

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'ingénieur**

**Mémoire de Magister**

Présenté par :

**Sofiane AIT OUKLI**

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en :

**Filière : Génie des matériaux**

**Option : Matériaux archéologiques**

**TITRE DU MEMOIRE**

**Elaboration d'un mortier de jointement et restitution 3D**

**« Cas du site de la villa Mahiédinne »**

**Devant le jury composé de :**

Mr AYADI Azzedine (Professeur UMBB)	Président
Mr BOUMCHEDDA Khaled (Professeur UMBB)	Examineur
Mr OUDJIT Mohammed Najib (Professeur USTHB)	Examineur
Mme BOUMGHAR Fatima (Professeur USTHB)	Directrice de thèse
Mr HAMIANE Messaoud (Professeur UMBB)	Co-Directeur de thèse

# *R*emerciements

---

*Avant tout je remercie dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné la force tous les jours. A toute ma famille pour être toujours là à mes cotés.*

*À mon directeur de thèse Mme Boumghar, le directeur de l'option Mr Hamiane ainsi qu'à tous les enseignants de l'université de Boumerdes pour leur aide et conseils.*

*À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

## ملخص

تزخر الجزائر بتراث ثقافي ثري ومتنوع إلا أن هذا التراث معرض للتلف من جراء تأثير العوامل الطبيعية، الزمن والعامل البشري، فالحفاظ على هذا التراث وإعادة اعتباره من خلال صيانته وحمايته يستدعي دراسة دقيقة وعميقة.

يهدف عملنا هذا إلى دراسة مواد بناء فيلا محي الدين الموجودة بالجزائر العاصمة، حالة حفظها، تشكيل تركيبية ملاط جيري يتلاءم ومواد بناء المعلم الأثري. كما دعمنا بحثنا هذا بتصميم ثلاثي الأبعاد لجزء من الموقع الأثري والذي يسمح لنا بإصدار وثائق متفاوتة التفاعلية (صور، فيديو، مجسمات افتراضية). هذه الأخيرة يمكن أن تنشر فيما بعد بواسطة عدة وسائط (قرص صلب، انترنت....) من أجل التعريف بالموقع.

## الكلمات المفتاحية

التلف، مواد بناء، فيلا محي الدين، ملاط الجير، تصميم ثلاثي الأبعاد.

*RÉSUMÉ*

Le patrimoine algérien, aussi riche soit-il, ne peut survivre au passage du temps, aux effets de la nature et, plus importants encore, au facteur humain. C'est pourquoi un travail d'entretien et de restauration bien étudié est nécessaire afin de redorer les traits de nos sites archéologiques.

Ce travail entre dans le cadre d'une étude visant à faire un constat sur l'état d'un site archéologique de l'époque ottomane, en l'occurrence le domaine Mahiédinne, d'étudier ses matériaux et leur état d'altération ainsi que d'apporter une pierre à cet édifice en confectionnant un mortier de jointement compatible avec les maçonneries du site. Cette recherche est complétée par une restitution 3D d'une partie du site permettant la production de documents plus ou moins interactifs (images, vidéos, maquettes virtuelles...). Ces derniers peuvent par la suite être diffusés grâce à plusieurs supports (CD, DVD, Internet...) afin de faire connaître le site.

*Mots clés*

Matériaux, détérioration, mortier de chaux, restauration, infographie, restitution 3D, modélisation.

*ABSTRACT*

The Algerian patrimony, however rich, can not survive the passage of time, the effects of nature and, more important still, the human factor. This is why a restoration and maintenance work well studied is necessary in order to regild the features of our archeological sites.

This work enters within the context of a research aiming at making a report on the state of an archeological site of the Ottoman's time, in the circumstances the Mahiéidine domain, to study its materials and their state of deterioration thus bringing a stone to this edifice by making a jointing mortar compatible with masonries of the site. This research is supplemented by 3D restitution of part of the site allowing the production of more or less interactive documents (images, videos, virtual models...). These last ones can be diffused thanks to several supports thereafter (CD, DVD, Web...) in order to make known the site.

*Key words*

Building materials, deterioration, lime mortar, restoration, computer graphics, 3D restitution, modeling.



## TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	2
Résumé.....	3
Table des matières.....	6
Liste des annexes.....	12
Introduction générale.....	14

### *CHAPITRE I : l'archéologie, oratoire de l'ancestral par des locutions modernes*

1. Introduction.....	16
2. Techniques et étapes d'une étude archéologique.....	16
3. La représentation graphique des données archéologiques.....	16
3.1 La documentation photographique.....	16
3.2 Le dessin technique à deux dimensions.....	17
3.3 La représentation tridimensionnelle.....	17
4. Reconstitution archéologique.....	18
4.1 Les dessins.....	19
4.2 Les maquettes.....	19
4.3 Les reconstitutions grandeur nature.....	19
4.4 La reconstitution infographique.....	19

### *CHAPITRE II : L'appareillage et les matériaux archéologiques*

1. Appareillage architectural.....	20
1.1 Définitions.....	20
1.2 Types d'appareils.....	20
1.2.A La nature, la forme et la taille des matériaux.....	20
1.2.A.1 L'appareil en pierres sèches.....	20
1.2.A.2 L'appareil cyclopéen.....	20
1.2.A.3 L'appareil polygonal.....	20
1.2.A.4 L'appareil régulier.....	21
1.2.A.5 L'appareil moule.....	21
1.2.A.6 L'appareil à chaînage.....	21
1.2.B Le mode d'appareillage.....	22
1.2.B.1 L'appareillage à joints vifs.....	22
1.2.B.2 L'appareillage traité avec un liant.....	22
1.2.C La structure du parement.....	23
1.3 Architecture Ottomane et musulmane en Algérie.....	23
1.3.A Matériaux.....	23
1.3.B Éléments architecturaux.....	23
1.3.B.1 Arcs.....	23
1.3.B.2 Supports.....	24
1.3.B.3 Coupoles.....	24
1.3.B.4 Iwans.....	24
1.3.B.5 Pishtak.....	24
1.3.B.6 Moucharabiehs et fenêtres à jalousie.....	24
2. Maçonneries, et matériaux archéologiques.....	25
2.1 Pierres.....	25
2.1.A Définition.....	25



2.1.B Altération des pierre.....	25
2.1.B.1 Les patines.....	25
2.1.B.2 Les dégradations.....	26
2.1.B.2.1 Les altérations physiques.....	26
• Les ravinelements.....	26
• Les dilatations.....	27
• Le gel.....	27
2.1.B.2.2 Les altérations chimiques.....	27
• Les dissolutions.....	27
• Les altérations liées à des concentrations de sels.....	28
• Les encroûtements.....	28
• Les plaques.....	29
• Les désagrégations sableuses.....	30
2.1.B.2.3 Les altérations biologiques.....	30
2.1.B.3 Méthode de conservation de la pierre.....	31
2.1.B.3.1 Traitements préventifs.....	31
2.1.B.3.2 Traitements curatifs.....	31
a)Nettoyage.....	31
b)Consolidation.....	32
2.2 Briques.....	32
2.2.A Historique.....	32
2.2.B Définitions.....	33
2.2.C Pathologies de la brique.....	36
2.2.D Restauration des maçonneries en brique.....	37
2.3Mortiers et enduits.....	40
2.3.A Définitions.....	40
2.3.B Granulats.....	41
2.3.C Liants.....	42
2.3.C.1 La chaux.....	42
2.3.C.1.1 Historique.....	42
2.3.C.1.2 Définitions.....	44
a)La chaux aérienne.....	44
b)La chaux hydraulique.....	46
2.3.C.1.3 Utilisations de la chaux dans le bâtiment.....	47
2.3.C.2 ciment.....	49
2.3.D Eau.....	49
2.3.E Produits d'ajouts.....	50

### *CHAPITRE III : L'infographie appliquée à l'archéologie*

1. Introduction.....	51
2. Domaines d'application.....	51
3. Définitions.....	52
3.1 L'infographie 2 D.....	52
3.2 L'infographie 3D.....	54
4. Les différentes étapes de la reconstitution 3D.....	55
4.1 Modélisation.....	55
4.1.1Modélisation mathématique de courbe et de surface.....	55
4.2 Modélisation des objets solides.....	63



4.3 Illumination et ombrage.....	65
4.3.1 Modèles d'illumination.....	66
4.3.2 Modèles d'ombrages pour polygones.....	67
4.3.3 Matériaux et textures.....	68
4.3.4 Ombres portées.....	69
4.3.5 Transparence.....	69
4.4 Dynamiques et Animations.....	69
4.5 Rendu.....	70
4.5.1 Techniques de rendu pour les dessins linéaires.....	70
4.5.2 Techniques de rendu pour les images ombrées.....	71
5. Reconstitution 3D en archéologie.....	72
5.1 La reconstitution assistée par ordinateur.....	72
5.2 La reconstitution hypothético-déductive.....	72
5.3 Modalistes et méthodes d'acquisitions des données.....	73
5.4 Les instruments métrologiques tridimensionnels.....	73
5.4.1 Le relevé au théodolite.....	73
5.4.2 Les relevés photogrammétriques.....	73
5.5 Scanner 3D et Rendu interactif de sculptures de Michelange.....	74
5.6 La saisie d'information à distance.....	75
5.6.1 Par l'analyse d'image.....	75
5.6.2 Par balayage laser.....	76
5.7 La saisie directe de l'information.....	77
6. Les possibilités de la réalité virtuelle pour la recherche et le traitement de l'information.....	77
6.1 La représentation tridimensionnelle de la topographie.....	77
6.2 La reconstitution du paysage archéologique.....	77
6.3 La prospection virtuelle.....	78
6.4 Possibilité d'association avec d'autres logiciels et des bases de données.....	78
6.5 Simulation des propriétés physiques et visualisation de l'invisible.....	78

#### *CHAPITRE IV : Présentation de la villa Mahiédine*

1. Présentation du site : villa Mahiédine.....	80
1.1 Présentation historique et situation géographique.....	80
1.2 Contexte architectural et système constructif.....	81
2. État des lieux et phénomènes de dégradation.....	83
2.1 Dégradations d'origines humaines.....	83
2.2 Phénomènes naturels.....	85
2.2.A L'humidité.....	86
2.2.A.1 L'humidité ascensionnelle en provenance du sol.....	86
2.2.A.2 L'humidité provoquée par les infiltrations d'eau de pluie.....	86
2.2.A.3 Les condensations.....	87
2.2.A.4 L'humidité accidentelle.....	87
2.2.B Les algues, les mousses et la végétation.....	88



## *CHAPITRE V : Étude d'un mortier de jointement*

1. Problématique.....	89
2. Identification et prélèvement des échantillons.....	89
3. Choix des composants.....	90
3.1 Liants.....	90
3.2 Granulats.....	91
3.2.A Sable.....	91
3.2.B Tuf.....	92
3.2.C Caractéristiques du sable utilisé dans ces formulations.....	93
3.3 Eau.....	94
3.4 Adjuvants.....	94
4. Étude des mortiers.....	95
4.1 Compositions des mortiers.....	95
4.2 Mesure de la consistance des mortiers.....	95
4.3 Mesure du temps de prise.....	97
4.4 Mesure de la résistance à la flexion et à la compression.....	98
4.4.A Résistance à la flexion.....	98
4.4.B Résistance à la compression.....	101
4.5 Mesures du retrait.....	103
4.6 Imbibition et porosité capillaire.....	104

## *CHAPITRE VI : Modélisation et restitution de la villa*

1. Restitution de la villa b et choix des logiciels.....	107
2. Modélisation.....	107
2.1 Collecte des informations et documents relatifs à la restitution.....	107
2.2 Modélisation de la villa.....	107
• Modélisation du Rez-de-chaussée.....	109
• Modélisation du 1er étage.....	110
• Les arcades.....	111
• Modélisation complète de la villa.....	113
3. Habillage.....	114
4. Éclairage.....	116
5. Animation.....	117
6. Rendu.....	117
7. Diffusion.....	118
Conclusion générale.....	119
Références bibliographiques.....	121
Liste des figures.....	125
Annexe.....	129



<i>Anx. 1. Étalement en fonction du dosage en super-plastifiant pour la série CA.....</i>	129
<i>Anx. 2. Étalement en fonction du dosage en super-plastifiant pour la série CB.....</i>	129
<i>Anx. 3. Étalement en fonction du dosage en super-plastifiant pour la série CC et CD...</i>	130
<i>Anx. 4 Résistance à la flexion en fonction du temps pour la série CA.....</i>	130
<i>Anx. 5 Résistance à la flexion en fonction du temps pour la série CB.....</i>	131
<i>Anx. 6 Résistance à la flexion en fonction du temps pour la série CC et CD.....</i>	131
<i>Anx. 7 Résistance à la compression en fonction du temps pour la série CA.....</i>	132
<i>Anx. 8 Résistance à la compression en fonction du temps pour la série CB.....</i>	132
<i>Anx. 9 Résistance à la compression en fonction du temps pour la série CC et CD.....</i>	133
<i>Anx. 10 Imbibition capillaire pour la série CA 01.....</i>	133
<i>Anx. 11 Imbibition capillaire pour la série CA 02.....</i>	134
<i>Anx. 12 Imbibition capillaire pour la série CA 03.....</i>	134
<i>Anx. 13 Imbibition capillaire pour la série CA 04.....</i>	135
<i>Anx. 14 Imbibition capillaire pour la série CA 05.....</i>	135
<i>Anx. 15 Imbibition capillaire pour la série CB 01.....</i>	136
<i>Anx. 16 Imbibition capillaire pour la série CB 02.....</i>	136
<i>Anx. 17 Imbibition capillaire pour la série CB 03.....</i>	137
<i>Anx. 18 Imbibition capillaire pour la série CB 04.....</i>	137
<i>Anx. 19 Imbibition capillaire pour la série CC 01.....</i>	138
<i>Anx. 20 Imbibition capillaire pour la série CC 02.....</i>	138
<i>Anx. 21 Imbibition capillaire pour la série CD 01.....</i>	139
<i>Anx. 22 Imbibition capillaire pour la série CD 02.....</i>	139
<i>Anx. 23 Imbibition capillaire pour la série CD 03.....</i>	140
<i>Anx. 24 Imbibition capillaire pour la série CD 04.....</i>	140
<i>Anx. 25 Prise de masse par capillarité pour la série CA 01.....</i>	141
<i>Anx. 26 Prise de masse par capillarité pour la série CA 02.....</i>	141



<i>Anx. 27</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CA 03</i>	142
<i>Anx. 28</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CA 04</i>	142
<i>Anx. 29</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CA 05</i>	143
<i>Anx. 30</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CB 01</i>	143
<i>Anx. 31</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CB 02</i>	144
<i>Anx. 32</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CB 03</i>	144
<i>Anx. 32</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CB 04</i>	145
<i>Anx. 33</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CC 01</i>	145
<i>Anx. 34</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CC 02</i>	146
<i>Anx. 35</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CD 01</i>	146
<i>Anx. 36</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CD 02</i>	147
<i>Anx. 37</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CD 03</i>	147
<i>Anx. 38</i>	<i>Prise de masse par capillarité pour la série CD 04</i>	148
<i>Anx. 39</i>	<i>Fiche technique chaux aérienne CL90</i>	149
<i>Anx. 40</i>	<i>Fiche technique chaux Boehm NHL2, chaux hydraulique naturelle</i>	150
<i>Anx. 41</i>	<i>Fiche technique chaux hydraulique naturelle pure NHL5</i>	151
<i>Anx. 42</i>	<i>Fiche technique du super-plastifiant</i>	152

## *CHAPITRE I :*

### *l'archéologie, oratoire de l'ancestral par des locutions modernes*

1. Introduction
2. Techniques et étapes d'une étude archéologique
3. La représentation graphique des données archéologiques
4. Reconstitution archéologique

# *I*ntroduction

---

L'Algérie par son histoire et ses richesses regorge de sites et de trésors archéologiques. Ces derniers, au fil du temps, ont subi l'effet des divers phénomènes physiques et chimiques qui les entourent. Température, lumières, humidité, séismes, inondations ainsi que le facteur humain ont participé à la dégradation de nos vestiges et la détérioration des matériaux qui les composent.

La nécessité des restaurations s'est fait ressentir très tôt mais dans la plupart des cas ces dernières n'ont pas fait l'objet d'une étude approfondie et spécifique à chaque cas conduisant ainsi à des dégâts plus importants et parfois irréversibles.

Ce travail vise à fournir une étude du domaine Mahiédinne en y évoquant l'état des lieux, les différents phénomènes de dégradation ainsi que la confection d'un mortier de jointement compatible avec les maçonneries utilisés. Ce travail est complété par une restitution 3D d'une partie du domaine.

Ce mémoire est composé de deux parties. Dans les deux premiers chapitres de la première partie on s'est intéressé à donner une présentation de l'archéologie, ses techniques, les domaines qu'elle traite ainsi que les sciences qui lui sont associés. Dans le troisième chapitre on a évoqué les différents styles de construction et les

matériaux utilisés. Le quatrième chapitre a été consacré à l'infographie, ses techniques et son application à l'archéologie.

La deuxième partie commence par une présentation du domaine Mahiédinne, de l'état des lieux ainsi que les différentes causes de dégradation. Dans le sixième chapitre on a présenté les résultats de l'étude faite sur le mortier de jointement. Le septième chapitre est consacré aux résultats de la restitution 3D de la villa B du domaine Mahiédinne et décrit la méthodologie suivie.



## **1. Introduction**

L'archéologie fut longtemps considérée comme un passe-temps érudit, bien éloigné des préoccupations profondes de la société, et les archéologues comme des rêveurs, inoffensifs mais hors de leur temps, hors ce même archéologue joue jusqu'à nos jours le rôle de la vedette dans un processus devenu aujourd'hui extrêmement professionnel, régissant une affirmation identitaire nous permettant de connaître, préserver et reconstruire notre passé tout en réfléchissant sur notre histoire.

## **2. Techniques et étapes d'une étude archéologique**

Quatre étapes, sont généralement nécessaires pour le déroulement d'une recherche archéologique: la prospection, qui permet de découvrir et de localiser les vestiges ; la fouille, qui vise à les dégager de leur gangue de sédiments ; l'étude, qui les décrit et tâche de les interpréter ; la publication, enfin, qui met l'ensemble des résultats à la disposition de la communauté scientifique et, parfois, aussi du grand public. Mais, outre que toute recherche archéologique ne suppose pas nécessairement une fouille, les interférences sont permanentes entre les diverses opérations : l'étude et la fouille progressent de pair, et la publication s'élabore en même temps. Les techniques mises en œuvre diffèrent d'une étape à l'autre, mais le choix qui en est fait et l'interprétation qui s'en dégage posent des problèmes méthodologiques qui sont à peu près toujours les mêmes. <sup>[1]</sup>

## **3. La représentation graphique des données archéologiques**

### **3.1 La documentation photographique**

La photographie est un moyen d'enregistrement et de sauvegarde des données de terrain sans discrimination, faisant le moins possible intervenir l'opérateur et dans un laps de temps infiniment court. <sup>[2]</sup> Son mode d'accès intuitive et exclusivement visuel fait d'elle un document accessible au plus grand nombre.

Nonobstant, les documents photographiques posent quelques problèmes. Du fait de l'impossibilité de distinguer entre les informations pertinentes et celles qui sont inutiles, on se trouve confronté à une pollution de la valeur informative de la photographie. Cette valeur informative se trouve aussi amoindrie par d'autres facteurs tels le cadrage de la photographie et la luminosité. Il semble alors que la photographie soit dévouée plus à des observations menées à titre indicatif et permettant à conserver rapidement une image des vestiges ou d'un stade provisoire lors de la fouille. Toutefois, la photographie conserve tout son intérêt lorsqu'il s'agit de retranscrire tout type de décor inscrit sur un support bidimensionnel, telles les mosaïques et les peintures murales. Pour la réalité tridimensionnelle il faut ajouter le concept de volume en utilisant une séquence cinématographique ou vidéo, qui nous fait observer le vestige sous différents angles.



### 3.2 Le dessin technique à deux dimensions

Le dessin archéologique, comme le dessin technique (cartographique, industriel ou d'architecture), se différencie de la photographie par la sélectivité des informations qu'il retranscrit. <sup>[3]</sup> Cette forme de retranscription subit trois réductions :

- Une réduction des dimensions de l'objet par un processus de mise à l'échelle. <sup>[3]</sup>
- Une sélection des informations pour n'y garder que les plus pertinentes afin d'éviter une pollution lors de la lecture du document et augmenter la clarté de ce dernier. <sup>[3]</sup>
- Une réduction suivant le principe de géométrie descriptive, par la projection orthogonale de l'objet sur un plan perpendiculaire par rapport au sens de la projection. <sup>[3]</sup>

Dans le cas d'une vaste documentation archéologique, ce procédé montre ses limites, car d'une part, le croisement de deux documents 2D complémentaires ne suffit pas pour reproduire la tridimensionnalité ; d'autre part, la quantité sans cesse grandissante des données rend difficile cet effort mental de recouplement de documents de plus en plus nombreux. <sup>[3]</sup>

### 3.3 La représentation tridimensionnelle

La représentation tridimensionnelle fonctionne sur le même principe que le dessin, c'est-à-dire une projection de la réalité tridimensionnelle sur un plan en deux dimensions, sauf que dans le cas du dessin en deux dimensions, le plan de projection est rigoureusement parallèle aux plans privilégiés de l'objet, de sorte que les informations s'établissant sur des plans perpendiculaires à ce dernier ne puissent pas venir perturber la lecture du document. Ce qui nous amène à respecter les rapports entre les dimensions. Néanmoins, il n'est plus possible d'exprimer la profondeur sur un support en deux dimensions, la solution consiste alors à en annuler la mention. Pour le dessin en trois dimensions ce problème peut être résolu en restituant une certaine vision de la profondeur où les perpendiculaires à ce plan de projection qui représentent cette troisième dimension sont représentées suivant une orientation particulière, le rapport de perpendicularité qui relie l'orientation de la troisième dimension au plan de projection étant aménagé suivant certaines modalités.

L'une des approches ou solution dite « affine oblique » consiste à conserver sur le papier les parallélismes présents dans la réalité, afin que les verticales restent parallèles entre elles, de même que les horizontales et les fuyantes indiquant la profondeur. Dans le cas de la perspective cavalière, le plan principale de l'objet est parallèle au support, et seul le rapport angulaire qu'entretient ce plan avec les parallèles indiquant la profondeur est modifié : cet angle, perpendiculaire dans la réalité, est fixé par convention à 45°, ainsi les dimensions des fuyantes qu'il définit sont déduites de moitié. Il existe un autre système de projection qui permet de conserver le parallélisme et l'échelle des différentes dimensions, qui est l'axonométrie. Les dimensions verticales sont portées sur le support de manière à ce quelles soient rigoureusement parallèles aux



verticales de ce dernier, ainsi les angles sont maintenus mais le système orthonormé qu'il définit est basculé de 45°, ce qui nous donne une meilleure lecture des informations qu'elles véhiculent et ne privilégie aucune des faces par rapport aux autres. <sup>[19]</sup>

Ce mode de retranscription présente quelques lacunes et est limité par un mode de réalisation long et fastidieux : <sup>[4]</sup>

- lorsque le dessin doit être précis, le dessinateur doit s'aider d'autres documents décomposant l'objet en projections orthogonales afin de mieux en contrôler la projection centrale.
- pour réaliser une autre vue du même objet le dessinateur doit recommencer la même procédure en choisissant un autre point de vue.

L'introduction de l'informatique dans l'archéologie a permis d'automatiser le travail et d'en apporter de nouvelles méthodes, ce qui a permis aux archéologues de produire une quantité infinie de documents sans pour autant augmenter en proportion leur volume de travail. Aujourd'hui, ce sont les logiciels qui permettent de traiter l'information tridimensionnelle et de réaliser les dessins en projection.

#### **4. Reconstitution archéologique**

"Pourquoi est-il donc si important de reconstituer virtuellement un site ou une portion de site archéologique ? Parce que, au-delà de l'impact de vulgarisation, la reconstitution sur ordinateur est une information complexe et projective de l'interprétation. Elle est plus qu'une reconstitution graphique : c'est une simulation, c'est-à-dire qu'elle permet l'exploitation tridimensionnelle d'un modèle, par le moyen d'hypothèses et d'enquêtes non destructrices. En outre, les simulations permettent de vérifier objectivement certaines hypothèses d'interprétations qui concernent l'architecture, la culture matérielle, la topographie, les données paléo-écologiques, les micro-analyses territoriales, les restaurations, les mises en perspectives muséales, etc." <sup>[5]</sup>

La reconstitution archéologique permet de visualiser les connaissances actuelles d'un site, en un seul élément, lisible, compréhensible. Elle permet aux archéologues d'élaborer de nouvelles théories en fonction des éléments apportés par la reconstitution et/ou de découvrir de nouveaux éléments, qu'ils soient architecturaux, décoratifs ou ménagers



#### **4.1 Les dessins**

Les dessins ou peintures sont eux, disponibles à volonté, puisqu'ils peuvent être dupliqués ou photographiés. Ils peuvent présenter les sites reconstitués sous tous les angles, et dans n'importe quelle condition. Mais ils ont toutefois des inconvénients nombreux comme de ne présenter les sites que sous certains angles, et même si le site est représenté de nombreuses fois et de diverses façons, il est difficile d'avoir une idée précise et globale du site contrairement à ce que permet la maquette.

#### **4.2 Les maquettes**

Elles permettent d'avoir une vue d'ensemble du site, tout en gardant une grande précision dans les éléments représentés. Elles sont, de plus, déplaçables, certaines peuvent être ouvertes ou démontables, et elles sont peu coûteuses. Il est en revanche impossible ou presque de les ouvrir totalement, ou d'en modifier quelques éléments, quelques couleurs, aspects, ou tailles. De plus, bien que les maquettes soient déplaçables, les sites d'accueil ne peuvent en disposer que durant un temps restreint. De plus, il est assez rare de trouver une maquette en plusieurs exemplaires.

#### **4.3 Les reconstitutions grandeur nature**

Elles sont les reconstitutions les plus avantageuses qui soient, puisque comme leur nom l'indique, elles sont des reconstitutions de site à leur taille normale : elles permettent alors d'avoir la vue d'ensemble, les détails, les matériaux, le cadre écologique... et ce jusqu'aux techniques de construction. Mais elles ont deux inconvénients majeurs : le coût, qui est souvent élevé, et l'accessibilité qui est équivalente à celle qui consiste à visiter le site. De plus, la moindre modification sur la reconstitution peut devenir une épreuve difficile voire insurmontable.

#### **4.4 La reconstitution infographique**

Elle permet à la fois d'avoir les vues d'ensemble et les détails, la possibilité de modifier n'importe quel élément, des images fixes ou des films (sons et musiques compris), et une très grande disponibilité (puisque la reconstitution peut se trouver sur CD-ROM ou sur Internet). Pour les reconstitutions les plus évoluées, il est même possible de circuler, avec ou sans guide, à l'intérieur de celles-ci ; certaines peuvent même être interactives. L'inconvénient majeur des reconstitutions infographiques est qu'elles ne peuvent être disponibles que sur ordinateur, avec certains logiciels. Ce type de reconstitution sera développé plus en détail dans le chapitre IV.

*CHAPITRE II :*  
*L'appareillage et les matériaux archéologiques*

1.Appareillage architectural

2.Maçonneries, et matériaux archéologiques

## **1. Appareillage architectural**

### **1.1 Définitions**

L'appareil, en architecture, désigne les modalités d'assemblage, de liaison et de mise en valeur des matériaux de construction. Il est lié à la nature des matériaux, mais les modes d'appareillage demeurent souvent identiques ou inspirés par les mêmes principes quand, dans l'évolution historique, une architecture passe d'un matériau à un autre, du bois à la pierre, de la pierre au béton. Dans une architecture qui cherche les valeurs d'expression d'un matériau, son esthétique propre, dans les caractères propres de la fonction, l'appareil souligne l'emploi et l'adaptation du matériau suivant le rôle, l'esprit, le but de la structure fonctionnelle de l'édifice. En plus de sa valeur fonctionnelle, l'appareil est souvent lié au milieu géographique, reflétant, ainsi, les caractères historiques d'une période ou d'une région et les valeurs naturelles propres à cette dernière.

### **1.2 Types d'appareils**

Un appareil peut être classé suivant plusieurs critères :

#### **1.2.A La nature, la forme et la taille des matériaux**

##### **1.2.A.1 L'appareil en pierres sèches**

Les murs en pierres sèches sont constitués par un empilement de matériaux à peine dégrossis, il ne fait appel à aucun type de liant, toute sa solidité tient dans le soin et l'habileté de l'empilement. La simplicité de cet appareil en petites dalles imbriquées, dont le seul parement extérieur est dressé, n'a pas nui à la complexité de certaines constructions comme les tours dressées sur plan circulaire ou les maisons couvertes par des voûtes en encorbellement. Ce type d'appareil continue à être employé pour les constructions rapides ou économiques, mêmes dans les périodes les plus brillantes des architectures antiques ou modernes. <sup>[19]</sup>

##### **1.2.A.2 L'appareil cyclopéen**

Ce type d'appareillage de caractère primitif et rustique est propre aux civilisations vigoureuses de la préhistoire. Il est caractérisé par l'emploi de très gros blocs, dont les faces de joint sont à peine dégagées de l'arrachement naturel et qui sont associés sans grand souci de jointement. Des cales sont souvent nécessaires pour obturer les interstices. Par sa force et sa puissance, cet appareil est toujours la marque d'une architecture à caractère guerrier et souligne le rôle défensif des constructions où il se trouve employé. <sup>[19]</sup>

##### **1.2.A.3 L'appareil polygonal**

Ce type d'appareil peut paraître, extérieurement, comme une évolution artistique de l'appareil cyclopéen, les blocs joints respectent leur contour naturel d'extraction, ils sont adaptés les uns aux autres, à la demande, au fur et à mesure de leur mise en place,



ils ne peuvent être préparés que sur chantier à l'aide d'un gabarit en plomb qui dessine les lignes auxquelles ils doivent s'intégrer. Il en résulte des parements extérieurs des murs polygonaux sont ravalés avec soin, tantôt avec un très léger bossage qui accentue la puissance et la force de la maçonnerie, tantôt suivant un plan sans saillie, achevé par un polissage qui met en valeur l'arabesque sinueuse des joints.

L'appareil polygonal est en général traité avec des matériaux de grande qualité, granit, marbre, ou calcaire dur. Il y a peu d'exemples réalisés avec des calcaires tendres ou tufs, ces roches se débitant plus aisément en carreaux et parpaings réguliers. <sup>[19]</sup>

#### **1.2.A.4 L'appareil régulier**

Il consiste à traiter des blocs parallélépipédiques et les disposer en assises horizontales de hauteur uniforme (style isodome) ou variable (pseudo-isodome). Ce type d'appareil demande une technique de taille et d'assemblage très soignée et très précise, ainsi qu'une main-d'œuvre experte et coûteuse qui limite l'emploi et entraîne sa disparition progressive dans l'architecture contemporaine. En outre, il nécessite l'emploi de matériaux de grande qualité puisqu'ils jouent leur rôle sans l'aide d'enduits ou de revêtement. Seuls les beaux calcaires, les pierres dures, mais propres à la taille, les marbres répondent aux diverses exigences de l'appareil régulier.

Les joints verticaux peuvent répondre à une verticalité stricte ou au contraire prendre une inclinaison plus ou moins accentuée (appareil trapézoïdal). Ces mêmes joints peuvent être réduits à une simple ligne de contact, comme dans les monuments égyptiens et grecs d'époque classique, ou au contraire, les joints peuvent être traités avec une plus grande valeur plastique pour dégager la valeur décorative de l'appareil ; ils sont chanfreinés de façon à dessiner des lignes d'ombre qui soulignent des faces éclairées des blocs. <sup>[19]</sup>

#### **1.2.A.5 L'appareil moule**

On désigne par ce terme, la construction en matériaux non autonomes, telle l'argile non façonnée de Mésopotamie ou d'Égypte, le béton romain, le béton moderne. Le principe consiste à couler ces matériaux dans un coffrage qui est enlevé après séchage. Cet appareil peut être laissé « brut de coffrage » ou recevoir un revêtement de pierre. <sup>[19]</sup>

#### **1.2.A.6 L'appareil à chaînage**

Il est associé à des matériaux aussi divers que la pierre, la brique ou le bois, son origine est à chercher dans les maçonneries de structure pauvre et surtout dans les régions pauvres en pierre. Avant l'emploi du béton on construisait en briques crues, voire en simple pisé, d'où la nécessité de la protection et le maintien de ces matériaux, spécialement au pied et aux abouts des murs. On utilisait des matériaux durs, comme le bois et la pierre, pour le renforcement. Ces éléments durs constituent, alors, un cadre dans lequel s'empilent ou se tassent les briques et le pisé ; ils forment des chaînages dont la densité est plus ou moins grande. Par la suite, une valeur décorative s'est ajoutée au rôle de renforcement, laissant libre recours à l'imagination des artistes. <sup>[19]</sup>

## **1.2.B Le mode d'appareillage**

### **1.2.B.1 L'appareillage à joints vifs**

Il est fondamental dans les architectures antiques, en particulier égyptiennes et grecques, comme dans l'architecture maya. Les blocs sont juxtaposés suivant des surfaces de joints soigneusement préparées de façon à obtenir une coïncidence parfaite quelques que soient la forme du joint ou la taille de la pierre. La difficulté d'obtenir une parfaite cohésion a entraîné l'emploi de techniques particulières, cette cohésion n'est pas cherchée en général sur toute la surface du joint, mais est réalisée par l'intermédiaire de bandeaux. La région centrale est démaigrie, traitée en retrait, laissant un léger vide entre les deux blocs. La préparation de ce jointement exige un travail de polissage très soigné pour chaque joint, qui était exécuté sur chaque face libre au fur et à mesure de la pose. D'autre part, sur les lits horizontaux, le travail de préparation des joints avec le polissage des surfaces était exécuté sur chaque assise, après sa mise en place ; un ravalement était alors exécuté au ciseau, parfois même à la pointe, pour faire disparaître les saillies ou les dénivellations et préparer le lit d'attente de l'assise suivante.

Des procédés différents peuvent être utilisés pour d'autres types de construction, comme les monuments romains en grand appareil. Après la mise en place de chaque bloc, un coup de scie était passé dans le joint pour lisser les surfaces et permettre une complète juxtaposition.

Une autre technique était utilisée en Égypte, en Syrie, en Grèce, à Rome et dans les provinces de l'art romain, Gaule ou Afrique du Nord. Elle visait à protéger contre glissement les murs construits en grand appareil à joints vifs. Les blocs d'une même assise sont reliés entre eux par des crampons ou des griffes en bois, en bronze ou en fer baignés dans des coulées de plomb. Ces crampons ont tantôt une forme en queue d'aronde, aux extrémités évasées, tantôt le profil d'une griffe avec des tenons verticaux à chaque extrémité. D'une assise à l'autre les blocs ou les tambours des fûts de colonne étaient goujonnés les uns aux autres par des tenons de bois ou de bronze, de forme circulaire ou quadrangulaire. <sup>[19]</sup>

### **1.2.B.2 L'appareillage traité avec un liant**

Il est largement employé dans les constructions en matériaux ordinaires, ainsi que dans les édifices de grand appareil, dans les architectures modernes et contemporaines. Le liant utilisé peut être de diverses natures, un mortier de terre plus ou moins argileuse, dans les architectures primitives ou pauvres ; un lait d'argile parfois renforcé par des matières bitumineuses, dans les constructions en brique d'Égypte ou de Mésopotamie.

La chaux et le sable ont fait leur apparition très tôt dans la préparation des liants, les poudres volcaniques et la briques pilée furent employées comme ajouts avec des dosages extrêmement variés. Les romains bâtissaient des constructions massives en moellons qu'ils baignaient dans d'épaisses couches de mortier. <sup>[19]</sup>

### 1.2.C La structure du parement

C'est le traitement du parement qui donne à l'appareil une physionomie propre et précise ainsi que son originalité. Selon une tendance, le mur est conçu comme un tout, un élément unifié, traité dans son ensemble et par panneaux. Dans ce cas, les joints s'effacent, les parements extérieurs sont ravalés avec soin et la façade est composée de grands panneaux que limitent les ouvertures, les chaînages. C'est le cas pour les murs grecs du V<sup>ème</sup> siècle A-J, des conceptions de l'architecture égyptienne ainsi que les grands monuments historiques de l'architecture romaine. L'autre perspective tend à dégager les structures architecturales et à faire sentir le détail de la construction et l'originalité de l'appareil. Les éléments constitutifs du mur sont mis en valeur, aux dépens de l'unité du parement. On procède, alors, au traitement des joints et à une taille particulière du parement de chaque bloc ou chaque élément. Si les mortiers ou les ciments de liaison débordent, ils sont traités soit en bandeaux plats, soit en sillons, tirés au fer et parfois soulignés d'un filet coloré. <sup>[19]</sup>

## 1.3 Architecture Ottomane et musulmane en Algérie

### 1.3.A Matériaux

Le choix de l'utilisation d'un tel ou tel matériau dépendait comme de nos jours de beaucoup de facteurs : la région où l'édifice est construit, l'accessibilité du matériau, son coût, sa destination...Il existe cinq types de matériaux utilisés dans la construction en Algérie sans compter le bois que l'on retrouve surtout dans les charpentes : <sup>[20]</sup>

- **Le Pisé** : Il s'agit d'un mélange de terre, de chaux et de chamotte (argile cuite pilée) ou de petits cailloux. Pressé entre deux planches de bois (encaissement), ce matériau est utilisé principalement pour les habitations.
- **le banco** : C'est un mélange de terre crue et de paille.
- **la brique crue** : elle a l'avantage d'être facile à trouver et à utiliser, et peu coûteuse. Son grand défaut réside dans sa très mauvaise conservation et sans comportement avec l'eau.
- **la brique et terre cuite** : Elle est usitée pour tous types de monuments, des plus simples aux plus importants (mosquées, madrasas, tombeaux...). Peu chère, elle se conserve bien. on peut utiliser deux types d'éléments : structurels (briques glaçurées ou non) ou purement décoratifs comme les carreaux de revêtement en céramiques.
- **le moellon** : Il se constitue de pierres mal aguerries qui tiennent grâce à un mortier de chaux et de sable, auquel ont parfois été ajoutés du charbon et de la chamotte.
- **la pierre** : La nature des pierres utilisées varie selon les régions. les marbres sont utilisés pour leurs propriétés décoratives (couleurs).

### 1.3.B Éléments architecturaux

#### 1.3.B.1 Arcs

Les arcs sont un élément majeur dans l'architecture en Algérie (Musulmane et Ottomane) tout comme dans l'architecture occidentale. Certains sont courants en orient

comme en occident : arc en plein cintre, arc brisé, mais d'autres sont plus spécifiques, comme l'arc persan, au profil caréné, l'arc polylobé, l'arc à lambrequins ou encore l'arc outrepassé (en fer à cheval). <sup>[21]</sup>

### 1.3.B.2 Supports

Il y a deux types de supports utilisés : <sup>[21]</sup>

- **Les colonnes** : des supports cylindriques. Dans les premiers siècles de l'Islam, les colonnes utilisées proviennent souvent de remplois de bâtiments antiques, mais au bout d'un certain temps, les matériaux antiques se faisant rares, les ouvriers islamiques apprennent à en tailler eux-mêmes
- **Les piliers** : des éléments maçonnés, le plus souvent carrés, rectangulaires ou cruciformes.

### 1.3.B.3 Coupoles

C'est un mode de couverture hémisphérique, qui repose le plus souvent sur une zone de transition octogonale elle-même posée sur quatre piliers. Pour cette zone de transition on peut se servir de pendentifs (triangles convexes posés sur la pointe), comme dans le monde byzantin, ou de trompes, à savoir des petites niches, ce qui proviendrait du monde iranien. À partir du XV<sup>e</sup> siècle, les coupoles sont très souvent doubles laissant un espace plus ou moins important entre la coque interne et la coque externe. Cette technique permet de réaliser des monuments plus hauts. <sup>[21]</sup>

### 1.3.B.4 Iwans

Ils proviennent du monde iranien. Il s'agit d'un hall voûté avec une façade rectangulaire ouverte par un grand arc. <sup>[21]</sup>

### 1.3.B.5 Pishtak

C'est un élément provenant d'Iran. Il s'agit d'un portail en forme d'arc qui fait saillie sur la façade où il se trouve. En général, il est cantonné de deux minarets. <sup>[21]</sup>

### 1.3.B.6 Moucharabiehs et fenêtres à jalousie

Les moucharabiehs sont une sorte de grillages en bois tourné (ou d'autres matériaux), ils sont fréquemment utilisés. Parfois, des barrières de moucharabiehs sont même créées. <sup>[21]</sup>

## **2. Maçonneries, et matériaux archéologiques**

### **2.1 Pierres**

#### **2.1.A Définition**

La pierre est une roche inorganique ou concrétion, d'origine sédimentaire, magmatique ou métamorphique. Parmi les pierres utilisées comme matériaux de construction, on trouve le basalte, le silex, le granite, les roches calcaires, le marbre, le porphyre, le grès et l'ardoise. Les pierres d'ornement, outre les pierres précieuses ou les gemmes, incluent l'albâtre, la fluorite, le jade, le jaspé, le lapis-lazuli, la labradorite et la malachite. Le marbre onyx mexicain (stalagmitique aragonite) et le marbre onyx algérien, colorés de façon moins élégante, représentent des additions relativement récentes aux pierres ornementales, au même titre que le bois pétrifié d'Arizona. Ces dernières années, le granite représentait environ 83 % des pierres utilisées pour les monuments, le marbre en représentant environ 17 %. <sup>[22]</sup>

#### **2.1.B Altération des pierres**

Le développement industriel et toutes les pollutions qu'il engendre, surtout depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, ont donné au problème de la maladie des pierres une dimension nouvelle. Si la recherche des causes et des mécanismes d'altération ainsi que celle des moyens de lutte sont entreprises scientifiquement depuis au moins une centaine d'années, l'organisation des études en ce domaine, qui peut intéresser des disciplines aussi diverses que la météorologie, la microbiologie, la pétrographie ou les travaux publics, est toute récente.

On ne peut pas considérer toutes les transformations des pierres au contact de l'atmosphère comme des altérations. Ainsi, la tradition des tailleurs de pierre voulait que les pierres, après leur extraction, soient laissées sur la carrière pour avoir une maturation produite par la migration de carbonate de calcium vers la surface de la pierre (calcin) ce qui améliore leurs qualités mécaniques. <sup>[23]</sup> Le calcin possède une dureté et une densité plus grandes que celles de la roche originale. Les analyses chimiques ont montré qu'il était constitué en grande partie de sulfate de calcium, ce qui tendrait à prouver que le calcin en zone urbaine résulte de la superposition de migrations de carbonates et de sulfates de calcium. <sup>[23]</sup>

Ainsi, en se fondant sur les observations et les modifications des roches dans leur contexte naturel, il est possible de subdiviser les transformations superficielles des pierres en œuvres en plusieurs groupes :

##### **2.1.B.1 Les patines**

Ils correspondent à une évolution superficielle de couleur ou de texture sans changement de la forme ou de la résistance de la pierre <sup>[23]</sup>. Les pierres plus anciennes ont par rapport à celles récemment extraites des carrières une couleur plus foncée, et une texture plus satinée qui leur donne un aspect lisse presque métallique. Cette coloration provient d'un film d'épaisseur millimétrique qui recouvre seulement les

surfaces exposées aux intempéries et donc soumises à des alternances d'imbibitions et de séchages. La patine est observée sur la majorité des pierres où l'acquisition d'une couleur ocre est due à un léger enrichissement en oxydes de fer de la couche externe de la pierre. Lors de la migration des fluides par capillarité, les oxydes disséminés dans la pierre sont transférés vers la surface d'évaporation où ils s'accumulent. Des concentrations très faibles d'oxydes de 0.1 % par rapport à la roche totale, suffisent à pigmenter la surface des roches et à leur donner des colorations rouille. <sup>[23]</sup>

Sur les grès, il existe parfois sous le film d'oxyde de fer une couche d'un dixième de millimètre d'épaisseur constitué d'un feutrage d'argile où sont disséminés des éclats de quartz et de calcite qui ont été entraînés depuis le grès ou développés sur place à partir d'autres minéraux. <sup>[24]</sup> C'est la présence de cette patine composite qui donne aux vieilles sculptures en grès leur aspect lustré. Sur les roches carbonatées, molasses et tuffeaux, dans des situations équivalentes, on observe un horizon millimétrique formé de calcite bien cristallisée et teintée par des oxydes de fer ; cette concentration superficielle de calcite constitue de calcin. <sup>[24]</sup>

La composition des patines, leur épaisseur et leur couleur varient d'une qualité de pierre à l'autre. C'est pourquoi, indépendamment des dépôts de poussières qui encrassent les surfaces et qui en atténuent les contrastes, le développement normal d'une patine ne supprime pas les différences d'aspect entre plusieurs types de pierres.

### **2.1.B.2 Les dégradations**

Elles regroupent toutes les autres modifications et qui sont caractérisées par une perte de matière ou un affaiblissement de la cohérence de la pierre. <sup>[23]</sup>

#### **2.1.B.2.1 Les altérations physiques**

Les altérations physiques provoquent la dissociation partielle des pierres sous forme de grains ou d'éclats de roche mais sans modifier la composition minéralogique. Les écoulements accidentels, qui sont à l'origine des ravinements, constituent le mécanisme d'altération physique le plus connu bien qu'ils soient moins fréquents que les altérations liées à des dilatations. Celles-ci résultent de l'expansion volumique des pierres dans le cas de dilatations hydriques ou thermiques.

- **Les ravinements** : les ravinements se produisent sur des éléments exposés à des ruissellements accidentels, sous des gargouilles, des chéneaux défectueux ou à l'aplomb de joints érodés qui collectent les eaux d'écoulement. Sur les roches litées, formées d'une alternance de lits durs et tendres, les ruissellements sont à l'origine de ravinements inégaux par creusement des lits les plus tendres tandis que les roches homogènes sont creusées de façon uniforme. <sup>[25]</sup> Les ravinements sont la conséquence la plus spectaculaire mais souvent la moins grave des écoulements car c'est sur leurs bordures, dans les endroits humides, que cristallisent les sels et que se développent les dégradations les plus importantes. <sup>[25]</sup> Dans certaines conditions d'exposition (encadrements de portes, sculptures isolées, angles des bâtiments) des érosions éoliennes peuvent se produire. Ce mécanisme ne permet pas, à lui seul, d'expliquer les

ravinements car dans tous les cas étudiés, l'altération éolienne ne semble agir que sur les pierres fragilisées par des sels. <sup>[25]</sup>

- **Les dilatations :** Les roches soumises à des variations de température ou de saturation en eau peuvent subir des dilatations thermiques et hydriques dont l'importance varie en fonction de la nature minéralogique des pierres et des structures de leur milieu poreux. Les argiles qui gonflent en présence d'eau et qui modifient les structures de porosité jouent souvent un grand rôle dans la dilatation hydrique des roches. <sup>[25]</sup> Les oxydes, les hydroxydes et les calcites finement cristallisées peuvent également jouer un rôle déterminant. La répétition des dilatations hydriques aboutit au décollement de plaques dont la surface et l'épaisseur correspondent à la partie de la roche imbibée lors de chaque précipitation. Ces plaques, situées dans les zones mouillées, se distinguent des éclatements dus au gel car elles épousent la forme externe des pierres. Elles se distinguent de certaines altérations chimiques car elles ne présentent pas à leur base de concentrations en sels. <sup>[25]</sup> Malgré ces différences, la morphologie des dégradations en plaque ne permet pas toujours de se prononcer sur le mécanisme qui les a engendrées.

- **Le gel :** Dans beaucoup de régions, les éclatements dus au gel constituent les dégradations les plus spectaculaires que l'on puisse observer sur les bâtiments. La gélifraction affecte surtout les roches sédimentaires bien litées et provoque des éclatements et des fractures qui écartent les lits les uns des autres ou qui divisent les pierres en tranches épaisses de plusieurs centimètres. Ces dégradations se développent sur les pierres exposées aux intempéries et préférentiellement sur les blocs placés en délit comme le sont, pour les besoins de la sculpture, les statues, les pinacles et les baldaquins. <sup>[25]</sup>

Les gélifractions résultent de l'expansion volumique de la glace par rapport au volume initial occupé par les solutions qui imbibent les pierres. Le mécanisme de la gélifraction met ainsi en évidence l'importance de la saturation des roches qui dépend :

- Des conditions climatiques : roches sèches ou au contraire fortement imbibées lors du gel;
- De la situation des pierres sur le bâtiment pierre abritée, pierre en zone humide ou lessivée;
- Des propriétés du milieu poreux.

Les effets du gel sont d'autant plus importants que la roche présente des surfaces d'anisotropie comme un litage stratigraphique ou des plans de fracture qui ne sont pas comprimés par une charge sus-jacente. Ces conditions, qui facilitent le développement de la gélifraction, se trouvent réunies sur les roches sédimentaires détritiques.

### 2.1.B.2.2 Les altérations chimiques

- **Les dissolutions**

Les dissolutions se développent sur les matériaux carbonatés, pierres calcaires ou mortiers à la chaux exposés à des lessivages. Sous l'effet des dissolutions, les pierres

subissent une usure superficielle qui empêche l'accumulation de poussières et donc l'encrassement des surfaces. C'est pourquoi les pierres soumises à de légères dissolutions sont souvent confondues avec des pierres totalement épargnées par les altérations. Lorsque les dissolutions se produisent sur des roches hétérogènes, comme les molasses, constituées par la juxtaposition de lits plus ou moins riches en calcaire, elles provoquent une usure différentielle de la pierre qui entraîne la mise en relief des lits les plus durs. <sup>[23]</sup> Dans les grès carbonatés, la dissolution de la matrice calcaire facilite le dessertissage des grains de quartz, provoquant des altérations semblables aux ravinements. Les dissolutions sont d'autant plus intenses et plus rapides que les eaux sont plus acides; c'est pourquoi elles sont amplifiées par la pollution atmosphérique qui augmente l'acidité des eaux de pluie. <sup>[23]</sup> Sur les bâtiments, les variations d'acidité des eaux de ruissellement se traduisent par des dissolutions d'intensité différente. Les zones soumises aux pluies fouettantes, comme les appuis de fenêtre, les cordons et corniches, ainsi que les parties hautes des murs, subissent de fortes dissolutions. Dans les parties basses des murs, les eaux de ruissellement qui se sont chargées en carbonates dans les parties sus-jacentes provoquent des dissolutions plus faibles. <sup>[23]</sup>

- **Les altérations liées à des concentrations de sels**

Les altérations qui entraînent une modification minéralogique de la partie superficielle de la pierre sont caractérisées par des concentrations anormales de sels. Le plus souvent, des sulfates et des chlorures sont en effet associés à des altérations de formes variées qui se développent sur toutes les qualités de pierres. <sup>[23]</sup> La diversité des formes d'altération a été à l'origine d'une nomenclature complexe formes en chancres, plaques, pellicules, pustules, champignons, onglets.etc. Termes regroupés sous le vocable de « maladie de la pierre». Malgré leurs formes variées, les altérations liées à des concentrations de sels peuvent être classées en encroûtements, plaques ou désagrégations sableuses en fonction de leur structure et de leur morphologie et des mécanismes qui les génèrent. <sup>[23]</sup>

- **Les encroûtements**

Les encroûtements noirs ou croûtes noires, souvent épais et d'aspect scoriacé, observés sur les grès, les molasses et les tuffeaux, se développent également sur toutes les qualités de pierres. Suivant leur degré d'évolution, les encroûtements se détachent et la pierre sous-jacente est compacte et cohérente ou au contraire, ils adhèrent et incrustent le substrat pulvérulent et friable. Ces encroûtements ne se développent que dans les parties humides abritées des lessivages où s'évaporent les solutions qui transitent à travers la roche. Sur les bordures humides des zones lavées par les eaux fouettantes et les ruissellements, les encroûtements qui se développent à l'abri de toute érosion peuvent recouvrir de grandes surfaces sur des épaisseurs dépassant un centimètre. L'analyse des encroûtements au microscope permet de distinguer une succession de couches que l'on peut caractériser par leur composition, leur structure et leur origine <sup>[23]</sup>. De l'extérieur vers l'intérieur on peut identifier :

- Une couche externe noire, friable, d'aspect spongieux et sans cohérence superficielle. Elle est formée de suies, de poussières, d'éléments de mortier et de grains de sable cimentés par un feutrage très lâche de cristaux de gypse et parfois de calcite. L'accumulation de ces particules sur des surfaces humides résulte d'un dépôt atmosphérique direct qui ne peut se développer qu'à l'abri des lessivages; au contraire,

les fins cristaux de gypse et de calcite se sont développés lors de l'évaporation des solutions qui ont transité à travers les pierres sous-jacentes.

- En-dessous, une couche plus cohérente et moins riche en suies comprend des éléments provenant de la pierre sous-jacente ; sa cohésion est assurée par un réseau de petits cristaux de gypse qui constitue, vers la base de l'encroûtement, un ciment bien développé et dense.

Le passage des couches externes caractérisées par des dépôts atmosphériques au substrat pierreux peut être brutal ou au contraire progressif lorsque l'encroûtement correspond uniquement à des dépôts plaqués sur la pierre, son abrasion laisse apparaître la surface de la pierre presque intacte.<sup>[23]</sup> Ce type d'encroûtement se développe apparemment vite, en présence d'apports importants et sur des pierres peu poreuses dans lesquelles le gypse a faiblement cristallisé. Si l'encroûtement incruste la pierre, on observe un passage progressif entre les couches de dépôt et le substrat pierreux imprégné par le gypse qui tapisse les pores et remplit des fractures. La pierre est friable et pulvérulente, parfois sur des épaisseurs de plusieurs centimètres. Ce type d'altération s'observe sur des pierres poreuses. Les encroûtements ont tendance à se détacher et la pierre sous-jacente à s'éroder, parfois sur plusieurs centimètres d'épaisseur: si les conditions d'exposition n'ont pas évolué, la nouvelle surface peut, à son tour, être recouverte par un encroûtement.

- **Les plaques**

Les pierres soumises à des pluies fouettantes et à des cycles d'imbibition et de séchage sont affectées par un débit en plaques dont l'épaisseur varie de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Indépendantes du litage stratigraphique, les plaques qui moulent les surfaces externes se distinguent des éclatements dus au gel et des décollements résultant des dilatations hydriques car elles peuvent affecter sur des murs entiers, toutes les pierres de même exposition. Leurs surfaces sont souvent marquées par des dissolutions ou par des recouvrements de lichens mais elles sont exemptes d'encroûtement. Habituellement, les plaques prennent naissance en bordure des joints par un décollement qui progresse vers la partie centrale jusqu'à la chute de la plaque. Lorsqu'une plaque se détache, la nouvelle surface située en retrait par rapport au mur est ainsi protégée des ruissellements. Cette nouvelle géométrie de la surface n'est pas propice au développement d'une nouvelle plaque mais favorise la formation d'encroûtements et surtout de désagréments sableux.<sup>[25]</sup>

Comme pour les encroûtements, l'analyse des plaques au microscope permet de mettre en évidence une succession d'horizons qui diffèrent par leur composition :

- La plaque proprement dite est formée d'une tranche de roche cohérente. Sa surface peut être dure et homogène, en particulier lorsqu'elle est recouverte d'une patine d'oxydes, ou au contraire friable, lorsqu'elle est affectée par des dissolutions. Dans sa partie inférieure, le long de la surface de décollement, la plaque est granuleuse, presque pulvérulente. Les dégradations en plaques se distinguent des autres débits par la présence de sels (batte, thénardite et surtout gypse) concentrés en profondeur, où ils provoquent une décohérence des constituants de la roche, sous la plaque, la pierre est pulvérulente car elle est enrichie en sels sur une épaisseur de plusieurs centimètres.

- **Les désagréations sableuses**

Sur les pierres granuleuses humides mais non lessivées, le dessertissage des grains provoque une désagrégation sableuse qui est à l'origine d'une érosion rapide sous l'effet des lessivages. Cette désagrégation peut affecter toute la surface de la pierre de façon homogène ou au contraire donner lieu à une érosion différentielle. Malgré des développements dans des conditions d'exposition identiques, les désagréations sableuses sont le plus souvent indépendantes des encroûtements gypseux. Sur les blocs pétrographiquement homogènes, au litage régulier, l'érosion évolue à la même vitesse sur toute la surface de la pierre; progressivement, la face externe recule et se trouve en retrait de plusieurs centimètres par rapport à sa position initiale. Sur les pierres hétérogènes, à galets et à stratifications entrecroisées, une érosion différentielle se développe aboutissant à la formation d'alvéoles ; entre les parties en creux où l'érosion a progressé rapidement, les zones peu érodées correspondent aux parois des alvéoles.

<sup>[25]</sup> Dans de nombreux cas, les alvéoles progressent à partir d'irrégularités comme les trous de levage, les traces d'outils ou les emplacements de galets. Ces irrégularités superficielles semblent modifier les conditions d'évaporation dont dépend le développement des alvéoles. D'une façon générale, des efflorescences blanches de sel tachent la surface des pierres dans leurs parties non affectées par les alvéoles. Il s'agit de thénardite et surtout de halite que l'on retrouve, associées au sable dans le fond des alvéoles, en efflorescences sur les parois des alvéoles et à l'état de traces dans la masse de la pierre soumise aux désagréations sableuses <sup>[25]</sup>.

Suivant la nature des roches et de leurs propriétés de transfert capillaire et d'évaporation, les sels cristallisent soit à la surface des pierres, soit sous la surface, où ils provoquent le dessertissage des grains. Comme les autres types d'altérations, les dégradations par dessertissage des grains sont contrôlées par l'exposition et par les propriétés physiques des pierres. Les pierres à stratifications entrecroisées où les alvéoles sont concentrées le long de litages obliques ayant des propriétés physiques sensiblement constantes, en fournissent une bonne illustration.

### **2.1.B.2.3 Les altérations biologiques**

Parmi les organismes qui peuvent se développer sur un substrat rocheux, on peut distinguer deux groupes : les organismes nuisibles, bactéries ou végétaux qui, par leurs fonctions, leurs métabolites ou leurs manifestations visibles, sont susceptibles d'introduire des altérations ou des maladies de pierre.

Les dislocations des pierres sont activement accélérées par les racines de *Ficus elastica*. Les lichens, les algues et les champignons peuvent être aussi considérés comme un facteur de désagrégation de la roche. En effet, les filaments s'insèrent entre les grains des pierres et les déchaussent. À l'échelle du cristal, ces derniers pénètrent dans les macles et les clivages, et provoquent ainsi une microfissuration. <sup>[24]</sup>

En outre, les algues et les champignons peuvent provoquer des accumulations de fer et de manganèse, créant ainsi des croûtes noires. Les champignons, les actinomycètes et les bactéries peuvent sécréter des enzymes et des acides capables de solubiliser le calcium, le potassium et le magnésium. C'est le cas des « bactéries des silicates », qui attaquent aussi les plagioclases. Les bactéries du cycle biologique du

soufre peuvent produire du gypse, créant ainsi des lésions. Quant aux bactéries du cycle de l'azote, elles peuvent produire des sels d'ammonium facilement solubles.

### **2.1.B.3 Méthode de conservation de la pierre**

Depuis la dernière décennie, l'ensemble des procédés et produits de conservation de la pierre sont systématiquement testés. Déjà, un certain nombre de résultats tangibles ont été acquis dans les mesures préventives et curatives.

#### **2.1.B.3.1 Traitements préventifs**

Les traitements préventifs consistent à empêcher les migrations d'eau dans la pierre. Les produits hydrofuges imperméabilisent les parements, mais ils laissent s'évaporer la vapeur d'eau (respiration de la pierre) des zones internes. Ainsi, ces produits peuvent être appliqués sur des surfaces verticales préalablement lavées et rejointoyées.

Certains procédés de lutte contre les remontées d'eau du sol sont efficaces. Pour cela, des imprégnations de la base du mur ou des injections dans les joints avec des résines sont utilisées. Ainsi, ces deux types de procédés viennent s'ajouter aux méthodes classiques de reprise en sous-œuvre avec des feuilles de plomb et de drainage du sol.

#### **2.1.B.3.2 Traitements curatifs**

Les traitements curatifs comportent le nettoyage, l'élimination des sels et la consolidation des parties altérées friables.

##### **a) Nettoyage**

Le nettoyage de parement à l'eau (ruisselante ou nébulisée) permet une élimination des salissures et des sulfates en surface. Cependant, dans certains cas des traitements plus appropriés sont à envisager :

- Dans le cas de salissures minérales importantes et indurées, sans introduire de grandes quantités d'eau dans la masse de maçonnerie, des nettoyages chimiques (bifluorure d'ammonium, bases) sont nécessaires. <sup>[25]</sup>

- Dans le cas de parties sculptées où des desquamations s'amorcent au-dessous de la suie, une préconsolidation à l'aide de résine doit précéder le nettoyage ; ce dernier est réalisé à l'aide d'un microsablage à pression et granulométrie contrôlées. <sup>[25]</sup>

Les nettoyages mécaniques et le sablage sont parfois utiles pour des parements très sales. Cependant, si l'on veut préserver l'épiderme de la pierre, une main-d'œuvre expérimentée doit être employée. Après ces divers nettoyages une application d'hydrofuge empêche la fixation de salissures. <sup>[25]</sup>

L'élimination des sels nocifs peut être réalisée sur des sculptures dans des bains répétés d'eau osmosée. Applications de pulpe de papier humide ou d'argile (sépiolite, attapulгите) et procédé Mora permettent une élimination des salissures et des sels. À

l'opposé, le procédé Lewin permet une insolubilisation des sulfates par formation de sulfate de baryum. <sup>[25]</sup>

### **b) Consolidation**

Dans le cas de pierres altérées, des résines redonnent une cohésion. Les objets démontables peuvent être imprégnés sous vide dans des caissons ; la polymérisation de la résine est provoquée par une irradiation au rayon gamma. <sup>[25]</sup>

Pour la consolidation des pierres en œuvre, diverses résines sont étudiées : silane, silicate d'éthyle, époxy, etc. Ce n'est qu'après avoir acquis la parfaite connaissance des interactions entre la résine et la pierre qu'on pourra garantir la conservation. <sup>[25]</sup>

## **2.2 Briques**

### **2.2.A Historique**

La brique est un matériau très ancien, fait à partir d'argile, que les hommes utilisèrent d'abord crue, séchée au soleil, c'est le fruit d'une longue évolution, qui prend sa source dans l'Orient méditerranéen dès le VIII<sup>e</sup> millénaire avant J.C., ce qui fait d'elle le plus ancien des produits "industriels". C'est sur le site de Jéricho que l'on trouve, à cette époque, des constructions en boules d'argile séchées, qui, dès le millénaire suivant, commencent à être moulées dans leur forme parallélépipédique.

A Abydos, en haute Égypte, des parois en briques sont visibles dans une tombe princière du IX<sup>e</sup> millénaire avant J.C., soit un millénaire avant les premières constructions en pierre de Sakkarah. <sup>[26]</sup>

L'idée d'appliquer à la brique les méthodes de cuisson employées pour la céramique depuis le néolithique ne voit le jour qu'à la fin du III<sup>e</sup> millénaire, à Ur en Mésopotamie, où l'on trouve des briques cuites estampillées. Ce sont les Romains qui généraliseront l'emploi de ce, faisant une fois encore preuve de leur faculté à récupérer et à améliorer ce qu'ils matériau découvraient d'intéressant dans les pays qu'ils soumettaient.

Introduite au sud de la péninsule, vers le Ve siècle avant J.C. par des colonies grecques, la brique s'y diffuse rapidement, essentiellement comme matériau de construction, voire de parement de murs construits en blocage ; ces parements étaient eux-mêmes recouverts de marbres ou de stucs travaillés à l'imitation des monuments grecs, décors actuellement tous disparus. <sup>[26]</sup>

La raison principale de l'utilisation massive du nouveau matériau est très certainement sa maniabilité et sa grande rapidité de mise en œuvre, qui permettait de réduire les délais d'exécution des énormes programmes réalisés par les Romains. La construction des thermes de Caracalla, par exemple, monument de plus de douze hectares, n'a duré que cinq ans.

Ce n'est qu'à partir du II<sup>e</sup> siècle après J.C., sous Trajan, puis Hadrien, que se développe une architecture où la brique devient un matériau noble et se montre, à la fois matériau de structure et élément de parure : seule, avec effets de polychromie obtenus par des briques de teintes différentes, ou associée à de la pierre ou du marbre. <sup>[26]</sup>

En Gaule romaine, cependant, à l'exception de la région toulousaine, rares sont les monuments construits entièrement en brique. Cette dernière est plutôt utilisée dans des maçonneries dites en "opus mixtum" où alternent assises de moellons et assises de briques. <sup>[26]</sup>

Avec l'effondrement de l'empire romain, la brique disparaît, au même titre que les autres constructions "en dur", jusqu'à la période médiévale. <sup>[26]</sup>

Mais à partir du XII<sup>e</sup> siècle, son expansion est à nouveau considérable, principalement dans les régions où la bonne pierre est rare, c'est à dire, dans la grande plaine d'argile et de limon d'Europe du Nord (Flandres, Hollande, Allemagne du Nord), d'où elle atteindra l'Europe centrale et l'Angleterre. <sup>[26]</sup>

Elle se répand également au sud, dans la région toulousaine essentiellement pour ne parler que de la France.

Grâce à l'industrialisation, le XIX<sup>e</sup> siècle offre à la brique un renouveau certain, notamment dans les innombrables demeures et pavillons de style "villé-giature", où elle se prête à l'illusion, au pastiche, au rustique et au pittoresque ; les catalogues des fabricants s'enrichissent de multiples modèles et décors, et la sculpture décorative en façade devient accessible au plus grand nombre. <sup>[26]</sup>

D'autre part le développement de l'architecture industrielle fait appel à la brique, laissée apparente qui, mariée au métal, permet de réaliser de grands volumes bâtis en même temps que les cités ouvrières adjacentes.

## 2.2.B Définitions

- **Brique ordinaire :**

Une brique d'argile est une roche artificielle ayant la forme parallélépipédique rectangle de dimensions bien déterminées. Généralement, on fabrique les briques suivant deux procédés: procédé plastique (l'argile est humectée d'eau de 20 à 25 %) et procédé demi-sèche (l'argile est humectée d'eau de 8 à 12 %). Après moulage et séchage, les briques sont cuites pour qu'elles deviennent assez dures. La cuisson est faite soit dans le four périodique soit dans le four continu.

En général, les dimensions d'une brique ordinaire sont: 250 x 120 x 5 mm. Selon la technologie de fabrication des briques traditionnelles, il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions exactement précises, à cause du retrait à l'air et retrait de cuisson. Selon la Norme, les tolérances sur les briques peuvent être calibrées de la manière suivante: ±6 mm sur la longueur; ± 4 mm sur la largeur et ±3 mm sur

l'épaisseur. On distingue la masse volumique des briques courantes en quatre groupes.  
[27]

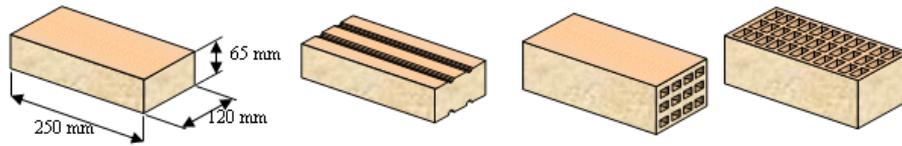


Fig. III.1 Briques pleines et perforées

Tab III.1 La classe et la masse volumique les briques courantes

Classe	A	B	C	D
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	700 – 1000	1000 – 1300	1300 – 1450	Supérieur de 1450

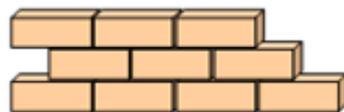
La capacité d'absorption d'eau d'une brique ne doit pas être inférieure à 8 %.

Tab III.2 Dimensions et résistances des briques

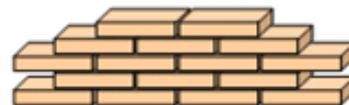
	Dimensions courantes (mm)			Résistances moyennes		
	Epaisseur	Largeur	Longueur	Catégorie	Résistance	
					MPa	Bar
Briques pleines	40	105	220	I	20	200
ou	55	105	220	II	30	300
perforées	60	105	220	III	40	400
Tolérances sur briques calibrées:						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 % sur longueur et largeur</li> <li>• 3 mm sur hauteur</li> </ul>				1 MPa = 10 bars 1 bar = 10 Newton/cm <sup>2</sup>		

• **Brique poreuses:**

Les briques poreuses peuvent être fabriquées par la technologie traditionnelle en utilisant les argiles ordinaires, auxquelles on ajoute des additions fusibles (sciure de bois, tourbe pulvérisée, charbon pulvérisé).



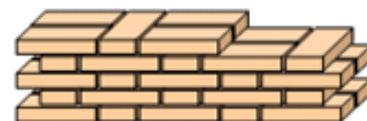
Cloison de 0,06 m



Cloison de 0,11 m



Murs de 0,22 m (appareillage français)



Murs de 0,22 m (appareillage anglais)

Fig. III.2 cloisons et mur

L'emploi des briques poreuses permet de réduire les dépenses de transport et donc le prix des murs. Cependant la résistance d'une brique poreuse étant faible, ce type de briques ne peut pas être utilisé pour construire des murs supportant de fortes charges. Elles seront plutôt employées pour le remplissage des bâtiments à ossature métallique ou béton armé. [27]

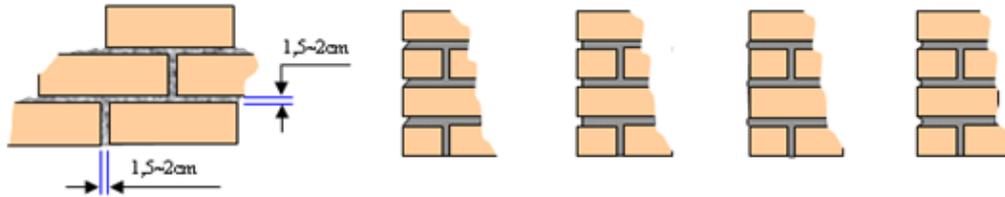


Fig.III.3 Configuration des joints de mortier aux murs façades

• **Briques d'argiles creuses à perforations:**

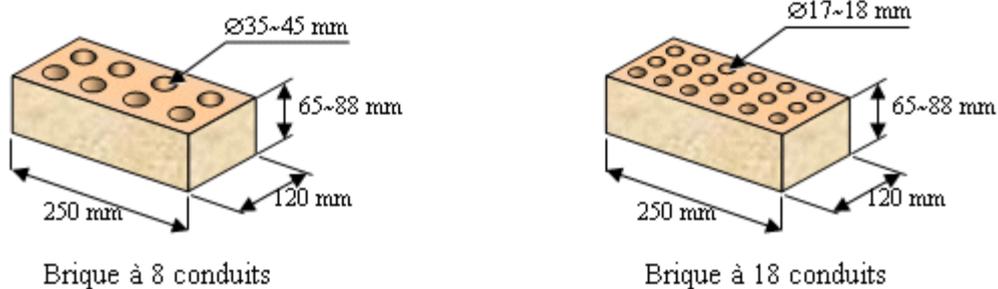
Les briques creuses qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriqués par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivantes: 250 x 120 x 88 ou bien 65. [27]

On fabrique les briques à 8 et 18 conduits dont les diamètres sont de 35-45 mm et de 17-18 mm.

Les trous de la perforation sont faits soit verticalement dans la proportion de 60 % de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40 % de la section totale On classe les briques creuses en quatre marques: 150, 125, 100 et 75. [27]

La capacité d'absorption d'eau d'une brique creuse a la même valeur que pour la brique ordinaire donc > 8 %.

La résistance à la flexion est de 20, 18, 16 et 14 kg/cm<sup>2</sup>. Toutes les autres prescriptions techniques imposées aux briques creuses sont les mêmes que pour les briques ordinaires. [27]



Brique à 8 conduits Brique à 18 conduits  
Fig. III.4 Briques creuses comprimées par voie demi-humide.

Caractéristiques et utilisations des briques pleines ou perforées:

Elles servent à réaliser:

- des parements extérieurs ou intérieurs décoratifs (appareillages en briques),
- des murs simples ou doubles enduits ou non.

Les briques sont obtenues soit:

- par filage (passage de l'argile dans la filière),
- par pressage (compression de la pâte dans un moule)

Qualités requises:

- Résistance au gel (à 25 cycles de gel et dégel).
- Peu de dilatation à l'humidité (gonflement).
- Pas d'éclatements dus à l'expansion de grains de chaux.
- Peu d'efflorescences (sels) pouvant former des taches.
- Aspect suivant la destination du produit.
- Régularisation des coloris et des dimensions.

La brique pleine, par la régularité de ses dimensions, se prête à toute une gamme d'appareillages :

- l'appareil en panneresses n'a qu'une demi brique d'épaisseur, il convient aux cloisons ;
- l'appareil à la française, constitué de lits de briques identiques deux à deux, un lit de boutisses et un lit de panneresses ;
- l'appareil à l'anglaise, les lits sont constitués d'une alternance de boutisses et de panneresses ;
- l'appareil des moines, les lits sont constitués d'une alternance d'une boutisse et de deux panneresses ;

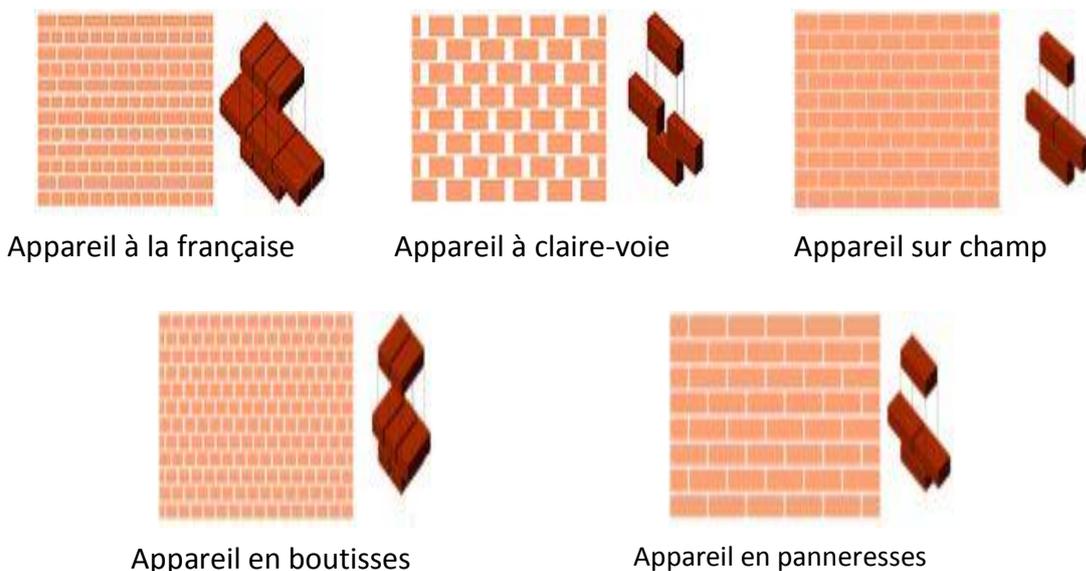


Fig. III.5 Différents types d'appareil

### **2.2.C Pathologies de la brique**

La pluparts des pathologies de la brique résident dans l'altération de sa surface, de son aspect, dans l'augmentation de sa porosité et sa friabilité, jusqu'à la désagrégation.

Lorsqu'elle est apparente, la brique subit l'action mécanique et chimique des intempéries. Le phénomène le plus grave est "l'alvéolisation" qui désagrège la brique, elle apparaît à la base des murs anciens, dans les zones soumises aux remontées capillaires. Cela est dû à la structure cristalline cubique des chlorures présents dans l'eau, la présence permanente de cette dernière peut même provoquer la dissolution interne des briques, qui prennent un aspect cartonneux et perdent leur résistance mécanique ; cette désagrégation est due à des effets électrolytiques sur l'argile. Ce phénomène affecte particulièrement les briques du XVIII<sup>e</sup> siècle, encore cuites dans des fours à bois. Elle peut aussi se désagréger peu à peu du fait de la trop faible capacité de capillarité du mortier et de sa trop forte étanchéité qui va empêcher l'eau contenue dans la brique de migrer dans le mortier et de s'évaporer : la face avant de la brique va reculer peu à peu et se creuser par rapport au joint. L'utilisation d'un mortier trop résistant, peut aussi provoquer l'émiettement ou la cassure de la brique, par manque de souplesse. Enfin, les parements de brique peuvent présenter des traces de salissures (noires), des traces moisissures (noires ou vertes), des traces de salpêtre (blanches et cotonneuses) qui provient d'une cristallisation de nitrates (d'ammonium, de calcium ou de potassium) à la surface de la maçonnerie, ou encore des traces d'efflorescences (blanches granuleuses et sèches), qui elles, apparaissent très rapidement ; elles sont provoquées par la migration de sulfate de sodium provenant du mortier de jointoiment. Elles cèdent facilement au traitement par un gel acide, suivi éventuellement d'un hydrofuge microporeux quand au salpêtre, qui met de nombreuses années à se développer, on peut le stopper en éliminant les bactéries à l'aide de formol ou de bactéricides anioniques, et traiter la cause de l'humidité. <sup>[28]</sup>

### **2.2.D Restauration des maçonneries en brique**

Pour diagnostiquer l'état d'un mur de brique altéré, il convient tout d'abord de procéder à un examen permettant d'identifier le type de pathologies : problème d'humidité, défaut de stabilité...

Ensuite on en détermine les causes : s'il s'agit d'altérations dues à l'humidité, on identifiera si elle provient d'une faiblesse de la couverture, zinguerie, d'une porosité excessive du parement ou de remontées capillaires venues du sol.

Dans un premier temps, on s'attachera donc à tenter de supprimer les facteurs détériorant.

Ensuite on entreprendra de restaurer le parement abîmé. En identifiant identifier le type de brique concerné (terre cuite, brique de sable, brique silico-calcaire...) et éventuellement retrouver son lieu de provenance.

Des analyses chimiques et des examens minéralogiques et microscopiques permettent aussi de déterminer la composition du mortier et la nature des altérations subies.

Par ailleurs, un examen visuel soigneux, appuyé éventuellement par des analyses, doit permettre de vérifier si la brique était nue ou apparente derrière un badigeon, ou totalement couverte.

Dans ces deux derniers cas, elle ne doit pas être décapée car, vraisemblablement sa qualité de cuisson ou d'aspect ne lui permet pas d'être laissée visible.

- **Injection de coulis**

Des injections de coulis de mortier peuvent être envisagées si l'intégrité de la maçonnerie est menacée, elles permettront de combler les vides ou les fissures repérés dans la maçonnerie. La composition du coulis et le protocole suivi pour l'injection ont une grande importance pour la qualité des résultats.

Le coulis d'injection doit être compatible avec les matériaux existants et présenter des caractéristiques analogues, car il doit y avoir une parfaite adhérence du coulis injecté sur le mortier existant et sur les briques ; la composition de ceux-ci doit donc être analysée préalablement et des essais réalisés. <sup>[30]</sup>

- **Traitements de surface**

Plusieurs méthodes de nettoyage sont souvent nécessaires avant de trouver la plus convenable, à cause des divers types de saletés qui se forment sur la maçonnerie en brique et des différentes caractéristiques des briques et mortiers. Le nettoyage des efflorescences peut s'effectuer en grande partie à l'aide d'une brosse ; si c'est insuffisant, il faut laver le mur à l'eau, frotter à la brosse, et rincer de nouveau. Si le résultat n'est pas satisfaisant, on peut appliquer une solution d'acide muriatique (solution à 1 pour 9 d'eau) sur le mur bien mouillé, puis rincer. <sup>[28]</sup>

Mais si des efflorescences apparaissent soudainement sur un mur ancien, il faudra d'abord identifier la source de l'humidité excessive qui a engendré ce phénomène.

Le nettoyage des mousses, lichens, vignes et plantes grimpantes, nuisibles à la maçonnerie à cause de l'insinuation des racines dans les joints, s'effectue par l'application de sulfamate d'ammonium ou d'une solution de silico-fluor de zinc ou de magnésie (proportion 1 pour 40 d'eau) ; on peut également employer un herbicide commercial. <sup>[28]</sup>

Le nettoyage des parasites, champignons, etc, s'effectue aisément avec un fongicide. Il peut être suivi d'un hydrofuge si l'on veut prolonger l'effet.

- **Rejointoiement**

C'est une opération de protection primordiale pour la conservation du mur. Dans la mesure du possible, on s'attachera à conserver les joints des restaurations antérieures en bon état ; pour les autres, on procédera à la réfection des joints avec un mortier soigneusement adapté, ou conforme à l'état d'origine s'il est connu. <sup>[28]</sup>

- **Hydrofugation**

La brique semble mieux réagir que la pierre aux procédés d'hydrofugation et la brique ancienne particulièrement, qui est généralement plus poreuse et qui peut être améliorée par ce procédé. L'hydrofugation peut, pendant un certain temps, permettre à la brique d'éviter les altérations dues à la stagnation d'humidité. <sup>[28]</sup>

Toutefois, le traitement hydrofuge, en rendant moins aisés les échanges hydriques, favorise les problèmes de pathologies dues au gel : il faut donc parfaitement maîtriser l'intervention.

- **Sablage**

Le sablage a été considéré à une époque comme une solution efficace de nettoyage ; mais cette technique étant trop agressive, érode la couche extérieure protectrice qui, à l'image du calcin pour la pierre, protège la brique. Les actions destructives du gel s'en trouvent facilitées et mettent en péril la brique, surtout si sa cuisson n'a pas été parfaite. <sup>[28]</sup>

- **Nettoyage par micro-sablage et hydro-gommage**

Le nettoyage des encrassements, dépôts noirs et salissures de suie s'effectue soit par application de compresses, soit par micro-sablage ou hydro-gommage. Ces techniques de nettoyage, relativement douces, peuvent être adoptées pour la brique en bon état ; néanmoins, on se souviendra que la brique étant plus poreuse que la pierre, l'utilisation de l'eau doit être parfaitement contrôlée. <sup>[28]</sup>

Mais attention, si la brique est très ancienne, il faut réfléchir à l'utilité d'effectuer un nettoyage qui ne durera pas plus de dix ans.

- **Comblement de zones manquantes**

Les réparations au mortier d'imitation sont plus difficiles à réaliser pour la brique que pour la pierre, d'une part pour des questions d'aspect, et d'autre part pour des questions de porosité. La composition de ces mortiers leur donne généralement une capillarité plus faible que la brique qui ne permet pas la continuité des migrations hydriques. <sup>[28]</sup>

- **Remplacement de brique**

C'est la solution la plus souvent choisie, car la pulvérulence de la brique n'est pas réversible, et le remplacement est techniquement assez simple à réaliser.

Toutefois, il faut être en mesure de retrouver le même type de brique, avec les mêmes caractéristiques et un aspect identique. Ensuite il faut s'assurer, par une uniformisation des joints et une patine éventuelle, de l'intégration des éléments neufs dans le mur ancien.

C'est pourquoi le remplacement de briques anciennes doit être fait avec soin et parcimonie.

## **2.3 Mortiers et enduits**

### **2.3.A Définitions**

Le mortier sert à assembler les éléments de pierres ou de briques permettant d'une part de donner une certaine cohésion aux éléments de pierres ou de briques, et de mieux répartir les charges. Cependant il convient de ne pas le considérer comme une colle ou un adhésif, rendant la construction monolithique et indéformable. Bien au contraire il conserve une certaine souplesse et permet ainsi aux édifices de mieux supporter nombre de déformations dues à des causes diverses comme une de trop fortes poussées de voûtes ou une faiblesse des fondations. <sup>[29]</sup>

L'enduit est un élément de revêtement fréquemment utilisé dans les anciens édifices. Le plus souvent de même composition que celle utilisée pour le mortier de jointement. Son rôle est très important, aussi bien du point de vue de l'aspect de l'édifice que de celui de sa pérennité : c'est l'enduit qui confère son aspect final à la maçonnerie, mais également qui protège le parement extérieur du mur des intempéries. <sup>[29]</sup>

La composition de base est en général simple et assez constante, cependant la proportion des éléments constitutants, leur teinte, l'ajout de certaines matières, la mise en œuvre et surtout la finition de surface varient beaucoup d'une région à l'autre, d'un type d'édifice à l'autre.

Les enduits traditionnels sont le plus souvent des mortiers à base de chaux. Ils sont réalisés en deux ou trois couches. <sup>[29]</sup>

- une première couche d'accrochage ou gobetis ;
- une seconde couche formant le corps d'enduit ou dégrossis ;
- une troisième couche appelée couche de finition.

La résistance mécanique du mortier de chacune des couches constituant l'enduit doit être dégressive, la plus forte résistance mécanique étant assurée par le gobetis.

Pour obtenir un bel et bon mortier de chaux à l'ancienne, le meilleur liant est la chaux aérienne. Pas d'effets satisfaisants avec des liants hydrauliques (chaux

hydrauliques, ciments) et ceci quels que soient les agrégats. Les agrégats peuvent avoir plusieurs provenances : sable de rivière, sablon coloré, rognures de pierre, tuileau ou brique pilés, pouzzolane, etc. <sup>[29]</sup>

D'autres paramètres entrent en jeu : le mélange des agrégats, le dosage en eau, les précautions à prendre dans l'application en fonction de la surface à traiter, du temps qu'il fait, de l'ensoleillement ; les gestes de la truelle et de la taloche, la sensibilité, le broissage, après la première prise. <sup>[29]</sup>

L'architecte doit aussi définir les parties à enduire et s'assurer qu'il opère sur des surfaces saines et protégées de l'eau.

### **2.3.B Granulats**

Les granulats utilisés dans les mortiers constituent une charge permettant de réduire la quantité de liant et dont le rôle et les effets varient selon la nature de ce dernier. Mélangés aux liants artificiels (ciment, chaux artificielle) les granulats doivent être les plus neutres et uniformes possible, le liant assurant à lui seul, de par ses caractéristiques mécaniques élevées et son opacité, la résistance et la coloration du mortier. Dans les mortiers réalisés avec des liants naturels (chaux ou plâtres) le choix des granulats est important car ils ont pour rôle : <sup>[29]</sup>

- De donner de la résistance aux mortiers, dont ils constituent l'ossature,
- De diminuer les phénomènes de retrait, en donnant du volume au mortier,
- De colorer les mortiers, en jouant sur l'effet de transparence de la chaux,
- De personnaliser l'aspect du mur et lui donner ses caractéristiques régionales par la diversité des matériaux locaux employés.

Les granulats utilisés pour la réalisation des mortiers d'enduit sont les sables, naturels ou artificiels, ils sont le plus souvent siliceux, ou silico-calcaires, rarement calcaires (poudre de marbre, par exemple). Ils proviennent principalement : <sup>[29]</sup>

- Du lit des rivières,
- Du littoral marin (soigneusement lavés),
- De carrières,
- De génération artificielle, par concassage de roches.

Dans le bâti ancien, les sables présentent des grains variant de l'infiniment petit (fines) à des éléments de plus de 10 mm, voire 15 mm pour les plus gros d'entre eux (graviers). Un sable bien équilibré doit présenter des grains de diamètres différents, permettant de limiter les vides, et donc d'éviter le surdosage en liant pour combler ceux-ci. En effet, un dosage trop riche en liant, peut provoquer un retrait important et des risques de micro-fissuration (faïençage). <sup>[29]</sup>

Le sable utilisé pour réaliser des mortiers d'enduit doit : <sup>[29]</sup>

- comporter une courbe granulométrique répartie : les enduits sont réalisés avec des sables dont la courbe granulométrique idéale est comprise entre 0,3 mm et 1.5 mm. Dans le bâti traditionnel on peut observe des sables plus grossiers. qui à l'inverse, des sables trop fins et un dosage important entraînent du retrait, ils sont donc à utiliser avec prudence et sur de faibles épaisseurs. On les associera avec des chaux aériennes permettant un resserrage successif de l'enduit. Dans tous ces cas, des essais de convenance sont à réaliser.

- être propre ne comprenant pas plus de 5 % d'éléments très fins comme les argiles, terre végétale, charbons.

- être chimiquement inerte en évitant tous les sols comportant des sels, des déchets organiques. Dans le cas de sable peu sûr, il sera nécessaire de réaliser des tests de convenance, notamment dans le cas de sable de mer.

- être homogène par un approvisionnement global et unique du chantier.

En revanche d'autres granulats sont recherchés pour leur réaction pouzzolanique donnant avec la chaux et l'eau de gâchage une certaine hydraulité au mortier. Parmi ces principaux granulats, on peut citer les tuileaux, tuiles, briques pilées, pouzzolanes, cendres, etc....

On trouve aussi des granulats qui sont recherchés pour des questions d'aspect ou de coloration comme : <sup>[29]</sup>

- certaines poudres de pierre (marbre notamment), talc,
- certains limons ou argiles, utilisés notamment pour la coloration, ou en revêtement particulier sur certaines maçonneries argileuses.

## 2.3.C Liants

### 2.3.C.1 La chaux

#### 2.3.C.1.1 Historique

L'usage de la chaux s'ancre dans l'histoire la plus ancienne allant jusqu'à la préhistoire. L'homme se servait des roches calcaires dès l'âge de pierre pour édifier des murets, fabriquer des outils et des armes et construire des foyers pour feu. C'est sans doute à ce dernier usage que l'on peut attribuer la découverte de la chaux. Cependant, pour l'utilisation de la chaux comme mortier, les témoignages les plus anciens remontent à l'époque égyptienne,

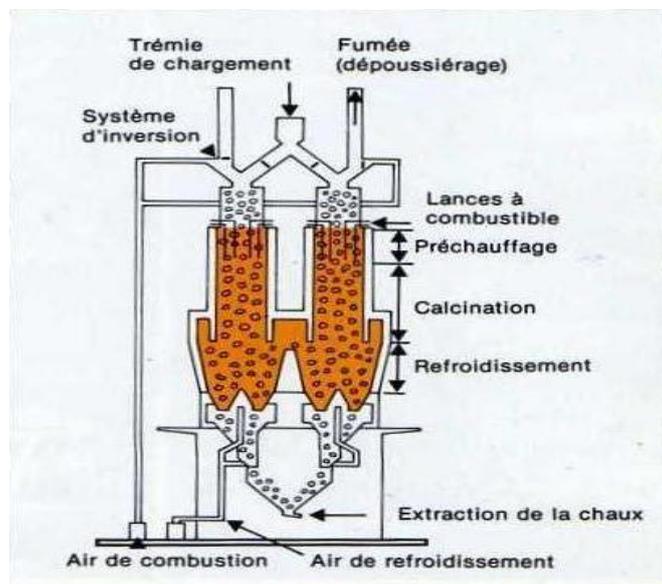


Fig.III.6 Four vertical

principalement durant les quatrième, troisième et second millénaires A-J. Les pyramides sont elles-mêmes construites avec d'énormes roches calcaires, tenues par un ciment constitué d'un mélange de chaux et de gypse. <sup>[31]</sup> Vue l'influence qu'eut la civilisation égyptienne sur les civilisations grecque puis latine, il n'y a rien d'étonnant à trouver chez celles-ci des utilisations semblables de la chaux comme mortier dans la construction. Ces civilisations élargissent ensuite les usages de la chaux et l'exploitent comme réactif chimique dans plusieurs types d'applications. La chaux fut ainsi utilisée dès 350 A-J pour le blanchiment de la toile de lin, dès 184 A-J, Caton mentionne sa fabrication par calcination dans des fours et en 75 A-J, le Romain Dioscorides souligne ses applications médicales, en solution dans l'eau. <sup>[31]</sup>

La chaux était utilisée pour l'assainissement des terres agricoles et le scellement des pierres au sol dès le début de notre ère. D'autres civilisations, comme les Incas, les Mayas, ou les indiens Mogul, qui n'avaient aucune relation avec la civilisation égyptienne utilisaient la chaux, dès le troisième millénaire A-J. Plusieurs méthodes de fabrication de chaux ont été alors découvertes : mélanges de la chaux éteinte et l'orge hydrate, ou encore de sang animal, de chaux et de sable... <sup>[31]</sup>

D'autres usages de la chaux firent leur apparition, comme l'utilisation de la chaux vive projetée à la figure de leurs adversaires français par les soldats anglais, durant la guerre de 1217, production d'une sorte de savon par les alchimistes européens à partir du carbonate de potassium extrait de cendres de bois.

Pour assister à une approche réellement scientifique et une exploitation industrielle de la chaux, il faut attendre le XVII<sup>ème</sup> siècle : le chimiste anglais Josef BLACK, puis le français Lavoisier, décrivent les réactions advenant pendant la fabrication de la chaux. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, Vicat, Debray et Le Châtelier complèteront leurs travaux, en déterminant toutes les données physico-chimiques du produit, et en décrivant ses différents processus et usages possibles.

Dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, de gros centres de production se créent à Rhode Island en Amérique, à Philadelphie et sur la rivière de l'Hudson. Procédant déjà à la calcination des roches calcaires, ces centres succédèrent à des usines plus artisanales qui fabriquaient la chaux par combustion de petits coquillages ou coquilles d'huîtres.

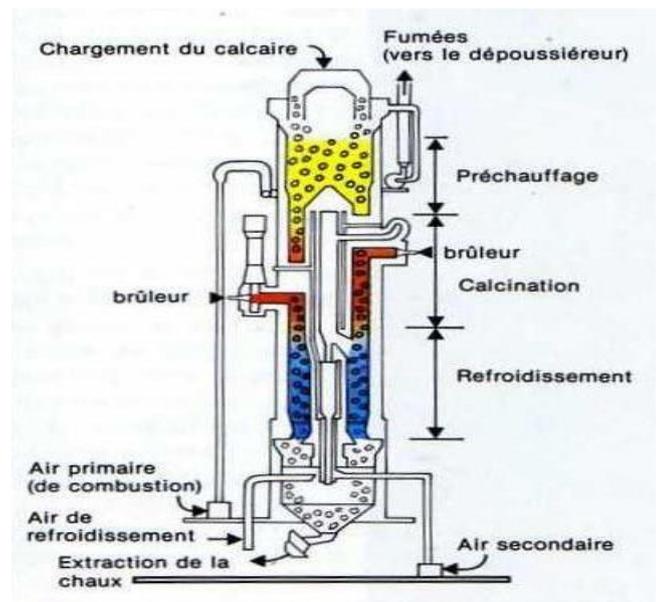


Fig.III.7 Four vertical

A la fin du XIX<sup>ème</sup>, au début XX<sup>ème</sup> siècle, le développement considérable de la sidérurgie trouve dans la chaux un constituant idéal et en devient rapidement un grand consommateur, entraînant ainsi la création de nombreux centres de production en Europe et aux États-Unis. Avec la révolution industrielle, les bases scientifiques et industrielles modernes de la production et des usages de la chaux sont donc établies, affinées et précisées. <sup>[31]</sup>

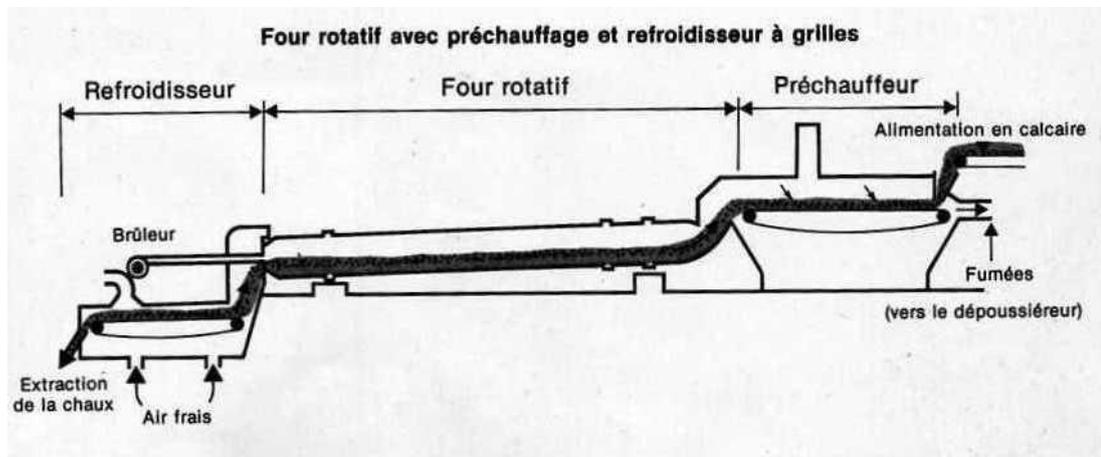


Fig.III.8 Four rotatif

Les industries traditionnellement consommatrices de chaux, restent aujourd'hui encore les principales consommatrices. Ainsi vient en premier lieu la sidérurgie, le plus grand consommateur et dont la courbe de production guide celle de la chaux. Parmi les autres activités industrielles on trouve, l'agriculture, le traitement des eaux, la stabilisation des sols, les matériaux de construction et le bâtiment, la papeterie, épuration des fumées, ...etc. <sup>[31]</sup>

### 2.3.C.1.2 Définitions

Le terme de chaux est générique. Il regroupe un grand nombre de produits, dont le seul point commun est d'être obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température, de pierre calcaire. Selon la composition du matériau de base, on obtiendra de la chaux aérienne ou de la chaux hydraulique.

#### a) La chaux aérienne

La chaux est, d'une façon générale, obtenue par calcination d'une roche calcaire, produit naturel, composé essentiellement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et d'un certain nombre d'autres constituants en quantité variable. Lorsque le calcaire de base contient très peu d'impuretés et de constituants autre que le carbonate de calcium, on appelle cette chaux, aérienne. Le terme « chaux grasse » est employé dans la construction, à cause de l'onctuosité qu'elle procure aux mortiers.

La chaux aérienne se subdivise en deux catégories :

- Chaux vive : c'est le produit direct de la calcination à 900 ° C de calcaires très purs, composés presque exclusivement de carbonate de calcium.



- La chaux éteinte :



Cet hydroxyde de calcium presque pur est appelé chaux éteinte, chaux hydratée ou encore fleur de chaux.

Après transformation, l'augmentation du volume est de près de 30%.

L'extinction peut être réalisée de différentes manières :

- arrosage superficiel des blocs de chaux vive, puis terminaison de la réaction à l'air,
- immersion des blocs de chaux vive dans un grand volume d'eau puis terminaison de la réaction à l'air,
- mélange eau-chaux dans un malaxeur avec contrôle de la réaction exothermique (dans l'industrie).
- immersion des blocs de chaux vive dans un grand volume d'eau puis terminaison de la réaction dans l'eau.

Dans les trois premiers cas on obtient une chaux en poudre (fleur de chaux, chaux grasse, CAEB, chaux éteinte...), dans le dernier cas la chaux éteinte produite prend l'apparence d'une pâte (chaux en pâte) que l'on pourra garder tant que l'on maintient en surface de l'eau limitant les échanges de gaz carbonique (donc de carbonatation)

Mais le calcaire de base peut comporter des constituants autres que le carbonate de calcium en quantités plus significatives, comme des dolomies ou des argiles.

Lorsque le calcaire contient du  $\text{MgCO}_3$ , en plus du carbonate de calcium, il produit des chaux magnésiennes, contenant  $\text{CaO}$  et  $\text{MgO}$ , elles sont, aussi, appelées chaux dolomitiques. Quand le calcaire contient 15 à 20 % d'argile, sa calcination conduit à la formation de silicates et d'aluminate de calcium en plus du  $\text{CaCO}_3$ . Les chaux obtenues sont appelées chaux hydrauliques naturelles. Elles sont utilisées essentiellement dans le bâtiment, à cause de leur aptitude à faire prise en présence d'eau.

La densité apparente de la chaux vive commercialisée se situe entre 700 à 1200 Kg m<sup>3</sup>, celle de la chaux éteinte est comprise entre 300 à 600 Kg m<sup>3</sup>.

La solubilité des chaux commercialisées, dépend de la température et de la composition. La chaux éteinte étant légèrement plus soluble que la chaux vive et les chaux dolomitiques sont beaucoup moins solubles que les chaux aériennes, de par la quasi-insolubilité de l'oxyde et l'hydroxyde de magnésium dans l'eau.

La réactivité de la chaux correspond à sa rapidité d'action lors de son emploi. Elle permet à l'utilisateur de prévoir et de maîtriser la durée des réactions et, si celles-ci sont exothermiques, l'élévation de la température produite.

La réaction d'hydratation de la chaux vive est exothermique, elle dégage 275 Kcal/Kg, sa réactivité dépend du calcaire d'origine et de la température à laquelle il a été calciné.



La carbonatation de la chaux éteinte se déroule suivant la réaction suivante :

La réactivité de la chaux éteinte convient à toutes les applications, sauf lorsque de mauvaises conditions de stockage ont engendré une recarbonatation. Elle est alors fonction de la surface spécifique de la chaux, du type de cuisson et des conditions mêmes d'extinction.

La basicité de la chaux est un critère important quand elle est utilisée à des fins de neutralisation d'un milieu acide, elle nous permet de déterminer le poids nécessaire de cette solution en fonction de l'acidité du produit à neutraliser.

### **b) La chaux hydraulique**

La chaux hydraulique est obtenue à partir de calcaire contenant des silicates, aluminates, des composés de magnésium. La chaux hydraulique la plus courante provient de la calcination de calcaire mêlé d'argile. Elle fait prise, en quelques heures, au contact de l'eau, d'où son appellation.

#### **• Carbonatation de la chaux hydraulique**

Le calcaire naturel est le plus souvent mélangé à des marnes et des argiles riches en éléments chimiques principalement la silice et aussi le fer, l'aluminium. Aux températures de cuisson (800 et 1500°C), le calcium se combine avec ces éléments pour former des silicates, des aluminates et des ferro-aluminates de calcium.

Au contact de l'eau, lors de l'extinction de la chaux vive, et surtout pendant la mise en œuvre des mortiers, ces molécules forment des hydrates insolubles. Les proportions d'alumine et de fer sont très faibles : dans les liants blancs, les teneurs en fer sont inférieures à 0,1 ou 0,2%. La prise hydraulique est essentiellement due à la réaction

entre le CaO et les silicates. C'est après la mise en œuvre que la chaux et les hydrates vont se carbonater au contact de l'air humide pour redonner le carbonate de calcium et la silice d'origine. C'est la partie aérienne de la prise. Le rapport entre différents composants associés à l'argile et la part en chaux définit l'indice d'hydraulicité.

### 2.3.C.1.3 Utilisations de la chaux dans le bâtiment

#### a) Les mortiers et enduits

L'emploi de la chaux dans le bâtiment comme mortier, enduit ou badigeon remonte à plusieurs millénaires. Mais il n'en reste pas moins qu'il demeure florissant surtout avec l'avènement et le développement des restaurations et réhabilitations de bâtiments anciens. Les mortiers à base de chaux ont été rudement concurrencés par ceux à base de liants hydrauliques, ces derniers présentant un durcissement plus rapide. Mais, à part ce défaut, ils présentent nombre d'avantage : facilité de mise en œuvre, qualité de l'aspect et imperméabilité. Ils sont, notamment, utilisés comme enduits de façade pour éviter les fissures et le faïençage, sous forme de badigeons, afin de protéger les façades de la prolifération des micro-organismes nocifs. <sup>[32]</sup>

Le mortier à base de chaux est un mélange de chaux éteinte, de sable et d'au de gâchage, en des proportions telles que la chaux remplit tous les vides du sable avec un léger excès. La granulométrie du sable est comprise entre 0 à 5 mm (du plus maniable à celui qui présente la meilleure résistance mécanique), il doit en outre contenir moins de 5 % d'argile. Le mortier est dit bâtard si, en plus de la chaux aérienne, on utilise un liant hydraulique tel le ciment ou la chaux hydraulique. <sup>[32]</sup>

Pour la préparation du mortier ou l'enduit, la température doit être supérieure à 5 ° C, et cela à la pelle ou dans une bétonnière. Il convient d'éviter un dessèchement trop rapide afin d'obtenir une consistance crémeuse, onctueuse et par trop fluide pour éviter des fissurations ultérieures. <sup>[32]</sup>

La prise de ces mortiers ou enduits est due à la recarbonatation de la chaux éteinte au contact du gaz carbonique de l'air :



Pour effectuer un enduit de façade, on procède à une application en deux ou trois couches que l'on appelle respectivement gobetis, dégrossi et couche de finition.

Le gobetis ou couche d'accrochage nécessite une application par projection vigoureuse ; le dégrossi ou corps d'enduit doit être compact et homogène pour assurer planéité et régularité ; la couche de finition assure la protection et la conservation de la précédente et joue un rôle décoratif. Les supports utilisés doivent être solides, propres et vigoureux, ou être munis d'un treillis métallique favorisant l'accrochage. Ils peuvent être de plusieurs types :

- **Les murs en pisé** : sont un support de choix pour les enduits de chaux, les liants hydrauliques n'étant pas compatibles avec la terre. On humecte alors la façade de lait de chaux ; le dégrossi a une épaisseur de 15 à 20 mm et sa composition est de 2 mesures de chaux pour (mesures de sable ; la couche de finition, de 7 à 10 mm, est composée de 3 mesures de chaux pour 7 à 9 mesures de sable. <sup>[32]</sup>

- **Les bétons cellulaires autoclaves** : sont des supports tendres qui imposent la chaux comme liant principal. Après humidification de la surface, on pose un gobetis cimenté de 2 mm d'épaisseur, puis un dégrossi de 15 à 20 mm (4 mesures de chaux et 1 mesure de ciment pour 12 mesures de sable), et enfin une finition de 7 à 10 mm (5 mesures de chaux et 1 mesure de ciment pour 15 mesures de sable). <sup>[32]</sup>

- **Les pans de bois** : sur ce type de support, on utilise exclusivement des enduits à la chaux, qui n'enferment pas d'humidité, laissant respirer le bois et protègent des incendies. <sup>[32]</sup>

- **Les supports durs** : tels que le béton et parpaings : le gobetis y est composé de 1 mesure de ciment pour 3 mesures de sable, sur 5 à 7 mm d'épaisseur alors que la chaux est utilisée dans le dégrossi de 15 à 25 mm, à raison de 1 mesure de chaux, 1 mesure de chaux hydraulique et 5 de sable, et dans la finition de 7 à 10 mm à raison de mesures de chaux pour 1 de chaux hydraulique et de 7 à 9 de sable. <sup>[32]</sup>

- **Les supports en briques creuses ou en pierre** : les mêmes épaisseurs et proportions y sont utilisées, mais le gobetis est remplacé par une humidification de la surface. <sup>[32]</sup>

Les enduits à la chaux sont également employés pour des travaux tels que les torchis, des stucages ou de la gypserie. Les mortiers quand à eux sont utilisés pour le jointement de maçonneries en pierre. La composition type est alors de 2 mesures de chaux éteinte pour 1 de chaux hydraulique et 7 à 9 de sable. <sup>[31]</sup>

Les badigeons sont constitués de lait de chaux et peuvent être colorés. Ils sont appliqués au pinceau ou à la brosse, par-dessus un enduit humidifié, en 2 ou 3 couches. Ils sont fixés grâce à l'emploi d'huile de lin ou de polyacétate de vinyle, voire parfois avec une adjonction de caséine. Relevant de procédés très anciens, ils permettent d'obtenir des façades tout à la fois hygiéniques, belles, avec des couleurs « aquarelles ». <sup>[31]</sup>

## b) Les matériaux de construction

La chaux est aussi employée pour la fabrication des matériaux de construction couramment utilisés comme les briques silico-calcaires et les bétons cellulaires. Les premières sont fabriquées avec un mélange intime de chaux et de sable siliceux compacté puis étuvé, ce qui leur confère une grande légèreté et de bonnes résistances mécaniques. Quand aux bétons cellulaires, ils sont moins résistants mécaniquement que les bétons ordinaires mais sont plus légers et de bons isolants thermique. C'est un matériau à l'aspect poreux, constitué par le moulage-durcissage d'un mortier composé de chaux, de ciment et de sable siliceux, dans lequel on a créé des pores en faisant s'éteindre la chaux sur l'aluminium en poudre. Cette réaction délicate requiert, lors de

l'extinction de la chaux, une montée de température parfaitement ajustée. Sa légèreté lui procure une aisance d'utilisation, il est économique, plus ou moins résistant selon la quantité de ciment mis en jeu. Tous ces atouts font qu'il soit très prisé pour plusieurs applications. <sup>[31]</sup>

Parmi les autres utilisations de chaux on peut citer : traitement des fumées (dans les incinérateurs elle est utilisée pour neutraliser les fumées acides chargées en soufre et/ou en chlore), la sucrerie, l'industrie papetière, la tannerie et la mégisserie, la fabrication des colles et gélatines l'industrie pétrolière, les industries agro-alimentaires.

### **2.3.C.2 ciment**

Le ciment est un liant minéral en poudre, obtenu à partir de clinker, finement broyé. Cette poudre, tout comme la chaux ou le plâtre, mélangée à de l'eau, fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats pour constituer des mortiers ou des bétons qui sont de vraies roches artificielles.

La mise au point du premier ciment, en 1824 à Portland est l'aboutissement de longues recherches et expérimentations menées par les bâtisseurs, puis les ingénieurs, pour l'amélioration des propriétés et des performances des mortiers de chaux. <sup>[33]</sup>

La période de la reconstruction, après la Seconde Guerre mondiale, marque un tournant décisif dans le déclin de la chaux et l'avènement du ciment dans la construction. Mais, quelques décennies plus tard, ce dernier a clairement montré ses limites, tant au niveau de son comportement (en particulier lorsqu'il est allié aux maçonneries anciennes) que de son aspect esthétique. Les propriétés inégalables de la chaux sont redécouvertes à la faveur de la sauvegarde et la réhabilitation des centres anciens. <sup>[33]</sup>

Lorsque les joints sont effectués au ciment, ils constituent une barrière étanche et contraignent l'humidité à migrer à travers la pierre ; à la longue, celle-ci est comme rongée, en retrait de plusieurs centimètres par rapport aux joints de ciment.

Autre erreur souvent commise : appliqué du ciment en soubassement d'une façade en maçonnerie : l'eau emprisonnée dans la maçonnerie est contrainte à remonter par capillarité jusqu'au bord supérieur du soubassement pour s'évaporer. Cette zone se dégrade alors rapidement. <sup>[33]</sup>

### **2.3.D Eau**

L'eau rentre dans la composition des mortiers afin de rendre plastique les mélanges poudreux, de permettre la carbonatation des chaux par dissolution du gaz carbonique, de permettre la prise des chaux hydrauliques.

L'eau doit être propre (norme NFP 18.303). Il est conseillé d'utiliser l'eau potable. Dans le cas contraire, il convient d'être attentif à ne pas utiliser les eaux chargées en sels (sulfates, eaux résiduelles...) ou acides. Dans le cas de l'eau de mer dont l'usage traditionnel est attesté mais qui est a priori proscrite, il est nécessaire



d'effectuer des essais de tenue et d'aspect (possibilité d'apparition de nuances, d'efflorescences). <sup>[33]</sup>

### **2.3.E Produits d'ajouts**

Certains produits peuvent, par ailleurs selon les cas, être ajoutés au mortier afin d'en modifier les propriétés, c'est notamment le cas pour : <sup>[29]</sup>

- les pigments, qui étaient utilisés traditionnellement pour peindre les parements en les mélangeant avec un lait de chaux. maintenant on les utilise aussi en les mélangeant au mortier pour colorer la masse. la norme DTU 26.1 prévoit de ne pas dépasser 3 % du poids de chaux pour colorer les mortiers,
- les armatures (faites de soies animales, de fibres végétales ou de pailles), pour renforcer la cohésion des mortiers,
- les liants complémentaires divers
- Adjuvants

*CHAPITRE III :*  
*L'infographie appliquée à l'archéologie*

- 1.Introduction
- 2.Domaines d'application
- 3.Définitions
- 4.Les différentes étapes de la reconstitution 3D
- 5.Reconstitution 3D en archéologie
- 6.Les possibilités de la réalité virtuelle pour la recherche et le traitement de l'information

## 1. Introduction

L'étude du patrimoine archéologique s'enrichit de jour en jour par la richesse apportée par les outils infographiques. Ces derniers amenant plus de clarté, en offrant des reconstitutions tridimensionnelles d'édifices réels, se révélant être un support efficace pour se documenter sur l'état actuel des édifices historiques, ainsi que pour l'analyse de leur évolution dans le temps.

Les avantages de l'infographie ne se limitant pas à cela elle offre en outre, un support définitif pour la conservation des données tout en permettant la diffusion de la connaissance archéologique et historique aux scientifiques et au grand public.

Dans ce chapitre on va donner quelques définitions de l'infographie en décrivant les différentes étapes (modélisation, illumination et ombrage, rendu...) et les techniques relatives à chacune d'elles, ensuite on va aborder la restitution 3D, pour donner un aperçu sur les différentes techniques de relevé et les possibilités offertes à la recherche par les maquettes virtuelles.

## 2. Domaines d'application

L'utilisation de l'infographie s'est généralisée de nos jours en touchant divers domaines aussi variés les uns que les autres :<sup>[34]</sup>

- **Les interfaces utilisateurs** : aujourd'hui la majeure partie de ces interfaces (utilisés quotidiennement tels que les programmes de traitement de texte ou d'image, les tableurs,... ) utilise l'infographie en s'appuyant sur des systèmes de fenêtrage, laissant ainsi la capacité à l'utilisateur pour gérer de multiples activités simultanées en lui permettant de sélectionner des articles de menu, des icônes et des objets sur l'écran.
- **Tracé des courbes, interactif** : afin de clarifier les phénomènes complexes et faciliter leur compréhension, les fonctions et les données mathématiques, physiques ou économiques sont présentées sous forme d'histogrammes et différents diagrammes et courbes. Le chercheur pouvant ainsi, à tout moment changer certains paramètres ou données et visualiser en temps réel l'effet de ce changement.
- **Cartographie** : l'infographie est utilisée pour schématiser les différentes mesures des phénomènes géographiques et naturels (un exemple en est illustré en figure IV.1).
- **Médecine** : l'infographie et la visualisation 3D jouent un rôle sans cesse croissant dans divers domaines médicaux tels que l'aide au diagnostic et la préparation d'opérations chirurgicales avec la représentation 3D de divers organes, à partir de l'imagerie à



Fig IV.1 Utilisation de l'infographie en cartographie (réserve naturelle bout du lac, IGN)

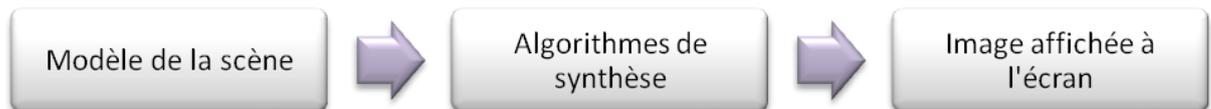
résonance magnétique nucléaire ou par illumination par rayon laser, cela nous donne une vue 3D de l'organe, permettant par exemple une différenciation entre les cellules saines et atteinte par un tumeur ou de déceler la présence d'un kyste).

- **Dessin et conception assistés par ordinateur** : elle est utilisée pour la conception des composants et des systèmes des dispositifs mécaniques, électriques, électromagnétiques et électroniques.
- **Simulation et animation pour la visualisation scientifique et les loisirs** : cette application touche à elle seule plusieurs domaines allant du cinéma (production des effets spéciaux dans les films) à la modélisation mathématique des différents phénomènes physiques et chimiques...

### 3. Définitions

L'infographie est la science de l'image numérique, elle définit les graphismes créés et gérés par ordinateur, elle regroupe deux activités principales : <sup>[34]</sup>

- l'analyse et le traitement d'images (reconnaissance de formes, amélioration et retouches d'images, ...)
- la synthèse d'image (affichage de données sous forme graphique, calcul et restitution d'images réalistes, visualisation de données scientifiques) sur écran ou sur imprimante par tout autre procédé informatique.



*Fig IV.2 Différentes étapes de l'infographie*

#### 3.1 L'infographie 2 D

Elle constitue l'ensemble des opérations informatiques permettant d'intervenir sur les images numériques. L'organigramme suivant nous décrit les différentes étapes de restitution d'une image numérique:

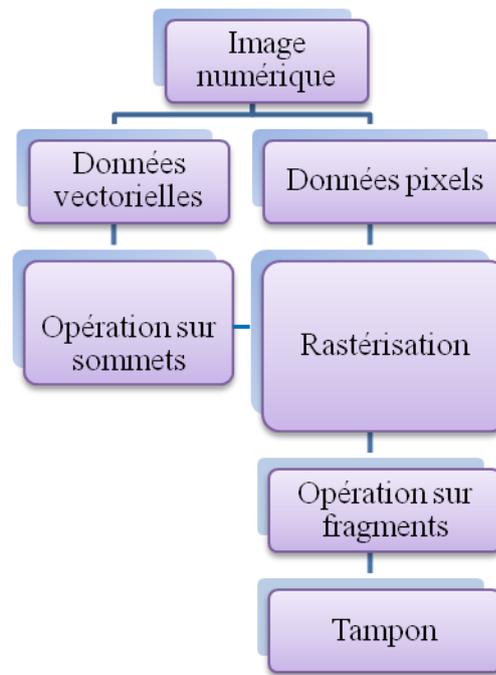


Fig IV.3. Différentes étapes de restitution d'une image numérique

Les opérations sur les sommets consistent en leurs traductions en matrices, ensuite les transformations de projection, perspective et de cadrage sont exécutées, enfin on procède à la mise en couleur et le calcul d'éclairage des polygones,

Durant la rastérisation, les données vectorielles sont traduites en pixels puis fusionnées avec les données "pixels",

Les opérations sur fragments consistent en des tests de profondeur, stencil, alpha, dithering (correction de dégradé), effet brouillard.

- **Le mode bitmap :**

L'image numérique est assimilée à une mosaïque ou une étendue plane entièrement remplie par des éléments graphiques élémentaires (pixels), identifiés par une position et une valeur de couleur. Ce type de représentation est orienté vers le traitement de l'image numérisée (convient pour les applications issues du domaine des arts graphiques et de l'édition).

Cependant, lors d'un agrandissement ou de la réduction d'une image, chacun des points est également grossi (on remarque cela sur les bords d'un cercle, où on verra apparaître un effet d'escaliers). En plus les images peuvent prendre énormément de place et les modifications sont moins faciles qu'en mode vectoriel car les différents objets présents ne sont pas indépendants.

- **Le mode vectoriel :**

L'objet graphique est créé en utilisant la définition géométrique des formes (lignes, cercles, courbes de Béziérs, etc.) auxquelles sont associés des attributs tels que la couleur, l'épaisseur de trait. Chaque objet est alors stocké non sous formes de points mais sous formes de primitives géométriques dont on ne conserve que les points significatifs ce qui permet de retracer l'image sans altérations et en même temps, les données sont beaucoup moins gourmandes en espace que les bitmaps. L'utilisation de ce mode est très importante dans les applications de type DAO, CAO. L'affichage de ces images est réalisé grâce à l'exécution d'une opération de génération du tracé, pour transformer ces objets vectoriels en une suite de points élémentaires.

### 3.2 L'infographie 3D

Elle utilise des représentations tridimensionnelles des données géométriques, ces dernières sont enregistrées dans l'ordinateur afin d'exécuter des calculs de rendu. En dépit des différences qui existent entre les images 2D et 3D, ces dernières se fondent, la plupart du temps, sur les mêmes algorithmes.

Les objets 3D sont des objets dont les points sont repérés par leurs coordonnées dans un repère classique Oxyz. Ces objets peuvent subir des transformations géométriques standards : translation, rotation, dilatation comme dans le cas 2D. On pourra utiliser les coordonnées homogènes pour représenter toutes ces transformations par des matrices 4x4.

Graphiquement, le modèle 3D est un ensemble d'objets organisés pour représenter une scène réelle ; il existe différentes méthodes pour la représentation graphique d'un objet 3D:

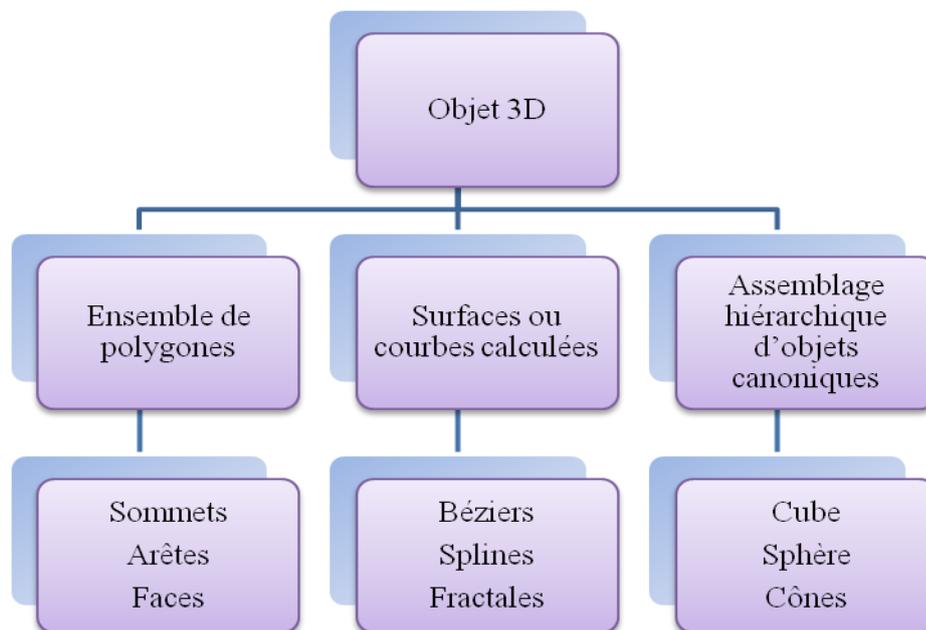


Fig IV.4. Méthodes de représentation graphiques des objets 3D

## 4. Les différentes étapes de la reconstitution 3D

Les différentes étapes de la création d'images 3D peuvent être schématisées comme suit :

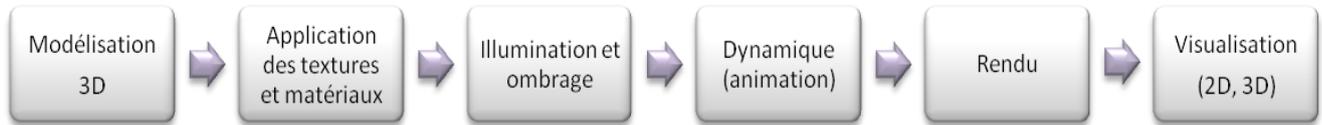


Fig IV.5. Etapes de la création 3D

### 4.1 Modélisation

Lors d'une modélisation infographique il s'agit d'exprimer les objets qui composent la réalité sous forme de figures géométriques tridimensionnelles.

#### 4.1.1 Modélisation mathématique de courbe et de surface

##### a. polygones maillés

Le polygone maillé est un ensemble d'arêtes et de sommets formant des polygones reliés de sorte que les arêtes ne soient communes qu'à deux polygones au plus. Les différentes opérations classiques sur un polygone maillé consistent à trouver :

- Toutes les arêtes attachées à un sommet ;
- Tous les polygones en contact avec une arête ou un sommet ;
- Les sommets reliés par une arête ;
- Les bords d'un polygone.

Toutes ces opérations servent à visualiser le réseau maillé et identifier les erreurs de représentation.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour la représentation de polygones maillés, parmi lesquelles on peut citer :

- **La représentation explicite** <sup>[34]</sup>: chaque polygone est représenté par une liste de coordonnées de sommets, ces derniers sont stockés dans l'ordre d'apparition, en tournant autour du polygone (Fig IV.6).

$$P = \{(x_1, y_1, z_1), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)\},$$

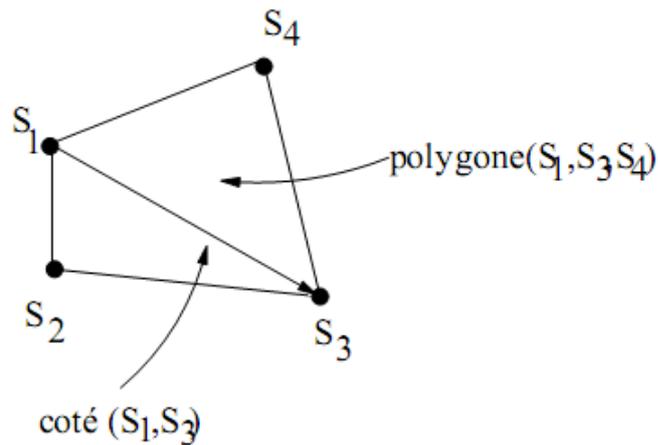


Fig IV.6 Représentation explicite des polygones

Le principal inconvénient de cette méthode est que dans le cas d'un polygone maillé, beaucoup d'espace mémoire est gâché du fait de la **duplication** des coordonnées des sommets partagés. En outre, il n'y a pas de représentation explicite des sommets des arêtes partagées, ce qui peut entraîner des erreurs lors de leur déplacement ou de leur transformation en dessin sur une table traçante par exemple.

- **La représentation avec des pointeurs sur une liste de sommets** <sup>[34]</sup>: chaque sommet est stocké une seule fois dans la liste des sommets, le polygone étant défini par des indices (ou pointeurs) dans la liste des sommets.

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} = \{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)\},$$

$$P = \{(1, 2, 3), (1, 3, 4), \dots\}.$$

Cette méthode permet une réduction considérable de l'espace mémoire ; par contre, il est toujours difficile de trouver les polygones partageant la même arête, et les arêtes communes sont dessinées deux fois.

- **La représentation avec des pointeurs sur une liste d'arêtes** <sup>[34]</sup>(Fig IV.7):

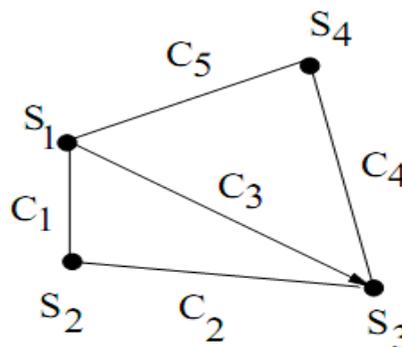


Fig IV.7 Représentation avec des pointeurs



On a toujours une liste de sommets représentés par leurs coordonnées :

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} = \{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)\}.$$

Mais le polygone pointe sur une liste d'arêtes et non sur celle des sommets, ne laissant apparaître l'arête qu'une seule fois :

$$P = \{P_1, P_2, \dots\} = \{(\&C_1, \&C_2, \&C_3), (\&C_3, \&C_4, \&C_5), \dots\}.$$

L'arête quand à elle, pointe sur la liste des sommets et sur le ou les deux polygones auxquels elle appartient.

$$C = \{C_1, C_2, C_3, \dots\} = \{(\&S_1, \&S_2, \&P_1, -), (\&S_2, \&S_3, \&P_1, -), (\&S_1, \&S_3, \&P_1, P_2), \dots\},$$

### b. Courbes cubiques paramétrées<sup>[34]</sup> :

Les lignes brisées et les polygones sont du premier degré pour les approximations des courbes et des surfaces respectivement. Si les courbes et les surfaces à approximer ne sont pas du type linéaire, une grande quantité de coordonnées de points terminaux est à créer et à stocker. La manipulation interactive de toutes ces données pour approximer les contours est fastidieuse car beaucoup de points doivent être positionnés précisément. On utilise alors des fonctions qui ont un degré supérieur aux fonctions linéaires, ces fonctions utilisent moins de place de stockage et offrent une manipulation interactive plus aisée.

- **Courbes paramétriques :**

Elles sont représentées par des équations telles :

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases}$$

et sont les lieux des points  $P(x, y, z)$ . On utilise en général des courbes de degré 3 (cubiques).

Dans le contexte du traitement ou de la synthèse d'images, nous cherchons à interpoler ou approximer une courbe à partir d'un nombre fini de points.

On utilise pour cela les courbes de la forme :

$$P(t) = (x(t), y(t), z(t)) = \sum_{i=0}^n f_i(t) P_i,$$

$f_i(t)$  sont des fonctions de pondérations et  $P_i = (x_i, y_i, z_i)$  sont les points de données.

- **Courbes Hermitiennes<sup>[34]</sup>** : Une forme hermitienne d'un segment de courbe polynomiale cubique est déterminée par des contraintes aux points extrêmes P1 et P4 (les points P2 et P3 étant utilisés comme points intermédiaires pour définir la courbe) et aux tangentes vectorielles R1 et R4 en ces mêmes points.

Pour trouver la matrice de base hermitienne, qui relie le vecteur géométrique hermitien aux coefficients polynomiaux, on écrit quatre équations, une pour chacune des contraintes, avec les coefficients polynomiaux à déterminer.

- **Courbe de Bézier<sup>[34]</sup>** : développé pour la conception CAO dans le domaine de l'automobile, pour contourner le problème posé par les courbes d'ajustement appelées splines qui présentaient le défaut de changer d'aspect lors d'une rotation de repère et qui les rendaient inutilisables en CAO. Les courbes de Bézier découlent d'une approche géométrique fondée sur la linéarité de l'espace euclidien et aucun repère n'intervient alors. La courbe de Bézier interpole 2 points de Contrôle extrêmes en s'approchant de 2 points intermédiaires qui ne sont pas sur la courbe (Fig IV.8).

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) P_i,$$

Avec :

$$B_{i,n} = C_i^n t^i (1-t)^{n-i}, \quad C_i^n = \frac{n!}{i!(n-i)!}.$$

Où :

$B_{i,n}$  : sont les polynômes de Bernstein, ou fonctions de pondération

$P_i$  : sont les points contrôle,

$n$  : est le nombre de points de contrôle utilisés (degré de la courbe + 1).

Le paramètre  $t$  varie de 0 à 1.

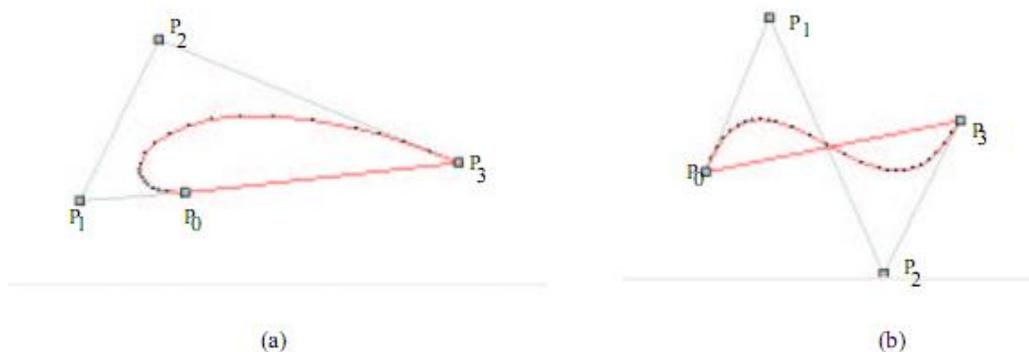


Fig IV.8. 4 points de contrôles, degré de l'approximation 3 -> courbes de Bézier cubiques



La courbe est toujours contenue dans l'enveloppe convexe des points de contrôle. Une courbe fermée peut-être générée en prenant le même point comme premier et dernier point de contrôle.

Pour deux points de contrôle, l'approximation correspond à une interpolation linéaire.

$$P(t) = (1 - t)P_0 + tP_1,$$

Pour trois points de contrôle :

$$P(t) = (1 - t)^2 P_0 + 2t(1 - t)P_1 + t^2 P_2,$$

Pour quatre points de contrôle (Bézier cubiques) :

$$P(t) = (1 - t)^3 P_0 + 3t(1 - t)^2 P_1 + 3t^2(1 - t)P_2 + t^3 P_3,$$

Soit sous forme matricielle :

$$P(t) = (t^3, t^2, t, 1) \cdot \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix}$$

$$P(t) = T^t \cdot M_{\text{bezier}} \cdot P.$$

Pour tracer des courbes avec beaucoup de points de contrôle, on utilise en général des Béziers cubiques que l'on colle bout à bout (Fig IV.9). Le problème est alors de vérifier la continuité aux extrémités des segments de courbes collés.

Tangente en  $P_3$  d'une Bézier cubique :

$$P'(1) = 3(P_3 - P_2).$$

Donc pour assurer une continuité  $C^1$  entre deux segments de courbes de Bézier, il faut que :

$$(P_3 - P_2) = (P_4 - P_3),$$

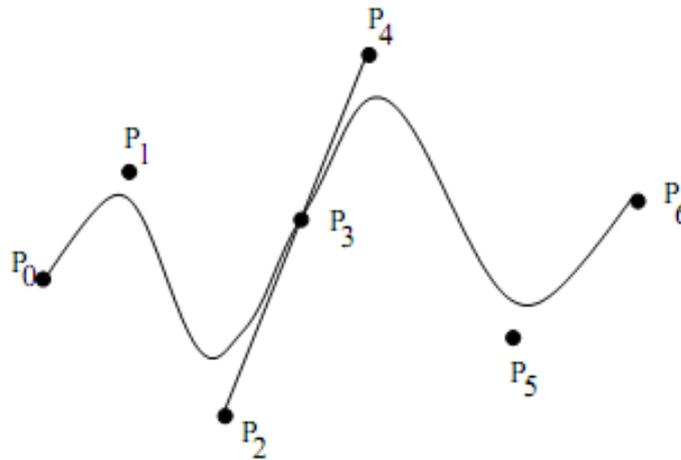


Fig IV.9 Courbes de Bézier collées entre elles par le point  $P_3$

- **Courbe B-Splines uniformes non rationnelles** <sup>[34]</sup>:

Les B-splines cubiques (splines = bandes métalliques) sont des courbes polynomiales cubiques de continuité  $C^0$ ,  $C^1$  et  $C^2$ .



Fig. IV.10 Une fontaine modelée à l'aide de surfaces NURBS

Les B-Splines approximent un ensemble de points de contrôle  $P_i$ ,  $i \in [0, m]$  avec une courbe constituée de  $m-2$  segments de courbes polynomiales  $Q_i$ ,  $i \in [3, m]$ . Chaque segment de courbes est fonction d'un paramètre  $t$  variant de  $t_i$  à  $t_{i+1}$  et de 4 points de contrôle. Le segment  $Q_i$  est donc défini par :  $P_{i-3}$ ,  $P_{i-2}$ ,  $P_{i-1}$ ,  $P_i$ , pour  $t$  variant de  $t_i$  à  $t_{i+1}$ .



Dans les B-Splines uniformes les paramètres  $t_i$  sont uniformément répartis sur l'ensemble des points de contrôle, à savoir :  $t_i = t_{i-1} + 1$ .

Donc  $t$  varie de 1 pour un segment de courbe et on effectue le changement de variable  $t = t - t_i$ . La position d'un point  $P$  est alors définie par :

$$P(t) = \frac{1}{6}[(1-t)^3 P_{i-3} + (3t^3 - 6t^2 + 4)P_{i-2} + (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1)P_{i-1} + t^3 P_i],$$

Pour :  $0 \leq t < 1$ .

Soit sous forme matricielle :

$$P(t) = (t^3, t^2, t, 1) \cdot \frac{1}{6} \begin{pmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{i-3} \\ P_{i-2} \\ P_{i-1} \\ P_i \end{pmatrix}$$

$$P(t) = T^t \cdot M_{bspline} \cdot P.$$

- Chaque segment est défini par quatre points de contrôle,
- La courbe approxime et n'interpole pas les points de contrôle. En jouant sur la multiplicité des points de contrôle, on peut attirer la courbe vers les points de contrôle jusqu'à l'interpolation pour une multiplicité de trois.
  - La courbe est contenue dans l'enveloppe convexe des points de contrôle.
  - La courbe est invariante par transformation affine.
  - La courbe est de continuité  $C^2$  partout.
- **Courbe B-Splines non uniformes non rationnelles** <sup>[34]</sup>:

Les paramètres  $t_i$  ne sont pas nécessairement répartis de manière uniforme. La position d'un point  $P$  de la courbe est définie par :

$$P(t) = N_{i-3,4}(t)P_{i-3} + N_{i-2,4}(t)P_{i-2} + N_{i-1,4}(t)P_{i-1} + N_{i,4}(t)P_i$$

$$3 \leq i \leq m, \quad t_i \leq t < t_{i+1},$$

Avec :

$$N_{i,0} = \begin{cases} 1, & t_i \leq t < t_{i+1}, \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$N_{i,k} = \frac{t - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{t_{i+k} - t}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t).$$



- **Segments de courbes polynomiales cubiques rationnelles, non uniformes** <sup>[34]</sup>:

Les segments de courbe cubique rationnelle sont des rapports de polynômes.

$$x(t) = X(t)/W(t), y(t) = Y(t)/W(t), z(t) = Z(t)/W(t).$$

Ces polynômes peuvent être de Bézier, d'Hermite, ou encore d'un autre type. Quand ce sont des B-splines, on obtient des NURBS. L'intérêt des courbes rationnelles est double :

1. les courbes rationnelles sont invariantes par rotation, changement d'échelle, translation et projection perspective. Ce qui veut dire qu'une transformation peut-être appliquée aux points de contrôle uniquement.
2. les splines rationnelles (quadratiques) permettent de tracer précisément les coniques sans avoir besoin de nombreux points de contrôle.

**c. surfaces bicubiques paramétrées** <sup>[34]</sup>:

Ce sont une généralisation des courbes cubiques paramétrés. La forme générale d'une courbe cubique paramétrée  $Q(t)=G.M.T$ , avec G, la matrice géométrique, constante.

On peut spécifier les différentes surfaces en utilisant différentes matrices géométriques :

- **Surfaces Hermitiennes** : elles peuvent être entièrement définies par une matrice géométrique  $4 \times 4 G_H$ .
- **Surfaces de Bézier** : elles peuvent être déterminées de la même façon que pour les bicubiques Hermitiennes.
- **Surfaces B-Splines** : Les patches B-Splines sont représentés comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(s,t) &= \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{M}_{Bs}^T \cdot G_{Bs_x} \cdot \mathbf{M}_{Bs} \cdot \mathbf{S}, \\ \mathbf{y}(s,t) &= \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{M}_{Bs}^T \cdot G_{Bs_y} \cdot \mathbf{M}_{Bs} \cdot \mathbf{S}, \\ \mathbf{z}(s,t) &= \mathbf{T}^T \cdot \mathbf{M}_{Bs}^T \cdot G_{Bs_z} \cdot \mathbf{M}_{Bs} \cdot \mathbf{S}. \end{aligned}$$

La continuité  $C^2$  aux frontières est automatique avec ces surfaces ; aucun arrangement particulier des points de contrôle n'est demandé, exceptés pour éviter la duplication des points de contrôle, lesquels créent des discontinuités.

**d. Surfaces du second degré** <sup>[34]</sup> : Elles sont déterminées par une équation de la forme :

$$f(x,y,z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + 2dxy + 2eyz + 2fxz + 2ghy + 2hz + k = 0$$

On a une sphère pour le cas particulier :  $a=b=c=k=1$  et les autres coefficients nuls.



Ces surfaces sont particulièrement utilisées dans des applications spécialisées comme la modélisation de molécules et ont été aussi intégrées dans des systèmes de modélisation de solides.

Elles offrent la possibilité de :

- De calculer la surface normale.
- De tester si un point est sur la surface.
- De calculer  $z$  étant donnés  $x$  et  $y$ , ce qui est important pour les algorithmes de surfaces cachées.
- De calculer des intersections d'une surface avec une autre.

**e. Techniques de modélisations spécialisées**<sup>[34]</sup>: la modélisation de certains phénomènes naturels tels que le brouillard nécessite l'utilisation de techniques spéciales, parmi ces dernières on peut citer :

- **Modèles fractals** : elle signifie toute chose ayant une mesure substantielle d'auto-similitude exacte ou statistique (Fig IV.11).

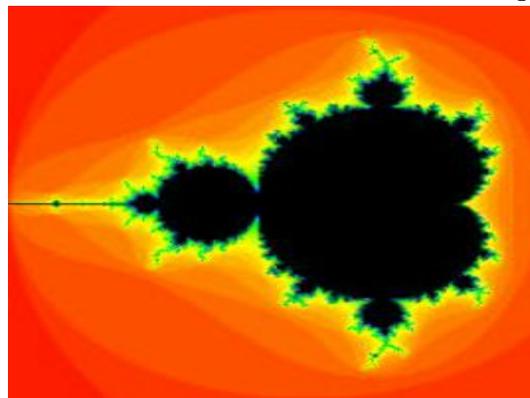


Fig IV.11 Approximation de l'ensemble de Mandelbrot (en noir dans la figure) :

Ce sont les points  $(x, y)$  pour lesquels la suite complexe :  $s_k = s_{2k-1} + x + y \times i, s_0 = 0$ , ne diverge pas, en module, à l'infini

- **Modèles basés sur des grammaires** : ces langages sont décrits par une grammaire consistant en une accumulation de productions, toutes étant appliquées à la fois. Ils permettent de décrire la structure des plantes en utilisant des graphes parallèles appelés graftals.

#### 4.2 Modélisation des objets solides :

Elle vise essentiellement à représenter des entités qui n'existent pas (ou éventuellement qui existent dans le monde réel) offrant ainsi un contrôle total sur ces dernières et rendant plus aisé l'observation de certains caractéristiques.

Il existe différentes méthodes pour réaliser une modélisation 3D, les six formalismes présentés ci-après donnent un large choix de modèles pour choisir en fonction de l'application désirée et les outils à disposition.

**a. Opérations booléennes régularisées** <sup>[34]</sup> : elles servent à combiner des objets avec des opérations booléennes, telles que l'union, l'intersection et la soustraction (Fig IV.12 ). En 3D on utilise des opérations booléennes régularisées conduisant, par la combinaison de deux objets solides, à l'obtention souvent d'un objet de même nature.

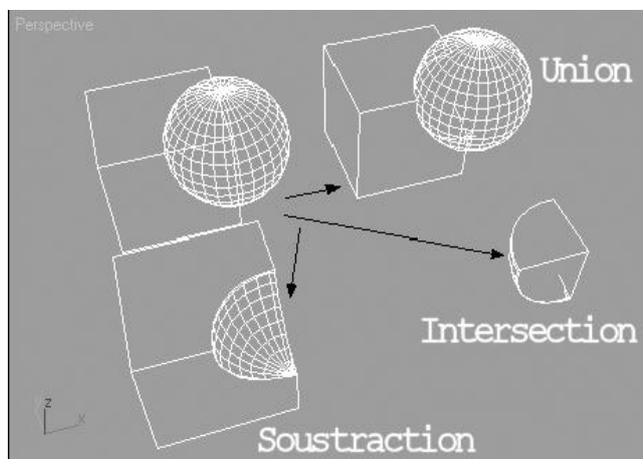


Fig. IV.12 Opérations booléennes

**b. Instanciation de primitives** <sup>[34]</sup> : cette méthode permet de créer des objets relativement complexes (des objets paramétrés) en définissant quelques paramètres de haut niveau. C'est ainsi qu'un engrenage est paramétré par un diamètre ou un nombre de dents.

**c. Représentations générées par balayage** <sup>[34]</sup> : le balayage d'une surface 2D ou d'un objet 3D suivant une trajectoire dans l'espace définit un nouvel objet appelé balayage. Parmi les différents types de balayages on trouve le balayage par translation, par extrusion ainsi que les balayages généraux.

**d. Représentations par frontières ou b-reps (Boundary Representation ou représentation par les contours)** <sup>[34]</sup> : elles décrivent un objet en termes de frontières de surfaces : sommets, arêtes, et faces. Parmi les systèmes de représentations par frontières on trouve :

- **Polyèdres et formule d'Euler** : dans le cas d'un polyèdre simple, ce dernier doit satisfaire la formule d'Euler, exprimant une relation entre le nombre de sommet (V), arêtes (E) et faces (F) :  $V-E+F = 2$ .

Une généralisation de la formule d'Euler s'applique aux objets qui ont des trous :

$V-E+F-H = 2(C-G)$ , où H : nombre de trous dans la face, G : nombre de trous qui passe au travers de l'objet et C : nombre de parties séparées de l'objet.

- **Opérations booléennes** : les représentations par frontières peuvent être combinées, en utilisant les opérations sur les ensembles booléens réguliers.

**e. Représentations par partitionnement spatial** <sup>[34]</sup> : le solide est décomposé en un ensemble de solides adjacents (de même type et plus primitifs que le solide d'origine), sans intersection, et cela jusqu'à la possibilité d'effectuer efficacement les opérations intéressantes.

- **Décomposition en cellules** : ce système définit un ensemble de cellules primitives qui sont typiquement paramétrés et souvent courbes, permettant de composer des objets complexes dans un mode ascendant en les ‘collant’ ensemble.

- **Enumération spatiale** : c’est un système dans lequel le solide est décomposé en cellule identiques (voxels) arrangées en une grille fixe et régulière.

- **Arbres octaux et arbres binaires** : D’autres variantes hiérarchiques de l’énumération spatiale, conçues pour répondre au problème de stockage, peuvent être utilisées pour encoder les solides tels que les arbres octaux (Ocrées) et les arbres binaires. La subdivision binaire ‘diviser pour régner’ est utilisée. Dans le cas des ocrées, l’espace est divisé à l’aide de plans mutuellement perpendiculaires et qui intersectent les trois dimensions à chaque niveau de l’arbre. Pour les arbres binaires, l’espace est divisé récursivement en paires de sous-espaces, séparés entre eux par un plan de position et d’orientation arbitraire.

**f. Composition arborescente de solides (CSG)** <sup>[34]</sup>: les primitives simples sont combinées au moyen d’un ensemble d’opérateurs booléens réguliers qui sont inclus directement dans la représentation

#### 4.3 Illumination et ombrage :

Dans l’image de synthèse une source lumineuse ponctuelle placée au-dessus de la scène est insuffisante car ne permet pas d’illuminer correctement les objets et donne une image plate (Fig IV.13). Pour remédier à ce problème il existe un éclairage type de base (Fig IV.d), employé notamment en photographie. Il se compose:

- d’une source lumineuse principale projetant des ombres placée en face et au-dessus de la scène (Fig IV.a)
- d’une source secondaire de plus faible intensité permettant d’adoucir les ombres et d’ajouter une lumière d’ambiance, placée au niveau des yeux de l’observateur (Fig IV.c)
- d’une source illuminant l’arrière des objets, permettant d’ajouter de la profondeur, placée à l’arrière et au-dessus de la scène, diamétralement opposée à la source principale (Fig IV.b).

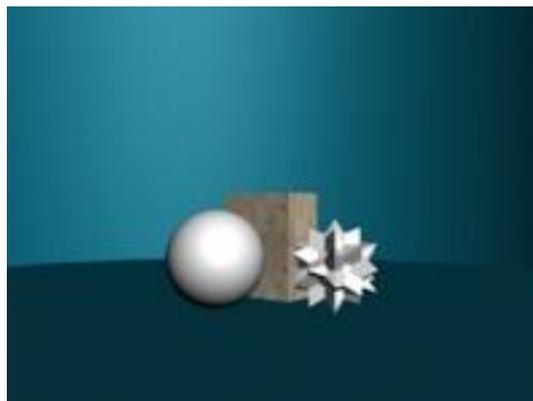
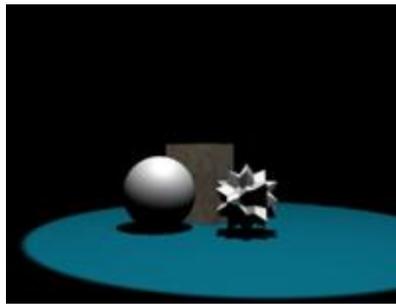
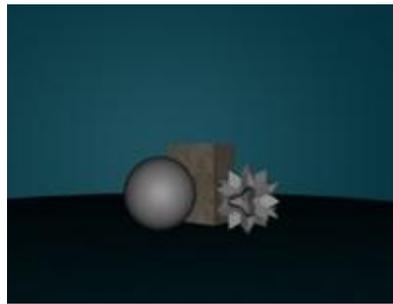


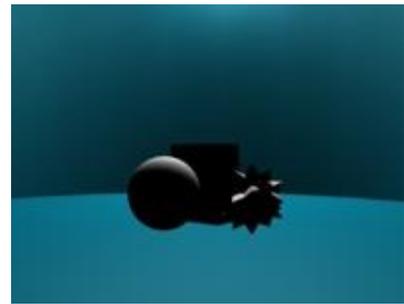
Fig. IV.13 *Image plate*



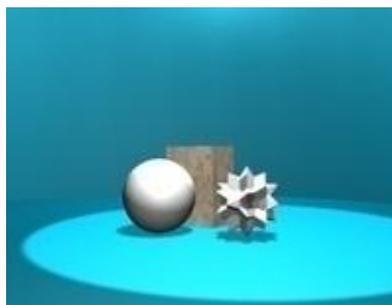
a. Source principale



b. Source de derrière



c. Source secondaire



d. Ensemble des sources

Fig. IV.14 effet des différentes sources de lumière sur les objets

#### 4.3.1 Modèles d'illumination <sup>[34]</sup>:

Le modèle d'illumination est exprimé par une équation dépendante de variables associées au point de l'objet traité :

$$I=K_i$$

Avec I : l'intensité résultante,  $K_i$  : l'intensité intrinsèque de l'objet

Etant indépendante de la position du point traité, l'équation peut être évaluée une seule fois par objet.

a. lumière ambiante :

Elle est assimilée à une source de lumière diffuse, non directionnelle, produite par les multiples réflexions de la lumière sur les surfaces présentes dans la scène. Son équation d'illumination est :  $I=I_aK_a$

Avec  $I_a$  : intensité de la luminosité ambiante (considérée comme constante)

$K_a$  : détermine le montant de lumière ambiante réfléchi par chaque objet (variant entre 0 et 1, c'est une propriété intrinsèque du matériau).



### **b. Réflexion diffuse :**

Un objet éclairé par une source ponctuelle présente par rapport à une lumière ambiante une luminosité variant d'un endroit à un autre. Les surfaces mates comme la craie possèdent une réflexion diffuse appelée *réflexion de Lambert*, leur luminosité est constante vue qu'elles réfléchissent la lumière également dans toutes les directions.

L'équation d'illumination diffuse est :  $I = I_p K_d \cos \Theta$

Avec  $I_p$  : Intensité de la source lumineuse

$K_d$  : Coefficient de réflexion diffuse (variant de 0 à 1, dépend du matériau)

L'angle  $\Theta$  entre la normale  $N$  à la surface éclairée et la direction  $L$  vers la source, varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  si la source lumineuse a un effet sur la surface.

### **c. Atténuation atmosphérique :**

Afin de simuler les atténuations atmosphériques, de nombreux systèmes utilisent un **paramétrage de profondeur**. Cette technique affiche les objets distants avec une intensité plus faible que ceux qui sont proches.

### **d. Réflexion Spéculaire :**

Cette réflexion est visible sur les surfaces brillantes. La lumière spéculaire reflétée par ces surfaces est de la même couleur que la lumière incidente. Parmi les modèles développés pour les surfaces partiellement réfléchissantes on trouve le modèle d'illumination de Phong.

## **4.3.2 Modèles d'ombrages pour polygones :**

### **a. Ombrage constant :**

Appelé aussi **ombrage par facette** ou **ombrage plat**, c'est le modèle d'ombrage le plus simple pour les polygones. Cette approche utilise un modèle d'illumination une seule fois pour déterminer une seule valeur d'intensité qui est ensuite utilisée pour l'ombrage du polygone entier. Approche valide si la source de lumière est éloignée et considérée à l'infini et que le polygone représente vraiment la surface modélisée et non une approximation de surface courbe.

### **b. Ombrage avec interpolation :**

Dans ce modèle, l'information d'ombrage est interpolée linéairement pour chaque triangle, à partir des valeurs calculées pour chaque sommet. Gouraud généralisa cette méthode aux polygones quelconques.



**c. Ombrage de maillages polygonaux :**

Les modèles précédents calculent l'intensité de chaque polygone indépendamment des autres ce qui donne un aspect de surface facetté. Il existe deux modèles d'ombrage de base pour maillage polygonaux qui exploitent les informations des polygones adjacents pour simuler une surface continue, ce sont les ombrages de Gouraud et de Phong. Les stations graphiques s'en inspirent.

**d. Ombrage de Gouraud :**

Appelé aussi **ombrage par interpolation d'intensité** ou de couleur, il généralise l'idée d'interpolation d'ombrage appliquée aux polygones en interpolant l'illumination des sommets des polygones représentant la surface à représenter et en tentant d'éliminer les discontinuités d'intensité.

**e. Ombrage de Phong :**

Appelé aussi **ombrage par interpolation des vecteurs normaux**, il interpole le vecteur N normal à la surface, plutôt que l'intensité. L'interpolation a lieu dans l'intervalle d'un polygone sur une ligne de balayage, entre les normales de début et de fin de l'intervalle.

Avec un modèle d'illumination prenant en considération la réflectance spéculaire, le modèle de Phong rend mieux que le modèle de Gouraud. Et en général, les résultats obtenus par interpolation des normales sont meilleurs que ceux obtenus par interpolation des intensités.

**4.3.3 Matériaux et textures** <sup>[34]</sup>:

**a. Polygones de détail :**

Pour augmenter le niveau de détail, le moyen le plus simple est d'ajouter des polygones de détail de surface pour monter des éléments sur un polygone de référence (comme le fait d'ajouter des portes, fenêtres sur le côté d'un bâtiment). Chaque polygone de détail est dans le même plan que le polygone de base.

**b. Placage de textures ou de motifs :**

Quand les détails deviennent trop minutieux et petits, la solution la mieux adaptée consiste à plaquer une image sur la surface, cette image est appelée texture et elle possède son propre système de coordonnées. La texture peut aussi être définie par algorithme. Cette technique a été conçue par Catmull en 1974 puis reprise par Blinn et Newell en 1976. Les éléments d'une image de texture sont appelés texels.



### c. Bump mapping :

Afin d'éviter que la surface sur laquelle on a plaqué la texture reste lisse, on a eu recours à la technique du *bump mapping* ou tableau de déplacements pour donner en post-traitement, l'apparence d'une géométrie modifiée sans avoir à toucher à la géométrie de la surface. Son approche consiste à perturber la normale à la surface avant de passer le point au modèle d'illumination.

#### 4.3.4 Ombres portées <sup>[34]</sup>:

Les algorithmes d'ombre portée déterminent quelles sont les surfaces visibles par une source lumineuse. Elles seront alors éclairées et les autres resteront dans l'ombre. Dans le cas de plusieurs sources lumineuses, les surfaces devront être évaluées par rapport à chacune des sources.

#### 4.3.5 Transparence <sup>[34]</sup> :

La transparence varie entre un corps translucide et un corps transparent, le dernier permettant d'y voir à travers, alors que le premier manifeste une transmission diffuse comme pour le verre sablé.

Deux méthodes sont utilisées pour avoir l'effet de combinaison de couleurs de deux objets en transparence : la transparence de filtrage et la transparence par interpolation.

### 4.4 Dynamiques et Animations :

Les animations en 3D sont construites de la même manière que les séquences cinématographiques ou vidéographiques : l'illusion du mouvement est créée en tirant profit de la limitation de la perception humaine. L'illusion du mouvement peut être ainsi générée à partir d'une séquence de 16 images par seconde, mais les fréquences de défilement ne deviennent réellement confortables qu'à partir de 24 images par seconde. La reproduction du mouvement par une succession d'images dépend en fait du support sur lequel l'animation est destinée à être diffusée. Ainsi, sur support vidéo, un minimum de 25 images par seconde est requis tandis qu'une diffusion sur l'écran d'un ordinateur peut demander davantage.

L'avantage des animations 3D sur les animations traditionnelles réside dans leur absence de contrainte physique : l'ensemble des éléments d'une scène n'est pas régi par les lois de la physique, ce qui laisse une plus grande liberté dans les possibilités de mise en scène. En outre, la création d'une animation ne dépend pas d'un référent réel car il ne s'agit pas d'un enregistrement du réel mais bel et bien d'une création.

Le facteur temps dans les images de synthèse permet une meilleure appréhension de la profondeur et du volume : le mouvement exprimé par une animation peut être une solution au problème de la planéité du support de la représentation. On peut faire à la caméra virtuelle ou « œil de l'observateur » le tour d'un édifice en le dévoilant au fur et à mesure, privilégiant ainsi une approche des volumes par la mémorisation des formes, la vision humaine recomposant automatiquement la spatialité. La caméra peut emprunter un chemin plus



compliqué ou trajectoire, en suivant un parcours à l'intérieur du monument, montrant successivement les volumes intérieurs.

L'intérêt de l'animation par ordinateur réside également dans la possibilité d'intervenir sur les objets, les éléments constituant une scène. Il s'ensuit alors tout un ensemble de possibilités permettant de présenter de manière didactique, voire intuitive, les informations. Ce genre d'animation est également très utile pour rendre compte des différentes phases d'évolution d'un site, pour représenter le caractère diachronique des sujets d'une recherche archéologique. L'expression des phases de construction d'un édifice n'est pas toujours très claire : généralement, la retranscription d'une évolution doit prendre en compte de nombreux paramètres, de nombreux composants ; dans ces conditions, il n'est pas aisé de formuler, graphiquement ou par écrit, l'ordre des constructions, des destructions, etc. Pour résoudre ce problème, rien n'empêche de présenter une animation évolutive du site.

La narration offre des possibilités illimitées au réalisateur d'une séquence animée, qui, en suivant les mouvements de caméra, les types de cadrage, peut exprimer un discours raisonné et hiérarchisé. La présentation d'un monument peut être construite sur un développement utilisant l'ensemble des procédés cinématographiques pour mettre en scène l'information.

#### **4.5 Rendu :**

##### **4.5.1 Techniques de rendu pour les dessins linéaires <sup>[34]</sup>:**

IL s'agit de montrer la profondeur des objets 3D sur un écran 2D. Les techniques suivantes peuvent être utilisées pour créer des dessins linéaires sur les écrans vectoriels et à balayage de trame.

**a. Vues orthographiques multiples :** Dans lesquelles le plan de projection est perpendiculaire à l'axe principal.

**b. projections en perspectives :** la taille d'un objet est mise à l'échelle dans des proportions inverses de sa distance à l'observateur. Néanmoins, une ambiguïté peut apparaître.

**c. Effet de profondeur :** Il peut être représenté par l'intensité de l'image. Les parties des objets qui apparaissent intentionnellement plus loin de l'observateur sont visualisés avec une intensité plus faible.

**d. Texture :** des textures qui suivent la forme de l'objet permettent de mieux le délimiter. Le recouvrement par des textures est spécialement utilisé dans la projection en perspective pour lever l'ambiguïté si elle existe.

**e. Couleur :** elle peut être utilisée symboliquement pour différencier un objet d'un autre en assignant une couleur différente à chaque objet de la scène.



**f. Détermination des lignes visibles :** Seules les surfaces, bornées par des arêtes, peuvent cacher d'autres lignes. Ainsi, les objets qui en bloquent d'autres peuvent être modélés comme des collections de surfaces et de solides.

#### 4.5.2 Techniques de rendu pour les images ombrées <sup>[34]</sup>:

Certaines des techniques de rendu exploitent l'aptitude des périphériques à balayage, à visualiser des surfaces ombrées. Ce qui est le cas dans :

**a. La détermination de surfaces visibles :** entraînant seulement la visualisation des parties de surfaces qui sont visibles aux observateurs.

**b. L'Eclairage et l'ombrage :** où les surfaces visibles acquièrent un ombrage dépendant du type d'illumination (ambiant, ponctuelle...), de l'orientation des surfaces et du type du matériau.

**c. L'Ombrage interpolé :** où l'information d'ombrage est calculée pour chaque sommet de polygone et interpolée le long des polygones pour déterminer l'ombrage de chaque pixel.

**d. Les propriétés des matériaux :** (matériaux ternes, brillants, translucides, mates, transparents...) doivent être prises en compte quand l'ombrage est déterminé et ce, pour augmenter le degré de réalisme.

**e. La Modélisation des surfaces courbes :** où l'information d'ombrage complète, est calculée pour chaque pixel de l'image.

**d. L'Eclairage et les ombres améliorés :** permettent de corriger l'apparence irréaliste des images infographiques due au défaut de précision de la modélisation dans la façon dont la lumière interagit avec les objets.

**e. Les Textures :** permettent, de fournir un effet de profondeur additionnel et d'imiter les détails des surfaces des objets réels.

**f. Les Ombres :** permettent d'augmenter le niveau de réalisme en ajoutant des effets de profondeur.

**g. Transparence et réflexion :** les modèles simples de transparence n'incluent pas la réfraction de la lumière à travers un solide transparent. Les modèles les plus complexes incluent la réfraction, la translucidité diffuse et l'atténuation de la lumière avec la distance.

## 5. Reconstitution 3D en archéologie

L'infographie permet, grâce à l'image de synthèse, de diffuser l'information à un large public en restituant à l'état initial des sites archéologiques dont les vestiges ont subi des



*Fig. IV.15 une reconstitution virtuelle*

dégradations plus ou moins importantes. Elle constitue aussi un outil de travail, de synthèse des informations recueillies par les archéologues, ainsi, qu'un moyen pour la restauration. La fig IV.15 nous montre une reconstruction 3D de la Rome antique.

### 5.1 La reconstitution assistée par ordinateur

Elle est utilisée quand le vestige existe ou est partiellement détruit mais dont de nombreux éléments de construction sont encore présents ou en emploi dans d'autres monuments. Elle permet de déplacer en temps réel les éléments de la construction (virtuellement, bien-sûr) et de visualiser immédiatement le résultat tout en offrant la possibilité d'essayer plusieurs combinaisons pour n'en conserver que les plus pertinentes. <sup>[99]</sup>

Le problème de ces reconstitutions réside néanmoins dans le caractère presque toujours lacunaire de la documentation disponible. Il en résulte que le modèle numérique constitué donne une vision partielle de ce à quoi pouvait ressembler le bâtiment, ce modèle pouvant ensuite être mis à jour en fonction de nouvelles découvertes.

### 5.2 La reconstitution hypothético-déductive

Une autre alternative de reconstitution use de la documentation relative au site étudié, ainsi qu'aux connaissances disponibles sur des vestiges comparables présents sur d'autres sites. <sup>[38]</sup>



### **5.3 Modalistes et méthodes d'acquisitions des données**

Les vestiges découverts, jusqu'ici, étaient conservés sous la forme de documents graphiques (photographies, dessins...etc.), qui sont destinés à être publiés sur des supports plans, donc, ils ont été essentiellement conçus dans une logique bidimensionnelle. Or, il s'avère que les données archéologiques gagnent à être véritablement gérées dans une logique tridimensionnelle. Cette dernière, qui n'est pas toujours possible à cause du manque d'instrument dédiés à cet effet. Dans la plupart des chantiers de fouille, la saisie des coordonnées tridimensionnelles ne concerne que certains vestiges caractéristiques et n'est réalisée que de manière approximative où l'objet est d'abord replacé dans le plan du site, ses coordonnées (x, y) étant obtenues par triangulation à partir de points connus, puis se voit attribuer une coordonnée (z) grâce un instrument de nivellement qui permet d'en déterminer l'altitude par rapport à un plan horizontal de référence. <sup>[39]</sup> Cette méthode ne permet que de situer, et de façon approximative, des objets de faible volume. Aussi, elle ne permet pas la saisie des formes des vestiges.

Toutes ces lacunes nous montrent le décalage qui existe entre l'archéologie telle qu'elle est pratiquée et les conditions à remplir pour une meilleure efficacité des modèles numériques. D'où la nécessité d'autres méthodes d'acquisitions tridimensionnelles. Toutefois l'utilisation de scanners 3D ont permis à des grands laboratoires américains (de Stanford) de numériser par exemple des sculptures (de Michelange au musée de Florence).

### **5.4 Les instruments métrologiques tridimensionnels**

#### **5.4.1 Le relevé au théodolite**

Il est utilisé comme instrument de mesure de points spécifiques du relief, utilisés ensuite dans la reconstitution du site en 3 dimensions. Les calculs trigonométriques réalisés à partir de ces mesures permettent aux géomètres de relever des objets à partir de leurs points significatifs. <sup>[40]</sup>

#### **5.4.2 Les relevés photogrammétriques**

Son principe repose sur l'intersection des visées enregistrées par deux photographies du même objet prises sous deux angles différents, ce qui permet de restituer le relief de l'objet, et de mesurer la position tridimensionnelle des points significatifs présent sur la ou les différentes photographies (Fig IV.16). <sup>[40]</sup>

La création des restituteurs analytiques (systèmes optoélectroniques) combinant la vision analogique avec un traitement informatique des données a permis de conserver les coordonnées tridimensionnelles pour les exporter vers des logiciels gérant les informations tridimensionnelles, ce qui a donné la possibilité de créer à partir d'un photogramme un modèle numérique de l'objet. <sup>[41]</sup>

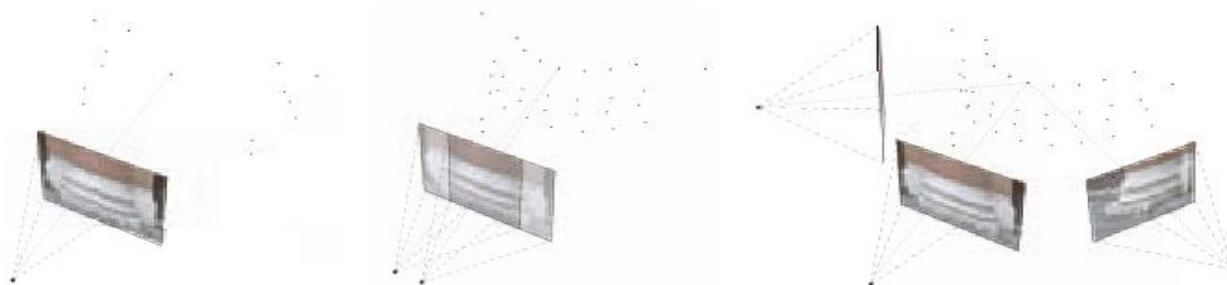


Fig IV.16 Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique. De gauche à droite : la restitution à partir d'une seule image, d'un couple d'images et d'un bloc multi-image.

Les récentes recherches ont conduit à l'élaboration de restituteurs intégralement numériques : l'utilisateur spécifie les caractéristiques de l'appareil et fournit un certain nombre de points d'appui présents dans les deux clichés pour caler les photographies ensemble. <sup>[41]</sup> Les avancées technologiques nous permettent aujourd'hui d'acquérir les images directement par des caméras à matrices DTC (matrice de certaine dimension composée de photosites) <sup>[52]</sup>

### 5.5 Scanner 3D et Rendu interactif de sculptures de Michelange

La visualisation 3D interactive peut être envisagée dans le cas de la mise en place d'un musée virtuel ou, dans la recherche de détails à restaurer. Un travail <sup>[51]</sup> illustré en figure IV.17 a été mené à l'USTHB d'Alger dans cette optique, autour des sculptures de Michelange du Musée de Florence, après une numérisation à l'aide d'un scanner 3D de ces sculptures et de premiers algorithmes de rendu 3D par le laboratoire américain de Stanford.



Level of detail	8	9	10	11
Points traversed	85677	335320	1260898	4226086
Points splatted	44001	95192	121086	142251
Redering time(Sec)	0.246	0.635	1.724	15.7
Maximum frame rate	4 fps	1.5 fps	<1 fps	<1 fps

Fig. IV.17. Le taux de trame maximale qu'on peut atteindre à différents niveaux de détail (8,9,10 et 11) dans le rendu de Lucy par le modèle QSplat



## **5.6 La saisie d'information à distance**

Ces méthodes d'analyse n'entrent pas en contact physique avec l'objet à numériser, ce qui s'avère être très utile quand le vestige archéologique est difficilement accessible ou particulièrement fragile.

### **5.6.1 Par l'analyse d'image**

C'est comme lors d'une analyse photogrammétrique, on analyse plusieurs images de l'objet à numériser. Mais l'avantage par rapport à la photogrammétrie traditionnelle tient du fait que les coordonnées ne proviennent pas d'un pointage manuel fastidieux mais d'une analyse automatique pilotée par ordinateur via un logiciel spécifique.

- **Acquisition de la forme d'après un couple stéréographique**

C'est une méthode dans laquelle l'objet à numériser est placé à une certaine distance de deux appareils photographiques numériques placés parallèlement. Le logiciel va chercher automatiquement en chaque point d'une photo son homologue sur l'autre, en fondant les critères de correspondance de chaque point sur sa position relative dans les deux images ainsi que la luminosité.

Par la connaissance de l'emplacement de chaque point sur les deux images ainsi que les réglages et l'orientation des appareils numériques, le logiciel en détermine la profondeur et par la suite la surface visible de l'objet est inscrite dans un espace tridimensionnel. En traitant les différentes faces, on obtient le modèle numérique de notre objet. Cette méthode présente l'inconvénient d'un manque de précision du modèle numérique, lorsque certains endroits sont sombres sur les photographies. <sup>[42]</sup>

- **Acquisition de la forme par lumière structurée**

Un appareil numérique est couplé à un projecteur piloté par ordinateur, qui projette un motif de forme et de couleurs connues sur l'objet. Les déformations se produisant sur la surface de l'objet en trahissant la forme, qu'il est ensuite facile de restituer. L'ensemble des données renseignant sur la forme de l'objet, sont obtenues automatiquement par le croisement des différentes analyses successives. <sup>[42]</sup>

- **Acquisition de la forme par le mouvement**

Un logiciel, avec l'aide d'un algorithme spécifique, analyse une séquence d'images filmées de l'objet, trouve le mouvement de la caméra et détermine la géométrie de la scène filmée en s'appuyant sur des points significatifs de cette dernière. <sup>[43]</sup>

### 5.6.2 Par balayage laser :

Le système est équipé d'un émetteur laser produisant un faisceau lumineux destiné à balayer horizontalement la surface de l'objet marquée d'un point lumineux dont les coordonnées sont relevées à intervalle régulier par une caméra vidéo (fig IV.18). Les coordonnées tridimensionnelles sont connues par un calcul de triangulation, le triangle étant formé par l'émetteur laser, le récepteur (caméra vidéo) et le point mesuré (Fig IV.19).<sup>[44],[45]</sup>

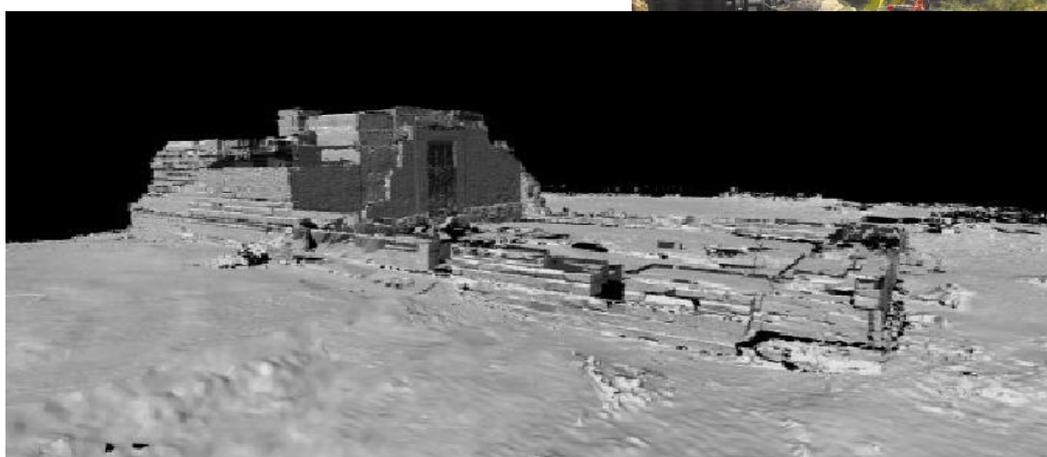


Fig. IV.18 Le modèle topographique 3D d'un temple et de son environnement immédiat

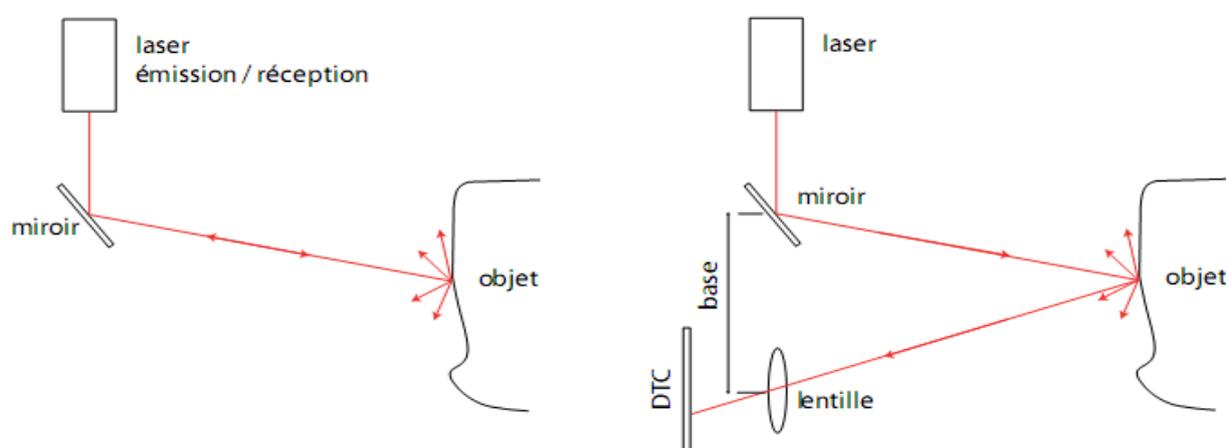


Fig IV.19 Illustration schématique des deux principes de fonctionnement des dispositifs de balayage laser 3D. À gauche le principe du temps de vol, à droite celui de la triangulation<sup>[44]</sup>.



## **5.7 La saisie directe de l'information**

Ces outils proviennent du secteur industriel de la rétro-conception. Ils appartiennent à la catégorie des machines à mesurer tridimensionnelles, ils font partie d'une installation plus ou moins complexe comprenant un bras mobile dans les trois dimensions pourvu à son extrémité d'un capteur haute précision avec lequel il peut palper la surface de l'objet. Piloté par ordinateur, ce dispositif permet de reconstituer toute la surface de l'objet en la parcourant. Ce qui nous donne un nuage de points de coordonnées  $x, y, z$  qui, reliés en eux trois à trois, forment une surface composée d'une multitude de facettes triangulaires inscrites dans un système tridimensionnel. <sup>[38]</sup>. Ce procédé ne peut traiter que les objets mobiles, en plus de l'importance des moyens mis en œuvre, d'où une préférence pour les méthodes de numérisation par analyse d'information à distance.

## **6. Les possibilités de la réalité virtuelle pour la recherche et le traitement de l'information**

### **6.1 La représentation tridimensionnelle de la topographie**

Les MNT (Modèles Numériques de Terrain) sont apparus à partir de la fin des années 1950, sous les acronymes DTM (Digital Terrain Model) ou DEM (Digital Elevation Model). Ils permettaient, à l'origine, de recréer des reliefs en trois dimensions à partir d'une quantité finie de points exprimés par le triplet de coordonnées  $(x, y, z)$ . Pour recréer des reliefs d'après la réalité, il suffisait donc d'entrer dans le fichier numérique, les coordonnées des points saisis sur le terrain soit à partir d'instruments de mesure tridimensionnelle comme les théodolites par exemple, soit à partir des restitutions photogrammétriques issues des photographies aériennes du terrain à numériser. La finesse et le degré de conformité du MNT par rapport au relief réel dépend bien évidemment de la quantité de points saisis ; néanmoins, pour donner au MNT l'aspect général du relief sans pour autant nécessiter la mesure d'un trop grand nombre de points, des algorithmes permettent de combler les vides laissés entre chaque mesure en interpolant la forme du relief à partir des données avoisinantes et réellement mesurées. Il résulte de ce genre de procédé, une image plus ou moins fidèle de l'original, présentée sous la forme d'un réseau de facettes triangulaires assis sur les véritables coordonnées du terrain. <sup>[48]</sup>

### **6.2 La reconstitution du paysage archéologique**

Il est possible, grâce aux connaissances acquises par les sciences de la Terre lors de l'observation du paysage actuel, de restaurer le paysage archéologique dans un MNT. L'une de ces utilisations permet de simuler le niveau de la mer à différentes époques pour mettre en évidence l'ensemble des terres émergées à un certain moment, ce qui représente un réel intérêt lorsqu'il s'agit de déterminer les choix et les possibilités d'implantation qu'avaient les



populations à différentes époques ainsi que l'extension de leur réseau de communications et de leur rapport aux autres sites suivant les possibilités de déplacement à l'intérieur d'un environnement. Ainsi, une montée ou une baisse du niveau de la mer peut conditionner le rapprochement ou l'éloignement de deux populations géographiquement proches l'une de l'autre. Un autre exemple prouvant l'importance du niveau de la mer dans l'étude des populations passées se trouve dans l'explication des déplacements humains lors des périodes de glaciation, et sur lequel se fonde une des théories de la « colonisation » du continent américain par le détroit de Behring, alors émergé. <sup>[38]</sup>

### **6.3 La prospection virtuelle**

Généralement, la découverte de vestiges trahis par des empreintes en relief est tributaire des conditions climatiques qui ne sont absolument pas contrôlables. A certains moments de l'année et de la journée, les lumières rasantes permettent de souligner des reliefs très estompés. Par conséquent, les prospecteurs, dépendants de ces conditions, bénéficient rarement de la conjoncture propice à la découverte de nouveaux sites. La modélisation numérique du relief peut présenter une alternative à ce manque de liberté. Il est possible d'utiliser les Modèles Numériques de Terrain (MNT) dans une perspective prospective, que cela soit à une échelle prenant en compte un site et son environnement ou simplement une zone à l'intérieur d'un site. <sup>[49]</sup>

### **6.4 Possibilité d'association avec d'autres logiciels et des bases de données**

On peut associer les modèles numériques de terrain à d'autres logiciels (surtout des logiciels de gestion de base de données) pour devenir des outils d'aide à l'interprétation archéologique. Ce qui nous donne la possibilité de visualiser certaines données en les replaçant dans un système tridimensionnel. Il s'ensuit que certaines relations de cause à effet peuvent être mises en évidence. <sup>[50]</sup>

Ce type d'associations nous montre, d'une part, que la combinaison de différents documents génère davantage d'interprétations qui peuvent désormais être confirmées par la prise en compte de nombreux paramètres ingérables autrement que par ordinateur ; d'autre part, le résultat visuel peut être contrôlé et discuté plus facilement par d'autres archéologues.

### **6.5 Simulation des propriétés physiques et visualisation de l'invisible**

La modélisation permet, aussi, d'intégrer les propriétés physiques des objets dans des simulations de manière à mettre en évidence les contraintes de poussée supportées par certains vestiges archéologiques. Pour cela, on modélise l'objet en prenant en compte les propriétés spécifiques à chacun des matériaux entrant dans la composition du vestige ou de l'ouvrage. Des simulations et des essais peuvent être réalisés par étude et analyse d'échantillons comparables à ceux présents dans les constructions. En entrant, en plus, dans le modèle



numérique les données géologiques réelles, on pourra avoir une vision plus précise sur les causes de dégradation ou de ruine des édifices ainsi que d'en prédire la venue. <sup>[38]</sup>

---

## *CHAPITRE IV :*

### *Présentation de la villa Mohiédine*

1. Présentation du site : villa Mahiédine

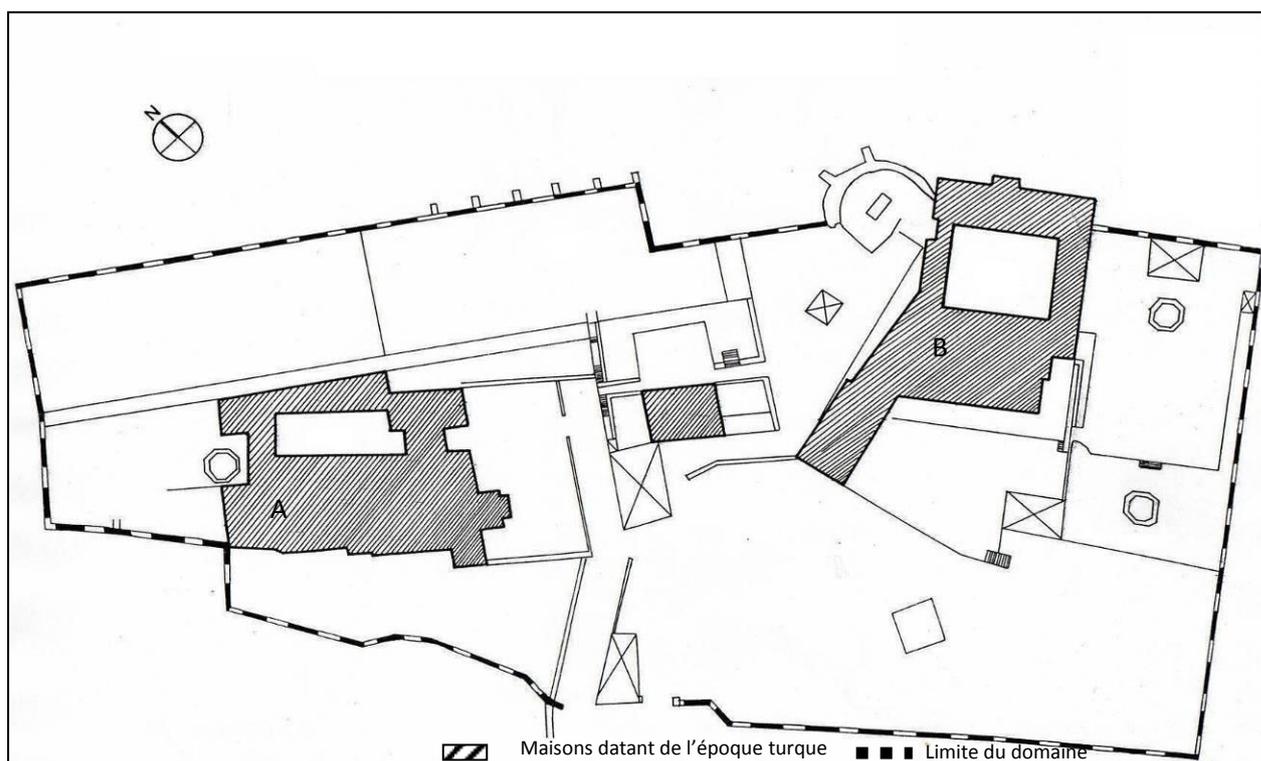
2. État des lieux et phénomènes de dégradation

## 1.2 Contexte architectural et système constructif

L'ensemble des villas se compose de trois éléments :

- Une maison et ses annexes se déroulant autour d'une cour ;
- Un groupe de deux maisons ayant des accès communs sur une cour bordée par un double portique ayant vue sur la mer ;
- Une loge inscrite dans l'espace compris entre les deux groupes d'habitation, elle représente un exemple rare des petits bâtiments de la compagnie d'Alger ancienne.

Il existe aussi dans l'enceinte de la compagnie Mahiédinne quelques bâtiments sans caractère défini datant de la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et le début du XX<sup>ème</sup>. [53]



*Fig.V.2 Plan de masse du domaine Mahieddine*

## 1. Présentation du site : villa Mahiédine

### 1.1 Présentation historique et situation géographique

Le domaine des villas MAHIEDDINE appelé aussi compagne Mahiédinne ou Djenane Mahiédinne (classés monuments historiques décret du 16 Avril 1927 abords décret du 16 octobre 1945 et reconduit le 20 Décembre 1967) <sup>[53]</sup> appartient à la commune de Sidi M'hammed (Wilaya d'Alger).

Il se situe dans une zone entre un quartier d'habitation (cité Mahieddine) et à la limite d'une zone d'espaces verts (entre  $36^{\circ}45'14.22''N$  et  $36^{\circ}45'18.00''N$ ,  $3^{\circ}3'14.58''E$  et  $3^{\circ}3'19.54''E$ ) <sup>[54]</sup>, sur un site surplombant la rue Mohamed ZEKAL (ex Fontaine Bleue), dressé sur un couteau permettant d'avoir une vue panoramique sur la baie et les hauteurs d'Alger.



Fig.V.1 Image aérienne de l'entourage du domaine Mahieddine, ce dernier étant délimité par un trait rouge

Les maisons datant de l'époque ottomane sont construites suivant un système traditionnel à murs porteurs. Ces derniers sont en maçonneries de terre cuite avec un mortier composé de terre et de chaux, supportant des planchers en voutes d'arête et en berceau en maçonnerie au rez-de-chaussée.



*Fig.V.3 Coupoles en maçonneries avec un enduit*



*Fig.V.4 système constructif, utilisant une brique de terre cuite et un mortier de chaux et de terre*

Les planchers de l'étage sont réalisés en poutrelles en bois (rondins ou solives) supportant un plancher de terre sur des voligeages, les revêtements sont en marbre ou en terre cuite.

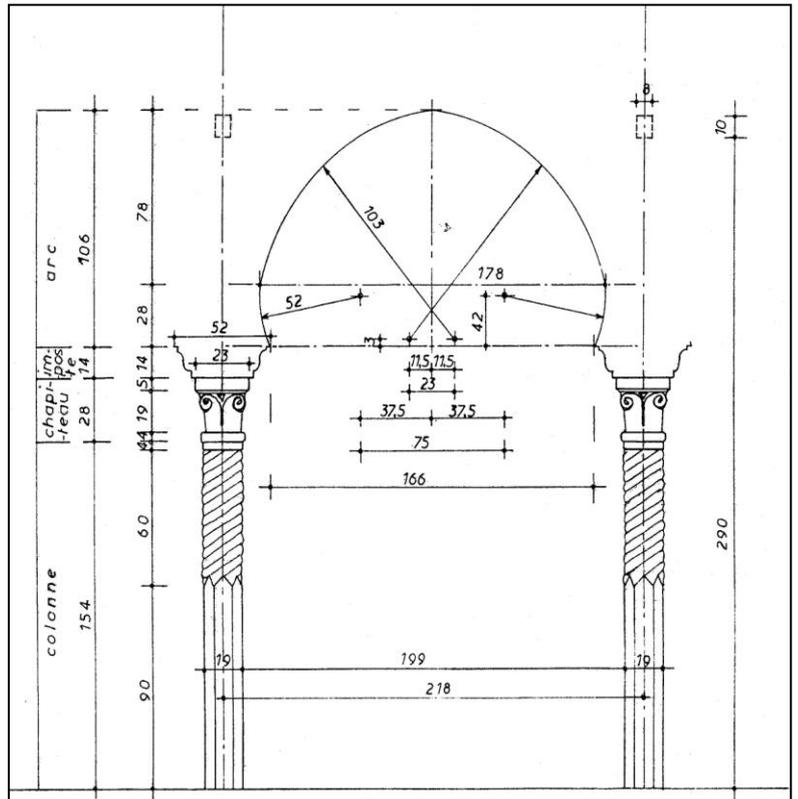
Dans certains espaces on trouve des coupoles réalisées en maçonnerie, les portiques sont constitués d'arcades (arc brisé outrepassé) en briques pleines supportant des planchers à rondins et ayant pour base des colonnes en tuf.



*Fig.V.5 portiques*



*Fig.V.6 Plancher*



*Fig.V.7 Schémas descriptif des poteaux et de l'arcade*

## 2. État des lieux et phénomènes de dégradation

Les deux villas sont dans un état de dégradation très avancé dû au vieillissement, l'utilisation anarchique des lieux comme habitation, vol de faïences et de menuiseries etc. Cet état a empiré au fil du temps malgré toutes les restaurations effectuées et les alertes lancées.

La villa B est la plus touchée, il y est eu même un effondrement total de certaines parties de la maison tels que le mur de soutènement du portique à l'intérieur. D'autres dégradations ont été décelées dans d'autres endroits tels que des défects d'enduits, fissures...



*Fig.V.8 effondrement du mur de soutènement du portique à l'intérieur de la villa B*



*Fig.V.9 des défects d'enduit sur une très grande partie des murs*

Les dégradations rencontrées sont de plusieurs natures, d'origines naturelles ou humaines, accidentelles ou prémédités :

### 2.1 Dégradations d'origines humaines



*Fig.V.10 Rien n'a pu échapper à la négligence et au vol, que se soit les éléments de menuiserie, s'agissant des portes (3), des fenêtres (2). Même cet emplacement (1) où il devait y avoir une fontaine en marbre ! Seules quelques exceptions ont failli à la règle comme ce portail d'époque (4).*

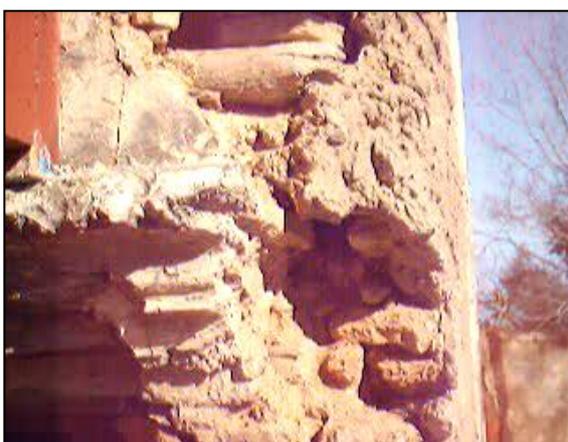
Ainsi, on constate l'utilisation des briques creuses (3), des parpaings (1) et des carreaux de faïences (2) et (5) pour modifier et réaménager les lieux à la guise des occupants de ces derniers.



*Fig.V.11 différents dégâts causés par l'occupation et la modification des lieux*

Les dégradations recensés ne se résument pas seulement aux actes de vandalismes ou le vol de menuiseries, faïence ou autres matériaux mais malheureusement il s'agit aussi d'anciennes restaurations qui ont par des travaux et des dispositions prises contribué à l'accélération de la dégradation ainsi qu'à dénaturer le vrai visage de l'art ottoman.

Dans la majorité des travaux de restauration rencontrés le premier pas était de décaper l'ancien mortier, ce qui rend encore plus vulnérables les maçonneries et les fragilise encore plus; ainsi la brique devenue apparente, et surtout à l'extérieur, subit l'action mécanique et chimique des intempéries qui provoquent le phénomène d'alvéolisation et de désagrégation, qui est due à des effets électrolytiques sur l'argile. Une présence permanente d'eau peut même provoquer la dissolution interne des briques, qui prennent un aspect cartonneux et perdent leur résistance.



*Fig.V.12 désagrégation et effritement du briquetage extérieur*



*Fig.V.13 utilisation d'un mortier à base de ciment pour le jointement et l'enduit*

L'utilisation de mortier à base de ciment, par le fait de sa haute résistance à la compression (supérieure, et de loin, à celle des briques) et sa dureté relativement élevée, propriétés qui ne lui permettent pas d'agir comme matériaux sacrificiable de l'ensemble, diffère de celle du mortier d'origine, plus mou et plus flexible et de moindre résistance mécaniques que les éléments de maçonnerie. Ce qui lui permet de s'accommoder aux mouvements mineurs de l'ouvrage, et dans le cas de plus grands mouvements, de subir le désordre et de se sacrifier au profit du maintien de l'intégrité de l'élément de maçonnerie. En effet, il est plus simple et économique de réparer des joints de mortier que de remplacer une brique épauprée.

D'une autre part, par une capacité de capillarité trop faible et une trop forte étanchéité, le mortier (à base de ciment) va empêcher l'eau contenue dans la brique de migrer dans le mortier et de s'évaporer. La face avant de la brique va reculer peu à peu et se creuser par rapport au joint.



*Fig.V.14 développement de lichens sur le parement*



*Fig.V.15 décollement de la couche d'enduit faite à base de ciment*

Cette faible capillarité entraîne aussi le décollement en plaques des enduits fait à base de ciment, suite à l'emprisonnement de l'humidité entre le parement et la couche d'enduit affaiblissant ainsi l'adhérence entre les deux (adhérence qui est déjà amoindrie par la différence du coefficient de dilatation entre les deux) et causant même des pourrissements et le développement de bio organisme.

## 2.2 Phénomènes naturels

Parmi les phénomènes naturels qu'on peut rencontrer, on peut citer le



*Fig.V.16 canalisation rompue, ainsi que la tuvauterie*

vent, le rayonnement solaire, les séismes, les glissements de terrain...etc. mais il y a un phénomène qui a joué un rôle capital durant le processus de dégradation des maçonneries de la villa Mohiédine : c'est l'humidité sous ses différents aspects.

## **2.2.A L'humidité**

Quatre types d'humidité ont été recensés:

### **2.2.A.1 L'humidité ascensionnelle en provenance du sol**

C'est l'humidité contenue dans le sol et remontant par capillarité dans les maçonneries des murs et dans les dallages.

Elle provient d'eaux circulant en surface ou dans les couches superficielles du sol, d'origines diverses :

Eaux de ruissellement, sources, canalisations enterrées rompues, des nappes phréatiques, lorsque celle-ci se trouve à faible profondeur.

### **2.2.A.2 L'humidité provoquée par les infiltrations d'eau de pluie**

En frappant contre les murs, la pluie pénètre dans ces derniers, les murs exposés aux vents dominants sont les plus vulnérables. Sur les abords de la mer, cette action est aggravée car la pluie chargée d'embruns dépose du sel sur les maçonneries ; celles-ci deviennent alors hydrophiles et retiennent l'eau : les murs sont alors constamment humides.



*Fig.V.17 trace d'humidité sur les murs extérieurs*

### 2.2.A.3 Les condensations

Deux phénomènes sont à considérer selon qu'il s'agit des murs intérieurs ou des murs extérieurs.

- **Murs intérieurs :**

Lorsqu'à un froid vif succède un temps tiède et humide, la vapeur se dépose sur les maçonneries qui n'ont pas eu le temps de se réchauffer et n'ont pas encore atteint la température ambiante.

En effet, à une température et à une pression déterminées, l'air ne peut contenir à l'état de vapeur, qu'une certaine quantité d'eau, définie par son poids par mètre cube d'air. Cette quantité d'eau diminue avec la température.

Si l'air ambiant se trouve brusquement refroidi, l'eau excédentaire que l'air ne peut plus retenir se condense en gouttelettes et se dépose sur les murs les plus froids.



*Fig.V.18 trace d'humidité sur les murs intérieurs dont l'effet est aggravé par l'absence d'enduit*

- **Murs extérieurs :**

En été, les gaz humides de l'atmosphère se déposent à la base des murs qui est la partie la plus froide. En hiver, la terre refroidit moins vite que les murs extérieurs : les gaz humides remontant de la terre se déposent donc à la base des murs, là aussi.

### 2.2.A.4 L'humidité accidentelle

Elle est causée par un accident ou un défaut d'entretien, des ouvrages en toiture (chêneaux, gouttières ou descentes), ou des canalisations (colonnes montantes, réseau de distribution encastré, chutes d'eaux usées, etc...) se mettent à fuir, parfois de façon insidieuse, non détectable immédiatement. L'eau pénètre alors dans les maçonneries et crée des désordres.

### 2.2.B Les algues, les mousses et la végétation

Dans certains endroits, l'humidité, d'origines diverses, provoque la prolifération de mousses et d'algues sur les murs ainsi que le manque d'entretien qui permet le développement de certaines végétations, qui au-delà de la dénaturalisation du paysage et la couleur des habitations peuvent provoquer des pourrissements, et par le biais des racines d'herbe ou d'arbre provoquent des désordres structurels.



*Fig.V.19 Ce ne sont pas les exemples de manque d'entretien ou de prolifération de végétation qui manquent !*



## *CHAPITRE V :*

### *Étude d'un mortier de jointement*

1. Problématique
2. Identification et prélèvement des échantillons
3. Choix des composants
4. Étude des mortiers

## 1. Problématique

Les mortiers utilisés pour les constructions neuves ne conviennent pas aux anciens ouvrages de maçonnerie, en raison entre autres de leur haute teneur en ciment Portland qui leur confère une densité, une résistance en compression et une dureté relativement élevées, propriétés qui ne leur permettent pas d'agir comme matériaux sacrificiels de l'assemblage d'où la nécessité d'utiliser un mortier plus mou offrant une résistance moindre à la compression, et plus flexible que les éléments de maçonnerie. Ainsi, le mortier peut accommoder les mouvements mineurs de l'ouvrage. Dans le cas de plus grands mouvements, un mortier mou subira les désordres et se sacrifiera au profit du maintien de l'intégrité de l'élément de maçonnerie. Il est plus simple et économique de réparer des joints de mortier que de remplacer une pierre épaufrée.

C'est dans ce sens que va cette étude, en cherchant à optimiser une composition de mortier répondant à toutes ces exigences. Commenant par identifier les matériaux déjà existant, servant comme point de repère, ensuite faire un choix de matériaux et confectionner plusieurs mortiers.

## 2. Identification et prélèvement des échantillons

Les échantillons sont des briques pleines de dimensions différentes et des fragments mortiers prélevés au niveau du rez-de-chaussée et du 1<sup>er</sup> étage de la villa B.

Ces échantillons ont subis des réflexions pour avoir une forme uniforme pouvant ultérieurement permettre leurs utilisations pour des essais mécaniques.



*Fig. VI.1 prélèvement des échantillons de briques et de mortiers*



### 3. Choix des composants

#### 3.1 Liants

Le ciment étant composé de calcaire et d'un pourcentage élevé d'argile ainsi que d'autres additifs jouit d'une forte hydraulité, ce qui lui confère une grande résistance mécanique, propriété, qui contrairement aux apparences le rend inadéquat pour les travaux de restauration. Cette résistance mécanique et par conséquent une plus grande dureté abiment les maçonneries en transmettant directement les contraintes à ces dernières. L'utilisation du ciment en restauration est à proscrire absolument car elle peut entraîner de sérieux désordres constructifs :

- Rétention de l'humidité avec, à terme, détérioration des maçonneries, pourrissement de certains bois inclus dans ces dernières. Ce qui provoque aussi le décollement en plaques des enduits si le ciment en fait parti.
- Sur le plan esthétique il est nuisible, sa couleur grise dénature les maçonneries et il ne peut pas être coloré à l'aide de tuf.

Le ciment blanc perçu comme adapté à être utilisé pour la restauration, ses caractéristiques restant les mêmes que le ciment gris, son emploi est à prohiber dans la restauration.

Les mortiers de chaux présentent beaucoup d'avantages pour le rejointoiement des ouvrages anciens de maçonnerie. La chaux est un liant qui contribue à l'obtention de cette flexibilité recherchée du mortier, contrairement au ciment Portland. Étant plus flexible, le mortier de chaux aura moins tendance à se détacher des éléments de maçonnerie. De plus, la chaux augmente la malléabilité du mortier et permet d'établir une grande surface de contact entre le mortier et l'élément de maçonnerie lors de la mise en œuvre. Ces deux caractéristiques permettent de réduire l'infiltration des eaux de pluie aux joints et, comme ce mortier est plus poreux qu'un mortier de ciment, il ne retient pas l'humidité dans le joint.

- **Chaux aérienne : CL 90**, est une chaux très pure, avec une densité apparente de 0.5 (voir fiche technique en annexe):

Avantages :

- Plasticité et souplesse de la maçonnerie
- Respiration des murs
- Bonne adhérence aux joints des murs montés à la terre
- Se colore parfaitement avec le tuf.

Inconvénients :

- Ne durcit pas au contact de l'eau d'où un emploi exclusivement saisonnier



- **Chaux hydraulique** : NHL 2 et NHL 5 (voir fiche technique en annexe).

Avantages :

- Prise à l'eau
- Plus étanche

Inconvénients :

- Moins de souplesse
- Emprisonnement de l'humidité dans le mur
- Prend moins bien la coloration du tuf

Sur la base des fiches techniques, des avantages et des inconvénients de ces chaux, le choix a été pris de faire des formulations avec d'une part un seul type de chaux et d'autre part un mélange des deux types pour en tirer le plus des atouts de chacune.

## **3.2 Granulats**

### **3.2.A Sable : P 18-542**

Dans un mortier, le sable à plusieurs rôles ;

- Donner de la résistance aux mortiers, dont ils constituent l'ossature,
- Diminuer les phénomènes de retrait, en donnant du volume au mortier,
- Colorer les mortiers, en jouant sur l'effet de transparence de la chaux,
- Personnaliser l'aspect du mur et lui donner ses caractéristiques régionales par la diversité des matériaux locaux employés.

Dans les anciens bâtis, les sables présentent des grains variant de l'infiniment petit à des éléments de plus de 10 mm, voire 15 mm pour les plus gros d'entre eux. En tout état de cause, un sable bien "équilibré" doit présenter des grains de diamètres différents, permettant de limiter les vides, et donc d'éviter le surdosage en liant pour combler ceux-ci. En effet, un dosage trop riche en liant, peut provoquer un retrait important et des risques de micro-fissuration (faïençage).

Le sable utilisé pour réaliser des mortiers d'enduit doit :

- comporter une courbe granulométrique répartie (granulats de taille différente) : les enduits sont réalisés avec des sables dont la courbe granulométrique idéale est comprise entre 0,3 mm et 15 mm.



Dans le bâti traditionnel on observe des sables plus grossiers :

Il conviendra donc de faire des essais. A l'inverse, des sables trop fins et un dosage important entraînent du retrait, ils sont donc à utiliser avec prudence et sur de faibles épaisseurs. On les associera avec des chaux aériennes permettant un resserrage successif de l'enduit. Dans tous ces cas, des essais de convenance sont à réaliser.

- être propre : les sables ne doivent pas comprendre plus de 5 % d'éléments très fins comme les argiles, terre végétale, charbons.

- être inerte : le sable utilisé doit être chimiquement inerte. Il faut éviter tous les sols comportant des sels, des déchets organiques. Dans le cas de sable peu sûr, il sera nécessaire de réaliser des tests de convenance, notamment dans le cas de sable de mer.

- être homogène : pour la réalisation d'un enduit, et afin d'obtenir une bonne homogénéité sur l'ensemble des zones traitées, un approvisionnement global et unique du chantier doit être recherché.

Le sable d'oued choisit est lavé sur le tamis 80  $\mu\text{m}$  remonté du tamis 3.15 mm, le refus de ce dernier est rejeté.

### **3.2.B Tuf**

C'est le nom donné au sable d'arène ou terre minérale, c'est la roche désagrégée que l'on trouve sous la couche superficielle de terre végétale. Il colore le mortier, ce que ne peut donner un sable de rivière ou un sable de carrière lavé ou autrement débarrassé de ses fines. La coloration obtenue est d'autant plus vive que la chaux est peu hydraulique. Elle varie beaucoup selon le terroir d'origine du tuf et procure leur belle qualité aux enduits réalisés à la chaux aérienne.

Le tuf extrait des tufières est plus ou moins gras selon sa teneur en fines, sachant que la teneur souhaitable de fine est de l'ordre de 15 % (DTU 26-1) on peut faire quelques correction en usant d'un sable.

### 3.2.C Caractéristiques du sable utilisé dans ces formulations

- Courbe granulométriques : NF P 18 560

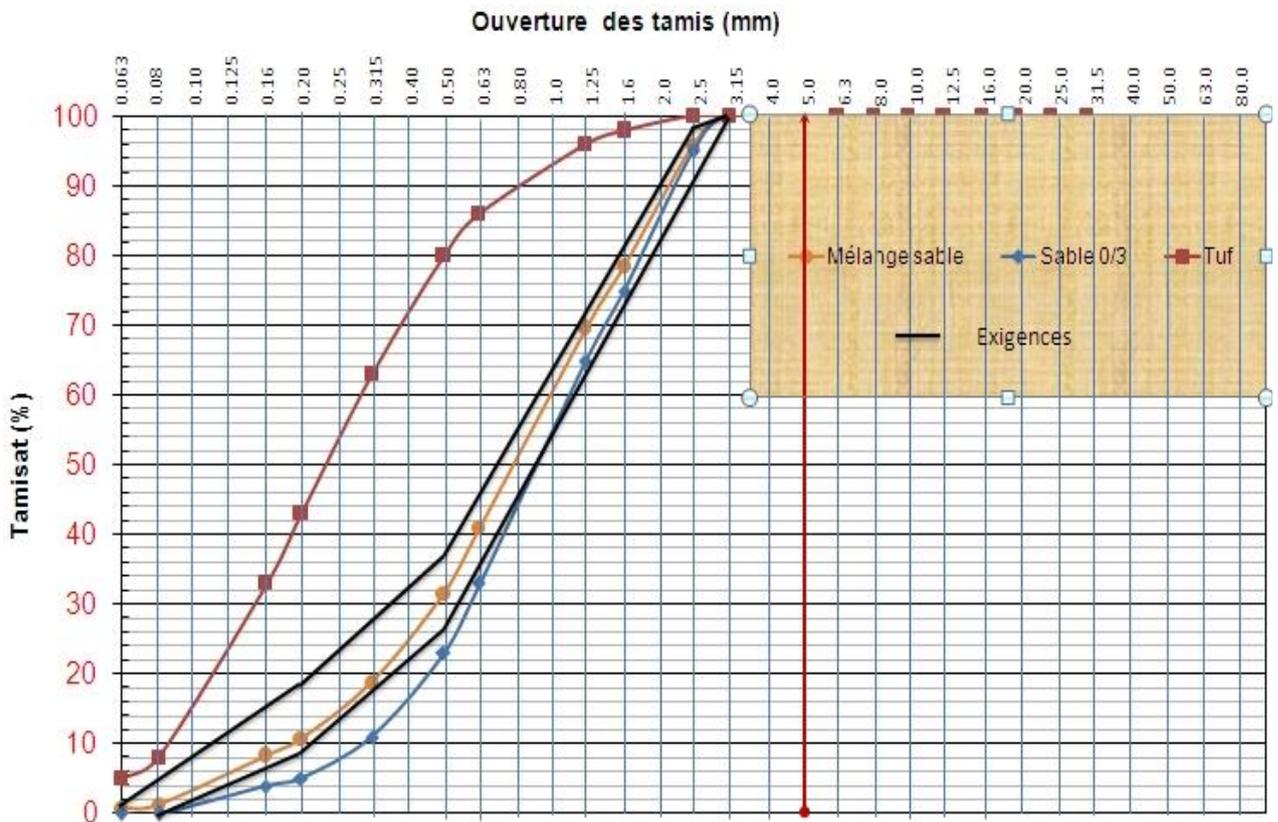


Fig.VI.2 Analyse granulométrique et courbe du mélange

La courbe de mélange entre bien dans le faisceau déterminé par la norme concernant les sables utilisés dans les mortiers.

- **Module de finesse du mélange du sable**

Le module de finesse du sable est : 2.92

Le module de finesse du tuf est : 1.22

Le module de finesse du mélange est : 2.67

Ce qui nous donne un sable moyen.



- **Propreté du mélange sable et tuf : NF P 18 598**

La propreté est déterminée par l'équivalent du sable, du tuf ainsi que du mélange :

$$E_{sp} \text{ sable} = 92 \%$$

$$E_{sp} \text{ tuf} = 74 \%$$

$$E_{sp} \text{ mélange} = 86 \%$$

Le sable étant lavé, sa propreté satisfait largement aux exigences ainsi que le tuf utilisé et par conséquent le mélange.

### **3.3 Eau : NFP 18.303**

L'eau rentre dans la composition des mortiers afin de rendre plastique les mélanges poudreux, de permettre la carbonatation des chaux par dissolution du gaz carbonique, de permettre la prise des chaux hydrauliques. L'eau doit être propre (norme NFP 18 303). Il est conseillé d'utiliser une eau potable. Dans le cas contraire, il convient d'être attentif à ne pas utiliser les eaux chargées en sels (sulfates, eaux résiduelles...) ou acides.

L'eau utilisée dans ces formulations est une eau potable du robinet.

### **3.4 Adjuvants**

Certains produits appelés "adjuvants" peuvent être incorporés au mortier dans des quantités très faibles ( $\leq 1 \%$  du poids de liant) afin d'en améliorer les propriétés :

- **Amélioration des propriétés des mortiers**

Les adjuvants utilisés peuvent améliorer la tenue, la dureté, l'entraînement d'air, les propriétés hydrofuges du mortier.

- **Amélioration des propriétés de mise en œuvre**

Les adjuvants utilisés peuvent améliorer l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau, le caractère mouillant. Ces adjuvants peuvent être des produits traditionnels ; il convient cependant de réaliser des essais préalablement et de vérifier la non-dégradation des propriétés des mortiers.

Pour cette étude on a utilisé un super-plastifiant haut réducteur d'eau à base de poly-carboxylates modifiées afin de diminuer la quantité d'eau nécessaire tout en gardant la même ouvrabilité. (Fiches techniques en annexe)

## 4. Étude des mortiers

### 4.1 Compositions des mortiers

Les mélanges de base sont composés par du sable 0/3, du tuf (dont le pourcentage est calculé de façon à avoir une distribution granulométrique continue du mélange sable + tuf), de la chaux aérienne CL90 ainsi qu'une série de mélange à base de chaux hydraulique NHL 2 et une autre à base de NHL 5, la dernière série est à base de ciment CPJ-CEM II 32.5 et 42.5.

	Composition en volume	CL 90 (%)	NHL 2 (%)	Sable (%)	Tuf (%)
CA	CA 01	33		57	10
	CA 02	23	10	57	10
	CA 03	15	17	58	10
	CA 04	5	25	60	10
	CA 05		30	60	10

	Composition en volume	CL 90 (%)	NHL 5 (%)	Sable (%)	Tuf (%)
CB	CB 01	23	10	57	10
	CB 02	15	17	58	10
	CB 03	5	25	60	10
	CB 04		30	60	10

	Composition en volume	CPJ-CEM II 32.5 (%)	CPJ-CEM II 42.5 (%)	CL 90 (%)	NHL 2 (%)	Sable (%)	Tuf (%)
CC	CC 01	33				57	10
	CC 02		33			57	10
CD	CD 01	22		11		57	10
	CD 02	22			11	57	10
	CD 03		22	11		57	10
	CD 04		22		11	57	10

Tab.VI.1 Les différentes compositions étudiées

Ces compositions ont par la suite été ajustées pour avoir la consistance voulue en fonction de la quantité d'eau et d'adjuvants ajoutés.

### 4.2 Mesure de la consistance des mortiers

#### NF P15-437

La consistance ou l'étalement du mortier est mesuré par la table à secousses: le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue.

L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_f - D_i}{D_i}$$

Avec  $D_f$  = diamètre final et  $D_i$  = diamètre initial.

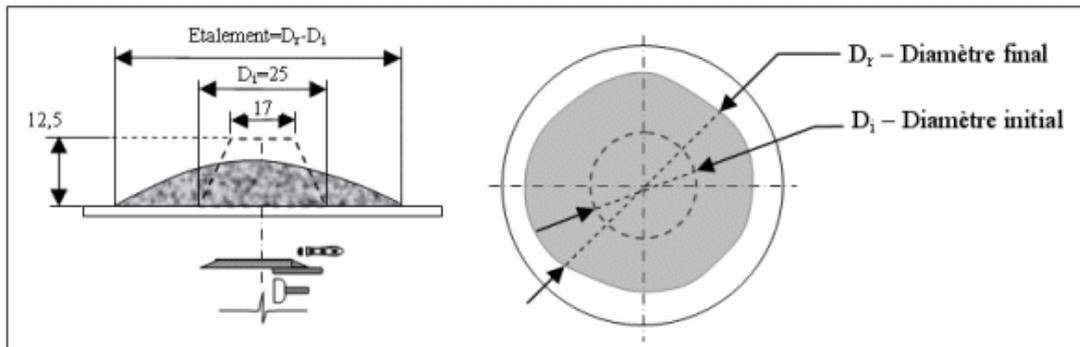


Fig.VI.3 Table à secousses

Pour les différentes compositions étudiées, on a mesuré l'étalement avec un E/L constant (E/L=0.5) en variant le dosage en super-plastifiant (ce dosage à été calculé en extrait sec).

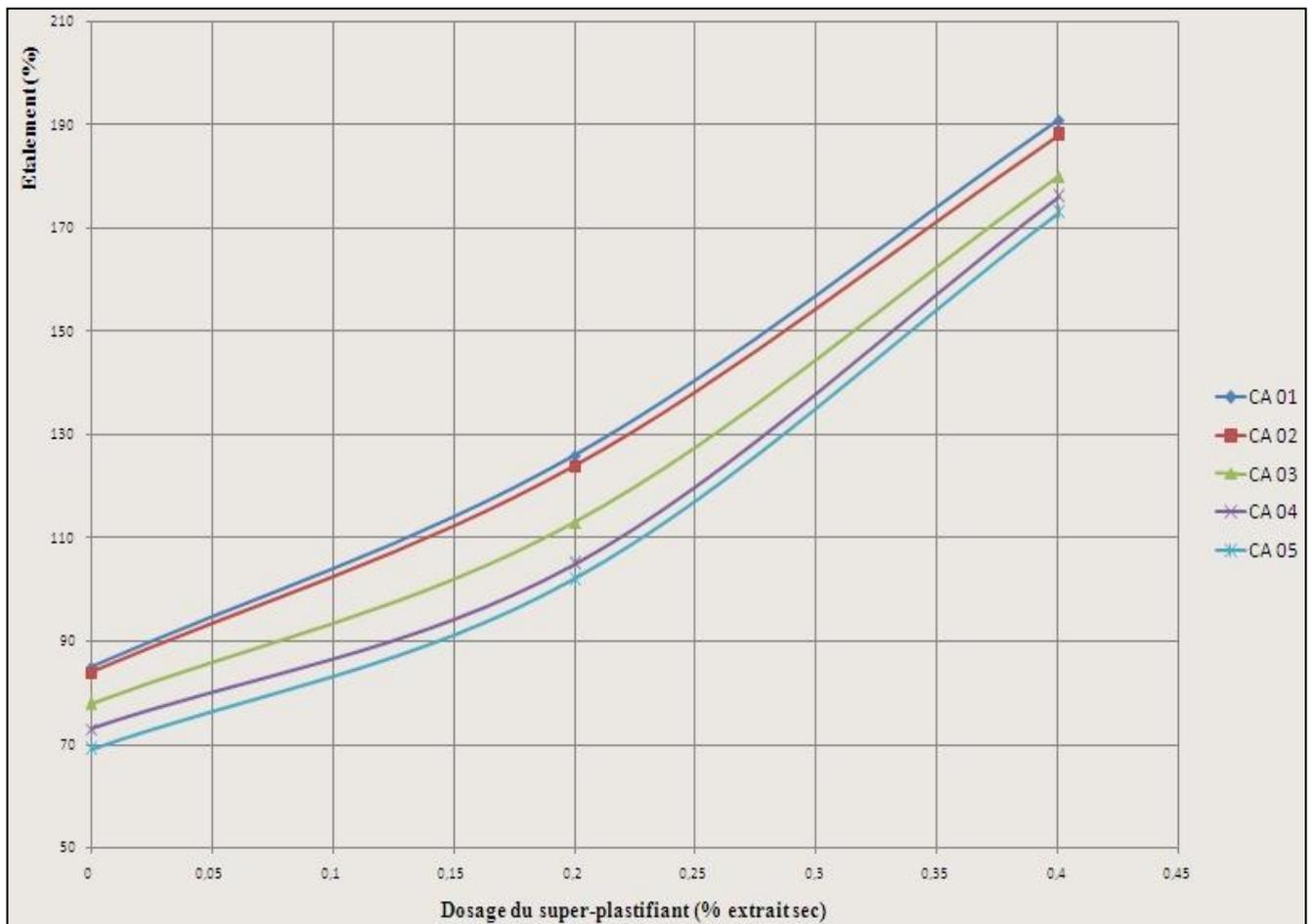


Fig.VI.4 Étalement en fonction du pourcentage du super-plastifiant (extrait sec) pour les différentes compositions CA

Les résultats obtenus ont été illustrés schématiquement sur les graphes ci-dessus (courbe d'étalement pour les différentes compositions en annexe):

Ces graphes nous montrent une nette augmentation de l'étalement et ainsi de l'ouvrabilité du mortier en fonction du pourcentage de super-plastifiant, et cela pour toutes les compositions étudiées.

### 4.3 Mesure du temps de prise

#### NF EN 480-2

Les essais de prise peuvent être effectués sur mortier. Lorsque L'essai a lieu sur mortier normal, il est gouverné par la norme NF P15-431. Lorsqu'il s'agit d'un adjuvant, l'essai obéit à la norme NF EN 480-2.

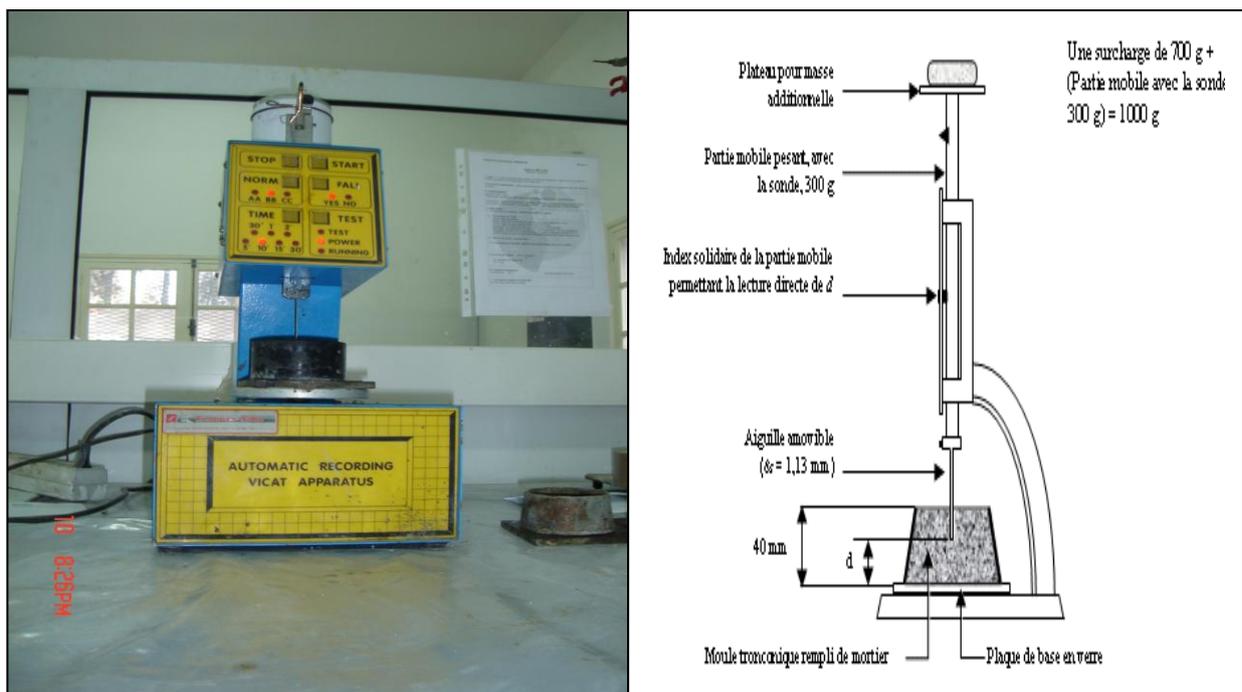


Fig.VI.5 Appareil Vicat

Pour la mesure du temps de prise on a choisit une seule composition par série (qui est représentative de la série), les résultats obtenus ont été reportés sur le tableau suivant :

Tab.VI.2 résultats des mesures des temps de prise

Composition étudiée (Adjuvanté)	Temps de prise	
	Début de prise	Fin de prise
CA (CA 01)	7h	12 h
CB (CB 04)	2 h 40 mn	5 h 45
CC (CC 01)	2 h 30 mn	3 h 45
CD (CD 01)	2 h 40 mn	3 h 55

La chaux CL 90 ayant une prise aérienne provoque l'augmentation du temps de prise. Pour les autres mortiers à base de liants hydrauliques ils ont un temps de prise décroissant selon le pourcentage et l'hydraulicité du liant utilisé.

#### 4.4 Mesure de la résistance à la flexion et à la compression

##### 4.4.A Résistance à la flexion

Les échantillons (de briques et de mortiers prélevés dans la villa B) étant ramenés à une forme standard (4 cm x4 cm x16 cm), ils ont été soumis à des essais de flexion. La résistance à la flexion est déterminée par chargement en trois points jusqu'à la rupture.

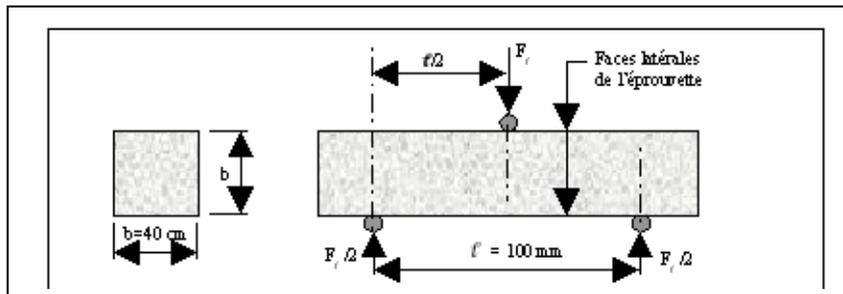


Fig.VI.6 Essai de flexion



Si  $F$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$\text{Formule : } f = 1.5 \frac{Fl}{bd^2}$$

Où :

$f$  : résistance à la flexion en  $\text{N/mm}^2$

$b$  et  $d$  : la longueur et l'épaisseur peuvent être considérées comme les dimensions intérieures du moule, en mm

$F$  : charge maximale appliquée en flexion, en N

$l$  : distance entre axes des rouleaux porteurs, en mm

Les résultats obtenus pour les échantillons prélevés dans la villa B sont reportés sur le tableau suivant :

*Tab.VI.3 résultats des résistances à la flexion*

N° Echantillon	Brique ( $\text{N/mm}^2$ )	Mortier ( $\text{N/mm}^2$ )
1	34	12.2
2	42	10.1
3	55	14.6
Moyenne	44	12.3

Pour les compositions étudiées, un dosage en super-plastifiant de 0.4 % en extrait sec a été choisit en ramenant l'étalement à 100 % (diminution de E/L jusqu'à 0.3) pour en tirer le meilleur des qualités du mortier.

Les résultats obtenus sont schématisés comme suite (courbes des résistances à la flexion en annexe):

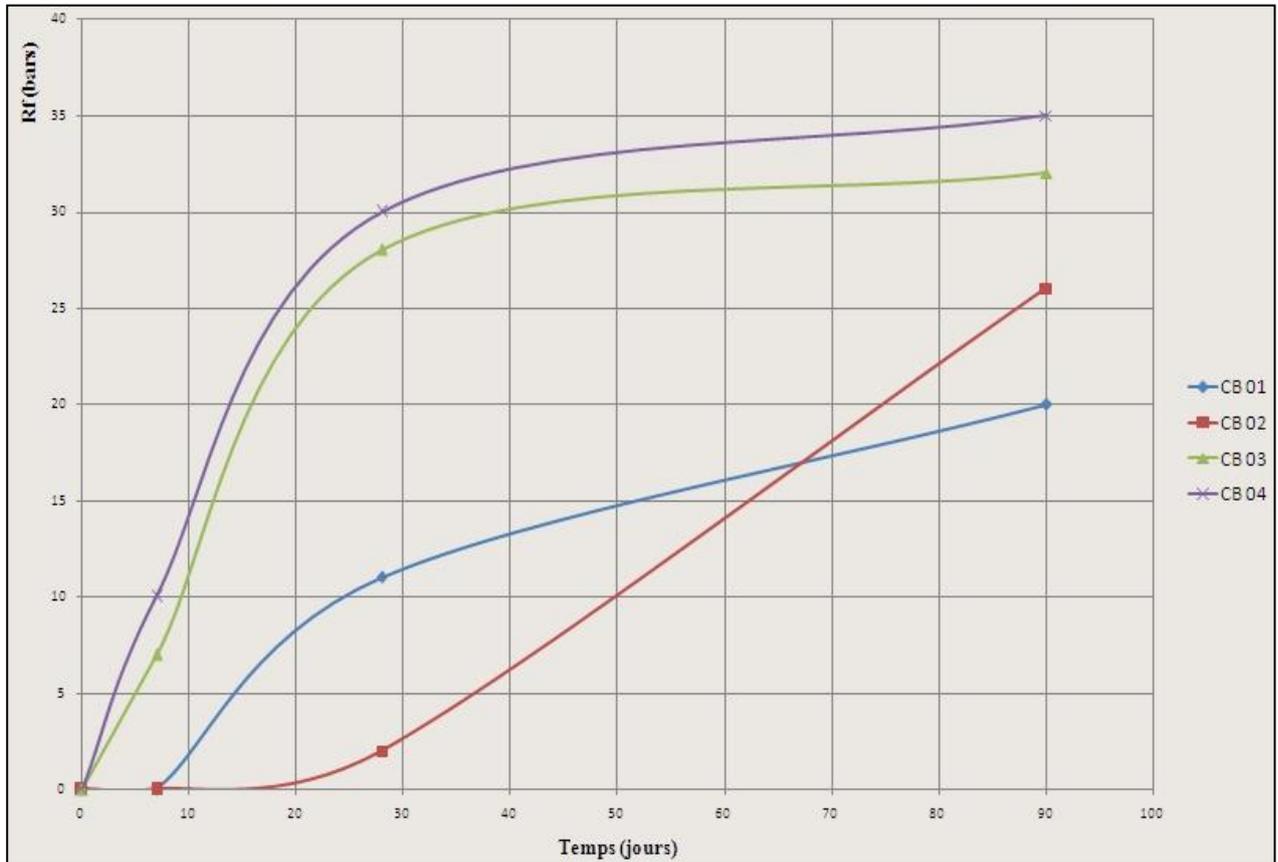


Fig.VI.7 Résistances à la flexion en fonction du temps des compositions CB

#### 4.4.B Résistance à la compression

Les échantillons utilisés pour les essais de compression sont les fragments obtenus après les essais de flexion sauf pour les mortiers prélevés dans la villa B où on a du utilisé de nouveaux échantillons.

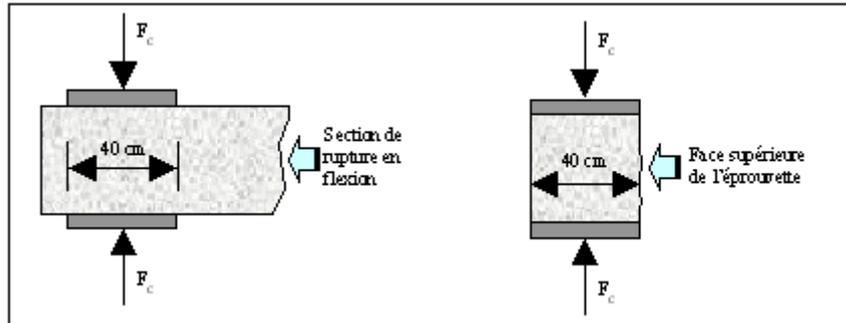


Fig.VI.8 Essai de compression

Formule :  $R = \frac{F_c}{A}$

Où :

R : résistance en compression en N/mm<sup>2</sup>

F<sub>c</sub> : charge maximale appliquée en compression, en N

A : section transversale en mm<sup>2</sup>.

Les résultats obtenus pour les échantillons prélevés dans la villa B sont reportés sur le tableau suivant :

Tab. VI.4 résultats des résistances à la compression

N° Échantillon	Brique (N/mm <sup>2</sup> )	Mortier (N/mm <sup>2</sup> )
1	52	17
2	30	10
3	41	12
Moyenne	41	13

Les résistances obtenues que se soit pour les briques ou les mortiers prélevés dans la villa B montrent une grande divergence des valeurs due à l'état des maçonneries ainsi qu'au non uniformité de qualité.

Les résistances à la compression des compositions de mortier étudiées ont servies pour tracer les courbes suivantes (courbes des résistances à la compression en annexe):

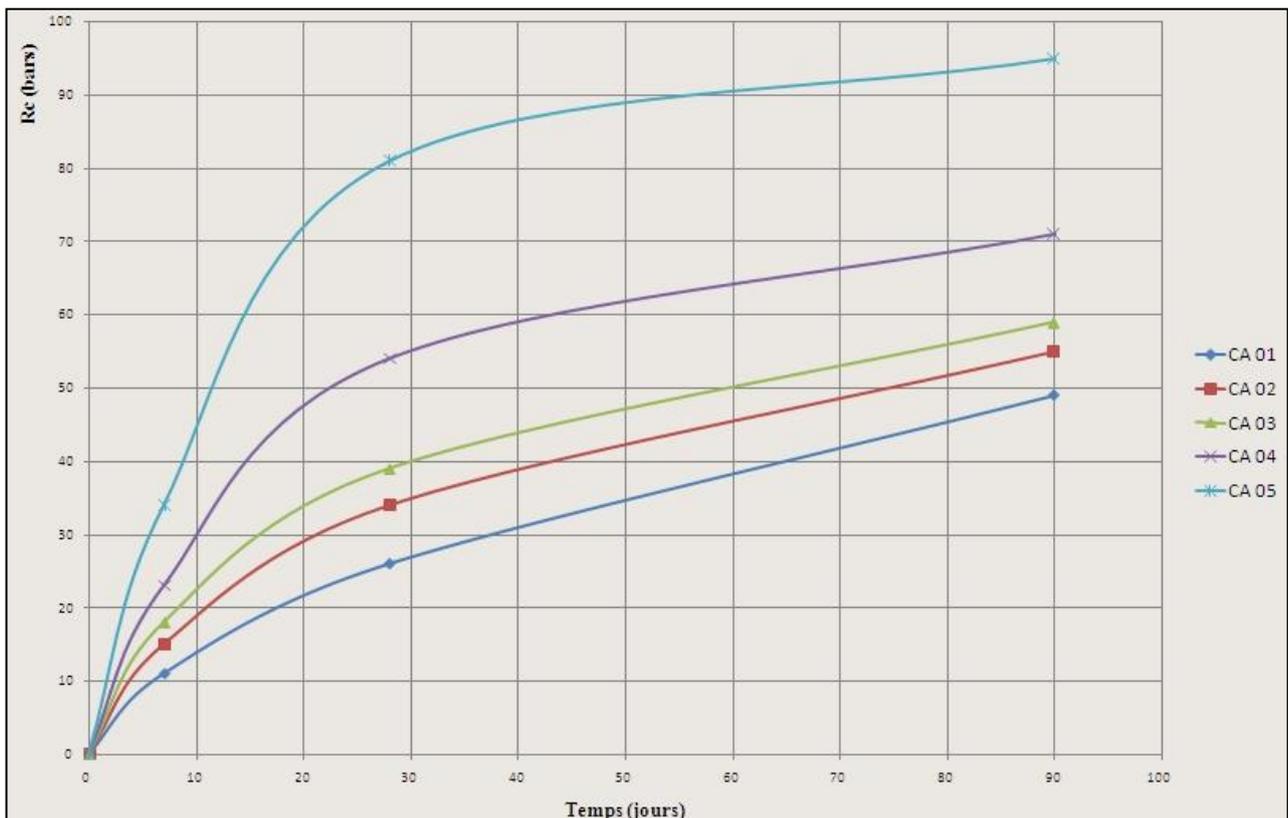


Fig.VI.9 Résistances à la compression en fonction du temps des compositions CC et CD

Les résistances mécaniques des mortiers étudiés évoluent en fonction du temps pour atteindre leurs valeurs maximales au bout de 90 jours. Cependant, la majorité des mortiers arrivent à plus de 80% de cette résistance avant les 28 jours.

Les mortiers à base du CPJ-CEM II 42.5 ont la plus grande résistance à la compression suivi de ceux à base du CPJ-CEM II 32.5 puis ceux à base de chaux hydrauliques (la NHL 5 ensuite la NHL 2) et enfin ceux à base de la CL 90. Ces mortiers ont une prise hydraulique ainsi qu'une prise aérienne suivant le pourcentage de chaux aérienne qu'ils contiennent, cette dernière évolue moins longtemps dans le temps.

Si la différence des résistances à la compression est nette entre les différentes compositions en faveur de ceux à base de liants hydrauliques, les résistances à la flexion sont elles équivalentes.

### 4.5 Mesures du retrait

#### NF P 15-433

La mesure du retrait est faite suivant la norme citée ci-dessus :

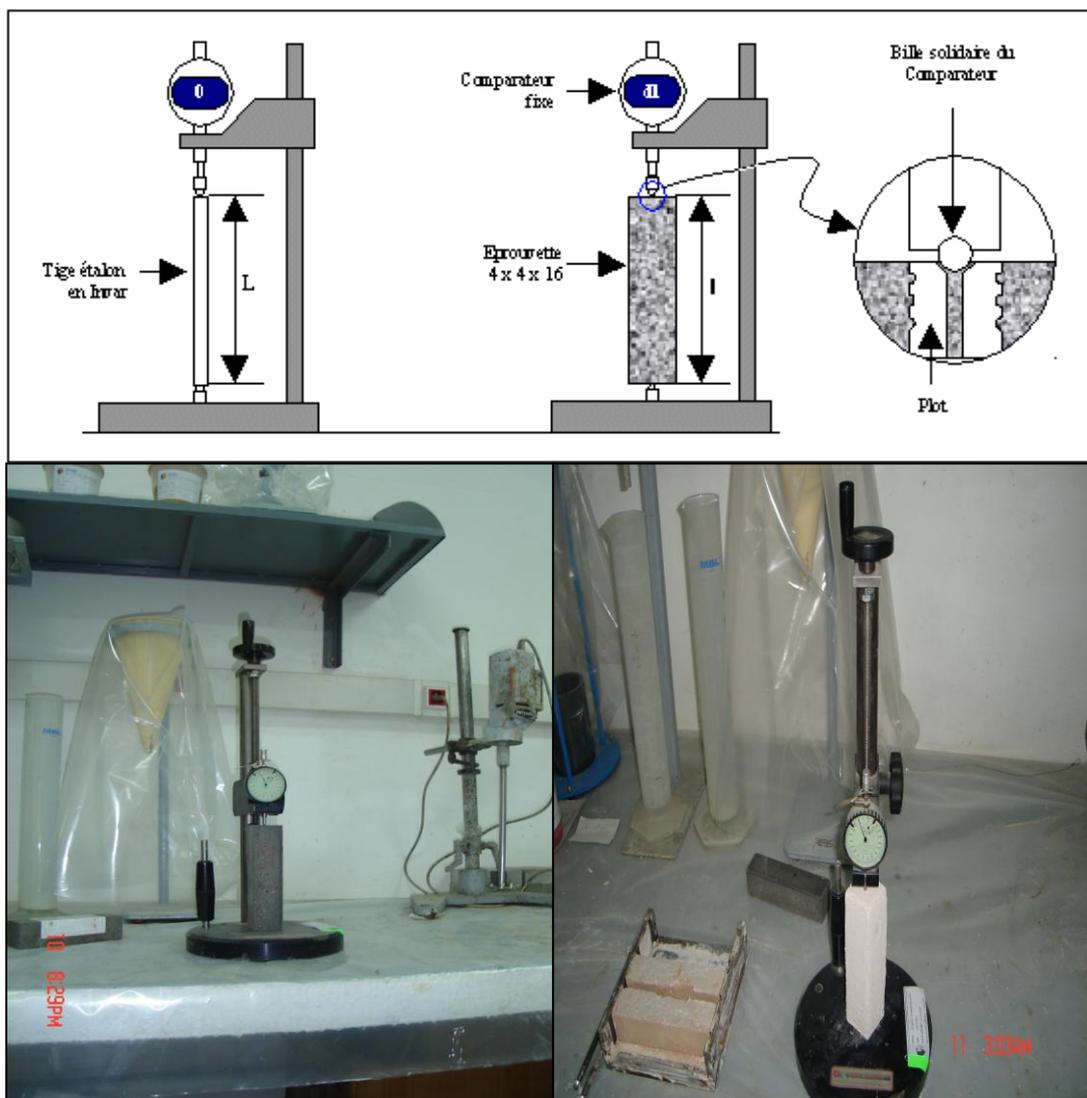


Fig.VI.10 Détermination du retrait des éprouvettes

Pour les mesures de retrait on a choisit une seule composition pour chaque série, les résultats obtenus ont été reportés sur le tableau suivant :

*Tab.VI.5 résultats des retraits enregistrés*

Composition étudiée	Retrait (adjuvanté)	Retrait (sans adjuvant)
CA (CA 01)	0.006	0.4
CB (CB 04)	0.007	0.6
CC (CC 01)	0.014	0.9
CD (CD 01)	0.008	0.7

Ces résultats nous font remarquer que les chaux aériennes et hydrauliques ont un retrait moins important que le ciment ce qui a permis ainsi à la chaux de diminuer le retrait en l'ajoutant dans le mortier batard (CD 01). L'ajout de super-plastifiant diminue lui aussi le retrait suite à la diminution de la quantité d'eau nécessaire au gâchage

## 4.6 Imbibition et porosité capillaire

### AFNOR B10-613

Pour observer l'influence du joint de mortier sur la continuité hydraulique, des pièces cylindriques de brique de (D=40 mm et H=80 mm) ont été confectionnées à l'aide d'une carotteuse puis coupées en deux parties identiques suivant la hauteur (H=40 mm), elles ont par la suite été rassemblées grâce aux différents mortiers confectionnés (5 mm d'épaisseur). Ces échantillons (après un murissement de 90 jours) sont placés dans une cuve hermétique au fond de laquelle le niveau d'eau distillée est maintenu constant pendant toute la durée du test. A intervalles de temps croissant, les échantillons sont pesés et la hauteur de la grange capillaire est mesurée au pied à coulisse.

Les coefficients d'imbibition A et B correspondent aux pentes des courbes de prise de masse et d'ascension du front capillaire en fonction de la racine carrée du temps :

$$h = B\sqrt{t} \quad \text{et} \quad \frac{dm}{s} = A\sqrt{t}$$

Si le front d'imbibition est homogène (bien horizontal), les deux coefficients d'imbibition A et B peuvent être reliés à la porosité accessible à l'eau par montée capillaire  $N_c$  qui correspond au volume qu'occupe l'eau par rapport au volume du matériau durant l'imbibition par la relation :

$$A = \rho_{\text{eau}} B N_c$$

En traçant les ascensions capillaires et les prises de masse en fonction de la racine carrée du temps on obtient les courbes suivantes (courbes d'imbibition capillaire en annexe) :

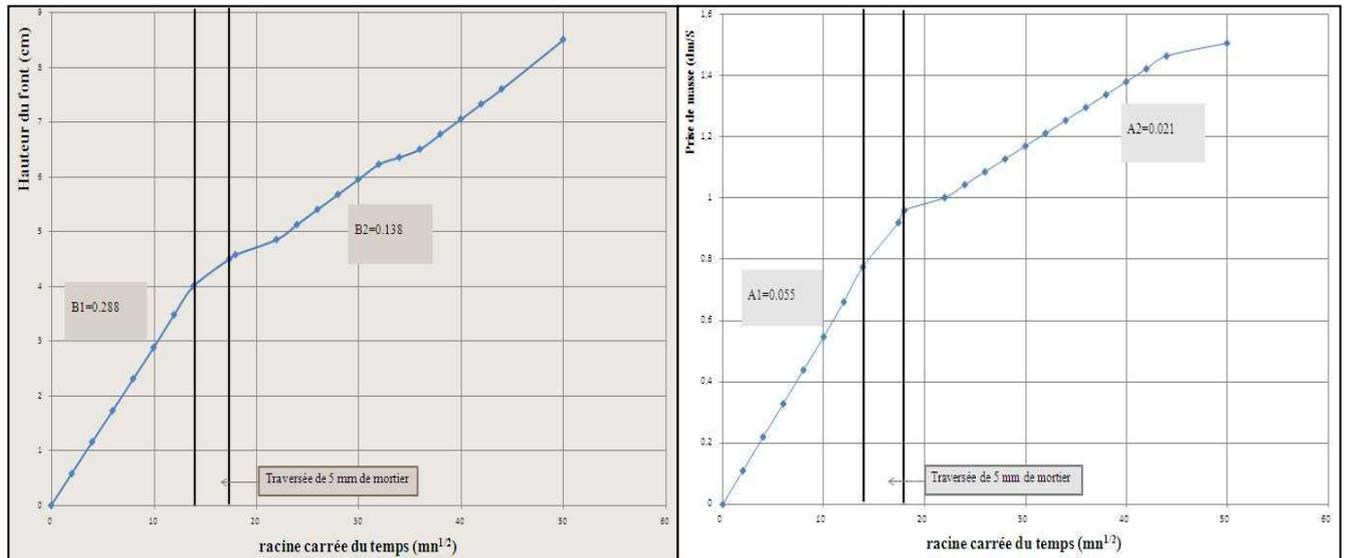


Fig.VI.11 Exemple des résultats obtenus lors des essais d'imbibition (composition CB 03)

Tab.VI.6 Tableau récapitulatif des différents résultats obtenus

Compositions des mortiers	A1 ( $g.cm^2.min^{1/2}$ )	B1 ( $cm.min^{1/2}$ )	A2 ( $g.cm^2.min^{1/2}$ )	B2 ( $cm.min^{1/2}$ )	Porosité capillaire	
					1 <sup>ère</sup> zone	2 <sup>ème</sup> zone
CA 01	0.054	0.299	0,045	0.248	18.06	18.01
CA 02	0.055	0.292	0,030	0.184	18.39	16.02
CA 03	0.051	0.281	0,024	0.156	18.15	15.23
CA 04	0.072	0.306	0,024	0.151	23.53	16.03
CA 05	0.054	0.298	0,017	0.128	18.12	13.19
CB 01	0.060	0.301	0,032	0.171	19.93	18.53
CB 02	0.063	0.283	0,030	0.146	22.26	20.42
CB 03	0.055	0.288	0,021	0.138	19.10	15.26
CB 04	0.060	0.302	0,014	0.093	19.87	14.78
CC 01	0.050	0.280	0,0002	0.010	17.86	02.33
CC 02	0.063	0.302	0,0002	0.010	20.86	02.02
CD 01	0.056	0.295	0,0038	0.044	18.98	08.54
CD 02	0.065	0.310	0,0023	0.032	20.97	07.22
CD 03	0.054	0.284	0,0031	0.039	19.01	08.03
CD 04	0.064	0.304	0,0019	0.029	21.05	06.61

Les résultats obtenus nous montrent l'existence d'une dispersion dans les propriétés d'imbibition entre les échantillons de briques eux mêmes. Néanmoins, l'objectif étant d'observer l'influence du joint de mortier sur la continuité hydraulique, c'est la modification engendrée entre les parties de l'échantillon cylindrique qui nous intéresse.

L'eau commence à monter dans la première zone de la brique traçant une droite qui témoigne de l'homogénéité du matériau. On observe ensuite une discontinuité plus ou moins aigue selon la composition du mortier étudiée. La cinétique capillaire est de moins en moins forte suivant que le mortier contient plus de liant hydraulique ainsi que l'hydraulicité de ce dernier. En dépassant le joint de mortier on retrouve notre droite mais avec une cinétique moins forte, le joint de mortier ne laissant passer qu'une quantité restreinte d'humidité par rapport à celle qui aurait pu passer à travers la brique seule.

## *CHAPITRE VI :*

### *Modélisation et restitution de la villa*

1. Restitution de la villa b et choix des softwares
2. Modélisation
3. Habillage
4. Éclairage
5. Animation
6. Rendu
7. Diffusion

### **1. Restitution de la villa b et choix des softwares**

La restitution de la villa B du domaine Mahiédinne vise l'obtention d'une maquette virtuelle. La modélisation de cette dernière s'est faite en utilisant 3DS Max<sup>®</sup>. Le choix de cet outil s'est fait en se basant sur la multitude de possibilités qu'il offre concernant les méthodes de modélisation et d'animation 3D ainsi que l'alternative d'exporter sous divers formats.

Pour visualiser le résultat obtenu, plusieurs formats ont été choisis :

- Le format JPG, pour les images ;
- Le format AVI pour les animations ;
- Le format WRL, pour pouvoir diffuser sur internet;
- Le format SKP, permettant des visites virtuelles en utilisant Sketch Up Viewer qui est un software gratuit disponible sur internet.

Pour l'édition de texture 2D, on a utilisé Photoshop<sup>®</sup>.

### **2. Modélisation**

#### **2.1 Collecte des informations et documents relatifs à la restitution**

Pour la reconstitution on a eu recours à plusieurs documents :

- Des vidéos et des photos obtenues sur site (regroupées sur le CD accompagnant cette thèse) ;
- Des dessins et des schémas récoltés au sein de l'agence nationale d'archéologie et de protection des sites et monuments historiques ;
- Des images satellitaires obtenues grâce à Google Earth<sup>®</sup> qui ont permis de faire des mesures globales du site.

#### **2.2 Modélisation de la villa**

La modélisation de la villa B commence avec des mesures faites sur cette dernière grâce à Google Earth et donnant, sur la partie bâtie de la villa, une longueur  $L \approx 33$  m, une largeur maximale  $l \approx 17$  m pour un périmètre  $P \approx 97$  m et une superficie  $S \approx 340$  m<sup>2</sup> (pour les deux villas et le domaine ces dimensions sont  $L \approx 122$  m,  $l \approx 69$  m,  $P \approx 355$  m et  $S \approx 5590$  m<sup>2</sup>).

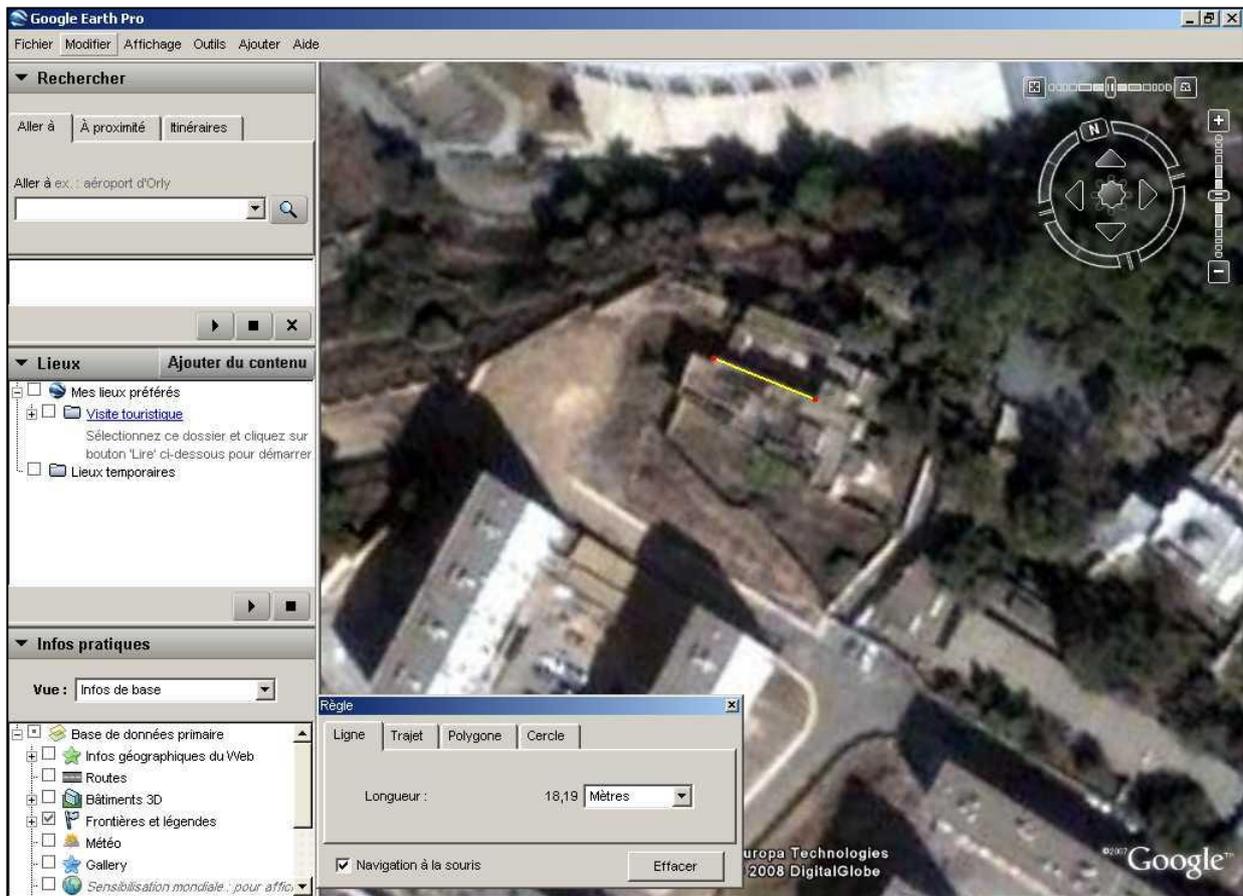


Fig VII.1. mesures faites à l'aide de Google Earth

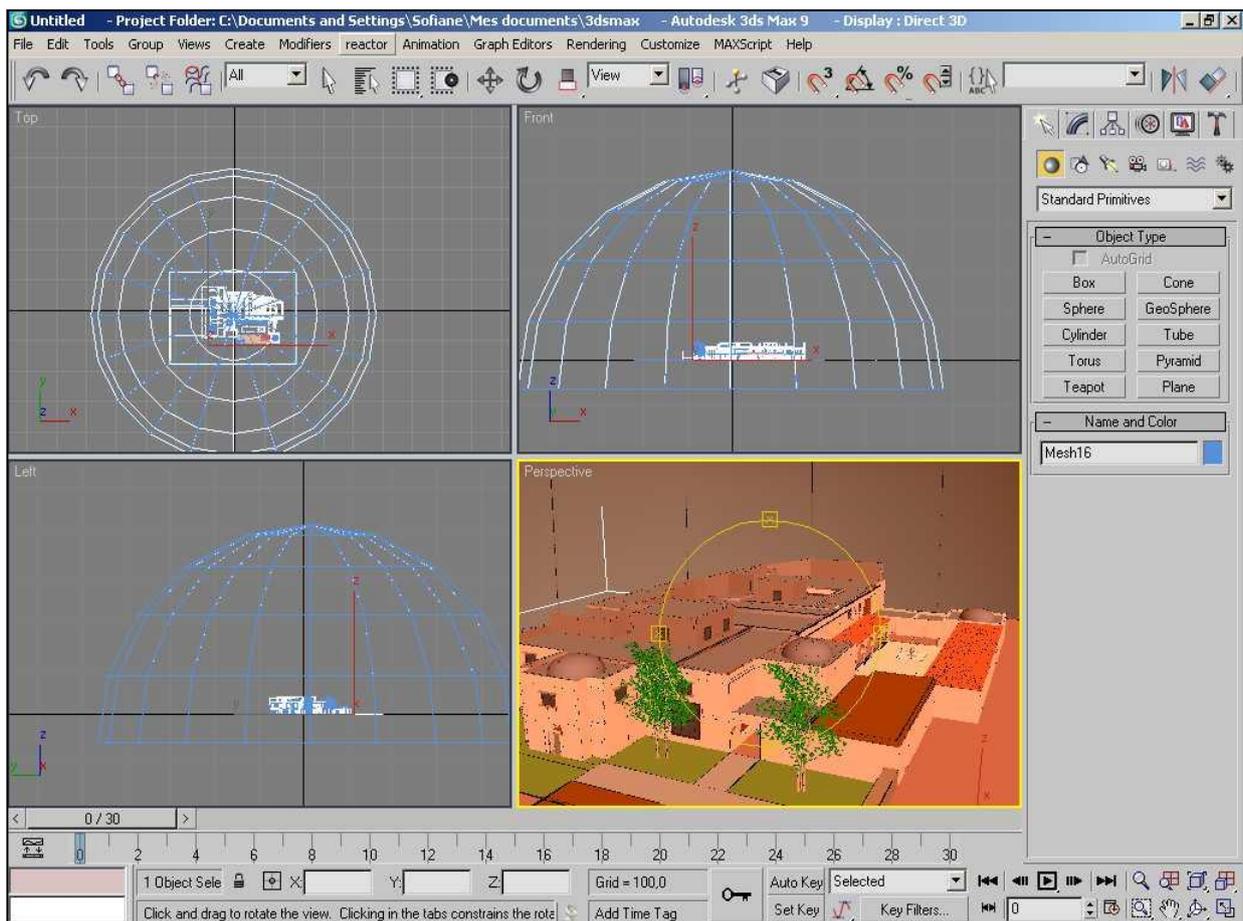
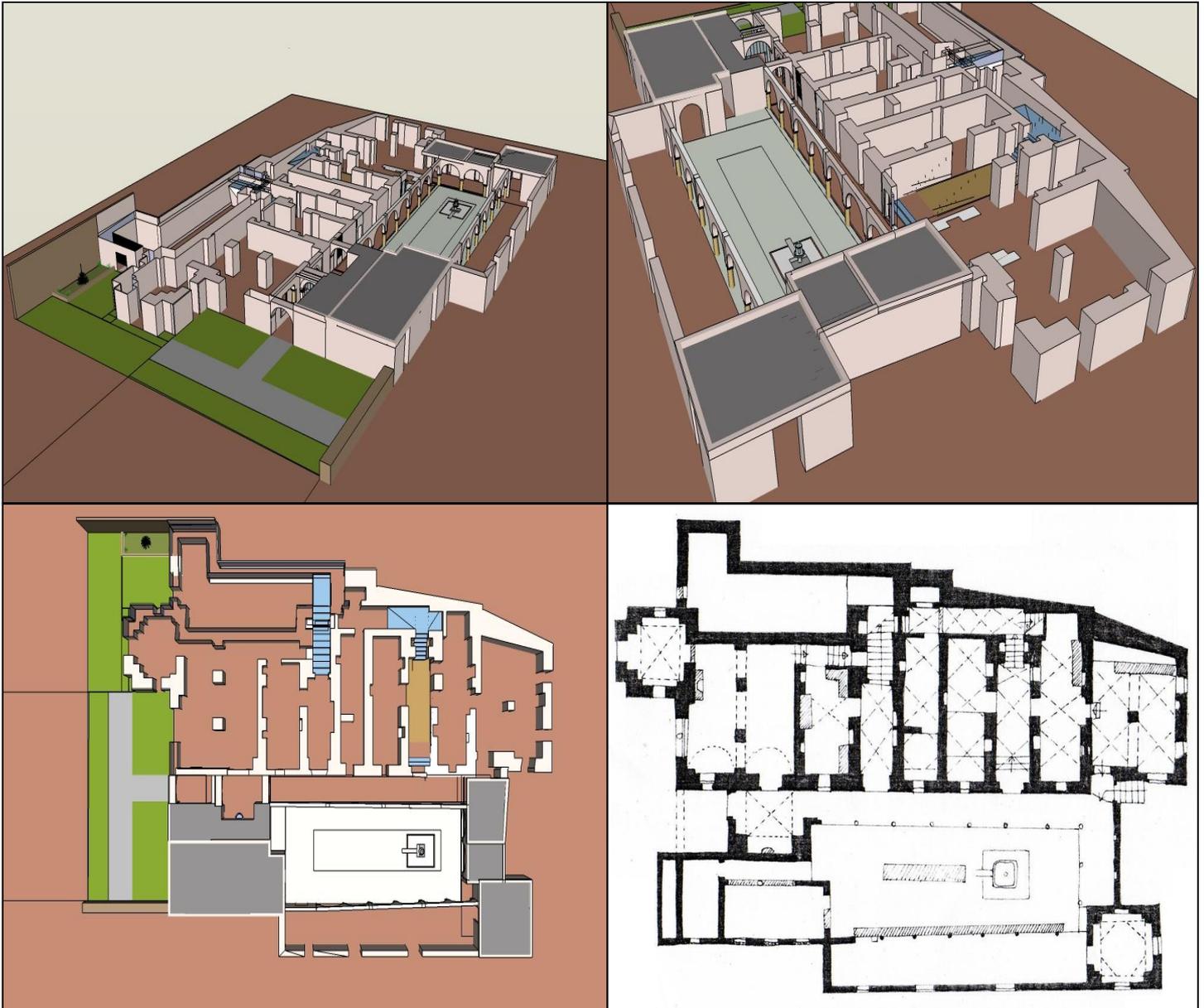


Fig. VII.2 modélisation de la villa en utilisant 3DS Max

• **Modélisation du Rez-de-chaussée**

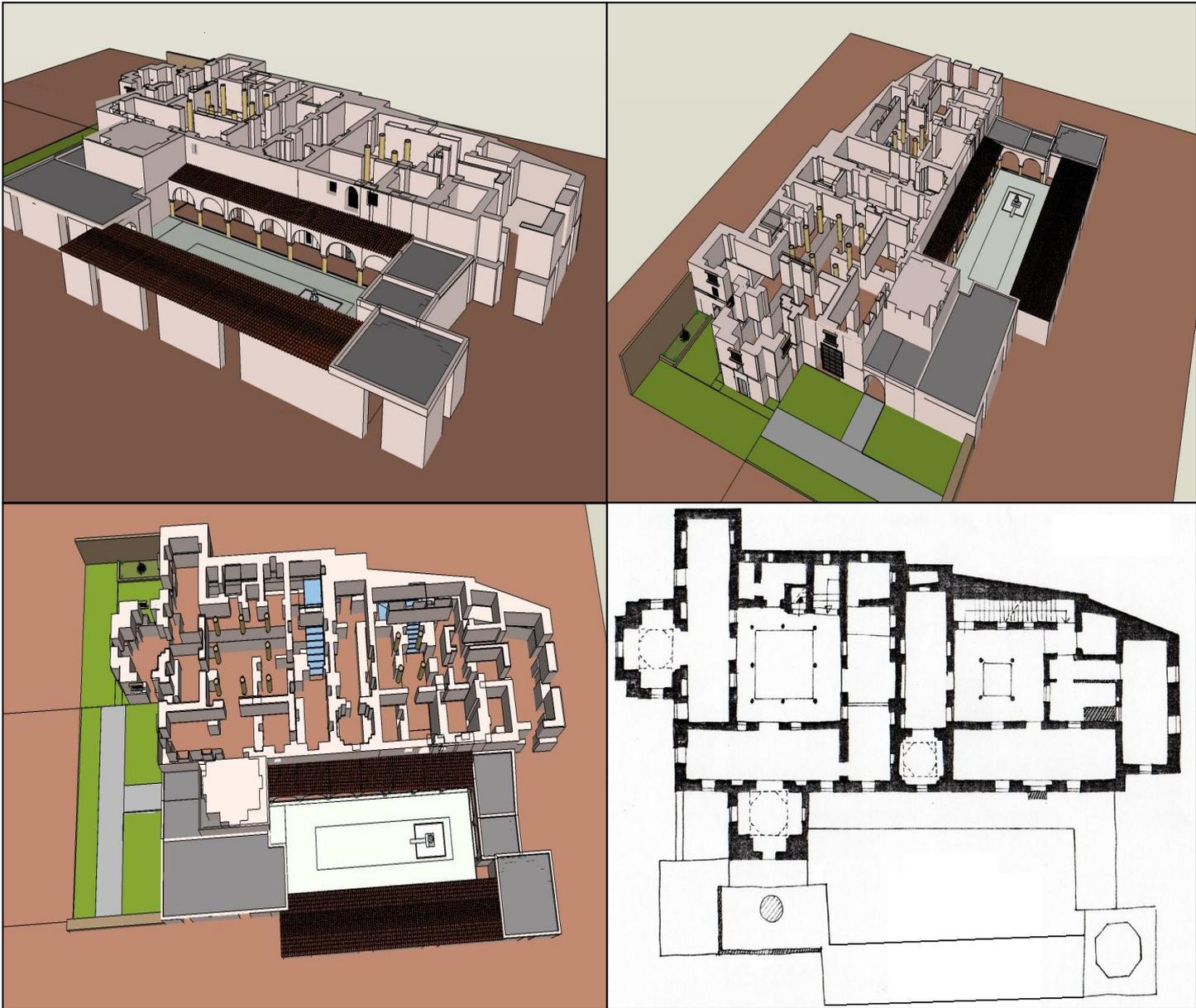
La modélisation du rez-de-chaussée s'est faite suivant le plan de ce dernier ainsi que les photos et vidéos faites sur site. Pour la création des géométries plusieurs commandes et techniques ont été utilisées en usant des primitives simples, étendues ou composées en leur appliquant les différents modificateurs disponibles dans l'outil utilisé.



*Fig.VII.3 Modélisation suivant le plan du rez-de-chaussée*

- **Modélisation du 1<sup>er</sup> étage :**

Pour la modélisation de l'étage, le plan de ce dernier a été utilisé. Plusieurs endroits n'ont pas pu être restitués virtuellement à cause de l'absence d'éclairage ou de lumière.



*Fig.VII.4 Modélisation suivant le plan du 1<sup>er</sup> étage*

• **Les arcades**

Les arcades ont été modélisées suivant le chaînage et les plans suivants prenant en compte les possibilités matérielles et la fluidité des visites par la suite :

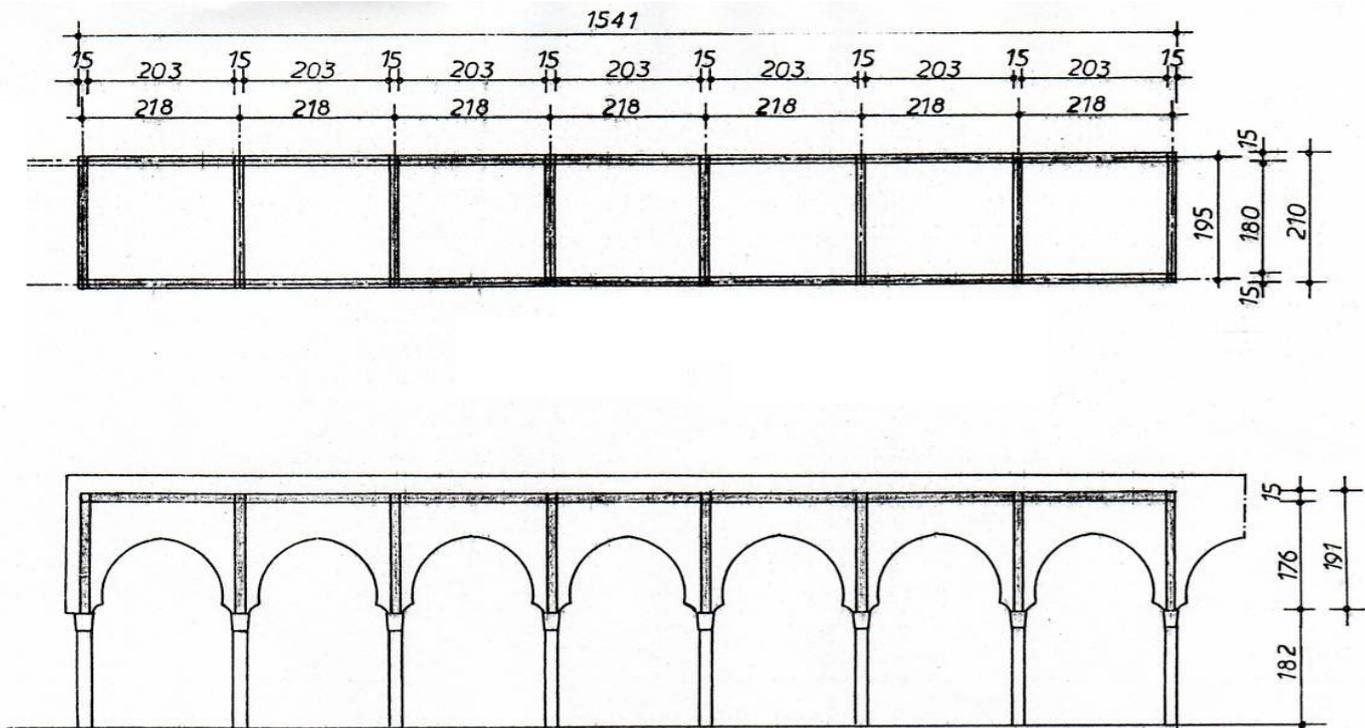


Fig.VII.5 Chainage du portique

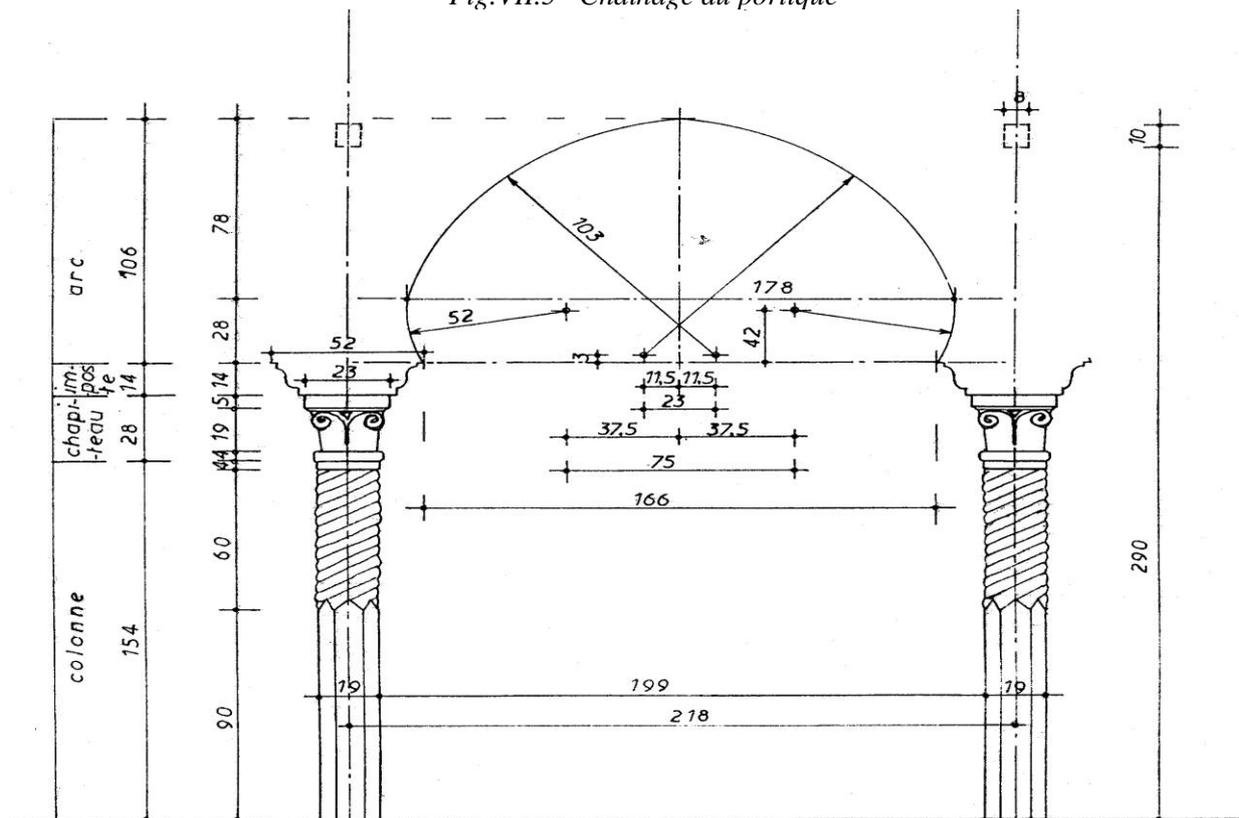
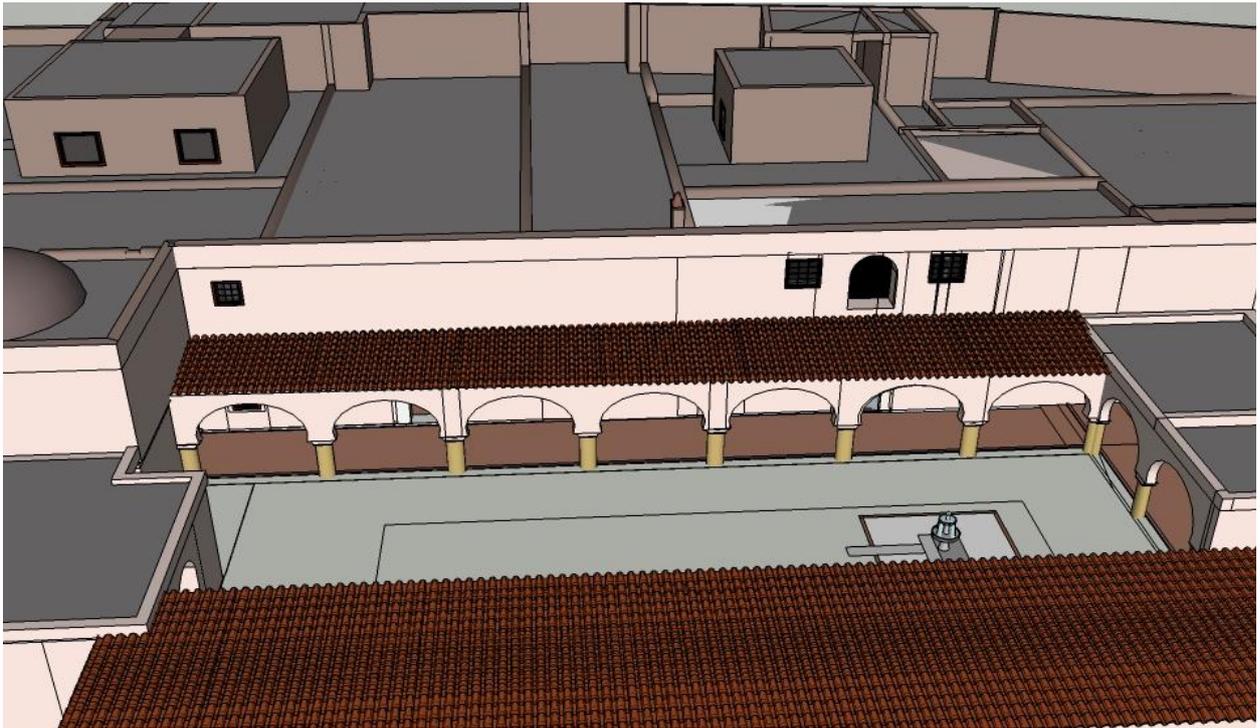


Fig.VII.6 Croquis des arcades et des chapiteaux



*Fig.VII.7 Modélisation des arcades*

- **Modélisation complète de la villa**

Le modèle final ou la maquette virtuelle présente un certain degré de réalisme qui est dicté par les possibilités et la puissance du matériel. La lenteur voir l'arrêt des visites virtuelles ainsi que des exportations sous divers formats ont conduit à la simplification voir la diminution du niveau du détail.

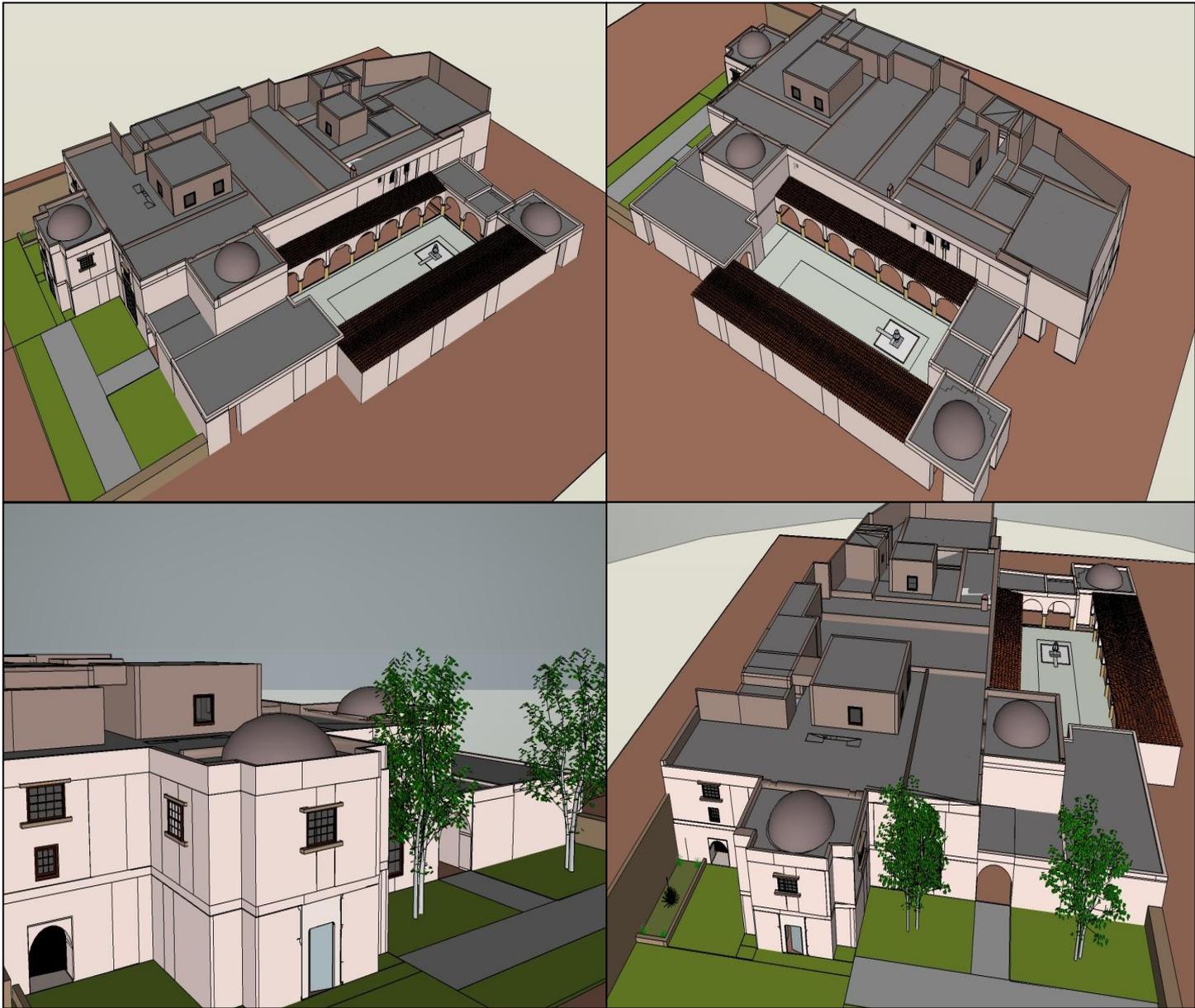


Fig.VII.8 *Modélisation complète de la villa*

### 3. Habillage

Pour habiller la scène, plusieurs textures ont été utilisées, sous divers formats : JPG ou PNG quand la transparence est recherchée. Dans certains cas et afin de diminuer le temps de calcul lors du rendu et des visites virtuelles, des textures seront utilisées au lieu de géométries complexes, ces textures sont sous format JPG, qui permet le meilleur compromis entre la taille du fichier (niveau de compression) et la qualité. Pour les textures où la transparence est recherchée, le format PNG a été utilisé.

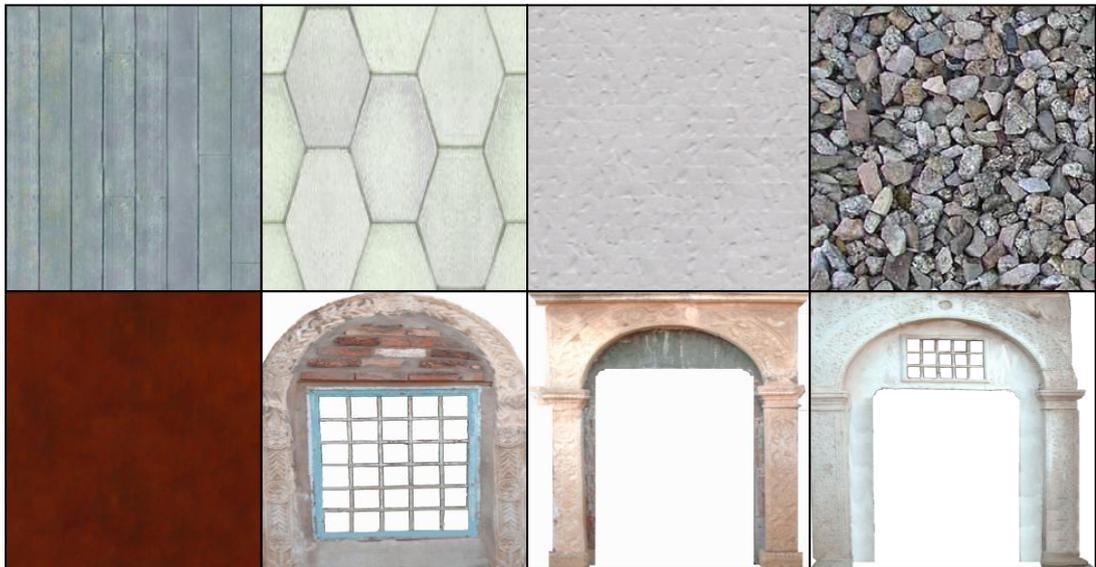


Fig.VII.9 Quelques textures utilisées lors de l'habillage du modèle de la villa

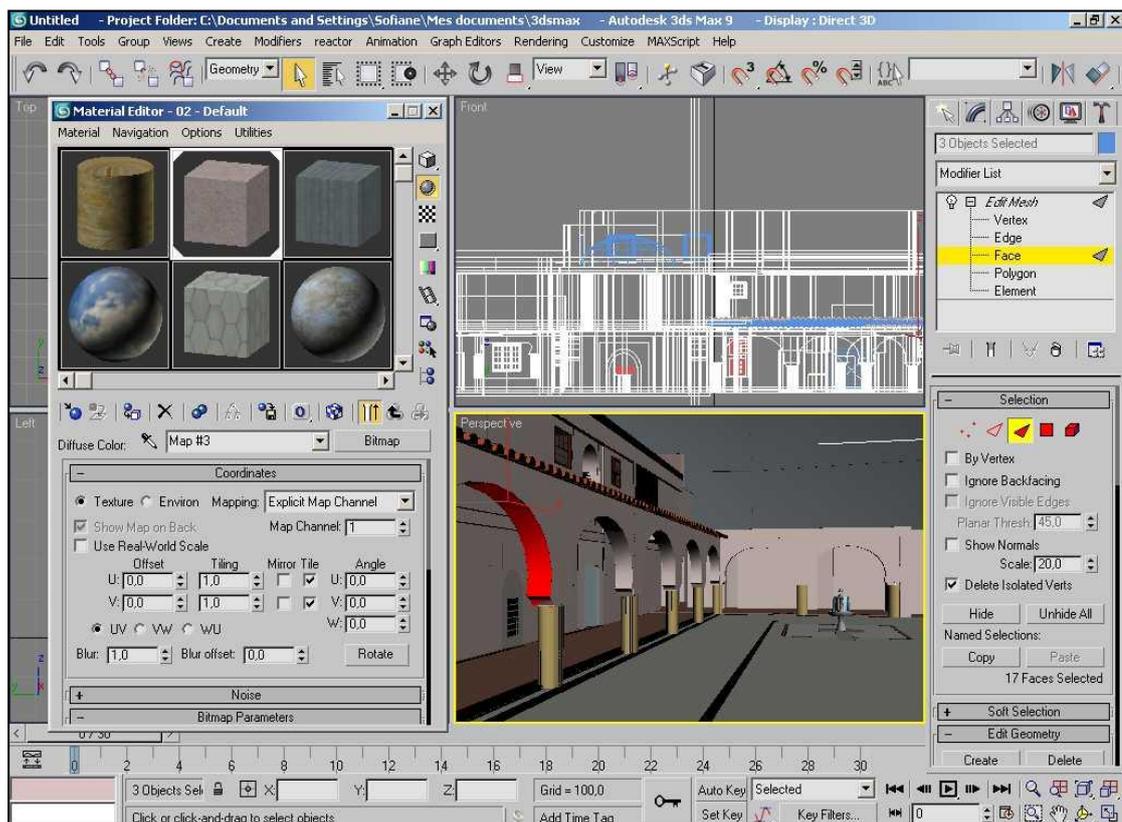


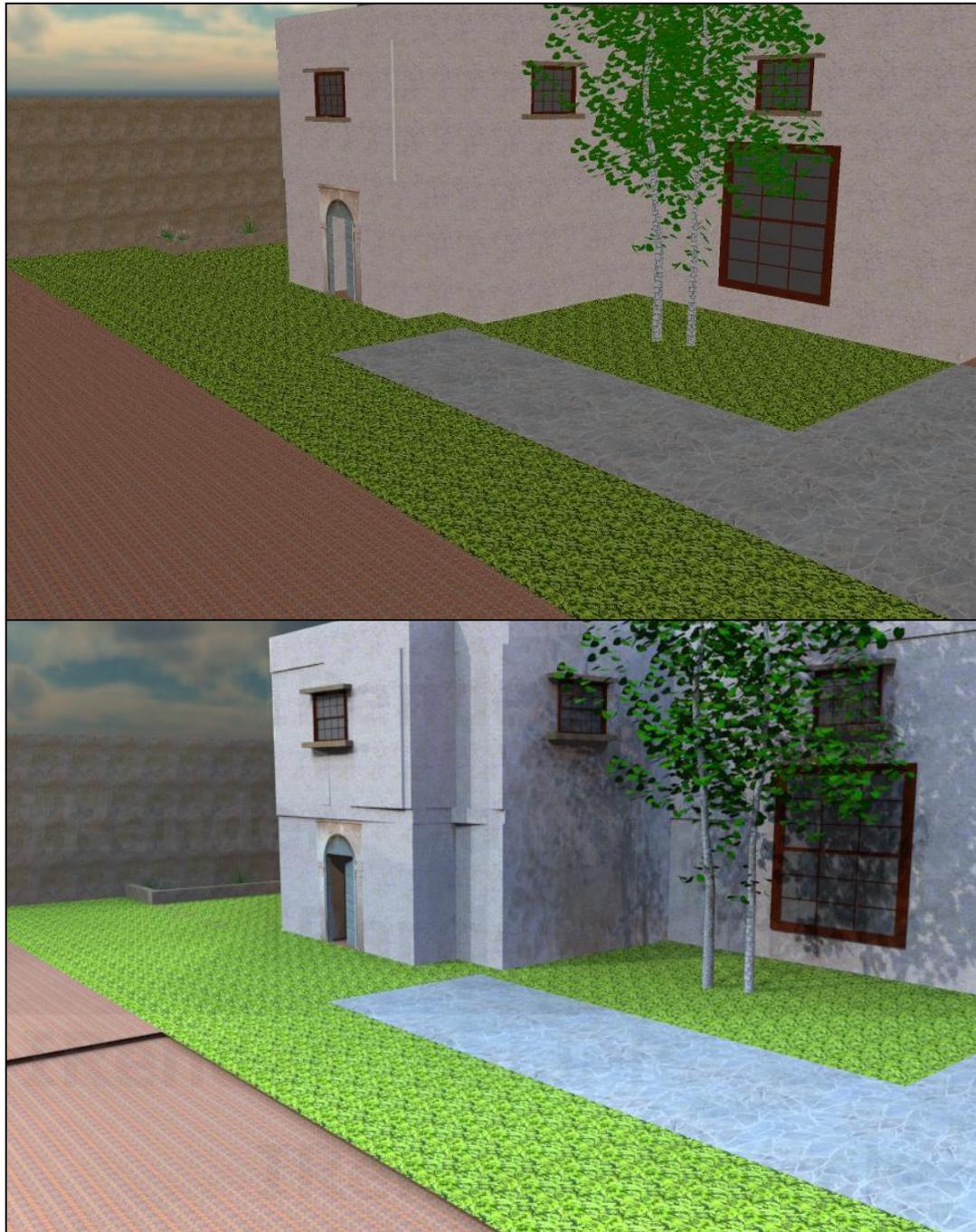
Fig.VII.10 application des textures en utilisant l'éditeur des matériaux



*Fig.VII.11 Modèle de la villa après son habillage par les différentes textures*

#### 4. Éclairage

Pour l'éclairage, on a utilisé une source de lumière principale qui projette les ombres, une source secondaire de plus faible intensité permettant d'adoucir les ombres et d'ajouter une lumière d'ambiance et enfin une source permettant d'ajouter de la profondeur en illuminant l'arrière des objets.



*Fig.VII.12 Différence entre l'éclairage simple (en haut) et un éclairage composé (en bas)*

## 5. Animation

Pour faire une animation, on a utilisé une camera libre dont on lui a affecté une contrainte de trajectoire, ce qui donne un effet comparable au tournage avec une caméra portable. L'animation est ensuite exportée sous format AVI. En utilisant les vidéos déjà prises sur site, on a réalisé un montage reliant le réel au virtuel.

## 6. Rendu

Pour avoir un rendu optimal, on a utilisé Mental Ray afin de générer les ombres et les effets de lumière de la scène en utilisant les sources de lumière qu'on a définies et reproduire les matériaux qu'on a appliqués, ainsi que les paramètres d'environnement, tels que l'arrière-plan et l'atmosphère.

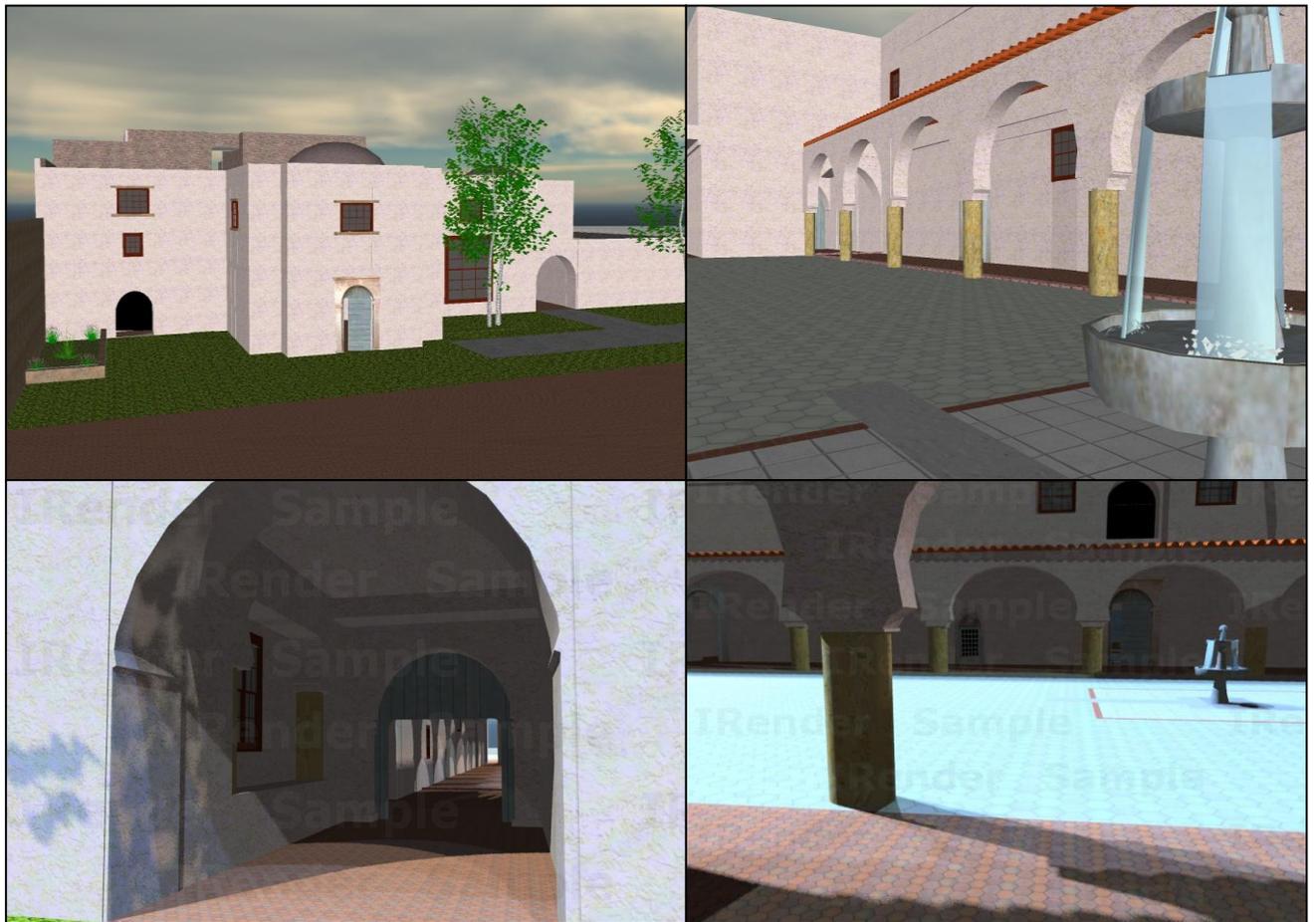


Fig.VII.13 différences entre l'utilisation d'une exportation classique (en haut) et un moteur de rendu (en bas)

## **7. Diffusion**

Pour la diffusion de la maquette virtuelle, on choisit le format WRL permettant d'afficher en temps réel la projection bidimensionnelle du modèle tridimensionnel et de se déplacer à l'intérieur en toute liberté. Afin de pouvoir visualiser le modèle de la maquette, il est nécessaire d'installer un Plugin à l'explorateur utilisé (Internet Explorer, Firefox, Opera, Netscape...) pouvant gérer le langage VRML. Ce plugin est fourni avec le CD accompagnant cette thèse.

Autre le format WRL, le modèle est diffusé sous format SKP (sketch Up) permettant ainsi la réalisation de visite virtuelle libre. L'outil nécessaire à la visualisation du modèle est téléchargeable gratuitement sur internet (disponible aussi sur le CD).

## C onclusion générale

---

Cette étude nous a montré l'amplitude des dégâts causés sur le domaine de la villa Mahiéenne par la négligence, le manque d'entretien ainsi que les différentes restaurations entreprises sur le site, ces dernières causant plus de mal que de bien en utilisant des matériaux inadéquats avec le caractère historiques des lieux.

Concernant le mortier conçu, on a vu que le but était de s'approcher le plus des caractéristiques des maçonneries. L'utilisation des super-plastifiants à permis l'obtention d'une ouvrabilité optimale avec un rapport E/L très bas ce qui a augmenter la compacité du mortier et par la suite sa résistance à la compression et à la flexion et a diminuer le retrait.

Les combinaisons de liants étudiées nous ont montré que les caractéristiques obtenues avec les deux ciments s'éloignent de celles des matériaux d'origine et des maçonneries. Ils peuvent ainsi causer des altérations irréversibles à ces dernières suite à une plus grande résistance et dureté qui va éliminer le caractère saccharifiable du mortier. La grande compacité des mortiers de ciment va jusqu'à éliminer la migration de l'humidité par capillarité des maçonneries et provoquer un déséquilibre hygroscopique d'où le décollement des enduits à base de ciment observé dans certaines restauration à cause de la condensation de l'humidité dans l'interface maçonnerie enduit.



Vue les résultats, la chaux aérienne semble être la plus appropriée même-si elle présente une résistance relativement faible. Cet handicap peut être résolu en ajoutant un certain pourcentage de chaux hydraulique qui varie selon le cas et les caractéristiques recherchées.

Lors de la restitution de la villa B du domaine Mahiédinne, les principales difficultés provenaient de la puissance du matériel utilisé ainsi que du manque d'informations sur les éléments détruits et le manque d'éclairage sur une grande partie à l'intérieur de la villa. Néanmoins la restitution nous permet de produire plusieurs documents : une maquette virtuelle permettant des visites guidées (vidéos) ou livres ainsi qu'une diffusion sur Internet par le biais du langage VRML.



## CHAPITRE I

- [<sup>1</sup>] "Archaeology." Encyclopedia Britannica. Encyclopedia Britannica 2007 Ultimate Reference Suite. Chicago: Encyclopedia Britannica, 2008.
- [<sup>2</sup>] P. REILLY, three-dimensional modeling and primary archeological data, éd. Routledge 1992, p. 160-161.
- [<sup>13</sup>] B. V. DRIESSCHE, le dessin au service de l'archéologie, Louvain, 1975, p. 30-44.
- [<sup>4</sup>] J. P. SAINT-ABIN, l'architecture en représentation, Malesherbes, I.G.D.M.H, 1985, p. 20-21.
- [<sup>5</sup>] Maurizio Forte, Archéologie virtuelle, le passé retrouvé, traduit par Denis-Armand Canal, Arthaud, Paris, 1996.

## CHAPITRE II

- [<sup>19</sup>] R. GINOUVES, R. MARTIN, Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine, Paris, 1983.
- [<sup>20</sup>] R. ETTINGHAUSEN & O. GRABAR, The Art and Architecture of Islam, 650-1250, Penguin Books, Harmondsworth, 1984
- [<sup>21</sup>] D. PANZAC dir., Les Villes dans l'Empire ottoman, 2 vol., C.N.R.S., Paris, 1991-1994
- [<sup>22</sup>] J. SARTRE, Châteaux « brique et pierre » en France. Essai d'architecture, Nouvelles Éditions latines, 1981.
- [<sup>23</sup>] J. KAUFFMANN, « Corrosion et protection des pierres des monuments », in Corrosion et anticorrosion, vol. VIII, no 3, 1960.
- [<sup>24</sup>] V. ROMANOVSKY, « Études sur les pierres calcaires des monuments », in Corrosion et anticorrosion, vol. III, 1955.
- [<sup>25</sup>] T. STAMBOLOV & J. R. J. VAN ASPEREN DE BOER, The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. A Preliminary Review, I.C.O.M. Committee for Museum Laboratories, Bruxelles, sept. 1967

[<sup>26</sup>] FROIDEVAUX Yves-Marie, "Techniques de l'architecture ancienne, construction et restauration", Ed. Mardaga, Liège, 1993.

[<sup>27</sup>] <http://www.la.refer.org/materiaux>

[<sup>28</sup>] FAUK Gilles, "Pathologies de la brique, des maux communs avec la pierre", article des Cahiers Techniques du Bâtiment n°179, Paris, avril 1997.

[<sup>29</sup>] SAPIN C. *et alii*, *Enduits et mortiers. Archéologie médiévale et moderne*, Paris, éd. du CNRS, 1991, p 123.

[<sup>30</sup>] BOUINEAU Alain, "Le renforcement des maçonneries anciennes à l'aide de coulis d'injection", LEM.

[<sup>31</sup>] J. CLAUDE, *La chaux, ses constituants*, NATHAN Communication, Paris, 1990, p 9-67.

[<sup>32</sup>] Ecole d'Avignon, "Techniques et pratique de la chaux", Ed. EYROLLES, 1995, 2003, Paris.

[<sup>33</sup>] M. VENUAT, *La Pratique des ciments mortiers et des bétons*, éd. du Moniteur, Paris, 2e éd. 1989.

### CHAPITRE III

[<sup>34</sup>] J. Foley et al, *Introduction à l'infographie*, éditions Addison-Wisley France et ISBN, Septembre 2001, p 335-541.

[<sup>35</sup>] B. Poinssac, *L'infographie*, Presses Universitaires de France - Que sais-je ?, Paris, 1994.

[<sup>36</sup>] L. Juillier, *les images de synthèse*, Paris, Nathan, 1998, p 8-10.

[<sup>37</sup>] X. DELESTRE, J. L. SCHULMANN, *le mausolée antique de Rouen : une approche pluridisciplinaire pour une hypothèse de restitution*, Paris, 1997, p 48-51.

[<sup>38</sup>] A.-M. GUIMIER-SORBETS, *LES APPLICATIONS DE L'INFOGRAPHIE 3D A L'ARCHEOLOGIE*, 1999, p. 30, p. 89-92 p. 75, p. 92-93, p 115-117.

- [<sup>39</sup>] VINCENT (R.), « En 1897, le Zéro du Nivellement Général de la France était adopté grâce au Marégraphe totalisateur fondamental de Marseille », *Revue XYZ*, n°73, 1997, p 85-89.
- [<sup>40</sup>] J. P. SAINT AUBIN, *Architecture et images virtuelles : vers une nouvelle pensée visuelle*, Paris, 1997, p 57-58.
- [<sup>41</sup>] Y. EGELS, *la photogrammétrie numérique : vers une banalisation du métier de photogrammètre*, 1998, p 8-11.
- [<sup>42</sup>] CH. MENARD & R. SABLATNIG, « Computer based acquisition of archaeological finds : the first step towards automatic classification » in *Archeologia & Calcolatori*, n°7, 1996, p 429-446.
- [<sup>43</sup>] M. FORTE & A. GUIDAZZOLI, « Shape from motion : dalle sequenze filmate alla modellazione tridimensionale. Progetto per l'elaborazione 3D di immagini video archeologiche » in *Archeologia & Calcolatori*, n°7, 1996, p 223-232.
- [<sup>44</sup>] Marbs A., Heinz G., Boehler W. *The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. Proceedings of CIPA International Symposium. Potsdam, Germany 2001.*
- [<sup>45</sup>] B. CHAZALY – E. LAROZE, *Le relevé par scannage 3D*, XYZ, N°102, 2005, p 21-26.
- [<sup>46</sup>] P.REILLY « Three-dimensional modelling and primary archaeological data » in *Archaeology and the information age, a global perspective*, London & New York, éd. Routledge, 1992, p147-173.
- [<sup>47</sup>] J.-P COUWENBERGH *La synthèse d'images*, Allier, éd. Marabout, 1998, p 75-76.
- [<sup>48</sup>] HARRIS (T.), « Digital terrain modelling and three-dimensional surface graphics for landscape and site analysis in archaeology and regional planning » in *Computer and quantitative methods in archaeology 1987*, éd.par Ruggles et Rahtz, Oxford, B.A.R., 1988, p 161-170.
- [<sup>49</sup>] P.REILLY & J. RICHARDS , « New perspectives on Sutton Hoo : the potential of 3-D graphics », in *Computer and quantitative methods in archaeology 1987*, éd. par Ruggles et Rahtz, Oxford, B.A.R., 1988, p 173-185.
- [<sup>50</sup>] W. A.BOISMIER & P.REILLY , « Expanding the role of computer graphics in the analysis of survey data », in *Computer and quantitative methods in archaeology 1987*, éd. par Ruggles et Rahtz, Oxford, B.A.R., 1988, p 221-225.



[<sup>51</sup>] NAMANE R., BOUMGHAR F. O., BOUATOUCHK. : Qsplat compression. In ACM AFRIGRAPH, 2004, ACM Press, New York

[<sup>52</sup>] Grussenmeyer P., Hanke K., Streilein A. Photogrammetrie architecturale.

Chapitre du livre, Photogrammétrie numérique. Éditions Lavoisier-Hermès, 2001

#### CHAPITRE IV

[<sup>53</sup>] Agence nationale d'archéologie et de protection des sites et monuments historiques.

[<sup>54</sup>] Google Earth.

## CHAPITRE II

<i>Fig.III.1 Briques pleines et perforées</i> .....	34
<i>Tab III.1 La classe et la masse volumique les briques courantes</i> .....	34
<i>Tab III.2 Dimensions et résistances des briques</i> .....	34
<i>Fig. III.2 cloisons et mur</i> .....	34
<i>Fig.III.3 Configuration des joints de mortier aux murs façades</i> .....	35
<i>Fig. III.4 Briques creuses comprimées par voie demi-humide</i> .....	35
<i>Fig. III.5 Différents types d'appareil</i> .....	36
<i>Fig.III.6 Four vertical</i> .....	42
<i>Fig.III.7 Four vertical</i> .....	43
<i>Fig.III.8 Four rotatif</i> .....	44

## CHAPITRE IV

<i>Fig IV.1 Utilisation de l'infographie en cartographie</i> .....	51
<i>Fig IV.2 Différentes étapes de l'infographie</i> .....	52
<i>Fig IV.3. Différentes étapes de restitution d'une image numérique</i> .....	53
<i>Fig IV.4. Méthodes de représentation graphiques des objets 3D</i> .....	54
<i>Fig IV.5. Etapes de la création 3D</i> .....	55
<i>Fig IV.6 Représentation explicite des polygones</i> .....	56
<i>Fig IV.7 Représentation avec des pointeurs</i> .....	56
<i>Fig IV.8 Courbes de Bézier cubiques</i> .....	58
<i>Fig IV.9 Courbes de Bézier collées entre elles par le point <math>P_3</math></i> .....	60
<i>Fig. IV.10 Une fontaine modelée à l'aide de surfaces NURBS</i> .....	60
<i>Fig IV.11 Approximation de l'ensemble de Mandelbrot</i> .....	63
<i>Fig. IV.12 Opérations booléennes</i> .....	64
<i>Fig. IV.13 Image plate</i> .....	65
<i>Fig. IV.14 effet des différentes sources de lumière sur les objets</i> .....	66

<i>Fig. IV.15 Une reconstitution virtuelle .....</i>	72
<i>Fig IV.16 Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique .....</i>	74
<i>Fig. IV.17 Rendering Lucy QSplat model.....</i>	74
<i>Fig. IV.18 Modèle topographique 3D d'un temple.....</i>	76
<i>Fig IV.19 Principes de fonctionnement des dispositifs de balayage laser 3D.....</i>	76

### CHAPITRE V

<i>Fig.V.1 Image aérienne de l'entourage du domaine Mahieddine.....</i>	80
<i>Fig.V.2 Plan de masse du domaine Mahieddine.....</i>	81
<i>Fig.V.3 Coupoles en maçonneries avec un enduit.....</i>	82
<i>Fig.V.4 Système constructif .....</i>	82
<i>Fig.V.5 Portiques.....</i>	82
<i>Fig.V.6 Plancher.....</i>	82
<i>Fig.V.7 Schémas descriptif des poteaux et de l'arcade.....</i>	82
<i>Fig.V.8 Effondrement du mur de soutènement.....</i>	83
<i>Fig.V.9 Des défections d'enduit sur une très grande partie des murs.....</i>	83
<i>Fig.V.10 Détérioration de la villa.....</i>	83
<i>Fig.V.11 Différents dégâts causés par l'occupation et la modification des lieux..</i>	99
<i>Fig.V.12 Désagrégation et effritement du briquetage extérieur.....</i>	84
<i>Fig.V.13 Utilisation d'un mortier à base de ciment pour le jointement et l'enduit.....</i>	84
<i>Fig.V.14 Développement de lichens sur le parement.....</i>	85
<i>Fig.V.15 Décollement de la couche d'enduit faite à base de ciment.....</i>	85
<i>Fig.V.16 Canalisation rompue, ainsi que la tuyauterie.....</i>	85
<i>Fig.V.17 Trace d'humidité sur les murs extérieurs.....</i>	86
<i>Fig.V.18 Trace d'humidité sur les murs intérieurs .....</i>	87
<i>Fig.V.19 Exemples de manque d'entretien ou de prolifération de végétation. ....</i>	88

## CHAPITRE VI

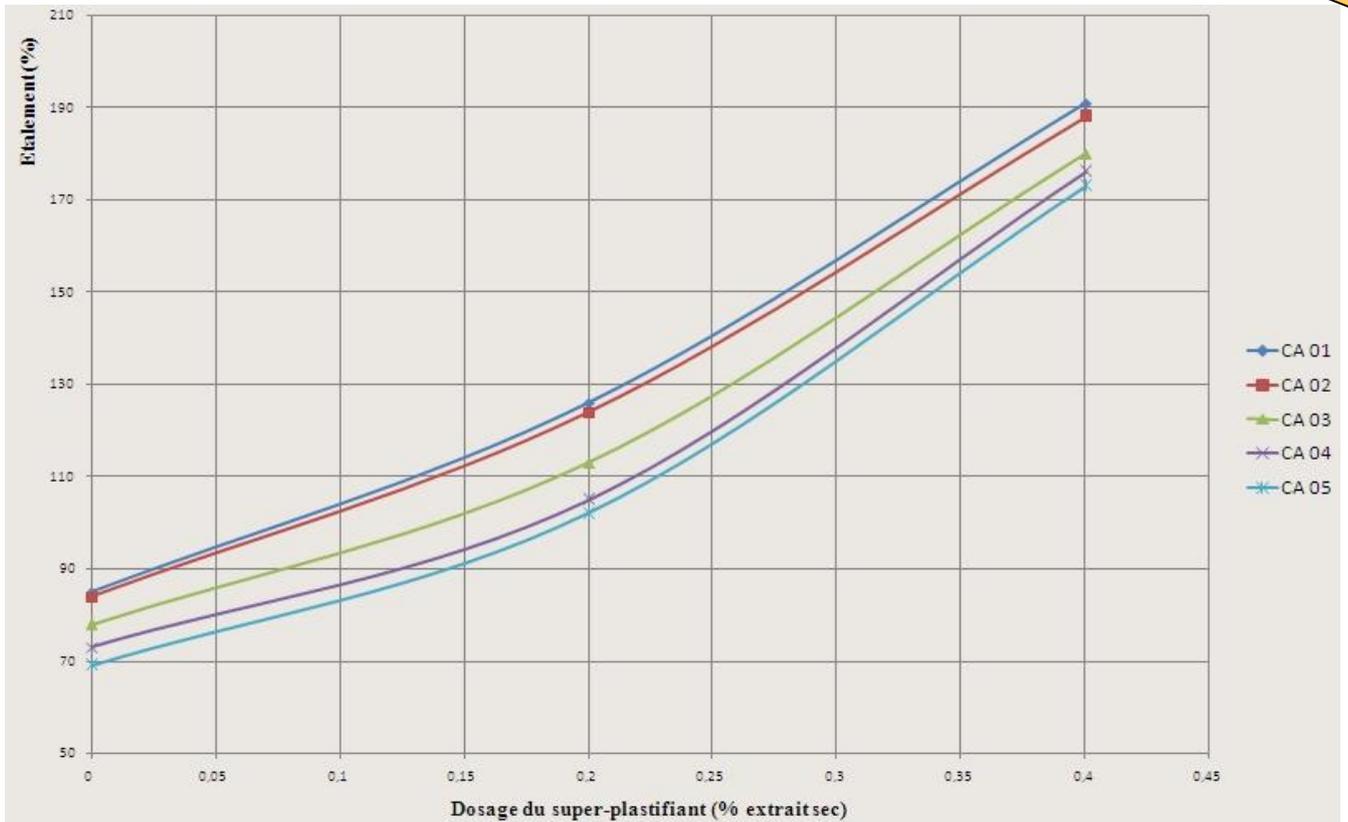
<i>Fig. VI.1 Prélèvement des échantillons de briques et de mortiers</i> .....	89
<i>Fig.VI.2 Analyse granulométrique et courbe du mélange</i> .....	91
<i>Tab.VI.1 Les différentes compositions étudiées</i> .....	95
<i>Fig.VI.3 Table à secousses</i> .....	96
<i>Fig.VI.4 Étalement en fonction du pourcentage du super-plastifiant</i> .....	96
<i>Fig.VI.5 Appareil Vicat</i> .....	97
<i>Tab.VI.2 Résultats des mesures des temps de prise</i> .....	97
<i>Fig.VI.6 Essai de flexion</i> .....	98
<i>Tab.VI.3 Résultats des résistances à la flexion</i> .....	99
<i>Fig.VI.7 Résistances à la flexion en fonction du temps des compositions CB</i> .....	100
<i>Fig.VI.8 Essai de compression</i> .....	101
<i>Tab. VI.4 Résultats des résistances à la compression</i> .....	102
<i>Fig.VI.9 Résistances à la compression en fonction du temps</i> .....	102
<i>Fig.VI.10 Détermination du retrait des éprouvettes</i> .....	103
<i>Tab.VI.5 Résultats des retraits enregistrés</i> .....	104
<i>Fig.VI.11 Exemple des résultats obtenus lors des essais d'imbibition</i> .....	105
<i>Tab.VI.6 Tableau récapitulatif des différents résultats obtenus</i> .....	105

## CHAPITRE VII

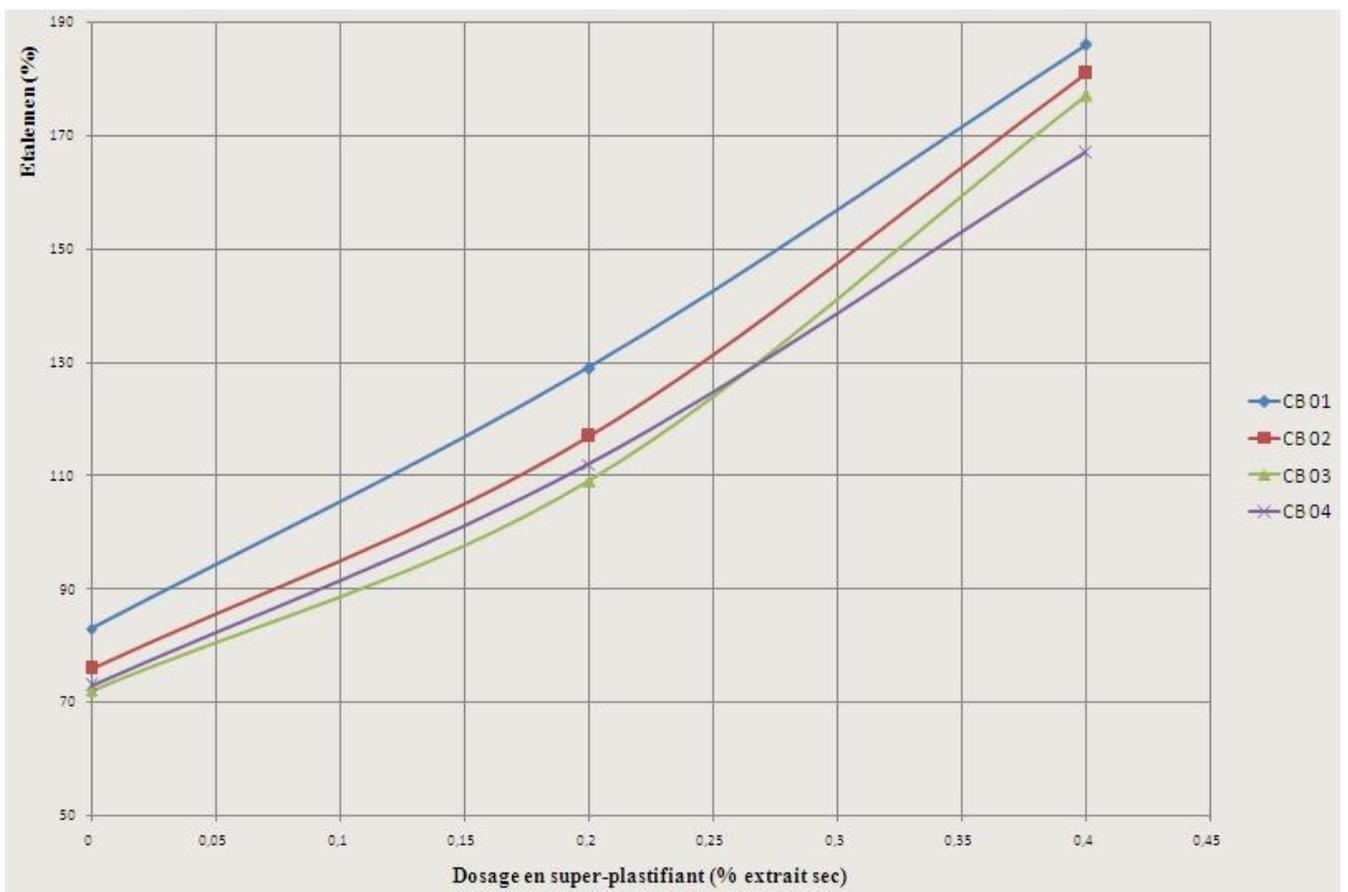
<i>Fig.VII.1 Modélisation suivant le plan du rez-de-chaussée</i> .....	108
<i>Fig.VII.2 Modélisation suivant le plan du 1<sup>er</sup> étage</i> .....	108
<i>Fig.VII.3 Chainage du portique</i> .....	109
<i>Fig.VII.4 Croquis des arcades et des chapiteaux</i> .....	110
<i>Fig.VII.5 Chainage du portique</i> .....	111
<i>Fig.VII.6 Modélisation complète de la villa</i> .....	111



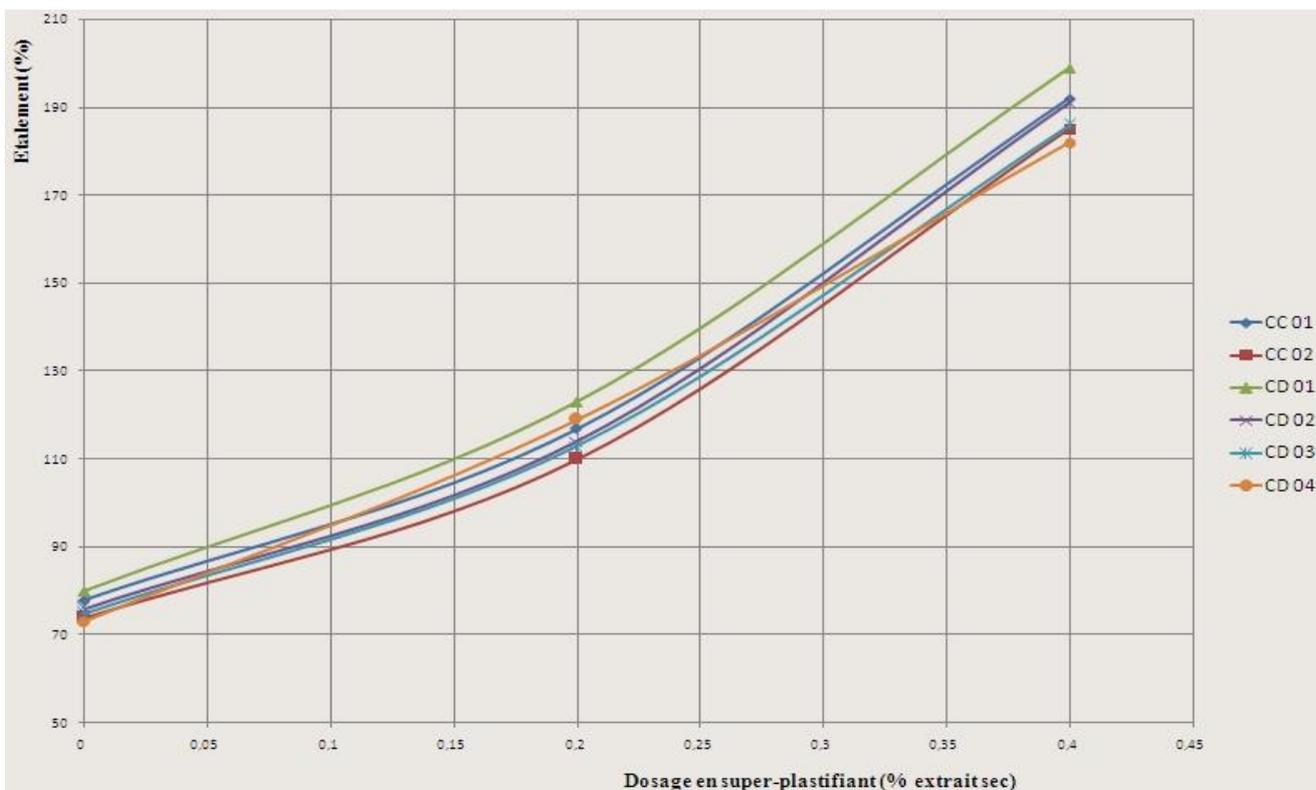
<i>Fig.VII.7 Quelques textures utilisées lors de l'habillage du modèle de la villa....</i>	112
<i>Fig.VII.8 Modèle de la villa après son habillage par les différentes textures.....</i>	113
<i>Fig.VII.9 Différence entre l'éclairage simple et un éclairage composé.....</i>	114
<i>Fig.VII.10 Différences entre l'utilisation d'une exportation classique et un moteur de rendu.....</i>	114
<i>Fig.VII.11 Modèle de la villa après son habillage par les différentes textures....</i>	115
<i>Fig.VII.12 Différence entre l'éclairage simple (en haut) et un éclairage composé (en bas).....</i>	115
<i>Fig.VII.13 différences entre l'utilisation d'une exportation classique (en haut) et un moteur de rendu (en bas).....</i>	116



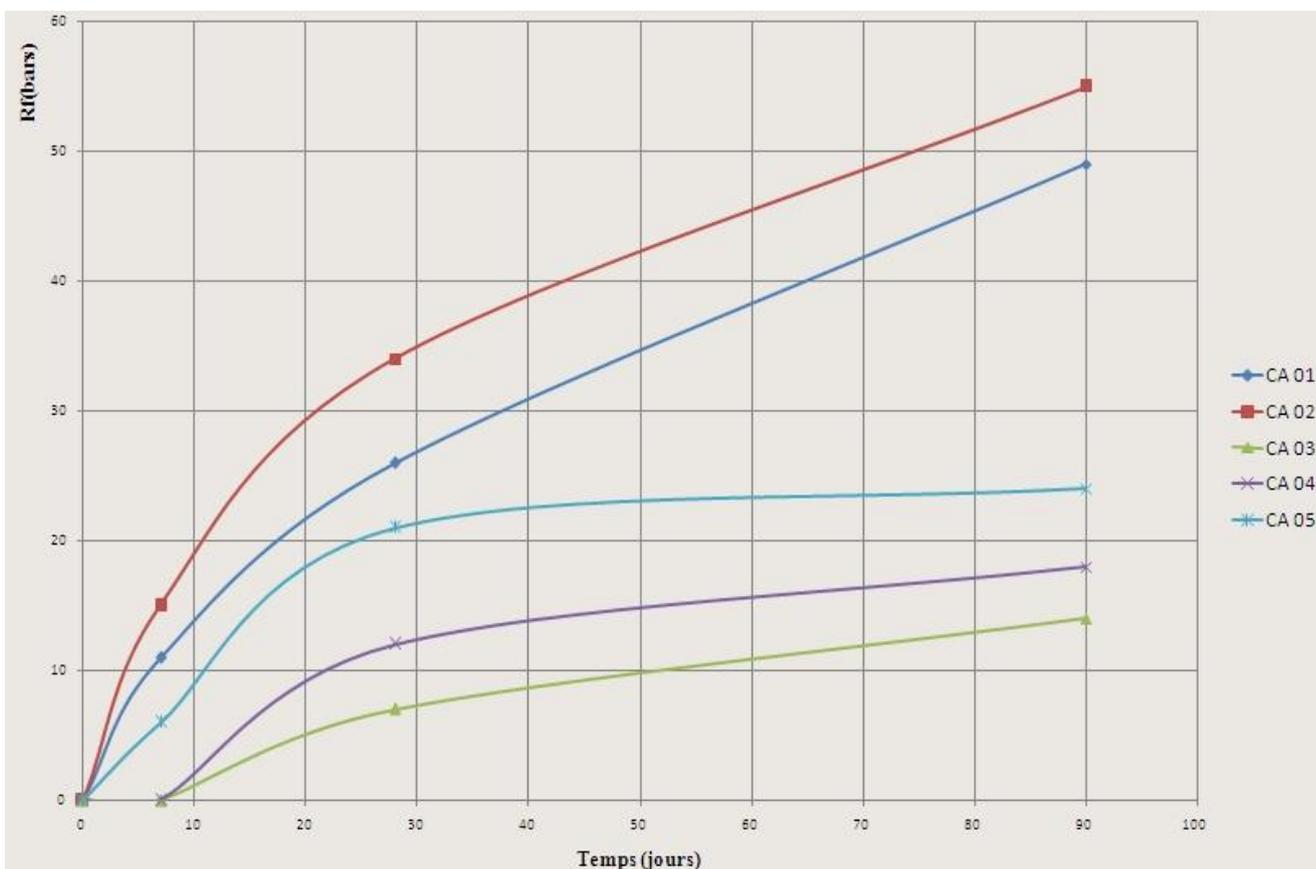
Anx. 1. Étalement en fonction du dosage en super-plastifiant pour la série CA



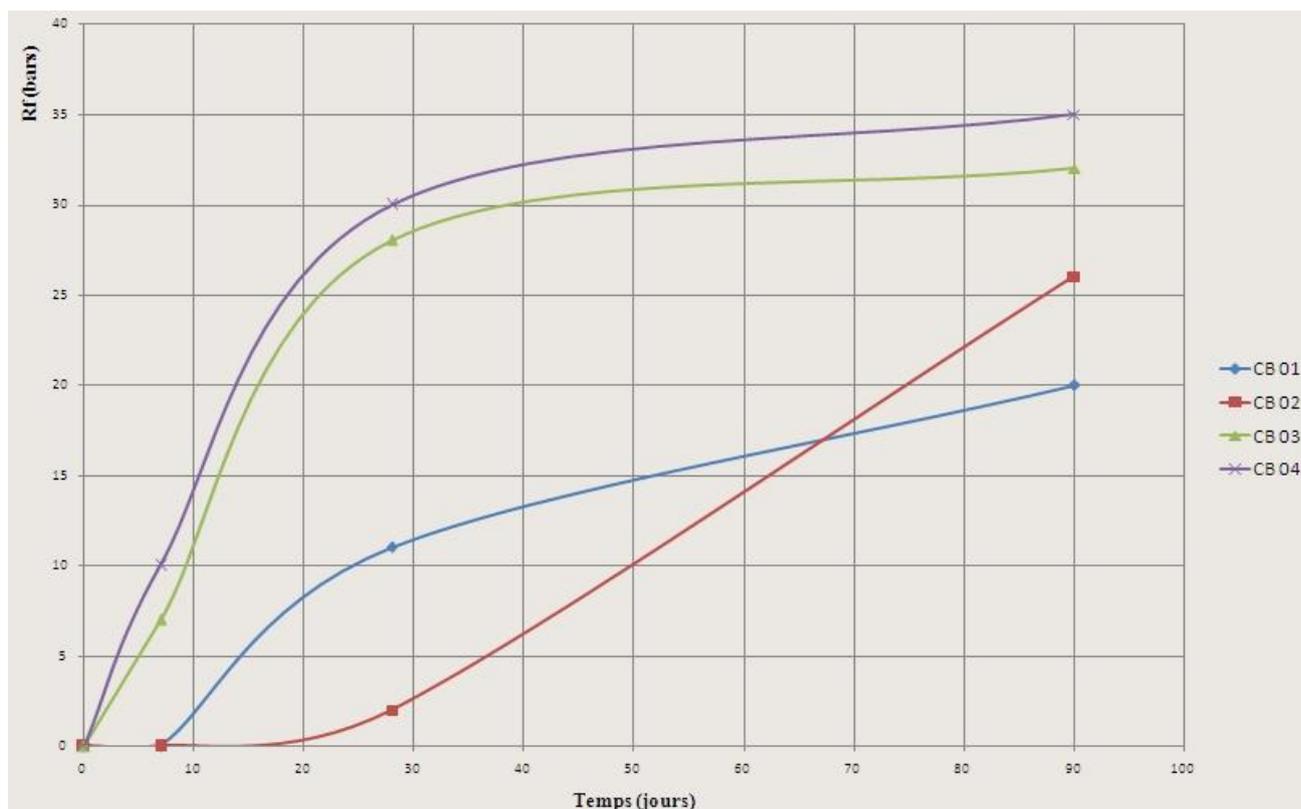
Anx. 2. Étalement en fonction du dosage en super-plastifiant pour la série CB



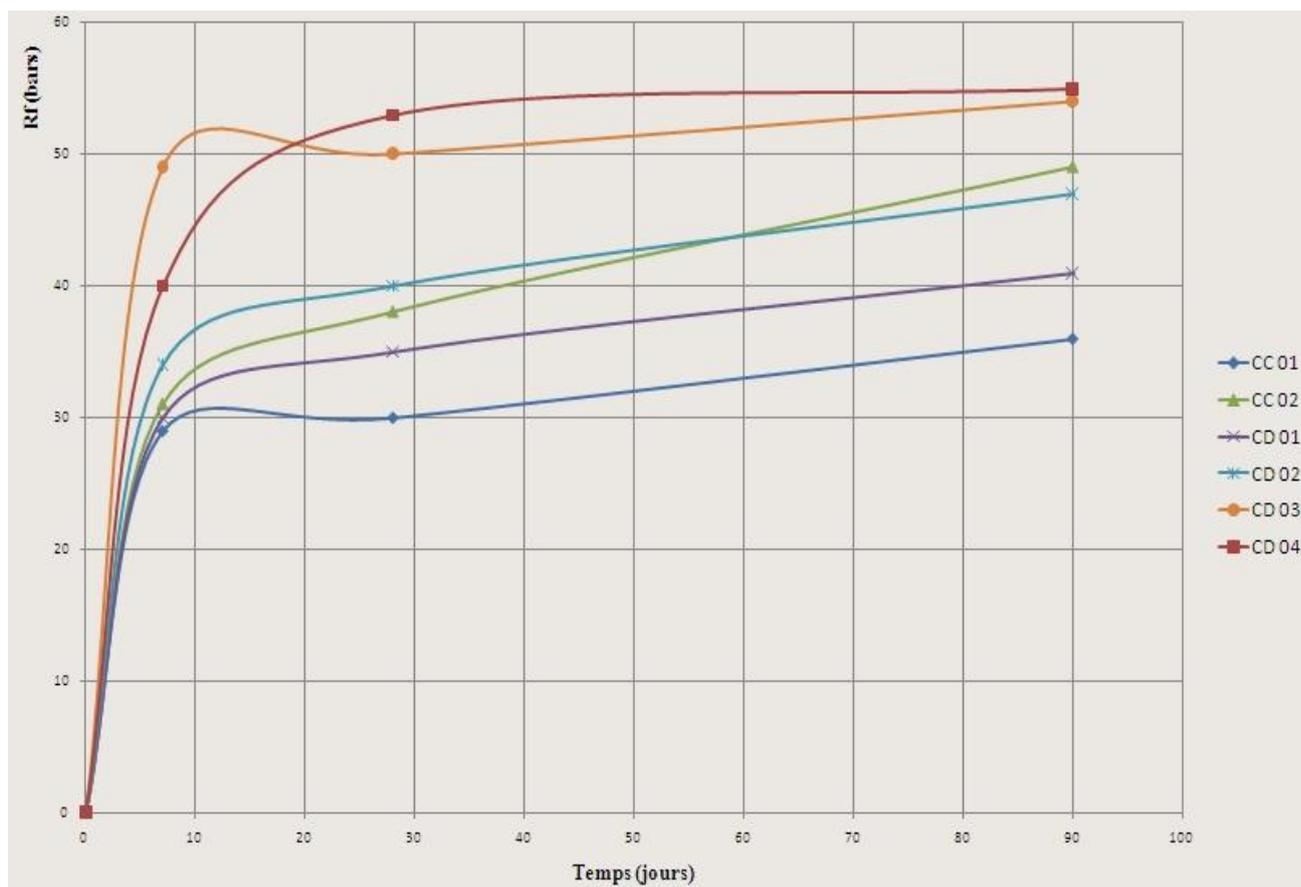
Anx. 3. Étalement en fonction du dosage en super-plastifiant pour la série CC et CD



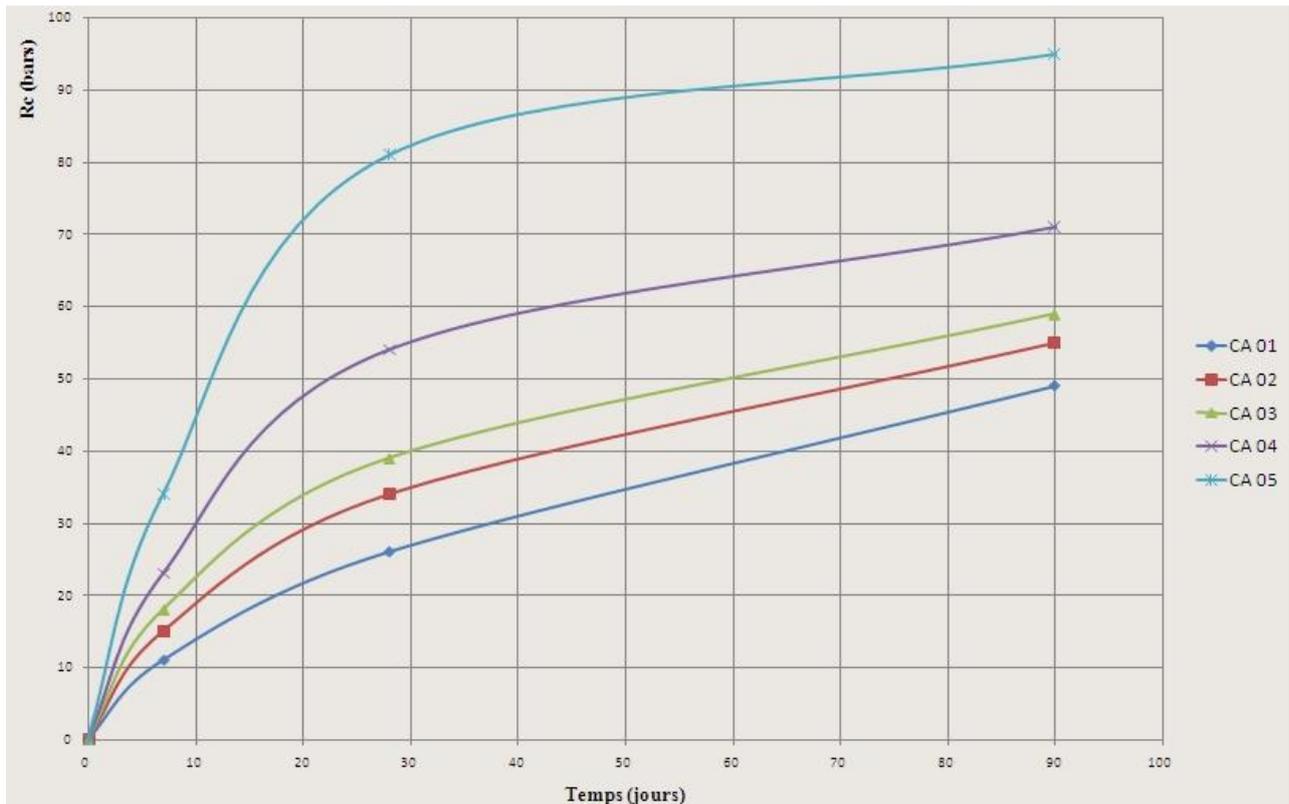
Anx. 4 Résistance à la flexion en fonction du temps pour la série CA



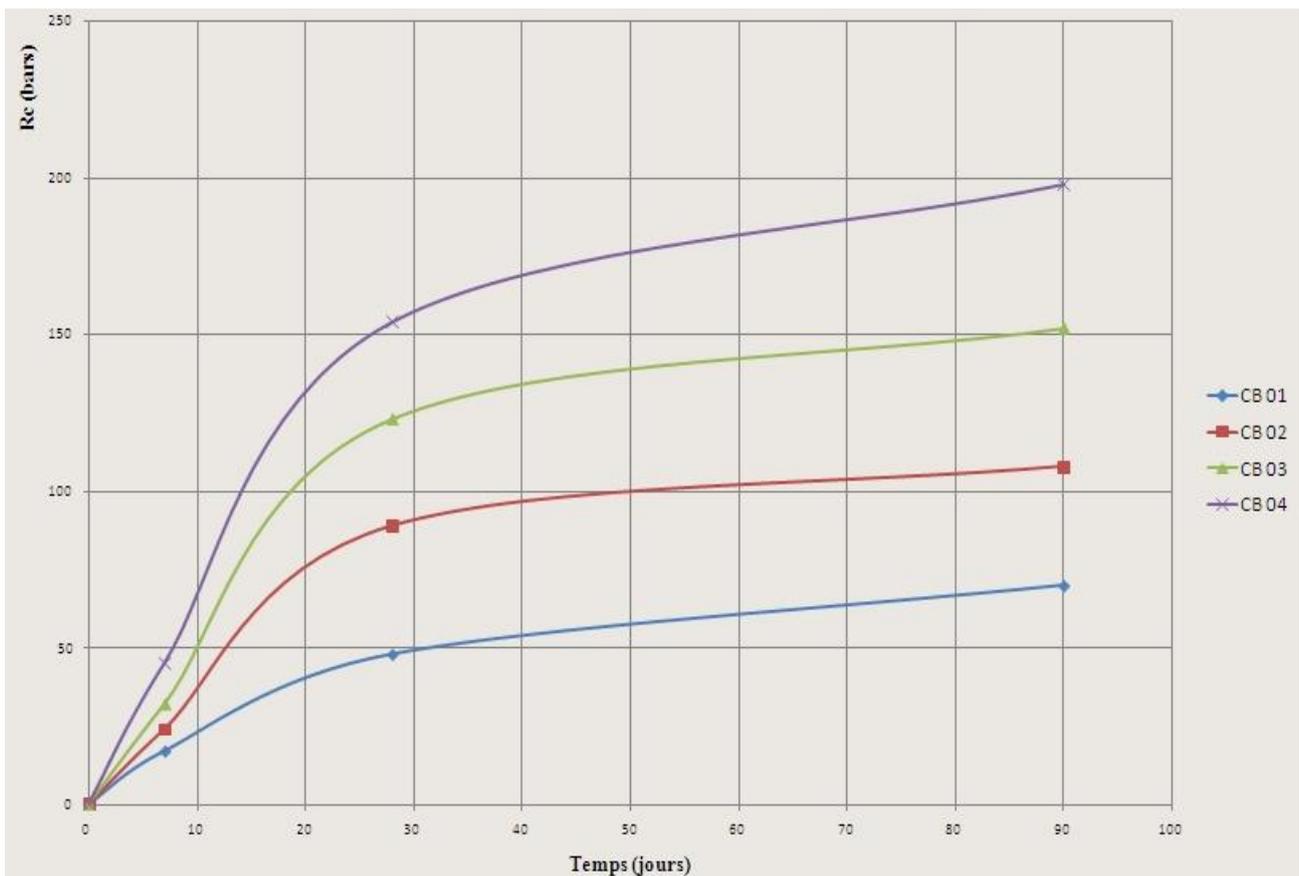
Anx. 5 Résistance à la flexion en fonction du temps pour la série CB



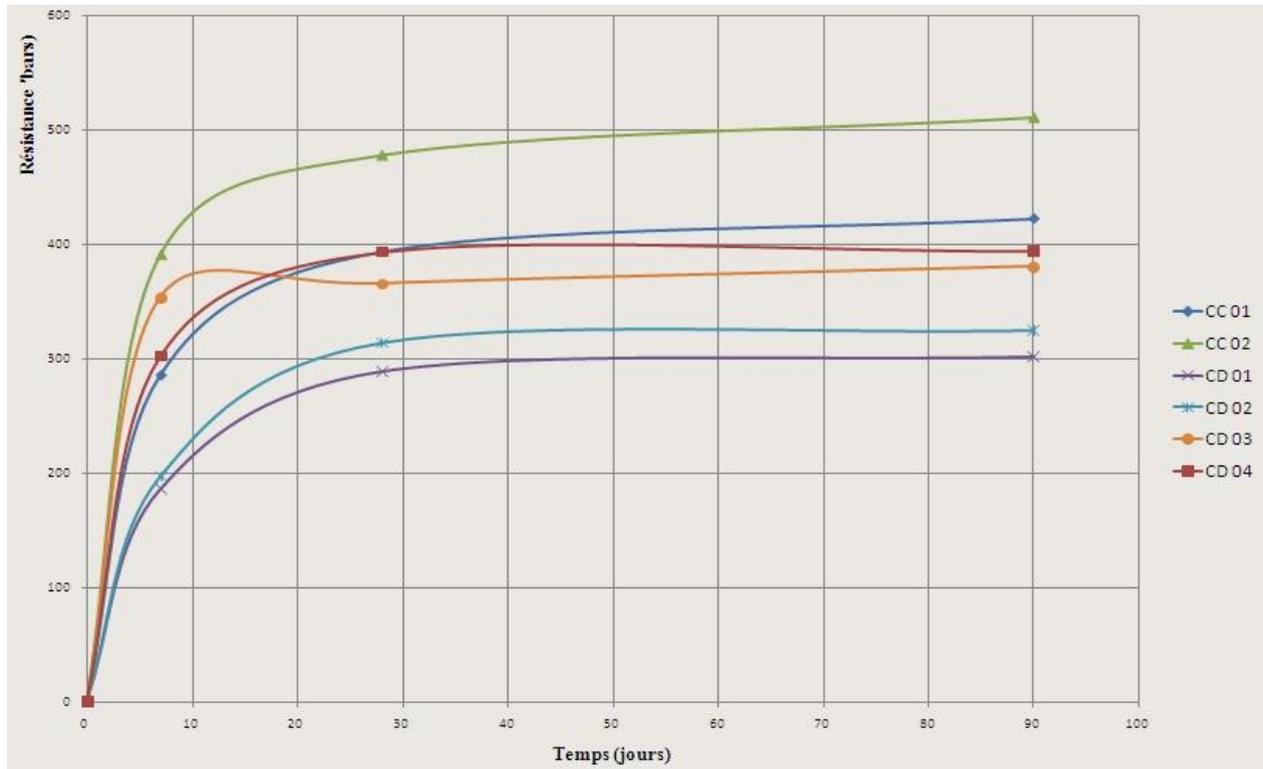
Anx. 6 Résistance à la flexion en fonction du temps pour la série CC et CD



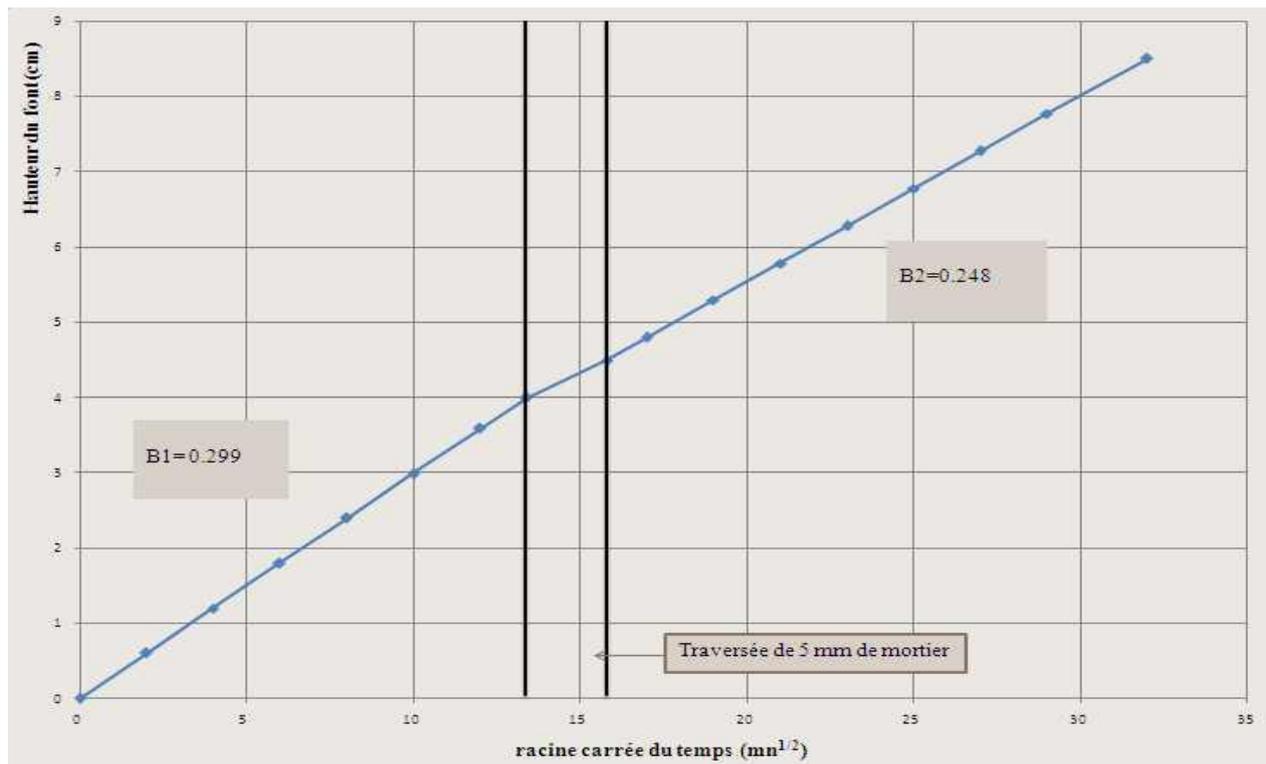
Anx. 7 Résistance à la compression en fonction du temps pour la série CA



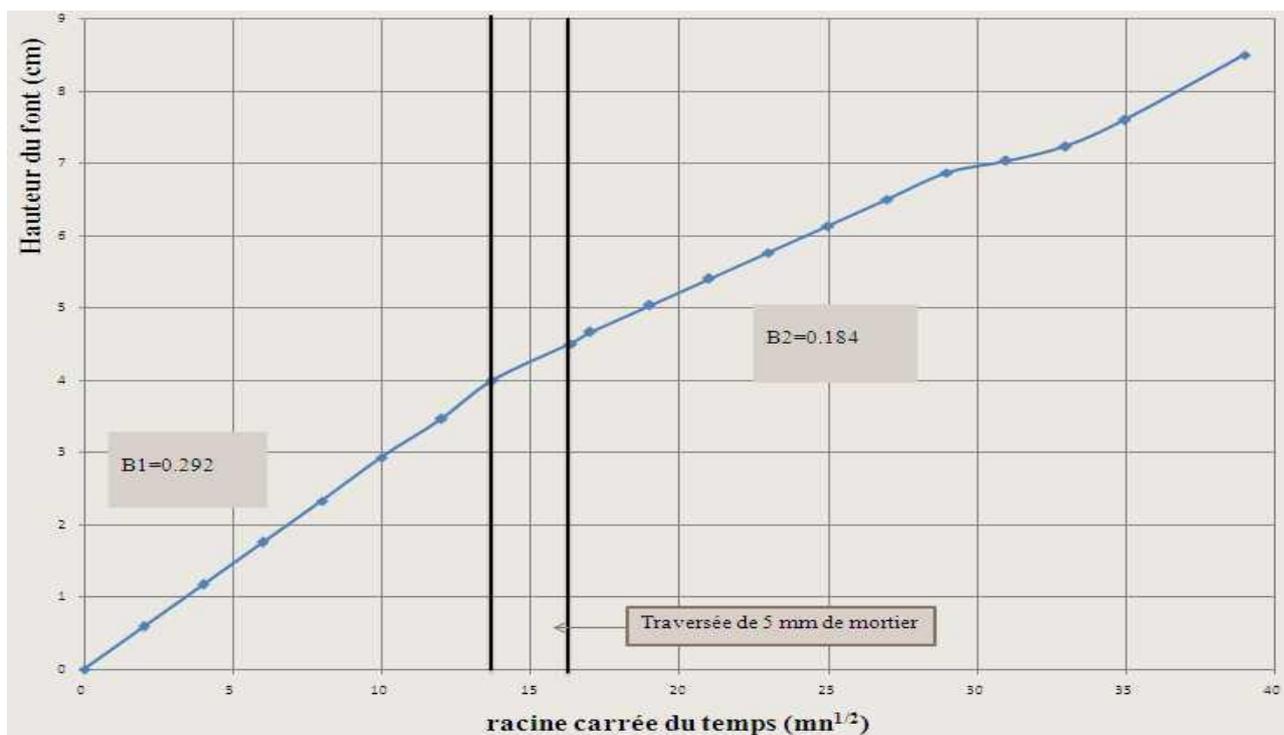
Anx. 8 Résistance à la compression en fonction du temps pour la série CB



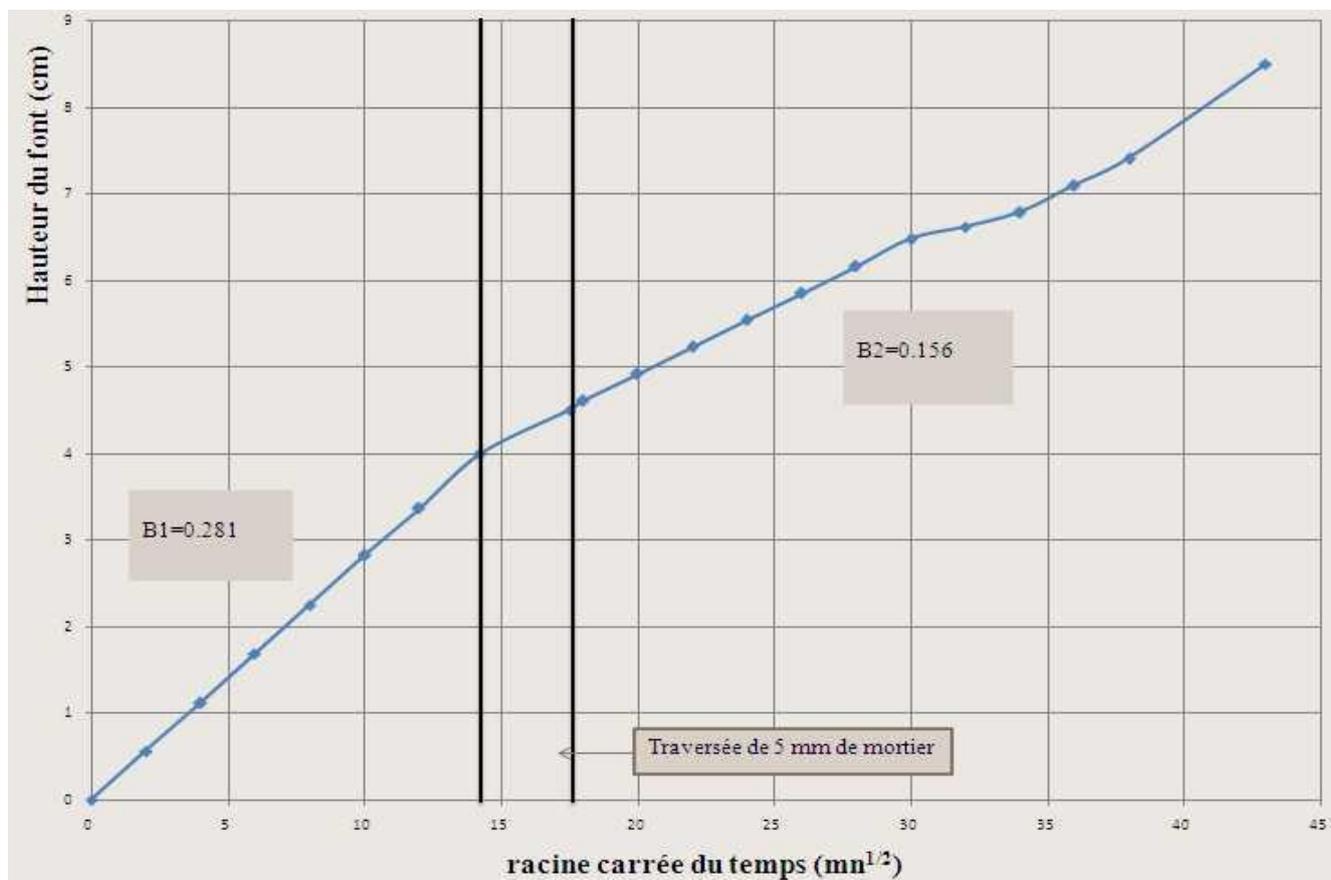
Anx. 9 Résistance à la compression en fonction du temps pour la série CC et CD



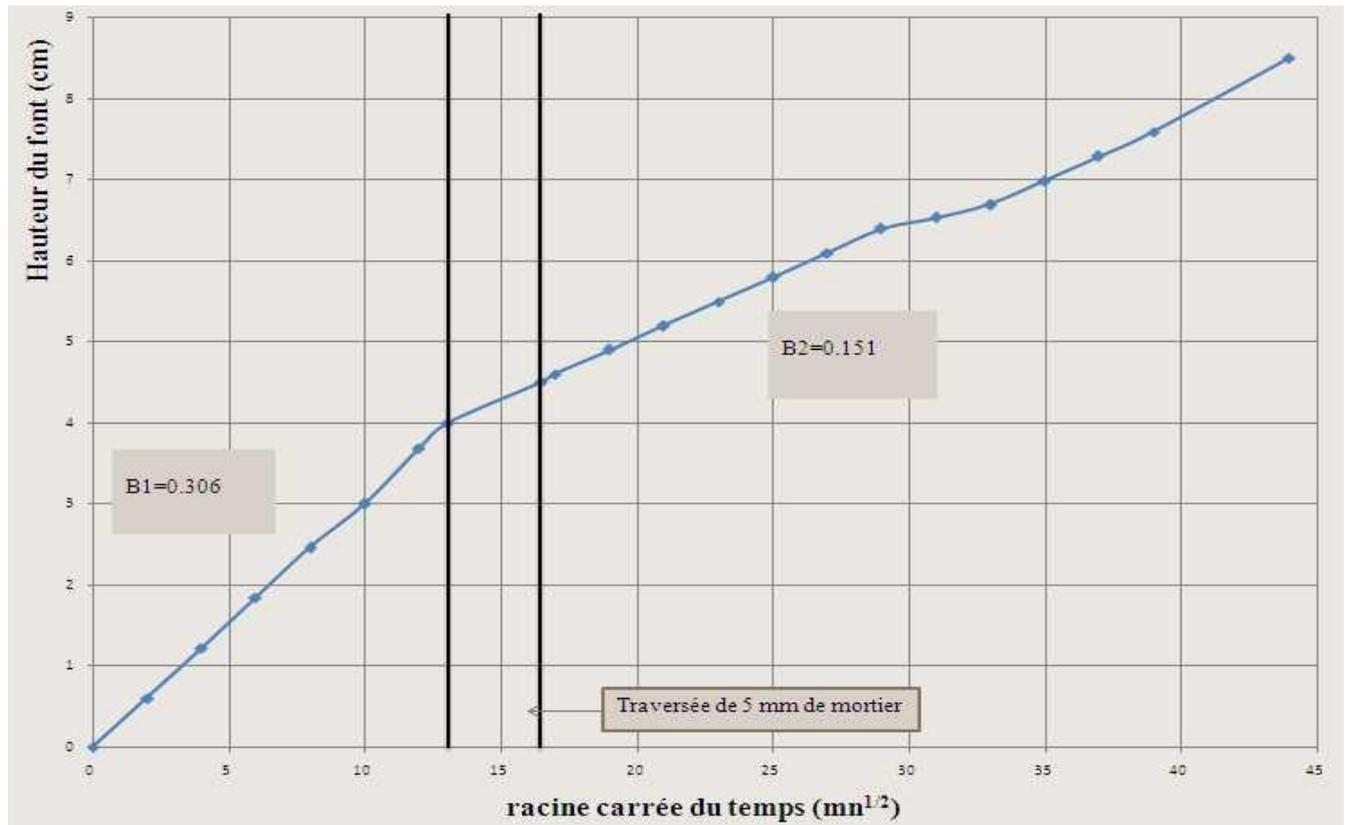
Anx. 10 Imbibition capillaire pour la série CA 01



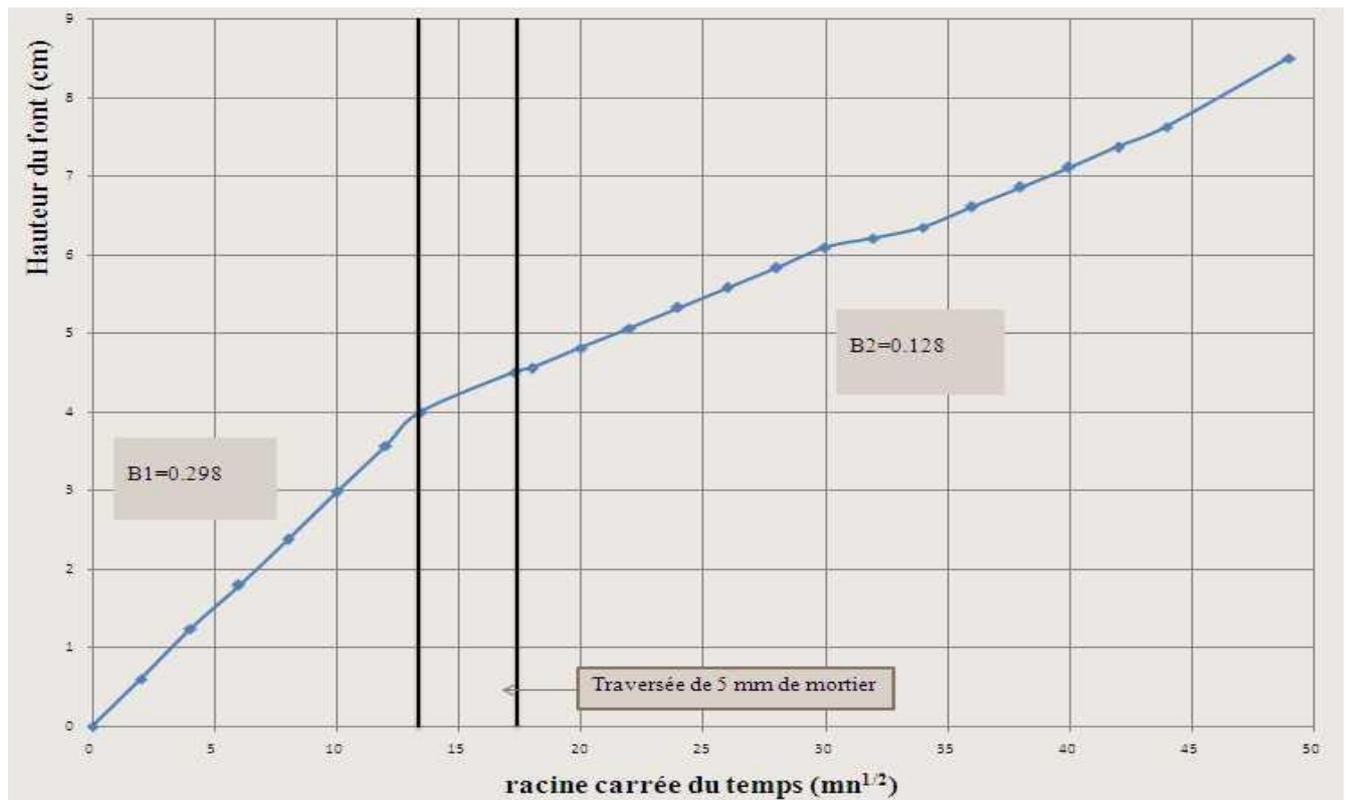
Anx. 11 Imbibition capillaire pour la série CA 02



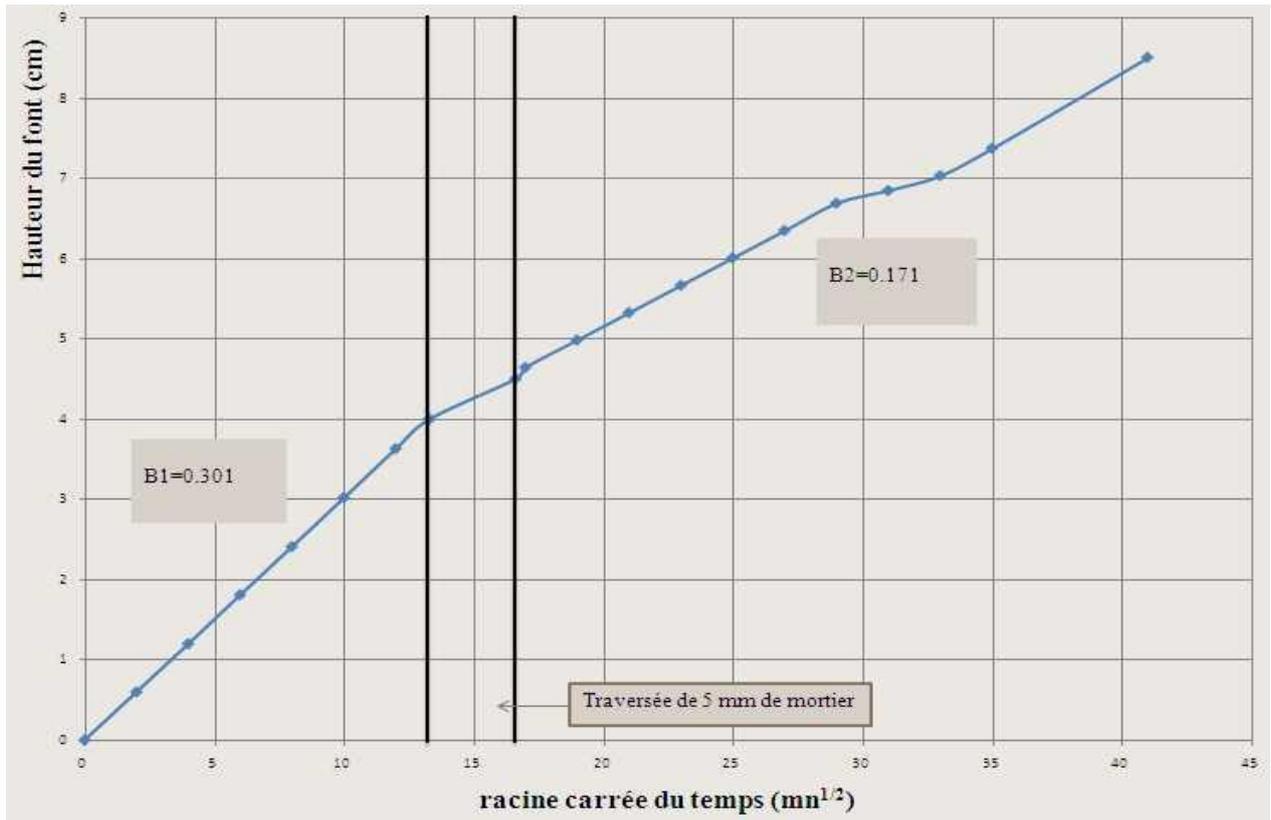
Anx. 12 Imbibition capillaire pour la série CA 03



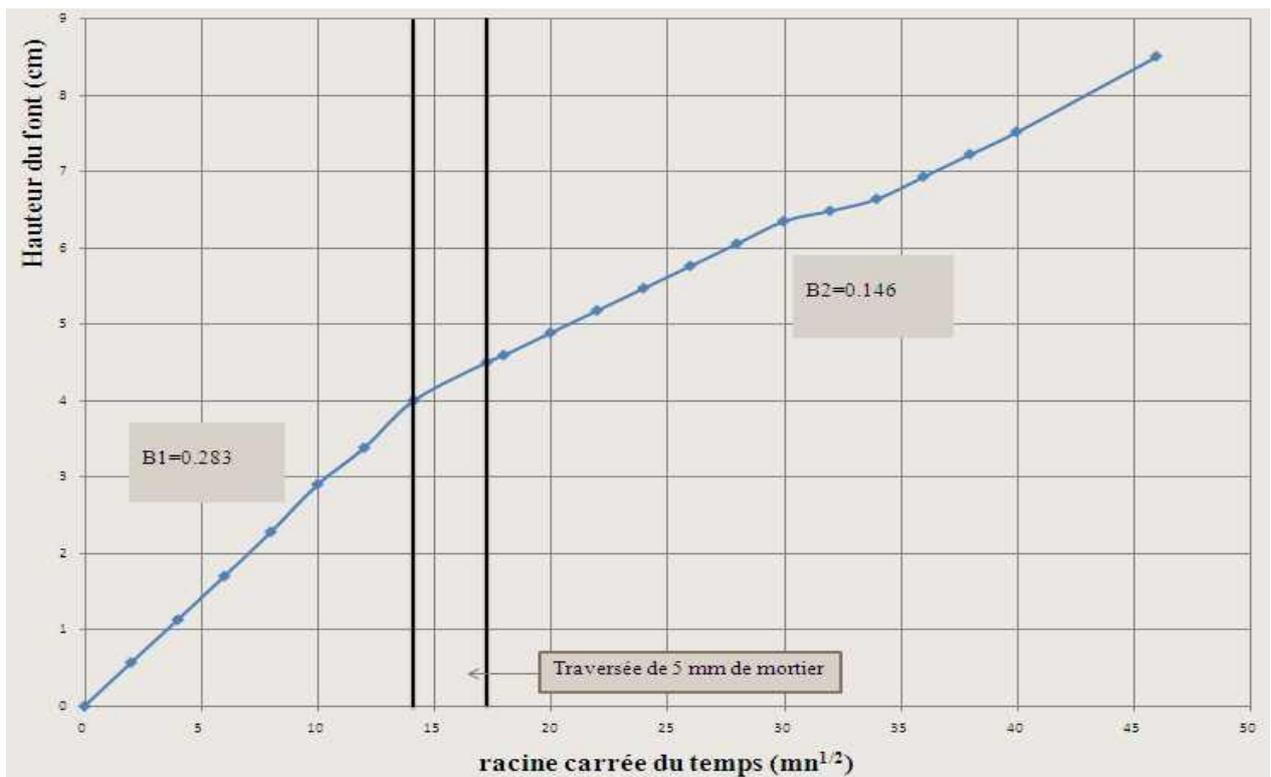
Anx. 13 Imbibition capillaire pour la série CA 04



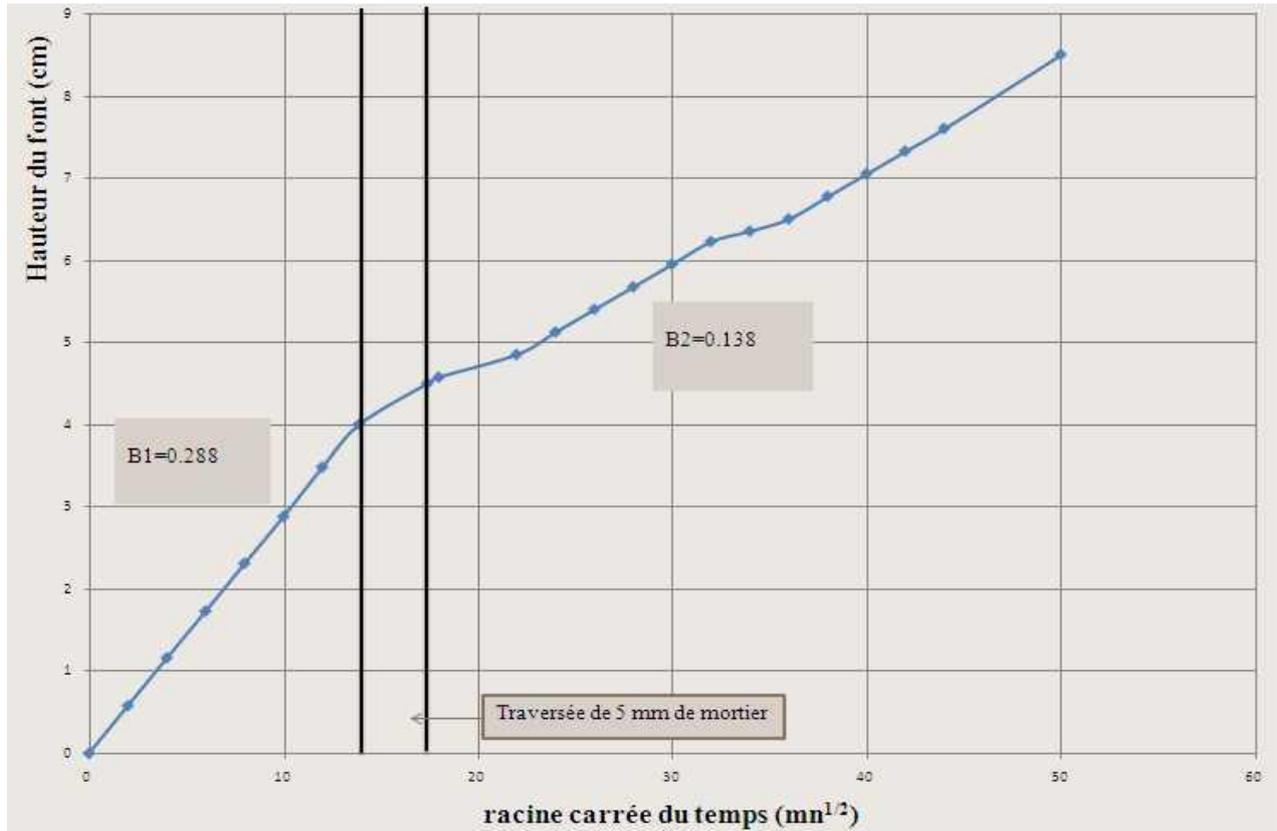
Anx. 14 Imbibition capillaire pour la série CA 05



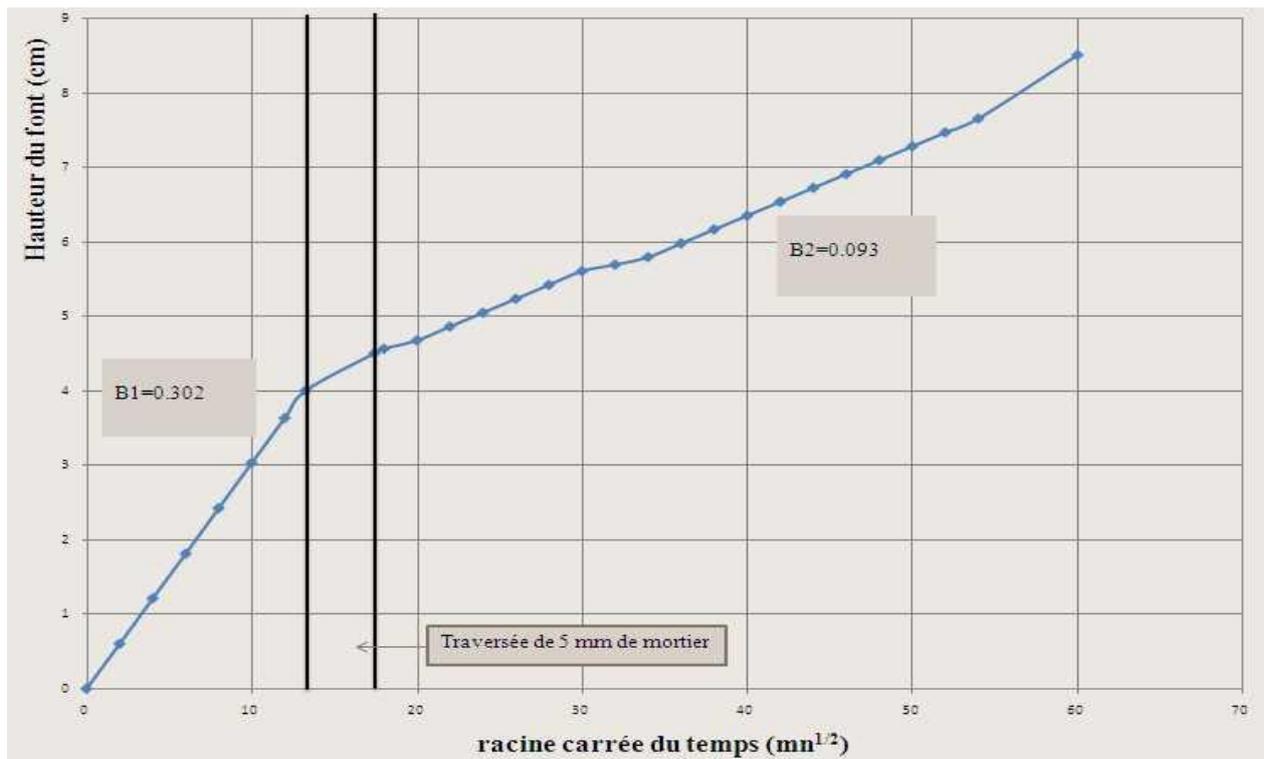
Anx. 15 Imbibition capillaire pour la série CB 01



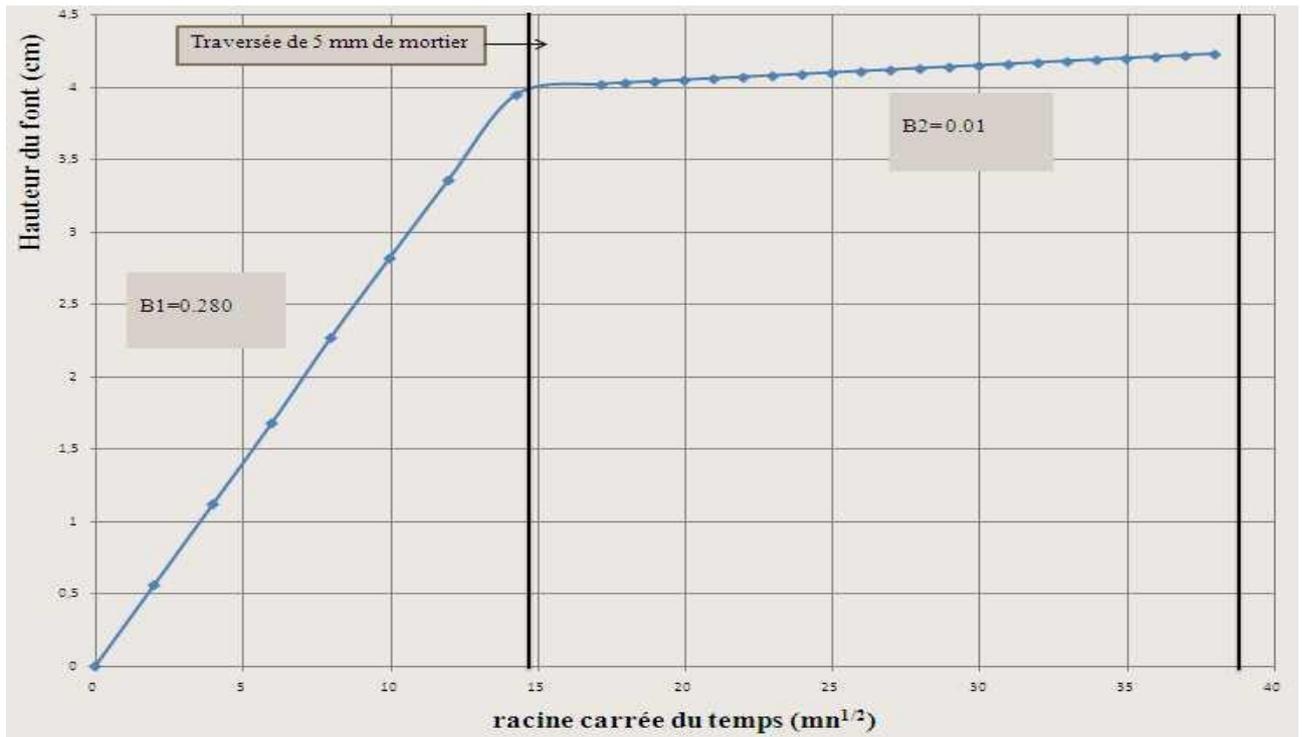
Anx. 16 Imbibition capillaire pour la série CB 02



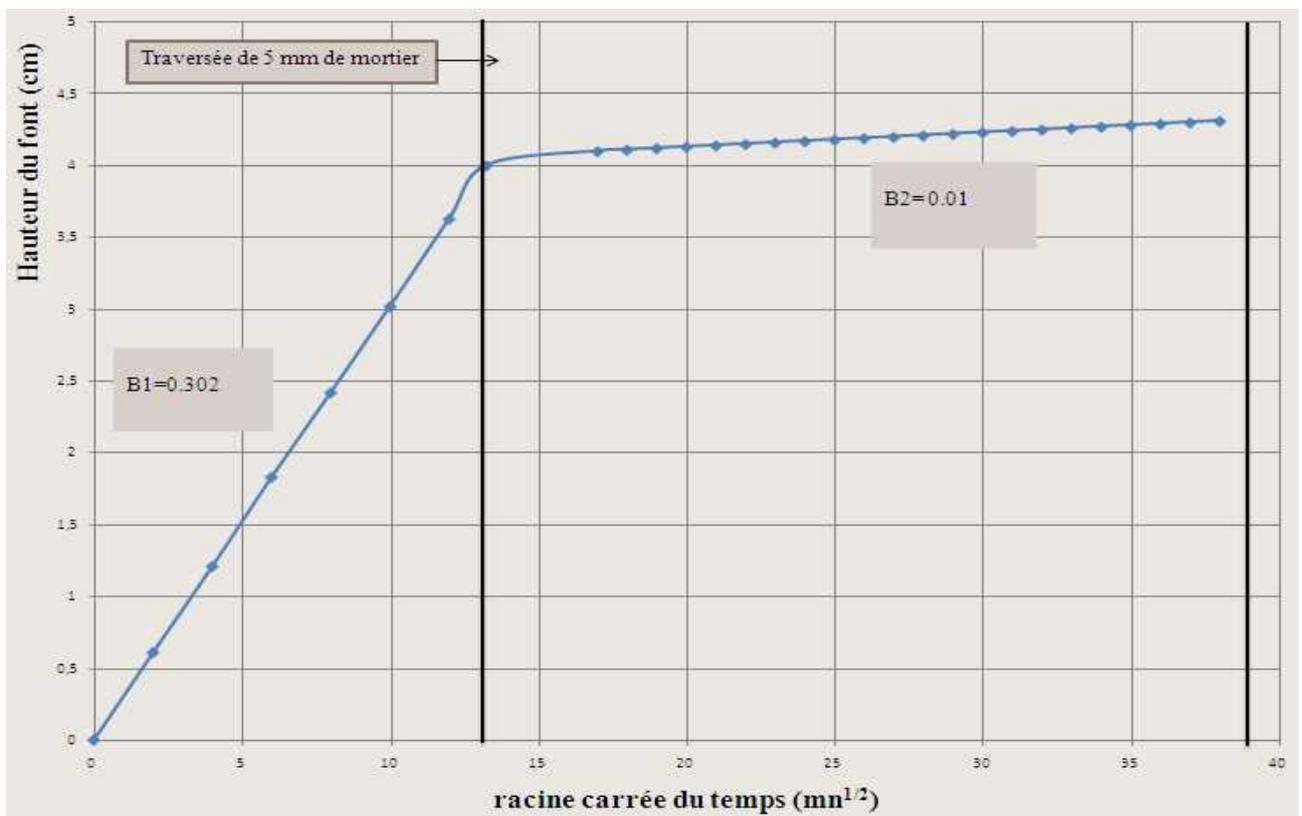
Anx. 17 Imbibition capillaire pour la série CB 03



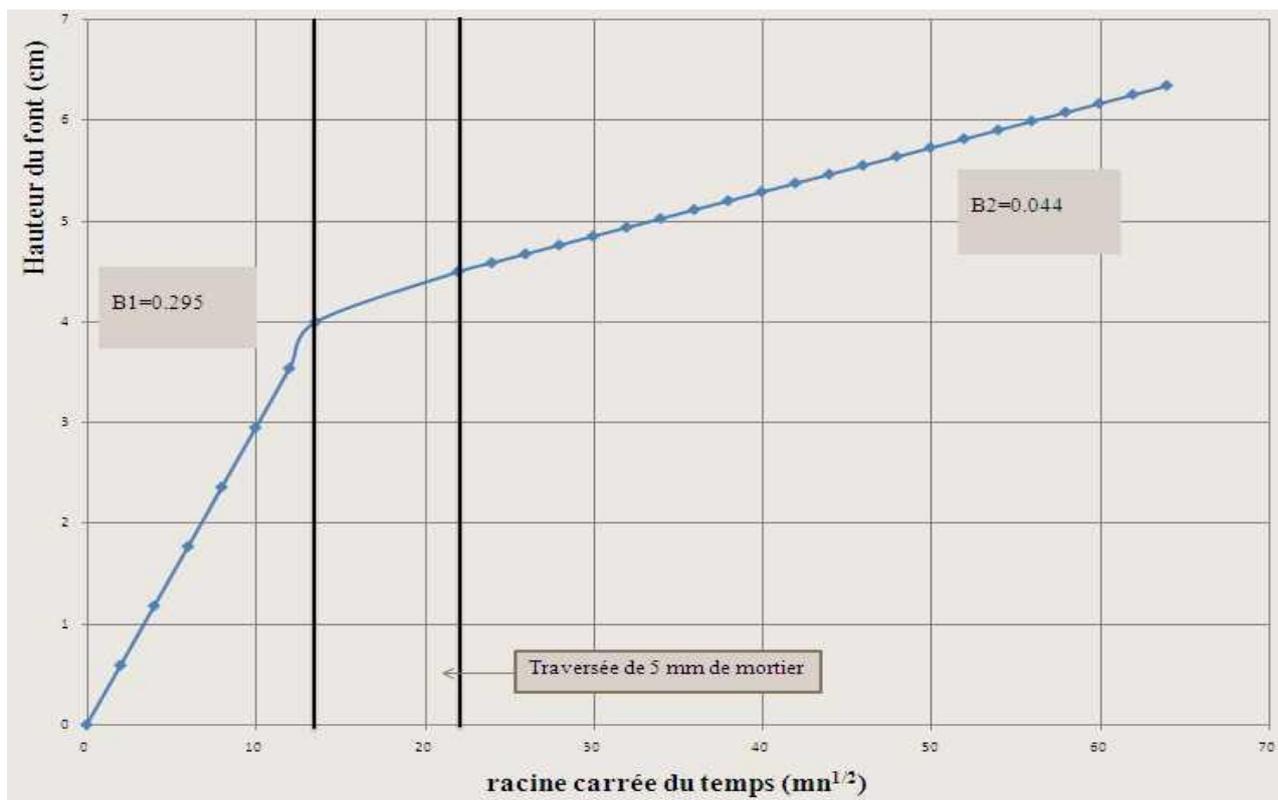
Anx. 18 Imbibition capillaire pour la série CB 04



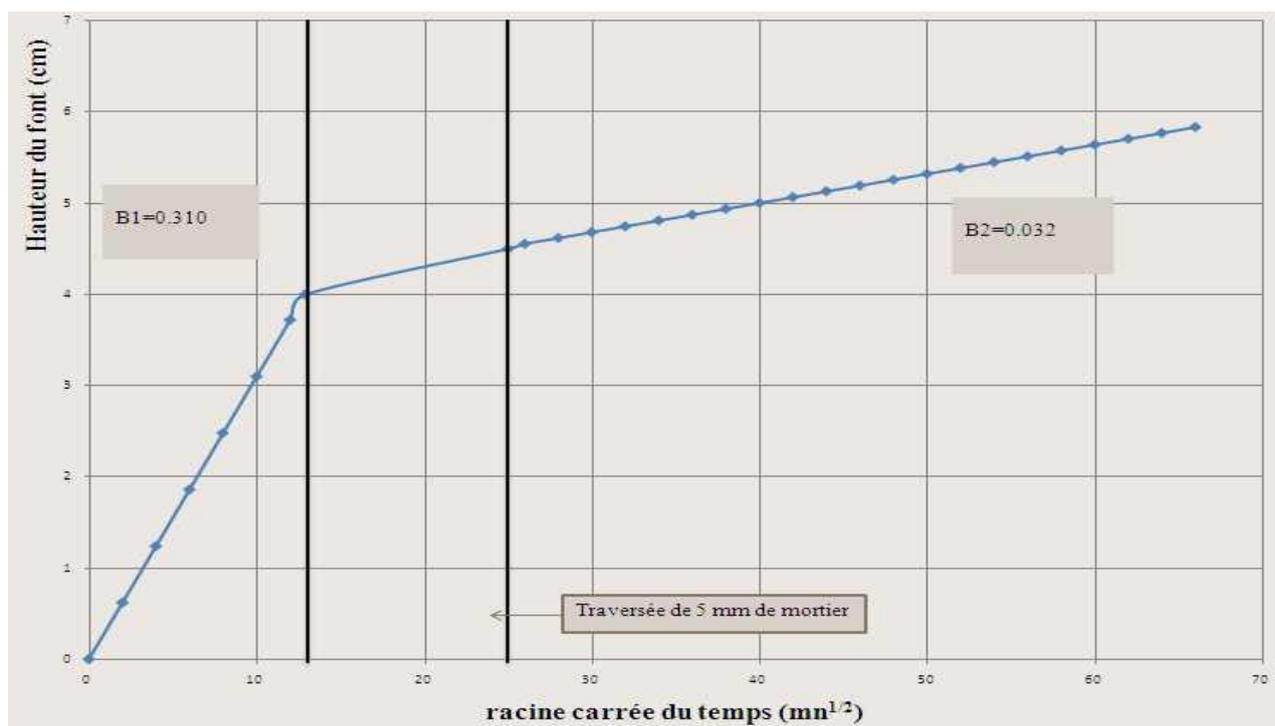
Anx. 19 Imbibition capillaire pour la série CC 01



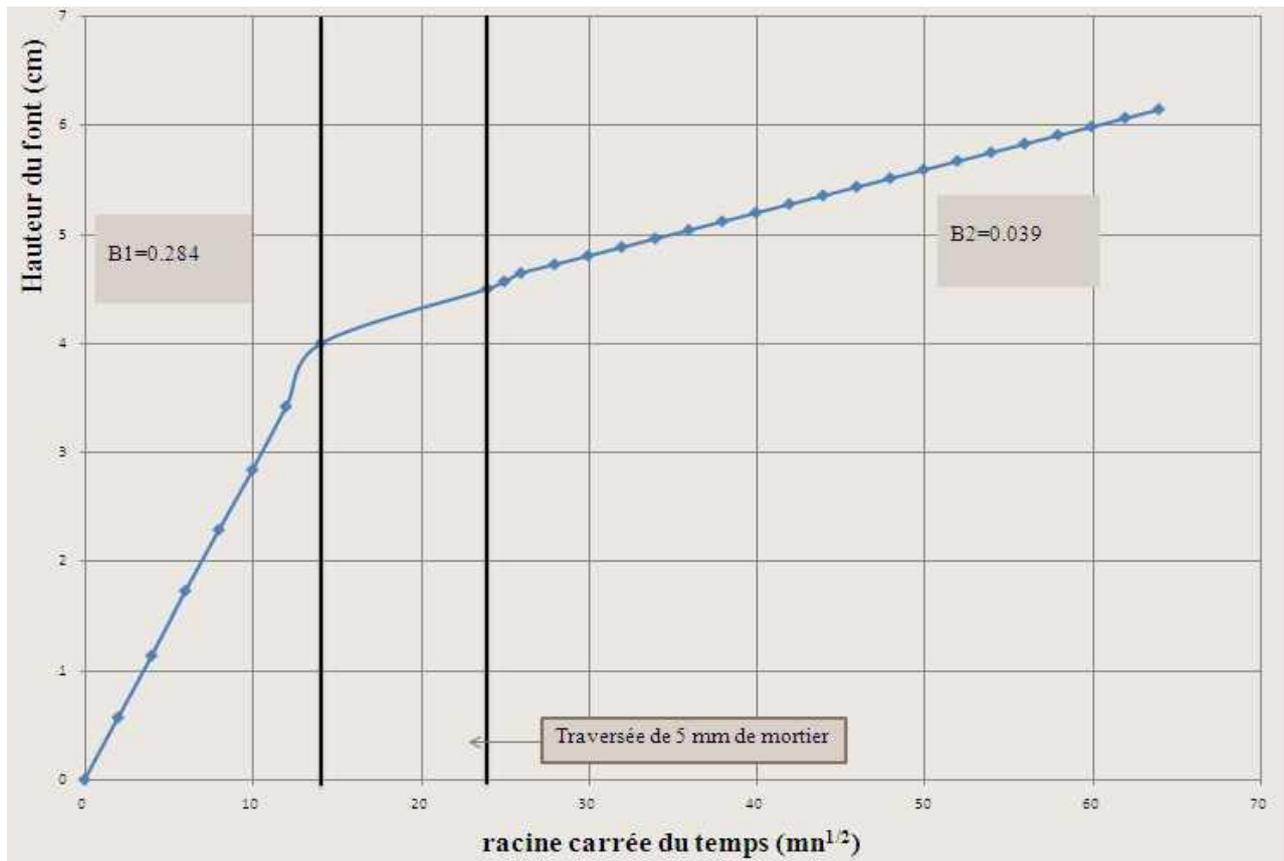
Anx. 20 Imbibition capillaire pour la série CC 02



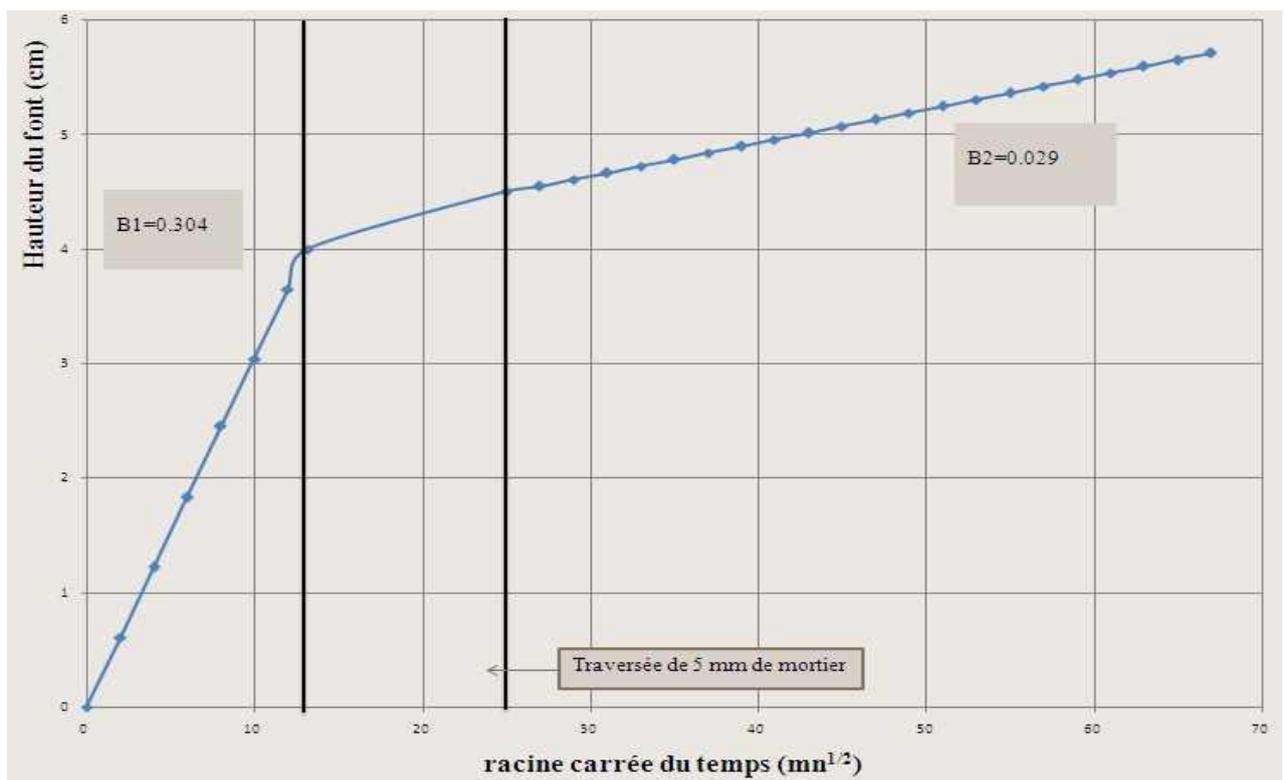
Anx. 21 Imbibition capillaire pour la série CD 01



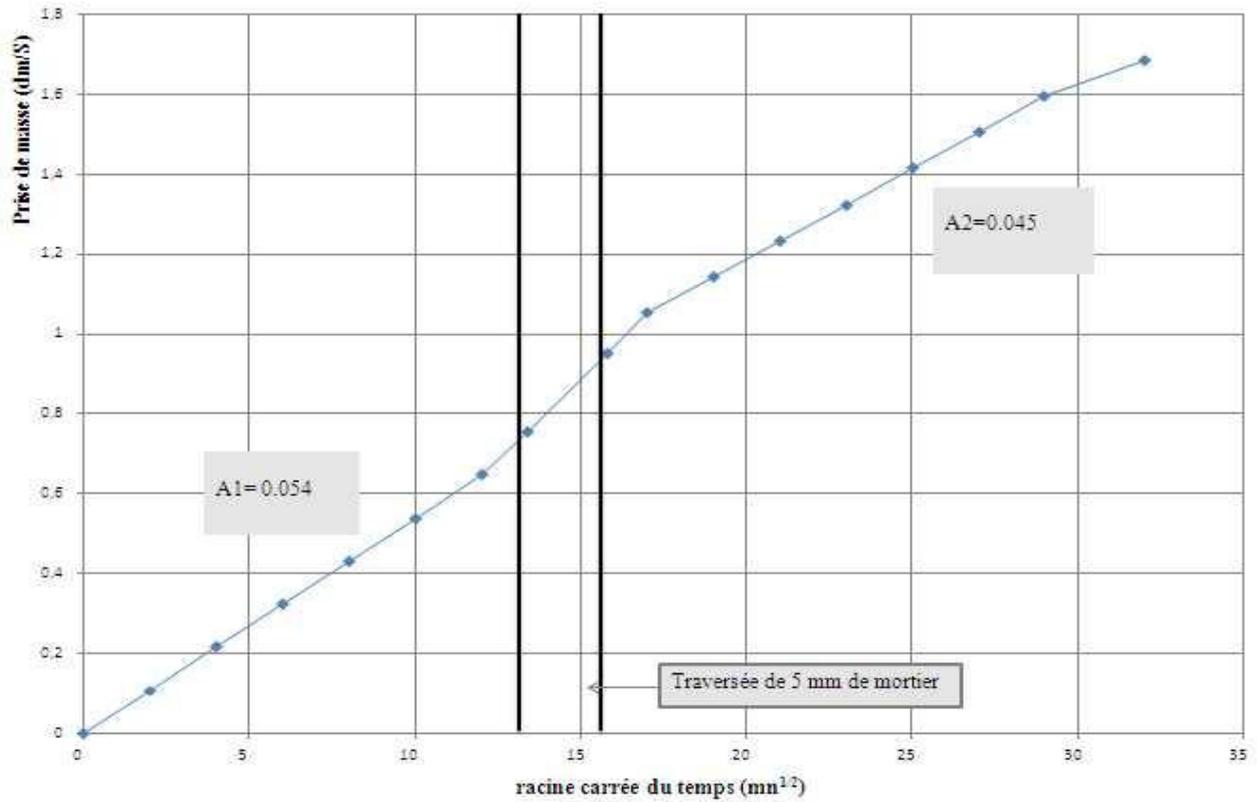
Anx. 22 Imbibition capillaire pour la série CD 02



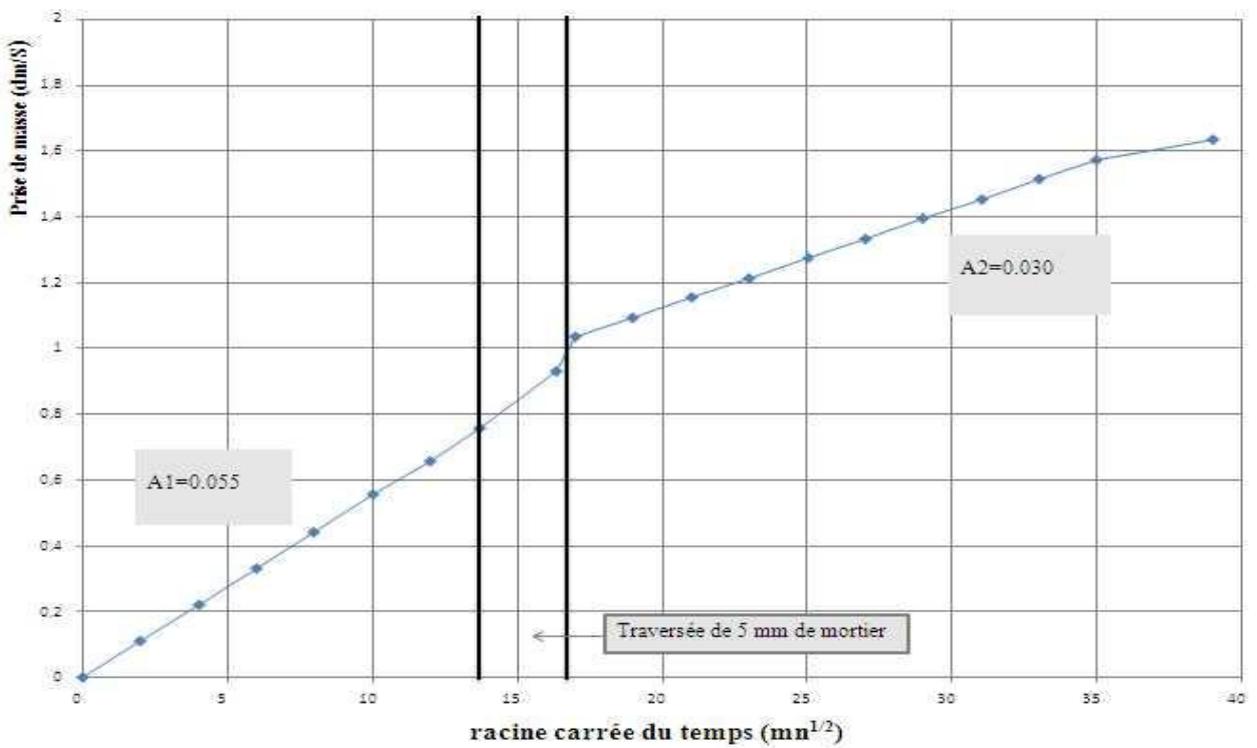
Anx. 23 Imbibition capillaire pour la série CD 03



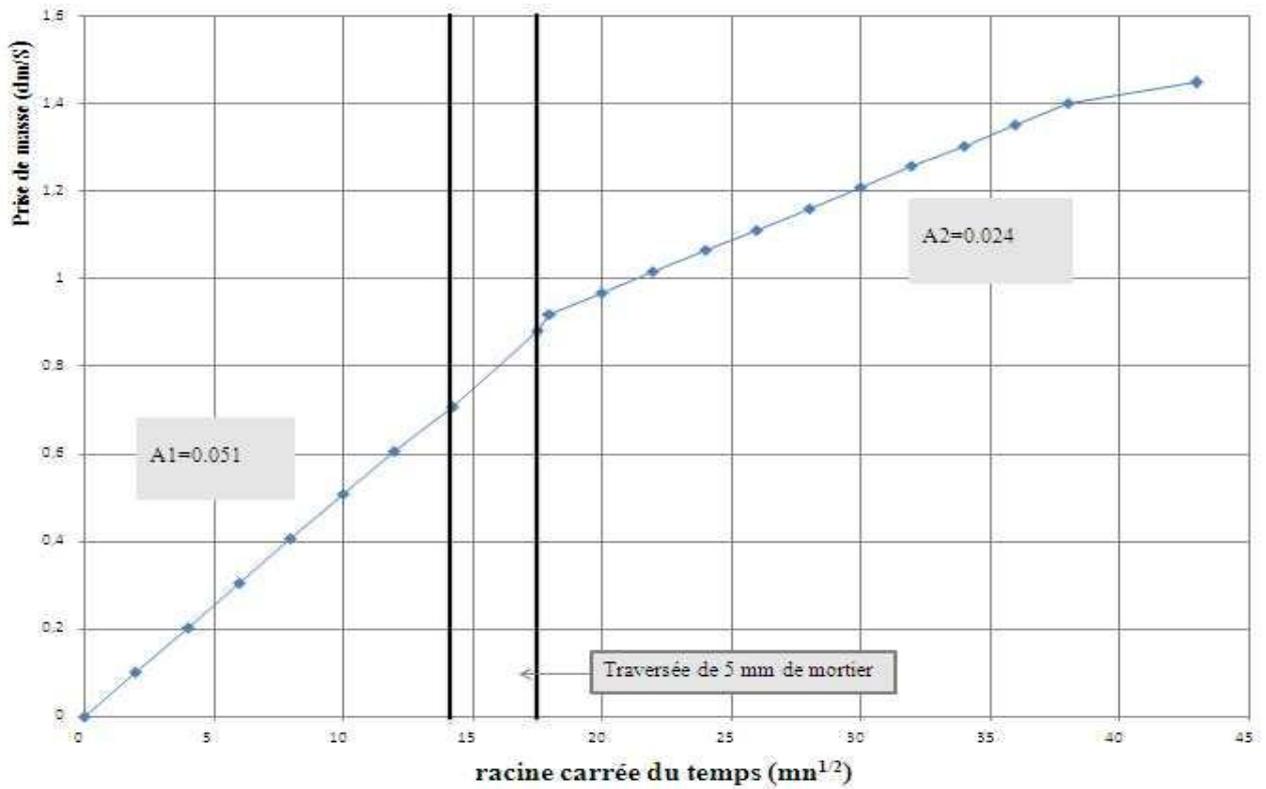
Anx. 24 Imbibition capillaire pour la série CD 04



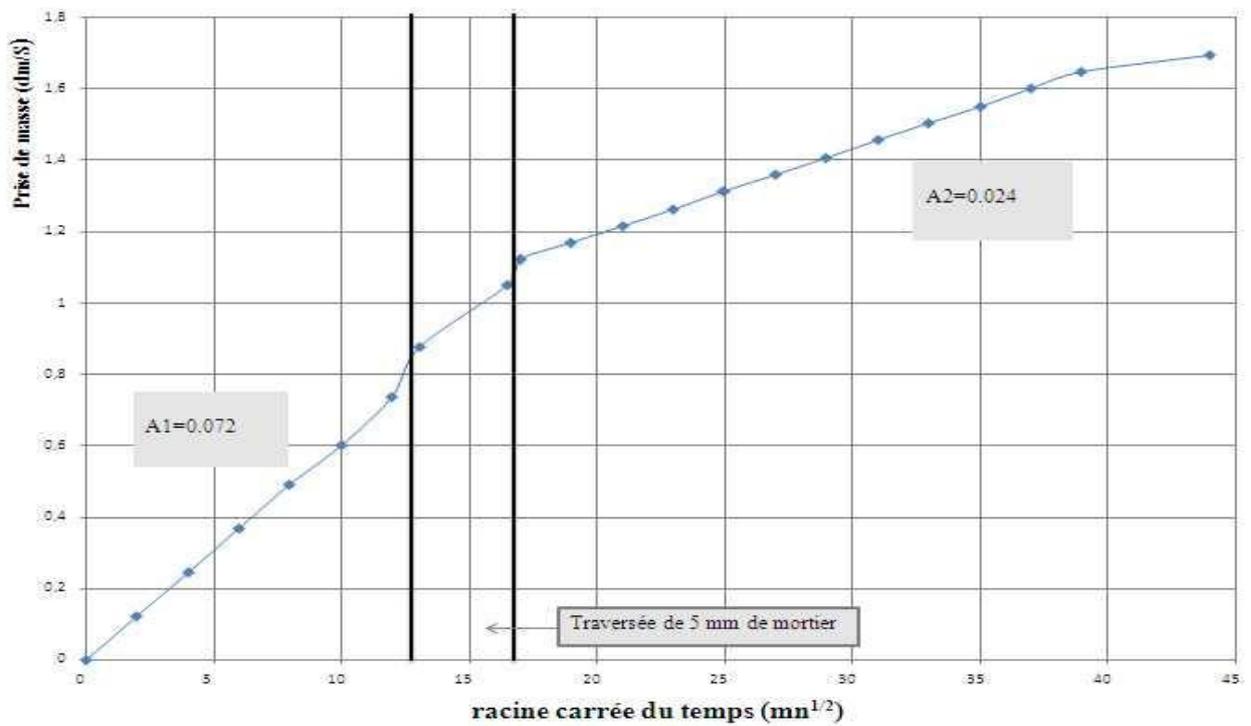
Anx. 25 Prise de masse par capillarité pour la série CA 01



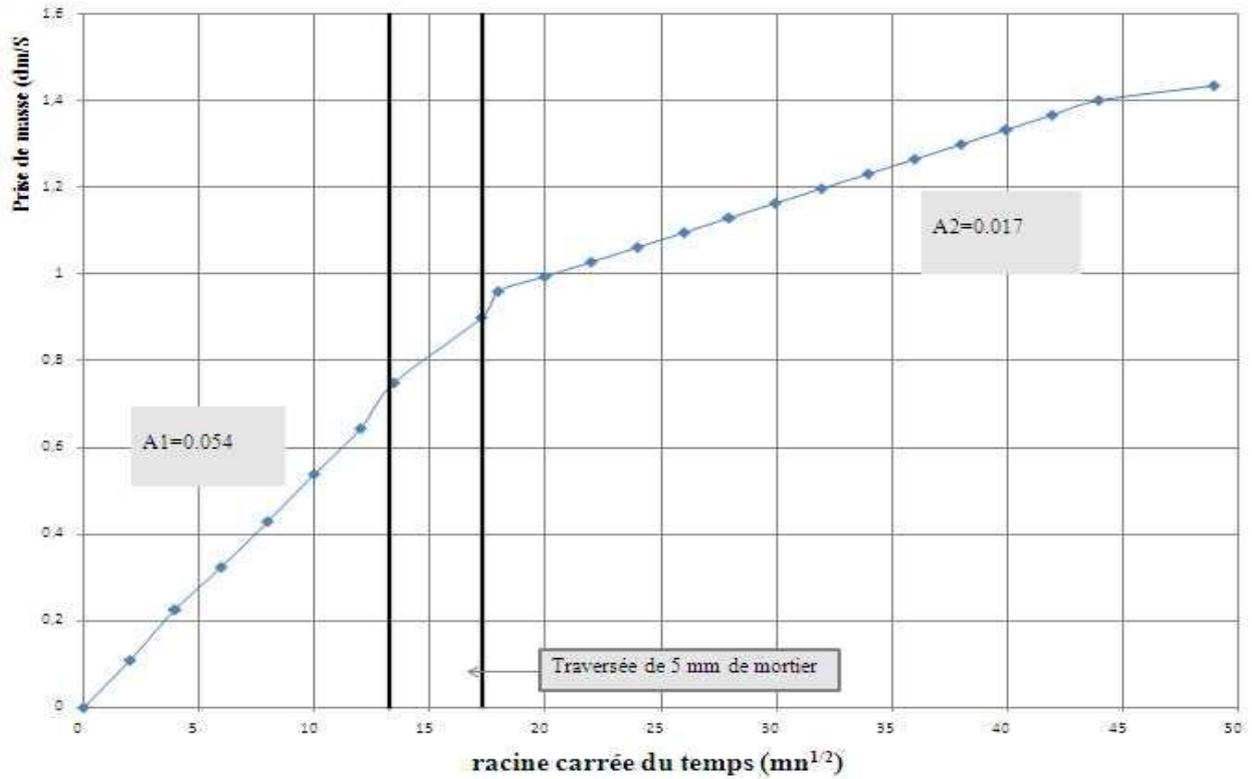
Anx. 26 Prise de masse par capillarité pour la série CA 02



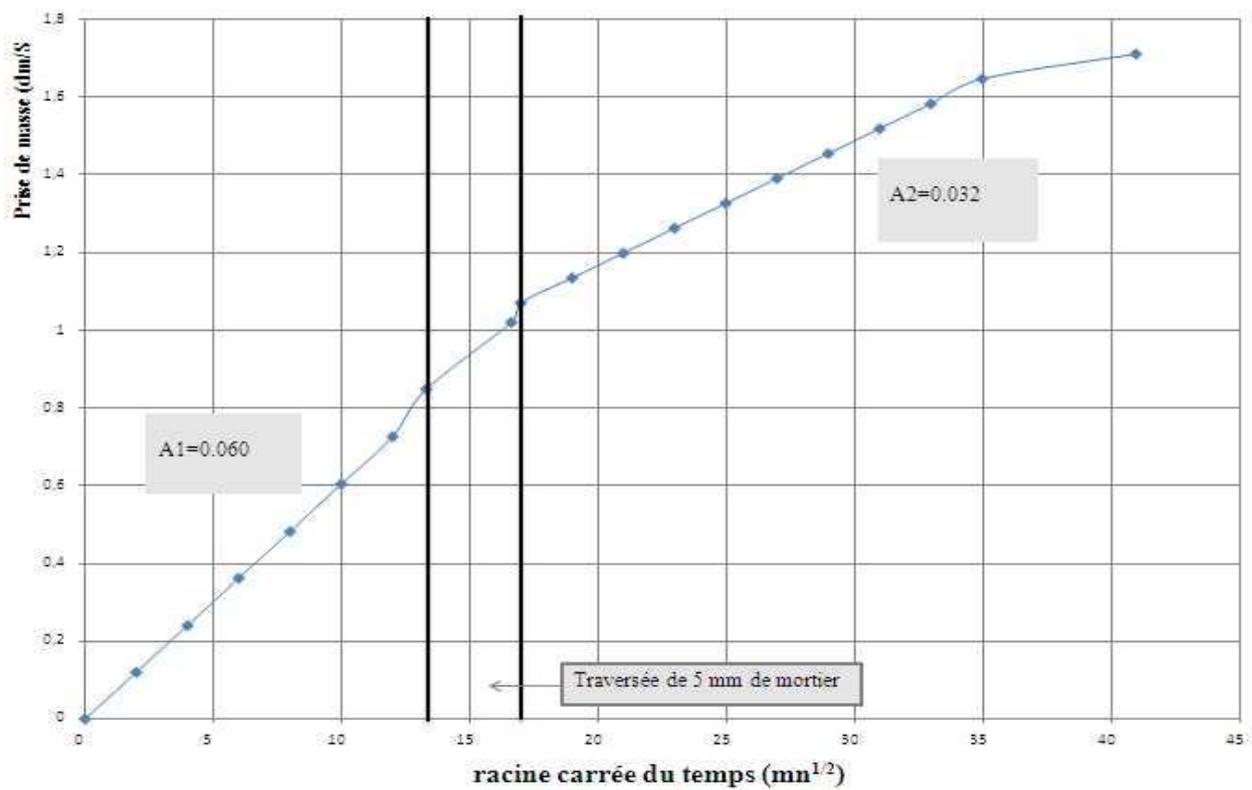
Anx. 27 Prise de masse par capillarité pour la série CA 03



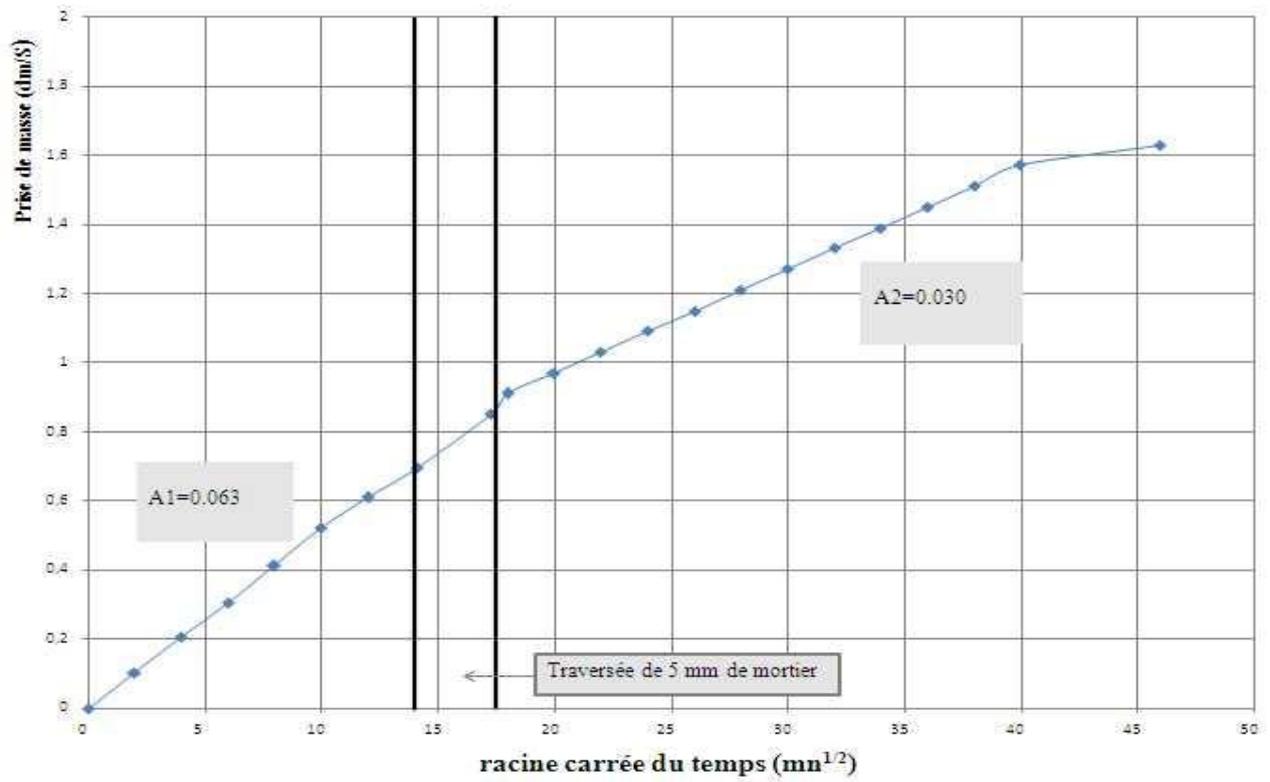
Anx. 28 Prise de masse par capillarité pour la série CA 04



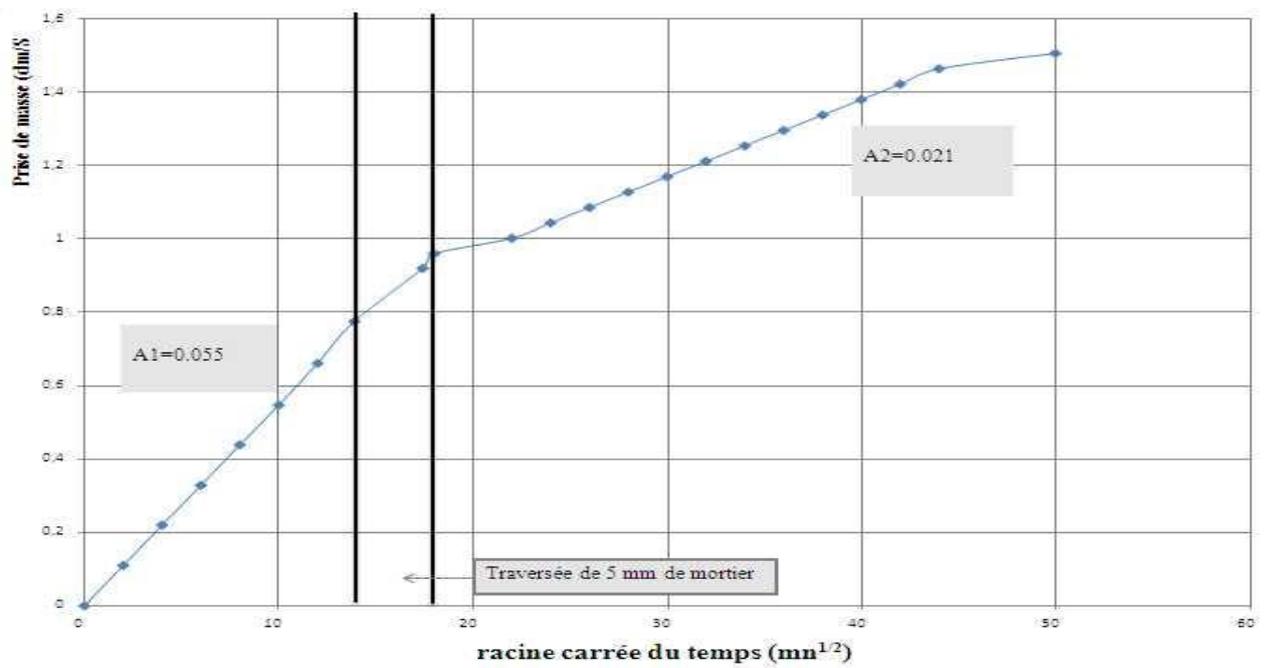
Anx. 29 Prise de masse par capillarité pour la série CA 05



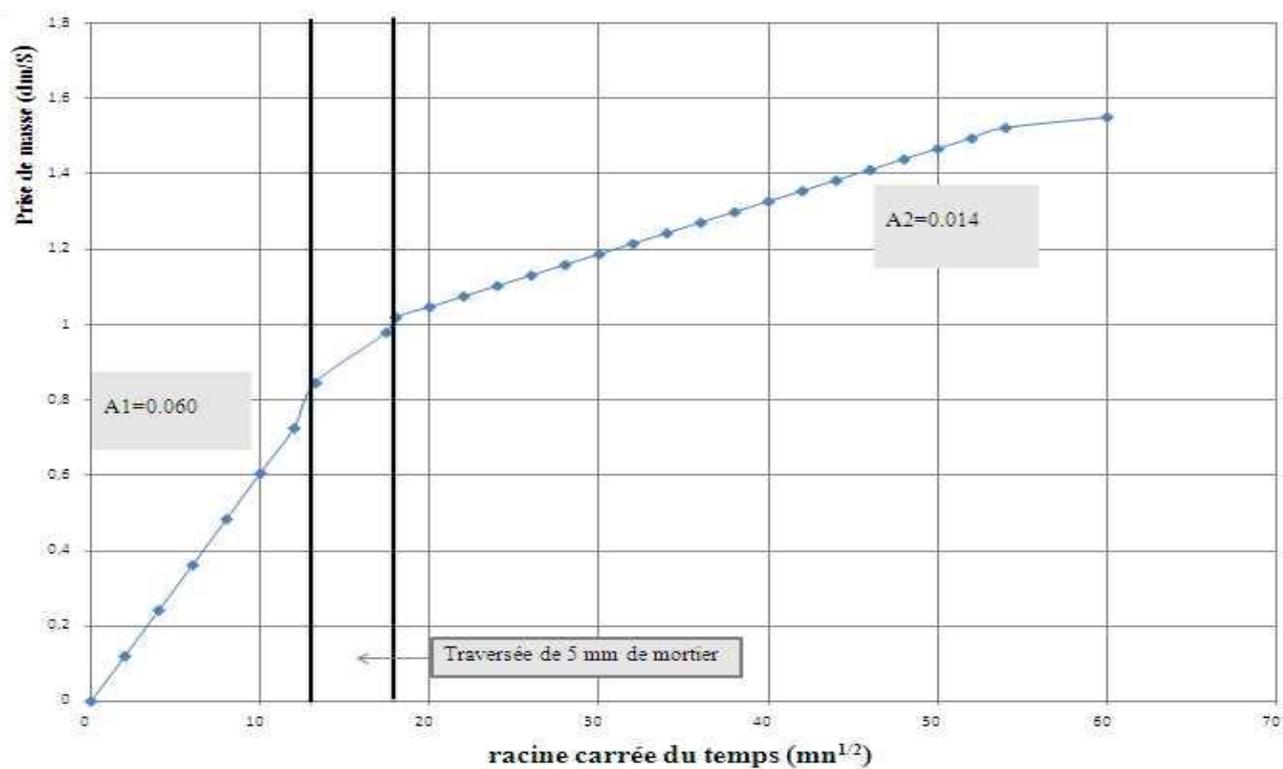
Anx. 30 Prise de masse par capillarité pour la série CB 01



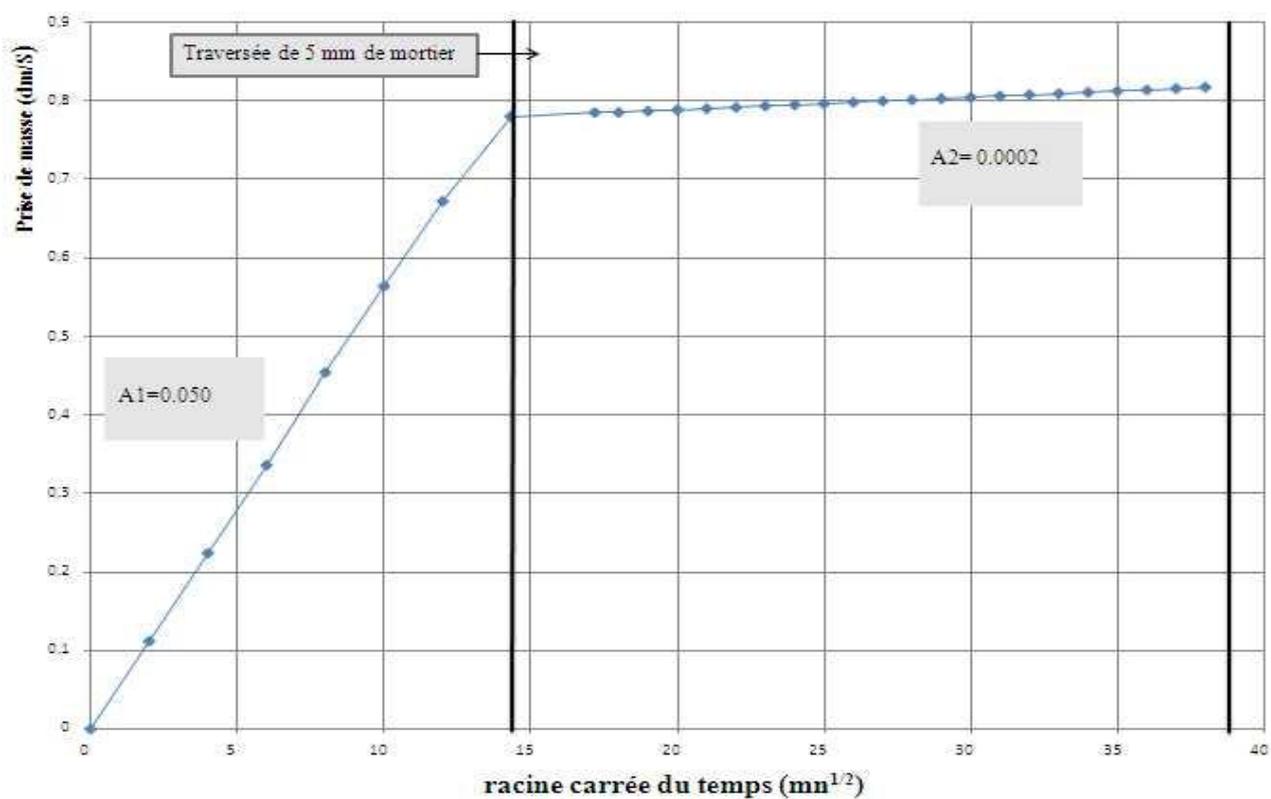
Anx. 31 Prise de masse par capillarité pour la série CB 02



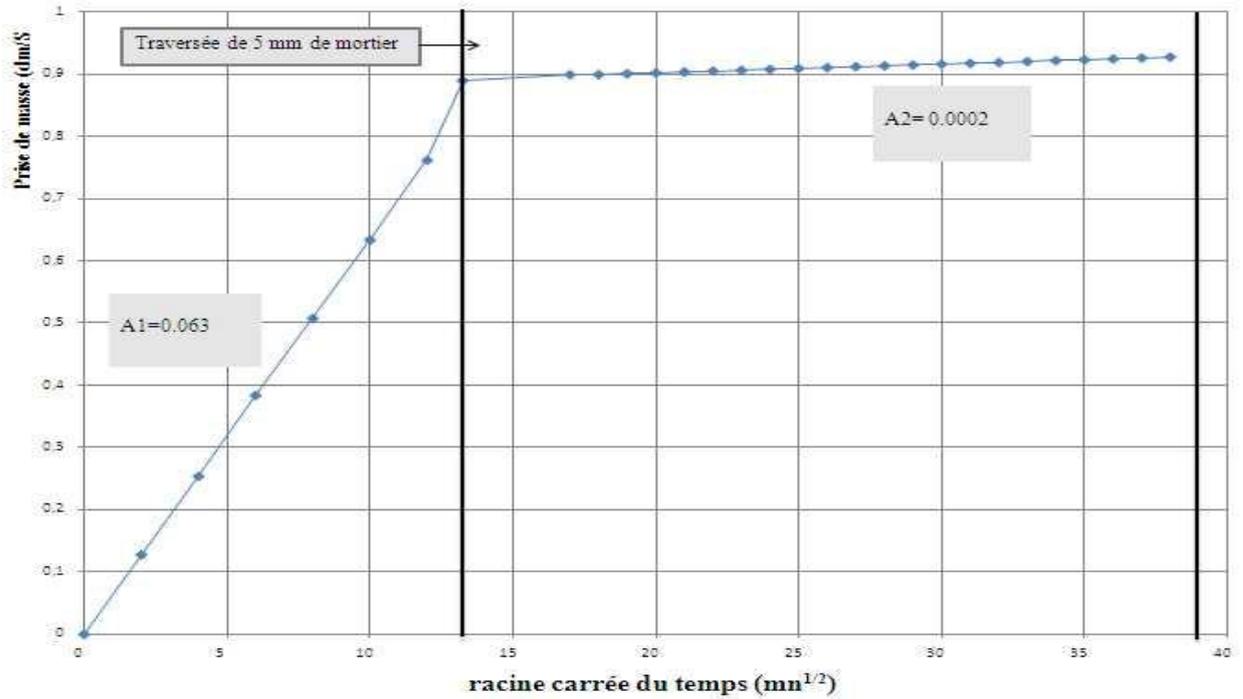
Anx. 32 Prise de masse par capillarité pour la série CB 03



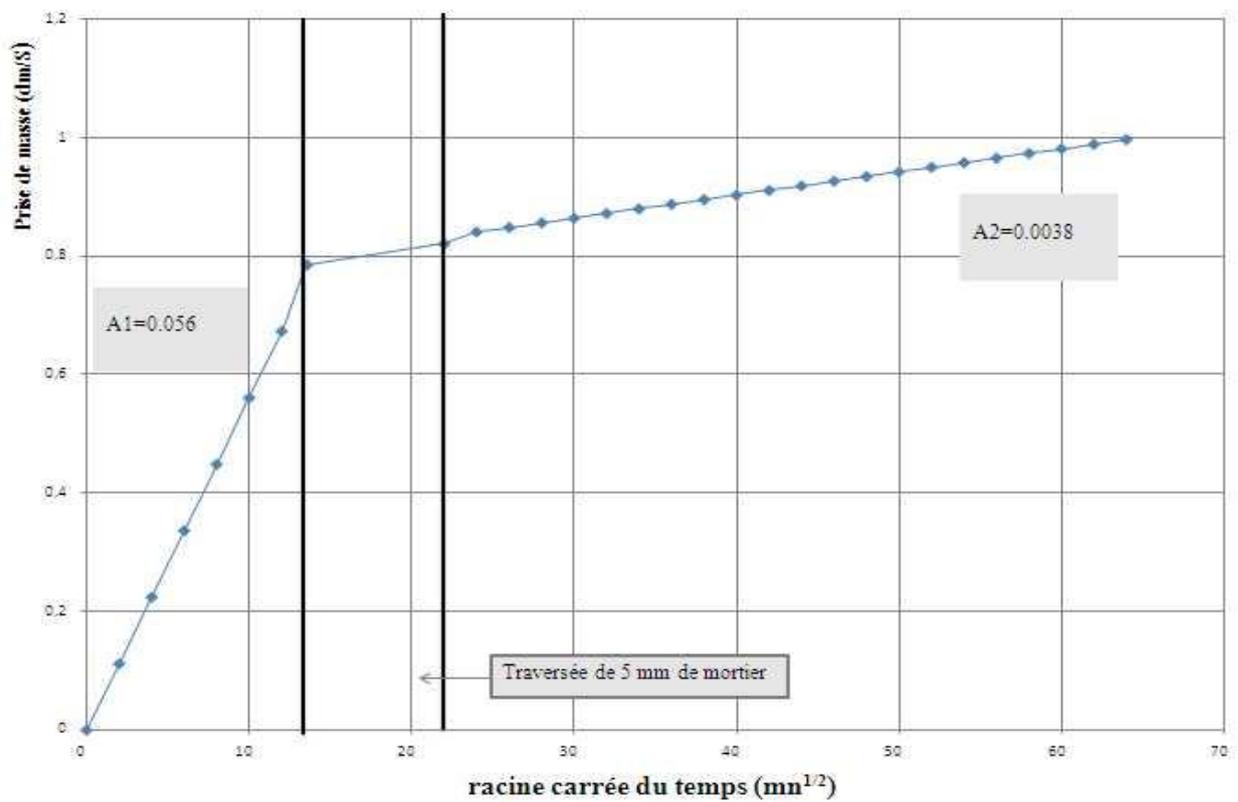
Anx. 32 Prise de masse par capillarité pour la série CB 04



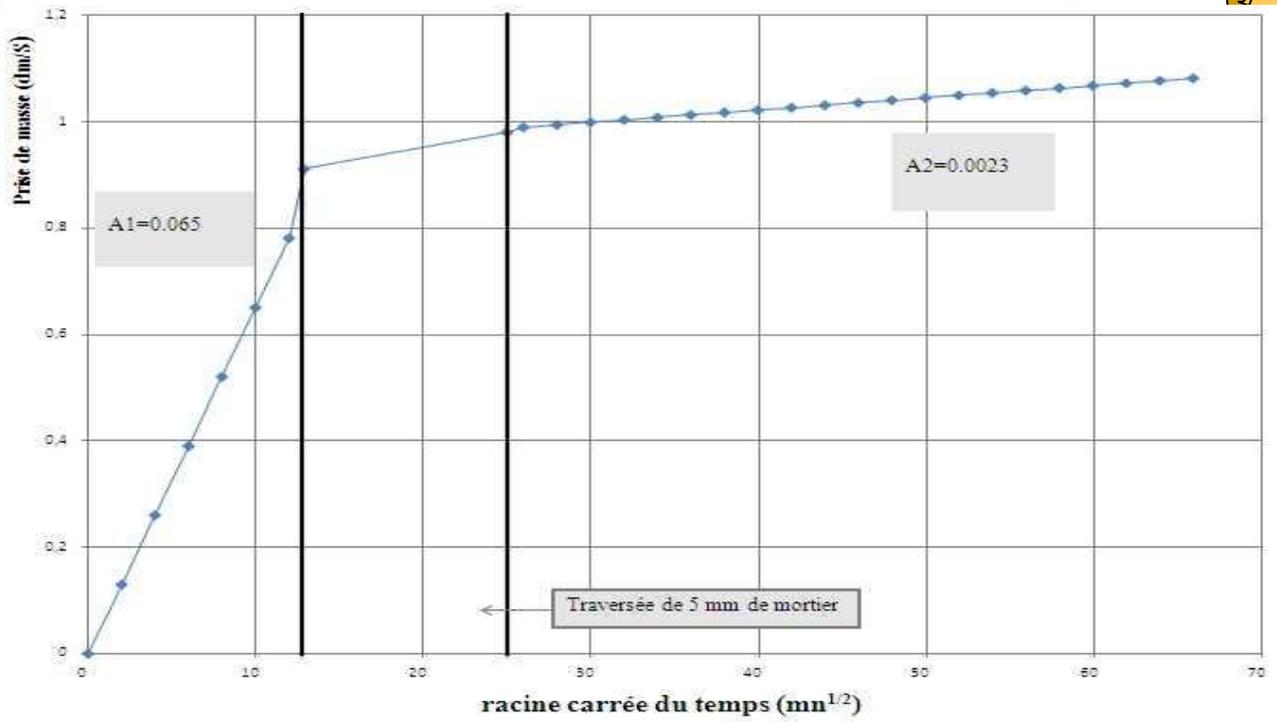
Anx. 33 Prise de masse par capillarité pour la série CC 01



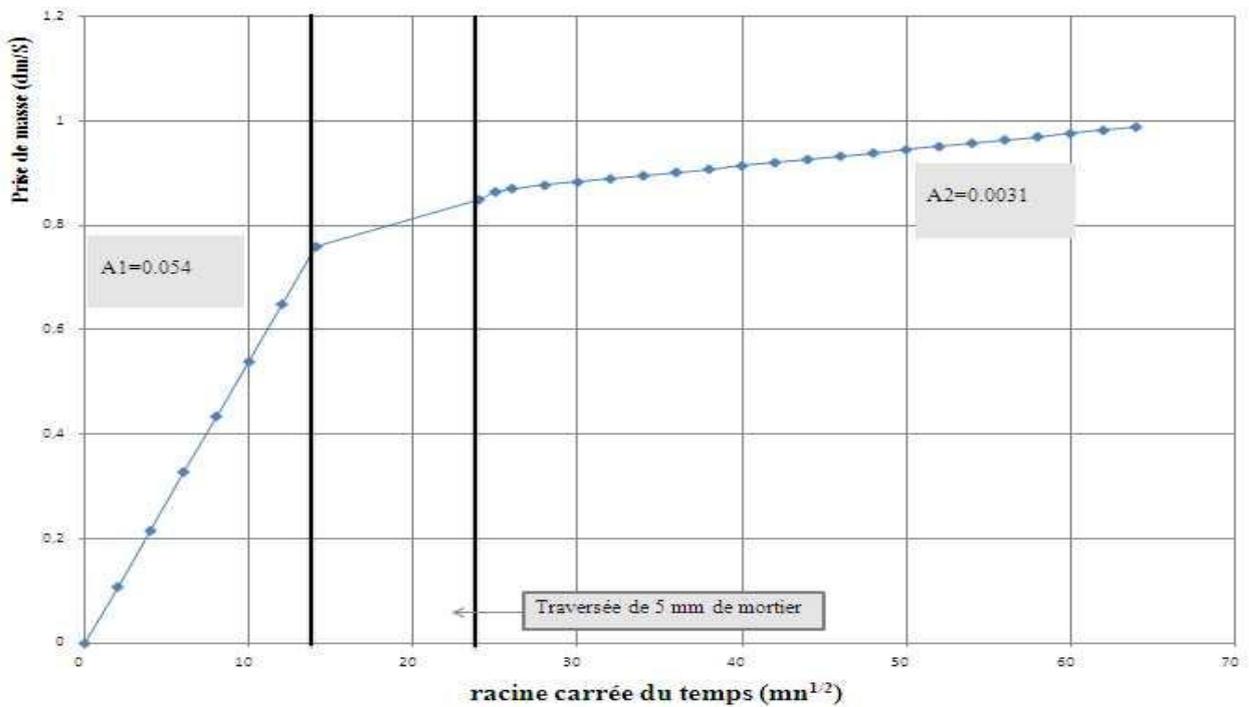
Anx. 34 Prise de masse par capillarité pour la série CC 02



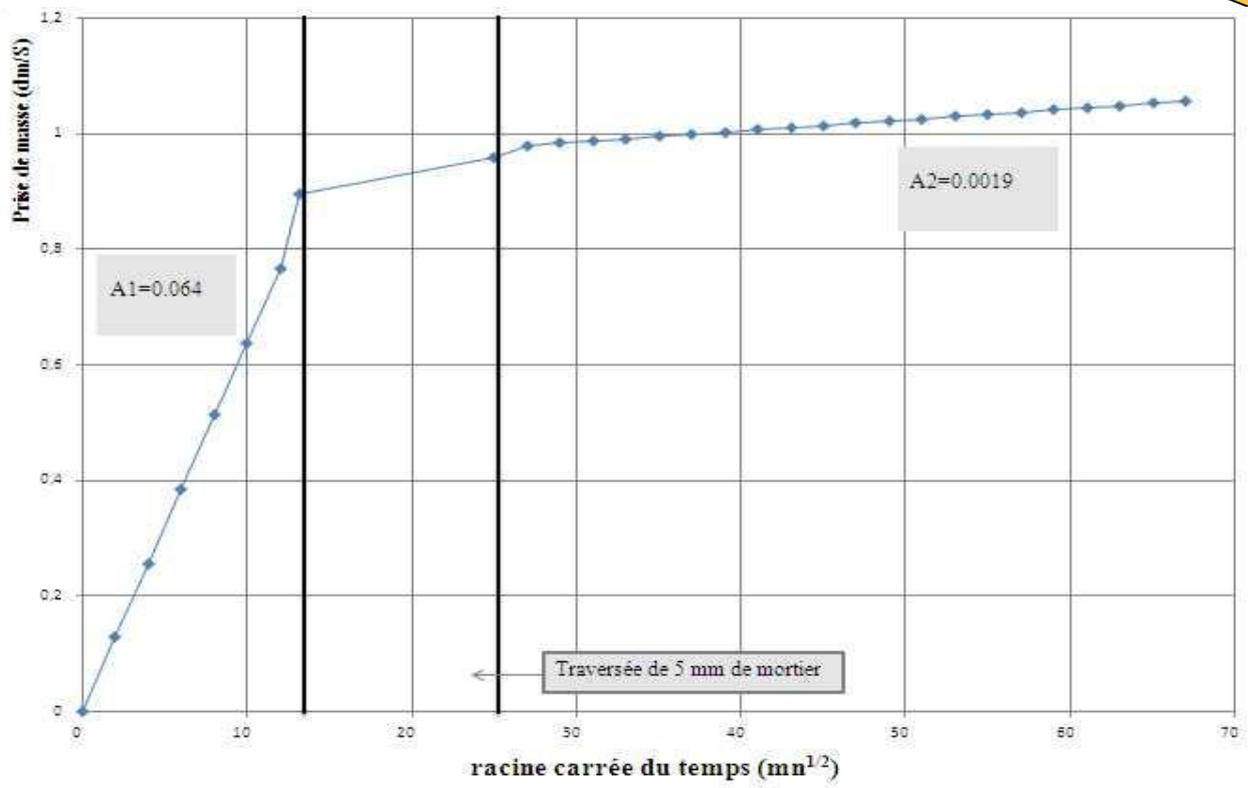
Anx. 35 Prise de masse par capillarité pour la série CD 01



Anx. 36 Prise de masse par capillarité pour la série CD 02



Anx. 37 Prise de masse par capillarité pour la série CD 03



Anx. 38 Prise de masse par capillarité pour la série CD 04

### Anx. 39 Fiche technique **chaux aérienne CL90**

**Caractéristiques :** La chaux aérienne CL90 est une chaux très pure, garantie sans adjuvant, issue d'une roche calcaire pure, choisie pour la force de ses qualités naturelles et son indice de luminance très élevé.

La calcination à 900°C du calcaire entraîne la formation de chaux vive et de gaz carbonique. L'extinction avec une quantité d'eau limitée produit une chaux en poudre.

**Production éthique :** cuisson de la roche au gaz naturel, aménagement environnemental du site d'extraction.

**Qualité :** Le choix d'une production industrielle, fidèle à la tradition, garantit une qualité suivie.

**Économie:** Le choix d'un matériau de très haute qualité à un prix accessible aux artisans et auto-constructeurs.

**La carbonatation :** La carbonatation est une réaction chimique très importante, spécifique à la chaux. Le mortier à la chaux aérienne commence sa carbonatation – sa prise – dès qu'il entre en contact avec l'air : l'hydrate de calcium contenu dans la chaux entre en contact avec le gaz carbonique. Il se produit une cristallisation sous forme de carbonate de calcium qui crée une fine pellicule de calcaire en surface, c'est ce qu'on appelle la carbonatation.

Ce processus peut prendre des heures ou des mois, il dépend de la composition de l'enduit, de son épaisseur et du taux d'humidité de l'air.

La prise aérienne de la chaux CL90 permet de conserver les enduits en seaux hermétiques, recouverts d'une couche d'eau que l'on retirera avant utilisation.

La pierre ponce – agrégat pouzzolanique La pierre ponce ajoutée aux mortiers de chaux aérienne renforce et dynamise la carbonatation. La structure poreuse de la pierre ponce apporte le gaz carbonique au cœur du mortier, favorisant la carbonatation en épaisseur.

Elle joue également un rôle de tampon hygrométrique en libérant progressivement l'eau qu'elle contient et permettant ainsi une prise lente de la chaux.

#### Données techniques :

- Norme européenne : CL90 S - EN459-1
- Nom chimique : Hydroxyde de calcium
- Formule chimique :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Densité : 400-600 Kg/m<sup>3</sup>
- Aspect : poudre fine blanche
- Réaction alcaline forte à dissolution aqueuse.
- Indice de luminance : 96,9/100 - Indice A : 0,3 - Indice B : 1,6

## Anx. 40 Fiche technique **chaux Boehm NHL2 chaux hydraulique naturelle**

### Utilisation :

Chaux hydraulique traditionnelle, utilisée depuis des millénaires et perpétuant le savoir-faire. Naturelle et écologique, elle est fabriquée par l'action du feu et de l'eau sur la pierre calcaire contenant de l'argile silicieuse.

Il existe trois types de chaux hydrauliques, déterminés par le pourcentage de silice qu'elle contient. La NHL2 est faiblement hydraulique avec un taux d'argile inférieur à 8%, elle garde ainsi ses caractéristiques de respiration tout en offrant une dureté et une résistance mécanique supérieure à la chaux aérienne.

La chaux hydraulique fait sa prise en deux temps : une première prise hydraulique (au contact de l'eau de gâchage) puis une seconde prise aérienne.

Bactéricide, antistatique, durable, elle se fortifie dans le temps en continuant de durcir.

Respiration des supports : La structure microporeuse du mortier de chaux permet le cheminement naturel de l'humidité, de l'intérieur vers l'extérieur.

Excellent régulateur hygrométrique, elle évite la condensation. Souplesse et plasticité, évite la fissuration. Excellent ignifuge à 800°C.

### Mise en œuvre et données techniques :

La chaux hydraulique est essentiellement recommandée dans l'élaboration des mortiers à bâtir. Fondations cyclopéennes et sous-bassement, gobetis, jointement et enduits sur murs de pierre, chapes de carrelage, pose de terres cuites. Scellement des tuiles de faîtage et de rive.

Pour une meilleure carbonatation et une gestion optimale de l'hygrométrie, il est conseillé de la préparer avec au moins un volume de poudre de pierre ponce par volume de chaux NHL2.

Pour les dalles de rez-de-chaussée et les chapes de ragréage, le mortier chaux NHL2 et pierre ponce crée un véritable soin aux problèmes d'hygrométrie, l'humidité n'est pas bloquée, elle est régulée et ne remonte plus dans les murs.

Caractéristiques	Valeur	Normes
CO <sub>2</sub>	<7%	<20%
SO <sub>3</sub>	<0,5%	<3%
Chaux libre (CaO)	>20%	>15%
Finesse refus à 200µm	<1%	<2%
Finesse refus à 90µm	<3%	<7%
Eau libre (teneur en humidité)	<0,5%	<2%
Masse volumique apparente (Kg/dm <sup>3</sup> )	0,6	entre 0,4 et 0,8
Temps du début de prise (en heure)	4 - 6 heures	>1 et <15 heures
Stabilité en mm	<2	<2,5
Résistance mécanique à la compression (N/mm <sup>2</sup> ) à 28 jours	3,5	2 à 5

### **Anx. 41 Fiche technique **chaux hydraulique naturelle pure NHL5****

La chaux hydraulique naturelle pure Calcia est le produit de la cuisson de calcaire siliceux. L'oxyde de calcaire CaO obtenu est éteint par addition d'eau, ce qui le réduit en poudre. Il est ensuite finement broyé.

La chaux naturelle pure Calcia est une NHL 5, conforme à la norme NF EN 459-1, fabriquée dans nos fours à chaux, sous système de management de la qualité, certifiés AFAQ ISO 9001, version 2000.

#### **Caractéristiques mécaniques :**

Le mortier de chaux naturelle pure NHL 5 obtient ses résistances en 2 temps :

- une prise initiale de type hydraulique (avec l'eau), grâce à la présence de silice qui permet de bonnes résistances mécaniques à court terme.
- une prise secondaire, dite aérienne (avec l'air), grâce à la présence de calcaire pur qui limite le retrait et développe les résistances mécaniques à long terme.

Le taux de chaux aérienne hydratée présent est de l'ordre de 30 %, très supérieur aux exigences de la norme (9 %).

#### **Caractéristiques physiques :**

Le début de prise est de l'ordre de 2 heures,

La finesse, très élevée, est de 8000 à 10 000 cm<sup>2</sup> /g de surface Blaine.

La chaux naturelle pure NHL 5 s'adapte très bien aux différents supports et tout particulièrement au bâti ancien.

Elle favorise les échanges gazeux à l'intérieur des murs qui «respirent» et de ce fait régule l'humidité à l'intérieur des habitations. Elle contribue au confort des habitations en participant à l'isolation thermique et physique.

Elle possède des propriétés désinfectantes. Sa mise en place est rendue très agréable grâce à la finesse de son grain qui donne des mortiers souples et onctueux et qui adhèrent bien au support.

#### **Domaine d'application :**

La chaux naturelle pure NHL 5 permet la réalisation de mortiers traditionnels, recommandés dans la restauration et la réhabilitation de bâtiments anciens :

- montage de pierres et de briques,
- rejointoiement,
- pose de tuiles et enduits.

## Anx. 42 Fiche technique **Super-plastifiant haut réducteur d'eau**

### • DESCRIPTION

Un super-plastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de poly carboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Il permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super-plastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Il ne présente pas d'effet retardateur.

### • CARACTERISTIQUES

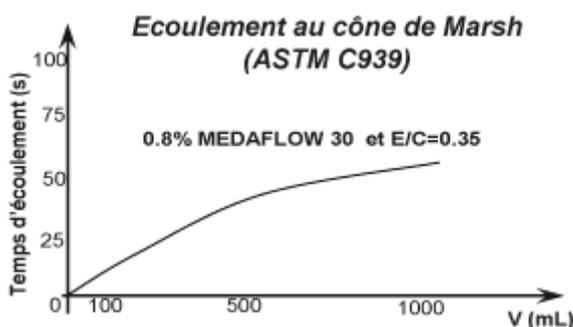
- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... Jaunâtre
- pH ..... 6 – 6,5
- Densité .....  $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec ..... 30%

### • PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés il permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité
- une très bonne maniabilité
- un long maintien d'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton



Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Désignation	Rc (MPa)		
	3J	7J	28J
MEDAFLOW 30 (1.4%)	39.2	54.7	62,2

**• DOMAINES D'APPLICATION**

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - plaçant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux.

**• DOSAGE**

Plage de dosage recommandée :

0,5 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.5 à 1.850 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

**• MODE D'EMPLOI**

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

**• CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE**

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10Kg, et en fûts de 210 Kg et 240 Kg.

**• DÉLAI DE CONSERVATION**

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

**• PRECAUTIONS D'EMPLOI**

Manipulation non dangereuse.

Se référer aussi à la fiche de données de sécurité.