquences.

Ce filtre est particulièrement adapté pour nettoyer le signal de température de l'échantillon car il faut atténuer les différents pics de fréquences communes entre le signal de référence et le signal de l'échantillon sans affecter les autres fréquences caractéristiques du signal d'origine.

Le filtre s'applique dans le domaine de Fourier avant de reconvertir le signal filtré dans le domaine temporel via le modèle mathématique suivant (76) :

$$T_{ech\ corr}^{\circ} = fft^{-1}(fft(T_{ech}^{\circ}) \cdot fft(filtre))$$

Le signal résultant après le filtrage est comparé au signal original comme cela est illustré dans la Figure 132.

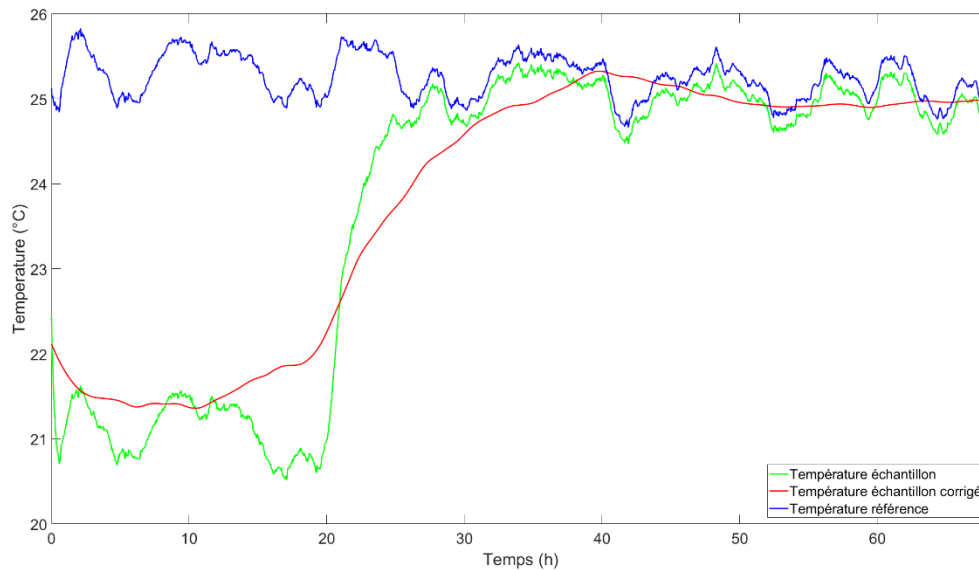


Figure 132 : Présentation du signal résultant après l'application du traitement n°2 comparé aux signaux de l'échantillon et de référence d'origine.

Le traitement effectué par la méthode de filtrage montre une diminution conséquente des variations induites par les effets environnementaux en gardant l'amplitude d'origine du signal mesuré sur l'échantillon. Cependant, l'effet du filtre montre un effet négatif en modifiant de manière importante l'allure de la courbe d'origine du signal mesuré sur l'échantillon.

ANNEXE IV

Résultats de la quantification
teneur en eau par les méthodes
imagerie IR et électrique sur
les assemblages multicouches

1. Réponse thermique des assemblages

1.1. Assemblage CAmHET-BAc-CA

La configuration de cet assemblage se caractérise par un bloc de calcaire inférieur CAmHET (calcaire moyen appareil hétérogène) surmonté par deux blocs de briques BAc et enfin un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joint de mortier MM.

Le bloc calcaire inférieur CAmHET est décomposé en treize niveaux de 5 mm de hauteur. Le mortier MM est décomposé en onze niveaux : le joint inférieur est composé de deux niveaux de 5 mm de hauteur. Le joint vertical est divisé en six niveaux de 5 mm de hauteur et 10 mm de largeur. Le joint supérieur se compose de trois niveaux de 5 mm de hauteur. Les briques BAc sont divisées chacune en six niveaux de 5 mm de hauteur et 35 mm de largeur. Le bloc calcaire supérieur CA est divisé en seize niveaux de 5 mm de hauteur, comme illustré sur la Figure 133.

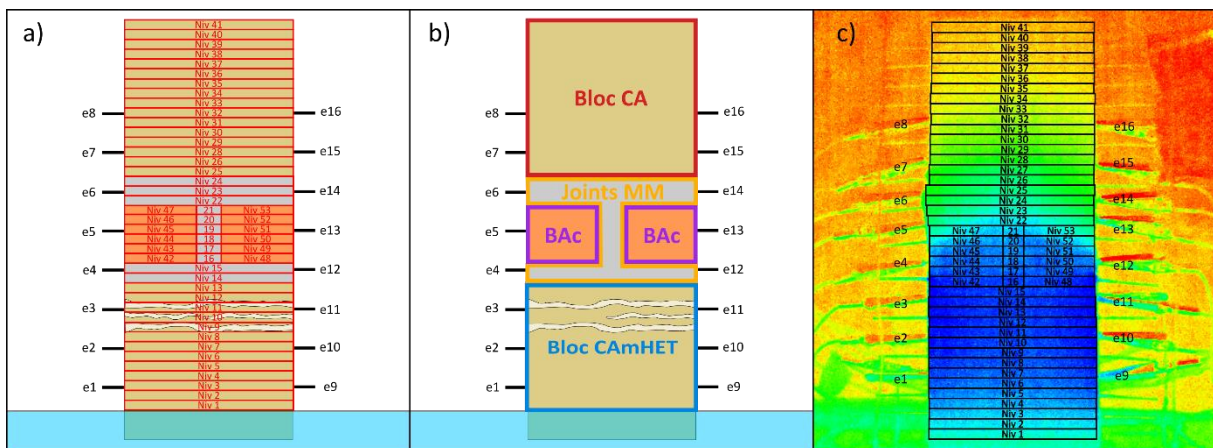


Figure 133 : a) Thermogramme de l'assemblage CAmHET-BAc-CA montrant la discrétisation en niveaux. b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage.

En additionnant les différents masses moyennes de chaque niveau pour tous les types de matériaux différents, il est possible de calculer la prise de masse correspondant à l'absorption d'eau de chacun de ces matériaux. La Figure 134 montre les évolutions de la prise de masse des différents matériaux en fonction du temps.

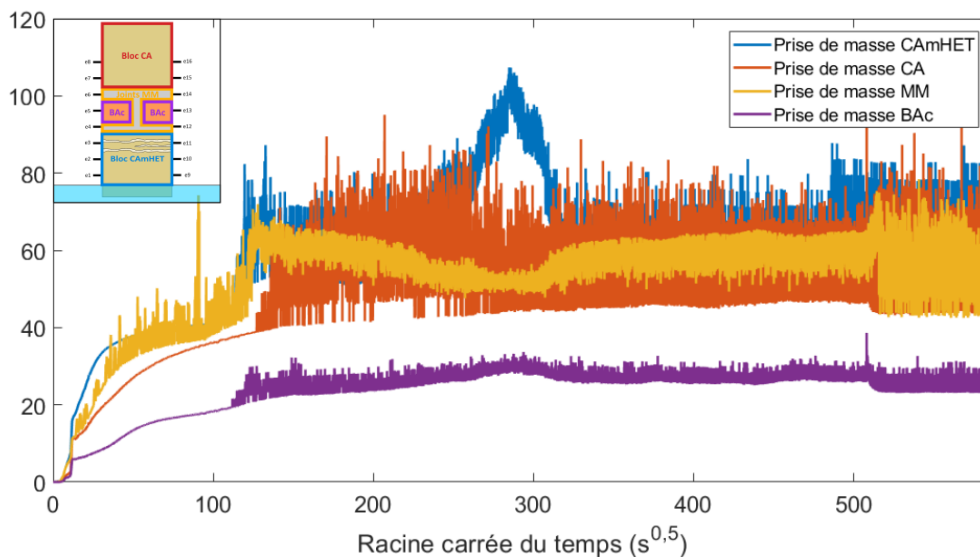
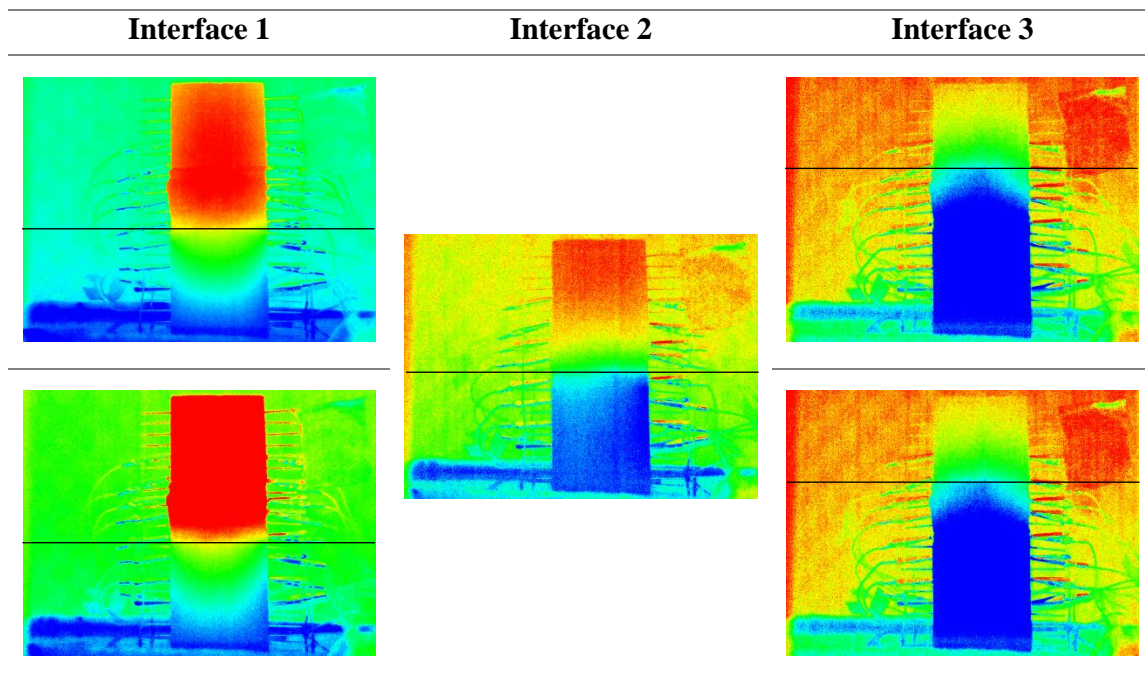


Figure 134: Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.

Il est possible d'observer que l'apport de masse le plus important est celui du bloc calcaire inférieur. Ce bloc de calcaire est l'élément le plus proche de la source d'eau et présente un grand volume de stockage par sa taille et sa porosité. Le niveau calcaire supérieur est le deuxième élément avec un plus grand apport concernant la prise de masse. Malgré le fait que c'est l'élément le plus éloigné de la réserve d'eau, il présente un grand volume dû à sa taille et à sa porosité. Les niveaux de mortier présentent une évolution de la prise de masse intermédiaire. Ce sont ces éléments qui permettent de fournir en eau les autres éléments supérieurs au bloc calcaire. Malgré cela, son apport en eau est moindre que pour le calcaire supérieur du fait de son plus faible volume et une porosité moins importante. Les niveaux de briques correspondent aux éléments ayant le plus faible impact sur le volume d'eau stocké pour les raisons évoquées dans le chapitre précédent.

Les interactions entre le front d'imbibition et les interfaces entre différents types d'imbibition sont analysées à partir des thermogrammes. La première interface CAmHET / MM, est atteinte par le front d'imbibition dans un intervalle de 21 à 38 minutes après le début de l'expérience. La deuxième interface MM / BAc est atteinte par le front d'imbibition après 2 h 20 min après le début l'expérience. L'arrivée du front à la troisième interface s'effectue très tardivement pendant le cours de l'expérience. En effet, ce n'est qu'à 90 h 30 min (soit 4 h 50 min avant la fin de l'expérience) que le premier contact front/interface est établie et se poursuit jusqu'à la fin de l'expérience.

Tableau 22 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHET-BAC-CA.



La prise de masse totale correspondant à l'absorption d'eau est calculée en additionnant les apports des différents matériaux. La Figure 135 présente les courbes de la variation de la prise de masse au cours du temps mesurée avec la méthode infrarouge et la méthode gravimétrique, ainsi que le modèle mathématique permettant de représenter l'évolution de masse mesurée par la méthode IR sous forme de régression exponentielle.

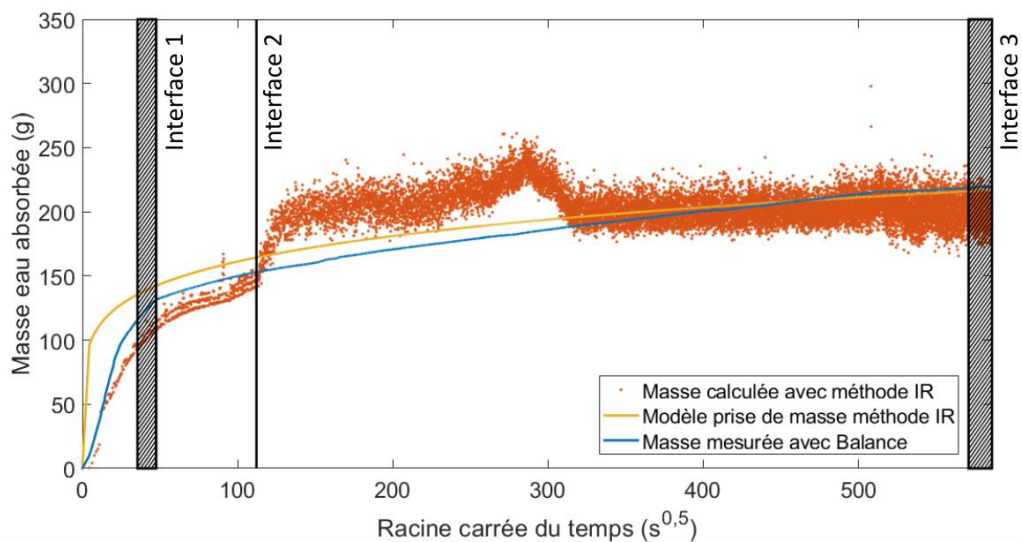


Figure 135 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAMHET-BAC-CA.

Les résultats correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode de thermographie IR présentent une très grande similitude sur la première partie de la courbe. Les premières heures de l'expérience (entre 0 s et $1,2 \cdot 10^4$ s) la masse calculée par les mesures thermographiques et la masse réelle est très similaire avec une très faible sous-estimation par rapport à la masse réelle. Entre $1,2 \cdot 10^4$ et $1 \cdot 10^5$ secondes la variation entre les valeurs mesurées par la méthode infrarouge et les valeurs mesurées par la méthode gravimétrique augmente légèrement et présente une surestimation de la valeur de masse réelle. Entre $1 \cdot 10^5$ secondes et la fin de l'expérience, les valeurs calculées se rapprochent de la masse réelle mais présentent une forte dispersion. De manière générale, la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode IR et la méthode gravimétrique montre une différence de 18,177 g, soit un écart moyen correspondant au 8,2% de la masse d'eau totale absorbée (220,5 g).

Comme pour les cas précédents, le modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse constitué à partir des IR (Modèle prise de masse méthode IR sur le graphique) présente un coefficient de corrélation R^2 de 0,588. Malgré cela, la courbe du modèle comparée à l'évolution réelle de la prise de masse montre un tracé très semblable. En effet, l'erreur absolue moyenne du modèle est de 5,064 g seulement. Cela correspond à une erreur moyenne de 2,3% par rapport à la masse totale d'eau absorbée. Cette différence extrêmement faible permet d'affirmer que le modèle mathématique permet de représenter de manière très fiable la variation de la masse d'eau au sein de l'assemblage.

La Figure 136 présente l'évolution des erreurs entre les données calculées et du modèle mathématique par rapport aux données réelles mesurées avec la balance.

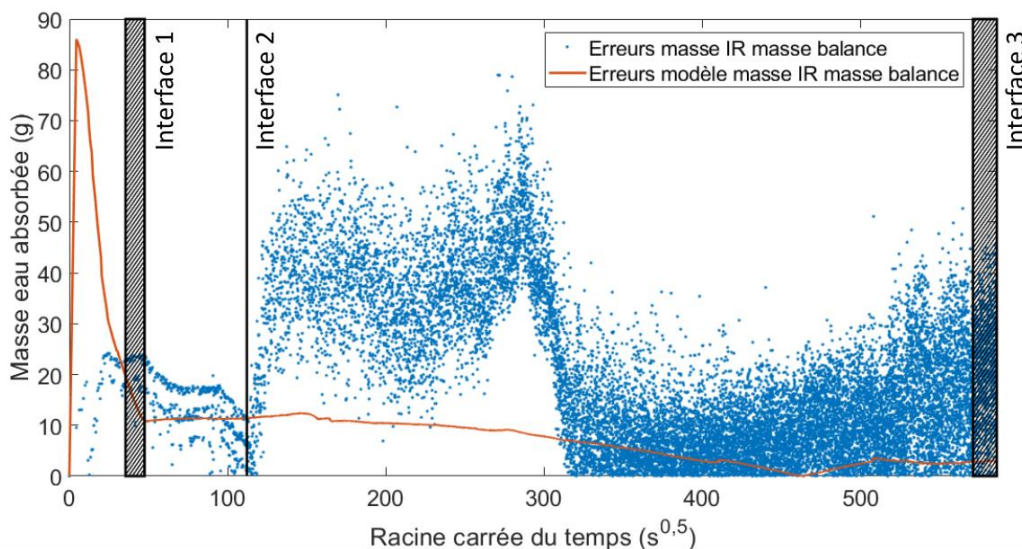


Figure 136 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAMHET-BAC-CA.

Pour cet assemblage l'évolution des erreurs, l'amplitude des erreurs de la masse calculée (masse IR) est relativement basse et stable jusqu'à l'arrivée du front sur l'interface 2 ($t = 8,58 \cdot 10^3$ s). Après la deuxième interface nous observons une diminution rapide des amplitudes des erreurs suivi par

une augmentation aussi rapide à partir de $1,4 \cdot 10^4$ s. Entre $1,4 \cdot 10^4$ s et $1 \cdot 10^5$ s, les amplitudes des erreurs présentent les valeurs plus élevées et nous observons une augmentation de la dispersion. A partir de $1 \cdot 10^5$ s, l'amplitude des erreurs diminue tout en présentant une grande dispersion.

Concernant l'évolution des erreurs entre le modèle mathématique et les mesures gravimétriques nous observons une diminution rapide de l'amplitude des erreurs entre le début de l'expérience et la première interface. Entre la fin de l'intervalle de l'interface 1 et $2,5 \cdot 10^4$ s les amplitudes restent stables. Au-delà de $2,5 \cdot 10^4$ s, les amplitudes des erreurs diminuent jusqu'à atteindre des valeurs presque nulles vers la fin de l'expérience.

1.2. Assemblage CAmHET-BAf-CA

La configuration de cet assemblage est constituée d'un bloc de calcaire inférieur CAmHET (calcaire moyen appareil hétérogène) surmonté par deux blocs de briques anciennes foncées BAF au-dessus desquels il y a un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joints de mortier.

Le bloc calcaire inférieur CAmHET est décomposé en douze niveaux de 5 mm de hauteur. Le mortier MM est décomposé en 12 niveaux : le joint inférieur est composé de trois niveaux (deux de 5 mm et un de 2 mm) ; le joint vertical est divisé en six niveaux de 5 mm de hauteur et 10 mm de largeur. Le joint supérieur se compose de trois niveaux de 5 mm de hauteur. Les briques BAF sont divisées chacune en six niveaux de 5 mm de hauteur et 35 mm de largeur. Le bloc calcaire supérieur CA est décomposé en dix-sept niveaux de 5 mm de hauteur (Figure 137).

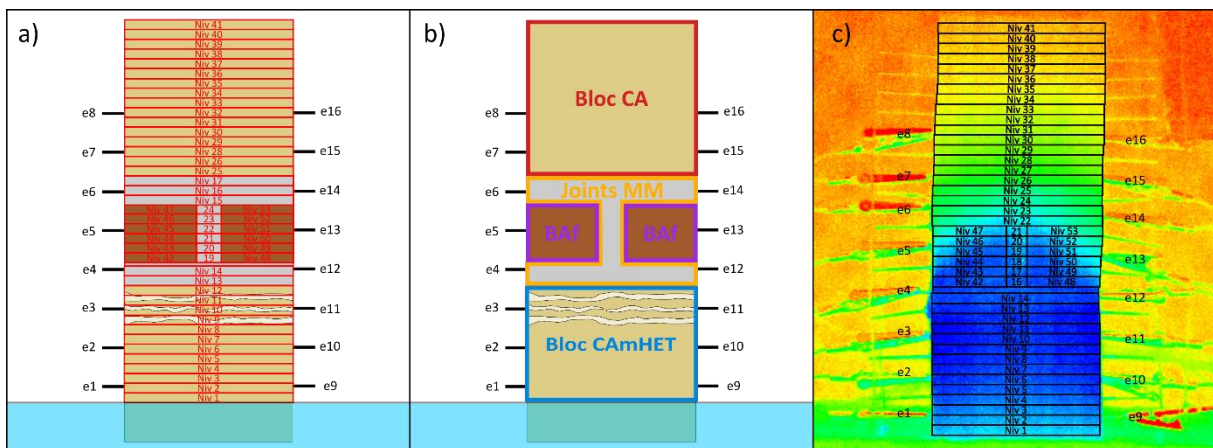


Figure 137 : a-b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CAmHET-BAf-CA montrant la discrétisation en niveaux.

En additionnant les différentes masses moyennes de chaque niveau pour tous les types de matériaux, il est possible de calculer la prise de masse correspondant à l'absorption d'eau de chacun de ces matériaux. La Figure 138 montre les évolutions de la prise de masse des différents matériaux en fonction du temps.

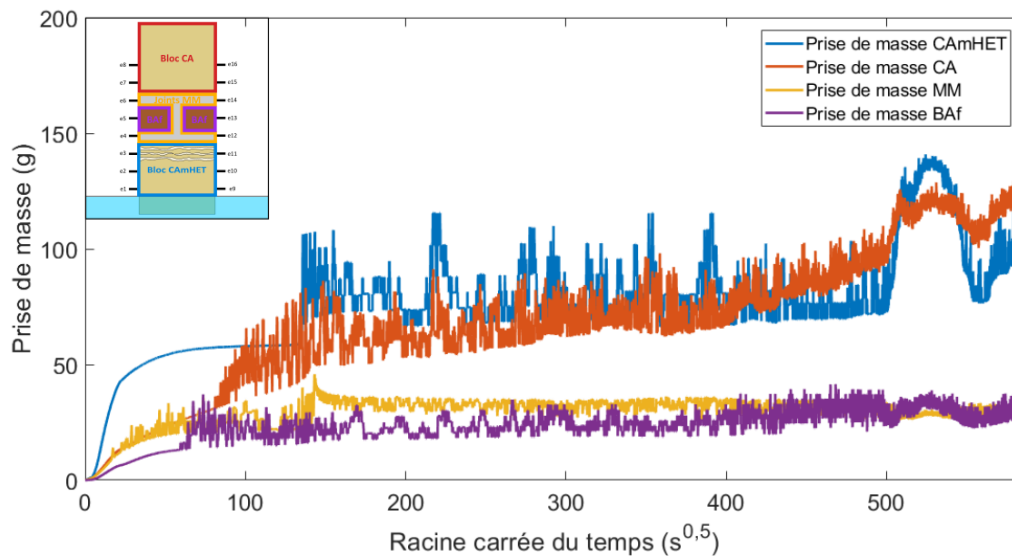
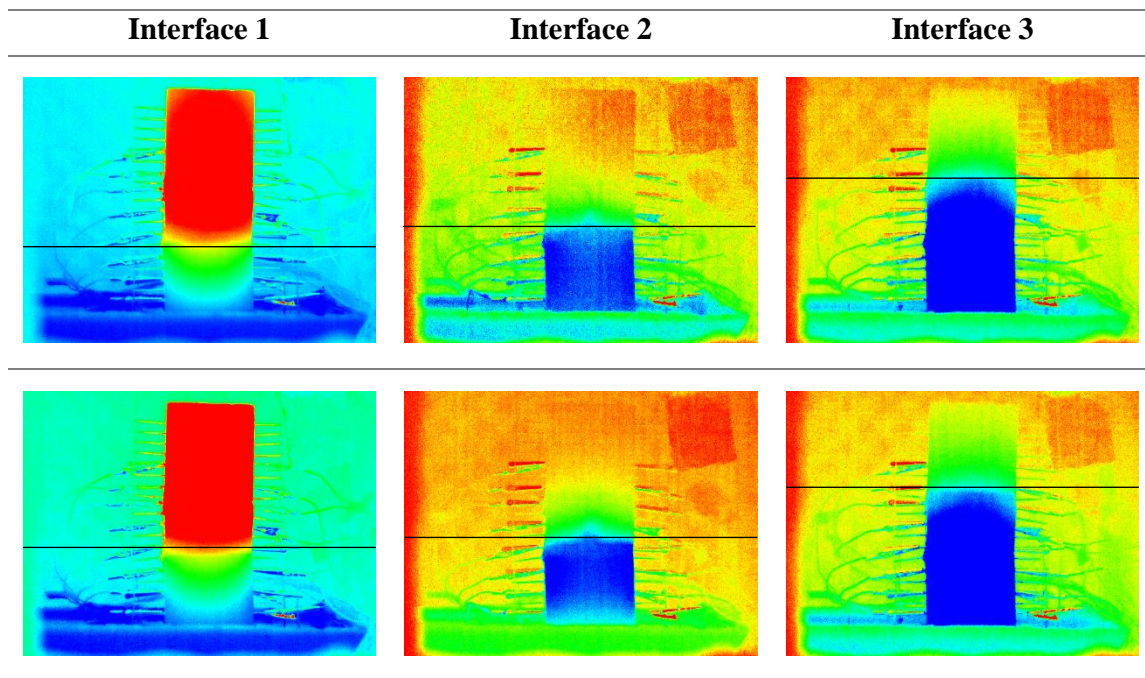


Figure 138: Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

L'élément présentant l'apport de masse le plus important est le bloc calcaire inférieur. Ce bloc de calcaire est l'élément le plus proche de la source d'eau et présente un grand volume de stockage par sa taille et sa porosité. Malgré sa distance à la réserve d'eau, le niveau calcaire supérieur est le deuxième élément avec un plus grand apport concernant la prise de masse, dû à son grand volume et à sa porosité élevée. Les niveaux de mortier présentent une évolution de la prise de masse intermédiaire. Ces éléments fournissent l'eau des autres éléments supérieurs au premier bloc calcaire. Malgré cela, cet apport en eau dans la zone mortier est moindre que pour le calcaire supérieur du fait de son plus faible volume et une porosité moins importante. Les niveaux de briques correspondent à l'élément ayant le plus faible impact sur le volume d'eau stockée. En effet, compte tenu de sa faible porosité et la taille moins importante, ce matériau a un rôle moins important que les autres éléments sur la courbe de prise de masse.

Comme pour les cas précédents, l'analyse des images thermiques permet de déterminer les moments où le front d'imbibition atteint les différentes interfaces entre matériaux. La progression du front d'imbibition est rapide en début d'expérience, mais présente des irrégularités du fait du caractère hétérogène du bloc CAmHET. En conséquence, l'arrivée du front sur la première interface CAmHET / MM s'étale sur un intervalle de temps compris entre $5 \cdot 10^2$ s et $2,3 \cdot 10^3$ s. La deuxième interface MM / BAF est atteinte par le front d'imbibition pendant l'intervalle temporel compris entre $1,7 \cdot 10^4$ s et $2,2 \cdot 10^4$ s après le début l'expérience. L'arrivée du front à la troisième interface s'effectue entre $3,3 \cdot 10^5$ s et la fin de l'expérience.

Tableau 23 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.



La prise de masse totale correspondant à l'absorption d'eau est calculée en additionnant les apports des différents matériaux. La Figure 139 présente les courbes de la variation de la prise de masse au cours du temps mesurée avec la méthode infrarouge et la méthode gravimétrique, ainsi que le modèle mathématique permettant de représenter l'évolution de masse mesurée par la méthode IR sous forme de régression exponentielle.

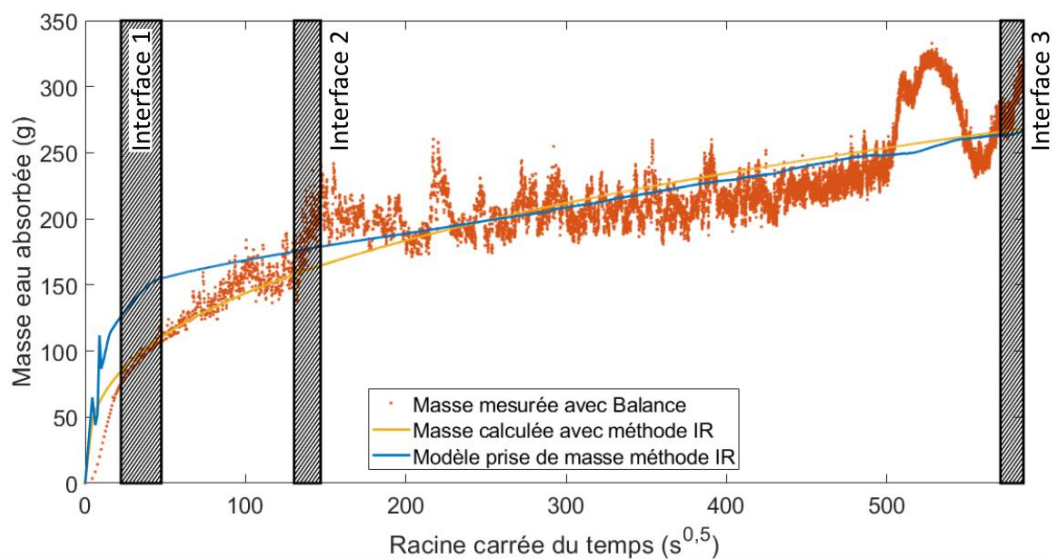


Figure 139 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de régression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

La comparaison des résultats présentés sur la Figure 139, correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode de thermographie IR, montre une tendance générale très similaire voir presque identique. Toute variation est quantifiée par la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode IR et la méthode gravimétrique. La valeur moyenne des erreurs absolues pour cet assemblage est de 19,694 g, soit un 9,6% de la masse totale d'eau imbibée et enregistrée par la méthode gravimétrique.

La qualité d'ajustement du modèle mathématique permettant de décrire l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode IR est déterminée par le coefficient de corrélation R^2 . Pour cet assemblage, le coefficient de corrélation R^2 est égal à 0,639. Malgré une valeur de régression modérément faible, la courbe du modèle est très proche de la courbe d'évolution réelle de la prise de masse. En effet, la moyenne des erreurs absolues est de 5,64 g ce qui correspond au 2,8% de la masse d'eau totale absorbée. Pour ces raisons, il est possible d'affirmer que le modèle mathématique retenu permet de représenter de manière fiable les résultats de la mesure de la prise de masse obtenue à partir de la méthode IR comme le montre la Figure 139.

La Figure 140 présente l'évolution des erreurs entre les données calculées (masse IR) et du modèle mathématique (modèle masse IR) par rapport aux données réelles mesurées avec la balance (masse balance).

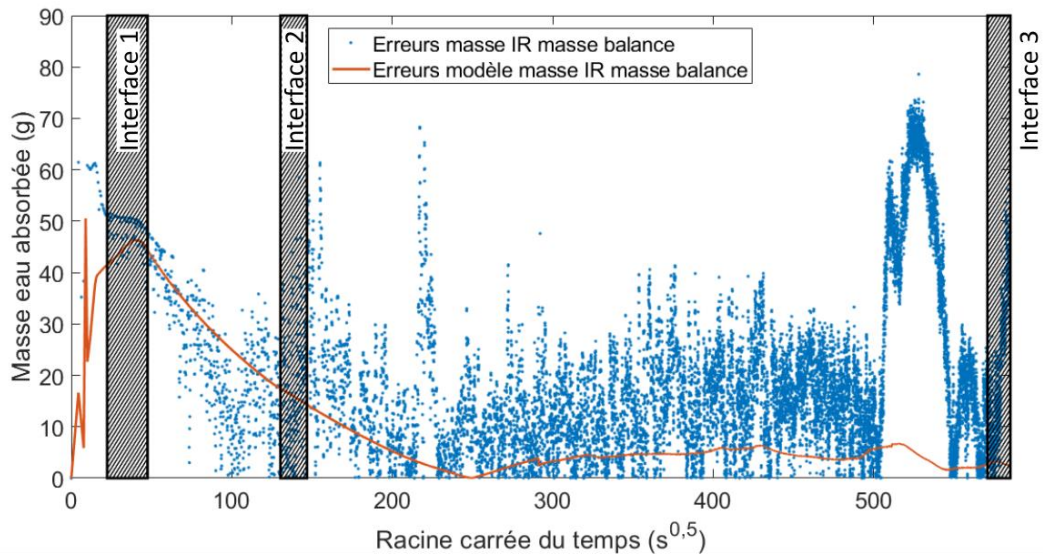


Figure 140 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAMHET-BAf-CA.

L'évolution des valeurs absolues des erreurs est caractérisée par une diminution progressive entre le début de l'expérience et l'arrivée du front à l'interface 2. Pendant cette diminution progressive, il est possible d'observer un palier de stabilisation des amplitudes des erreurs correspondant avec l'intervalle définissant l'arrivée du front à l'interface 1. A partir de l'interface 2, les erreurs présentent une distribution très dispersée jusqu'à la fin de l'expérience.

Dans le cas des erreurs entre le modèle mathématique et les valeurs réelles (masse balance) il est possible d'observer une légère augmentation en début de l'expérience et la fin de l'interface 1 (l'amplitude des erreurs restant toujours inférieure à celle des erreurs entre les valeurs calculées (masse IR) et celles mesurées (masse balance)). Après la première interface, les amplitudes des erreurs diminuent de manière soutenue jusqu'à atteindre un minimum vers $6,2 \cdot 10^4$ s. A partir de $6,2 \cdot 10^4$ s les erreurs du modèle restent faibles et relativement constantes jusqu'à la fin de l'expérience.

1.3. Assemblage CAMHOM-BAf-CA

L'assemblage ici présenté, est constitué d'un bloc de calcaire inférieur CAMHOM (calcaire moyen appareil homogène) surmonté par deux blocs de briques anciennes foncées BAf au-dessus desquelles il y a un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joints de mortier (Figure 141).

Le bloc calcaire inférieur est décomposé en quatorze niveaux de 5mm de hauteur. Le mortier est décomposé en treize niveaux (onze niveaux de 5 mm de hauteur et deux niveaux de 0.2 mm de hauteur). Les briques sont divisées chacun en 6 niveaux de 5 mm de hauteur. Le bloc de calcaire supérieur CA est décomposé en 16 niveaux de 5 mm de hauteur.

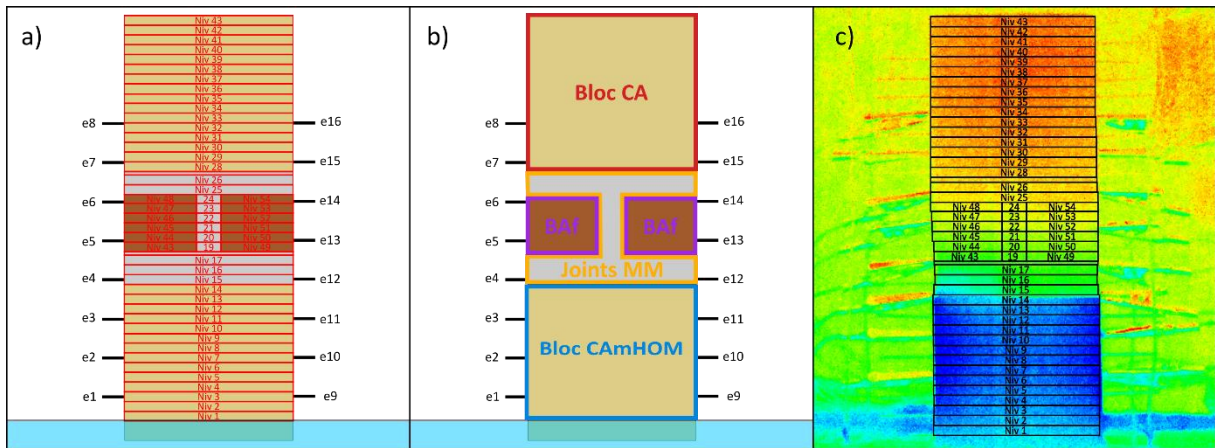


Figure 141 : a-b) Schéma montrant la discrétisation en niveaux par rapport aux différents matériaux constitutifs de l'assemblage. c) Thermogramme de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA montrant la discrétisation en niveaux.

En additionnant les différentes masses moyennes de chaque niveau pour tous les types de matériaux, il est possible de calculer la prise de masse correspondant à l'absorption d'eau de chacun de ces matériaux. La Figure 142 montre les évolutions de la prise de masse des différents matériaux en fonction du temps.

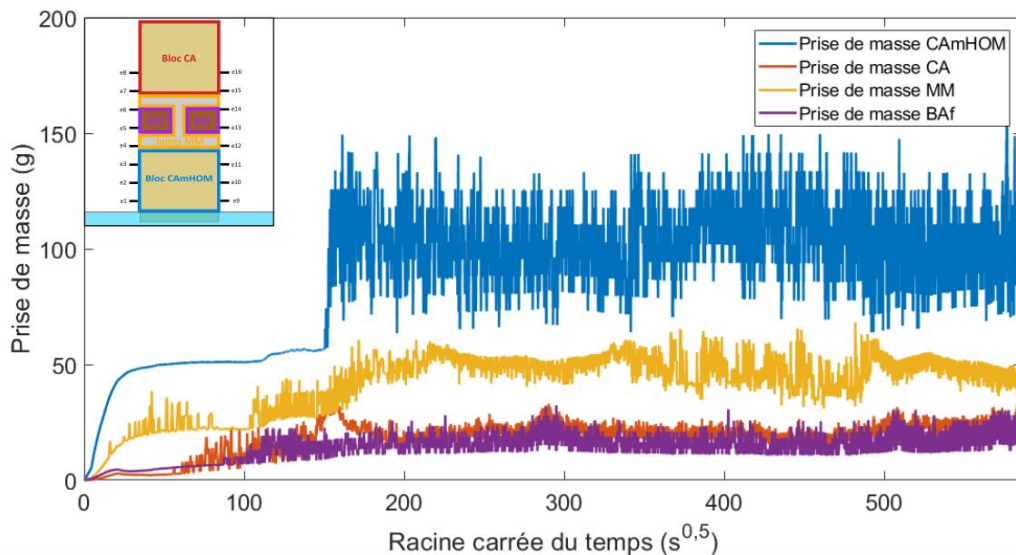
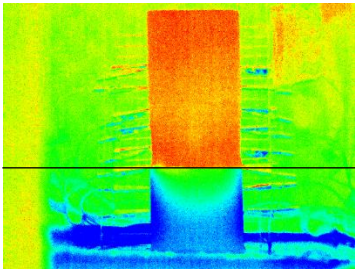
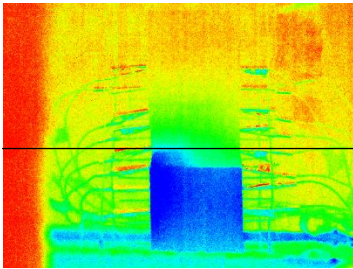
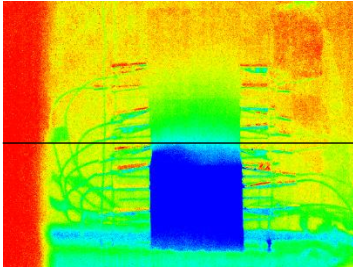


Figure 142 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode IR, pour chaque composante de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.

L'élément présentant l'apport de masse le plus important est le bloc calcaire inférieur. Ce bloc de calcaire est l'élément le plus proche de la source d'eau et présente un grand volume de stockage par sa taille et sa porosité. Le mortier est le second élément de l'assemblage ayant le plus grand impact sur le stockage de l'eau, suivi par les briques et le calcaire supérieur. Dans ce cas, le calcaire supérieur est l'élément ayant la moindre capacité de stockage apparente. En effet, malgré sa grande taille et sa grande porosité, le flux d'eau est interrompu au niveau des différentes interfaces.

La remontée du front d'imbibition est analysée à partir des images thermiques. C'est à partir des thermogrammes que sont déterminés les instants où le front d'imbibition atteint les différentes interfaces entre matériaux. La progression du front d'imbibition est rapide en début d'expérience. L'arrivée du front sur la première interface CAMHOM / MM se produit 580 s après le début de l'expérience. La deuxième interface MM / BAf est atteinte par le front d'imbibition pendant l'intervalle compris entre $1 \cdot 10^4$ s et $2,1 \cdot 10^4$ s après le début l'expérience. Dans ce cas, la ramontée du front est très ralentie après la deuxième interface au point que la troisième interface n'est jamais atteinte. Ce ralentissement est dû au fait que pendant la manipulation de l'assemblage, celui-ci s'est décollé suivant le plan défini par cette interface.

Tableau 24 : Thermogrammes montrant l'arrivée du front d'imbibition aux principales interfaces entre matériaux de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.

Interface 1	Interface 2
	
	

La Figure 143 présente les résultats correspondant à l'évolution de la prise de masse totale au cours du temps avec la méthode infrarouge et avec la méthode gravimétrique. Sur la même figure sont présentés les modèles adaptés à l'évolution de la prise de masse mesurée avec la méthode infrarouge. Comme pour les autres modèles, celle-ci correspond à une fonction exponentielle.

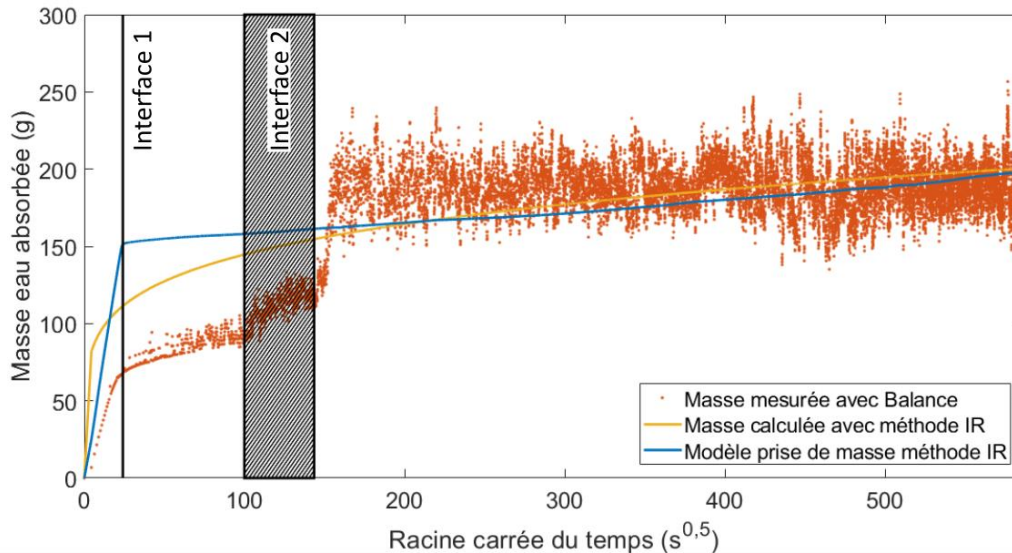


Figure 143 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode IR avec le modèle de regression et les moments où le front d'imbibition atteint les principales interfaces de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.

Sur les résultats présentés sur la Figure 143, comparant l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode de thermographie IR, il est possible d'observer que la tendance générale est très similaire. Pour cet assemblage, les différences entre la masse IR et la masse réelle est de 18,639 g ce qui correspond à un pourcentage de 9,4% de la capacité de stockage maximale mesurée avec la méthode gravimétrique ; la valeur de la masse d'eau maximale stockée étant de 198,3 g.

Le modèle mathématique traduisant l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode IR présente un coefficient de corrélation R^2 de 0,37. Ce résultat est légèrement plus bas que pour les assemblages précédents. En effet, cet assemblage est caractérisé par une différence entre la masse calculée avec la méthode IR et les masses mesurées avec balance sur la partie initiale de l'expérience. Celle-ci est plus importante que pour les autres assemblages. Malgré cette différence initiale, la valeur moyenne des erreurs absolues reste peu élevée avec une valeur de 5,843 g. Cette faible valeur permet d'affirmer que le modèle mathématique retenu est représentatif des résultats de la mesure de la prise de masse obtenue à partir de la méthode IR pour cet assemblage.

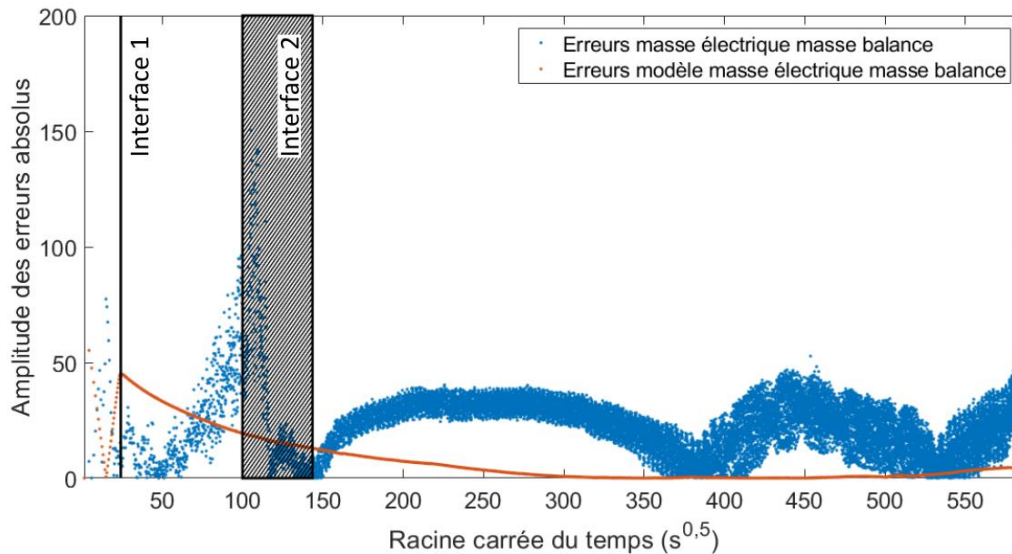


Figure 144 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode IR pour l'assemblage CAmHOM-BAf-CA.

L'évolution des valeurs absolues des erreurs est caractérisée par une augmentation progressive entre le début de l'expérience et l'arrivée du front à l'interface 1. Entre la première et la deuxième interface l'amplitude des erreurs continue à diminuer très légèrement de manière constante. Pendant la période temporelle définissant l'arrivée du front à l'interface 2, les valeurs des erreurs absolues diminuent mais présentent une dispersion croissante. Au-delà de l'interface 2 les erreurs présentent une distribution constante mais très dispersée jusqu'à la fin de l'expérience.

Dans le cas des erreurs entre le modèle mathématique et les valeurs réelles (masse balance) il est possible d'observer une diminution puis une augmentation de l'amplitude des erreurs avant d'atteindre l'interface 1. Après la première interface, les amplitudes des erreurs diminuent de manière soutenue jusqu'à atteindre un minimum vers $4,5 \cdot 10^4$ s. A partir de $4,5 \cdot 10^4$ s les erreurs du modèle restent faibles et relativement constantes jusqu'à la fin de l'expérience.

1.4. Synthèse des résultats avec la thermographie infrarouge

Ces premiers résultats de masses d'eau cumulées obtenus par thermographies IR et en considérant les différentes combinaisons de minéraux liés par le mortier montrent très distinctement deux étapes dans le processus du transfert de masse :

- Une période dynamique en début d'essai que notre méthodologie peine à reproduire,
- Une période probablement quasi statique que notre méthodologie reproduit très correctement et ce malgré le caractère complexe des assemblages.

A ce stade, ces résultats obtenus sans résoudre explicitement le problème thermo-hydrique sont très instructifs au sens où nos travaux permettent de marquer la distinction entre les deux périodes. Les

hypothèses retenues pour le développement de la méthode d'estimation des masses imbibées (processus quasi statique fonction du temps par tranche) sont très bien adaptées pour estimer de façon empirique l'évolution de la masse d'eau imbibée dans le système. Cet aspect est renforcé par le processus de calibrage retenu : (i) méthode statique et (ii) via le processus de séchage des échantillons. Le recours aux mesures de champs 2D est un avantage certain pour permettre une discrétisation fine des surfaces analysées.

Un tel contexte reste cependant trop restrictif pour parvenir à interpréter la propagation de l'eau dans le calcaire au début de l'essai où le processus de transport prédomine le processus diffusif. Pour un tel cas, il conviendrait de compléter la méthode de calibrage en imposant un processus de remontée de l'eau plus rapide.

Les résultats concernant la qualité de la corrélation entre le modèle et les données obtenues d'après les mesures effectuées par la méthode IR, ainsi que le coefficient définissant l'écart absolu moyen entre les données obtenues à partir de la méthode IR et les valeurs de teneur en eau réelles sont présentés sur le Tableau 14.

2. Réponse électrique des assemblages

2.1. Assemblage CAmHET-BAc-CA

L'assemblage analysé dans cette partie est le CAmHET-BAc-CA, composé d'un bloc de calcaire inférieur CAmHET (calcaire moyen appareil hétérogène) surmonté par deux blocs de briques BAc et enfin un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joints de mortier MM. Sur la Figure 145 est présentée la discrétisation de l'assemblage en huit niveaux correspondant avec les huit couples d'électrodes utilisés pour effectuer les mesures avec la méthode électrique.

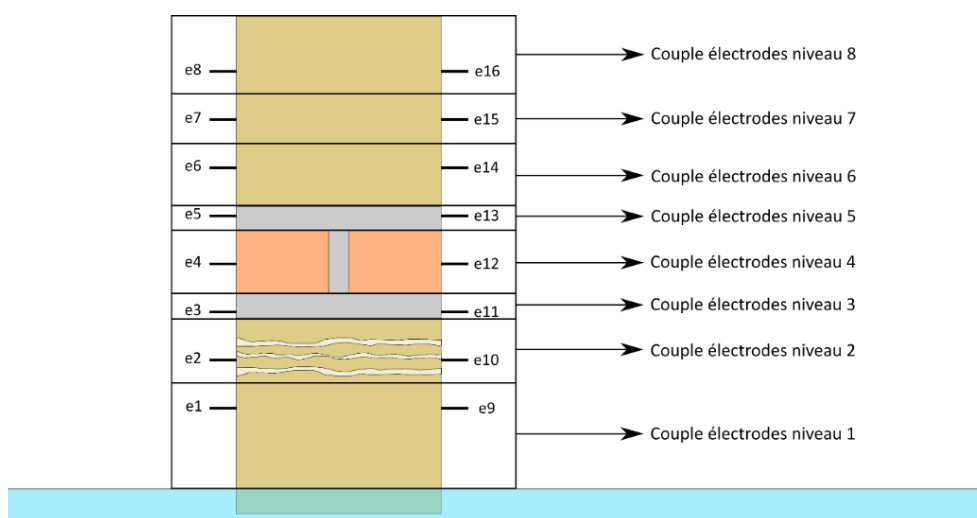


Figure 145 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAMHET-BAC-CA.

Les dimensions des volumes définissant les niveaux sur lesquels sont mesurés les variations de la résistivité électrique sont présentées au sein du Tableau 25.

Tableau 25 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHET-BAC-CA.

Niveaux	Matériau	Dimensions		
		X (cm)	y (cm)	z (cm)
1	CAMHET	8	8	4
2	CAMHET	8	8	2,5
3	MM	8	8	1
4	BAC et MM	8	8	3
5	MM	8	8	1,5
6	CA	8	8	2
7	CA	8	8	2
8	CA	8	8	4

La discrétisation de l'assemblage permet dans ce cas d'analyser la contribution des différents matériaux constituant l'assemblage. En additionnant les résultats de la prise de masse des différents niveaux, les résultats de la prise de masse par matériaux sur cet assemblage sont obtenus. Ces résultats sont présentés sur la Figure 146.

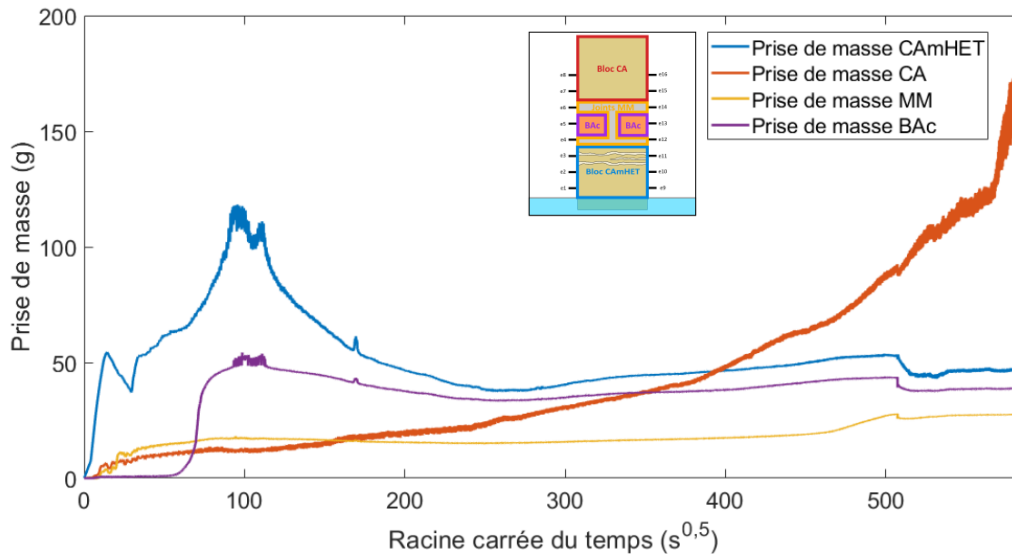


Figure 146 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurées à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAMHET-BAC-CA.

Comme pour le cas précédent, les courbes de la prise de masse des différents niveaux montrent une évolution cohérente par rapport à la position des différents niveaux. Malgré une certaine cohérence entre les apports des niveaux et l'évolution de la tendance générale des courbes, la somme des premiers niveaux de l'assemblage correspondant au matériau CAMHET présentent certaines anomalies en début de l'expérience. En effet, les premiers niveaux présentent un pic de masse dans les premiers instants de l'expérience suivi d'une diminution apparente avant la stabilisation de la mesure. Les matériaux plus en hauteur présentent un comportement plus logique avec une augmentation rapide de la prise de masse avec l'arrivée du front d'imbibition et une stabilisation de la saturation après le passage du front. Cette différence de comportement entre les différents niveaux est probablement dû à la vitesse de variation de la résistance de contact des électrodes avec l'augmentation de la saturation de l'assemblage.

Les résultats représentant la prise de masse totale sont obtenus en additionnant les contributions de la prise de masse mesurées sur chacun des huit niveaux discrétisant l'assemblage. La Figure 147 montre les résultats de la prise de masse totale calculée à partir de la méthode électrique avec son modèle mathématique comparé à la prise de masse réelle mesurée avec la méthode gravimétrique.

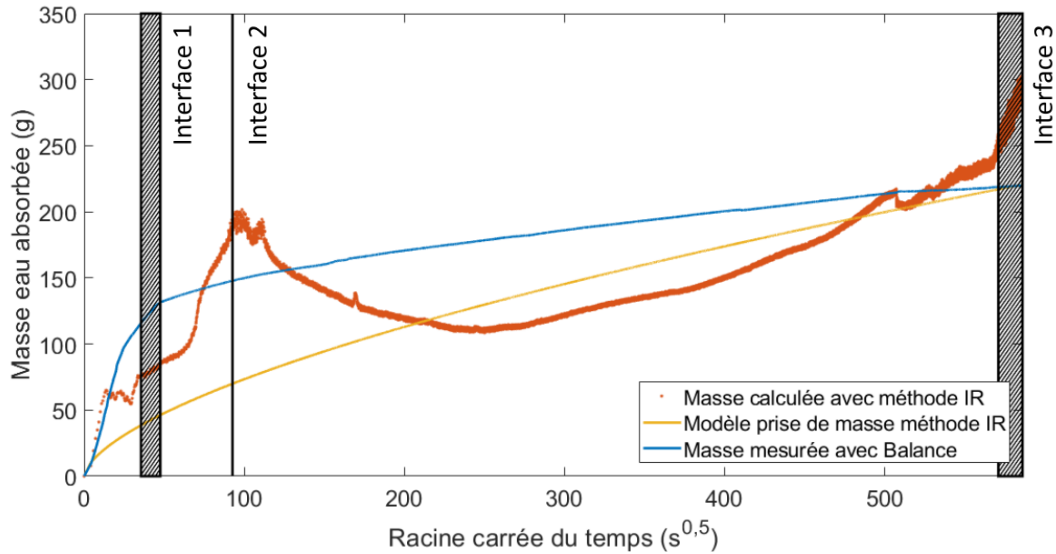


Figure 147 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de regression de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.

Les résultats présentés sur la Figure 147 et correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique montrent que la morphologie de la courbe de cette dernière, présente des différences non négligeables avec celle de la mesure par méthode gravimétrique. Cette différence de morphologie entre les deux courbes produit un offset se traduisant par un pic de la prise de masse à l'instant où le front d'imbibition atteint l'interface 2 suivi d'une diminution apparente de la masse jusqu'à $6 \cdot 10^4$ s à partir de quand l'évolution de la prise de masse reprend une tendance plus logique avec une augmentation progressive au cours du temps. Cette diminution apparente de la masse induit une sous-estimation non négligeable de la masse d'eau mesurée entre $6 \cdot 10^3$ s et $\sim 2,75 \cdot 10^5$ s.

Pour cet assemblage, le modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse obtenu à partir des résultats de la mesure par la méthode électrique présente un coefficient de corrélation R^2 de 0,6. La valeur relativement faible du coefficient s'explique par les variations abruptes du début de l'expérience et par le phénomène de diminution apparente de la masse qui induit une sous-estimation de la masse du modèle. L'écart entre le modèle et les valeurs de masse réelles (mesurées avec la balance) se réduit au cours de l'expérience.

La Figure 148 présente l'évolution des erreurs entre les données calculées et du modèle mathématique par rapport aux données réelles mesurées avec la balance.

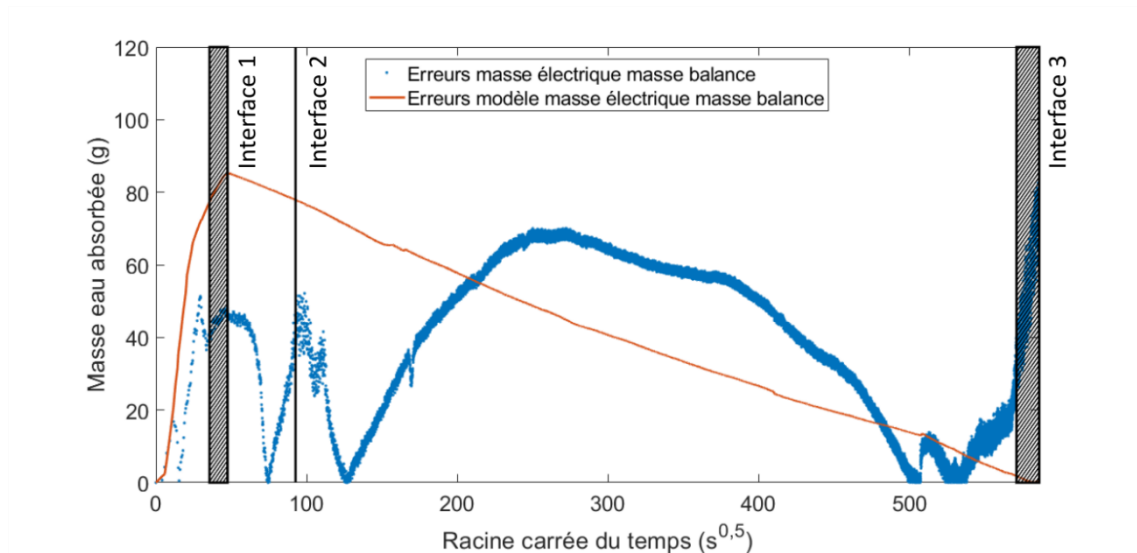


Figure 148 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAmHET-BAc-CA.

Pour cet assemblage l'évolution des erreurs, permet de visualiser l'impact des anomalies observées sur les résultats de prise de masse décrits précédemment. En effet, l'évolution des erreurs augmente progressivement pendant les premiers instants de l'expérience jusqu'à sa stabilisation autour de l'intervalle défini par l'interface 1. Un deuxième maximum de l'amplitude des erreurs est observé à l'instant défini par l'interface 2 ce qui correspond au pic de masse observé dans la courbe des résultats présentés précédemment. Après la deuxième interface nous observons une diminution rapide des amplitudes des erreurs suivie par une augmentation aussi rapide qui correspond à la période caractérisée par la diminution apparente de la masse. Après la phase de diminution apparente de la masse (correspondant avec le maximum des amplitudes des erreurs) l'amplitude des erreurs diminue jusqu'à la fin de l'expérience.

Concernant l'évolution des erreurs entre le modèle mathématique et les mesures gravimétriques nous observons une augmentation rapide de l'amplitude des erreurs (surpassant ceux des données mesurées avec la méthode électrique) entre le début de l'expérience et la première interface. Au-delà de la fin de l'intervalle de l'interface 1 les diminuent jusqu'à atteindre des valeurs presque nulles vers la fin de l'expérience.

2.2. Assemblage CAmHET-BAf-CA

L'assemblage CAmHET-BAf-CA est composé, en partie inférieure, d'un bloc de calcaire CAmHET (calcaire moyen appareil hétérogène) surmonté par deux blocs de briques BAf et enfin un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joints de mortier MM. Sur la Figure 149 est présentée la discrétisation de l'assemblage en huit niveaux correspondant avec les huit couples d'électrodes utilisés pour effectuer les mesures avec la méthode électrique.

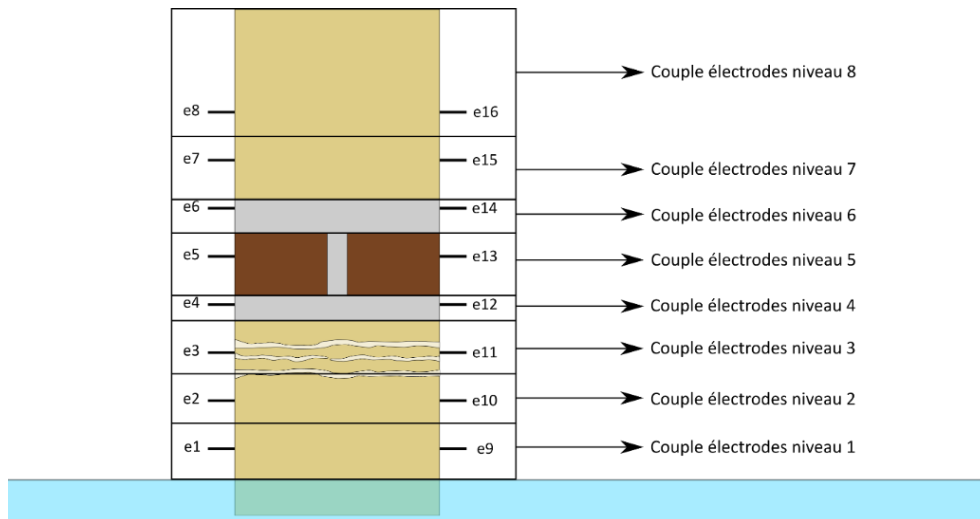


Figure 149 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAMHET-BAf-CA.

Les dimensions des volumes définissant les niveaux sur lesquels sont mesurées les variations de la résistivité électrique sont présentées dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHET-BAf-CA.

Niveaux	Matériau	Dimensions		
		x (cm)	y (cm)	z (cm)
1	CAMHET	8	8	2
2	CAMHET	8	8	2
3	CAMHET	8	8	2
4	MM	8	8	1,25
5	BAC et MM	8	8	3
6	MM	8	8	1,5
7	CA	8	8	2
8	CA	8	8	5,75

La discrétisation de l'assemblage permet dans ce cas d'analyser la contribution des différents matériaux constituant l'assemblage. La somme des valeurs de la prise de masse des différents niveaux correspondant aux différents matériaux permet l'obtention des résultats de la prise de masse par matériau. Ces résultats sont présentés sur la Figure 150.

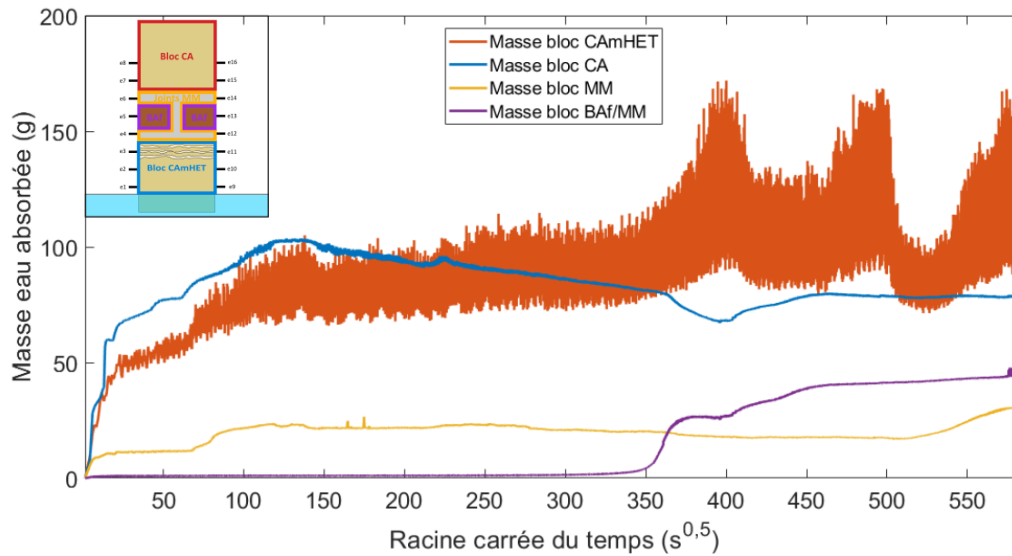


Figure 150 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

Comme précédemment, les courbes de la prise de masse des premiers niveaux correspondant au matériau CAmHET montrent une évolution cohérente en début d'expérience suivi d'une anomalie traduite par une diminution apparente de la masse. Dans ce cas, la diminution apparente de masse du matériau CAmHET reste très faible par rapport à celle observée pour l'assemblage précédent. Pour ce qui concerne la brique BAf et le mortier MM, ces matériaux montrent une évolution logique avec la physique de l'expérience avec des faibles valeurs de masse en début d'expérience et une augmentation rapide avec l'arrivée du front d'imbibition. Le signal du matériau calcaire CA définit par les niveaux 7 et 8 présente des anomalies concernant son augmentation rapide en début de l'expérience et la grande dispersion des valeurs calculées. Cela est dû au volume important de matériau qui est mesuré avec seulement deux paires d'électrodes.

La somme des contributions des différents matériaux est présentée sur la Figure 151 avec le modèle mathématique décrivant la prise de masse mesurée par la méthode électrique et la prise de masse réelle mesurée par la méthode gravimétrique.

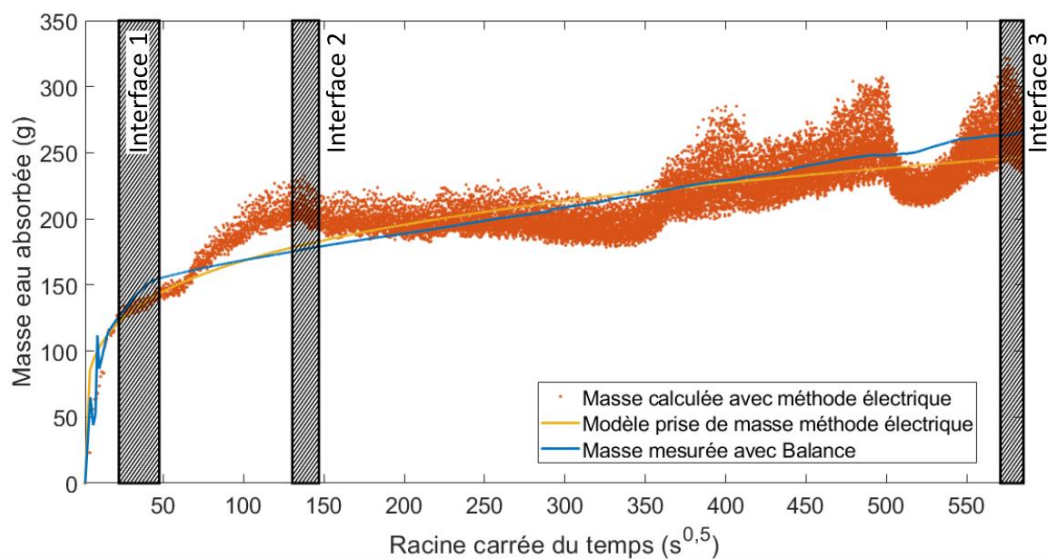


Figure 151 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de régression de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

Les résultats présentés sur la Figure 151 correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique montrent une très grande similitude malgré la forte dispersion des points. En effet, la tendance générale de la courbe de prise de masse calculée à partir de la méthode électrique, correspond assez bien avec celle de la mesure par méthode gravimétrique, ne montrant que des faibles anomalies caractérisées par une surestimation ou une sous-estimation ponctuelle de la prise de masse réelle.

Pour cet assemblage, le coefficient de corrélation R^2 permettant de caractériser la qualité du modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse à représenter les résultats de la mesure par la méthode électrique est de 0,59. La faible valeur du coefficient s'explique principalement par la dispersion des points de la courbe de prise de masse calculée par la méthode électrique. Malgré cela, il est évident que le modèle permet de décrire très bien la prise de masse réelle mesurée par la méthode gravimétrique.

La qualité d'ajustement des mesures et du modèle mathématique à la courbe de prise de masse réelle obtenue par la méthode gravimétrique est mesurée par la valeur moyenne des erreurs absolues. La valeur moyenne des erreurs absolues pour cet assemblage est de 19,694 g, soit 9,6% de la masse totale d'eau imbibée et enregistrée par la méthode gravimétrique.

La Figure 152 présente l'évolution des erreurs entre les données calculées (masse électrique) et du modèle mathématique (modèle masse électrique) par rapport aux données réelles mesurées avec la balance (masse balance).

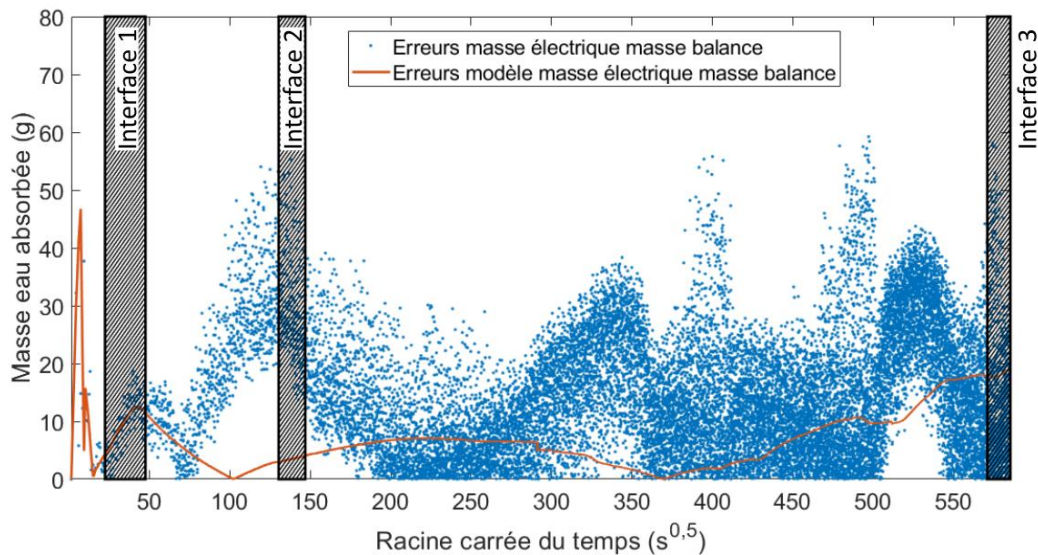


Figure 152 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

L'évolution des valeurs absolues des erreurs est caractérisée par une faible augmentation des erreurs dans les premiers instants de l'expérience. Cette tendance s'efface vers $2 \cdot 10^3$ s, ce qui correspond avec la fin de l'intervalle définissant l'arrivée du front sur l'interface 1. L'intervalle entre l'interface 1 et l'interface 2 est caractérisé par une diminution des erreurs suivie d'une augmentation rapide qui atteint son maximum pendant l'intervalle définissant l'arrivée du front à l'interface 2. A partir de l'interface 2, malgré une distribution très dispersée, les erreurs diminuent légèrement en présentant de légères augmentations sporadiques correspondant avec les anomalies observées sur les résultats précédents. Ces anomalies caractérisent une surestimation ou une sous-estimation ponctuelle de la prise de masse réelle.

2.3. Assemblage CAmHOM-BAf-CA

L'assemblage CAmHOM-BAc-CA est composé en partie inférieure d'un bloc de calcaire CAmHOM (calcaire moyen appareil homogène) surmonté par deux blocs de briques BAc et enfin un bloc de calcaire CA. Le tout est maintenu par des joints de mortier MM. Sur la Figure 153 est présentée la discrétisation de l'assemblage en huit niveaux correspondant aux huit couples d'électrodes utilisés pour effectuer les mesures avec la méthode électrique.

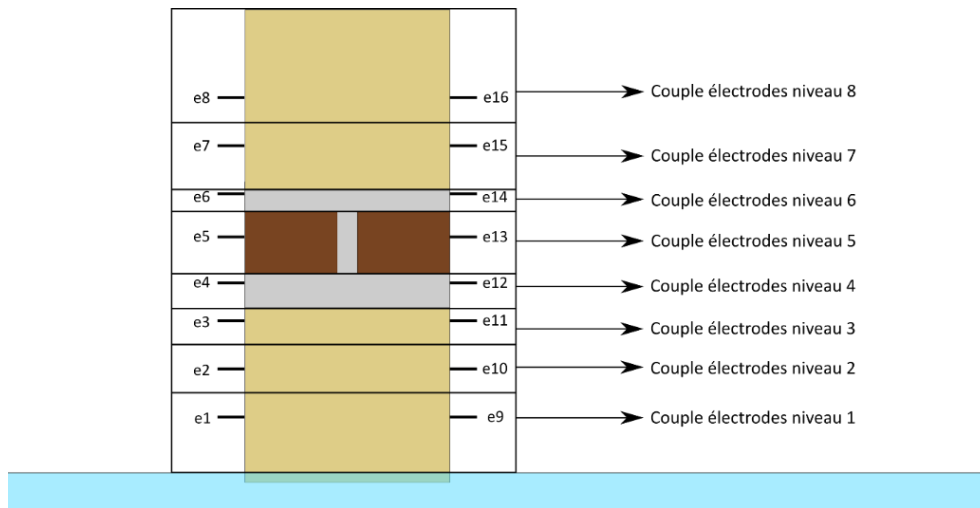


Figure 153 : Schéma représentant les différents niveaux divisant l'assemblage CAMHOM-BAf-CA

La taille des volumes définissant les niveaux sur lesquels sont mesurées les variations de la résistivité électrique est présentée sur le Tableau 27.

Tableau 27 : Informations sur la taille et matériaux composant les huit différents niveaux divisant la totalité de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.

Niveaux	Matériau	Dimensions		
		X (cm)	y (cm)	z (cm)
1	CAMHOM	8	8	4
2	CAMHOM	8	8	2
3	CAMHOM	8	8	1
4	MM	8	8	1,75
5	BAf et MM	8	8	3
6	MM	8	8	1,25
7	CA	8	8	3
8	CA	8	8	5

Les résultats de la prise de masse des différents niveaux définis sur cet assemblage sont présentés sur la Figure 154.

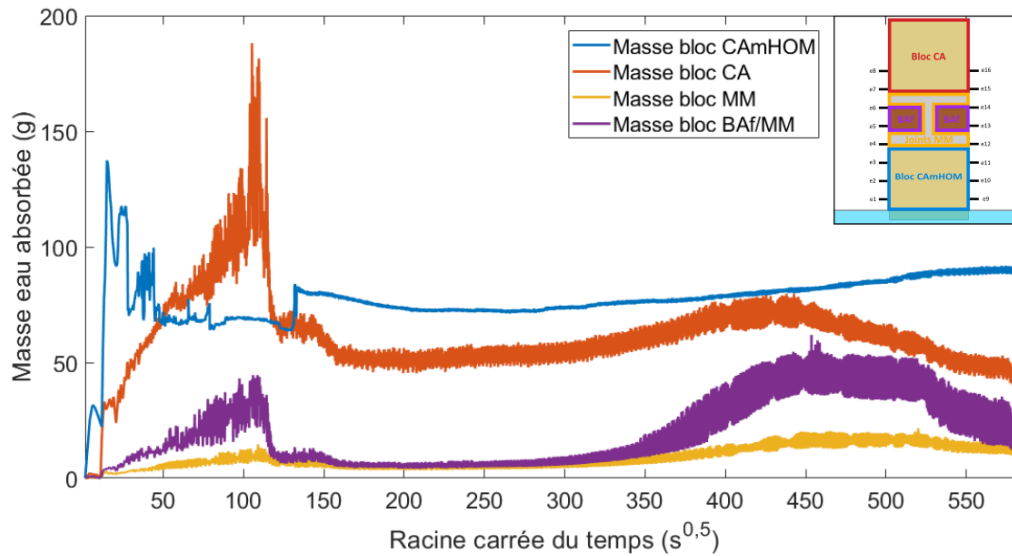


Figure 154 : Représentation graphique des évolutions de la prise de masse, mesurée à partir de la méthode électrique, pour chaque niveau divisant l'assemblage CAMHOM-BAf-CA

Pour cet assemblage, les courbes de la prise de masse des différents niveaux montrent une évolution cohérente par rapport à la position des différents niveaux. Malgré une certaine cohérence entre les apports des niveaux et l'évolution de la tendance générale des courbes, la somme des premiers niveaux de l'assemblage correspondant au matériau CAMHOM présente certaines anomalies en début de l'expérience. En effet, les premiers niveaux présentent un pic de masse dans les premiers instants de l'expérience suivi d'une diminution apparente avant la stabilisation de la mesure. Les matériaux plus en hauteur présentent un comportement plus logique avec une augmentation rapide de la prise de masse avec l'arrivée du front d'imbibition et une stabilisation de la saturation après le passage du front. Cependant, le matériau calcaire CA présente une augmentation de masse assez tôt en début d'expérience. Cela peut être lié à différents facteurs. D'une part, l'augmentation de l'humidité relative dans la chambre de mesure qui induit une augmentation de la teneur en eau endogène au sein du matériau. D'autre part, un changement de la résistivité de contact des électrodes induite par l'augmentation de la teneur en eau. Ceci pourrait expliquer ces anomalies qui peuvent se traduire par des erreurs de mesures plus importantes.

Les résultats représentant la prise de masse totale sont obtenus en additionnant les contributions de la prise de masse mesurées sur chacun des huit niveaux discrétisant l'assemblage. La Figure 155 montre les résultats la prise de masse totale calculés à partir de la méthode électrique avec son modèle mathématique comparés à la prise de masse réelle mesurée avec la méthode gravimétrique.

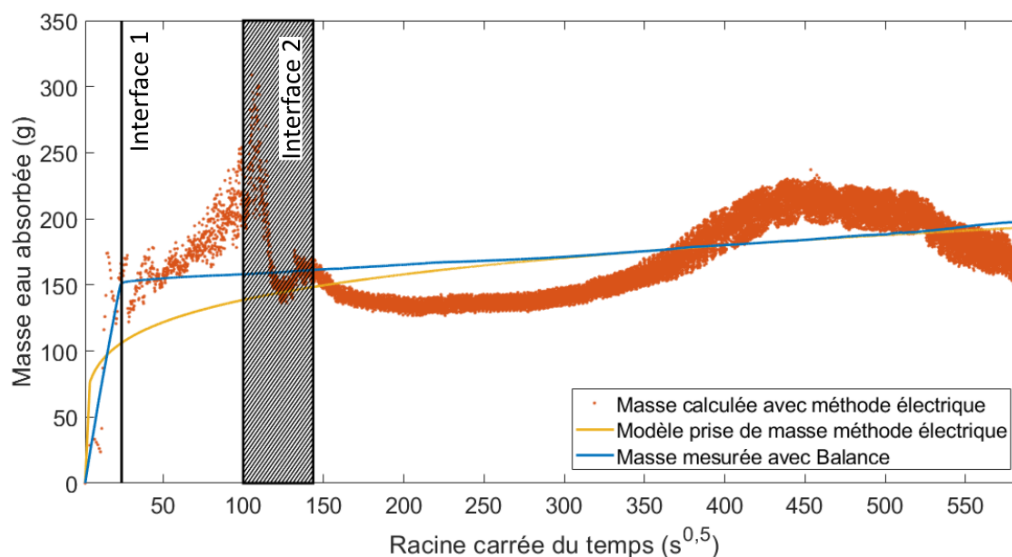


Figure 155 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique et celle calculée par la méthode électrique avec le modèle de régression de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.

Les résultats présentés sur la Figure 155 correspondant à l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique montrent une similitude avec celle de l'assemblage CAMHET-BAC-CA. En effet, la morphologie de la courbe des mesures obtenue par la méthode électrique, présente des différences non négligeables avec celle de la mesure par méthode gravimétrique. Cette différence de morphologie entre les deux se caractérise par un pic de la prise de masse vers le début de l'intervalle définissant l'arrivée du front sur l'interface 2. Ce pic produit une surestimation ponctuelle de la masse mesurée. Le pic de masse est suivi d'une diminution apparente de la masse qui finit par se stabiliser vers $5 \cdot 10^4$ s. A partir de ce point la dispersion des mesures augmente jusqu'à la fin de l'expérience. Pour ce même intervalle, la prise de masse mesurée augmente de manière cohérente avec quelques fluctuations autour de la courbe de la prise de masse réelle. La quantification des écarts est effectuée par la moyenne des valeurs absolues de la différence entre les valeurs mesurées par la méthode électrique et la méthode gravimétrique. Dans ce cas, la moyenne des valeurs absolues des erreurs est de 30 g. Cette variation est assez élevée car elle correspond à 14% de la capacité de stockage maximale mesurée avec la méthode gravimétrique. Ce qui montre que malgré la similitude générale entre les deux courbes, les écarts ponctuels sont assez importants pour générer des erreurs de mesure non négligeables.

Le modèle mathématique de l'évolution de la prise de masse mesurée par la méthode électrique (modèle prise de masse méthode électrique sur le graphique) présente un coefficient de corrélation R^2 égale à 0,24. Cette valeur particulièrement faible est due à la dispersion des mesures ainsi qu'aux forts écarts ponctuels sur certains intervalles. Malgré la faible valeur de ce paramètre, la moyenne des erreurs absolues entre le modèle mathématique et l'évolution réelle de la prise de masse d'eau étant de 27g reste beaucoup plus faible que celle des données mesurées. En effet, la moyenne des erreurs absolues correspond seulement à 7% de la masse d'eau totale absorbée. Cela montre que

malgré des différences ponctuelles significatives la tendance générale reste très similaire entre les deux courbes ce qui permet de valider l'affinité du modèle pour représenter les données de prise de masse réelle mesurés avec la balance.

Sur la Figure 156 est présentée l'évolution des erreurs entre les données calculées et du modèle mathématique par rapport aux données réelles mesurées avec la balance.

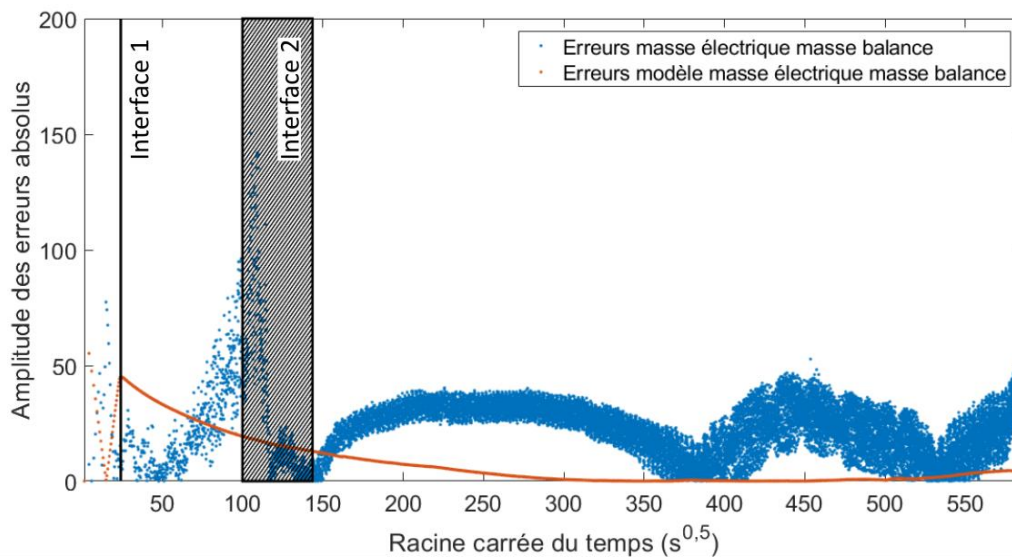


Figure 156 : Evolution des erreurs absolues entre les valeurs de masse d'eau calculées par la méthode gravimétrique et par la méthode électrique pour l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.

L'évolution des valeurs absolues des erreurs permet de quantifier les variations entre l'évolution obtenue par la méthode électrique et celle identifiée avec la balance. En effet, la valeur des erreurs reste assez faible jusqu'à $3 \cdot 10^3$ s, à partir duquel une augmentation rapide est observée. Cette augmentation atteint son maximum au début de l'arrivée du front sur l'interface 2. Cette augmentation des erreurs correspond avec la surestimation représentée par le pic de prise de masse observé sur les résultats précédents en début d'expérience. Au-delà de ce maximum, les amplitudes des erreurs diminuent fortement avec des augmentations et des diminutions ponctuelles jusqu'à la fin de l'expérience.

Dans le cas des erreurs entre le modèle mathématique et les valeurs réelles (masse balance) l'évolution montre comment le modèle mathématique permet de s'affranchir des anomalies observées par les erreurs entre les données obtenues à partir de la méthode électrique et les valeurs réelles de prise de masse. En effet, comme dans le cas précédent l'amplitude des erreurs augmente jusqu'à la première interface pendant laquelle la valeur des erreurs diminue progressivement. Cependant, dans ce cas la diminution se poursuit de manière constante jusqu'à sa stabilisation vers $1 \cdot 10^5$ s. Entre $1 \cdot 10^5$ s et la fin de l'expérience, les erreurs presque nulles restent constantes autour d'une valeur ~ 0 g.

Dans le cas des erreurs entre le modèle mathématique et les valeurs réelles (masse balance), il est possible d'observer une légère augmentation entre le début de l'expérience et le temps où l'interface 1 est atteinte. Cet intervalle est suivi par une diminution rapide atteignant son minimum vers $1 \cdot 10^4$ s. Dans le cas du modèle, l'interface 2 ne paraît pas avoir un effet perceptible sur l'amplitude des erreurs qui augmente légèrement entre $1 \cdot 10^4$ s et $1,375 \cdot 10^5$ s où un nouveau minimum est atteint. A partir de $6,2 \cdot 10^4$ s, les erreurs du modèle augmentent légèrement mais de manière constante jusqu'à la fin de l'expérience. En tenant compte que les erreurs maximales entre le modèle et les valeurs réelles n'atteignent pas les 20 g, et que dans la globalité elles restent entre 0 et 10g, le modèle permet de représenter la prise de masse réelle très fidèlement.

3. Comparatif des résultats électriques et de thermographie IR

Les résultats obtenus par les expériences de suivi d'imbibition par la méthode électrique et de thermographie IR sur les assemblages à montre la capacité de ces méthodes pour déterminer la teneur en eau réelle contenue dans l'assemblage.

La Figure 124, la Figure 125 et la Figure 159 permettent de comparer les capacités de mesure de la teneur en eau massique accessible à pression ambient des méthodes d'imagerie électrique et de thermographie IR pour les assemblages CAMHET-BAC-CA, CAMHET-BAF-CA et CAMHOM-BAF-CA respectivement.

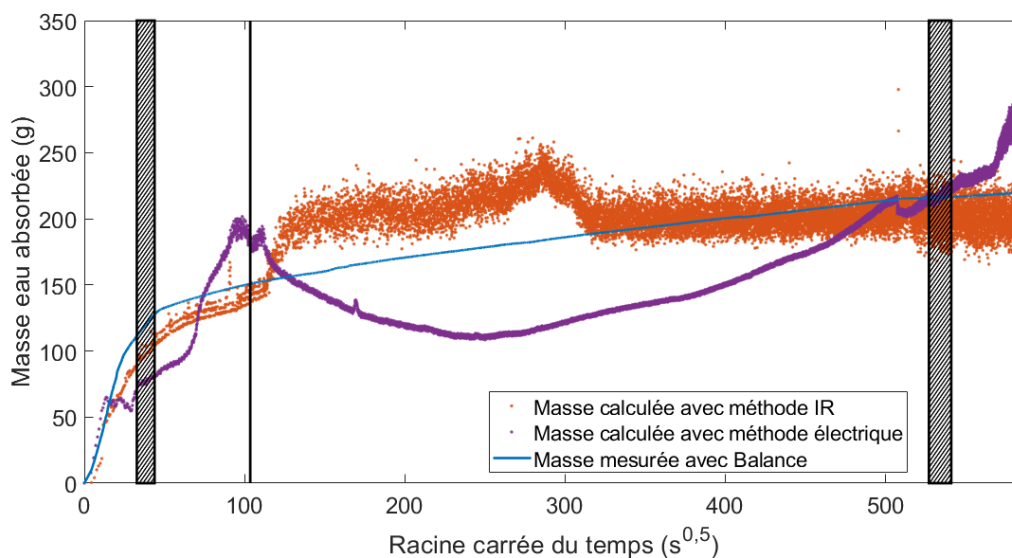


Figure 157 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAMHET-BAC-CA.

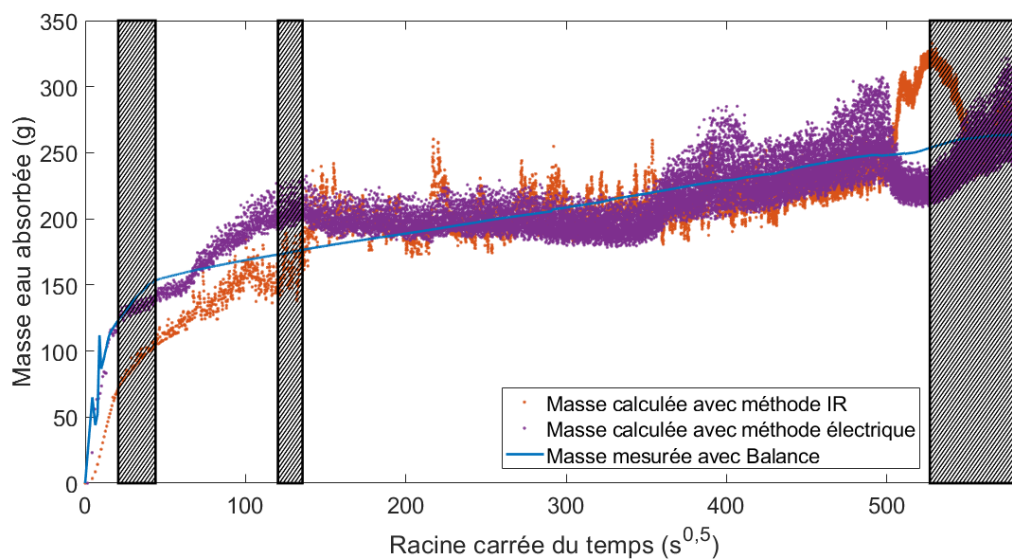


Figure 158 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAMHET-BAf-CA.

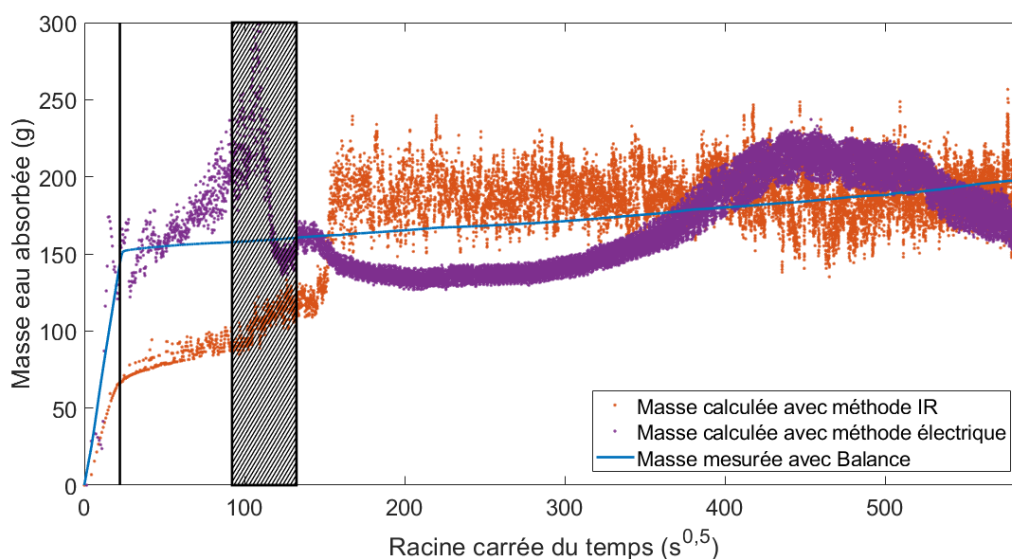


Figure 159 : Comparatif de la prise de masse correspondant à la quantité d'eau absorbée obtenue par la mesure gravimétrique, celle calculée par la méthode de thermographie IR et celle calculée par la méthode électrique de l'assemblage CAMHOM-BAf-CA.

Les mesures effectuées avec la méthode d'imagerie de thermographie IR présentent des performances similaires pour les trois types d'assemblages. Les résultats montrent une sous-estimation systématique de la masse d'eau absorbé pendant les premiers instants de l'imbibition. L'assemblage CAMHOM-BAf-CA présente l'écart plus importants, tandis que pour les assemblages CAMHET-BAc-CA et CAMHET-BAf-CA les écarts avec la mesure gravimétrique dans les premiers instants est moins importante. Pour les trois assemblages, au-delà de la deuxième

interface les la distribution des valeurs de la masse calculé présentent une dispersion non négligeable. Malgré la dispersion importante les valeurs, la masse calculée suivent une tendance très similaire à la masse réelle mesurée avec la balance.

La méthode électrique présente des résultats dont la avec des performances encourageantes mais différentes selon le type d'assemblage. En effet, pour l'assemblage CAmHET-BAc-CA, les résultats de la masse calculé d'après les mesures électriques présentent une anomalie caractérisée par une diminution apparente de la masse calculée entre la première et la dernière interface.

Pour l'assemblage CAmHET-BAf-CA, les résultats de la masse calculé d'après les mesures électriques en plus de l'anomalie caractérisée par une diminution apparente de la masse calculée entre la première et la dernière interface présentent une dispersion des valeurs de masse calculée un peu plus importante que celle mesuré sur l'assemblage précédent.

Pour l'assemblage CAmHOM-BAf-CA, les résultats de la masse calculé d'après les mesures électriques sont très proches de la masse d'eau réelle obtenus d'après les mesures gravimétriques mais mais présentent une dispersion des valeurs de masse calculée similaire à celle mesuré sur l'assemblage précédent.

4. Comparaison des résultats vis-à-vis des modèles phénoménologiques

La Figure 160, Figure 161 et Figure 162 montre le comparatif entre les modèles phénoménologiques correspondant à la partie érigé du mur avec les thermogrammes montrant l'évolution réel du front d'imbibition pour les assemblages CAmHET-BAc-CA, CAmHET-BAf-CA et CAmHET-BAf-CA respectivement.

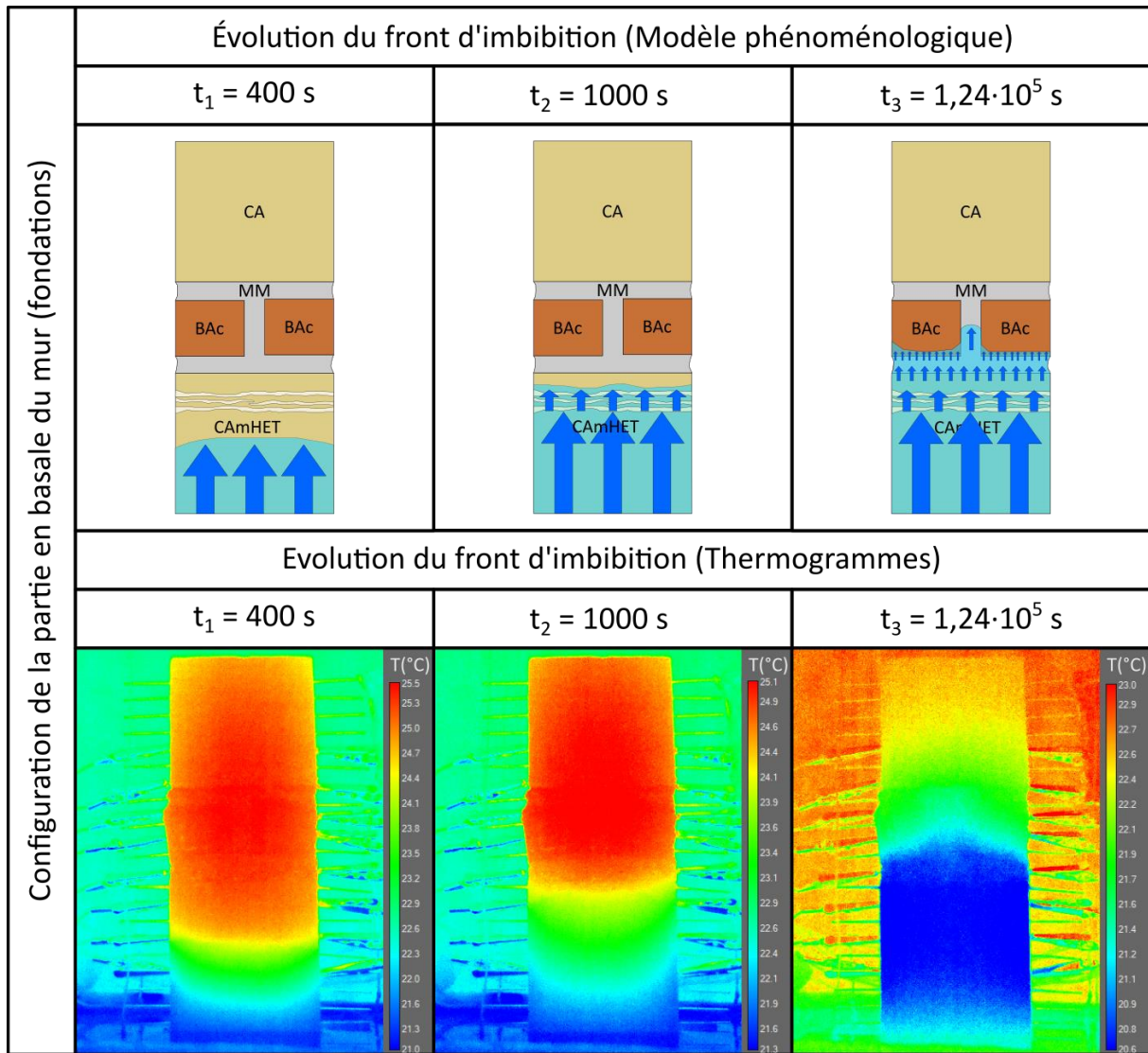


Figure 160 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et celle montré par les thermogrammes de l'assemblage CAmHET-BAc-CA.

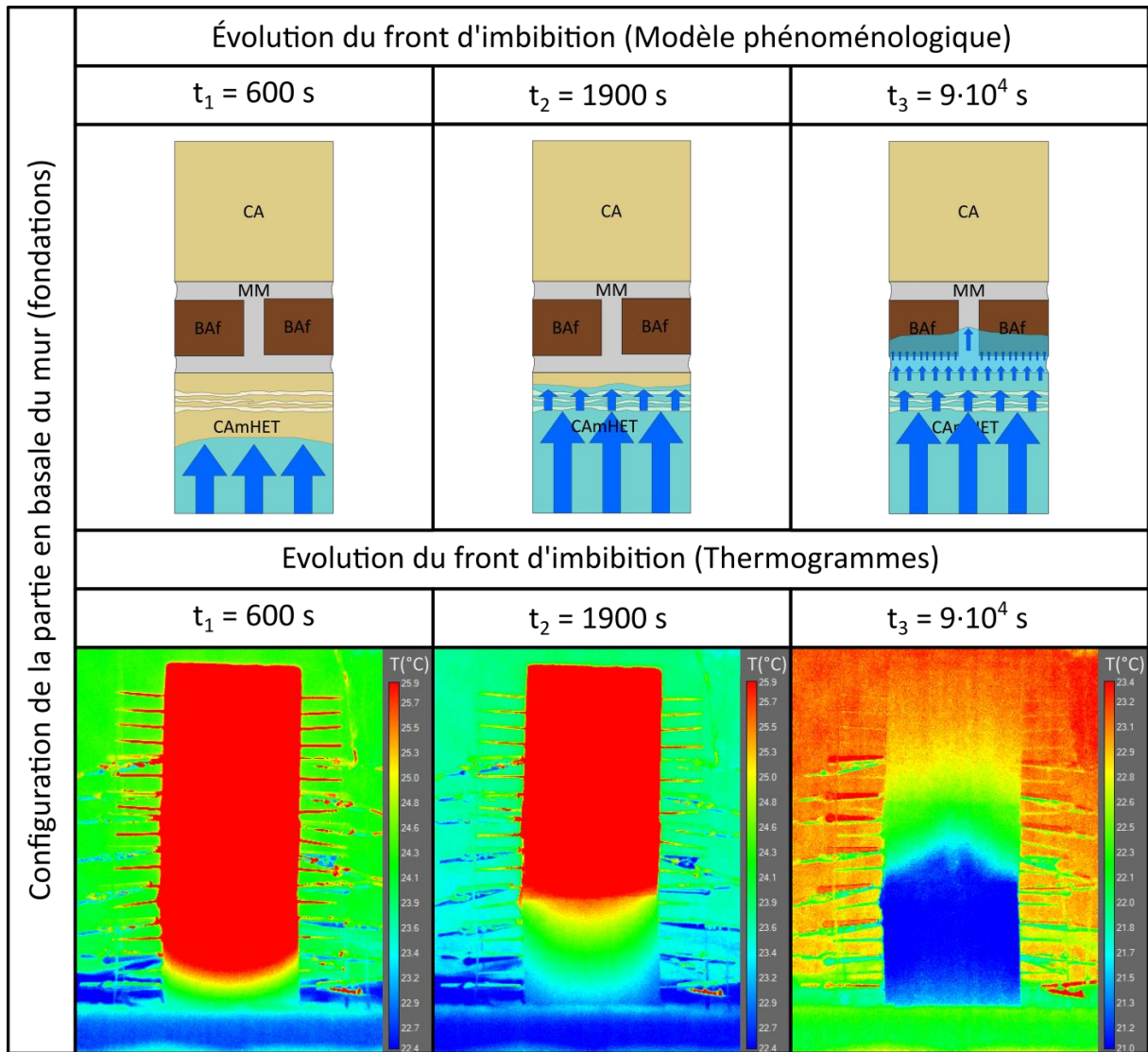


Figure 161 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et celle montré par les thermogrammes de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

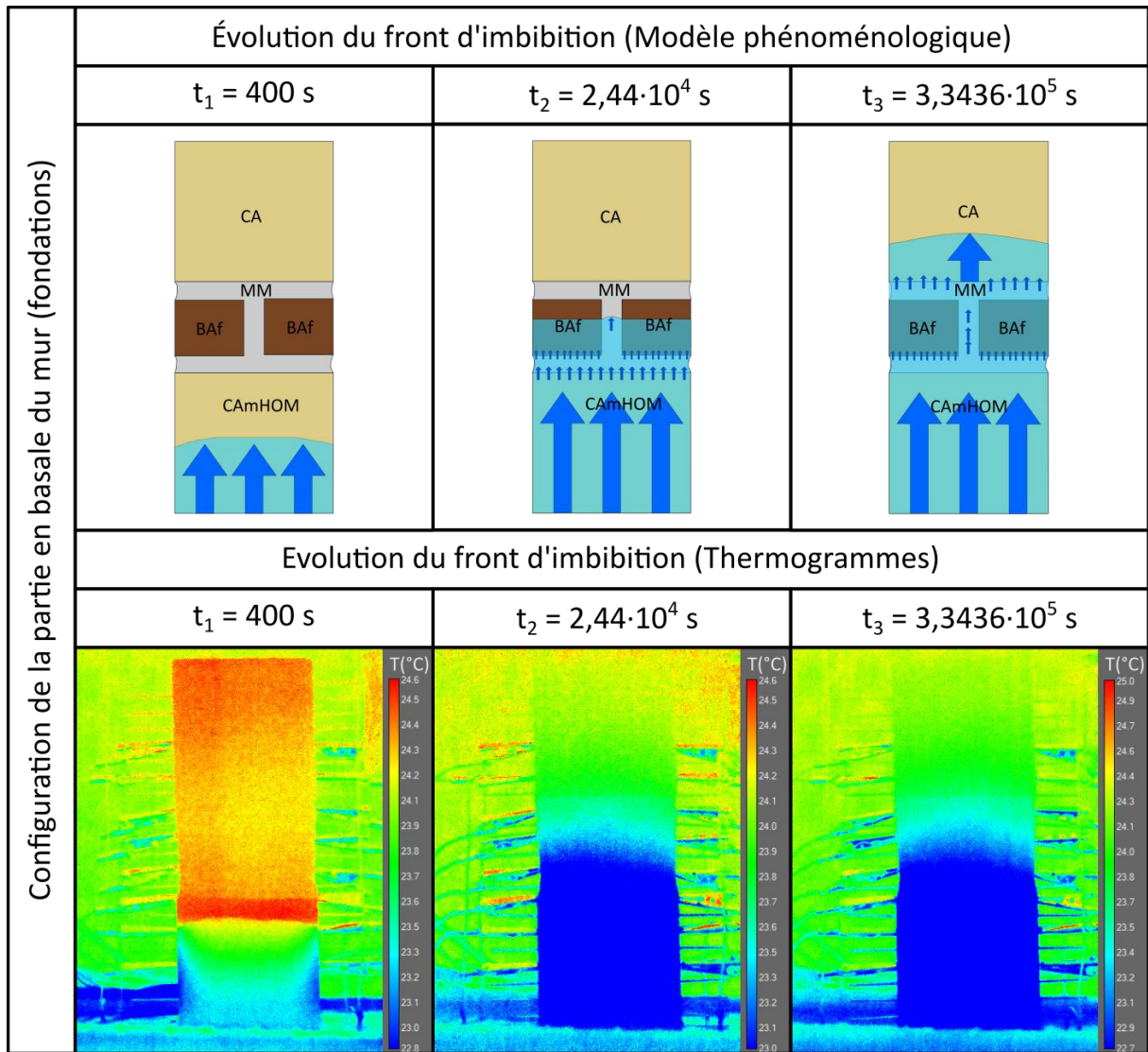


Figure 162 : Comparaison de l'évolution du front d'imbibition proposé par les modèles phénoménologiques et celle montré par les thermogrammes de l'assemblage CAmHET-BAf-CA.

Dans le cas des deux premiers assemblages présentés (CAmHET-BAc-CA et CAmHET-BAc-CA), l'évolution des fronts d'imbibition des thermogrammes correspondent bien avec les modèles phénoménologiques présentés. Les scènes thermiques permettent de confirmer les comportements du front d'imbibition présentés par les modèles.

Le bloc calcaire inférieur (CAmHET) des deux assemblages induit un faible ralentissement du front d'imbibition en atteignant les niveaux hétérogènes. Les briques (BAc et BAf) et le mortier (MM) réduisent d'avantage l'avancé du front.

Dans le cas de l'assemblage CAmHOM-BAf-CA les résultats concernant l'avancé du front sont compromis car le bloc calcaire inférieur c'est disloqué du reste de l'assemblage pendant une manipulation antérieure à l'expérience. Cela induit une contrainte supplémentaire sur l'ascension de front d'imbibition sur les niveaux supérieurs de l'assemblage. Malgré cette contrainte qui ralentie la progression du front de manière significative, l'avance du front sur les niveaux supérieurs se fait de manière uniforme tant pour les briques (BAf) comme pour le mortier (MM). En effet, la brique BAf et le mortier MM présentent de coefficients de capillarité similaires.

L'avance du front dans la partie de calcaire inférieur (CAmHOM) correspond bien avec le modèle, qui montre une ascension rapide du front d'imbibition.

De manière générale, les résultats de l'analyse des thermogrammes des différents assemblages permettent de confirmer les hypothèses mise en avant par les modèles. La microstructure des matériaux a une influence majeure sur le comportement du front d'imbibition. En effet les, calcaires CAmHOM et CA montrent une grande capacité de succion.

La calcaire CAmHET présente des caractéristiques similaires aux autres types de calcaire. Cependant, les niveaux hétérogènes peuvent ralentir légèrement le front d'imbibition.

Finalement ce sont les briques BAc et BAf avec le mortier MM qui présentent les caractéristiques plus restrictives vis-à-vis des phénomènes de transfert. Cela est représenté par le ralentissement systématique du front d'imbibition lors qu'il atteint les niveaux composés par ces types de matériaux.

ANNEXE V
Amélioration des algorithmes
de traitement de thermographie IR

1. Rappel algorithme original

L'algorithme utilisé pour effectuer les traitements des données de thermographie infrarouge obtenus lors des expériences effectuées sur les assemblages multicouches est présenté au cours du Chapitre VII (*CAPITRE VII - 2.1. Traitement du signal IR mesuré sur les assemblages multicouches p.139*).

Le processus de sélection de la teneur en eau est effectué en appliquant les équations (64), (65) et ((66). Dans ce cas, correspondant au traitement utilisé originellement, la température mesurée sur chaque niveau de l'assemblage à chaque instant t , est comparée à la température de la courbe de calibration dynamique. Cela permet d'attribuer une seule valeur de teneur en eau pour chaque valeur de température mesurée sur l'assemblage.

Finalement, comme le montrent les équations (67), (68) et (69), à partir des valeurs de teneur en eau retenus pour chaque niveau de l'assemblage à chaque instant t il est possible de calculer l'évolution de la prise de masse d'eau au cours du temps pour les différents assemblages soumis à un phénomène de remonté capillaire.

2. Nouveau algorithme

Compte tenu du caractère non monotone des courbes de calibration, l'algorithme a été modifié pour introduire un critère de choix pertinent pour faire correspondre la température apparente de surface identifiée pour chaque niveau de l'assemblage à la valeur de teneur en eau la plus adaptée. Pour ce faire, le critère de choix de la teneur en eau retenu pour une température donnée a été élargi de manière à tenir compte de toutes les teneurs en eau les plus probables. Ainsi, le nouveau critère de sélection des teneurs en eau est défini par la condition suivante représenté par l'équation (78) :

$$Wniv_j = Wcyl(k) \text{ pour tout } k \text{ dont } |Tcn(k) - Tnn_j R_j| < 1\%, \text{ avec } j = 1, \dots, N \quad (77)$$

Avec : $Wniv_j$, la teneur en eau de chaque niveau de l'assemblage pour tous les thermogrammes j analysés au cours de l'expérience ; $Wcyl$, la teneur en eau attribuées aux valeurs de température de la courbe de calibration dynamique ; Tcn , les températures normalisées de l'expérience de calibration dynamique ; Tnn_j , les températures normalisées de chaque niveau de l'assemblage pour tous les thermogrammes j .

Ce nouveau critère de sélection de la teneur en eau peut produire des situations dans lesquelles plusieurs teneurs en eau sont possibles pour une seule valeur de la température.

En effet, pour toute valeur Tcn présentant une différence inférieure ou égale à 1% avec la valeur $Tnn_j(i)$ mesuré sur un niveau de l'assemblage, la teneur en eau attribuée à ces valeurs Tcn sont retenues comme teneur en eau probable.

Les tests de cette nouvelle méthode de traitement sont effectués pour les données thermiques de l'assemblage multicouche CA-CA.

2.1. Situation 1

Comme le montre la *Figure 163*, une première possibilité est que pour une même valeur de température ils existent plusieurs possibilités de teneur en eau qui sont proches les unes avec les autres.

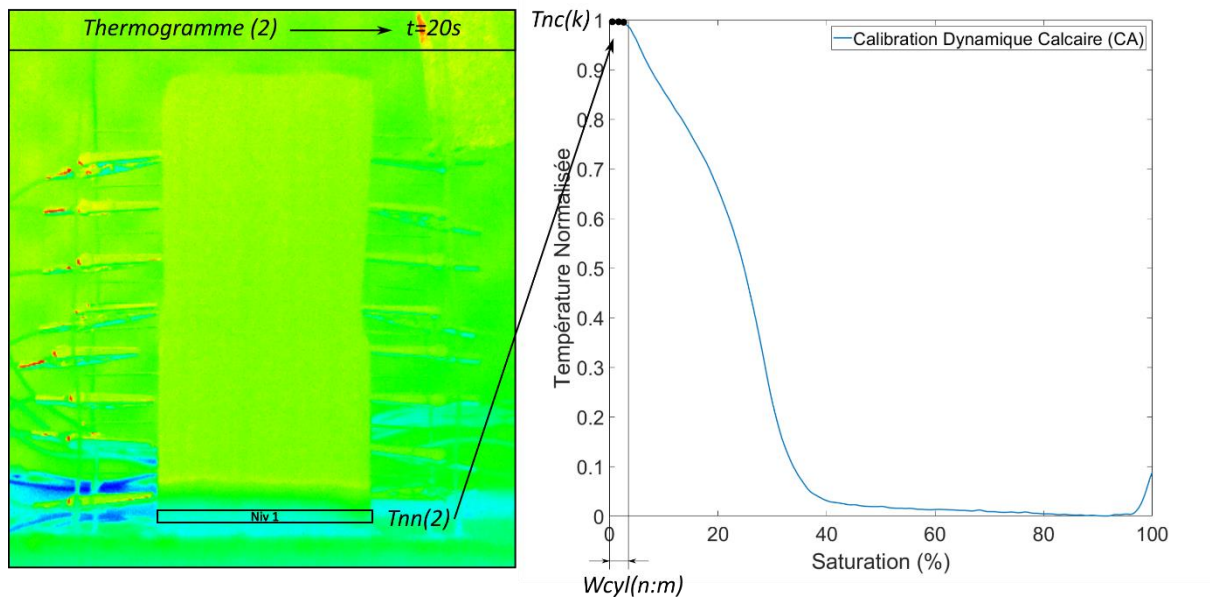


Figure 163 : Exemple représentant le cas où plusieurs valeurs similaires de teneur en eau peuvent être attribués à une valeur de température similaire.

Dans ce cas, les teneurs en eau les plus probables sont réparties selon une distribution unimodale (voir *Figure 164*).

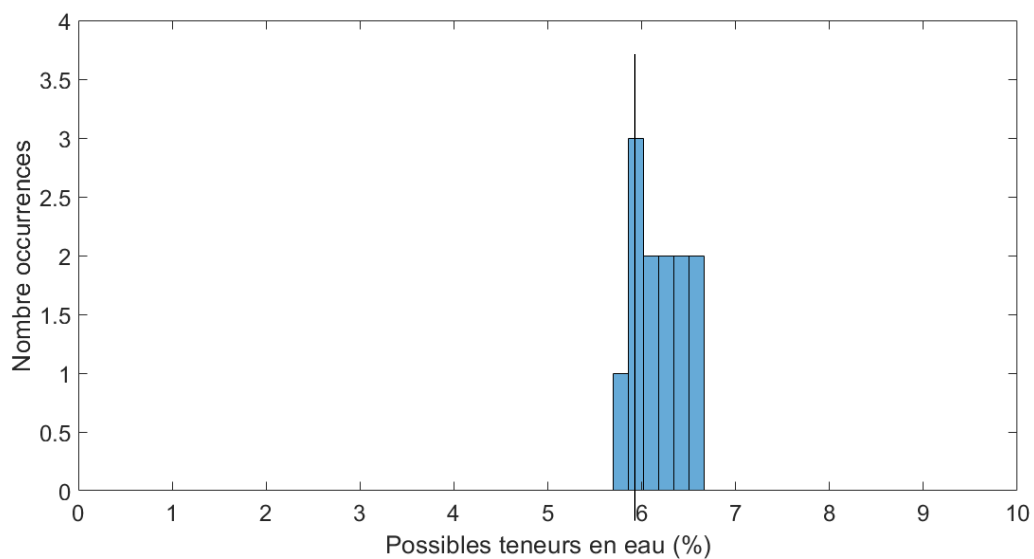


Figure 164 : Histogramme montrant une distribution unimodale des valeurs de teneur en eau pour une température surfacique donnée.

La teneur en eau finale, W_{niv_1} , présentée dans cet exemple, correspond à la médiane des valeurs de teneur en eau, $W_{cyl}(n:m)$, retenues et dont la distribution est représentée par l'histogramme de la Figure 164.

2.2. Situation 2

La deuxième possibilité est que, malgré la nouvelle condition de choix de teneur en eau, une seule valeur de teneur en eau est attribuée à la valeur de la température mesurée sur l'assemblage (voir Figure 165).

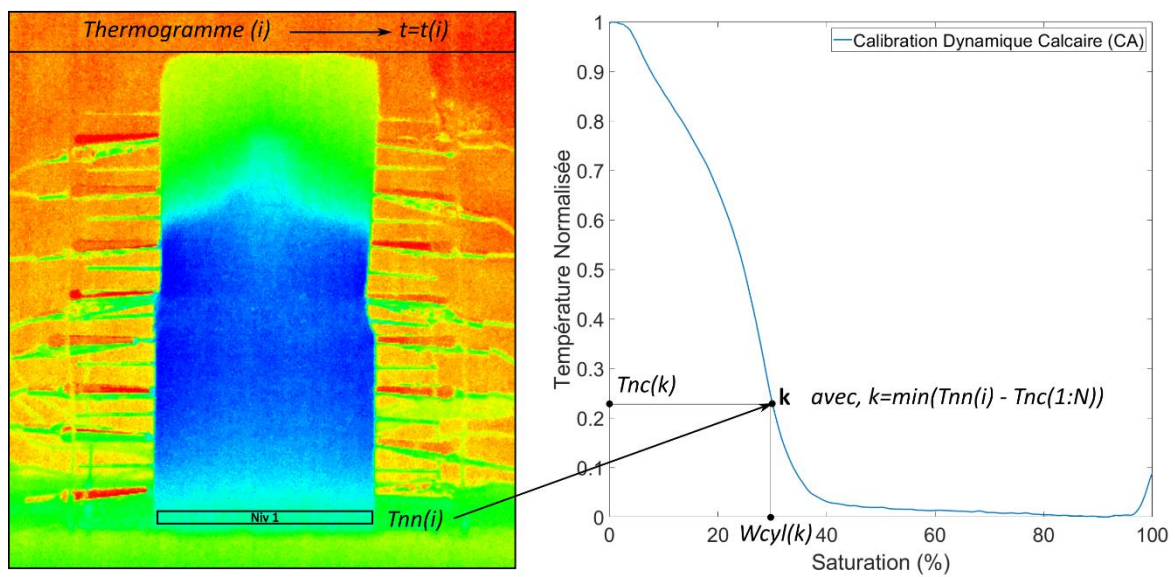


Figure 165 : Exemple représentant le cas où une seule valeur de teneur en eau peut être attribuée à une seule valeur de température.

2.3. Situation 3

La troisième possibilité (voir Figure 166) est que pour une même valeur de température ils existent plusieurs possibilités de teneur en eau qui sont différentes les unes avec les autres, montrant deux groupes de possibles valeurs de teneur en eau distinctes.

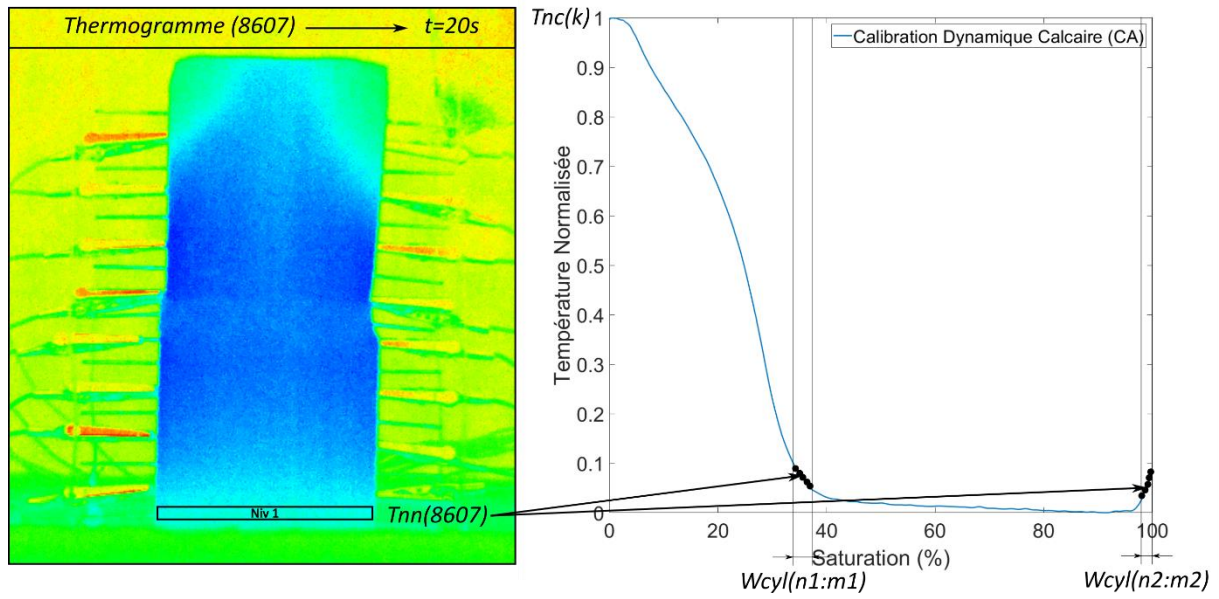


Figure 166 : Exemple représentant le cas où plusieurs valeurs distinctes de teneur en eau peuvent être attribués à un intervalle correspondant à une différence de température inférieure à 1%.

Dans ce cas les teneurs en eau les plus probables sont réparties selon une distribution bimodale comme le montre la Figure 167.

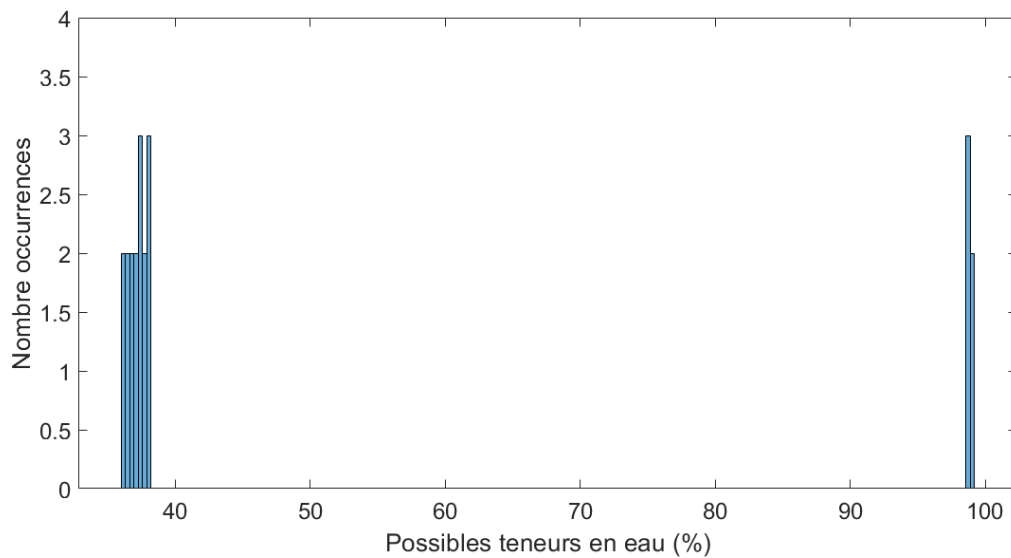


Figure 167 : Histogramme montrant une distribution bimodale des valeurs de teneur en eau pour une température surfacique moyenne d'un niveau donné.

3. Automatisation du choix de la teneur en eau le plus pertinent

La complexité de cette procédure de calcul est d'arriver à déterminer de manière automatique dans quelle des trois situations précédentes est la plus représentative en fonction de l'analyse de la morphologie des histogrammes.

3.1. Algorithme de partitionnement k-mean

La méthode utilisée pour l'analyse des possibles teneurs en eau pour une seule température découle des méthodes de traitement de l'image. En effet, les algorithmes permettant de mettre en œuvre des techniques de partitionnement sont très courants dans le domaine du traitement de l'image. L'algorithme utilisé est k-moyennes. Le partitionnement en k-moyennes (ou k-means en anglais) est une méthode de partitionnement de données et un problème d'optimisation combinatoire. Étant donné des points et un entier k, le problème est de diviser les points en k groupes, souvent appelés clusters, de façon à minimiser une certaine fonction. On considère la distance d'un point à la moyenne des points de son cluster. La fonction à minimiser est la somme des carrés de ces distances.

Cet algorithme permet de déterminer les « centroïdes » des clusters, ce qui correspond aux valeurs médianes des différents pics représentés sur l'histogramme. Cependant, le nombre de clusters pris en compte doit être établi à l'avance. C'est pourquoi chaque histogramme est analysé par l'algorithme K-mean sur trois itérations. Pour chaque itération le nombre de clusters est augmenté d'un pour permettre de répartir les données présentées par les histogrammes en 1, 2 ou 3 groupes.

3.1.1 Evaluation du nombre de partitionnements

Cette étape permet d'évaluer chaque nombre proposé de clusters (compris entre 1 et 3 clusters) et de sélectionner le plus petit nombre de clusters satisfaisants. L'équation (78) permet d'effectuer l'évaluation du nombre de partitionnements.

$$Gap(K) \geq Gap_{MAX} - ES(Gap_{MAX}) \quad (78)$$

Avec : K est le nombre de clusters, Gap(K) est la valeur d'écart pour la solution de clustering avec les clusters K, Gap_{MAX} est la plus grande valeur d'écart, et ES(Gap_{MAX}) est l'erreur standard correspondant à la valeur d'écart la plus importante.

Cette étape permet donc de différencier de manière automatique la distribution unimodale, bimodale ou multimodale des histogrammes de teneur en eau.

3.2. Choix de la teneur en eau

Dans le cas où il existe plusieurs clusters (représentant plusieurs choix de teneur en eau pour une même température) il est nécessaire de déterminer quelle valeur est la plus appropriée (voir Figure 168).

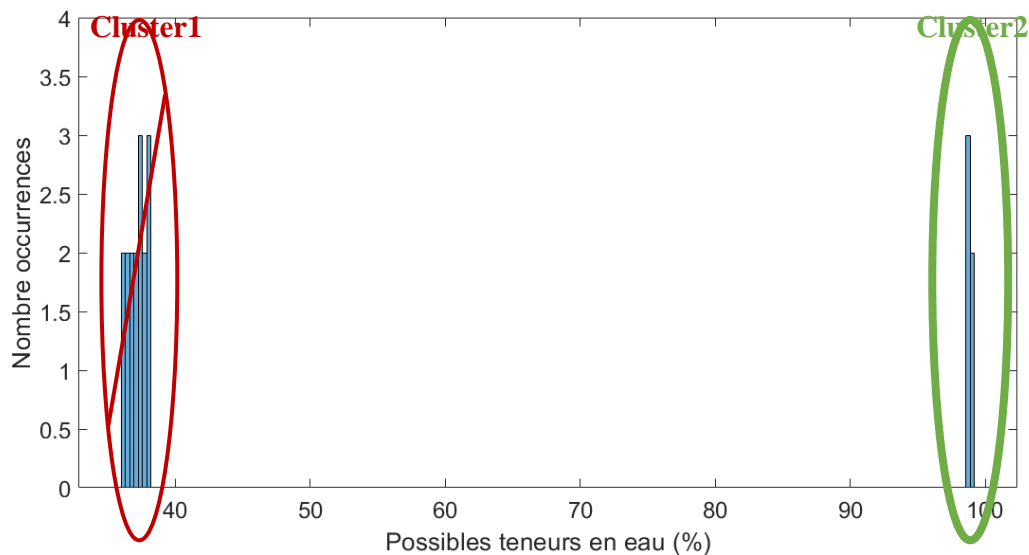


Figure 168 : Exemple du choix du cluster retenu pour le calcul de la teneur en eau d'un niveau de l'assemblage pour un instant t_j .

Cette étape est d'une importance capitale car elle va déterminer les choix des teneurs en eau individuelles pour chaque niveau (i) de l'assemblage pour chaque thermogramme (j) (c.à.d. pour chaque instant $t(j)$), ce qui va déterminer l'allure de la prise de masse totale au cours du temps montré dans les résultats finaux.

L'objectif en utilisant ce nouvel algorithme est de minimiser la dispersion et l'amplitude des erreurs des mesure de teneur en eau en utilisant la méthode de calcul 1 décrite dans le manuscrit.

Plusieurs types de conditions ont été testés afin d'améliorer les résultats fournis par cette nouvelle méthode de choix de teneur en eau des niveaux des assemblages.

3.2.1 Conditions de l'algorithme 1

Les conditions permettant de discriminer un cluster en faveur d'un autre, sont les suivantes :

- Si la médiane du cluster 1 à l'instant $t(i)$ est supérieure à la valeur de teneur en eau retenue à l'instant $t(i-1)$, la médiane du cluster 1 est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.

- Si la condition précédente n'est pas respectée, la même procédure d'analyse est effectuée sur la médiane du cluster 2.
- Si la condition précédente n'est pas encore respectée, la valeur plus élevée des médianes des deux clusters est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.

En appliquant ces conditions sur la totalité des niveaux pour tous les thermogrammes sont obtenus les résultats présentés sur la Figure 169.

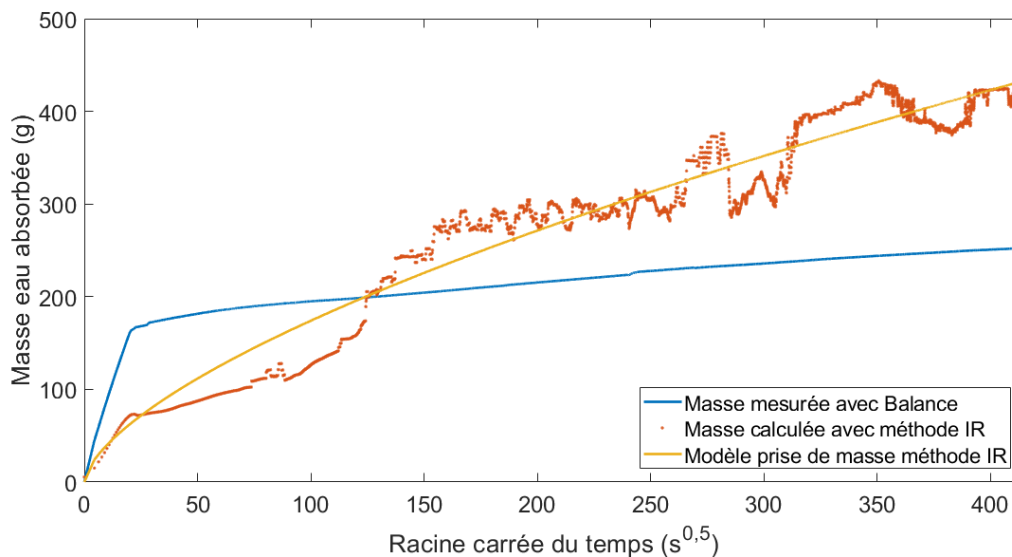


Figure 169 : Résultats de la prise de masse d'eau calculé par la méthode de thermographie IR en utilisant les conditions des algorithmes 1.

Cette condition est basée sur l'hypothèse que pour un même niveau de l'assemblage, la teneur en eau accessible à pression ambiante augmente au cours du temps.

3.2.2 Conditions de l'algorithme 2

Les conditions, permettant de discriminer un cluster en faveur d'un autre, sont les suivantes :

- Si la différence entre médiane du cluster 1 à l'instant $t(i)$ et la valeur de teneur en eau retenue à l'instant $t(i-1)$ est inférieure à la différence entre médiane du cluster 2 à l'instant $t(i)$ et la valeur de teneur en eau retenue à l'instant $t(i-1)$, la médiane du cluster 1 est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.
- Dans le cas contraire la valeur de la médiane du cluster 2 est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.

En appliquant ces conditions sur la totalité des niveaux pour tous les thermogrammes sont obtenus les résultats présentés sur la Figure 170.

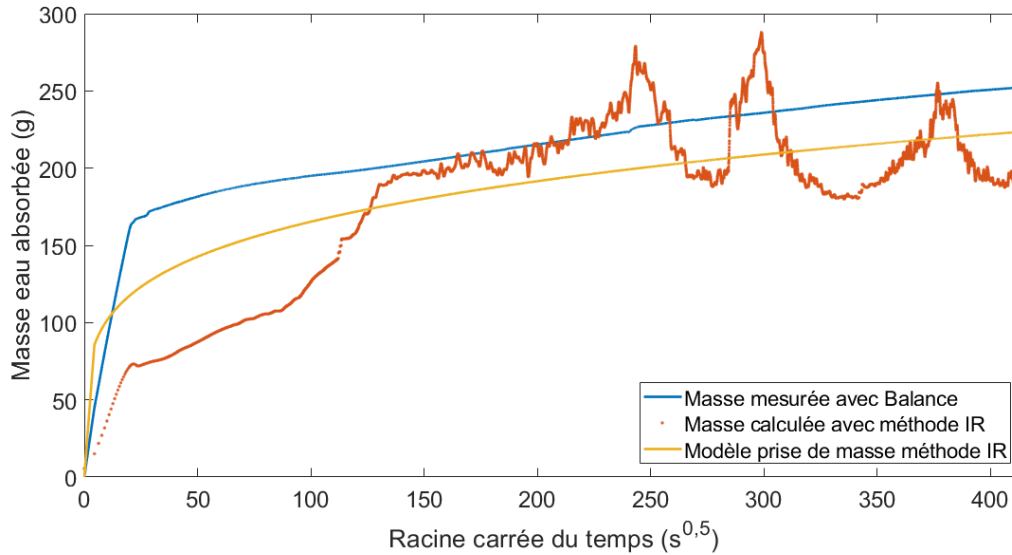


Figure 170 : Résultats de la prise de masse d'eau calculé par la méthode de thermographie IR en utilisant les conditions des algorithmes 2.

Cette condition est basée sur l'hypothèse que pour un même niveau de l'assemblage, la teneur en eau, accessible à pression ambiante, augmente au cours du temps évolue progressivement sans variations extrêmes.

3.2.3 Conditions de l'algorithme 3

L'algorithme 3 concernant le critère de choix de la teneur en eau plus approprié pour des cas ou plusieurs clusters (donc plusieurs teneurs en eau) est une combinaison des deux algorithmes présentés précédemment. Ainsi, comme le montre la Figure 171 pour les niveaux inférieurs les conditions de discrimination des teneurs en eau sont celles décrites dans l'algorithme 1 tandis que pour les niveaux supérieurs les conditions de discrimination sont celles décrites dans l'algorithme 3.

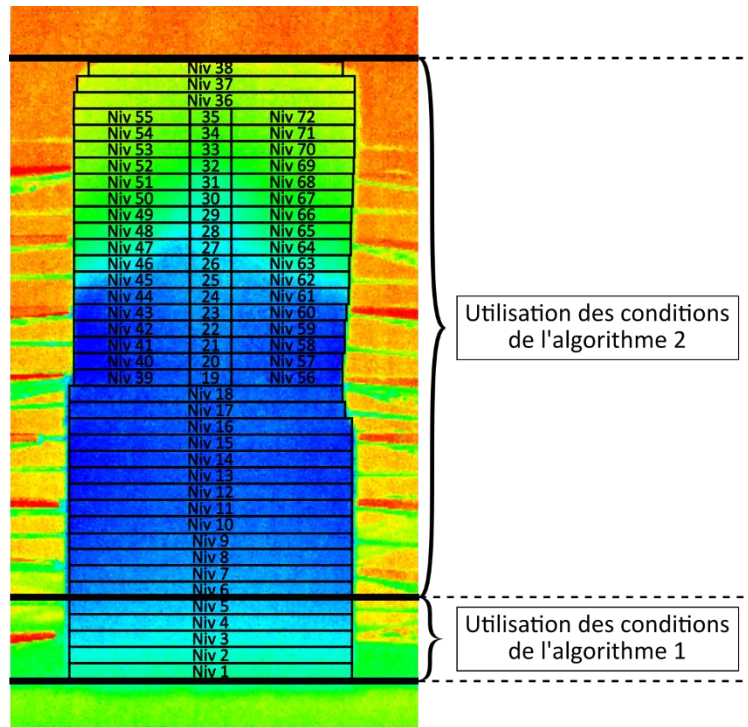


Figure 171 : Choix des conditions utilisés pour l'algorithme par niveau (Niv1 à Niv72) lors de l'attribution de la teneur en eau calculée à partir température surfacique.

Les conditions permettant de discriminer un cluster en faveur d'un autre, sont les suivantes :

Pour les niveaux de 1 à 5 :

- Si la médiane du cluster 1 à l'instant $t(i)$ est supérieure à la valeur de teneur en eau retenue à l'instant $t(i-1)$, la médiane du cluster 1 est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.
- Si la condition précédente n'est pas respectée, la même procédure d'analyse est effectuée sur la médiane du cluster 2.
- Si la condition précédente n'est pas encore respectée, la valeur plus élevée des médianes des deux clusters est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$

Cette condition est basée sur l'hypothèse que pour un même niveau de l'assemblage, la teneur en eau augmente au cours du temps. En appliquant cette condition, il est possible de minimiser les erreurs de mesure de teneur en eau en utilisant la méthode de calcul 1 décrite dans le manuscrit.

Pour les niveaux de 6 à 72 :

- Si la différence entre médiane du cluster 1 à l'instant $t(i)$ et la valeur de teneur en eau retenue à l'instant $t(i-1)$ est inférieure à la différence entre médiane du cluster 2 à l'instant $t(i)$ et la valeur de teneur en eau retenue à l'instant $t(i-1)$, la médiane du cluster 1 est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.
- Dans le cas contraire la valeur de la médiane du cluster 2 est retenue comme teneur en eau pour l'instant $t(i)$.

En appliquant ces conditions sur la totalité des niveaux pour tous les thermogrammes sont obtenus les résultats présentés sur la Figure 172.

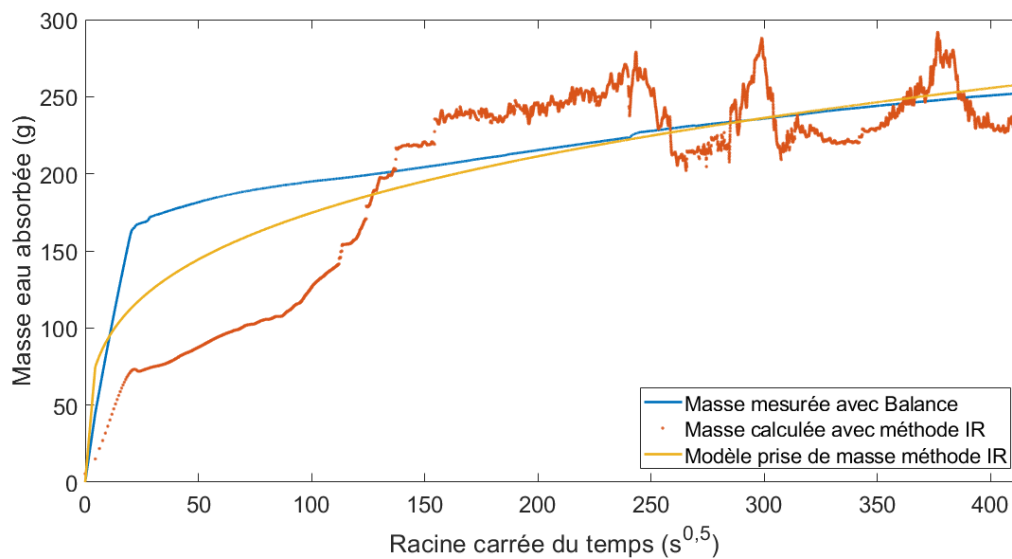


Figure 172 : Résultats de la prise de masse d'eau calculé par la méthode de thermographie IR en utilisant un code combinant les différentes conditions des algorithmes 1 et 2.

Ce dernier code de traitement permet de tenir compte des deux algorithmes présentés précédemment. En effet, dans ce cas les niveaux inférieurs du bloc calcaire en contact avec la source d'eau il est permis de changements brutaux de la teneur en eau et il n'est pas permis que les teneurs en eau retenues pour un instant $t(j)$ soient inférieures de celles retenues pour $t(j-1)$. Au contraire pour les niveaux supérieurs du bloc calcaire inférieur ainsi que pour le reste de niveaux des autres éléments de l'assemblage (joints mortier et blocs calcaires supérieurs), la teneur en eau au cours du temps évolue progressivement sans variations extrêmes, et donc sont privilégiés les teneurs en eau ou la différence entre l'instant $t(j)$ et $t(j-1)$ soit minimales.

4. Analyse et perspectives

Les premiers résultats obtenus avec le nouvel algorithme de traitement permettent de calculer des modèles dont l'évolution de la prise de masse très proche des celle mesuré par la méthode gravimétrique. En outre, il est possible d'observer une diminution de la dispersion présente sur la phase stationnaire des courbes l'évolution de prise de masse original présentés sur la Figure 106 (CHAPITRE VII - 2.2. Présentation des résultats p.143).

Un autre avantage du nouvel algorithme présenté sur cette Annexe est le fait que le code de traitement peut être adapté pour répondre à plusieurs conditions particulières à l'expérience. En effet, dans l'exemple proposé, les conditions de choix de la teneur en eau des niveaux inférieurs (de 1 à 5) sont différentes de celles des niveaux supérieurs (de 6 à 72).

Malgré ces résultats préliminaires encourageants il est encore nécessaire d'effectuer des tests supplémentaires et optimiser d'avantage l'algorithme de traitement.

ANNEXE VI
Caractérisation des matériaux
par modélisation numérique

1. Introduction

Les travaux ici présentés sont le fruit de la collaboration avec Pierre M. Adler du laboratoire METIS de l'Université Pierre Marie Curie. Les travaux pionniers de Pierre M. Adler sont axés sur les applications des outils numériques pour modéliser les phénomènes de transfert au sein des matériaux poreux.

Les tests de caractérisation des matériaux par modélisation numérique sont effectués sur le matériau calcaire. Pour effectuer les différents tests, les codes permettant de simuler des écoulements au sein du matériau calcaire ont été adaptés d'après les codes originalement créés par M. Adler.

Les analyses des propriétés physiques et de transfert du matériau calcaire se déroulent en trois étapes. La première étape permet de reconstruire le modèle 3D du matériau poreux à partir d'images, préalablement traitées, permettant de différencier l'espace poreux du squelette solide. C'est sur ce modèle que les propriétés de stockage du matériau peuvent être calculées.

La deuxième étape permet de caractériser les propriétés de transfert du modèle 3D en appliquant les équations de Darcy pour simuler un écoulement de fluide (monophasique, biphasique, ...). À partir des capacités de percolation du modèle obtenus par la simulation d'écoulement, il est possible de définir la perméabilité du modèle.

Finalement, la troisième étape permet de calculer les propriétés électriques et/ou thermiques attendues sur le modèle en fonction des propriétés physiques attribuées au squelette solide et aux fluides utilisés pour simuler l'écoulement.

2. Reconstruction du modèle 3D

Pour effectuer les simulations numériques permettant de caractériser les propriétés physiques des matériaux, il est nécessaire de construire des modèles 3D caractérisant le réseau poreux de ceux-ci. Pour cela, deux méthodes sont retenues. La première consiste à créer des modèles 3D par la concaténation des images 2D successives permettant de recréer le réseau poreux réel des matériaux. Tandis que la deuxième est basée sur la reconstruction mathématique du réseau.

La microtomographie aux rayons X est utilisée pour la reconstruction du réseau poreux en plusieurs étapes. L'imagerie et son traitement permettent de passer des images brutes (Figure 173a) aux images binarisées utilisées pour la reconstruction numérique du réseau poreux.

La première étape du traitement des images successives concerne l'amélioration du contraste basée sur la méthode « *Contrast-limited Adaptive Histogram Equalization* » (CAHE) représentée dans la Figure 173b. Celle-ci permet de mieux différencier le squelette solide des pores. Compte tenu de l'augmentation du bruit inhérent à l'application de l'algorithme CAHE, une deuxième étape est nécessaire. Celle-ci permet de réduire le bruit par application de filtres adaptés. Dans cette étape, plusieurs filtres ont été testés pour finalement retenir celui basé sur l'algorithme « *2D Dual-Tree Complex Wavelet Transform* », dont les résultats sont représentés dans la Figure 173c.

La dernière étape de traitement concerne la binarisation de l'image filtrée par la méthode de Otsu améliorée. Cette méthode basée sur le seuillage des niveaux de gris permet de différencier les parties solides des pores.

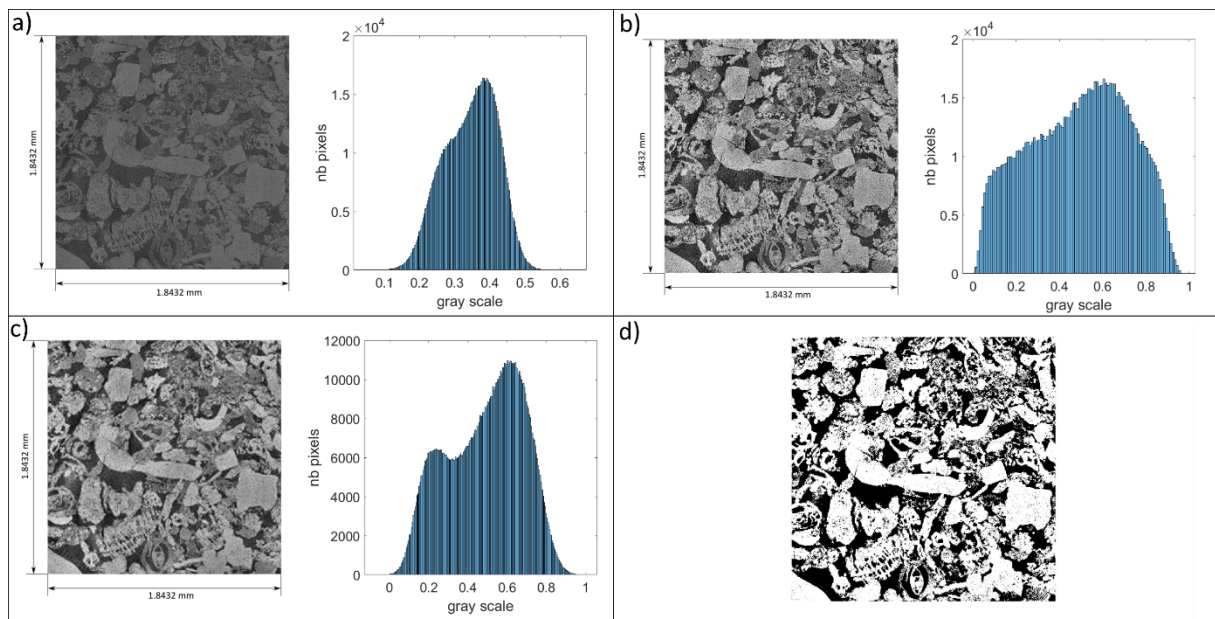


Figure 173 : a) Image et histogramme originels utilisés pour la création du modèle numérique, b) image et histogramme résultants de l'application de l'algorithme d'amélioration de contraste, c) image et histogramme résultants de l'application du filtre sur l'image avec le contraste amélioré et d) image binaire utilisée pour la reconstruction 3D.

Finalement, la reconstruction du modèle 3D est effectuée par reconstruction mathématique des images binarisées.

La reconstruction du système poral représentée sur la Figure 174, est obtenue, soit par concaténation d'une série d'images binarisées et dans ce cas, l'espacement entre sections doit être inférieur à la taille moyenne des pores, ou par combinaison des images binarisées en recourant notamment à la méthode stochastique d'autocorrélation qui permet l'obtention du volume à partir d'une seule image 2D.

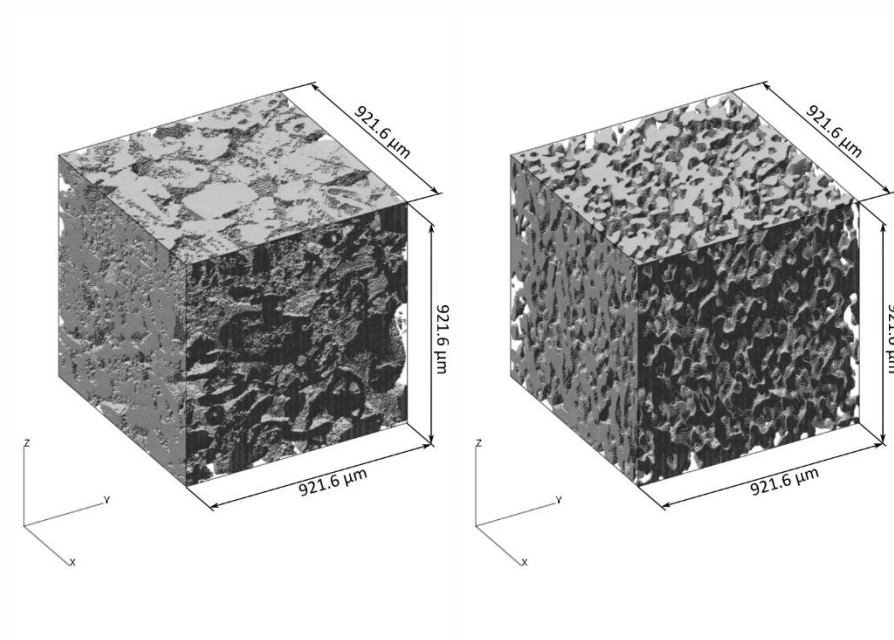


Figure 174 : a) reconstruction 3D par la méthode de concaténation et b) reconstruction 3D par la méthode mathématique

C'est à partir de ces reconstructions 3D qu'il est possible d'effectuer les différentes simulations permettant de vérifier les modèles phénoménologiques en appliquant des contraintes qui représentent des conditions particulières à celles qui peuvent être soumises aux matériaux du site.

3. Caractérisation des propriétés pétrophysiques

Le calcul effectué sur des modèles de matériau calcaire (CA) créés au moyen des deux méthodes de reconstruction présentées, offrent des informations concernant la porosité ouverte et la perméabilité intrinsèque. Pour ce qui concerne, les valeurs de porosité ouverte :

- La concaténation des images génère un système dont la porosité ouverte, $\varepsilon_{open} = 43.3\%$
- La méthode d'autocorrélation génère un système dont la porosité ouverte, $\varepsilon_{open} = 43.2\%$

Des simulations d'écoulement monophasique ont été effectuées sur des modèles de matériaux calcaires permettant de valider les propriétés de transfert concernant le calcul de la perméabilité en appliquant les équations de Darcy.

La perméabilité « réelle » calculée à partir du modèle dépend directement de la taille des voxels $K_{calc} = K \cdot I \cdot a^2$ (avec K étant la perméabilité adimensionnelle obtenu par le calcul, I la matrice identité et « a » la taille d'un voxel unitaire). Les résultats obtenus étant :

- Perméabilité du modèle générée par la méthode de concaténation $K_{calc} = 8.3 \cdot 10^{-12} m^2$
- Perméabilité du modèle générée par la méthode d'autocorrélation $K_{calc} = 8.5 \cdot 10^{-12} m^2$

4. Caractérisation des propriétés physiques

Le calcul de la valeur de conductivité électrique du matériau calcaire (CA) a été effectué dans le cadre de la simulation d'écoulement monophasique correspondant à une situation de saturation totale du matériau.

La conductivité électrique est gouvernée par les équations de Laplace qui s'applique tant aux processus électriques que thermiques et qui dépend de la géométrie du milieu poreux (tenseur sphérique pour des milieux isotropes)

Les résultats de conductivité calculés correspondent à des valeurs adimensionnelles du ratio de la conductivité de l'échantillon saturé sur la conductivité du fluide ($\sigma = \sigma_{meas} / \sigma_{fluide}$).

Conductivité du modèle générée par concaténation :

$$\bar{\sigma} = \begin{pmatrix} 0.254664 & 0.002976 & 0.009275 \\ 0.002373 & 0.243613 & -0.016568 \\ 0.011941 & -0.014875 & 0.266086 \end{pmatrix}$$

Conductivité du modèle générée par autocorrélation :

$$\bar{\sigma} = \begin{pmatrix} 0.153948 & -0.035913 & 0.002294 \\ -0.035128 & 0.152768 & 0.000058 \\ 0.000008 & -0.002919 & 0.224470 \end{pmatrix}$$

Les résultats des calculs de conductivité électrique du volume suivant les trois directions spatiales correspondent aux valeurs de la diagonale de la matrice. Pour les deux types de modèles testés, les valeurs de conductivité sont très similaires. En effet, dans les deux cas, les résultats du calcul de conductivité électrique sont très similaires dans les trois directions spatiales, ce qui confirme le caractère isotrope du matériau.