



**HAL**  
open science

# Caractérisation taxinomique des cotons (*Gossypium* spp.) par analyses morphologique et morphométrique des graines. Approche exploratoire et applications archéologiques

Juliette Milon

► **To cite this version:**

Juliette Milon. Caractérisation taxinomique des cotons (*Gossypium* spp.) par analyses morphologique et morphométrique des graines. Approche exploratoire et applications archéologiques. *Archéologie et Préhistoire*. 2018. dumas-01878090

**HAL Id: dumas-01878090**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01878090>**

Submitted on 17 Oct 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Muséum national d'histoire naturelle, Paris  
Laboratoire de l'UMR 7209, Sociétés pratiques et environnements  
Master Evolution, Patrimoine Naturel et Sociétés  
Spécialité Quaternaire et Préhistoire

**Caractérisation taxonomique des cotons (*Gossypium* spp.) par analyses morphologique et morphométrique des graines. Approche exploratoire et applications archéologiques**

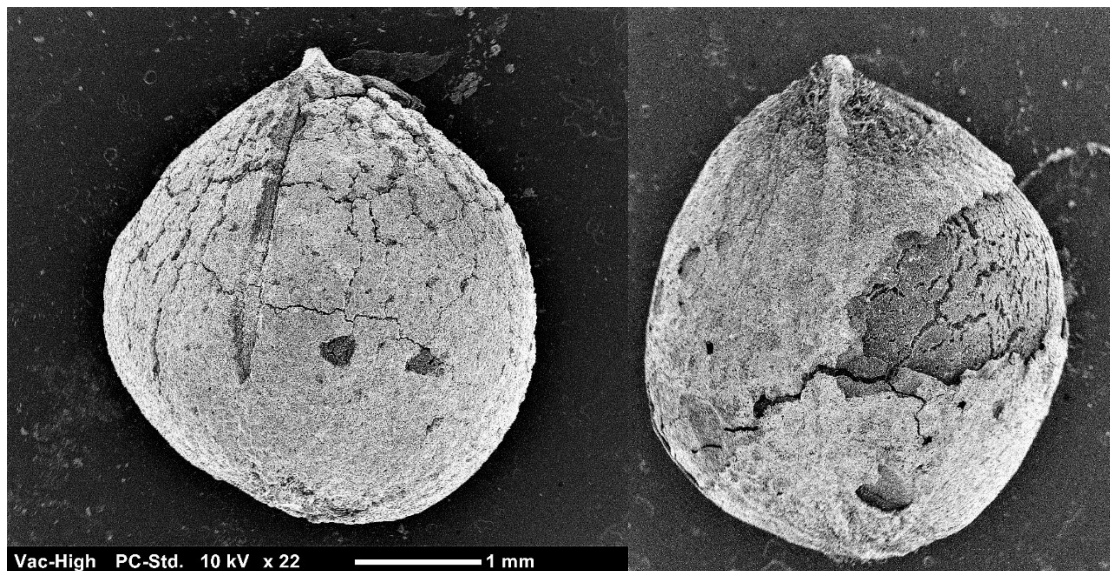
---

Mémoire de deuxième année de Master spécialité Quaternaire et Préhistoire

Juliette Milon

Sous la direction de

**Bouchaud Charlène et Cucchi Thomas**



Figures de couverture : à gauche, Graine de coton du site de Mouweis (Soudan) vue au MEB (MWS14\_3023\_Bot1\_2), 138-332 ap. J.-C. © J. Milon

A droite, Graine de coton du site de Madâ'in Sâlih (Arabie Saoudite) vue au MEB (MS\_10192\_G2), 4<sup>ème</sup> – 5<sup>ème</sup> siècles ap. J.-C. © J. Milon

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de mémoire, Charlène Bouchaud qui m'a toujours soutenue, pour toute la connaissance partagée, sa disponibilité, sa patience et sa gentillesse au cours de ces deux dernières années. Et Thomas Cucchi pour sa présence et son soutien, son secours salutaire en morphométrie, pour R et les statistiques...

Merci également à toute l'équipe de l'UMR 7209 et sa directrice Margareta Tengberg, et Marie-Pierre Ruas, pour l'accueil, le soutien et l'écoute notamment de tous les doctorants, ce qui a rendu mon stage agréable et constructif. Merci à Michel Lemoine pour son aide à l'expérimentation de carbonisation, les photographies MEB et sa bonne humeur depuis deux ans. Merci à Aurélie Salavert de supporter les longues conversations et réunions dans son bureau...toujours avec bonne humeur.

Merci à Marine Durocher pour le partage des clefs toujours arrangeant, le réconfort et les conseils avisés.

Merci à Amandine Blin pour sa présence, sa gentillesse et son écoute pendant les longues heures de prises de photographies. Merci à Didier Geffard-Kuriyama pour son intérêt, les discussions et le temps passé à prendre des photographies. Merci à Cécile Callou pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Merci à Christophe Viot du CIRAD de Montpellier pour les échantillons et son intérêt dans cette étude, et merci à Elena Peláez Andérica pour les échantillons de Las Chapatales.

Merci également à l'équipe de l'Herbier et tout particulièrement Vanessa Invernón et Serge Muller pour leur accueil d'une chaleureusement bienveillance et leurs explications botaniques à une archéologue...

Je tiens aussi à remercier les équipes de fouilles des sites de Mouweis et de Madâ'in Sâlih et leurs directrices, Marie Millet (département des Antiquités égyptiennes, Louvre) et Laïla Nehmé (directrice de recherches au CNRS). Je tiens tout particulièrement à remercier l'équipe de post-fouilles de la mission de mars 2018 qui m'ont beaucoup appris et apporté, ce fut un grand bol d'air et de soleil pendant ce stage de mémoire.

D'autre part, je tiens à présenter toute ma reconnaissance aux relecteurs, mes amis qui m'ont soutenu, mon père et Rémi pour leur soutien inconditionnel, et le temps passé sur R





## Table des matières

<b>1. Introduction et présentation du sujet</b>	<b>3</b>
<b>2. Le coton : présentation générale</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Phylogénie et domestication des cotons</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Quelques données agronomiques</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Description générale des fibres et des graines</b>	<b>7</b>
<b>3. Présentation des sites archéologiques de l'étude</b>	<b>10</b>
<b>3.1. Le choix des sites archéologiques de l'étude</b>	<b>10</b>
<b>3.2. MADÂ'IN SÂLIH</b>	<b>12</b>
3.2.1. Présentation générale du site archéologique	12
3.2.2. Description de l'organisation du site archéologique	14
3.2.3. Paysages, systèmes de cultures et d'élevage et activités textiles antiques à Madâ'in Sâlih	14
<b>3.3. MOUWEIS</b>	<b>16</b>
3.3.1. Présentation générale du site archéologique	16
3.3.2. Description de l'organisation du site archéologique	18
3.3.3. Paysages, systèmes de cultures et d'élevage et activités textiles antiques à Mouweis	18
<b>4. Matériel et méthodes</b>	<b>20</b>
<b>4.1. Description du matériel d'étude</b>	<b>20</b>
4.1.1. Les graines de coton moderne issues de récoltes récentes	20
<b>4.2. Les graines de l'Herbier</b>	<b>22</b>
4.2.1. Description et géolocalisation des spécimens de l'Herbier	23
4.2.2. Vérification des identifications des spécimens de l'Herbier par l'observation des caractères discrets	24
4.2.3. Sélection des spécimens de l'Herbier	26
<b>4.3. Carbonisations expérimentales (coton moderne)</b>	<b>27</b>
<b>4.4. Matériel archéologique</b>	<b>30</b>
4.4.1. Localisation des échantillons et leur contexte	30
4.4.1.1. Les échantillons de Madâ'in Sâlih (Arabie Saoudite)	30
4.4.1.2. Les échantillons de Mouweis (Soudan)	31
4.4.1.3. Sélection des échantillons archéologiques	32
<b>4.5. Résumé du corpus et système de représentation des données</b>	<b>32</b>
<b>4.6. Etude morphométrique</b>	<b>34</b>
4.6.1. Traitement des graines pour l'étude morphométrique	34
4.6.2. Photographies	34
4.6.2.1. Positionnement des graines	34
4.6.2.2. Prises de vues photographiques	35
4.6.3. Morphométrie traditionnelle	35
4.6.4. Morphométrie géométrique	36
4.6.5. Analyses statistiques	37
4.6.5.1. La reproductibilité des mesures réalisées	37

4.6.5.1.1.	Test de biais de logiciels	37
4.6.5.1.2.	Test de biais inter-opérateur	38
4.6.5.1.3.	Test de biais intra-opérateur	38
4.6.5.2.	Analyse des différences de variation (ANOVA) des tailles centroïdes et représentations	38
4.6.5.3.	Analyse des patrons de variation de la forme des graines (mesures traditionnelles et géométriques)	39
<b>5.</b>	<b>Résultats</b>	<b>41</b>
<b>5.1.</b>	<b>Etude morphométrique du corpus moderne</b>	<b>42</b>
5.1.1.	Morphométrie traditionnelle	42
5.1.2.	Morphométrie géométrique	43
5.1.2.1.	Etude de la conformation	43
5.1.2.2.	Etude des tailles centroïdes	44
5.1.2.3.	Etude de la forme	45
5.1.3.	Cas d'étude sur les spécimens de l'Herbier	46
5.1.4.	Cas d'étude sur le spécimen de récolte MS_Flora_14 (Arabie Saoudite)	47
<b>5.2.</b>	<b>Les expérimentations de carbonisation</b>	<b>51</b>
5.2.1.	Morphométrie traditionnelle	52
5.2.2.	Morphométrie géométrique	52
5.2.2.1.	Etude de la conformation	52
5.2.2.2.	Etude des tailles centroïdes	53
5.2.2.3.	Etude de la forme	54
5.2.3.	Comparaison du matériel moderne frais et carbonisé	54
<b>5.3.</b>	<b>Étude morphométrique des spécimens archéologiques</b>	<b>57</b>
5.3.1.	Morphométrie traditionnelle	57
5.3.2.	Morphométrie géométrique	60
5.3.2.1.	Etude de la conformation	60
5.3.2.2.	Etude des tailles centroïdes	62
5.3.2.3.	Etude de la forme	62
<b>6.</b>	<b>Discussion</b>	<b>64</b>
<b>6.1.</b>	<b>Comparaisons des différentes méthodes utilisées par l'étude morphométrique sur le corpus moderne</b>	<b>65</b>
6.1.1.	La forme en morphométrie géométrique, outil morphométrique d'optimisation des distinctions	65
6.1.2.	Les limites de la projection des données actuelles, hybridations et diversité moderne des morphotypes	66
6.1.3.	Les identifications et classifications des spécimens de l'Herbier, apport des méthodes morphométriques	66
<b>6.2.</b>	<b>Carbonisation expérimentale, les résultats obtenus et implications méthodologiques</b>	<b>67</b>
<b>6.3.</b>	<b>Application de la morphométrie à du matériel archéologique</b>	<b>68</b>
6.3.1.	Les limites d'une comparaison basée sur des cultivars modernes carbonisés, la divergence des phénotypes actuels et passés	68
6.3.2.	La diversité des morphotypes archéologiques	69
6.3.3.	Relations entre les espèces diploïdes, indienne et africaine, et les spécimens archéologiques	70
<b>7.</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>71</b>

## **1. Introduction et présentation du sujet**

Le coton (*Gossypium* sp.), en raison de son grand intérêt pour les populations humaines, fait l'objet de nombreuses recherches en économie, génétique, biologie, agronomie. De nombreux traités de la fin du 19<sup>ème</sup> et du début du 20<sup>ème</sup> siècle mentionnent les qualités de ses fibres (Deschamps 1885 ; Lagièrre 1966 ; Lecomte 1900). Le coton est en effet aujourd'hui utilisé à la fois pour ses fibres textiles, représentant une production mondiale en 2014 de plus de 25 millions de tonnes par an (FAO), mais aussi pour ses graines oléagineuses (production mondiale en 2014 : 46 millions de tonnes par an, FAO) dont on extrait l'huile et des tourteaux (résidu après pression) pour l'alimentation animale, humaine et l'industrie cosmétique (Lecomte 1900 ; Reis *et al.* 2006). Plante économique d'importance majeure de la famille des Malvacées, robuste, le coton est de nos jours cultivé sous forme annuelle ou vivace (Figure 1), certains cotonniers pouvant atteindre jusqu'à 7 mètres de hauteur (Deschamps 1885 ; Lagièrre 1966).



Figure 1 : Champ de coton et détail d'une balle de coton (fruit) à Las Chapatales, Espagne (*G. hirsutum* variété Amazona) © C. Bouchaud

La culture du coton est le résultat de processus complexes, impliquant quatre espèces domestiquées, provenant de foyers de domestication indépendants (Kulkarni *et al.* 2009) : *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. arboreum* et *G. herbaceum* (Figure 2).



Figure 2 : Graines de coton des quatre espèces domestiquées, dans l'ordre de gauche à droite, *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. arboreum* et *G. herbaceum* (0015\_hirs\_G4-0002\_barb\_G1-0001\_arb\_G20-0008\_herb\_C12) © J. Milon<sup>1</sup>

Ces quatre espèces présentent des fruits (Figure 1), ou capsules, qui s'ouvrent à maturité (balle de coton) en 3 à 5 valves rigides qui abritent chacune 5 à 7 graines développant des fibres (ou trichomes) à leur surface épidermique (Lagière 1966). Les études génétiques et archéologiques montrent que ces quatre domestications ont eu lieu à des moments différents : probablement entre le 6<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> millénaire pour les deux espèces tétraploïdes américaines, *Gossypium hirsutum* en Amérique centrale et *G. barbadense* au Pérou (Dillehay *et al.* 2007 ; Smith et Stephens 1971 ; Stephens 1975), ainsi que pour une des deux espèces diploïdes, *G. arboreum*, dans le sous-continent indien (Moulherat *et al.* 2002). La domestication de *G. herbaceum*, moins documentée, a probablement eu lieu en Afrique (Bouchaud *et al.* sous presse ; Palmer *et al.* 2012). *G. hirsutum* est actuellement le coton le plus cultivé à travers le monde, suivi de *G. barbadense*. Les deux cotons diploïdes sont en revanche moins cultivés, seulement dans quelques exploitations familiales en Inde, au Pakistan, en Chine, au Bangladesh, en Iran et plus rarement sur le continent africain. Ils ont été remplacés depuis le 19<sup>e</sup> siècle par les cotons américains aux qualités textiles plus appréciées (Brubaker *et al.* 1999).

Les attestations archéologiques, sous forme de textiles et de graines, généralement conservées sous forme carbonisée, ne permettent pas de préciser davantage les processus de domestication, ni les dynamiques de diffusion, car il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode fiable de détermination morphologique des cotons archéologiques à l'espèce (Chowdhury et Buth 1971). Les textes sont également de peu de recours puisque les termes employés sont des noms vernaculaires, qui donnent des informations non sur la détermination taxonomique, mais sur l'allure de la plante, son éventuelle origine, etc. Hérodote, au 5<sup>ème</sup>

<sup>1</sup> Les photographies à l'origine des figures macroscopiques ont été réalisées avec la station d'imagerie de l'unité de gestion des collections de Zoologie-Anatomie comparée (Direction des Collections) grâce à l'obligeance de Cécile Callou (MNHN)

siècle avant notre ère, nous parle, par exemple, des origines indiennes du coton, « *il existe aux Indes des arbres qui fournissent une laine dont la qualité est supérieure à celle fournie par les moutons* » (Lagière 1966). Pline fait référence à des cotonniers en mentionnant des « *arbustes à laine qui croissait de son temps dans la haute Egypte et qui était probablement un cotonnier* ». L'archéogénétique, qui peut donner des informations taxonomiques importantes si le matériel est bien conservé, a pour l'instant fait l'objet d'une unique étude (Palmer *et al.* 2012). L'état carbonisé des graines ne permet pas en effet, à l'heure actuelle, l'extraction d'ADN ancien.

Les études botaniques non seulement sur les graines mais également sur la plante en elle-même se font rares et peu de mentions ou clefs de déterminations sont à notre disposition pour permettre d'identifier les différents cotons. Les études récentes en morphométrie géométrique ont montré la pertinence de l'approche morphométrique pour différencier variétés sauvages/domestiquées et cultivars, sur du matériel végétal moderne et archéologique (Bouby *et al.* 2013 ; Pagnoux *et al.* 2015 ; Terral *et al.* 2010).

Le projet est ainsi une approche exploratoire ayant pour objectif d'utiliser la morphométrie (géométrique et traditionnelle) afin de capturer la variabilité et la diversité morphologique de graines modernes de coton domestique (*G. arboreum*, *G. herbaceum*, *G. barbadense*, *G. hirsutum*), fraîches et carbonisées expérimentalement, et de tester la puissance du signal taxonomique interspécifique contenu dans leur forme. Le but étant, dans un second temps, d'explorer la diversité taxonomique du matériel archéologique provenant de deux sites antiques. Les deux sites archéologiques de l'étude, Mouweis ville méroïtique du Soudan et Madâ'in Sâlih, ville nabatéenne d'Arabie Saoudite, sont tous deux des sites antiques présentant des graines de coton datés des premiers siècles de notre ère. Ces graines peuvent potentiellement correspondre aux espèces *G. arboreum*, originaire du sous-continent indien et *G. herbaceum*, originaire d'Afrique. La détermination des espèces des cotons de Mouweis et de Madâ'in Sâlih ouvrirait donc de nouvelles perspectives sur les stratégies de commerce et de culture des cotons durant l'Antiquité.

## **2. Le coton : présentation générale**

### **2.1. Phylogénie et domestication des cotons**

Actuellement une cinquantaine d'espèces sauvages du genre *Gossypium* poussent sous des latitudes tropicales et sub-tropicales de l'Afrique, de l'Asie, de l'Australie et de l'Amérique centrale et du Sud (Deschamps 1885 ; Lagière 1966 ; Tengberg et Mouhérat 2008 ; Wendel et Cronn 2003). L'aire naturelle de dispersion du genre est donc très étendue.



Environ 45 espèces sont diploïdes<sup>2</sup> et sont elles-mêmes divisées en huit clades, chacun désigné par une lettre (de A à G et K, (Wendel *et al.* 2012)). Les deux espèces domestiquées dans l'Ancien Monde, *G. arboreum* dans le sous-continent Indien, *G. herbaceum* en Afrique, appartiennent au clade A (n=13) et sont donc diploïdes. Une hybridation ancienne entre les clades diploïdes A (*G. herbaceum*) et D (*G. raimondii*) a donné naissance à une nouvelle lignée allopolyploïde (AD, n=26) sur le continent américain, il y a environ 1 à 2 millions d'années (Wendel 1989), comprenant les deux espèces américaines, *G. hirsutum* et *G. barbadense*, ce qui en fait des espèces tétraploïdes<sup>3</sup> (Figure 3).

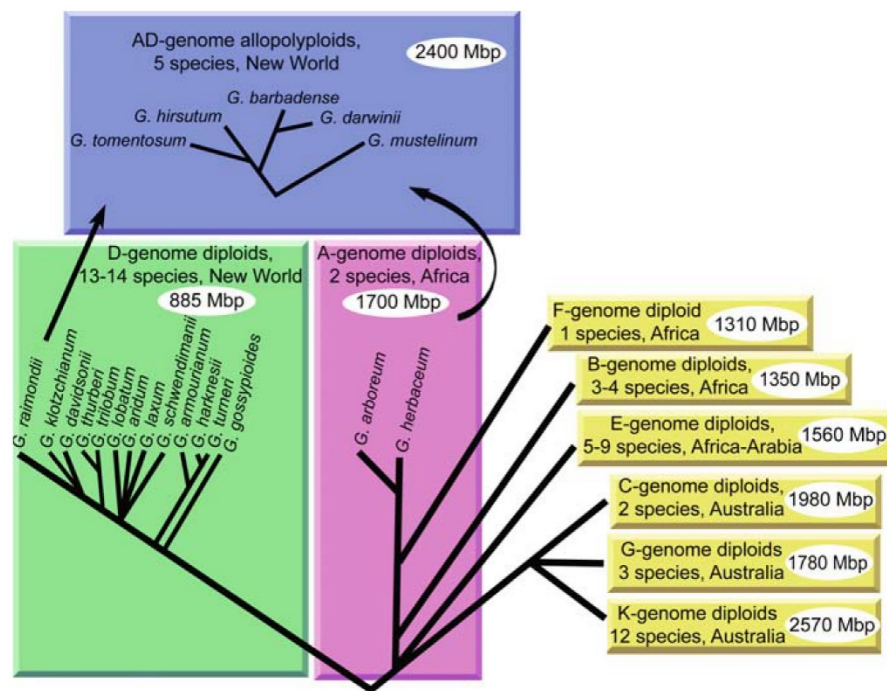


Figure 3 : Phylogénie du coton (genre *Gossypium* sp.) (Wendel et al. 2009)

La phylogénie des cotons domestiqués diploïdes, représentant un intérêt économique moindre, a fait l'objet de moins de recherches. L'ancêtre sauvage de *G. arboreum* n'est pas connu tandis que *G. herbaceum* var. *africanum* serait l'espèce sauvage ancêtre de l'espèce *G. herbaceum*. La plante contient plusieurs caractéristiques de génome A de coton sauvage, mais aussi son statut écologique, ses petits fruits et graines (Figure 2). Un des principaux problèmes pour accepter que *G. herbaceum* var. *africanum* soit l'ancêtre sauvage est que la plante pousse en Afrique du Sud, loin des premières mises en évidence de l'utilisation de coton africain (Nubie) (Paterson 2009). On peut néanmoins supposer que la distribution de *G. herbaceum* var. *africanum* était plus grande auparavant ou peut-être que la domestication a eu

<sup>2</sup> Diploïde, qui contient un assortiment double de chromosomes (2n, c'est-à-dire ici pour le coton n=13) (<http://www.cnrtl.fr/definition/diplo%C3%AFde>), consulté le 24/03

<sup>3</sup> Tétraploïde, qui possède dans ses cellules 4n chromosomes (pour le coton n=26) (<http://www.cnrtl.fr/definition/t%C3%A9traplo%C3%AFde>), consulté le 24/03



lieu hors de la zone géographique de répartition naturelle, suite à un transfert de l'ancêtre sauvage vers le nord le long d'anciennes routes de commerces (Wendel 1989). Des graines auraient été prélevées dans l'aire de répartition naturelle puis transplantées et acclimatées ailleurs. Dans ce dernier cas, la confrontation des données génétiques et archéologiques montre que la domestication du coton africain a pu avoir lieu quelque part entre Soudan et Ethiopie (Bouchaud *et al.* sous presse).

## **2.2. Quelques données agronomiques**

Le genre *Gossypium* sp. pousse dans les pays chaud dont les températures ne descendent pas en-dessous de la limite de 5°C. C'est à partir de ce seuil que le coton pousse difficilement. Sa culture nécessite en effet une température supérieure à 15°C afin de se développer de manière optimale. Le cycle de développement des cultivars modernes de coton s'étale sur une période allant de 160 à 210 jours entre la plantation et la récolte. Les variations de la durée de maturation sont notamment dues au climat et aux conditions de cultures. Sa demande en eau varie selon le cycle de développement des plants, de conséquent en début de saison puis sec lors des deux derniers mois de maturation (Reis *et al.* 2006). Pour l'hémisphère nord, cette maturation a donc lieu pendant l'été, période sèche. Les deux espèces originaires d'Afrique et d'Asie, de leurs noms latin *Gossypium herbaceum* et *G. arboreum*, sont des plantes robustes et résistantes à la sécheresse ainsi qu'aux nuisibles comme les sauterelles et les pucerons (Brubaker *et al.* 1999). Malgré leur nom latin qui peut prêter à confusion quant à leur statut (herbacée et arborée), ces deux espèces ont une morphologie très semblable et se composent de variétés pérennes arbustive ou arborée cultivées dans les régions tropicales et subtropicales. Une relecture récente des textes antiques grecs et latins laisse supposer que les cotons antiques étaient des plantes pérennes, arbustives ou arborées (Bouchaud *et al.* sous presse). En outre, des variétés annuelles ont été développées, probablement au cours des deux derniers millénaires (Brite et Marston 2013 ; Palmer *et al.* 2012) dans certaines zones septentrionales méditerranéennes et eurasiennes continentales, où le coton, ne supportant pas le gel, doit être planté tous les ans et être irrigué (Brite et Marston 2013 ; Brubaker *et al.* 1999).

## **2.3. Description générale des fibres et des graines**

La forme générale, la longueur des fibres et leur qualité varient en fonction de l'espèce de coton et de son origine. Selon les espèces, la longueur et la qualité des grandes fibres, appelées soie ou bourre (*lint* en anglais) sont très variables. Les espèces diploïdes présentent des soies moins longues et donc moins rentables que les graines tétraploïdes. C'est une des

raisons pour lesquelles, en plus de la qualité de leurs fibres, les espèces tétraploïdes sont maintenant celles qui sont largement majoritaires dans le paysage économique et agricole du coton. De même, certaines espèces « vêtue » portent des poils plus courts appelé linter (ou *fuzz* en anglais) alors que d'autres sont dites « nues ». Seule *G. barbadense* ne présente pas de linter parmi les espèces domestiquées (Hutchinson *et al.* 1947 ; Lagièrre 1966). Les graines, dont le nombre par fruits varient, ont des formes se déclinant d'ovoïdes à piriforme se terminant en pointe au niveau du hile, des tailles variant entre 4 et 12 mm et des masses variant de 7 à 17 g pour 100 graines (Lagièrre, 1966). La graine de coton (Figure 4) présente une portion du funicule (élément reliant la graine au péricarpe) fusionnée avec le tégument, formant une arête longitudinale, ou raphé, juste au-dessus du hile. Le raphé relie le hile (point de jonction reliant le funicule à travers la testa, ou tégument extérieur) à la chalaze (point de jonction du funicule à travers la membrane interne).

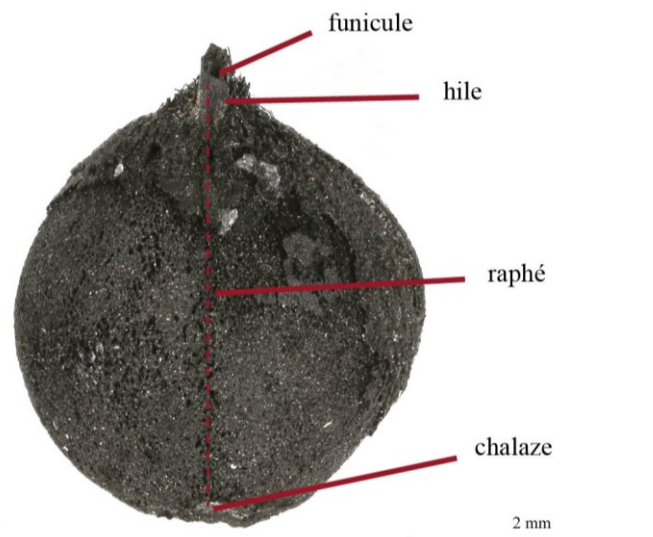


Figure 4 : Graine de coton archéologique provenant de Madâ'in Sâlih montrant les différents critères anatomiques d'une graine de coton (MS\_80166\_G18)

L'amande présente un embryon muni de deux cotylédons repliés sur eux-mêmes. Ces cotylédons contiennent de nombreuses ressources protéiniques et oléagineuses. Un autre point important d'identification et de caractéristique économique du coton est la présence ou non de glandes à gossypol. Le gossypol désigne au sens large les composants terpénoïdes présents dans l'amande des graines et plus généralement dans la plante (Dao 2002), rendant la plante toxique pour beaucoup de prédateurs. Les ruminants ont une meilleure capacité que les non-ruminants à assimiler le gossypol et donc à consommer ces graines (Cornu *et al.* 1977). Il existe des variétés ne possédant pas de glandes à gossypol à l'état sauvage et naturel, mais la plupart des variétés sans gossypol présents dans l'environnement moderne semblent être le résultat de mutations génétiques modernes (Paterson 2009). L'intérêt de ces variétés

nouvellement créées est d'une part la diminution des coûts d'extraction et de raffinage de l'huile de coton mais également la consommation directe des tourteaux ou farine de coton ayant une forte teneur en protéine et servant à la fois dans l'alimentation animale et humaine (Cornu *et al.* 1977 ; Lagièrre 1966). Dans notre étude, tous les exemples choisis portent ces glandes à gossypol, visibles à l'œil nu car elles forment des glandes noires dans le cotylédon de la graine (Figure 6) excepté l'échantillon 0013\_Hirs du CIRAD (Figure 5).

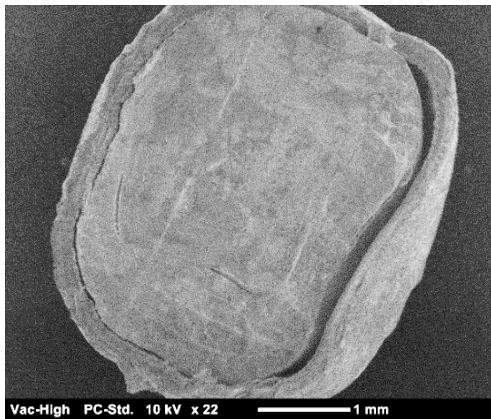


Figure 5 : Intérieur d'une graine de coton sans glande à gossypol, *G. hirsutum* (0013\_Hirs\_CIRAD) (MEB)



Figure 6 : Détail de l'intérieur d'une graine 0004\_Herb\_BG1524\_CIRAD\_glandes à gossypol

L'identification des graines archéologiques, préservées sous forme desséchée ou carbonisée, repose sur la morphologie générale de la graine, la présence d'un raphé, l'aspect du tégument extérieur. L'identification de graines fragmentées se fait aisément grâce notamment aux cellules palissadiques de l'épiderme visibles à la loupe et très caractéristiques (Figure 7). Si les glandes à gossypol sont visibles sur les graines archéologiques, elles sont présentes dans toutes les espèces et ne peuvent pas aider à l'identification des graines autre qu'au genre *Gossypium*.

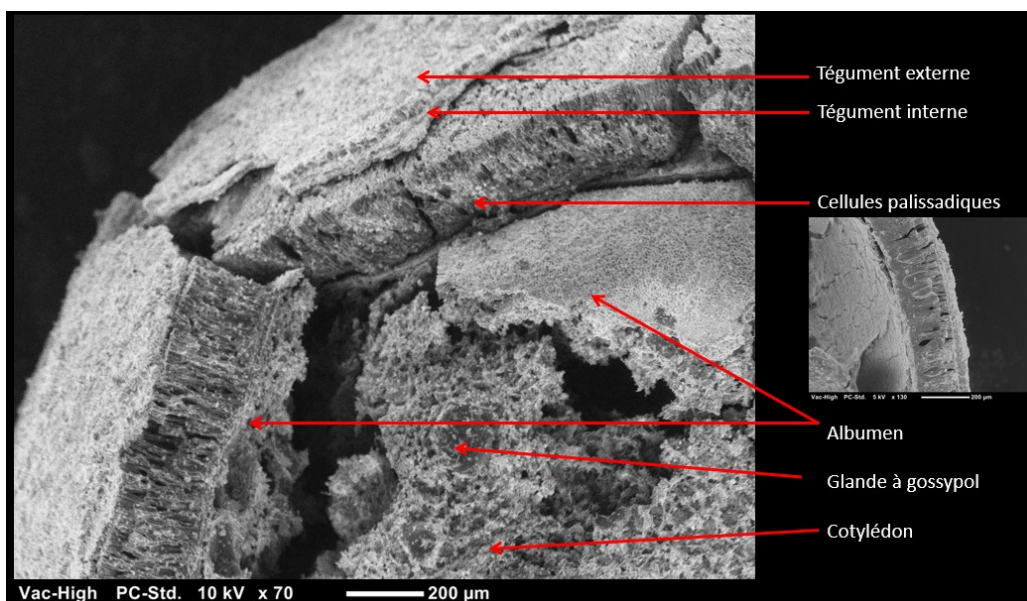


Figure 7 : Caractéristiques morphologiques d'une graine de coton archéologique (MEB)

### **3. Présentation des sites archéologiques de l'étude**

#### **3.1. Le choix des sites archéologiques de l'étude**

Le corpus de l'étude présente des graines de coton provenant de deux sites archéologiques qui constituent deux observatoires des processus d'introduction de nouvelles plantes et des circulations commerciales antique. Le développement de la culture du coton indien (*Gossypium arboreum*) se déroule entre le 6<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> millénaire avant J.-C dans le sous-continent indien (Fuller 2007 ; 2008 ; Moulherat *et al.* 2002). L'histoire de la domestication et de la diffusion de l'espèce africaine, *G. herbaceum*, est mal connue, mais sa présence est attestée en Afrique du nord-est durant les premiers siècles de notre ère (Palmer *et al.* 2012). Pour tester le protocole morphométrique, il a donc été décidé de choisir des sites agricoles impliqués dans des réseaux commerciaux où les deux espèces de coton diploïdes, *G. arboreum* et *G. herbaceum*, pouvaient avoir circulé (Figure 8). Les deux sites retenus sont des sites fouillés par des équipes françaises ayant fait l'objet d'études archéobotaniques et où des graines de coton carbonisées ont été trouvées. La présence du coton sous forme de graines carbonisées dans les assemblages de ces deux sites antiques nous apprend beaucoup de choses sur les techniques de cultures, de récoltes, de vies et d'artisanats des populations. La présence de graines de cotons en grande quantité dans les assemblages,  $\frac{2}{3}$  des échantillons présentent des graines de coton sur le site de Madâ'in Sâlih et  $\frac{3}{4}$  pour le site de Mouweis, est la plus grande des preuves de la culture du coton (Bouchaud *et al.* sous presse). En effet, l'importance des attestations semble ne pas pouvoir résulter d'une cueillette à partir de spécimens sauvages mais bien de récoltes à proximité des habitations composées de plants au moins partiellement domestiqués. Le fait que les assemblages soient constitués de graines nous indique une culture faite sur place et à proximité des habitations (jardins, champs... proches des villes) (Bouchaud *et al.* sous presse ; Burger *et al.* 2016). La présence de graines carbonisées au sein de contextes archéologiques variés (habitats, zones de rejets, de dépôts, zones d'artisanats...) nous donne également un indice de l'étape du processus de traitement des récoltes et sur les techniques d'artisanats associé à la plante. Ces sites sont tous deux occupés entre le 4<sup>ème</sup> siècle avant et le 4/5<sup>ème</sup> siècle après Jésus-Christ. Le site de Madâ'in Sâlih ou Hégra, au nord-ouest de l'Arabie, est une des villes les plus importantes du royaume nabatéen. Elle est souvent comparée à Pétra, la capitale de son royaume (Nehmé 2018), avec laquelle elle partage de nombreuses similarités, notamment architecturale (Dentzer 2008; Nehmé 2018). Étant donné sa position géographique, à la fois tournée vers le Levant, la Jordanie et la Syrie mais aussi vers le sud de la péninsule arabique et l'océan indien via les



routes de l'encens et les transports caravaniers, ce site se définit selon de très nombreuses influences culturelles (Demange 2010 ; Nehmé 2018 ; Nehmé *et al.* 2010). Le site de Mouweis est localisé au Soudan central, sur la rive Est du Nil. C'est une ville riveraine régionale du royaume de Méroé qui est caractérisée par une mosaïque d'influences. Le royaume méroïtique subit des particularismes locaux mais également les influences pharaoniques, grecques et celles de l'empire romain par le biais de sa grande proximité géographique et culturelle avec l'Égypte. La culture méroïtique est également sensible aux influences venues des régions plus au sud et cela se perçoit, dès les premiers siècles de notre ère, dans les cultures et les pratiques alimentaires (Baud 2010). La culture du coton dans l'empire méroïtique (site de Mouweis) a une importance économique et structurante du pouvoir majeure mais on ne connaît ni son origine ni les débuts de la culture. Tout comme Madâ'in Sâlih, il se pourrait, que le coton qui y fut cultivé vienne d'Asie par l'intermédiaire des routes des épices et de l'encens. Il est également envisageable que le coton méroïtique et/ou nabatéen soit d'origine africaine et donc de l'espèce *G. herbaceum*. Enfin, dans un cas comme dans l'autre, il est bien entendu envisageable que les graines archéologiques de coton retrouvées sur les sites ne correspondent pas à une espèce mais à plusieurs et donc originaires de plusieurs régions différentes.



Figure 8 : Carte situant les deux sites archéologiques de l'étude

## 3.2. MADÂ'IN SÂLIH

### 3.2.1. Présentation générale du site archéologique

Madâ'in Sâlih ou Hégra, est situé à 20km au nord environ de l'oasis d'al-'Ulâ (anciennement appelée Dadan notamment dans l'Ancien Testament), à 400km au nord-ouest de la ville sainte de Médine dont elle est reliée par de nombreuses voies de circulation. Le site de Madâ'in Sâlih est principalement connu pour son appartenance au royaume nabatéen à partir du 1<sup>er</sup> siècle av. J.-C. Ce royaume s'étend, dans son extension maximale, entre le 1<sup>er</sup> siècle av. J.-C. et le 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C., entre le nord-ouest de la péninsule Arabique, Madâ'in Sâlih constituant alors sa frontière méridionale, le Hauran au nord (Syrie du Sud), les côtes méditerranéennes à l'ouest (Figure 9). Le royaume devient une province romaine en 106 ap. J.-C. La culture nabatéenne, principalement définie par sa production architecturale, céramique, monétaire et son écriture, reste cependant visible jusqu'au 4<sup>ème</sup>-5<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C. (Nehmé *et al.* 2010).

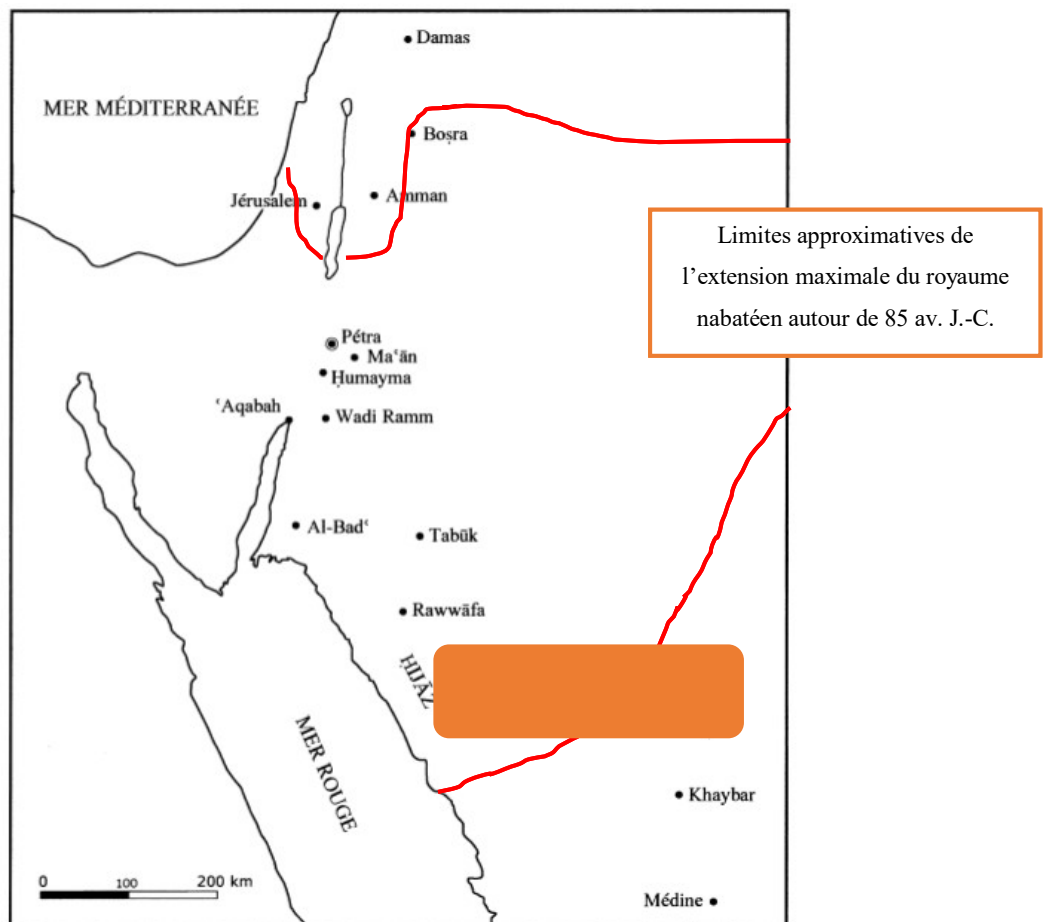


Figure 9 : Le royaume nabatéen et la localisation du site de Madâ'in Sâlih © d'après (Nehmé *et al.*, 2006)

Madâ'in Sâlih est localisé dans une vaste plaine désertique intérieure située sur les piémonts du plateau basaltique du Jabal 'Uwayrid qui s'étend au sud-est du massif du Hijaz (Nehmé 2018). L'hydrométrie de la région est très faible, entre 50 et 100 mm d'eau par an, tombant entre novembre et mars. L'aridité du climat est cependant atténuée par la géographie. La plaine sert de gouttière naturelle et fonctionne comme un bassin versant recueillant les eaux tombant sur le Jabal 'Uwayrid, alimentant ainsi une nappe phréatique souterraine de grande étendue (Bouchaud 2011 ; 2013 ; Nehmé 2004). La couverture arborée actuelle est principalement composée d'acacias (*Acacia tortilis*) de tamaris (*Tamarix aphylla*) (Figure 10) et de palmiers dattiers (*Phoenix dactylifera*). Les végétaux arbustifs sont très présents et correspondent principalement à des Amaranthacées, comme *Haloxylon salicornicum* ou encore *Hammada elegans*. Un grand nombre d'herbacées, comme le pourpier (*Aizoon canariense*), la luzerne sauvage (*Medicago laciniata*), l'anthémis (*Anthemis scrobicularis*) ou *Zygophyllum simplex* se développent annuellement à la faveur des pluies rares mais abondantes d'hiver et de printemps (Kürschner et Neef 2011).



Figure 10 : Vue sur les tombeaux du Jabal al Khaymat et les environs © Hubert Raguet

L'occupation du site, largement inféodée à la maîtrise de l'eau, s'appuie sur un réseau hydraulique complexe puisant dans les nappes phréatiques. Madâ'in Sâlih ne présente pas moins de 129 puits (jusqu'à 20m de profondeur) construits durant l'Antiquité (Dentzer 2008 ; Nehmé 2004 ; 2018).



### 3.2.2. Description de l'organisation du site archéologique

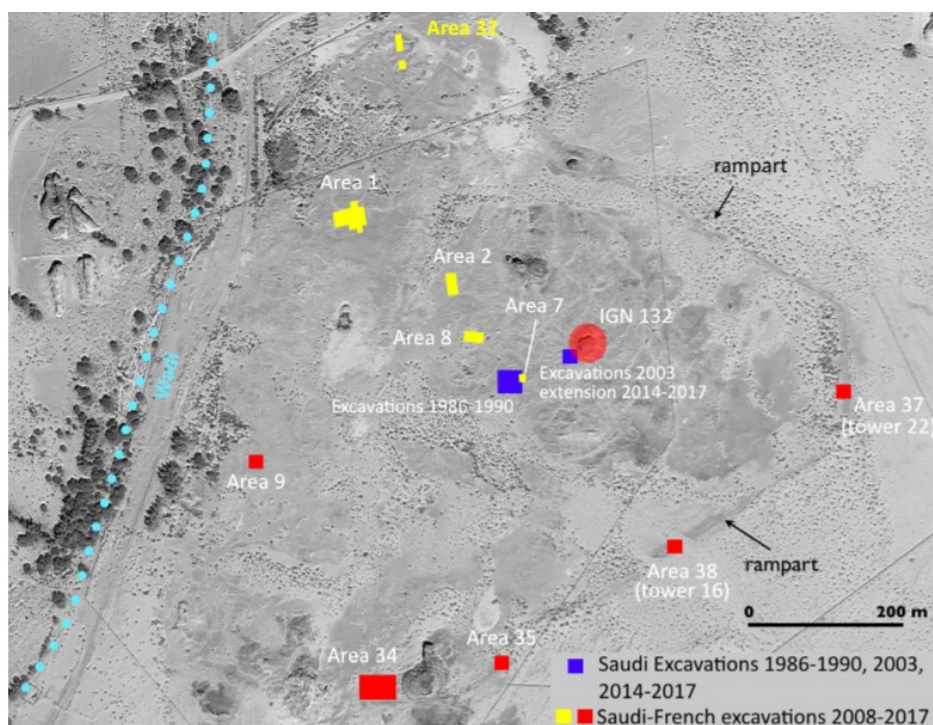


Figure 11 : La zone résidentielle montrant les localisations des fouilles depuis 2008 © Mission archéologique de Madâ'in Sâlih (Nehmé 2017)

Les fouilles franco-saoudiennes, dirigées depuis 2008 par Laïla Nehmé, François Villeneuve et Daifallah al-Talhi ont montré que les quartiers d'habitations se concentrent dans la partie centrale du site avec une occupation principalement entre le 4<sup>ème</sup> siècle av. J.-C et le 5<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C, couvrant donc une période pré-nabatéenne (4<sup>ème</sup>-2<sup>ème</sup> siècles ap. J.-C.), nabatéenne (1<sup>er</sup> siècle av. J.-C.-1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C.) et nabatéo-romaine (2<sup>ème</sup>-4<sup>ème</sup>/5<sup>ème</sup> siècles ap. J.-C.). (Nehmé 2004 ; Nehmé, Wazizeh, *et al.* 2011 ; Nehmé *et al.* 2016). Cette zone centrale d'activités domestiques et artisanales, où se situent également des zones cultuelles, est entourée par des tombeaux sculptés dans la roche (Figure 11). Les zones agricoles irriguées, définies par la présence des puits, s'étendaient principalement au nord et à l'ouest de la zone résidentielle (Nehmé 2004 ; 2011 ; 2016 ; 2017 ; Villeneuve *et al.* 2008).

### 3.2.3. Paysages, systèmes de cultures et d'élevage et activités textiles antiques à Madâ'in Sâlih

L'étude archéobotanique, toujours en cours, a été réalisée par Charlène Bouchaud dans le cadre de sa thèse (Bouchaud 2011). L'étude se base sur l'analyse des vestiges carpologiques (graines, fruits et autres éléments végétatifs non ligneux), essentiellement préservés sous forme carbonisés mais également desséchés pour certains, et les vestiges

anthracologiques (charbon de bois) et concernent principalement les périodes nabatéenne et nabatéo-romaine, entre le 1<sup>er</sup> siècle av. J.-C. et le 4<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. (Bouchaud *et al.* 2012 ; 2015 ; Bouchaud 2013). Ces macro-restes végétaux sont présents dans toutes les zones du site y compris les tombes (Bouchaud *et al.* 2015 ; 2011). L'étude de ces assemblages carpologiques et anthracologiques indique que la végétation naturelle est caractéristique des régions désertiques sableuses et très similaire à l'actuel (acacia, tamaris, Amaranthacées). Ces assemblages sont par ailleurs dominés par une espèce, le palmier dattier comme l'atteste la découverte de très nombreuses restes de dattes (graines, éléments de stipe (tronc), et feuilles). Le palmier dattier est au centre de la vie quotidienne des populations de la péninsule arabique, en particulier pour ses fruits qui constituent la base de l'alimentation depuis au moins le 3<sup>ème</sup> millénaire (Tengberg 2012) mais aussi pour les périodes modernes (voir le chapitre sur l'alimentation de la tribu arabe des Fuqarâ dans Jaussen et Savignac 1997, 47–50). Le palmier est également utilisé comme combustible, matériaux de construction, pour la vannerie, etc. Le reste des assemblages carpologiques montre une alimentation végétale variée composée de céréales comme l'orge (*Hordeum vulgare*) et les blés nus (*Triticum aestivum/durum*), de légumineuses dont la lentille (*Lens culinaris*) et le pois chiche (*Cicer arietinum*), de fruitiers comme le raisin (*Vitis vinifera*) et l'olive (*Olea europaea*). Ces assemblages évoluent peu au cours du temps. La seule nouveauté est l'apparition des graines de coton (*Gossypium* sp.) à la fin du 1<sup>er</sup> siècle-début du 2<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. (voir détail dans la partie méthode), seule plante textile jusqu'alors attestée par l'étude archéobotanique. Notons que des textiles ont été trouvés dans les tombes, principalement datées du 1<sup>er</sup> au 3<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C. : la plupart sont en lin et laine, mais plusieurs exemplaires sont en coton (Bouchaud *et al.* 2011 ; Dal-Prà 2012 ; Nehmé 2012). Alors que des textiles en coton ont été trouvés sur d'autres sites nabatéens, Madâ'in Sâlih est pour l'instant, le seul site Nabatéen à présenter du coton dans ses assemblages sous forme de graines. Les analyses archéozoologiques montrent que l'alimentation carnée reposait principalement sur la consommation de moutons et de chèvres. Le bœuf, le cheval / mule et les dromadaires sont également présents dans les assemblages archéozoologiques mais leur présence semble plus anecdotique et liée à une consommation opportuniste après utilisation des animaux pour les travaux de charges et de traits (Studer 2011). Au moins trois de ces espèces – mouton, chèvre et dromadaire – pouvaient potentiellement fournir des fibres textiles.

On peut donc associer le site de Madâ'in Sâlih à une oasis à étages successifs. Les palmiers dattiers, omniprésents et première ressource alimentaire devaient constituer la production principale, offrant ombre et engrais aux cultures arbustives et annuelles poussant

sous les plantations ou à proximité de celles-ci, optimisant ainsi l'irrigation des cultures. L'importance des graines de coton trouvées montre que la plante était très probablement cultivée au sein de ce système oasien (Bouchaud *et al.* 2015).

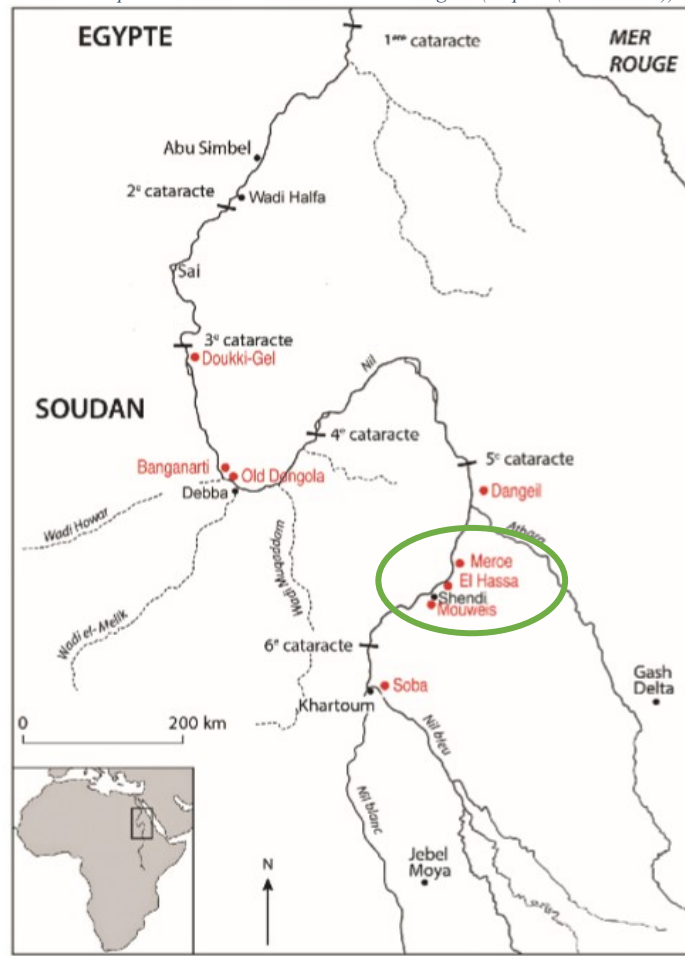
### **3.3. MOUWEIS**

#### **3.3.1. Présentation générale du site archéologique**

Mouweis est une ville méroïtique du bord du Nil au Soudan central. Le site est fouillé par le département des antiquités égyptiennes du Musée du Louvre depuis 2007 sous les directions successives de Michel Baud et Marie Millet (Millet 2015, rapport inédit). Située à 50 km au sud de Méroé, capitale éponyme de l'empire méroïtique et proche de la ville actuelle de Shendi (Soudan), Mouweis est caractéristique des établissements urbains méroïtiques. Elle est considérée comme une ville de taille moyenne bien que son étendue s'élève à 16 hectares. Le royaume méroïtique se met en place au cours du 3<sup>ème</sup> siècle av. J.-C et disparaît aux 4<sup>ème</sup>/5<sup>ème</sup> siècle après J.-C (Millet 2015, rapport inédit). Durant cette période, des rois se succèdent avec des gouvernements itinérants possédant de nombreux points d'attaches en dehors de leur capitale (Figure 12).

La délimitation de l'étendue du royaume de Méroé est difficile à envisager à cause notamment de l'itinérance des lieux de pouvoir et de détenteurs de ses pouvoirs. On peut en revanche déterminer une zone d'environ 1500 km de long, le long de la vallée du Nil depuis la limite avec l'Egypte et jusqu'à la ville soudanaise actuelle de Khartoum, faisant ainsi du Soudan central actuel, le cœur du royaume méroïtique (Maillot 2008). Le contrôle des systèmes d'échange et des biens de prestige semble avoir été le principe de base du pouvoir royal dans une organisation où celui-ci est constamment en mouvement et en itinérance (Maillot 2008). Dans ce cadre-là, le commerce des épices et d'autres biens de prestige comme le coton et les tissus ont une importance non négligeable, tout comme les productions agricoles de la région (Maillot 2008 ; Yvanez 2016).

Figure 12 : Carte représentant le site de Mouweis et la région (d'après (Chaix 2016))



Mouweis est ainsi une ville étape typique de ces rois méroïtiques. Elle possède toutes les structures et commodités nécessaires à cette vie semi-nomade des rois de Méroé, marquées notamment par la présence d'un temple et d'un palais. Mouweis se situe dans une vaste plaine sableuse de type savane. Les conditions climatiques actuelles probablement proches des conditions de l'époque antique (pour autant, aucune donnée paléoclimatique ne permet de connaître précisément les conditions climatiques antiques dans la région), sont caractérisées par des températures élevées et des pluies irrégulières de mousson pendant la saison chaude estivale (climat équatorial). Les précipitations sont en moyenne de 100 à 200 mm par an (Zhang *et al.* 2012). Le Nil est une composante principale des paysages de cette région riveraine du fleuve. Il se situe de nos jours à 1km du site mais devait se situer, à l'époque méroïtique, à seulement quelques centaines de mètres du site, voire moins lors des crues annuelles (Bouchaud 2015, rapport inédit ; Millet 2015, rapport inédit). Actuellement le paysage ligneux de Mouweis est caractérisé par une espèce invasive, le mesquite (*Prosopis chilensis*) et quelques espèces arbustives (*Capparis decidua*, *Salvadora persica*).

### 3.3.2. Description de l'organisation du site archéologique

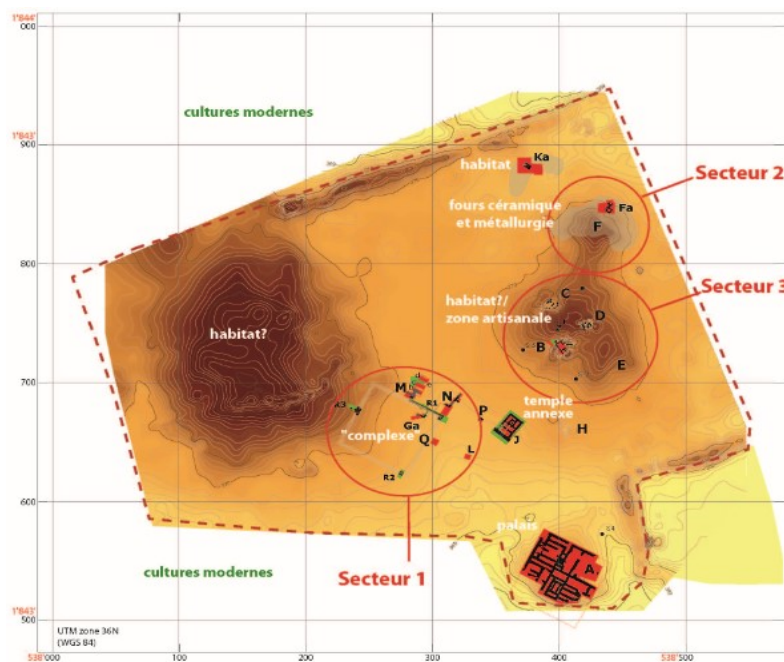


Figure 13 : Carte générale du site de Mouweis, © Mission archéologique de Mouweis (Millet 2015, rapport inédit)

La fouille de Mouweis et les problématiques développées par les missions successives (Millet 2014a ; 2014b ; 2016, rapports inédits) offrent une occasion unique d'appréhender la question de l'urbanisation et de son organisation dans les villes méroïtiques. En effet, le site présente plusieurs zones distinctes et une organisation structurée de l'espace. A l'instar des autres villes méroïtiques, Mouweis s'organise autour d'un centre névralgique de pouvoir avec temple, palais, zones d'habitats et d'artisanats. Deux quartiers avec des habitations et des zones artisanales sont situés au nord du site et sont éloignés de la zone du palais et du temple, situés au sud du site (Figure 13) (Millet 2015, rapport inédit). Les secteurs d'habitats du site ne présentent aucune césure chronologique, les occupations s'accumulant les unes sur les autres sans apparente discontinuité du 1<sup>er</sup> siècle au 4<sup>ème</sup> ou 5<sup>ème</sup> siècles ap. J.-C (Maillot 2008). Les fouilles récentes se sont concentrées sur trois secteurs d'activités domestiques et artisanales jusqu'alors peu documentées par l'archéologie méroïtique.

### 3.3.3. Paysages, systèmes de cultures et d'élevage et activités textiles antiques à Mouweis

L'étude archéobotanique du site a fait l'objet d'études préliminaires de la part de Charlene Bouchaud, de Claire Newton et de mon mémoire de master 1 (Bouchaud 2015 ; Milon 2017) et s'appuie sur l'analyse de restes anthracologiques et carpologiques de zones de rejets domestiques et artisanaux situés dans l'enceinte de la ville. La salinité des sols (conditions de crues et de la présence du Nil proche) contribue probablement à la fragilité des

échantillons (Milon 2017), qui sont uniquement préservés sous forme carbonisée du fait de leur contact avec le feu (combustible, activités domestiques nécessitant une chauffe partielle, accident de cuisine, etc.). Les échantillons appartiennent aux différentes périodes d'occupation du site, entre le 4<sup>ème</sup> s. av. J.-C et le 4<sup>ème</sup>-5<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C. mais l'analyse préliminaire des résultats ne permet pas de proposer une lecture diachronique à l'heure actuelle. Les premiers résultats montrent des assemblages très différents des paysages actuels (Figure 14). Les données anthracologiques indiquent une prédominance du bois d'acacia (*Acacia* sp.) et des buissons de Capparacées (comme par exemple *Capparis decidua*). Les attestations de bois et graines de jujubier (*Ziziphus spina christi*) et de palmier du désert (*Balanites aegyptiaca*), montrent que ces ligneux ont pu pousser naturellement dans les environs du site ou être cultivés. Les plantes cultivées comprennent le palmier dattier (*Phoenix dactylifera*), attesté en faible quantité, des légumineuses, présentes de manière sporadique dans les échantillons traités, comme les lentilles (*Lens culinaris*) et les doliques à vache (*Vigna unguiculata*). Les céréales constituent l'essentiel des plantes économiques. Le sorgho (*Sorghum bicolor*) est la céréale la plus attestée à Mouweis, suivie du mil à chandelle (*Pennisetum glaucum*), et dans une moindre mesure de l'orge (*Hordeum vulgare*) et du blé (*Triticum* cf. *turgidum* subsp. *dicoccon*) (Milon 2017). Le sorgho et le mil, respectivement originaires de l'est et de l'ouest de l'Afrique sub-saharienne, sont représentatives des cultures à croissance rapide, dont la croissance a lieu durant la saison estivale (Fuller, 2007) tandis que l'orge et le blé sont des céréales proche-orientales à maturation plus lente et hivernale. Les agrosystèmes présents à l'époque méroïtique sur le site de Mouweis et les environs sont donc dominés par des cultures céréalières dont les phases de semailles, de récoltes et de maturations sont échelonnées de façon à créer des ressources tout au long de l'année. Les graines de coton font également partie des taxons les mieux représentés au sein des assemblages carpologiques (Milon 2017), voir détail ci-dessous), suggérant une culture locale de coton. Les fouilles n'ont pas permis de mettre au jour des installations de canaux, de puits ou de quelconques systèmes d'irrigations. Si les conditions pluviométriques de la région ont pu être suffisantes pour assurer la croissance de certaines cultures (comme le sorgho et le mil à chandelle), la question de l'irrigation de plantes poussant hors de la saison des pluies (comme l'orge et le blé) ou peut-être plus demandeur en eau, comme le coton demeure ouverte. Les paysages agricoles devaient se présenter de façon linéaire, la proximité avec le Nil facilitant l'éventuelle utilisation de son eau. La faune principalement trouvée à Mouweis est composée d'une part, de bovins et de caprinés domestiques (Chaix 2016), d'autre part on y trouve également le dromadaire, le chien et l'âne. Il est intéressant d'observer l'absence



notable de poissons (Lesur 2014, rapport inédit) malgré la proximité avec le Nil (Chaix 2016 ; Lesur 2014, rapport inédit). Le site de Mouweis présente en outre la première attestation ostéologique africaine de zébu (Chaix, rapport inédit).



Figure 14 : Vue du secteur 3 © Mission archéologique de Mouweis, 2014

## **4. Matériel et méthodes**

Cette étude, reposant sur la caractérisation taxonomique des graines de quatre espèces cultivées de cotons *Gossypium arboreum*, *Gossypium herbaceum*, *Gossypium hirsutum* et *Gossypium barbadense*, s'appuie sur un corpus varié de graines modernes et archéologiques et différentes méthodes de morphométrie géométrique et traditionnelle.

### **4.1. Description du matériel d'étude**

#### **4.1.1. Les graines de coton moderne issues de récoltes récentes**

Le matériel étudié est originaire de différents endroits. Il provient en majorité (12 échantillons des 4 espèces de cotons cultivés) des cultures irriguées réalisées sous serre en 2016 et 2017 au CIRAD de Montpellier (collaboration Ch. Viot, UMR AGAP, voir Tableau 1). Ces dernières correspondent à des cultivars de diverses origines à travers le monde tel que le Cameroun, le Vietnam, l'Iran, l'Égypte, l'Inde, ou les Etats-Unis (voir Annexe 1). Pour chacune de ces 4 espèces du genre *Gossypium*, 3 échantillons de 28 à 30 graines (selon les disponibilités) ont été choisis (Tableau 1). L'effectif du nombre de graines par échantillons est celui que l'on retrouve dans la plupart des études (Ros *et al.* 2014 ; Pagnoux *et al.* 2015). Un échantillon de coton de l'espèce *G. hirsutum* provient d'une culture irriguée de cotonnier en plein champ des environs de Séville, sur la commune de Las Chapatales, en 2017 (collaboration compagnie *Semillas Sostenibles Ibérica S.L.U.*, grupo Algodonera del Sur S.A.) (Figure 15). Cet échantillon est une variété de coton provenant de Californie. Le corpus



de graines modernes récoltées comprend donc 387 graines de coton des 4 espèces domestiquées de 13 origines/cultivars différents.

Tableau 1 : Récapitulatif du corpus de graines de coton moderne étudiées

Espèce de coton	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	TOTAL
Nombre d'échantillons étudiés	<b>3</b> 0001_Arb_BG1557 0011_Arb_BG7408 0012_Arb_BG7502	<b>3</b> 0002_Barb_BG1382 0006_Barb_BG1406 0007_Barb_BG2011	<b>3</b> 0003_Herb_BG1515 0004_Herb_BG1524 0008_Herb_BG7510	<b>3 (CIRAD)</b> 0005_Hirs_BG2166 0013_Hirs_CIRAD 0014_Hirs_CIRAD_t est + <b>1 (Las Chapatales)</b> 0010_Hirs_Acala_M axxa	<b>13</b>
Nombre de graines étudiées	90	90	87	90 + 30 = 120	<b>387</b>



Figure 15 : Carte représentant les origines des spécimens modernes du CIRAD, Montpellier et de Las Chapatales, Séville (Google maps)

Une partie du matériel moderne provient également d'une récolte effectuée en 2018, dans le cadre d'une mission archéologique. L'échantillon a été récolté dans une palmeraie proche du site de Madâ'in Sâlih, sur des plants de coton *G. barbadense* et se compose de 30 graines. Le jardin oasien dans lequel cet échantillon a été récolté s'appelle al-helwa farm et la propriétaire Nura al-Fageer. Ces graines modernes ont été préalablement nettoyées des fibres, inter et ouate (fibres plus fines et courtes que les autres fibres du coton qui adhère aux graines). Un système de numérotation de ces graines (modernes mais aussi archéologique,

Figure 16) a été mis en place. Il découpe le corpus en plusieurs niveaux allant des spécimens décrivant un ou plusieurs plants de coton jusqu'aux individus (=graines).

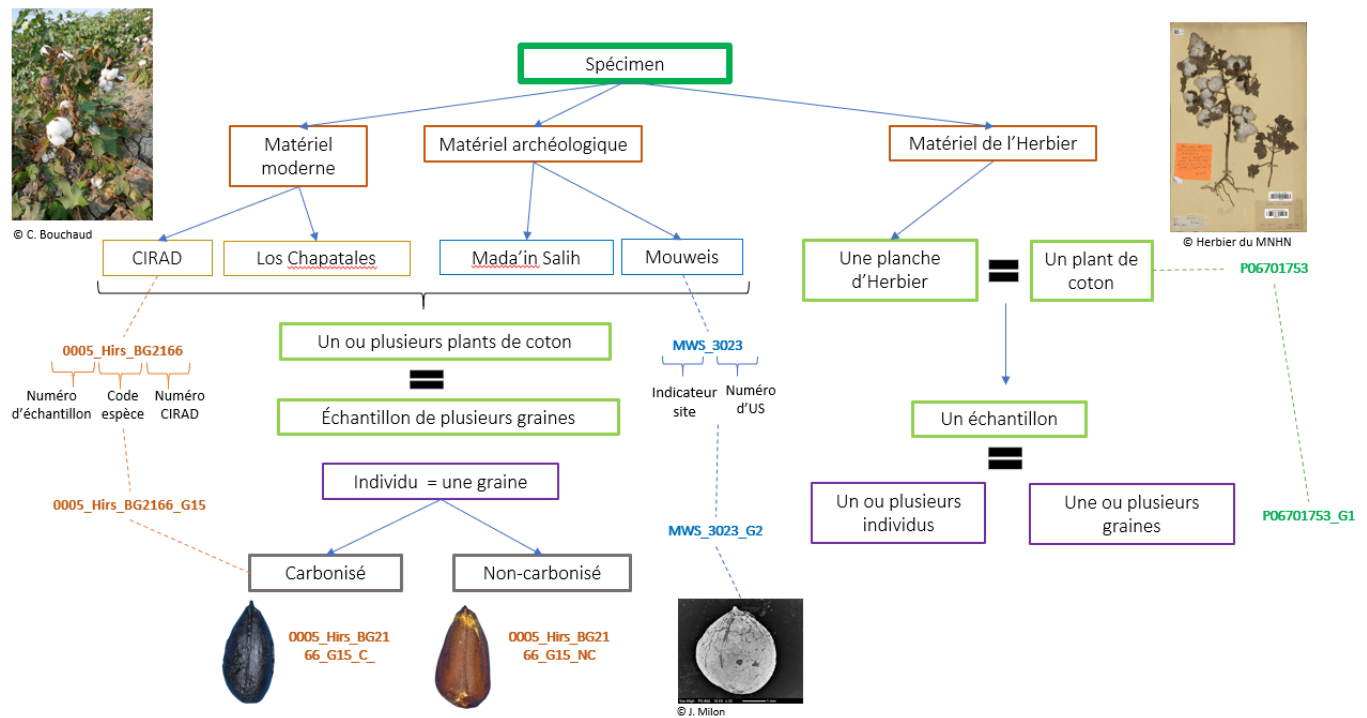


Figure 16 : Schéma montrant les différents niveaux et de numérotation du corpus

## 4.2. Les graines de l'Herbier

Une autre partie du corpus moderne se compose d'individus venant de l'Herbier du Muséum national d'histoire naturelle. L'Herbier se compose de planches botaniques (spécimens) rangés par famille, genre, grand secteur géographique et espèce. A la fin de chaque famille, par exemple, ici, la famille des Malvacées à laquelle appartient le coton, une carpothèque permet de conserver fruits et graines. Cette carpothèque de l'Herbier est constituée d'échantillons parfois rattachées à des spécimens de l'Herbier mais pas toujours. Le travail réalisé à l'Herbier a été possible grâce à la collaboration de Vanessa Invernón, ingénieur de recherche au MNHN (ISYEB - UMR 7205) et chargée de conservation à l'Herbier, et de Serge Muller, professeur au MNHN (ISYEB - UMR 7205) et responsable scientifique de l'Herbier. Après examen et sélection des spécimens (voir détail ci-dessous), le matériel récupéré sur les planches de coton de l'Herbier pour l'étude représente un total de 40 spécimens représentant 95 graines de coton et de 5 spécimens provenant de la carpothèque pour un total de 44 graines (voir liste en Annexe 3). Les 40 spécimens ou planches de l'Herbier proviennent de différentes régions dans le monde (Figure 17) de même que les spécimens de la carpothèque de l'Herbier.



Figure 17 : Carte recensant les spécimens de *Gossypium* sélectionnés des planches de l'Herbier (Google maps) Les couleurs suivent les catégories géographiques de l'Herbier (Vert=Amériques, Bleu= Afrique tropicale, Marron=Madagascar, Jaune=Asie, gris=cultivés)

#### 4.2.1. Description et géolocalisation des spécimens de l'Herbier

La collection générale de l'Herbier compte 1427 individus du genre *Gossypium* répartis dans l'ensemble des secteurs géographiques déterminées par le classement de l'Herbier, à savoir, France, Europe, Afrique tropicale, Madagascar, Afrique du nord, Océanie, Nouvelle Calédonie, Asie, et Amérique. Il existe un dernier secteur géographique à part qui correspond aux plantes cultivées, ce dernier « secteur géographique » sépare les plantes cultivées des plantes sauvages. Pour cette étude, la distinction entre cultivé et sauvage n'as pas été pris en compte, seuls des spécimens cultivés ont été pris en compte, selon l'origine géographique du spécimen.

La plupart des planches de l'Herbier sont numérisés et accessibles à travers la base de données de l'Herbier du Museum (<https://science.mnhn.fr/institution/mnhn/collection/p/item/search>). Chaque planche d'herbier a un code barre avec un identifiant unique qui permet de relier le spécimen d'herbier à la base de données. Associé à chaque image du spécimen d'herbier il existe les informations relatives à l'identification de la planche (famille, genre, espèce) ainsi que d'autres informations disponibles sur l'étiquette de récolte (secteur géographique, lieu et date de récolte...). Le but de la première manipulation à l'Herbier est de mettre de côté les spécimens des quatre espèces domestiquées (*G. herbaceum*, *G. hirsutum*, *G. arboreum* et *G. barbadense*) susceptibles d'être intéressant dans l'étude morphométrique (voir Annexe 2 et 3). La première opération a consisté à enregistrer pour chaque spécimen les informations suivantes : la date de collecte (de 1804 à 2002), l'aire géographique et le pays de récolte, l'espèce identifiée et la présence de fruits (graines, fibres ...) (Voir Annexe 2). Ces procédures d'enregistrement et de géolocalisation permettent d'accéder facilement aux informations nécessaires pour effectuer un tri rapide des spécimens.



#### 4.2.2. Vérification des identifications des spécimens de l'Herbier par l'observation des caractères discrets

L'observation des caractères morphologiques des différents espèces du genre *Gossypium* (réalisés avec la collaboration de la responsable scientifique de la collection des malvacées à l'Herbier, Vanessa Invernón) et la création d'une clef de détermination utile basé sur les caractères plus fréquemment observables sur les spécimens d'herbier, ont permis de vérifier les identifications des spécimens de plants entiers venant de l'échantillon de MS\_Flora\_14.

Les identifications ont été confirmés ou corrigés à l'aide des différents monographies et flores (Florence 1997 ; Hooker 1897 ; Tang *et al.* 2007 ; Castroviejo *et al.* 1993).

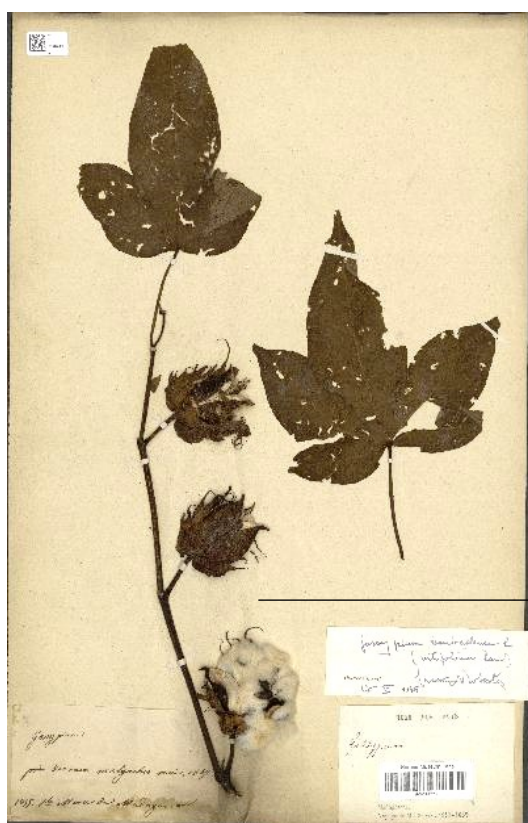


Figure 20 : Planche de l'Herbier d'un *Gossypium herbaceum* P00574278

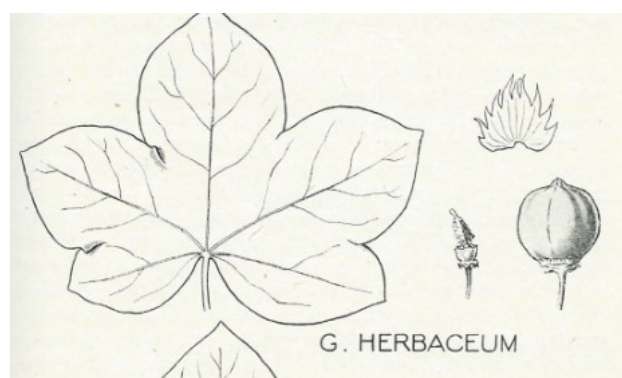


Figure 19 : Détail d'une planche botanique représentant un spécimen de *Gossypium herbaceum* (Hutchinson, JB, RA Silow, et SG Stephens, 1947)



Figure 18 : Détail de "Planche de l'Herbier d'un *Gossypium herbaceum*, P00574278"

A la lecture des flores décrivant les espèces de coton, peu nombreuses, on se rend compte que les critères de déterminations sont complexes et pas toujours facilement observables. L'identification est déterminée essentiellement à l'aide de la morphologie des épicalices, le nombre et les dimensions des denticules (pour *G. herbaceum* et *G. arboreum*) ou filaments (pour *G. hirsutum* et *G. barbadense*). Le terme épicalice désigne le calicule, c'est-à-dire l'extérieur du calice. Dans le cas du genre *Gossypium*, cela représente le verticille floral de protection de la fleur et du fruit, en dessus des capsules (=fruits) contenant les graines et les fibres. Pour donner un exemple : Dans le cas du spécimen d'herbier P00574278

(Figure 18, Figure 20), on observe que les dents des pièces de l'épicalice sont plus larges que longues, l'épicalice étant de plus, pas soudé à la base. Il possède de nombreux denticules dans la partie supérieure du segment de l'épicalice, supérieurs à 4 et compris entre 5 et 13, et plus longs que larges (Castroviejo *et al.* 1993). On en conclut donc que nous avons ici affaire à un spécimen de *Gossypium herbaceum*. A l'inverse, le spécimen P04642158 (Figure 21, Figure 23) présente les dents des pièces de l'épicalice plus longues que larges, possédant seulement entre 3 et 4 denticules dans la partie supérieure du segment de l'épicalice, les denticules sont plus larges que longues. Le spécimen P04642158 est donc *Gossypium arboreum*.



Figure 23 : Spécimen de *Gossypium arboreum* à l'Herbier du MNHN (P04642158)

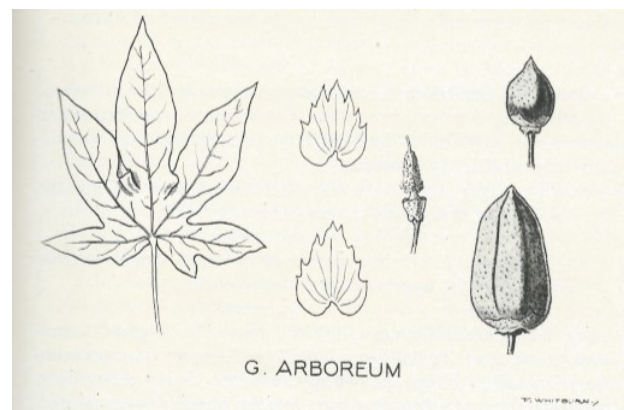


Figure 22 : Détail d'une planche botanique représentant un spécimen de *Gossypium arboreum* (Hutchinson, JB, RA Silow, et SG Stephens, 1947)



Figure 21 : Détail de " Spécimen de *Gossypium arboreum* à l'Herbier du MNHN (P04642158)"

Afin de faciliter la lecture et la détermination des spécimens de coton, une clef de détermination a été créée sur la plateforme en ligne de « Xper3 »<sup>4</sup> (<http://www.xper3.fr/>). Créée à partir des données issues des observations de l'Herbier, des observations morphologiques et anatomiques de graines au stéréo microscope et au MEB (microscope électronique à balayage : NeoScope JCM-5000 Nikon avec le logiciel JCM-5000) (voir liste en Annexe 8), mais aussi à l'aide des flores (Florence 1997 ; Hooker 1897 ; Tang *et al.* 2007 ; Castroviejo *et al.* 1993) et autres articles et ouvrages sur le coton (Deschamps 1885 ;

<sup>4</sup> Xper3 a été conçu et développé par le [Laboratoire d'Informatique et Systématique](#) de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6) faisant partie de l'UMR 7205 ([CNRS](#), [MNHN](#), [UPMC](#), [EPHE](#))

Hutchinson *et al.* 1947 ; Johnson et Decker 1980 ; Lagièrè 1966 ; Stephens 1970 ; Tang *et al.* 2007), la clef se compose de plusieurs niveaux. Ces niveaux concernent différentes parties ou structures de la plante (épicalice, capsule, fleurs, graines, ...) afin de remédier le cas échéant à l'absence d'un des critères de détermination de l'espèce. Cette clef interactive permet, à l'aide des observations que l'on peut faire sur un spécimen d'herbier donné, de savoir de quelle espèce de coton il s'agit.

Gossypium, Generated by IKey+, Laboratoire Informatique et Systematique, UMR 7205, MNHN Paris

Options:  
sddURL=http://www.xper3.fr/xper3GeneratedFiles/sdd/export/Gossypium-02CBCB9B79C0FAC9AD51CAC09015E8DC.sdd  
format=pdf  
representation=flat  
fewStatesCharacterFirst=true  
mergeCharacterStatesIfSameDiscrimination=false  
pruning=true  
verbosity=ho  
scoreMethod=xper  
weightContext=  
weightType=global

parseDuration= 0.012s  
keyCreationDuration= 0.001s

1 Epicalice :  
Denticulé => 2  
Filamenteux => 3

2 Taille des dents :  
Plus larges que longues => Gossypium arboreum  
Plus longues que larges => Gossypium herbaceum

3 Etat de la graine :  
Nue => Gossypium barbadense  
Vêtue => Gossypium hirsutum

*Figure 24 : Extrait de la clef de détermination interactive générée sur Xper3*

<http://www.xper3.fr/kbEdition?content=item&s&d=2&sortItems=false&sortDescriptors=fa>

[lse](#)

#### 4.2.3. Sélection des spécimens de l'Herbier

Après sélections et tri successifs, 10% (148 spécimens) des 1427 spécimens de l'Herbier ont été retenus lorsqu'ils présentaient des fruits ou des graines de coton, les autres ont été immédiatement écartés. Au sein de ces spécimens comprenant des capsules de coton, 17% (25 spécimens) ont dû être écartés en raison de leur statut particulier (spécimen ancien, appartenant à des collections historiques, matériel fragile et/ou endommagé, déhiscence et maturité des capsules...). Ensuite, les spécimens ont été sélectionnés en fonction de leur ancienneté, en choisissant préférentiellement les plus anciens, moins sujets aux hybridations (Hutchinson *et al.* 1947 ; Stephens 1949). Ils ont également été choisis selon leurs origines géographiques. Les spécimens de *G. hirsutum* et *G. barbadense* ont été choisis préférentiellement parmi les zones géographiques américaines, les spécimens de *G. herbaceum* parmi les exemplaires venant d'Afrique et pour les *G. arboreum*, parmi ceux venant d'Asie. Finalement, 42 spécimens (3% des 1427 spécimens de *Gossypium* de l'Herbier) ont été sélectionnés (voir Annexe 3). Pour chaque planche sélectionnée (42



planches) entre une et une dizaine de graines ont été prélevées à l'aide d'une pince. Cette étape de prélèvement s'est accompagnée d'une vérification des identifications (voir ci-dessus). Prenons l'exemple d'un spécimen sélectionné pour l'étude en raison de la présence de graines et dont l'identification pose problème. Le spécimen P06612924 (Figure 26), récolté au Vietnam en 1934 et identifié comme *G. arboreum* présente au niveau des segments de l'épicalice, tout d'abord des filaments et non des denticules. Ces filaments se présentent comme ceux des spécimens de *G. hirsutum*, très longues et avec le filament central particulièrement développé (Figure 26). On peut donc supposer que le spécimen identifié est en réalité un exemplaire de *G. hirsutum*. Par ailleurs, ce travail a également permis de réviser la nomenclature et la synonymie de certains taxons. Par exemple, *G. obtusifolius* ou *G. herbaceum* var. *religiosum* sont des anciens noms de *G. herbaceum* (Hooker 1897) d'après le site <http://www.tropicos.org/>).



Figure 25 : Prélèvements manuels des graines de coton sur les planches de l'Herbier

Figure 26 : Détail du spécimen P06612924 montrant l'épicalice réfutant l'identification faite de *G. arboreum*

Les planches de l'Herbier ayant fait l'objet de prélèvement de graines ont été mises de côté pour inclure une étiquette indiquant l'utilisation de ces spécimens pour la présente étude. De la même façon, une note sera ajoutée sur la base de données de l'Herbier de Paris pour ces planches.

#### **4.3. Carbonisations expérimentales (coton moderne)**

Les carbonisations expérimentales ont été réalisées sur des graines de coton modernes de cinq échantillons différents, afin d'évaluer la préservation, les distorsions métriques et la fragmentation en contexte de carbonisation. En effet, l'impact de la carbonisation et des déformations associées peuvent apparaître à première vue comme un handicap majeur pour l'étude du matériel archéologique (Bouby 2010). Les mesures réalisées avant et après la carbonisation ont pour but de déterminer des paramètres de réduction des graines, les changements morphologiques et morphométriques lors de la carbonisation entraînant une



variation sur la conformation<sup>5</sup> des graines mais aussi des possibles erreurs de classification post-carbonisation entre les graines non-carbonisées du référentiel moderne et les graines carbonisées (Bouby 2010). La seule publication connue sur des carbonisations expérimentales de coton (Stephens et Moseley 1974) ne donne pas les conditions expérimentales de durée de carbonisation. Des tests de carbonisation en atmosphère réductrice ont dû être mis en place afin de déterminer à partir de quelle(s) température(s) (en degré Celsius) et pendant combien de temps (en heures) il est nécessaire de maintenir les graines de coton au four. Le but étant d'obtenir des individus carbonisés, non fragmentés ni éclatés, au plus proche possible des spécimens archéologiques et de leurs conditions de carbonisations. Ces carbonisations ont été réalisées sur un échantillon de 30 graines de coton (0014\_Hirs\_CIRAD\_test) provenant de cultures sous serre (CIRAD, Montpellier). Les graines, individualisées et possédant chacun un numéro identifiable et unique, ont tout d'abord été prises en photographies au préalable selon le protocole de prises de mesures de morphométrie mise en œuvre durant cette étude (voir infra). Le four à carbonisation utilisé est celui du plateau archéobotanique de l'UMR 7209 du Muséum national d'histoire naturelle (Nabertherm More than Heat 30-3000°C – Trademark) et réalisé des tests (voir protocole établi en Annexe 4). Les études expérimentales déjà réalisées sur d'autres taxons proposent des températures de cuisson réductrice entre 200°C et 300°C et des durées de 1 à 3h (Bonhomme et al. 2017 ; Bouby 2010 ; García-Granero et al. 2016 ; Ros et al. 2014 ; Stephens et Moseley 1974) (Tableau 3). En combinant ces données et les expérimentations conduites l'année passée (Milon 2017), il a semblé judicieux de diviser l'échantillon test en 3 sous-échantillons chacun composé de 10 graines. Chacune des graines a été individualisée et enveloppée dans une couche de papier aluminium puis une couche de sable de 3cm environ. Pour chaque échantillon et pour indication, une graine a été sectionnée en deux pour pouvoir observer l'intérieur après carbonisation pour apprécier la qualité de cette carbonisation. Le premier sous-échantillon a été carbonisé à 200°C pendant 2h, le second sous-échantillon à 250°C pendant 2h et le troisième sous-échantillon à 300°C pendant 2h (Tableau 2). Après cette durée, il apparaît, grâce aux graines sectionnées en deux, que pendant la carbonisation à 200°C et 250°C les graines ne sont que torrifiées au cœur et non carbonisées. Les graines carbonisées pendant deux heures à 300°C présentent, elles, des traces d'éclatements, de fissures et de déformations très importantes. Certaines sont fragmentées comme on peut les trouver en contexte archéologique. De ces premières constatations il a

---

<sup>5</sup> La conformation d'un objet correspond à ses proportions propres hors effets de taille, position ou orientation. Elle est définie en morphométrie géométrique. (Cucchi *et al.* 2015)

donc été décidé de prolonger la carbonisation à 200°C pendant une heure soit un total de 3heures et pour la carbonisation à 250°C pendant une demi-heure de plus, soit un total de 2h30.

Tableau 2 : Détails des carbonisations expérimentales réalisées sur l'échantillon test 0014\_Hirs\_CIRAD\_Test

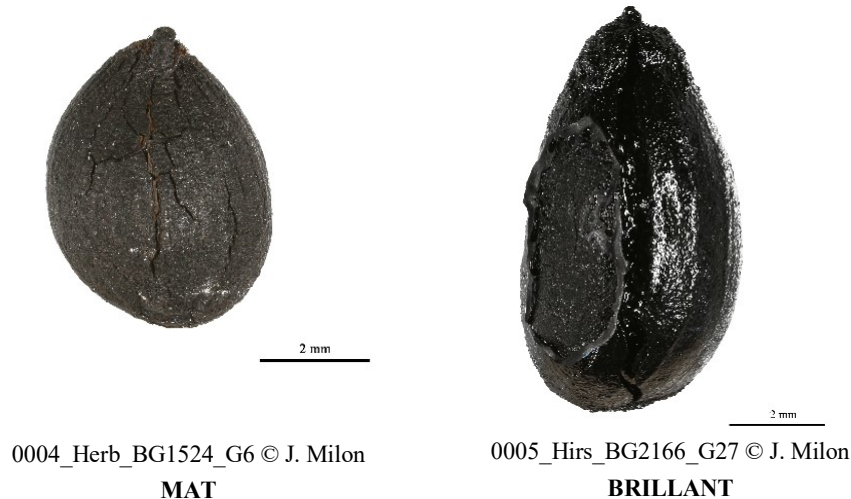
Températures de carbonisations (échantillon test)	200°C	250°C	300°C
Durée de carbonisation	3h	2h30	2h

Tableau 3 : Récapitulatif des carbonisations expérimentales recensées dans la littérature scientifique, voir détails sur les publications (Annexe 9)

Articles	Taxons étudiés	Température de carbonisation	Durée de carbonisation
(Bonhomme <i>et al.</i> 2017)	Grains d'orge, engrain ( <i>Triticum monococcum</i> ) et amidonnier	230-260°C	6h
(Braadbaart 2007)	Grains d'amidonnier et blé tendre ( <i>Triticum aestivum</i> ), avec et sans glumes et glumelles	600°C	1h
(Braadbaart <i>et al.</i> 2007)	Graines de tournesol ( <i>Helianthus annuus</i> )	Différentes températures entre 130°C et 600°C	60 min
(García-Granero <i>et al.</i> 2016)	Grains de sétaires ( <i>Setaria itálica</i> ) et de millet commun ( <i>Panicum miliaceum</i> )	250 °C	3h
(Ros <i>et al.</i> 2014)	Orge à 2 et 6 rangs	250°C	50min
(Stephens et Moseley 1974)	Coton ( <i>G. barbadense</i> )	200°C	Durée de carbonisation indéterminée
(Bouby 2010)	Pépins de raisins de différents cépages	250°C	20min
		410°C	20min
		450°C	20min-10min
Données de M1 (Milon 2017)	Coton ( <i>G. hirsutum</i> )	300°C	2h et 4h
		400°C	2h et 4h
		500°C	1h et 2h

D'après les observations réalisées sur les graines sectionnées testant la carbonisation à cœur et l'aspect extérieur des graines entières, les paramètres de cuisson retenus sont de 250°C pendant 2h30. Quatre échantillons de 30 graines de chacune des espèces de coton (0011\_Arb\_BG7408 / 0006\_Barb\_BG1406 / 0005\_Hirs\_BG2166 / 0004\_Herb\_BG1524) ont été placés tour à tour dans le four expérimental à 250°C pendant 2h30 afin d'éviter les risques de mélange des spécimens. Les graines ont ensuite été retirées du four et conditionnées individuellement avant d'être de nouveau prise en photographies. Ces carbonisations ont été l'occasion de noter que les graines de coton des espèces diploïdes (*G. arboreum* et *G. herbaceum*) présentent notamment un aspect plus mat que les espèces tétraploïdes (*G. barbadense* et *G. hirsutum*) (voir détails en Annexe 5 et 'Résultats').

Figure 27 : Représentation des différents aspects extérieurs des graines de coton après carbonisation



#### 4.4. Matériel archéologique

Le matériel archéologique est constitué de graines de coton carbonisées et provient de deux sites archéologiques antiques contemporains (voir 'Introduction'). Le site de Madâ'in Sâlih au nord-ouest de l'Arabie Saoudite est représenté par 99 graines venant de 22 prélèvements (=unité stratigraphique=échantillons) différentes, et le site de Mouweis (Soudan central) par 16 graines de 9 prélèvements différentes. En tout, le corpus archéologique présente 115 graines de coton, toutes carbonisées provenant de 31 unités stratigraphiques différentes. Ces graines viennent d'assemblages archéobotaniques ayant fait l'objet de tri et d'identification au préalable, dans le cadre du mémoire de master 1 en ce qui concerne le site soudanien de Mouweis (Milon 2017) et dans le cadre de la thèse de Charlène Bouchaud (Bouchaud, 2011 ; Bouchaud *et al.* 2011) pour les échantillons de Madâ'in Sâlih. Ma participation à la mission de post-fouilles réalisées entre le 14 et le 30 mars 2018 à Madâ'in Sâlih a permis de collecter des graines de cotons au sein de six prélèvements de sédiment qui ont été tamisés et triés sur place. Ces échantillons ayant des contextes bien documentés et intéressants du point de vue de la compréhension des assemblages archéobotaniques, il a été décidé de les inclure dans la présente étude morphométrique.

##### 4.4.1. Localisation des échantillons et leur contexte

###### 4.4.1.1. Les échantillons de Madâ'in Sâlih (Arabie Saoudite)

Les échantillons retenus pour l'étude morphométrique des graines de coton proviennent uniquement de la zone résidentielle et centrale du site et de contextes tels que des foyers, des sols, et des zones d'activités domestiques ou de rejets de combustions (Nehmé *et al.* 2016 ; Bouchaud 2011). Plusieurs échantillons contenant des graines de coton ont fait l'objet de datations radiocarbones. Ces datations montrent que les graines de coton

appartiennent aux niveaux les plus récents de la stratigraphie du site, entre la fin du 1<sup>er</sup> et le début du 2<sup>ème</sup> siècle de notre ère et jusqu'au 4<sup>ème</sup> siècle (Tableau 4). Le nombre minimum d'individus (NMI) des graines de coton du site s'élève à 687 et celui utilisé pour les études morphométriques est de 99 (environ 15% des graines sont utilisées).

Tableau 4 : Dates radiocarbone des échantillons du corpus de coton de Madâ'in Sâlih

Lab n°	US n°	Matériel	Age <sup>14</sup> C BP	Datations calibrées (95.4% <sup>a</sup> )	
				De	à
Sac A 18212 (Lyon_6669)	10061	Charbons	1875 ± 30	70	224
Sac A 31285 (Lyon-9755)	80106	Graines	1850 ± 30	85	235
Sac A 31284 (Lyon 9754)	80124	Graines de coton ( <i>Gossypium</i> sp.)	1815 ± 30	126	322
Sac A 31283 (Lyon_9753)	80166	Graines	1725 ± 30	245	389

<sup>a</sup>Calibration IntCal.13 (Reimer *et al.* 2013)

Les échantillons sélectionnés pour l'étude sont extraits de 5 zones différentes de fouilles : les zones 10, 34, 60, 80 et 90 (voir détail en Annexe 6). Les zones 10, 80 et 90 représentent différents quartiers d'habitations. La zone 34 correspond au camp romain qui s'installe dans la partie sud du site au II<sup>ème</sup> siècle avant d'être réutilisé à la fin du 3<sup>ème</sup>-4<sup>ème</sup> siècle par les populations locales en tant que zone d'habitation. L'échantillon provenant de cette zone appartient à cette dernière phase. La zone 60 présente un habitat tardif, daté des 3<sup>ème</sup>-4<sup>ème</sup> siècle de notre ère, présentant des activités domestiques et/ou artisanales et situé à l'intérieur d'un ancien téménos nabatéen (Nehmé 2016).

#### 4.4.1.2. Les échantillons de Mouweis (Soudan)

Le corpus étudié est constitué de 9 échantillons de sédiment et 16 graines de coton étudiées provenant du secteur 3 du site archéologique correspondant à une zone de rejet composée de couches d'accumulations venant de quartiers d'habitats et/ou artisanaux. Les échantillons contenant du coton proviennent des niveaux du II<sup>ème</sup> siècle au IV<sup>ème</sup> siècle de notre ère (Tableau 5). Au total, le NMI de coton pour le site de Mouweis est de 89 dont 16 uniquement ont pu servir aux études de morphométrie à cause des conditions de conservations.

Tableau 5 : Dates radiocarbone des restes végétaux de Mouweis, échantillons du corpus

Lab n°	US n°	Matériel	Age <sup>14</sup> C BP	Dates calibrées (95.4%) <sup>a</sup>	
				De	à
Muse_id-17282	MWS14_3023_Bot1	2 graines de coton ( <i>Gossypium</i> sp.) brûlées	1782 ± 24	138	332
Muse_id-17283	MWS14_3043_Bot1	3 fragments de tégument de graine de coton ( <i>Gossypium</i> sp.) brûlées	1781 ± 25	139	333

<sup>a</sup>Calibration IntCal.13 (Reimer *et al.* 2013)

#### 4.4.1.3. Sélection des échantillons archéologiques

La sélection des spécimens archéologiques a constitué une phase importante. Seules les graines suffisamment bien conservées et présentant des critères morphologiques indispensables à la prise de mesures, de points d'intérêts (*Landmark*) et de contours en morphométrie ont été retenues (García-Granero *et al.* 2016). Il a donc d'abord fallu mettre de côté les nombreuses graines fragmentées (Figure 28) et ne garder que les individus entiers. Cette fragmentation des assemblages de coton dans les deux sites archéologiques serait d'ailleurs un indice de récupération d'huile de coton à des fins d'éclairage ou de combustible (Bouchaud *et al.* sous presse ; Bourgeon *et al.* 2017). Elle constitue un des biais majeurs de l'étude puisqu'elle oblige à mettre de côté beaucoup de graines. Parmi ces derniers, ceux dont le raphé n'était pas visible par exemple, ont dû être écartées de l'étude, puisque cet élément est nécessaire pour orienter la graine. Ainsi, pour le site de Madâ'in Sâlih 99 graines, représentant 13% du NMI des graines de coton trouvées sur le site a pu être sélectionné pour l'étude et 89 graines (15%) pour Mouweis.



Figure 28 : MS\_80166 graines de coton fragmentées du site de Madâ'in Sâlih

#### **4.5. Résumé du corpus et système de représentation des données**

Pour résumé, le corpus de l'étude compte au total 730 graines modernes et archéologiques provenant de 94 échantillons permettant de prendre en compte la variabilité à la fois inter et intra espèces (Tableau 6).



Tableau 6 : Tableau récapitulatif des origines et des quantités de graines et d'échantillons

		Nombre de graines (Total)	Nombre d'échantillon (Total)
Matériel moderne (provenance CIRAD)	non carbonisé	296	12
	carbonisé	120	4
Matériel moderne (provenance Espagne)	non carbonisé	30	1
Matériel provenant de la récolte en Arabie Saoudite (mars 2018)	non carbonisé	30	1
Matériel planche Herbier	non carbonisé	95	40
Matériel carpothèque Herbier		44	5
<b>TOTAL des graines modernes</b>		<b>615</b>	<b>63</b>
Matériel archéologique Madâ'in Sâlih	carbonisé	99	22
Matériel archéologique Mouweis	carbonisé	16	9
<b>TOTAL des graines archéologiques</b>		<b>115</b>	<b>31</b>
<b>TOTAL des graines utilisées pour cette étude</b>		<b>730</b>	<b>94</b>

L'étude morphométrique du corpus a mené à de nombreuses représentations et graphiques divers. Par convention et aspect de commodité, tous les graphiques sont présentés avec le même code couleurs, à savoir **le violet pour l'espèce *G. hirsutum*** ; **le vert pour *G. barbadense*** ; **le bleu pour *G. arboreum*** ; **le rouge pour *G. herbaceum*** ; **le jaune/marron pour le site archéologique de Mouweis** et **le noir pour le site archéologique de Madâ'in Sâlih** (y compris lors des différenciations de morphotypes, tous les morphotypes du site demeurent en noir).

De plus, il est à noter que le terme de « corpus moderne » ci-dessous, sur lequel se basent les analyses en morphométrie traditionnelle et géométrique, se réfère aux 12 échantillons venant du CIRAD et de Las Chapatales (Tableau 6). Ils se composent des trois échantillons de *G. arboreum* : 0001\_Arb\_BG1557 ; 0011\_Arb\_BG7408 ; 0012\_Arb\_BG7502, de trois échantillons de *G. barbadense* 0002\_Barb\_BG1382 ; 0006\_Barb\_BG1406 ; 0007\_Barb\_BG2011, de trois échantillons de *G. herbaceum* 0003\_Herb\_BG1515 ; 0004\_Herb\_BG1524 ; 0008\_Herb\_BG7510 et de trois échantillons de *G. hirsutum* 0005\_Hirs\_BG2166 ; 0013\_Hirs\_CIRAD et 0010\_Hirs\_Acala\_Maxxa. L'effectif total de cette partie du corpus est de 296 graines au total.

Un échantillon 0014\_Hirs\_CIRAD (30 graines) a uniquement été utilisé pour établir le protocole de carbonisation. Le corpus carbonisé sur lequel s'appuient les études morphométriques est composé de 4 échantillons, un par espèce, carbonisé expérimentalement à 250°C pendant 2h30. Il représente un effectif de 120 graines des échantillons suivant, 0011\_Arb\_BG7408 / 0006\_Barb\_BG1406 / 0005\_Hirs\_BG2166 / 0004\_Herb\_BG1524. Enfin, le terme « Herbier » représente les graines venant des planches et de la carpothèque de l'Herbier et correspond à un effectif de 95 graines de coton (description en Annexe 3).

## 4.6. Etude morphométrique

### 4.6.1. Traitement des graines pour l'étude morphométrique

Les 296 graines du corpus moderne, dont 120 ont été carbonisées, ainsi que les 95 graines de l'Herbier et les 115 graines archéologiques carbonisées ont été pris en compte pour l'analyse morphométrique. Les graines modernes non-carbonisées provenant des collections du CIRAD et de la récolte de Las Chapatales ont été nettoyées préalablement de leurs fibres à l'aide de pinces et d'une légère carbonisation superficielle (bougie chauffe plat). Les graines de *G. barbadense* qui sont dites « nues » (Hutchinson *et al.* 1947) c'est-à-dire qui ne possèdent pas de ouate autour de la graine n'ont pas nécessité de nettoyage. Pour des raisons de conservation, les graines provenant des collections de l'Herbier n'ont pas fait l'objet d'un passage léger au feu. Les fibres ont été éliminées au maximum à l'aide d'une pince. Les prélèvements étant interdits sur des spécimens de l'Herbier déjà étudiés, il est important de conserver tout le matériel prélevé lors du nettoyage ou lors de toute autre étape de l'étude.

### 4.6.2. Photographies

#### 4.6.2.1. Positionnement des graines

La prise de photographies des spécimens modernes ou archéologiques s'est déroulée selon un protocole précis. Chaque graine a été positionnée sur un disque de pâte à modeler afin d'empêcher les mouvements des graines. Pour la vue latérale, le raphé est positionné à plat placé sur la gauche, le plus droit possible, et parallèle au support. La chalaze doit également être orientée vers le bas et le funicule vers le haut (Figure 29). La vue dorsale est positionnée selon le raphé, qui doit être le plus rectiligne possible, placé au centre et parallèle au support. En vue proximale, le raphé est orienté vers le bas, l'alignement entre la chalaze et le raphé est perpendiculaire au support.



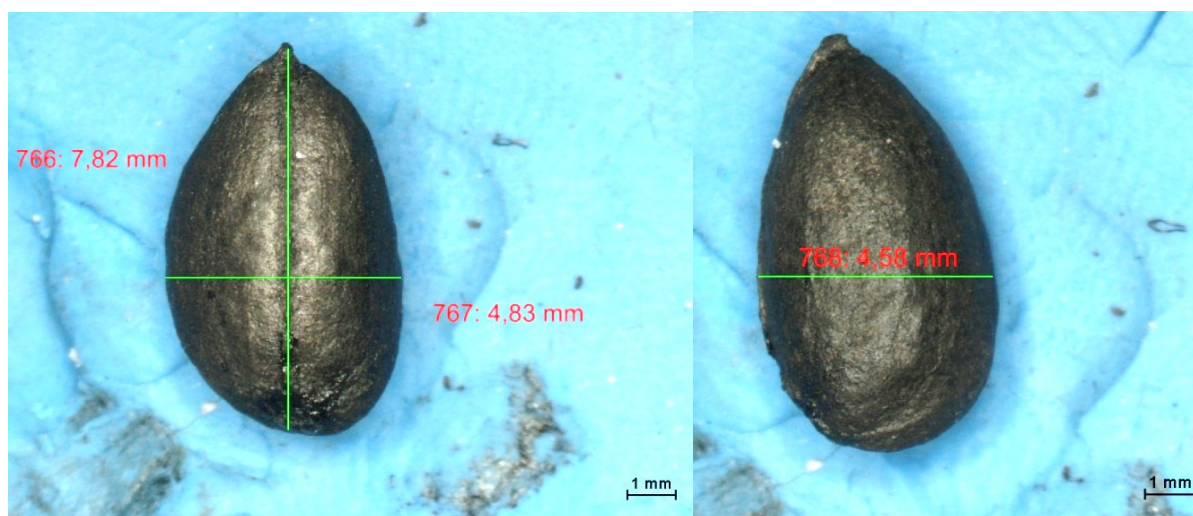
Figure 29 : Une graine de coton moderne (0008\_herb\_BG7510\_G7) en vue dorsale et latérale

#### 4.6.2.2. Prises de vues photographiques

Les photographies ont toutes été réalisées sur un même équipement. Toutes les graines ont donc été prises en photographies sur le microscope (Leica Z6 APO DMC 4500) de la plate-forme de morphométrie (UMS 2700, responsable scientifique Amandine Blin) et à l'aide du logiciel Leica LAS Core\_LAS V4.8. Ce protocole de prise de photographies est le même protocole qui a été suivie dans plusieurs études en morphométrie (Bonhomme *et al.* 2017 ; Ros *et al.* 2014). Les graines prélevées parmi les planches de l'Herbier ont été sorties des collections pour être prises en photographie avant et après nettoyage des fibres. Elles ont ensuite été placées dans un congélateur pendant deux semaines avant de les réintégrer aux collections de l'Herbier. Chaque graine moderne et archéologique a été prise en photographies selon les trois vues, représentant au total 2190 photographies.

#### 4.6.3. Morphométrie traditionnelle

Les mesures de morphométrie traditionnelle concernent la longueur et la largeur des graines sur la vue dorsale et l'épaisseur de la graine en vue latérale. La longueur se mesure sur la vue dorsale en traçant une ligne entre la chalaze et l'extrémité du raphé. La largeur de la graine se mesure également sur la vue dorsale, selon un axe perpendiculaire à la longueur et sur la partie de la graine, souvent centrale, où celle-ci est la plus large. L'épaisseur a été mesurée en vue latérale en traçant une ligne perpendiculaire au raphé à l'endroit le plus épais de la graine (Figure 30). Ces mesures ont été réalisées à l'aide du Logiciel d'acquisition d'images NIS Elements 3.1 Nikon (plateau archéobotanique de l'UMR 7209) et du logiciel Image J. Pour des raisons de temps, seule la vue dorsale a été utilisée en morphométrie géométrique et les vues dorsales et latérales pour la morphométrie traditionnelle.



*Figure 30* : Mesures de longueur et largeur en vue dorsale (gauche) et d'épaisseur en vue latérale (droite) d'une graine de coton *G. barbadense* (0006\_Barb\_BG1406)

#### 4.6.4. Morphométrie géométrique

La morphométrie géométrique, elle, s'appuie non pas sur des longueurs comme en morphométrie traditionnelle, mais sur des points, soit des points d'intérêts (*Landmark*), soit des points qui forment un contour. En morphométrie géométrique, la forme est quantifiée à l'aide de coordonnées cartésiennes en 2 ou 3D ce qui permet une visualisation des différences de conformations et donc des changements de forme des objets étudiés (Cucchi *et al.* 2015). La méthode de superposition Procruste utilisée en morphométrie géométrique permet d'obtenir la composante « taille et forme » de cette configuration de points et donc d'étudier ces composantes séparément. L'analyse Procuste consiste en une succession de plusieurs étapes menant à une comparaison des formes des spécimens entre eux en ayant enlevé les effets de taille, d'alignements et d'orientations (Cucchi *et al.* 2015). On obtient alors un consensus, c'est-à-dire un spécimen de référence, défini par les valeurs des tailles centroïdes de chacun des individus, les valeurs des spécimens alignés qui nous donne les mesures et coordonnées procuste sur lesquels la morphométrie géométrique, tests et représentations se basent. La quantification de la forme de la graine de coton nécessite la combinaison de *Landmark* et de points de contours. Il est possible de combiner dans une même analyse des points homologues et des points de contours grâce à la méthode des points glissants (*sliding semi-landmarks*) (Cucchi *et al.* 2015). Un point repère homologue (*Landmark*) à chaque graine a été défini pour chacune des vues (Figure 31).

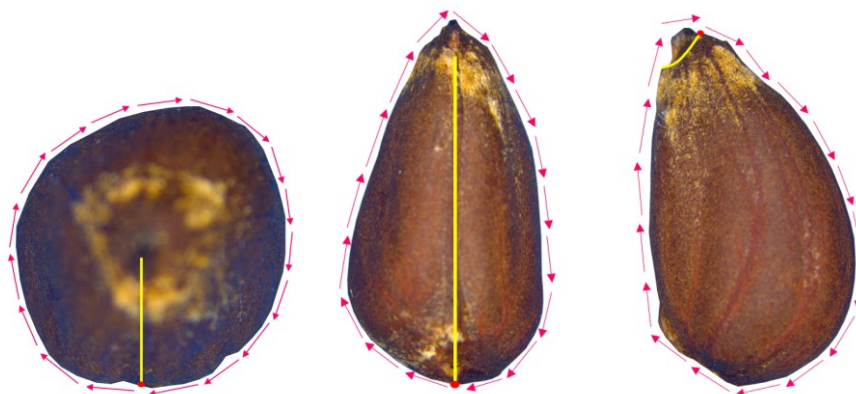


Figure 31 : Graine de coton montrant pour les 3 vues les points de repères homologues (*Landmark*) et le sens de la prise des points de contours

Pour la vue latérale, ce repère se situe à droite du contour de la graine au point d'intersection entre le prolongement du funicule et la fin du raphé. Les deux points de repères de la vue dorsale se situent dans le prolongement inférieur du raphé au point d'intersection avec le contour de la graine. Ils sont situés manuellement à la base et à l'apex de la graine, comme pour les noyaux d'olives, (Bourgeon *et al.* 2017). Le point repère de la vue proximale



est situé au point d'intersection du contour avec le raphé, orienté vers le bas (Figure 31). Le nombre de points de contours a été défini par la moyenne des points de contours pris instinctivement sur l'ensemble des graines modernes et archéologiques lors d'un premier passage sur le logiciel Tps Dig (voir Annexe 14 sur l'utilisation du logiciel Tps Dig). Pour la vue dorsale, ils sont au nombre de 51. La conformation des graines est donc testée à l'aide des coordonnées Procuste des individus (X1, Y1, X2, Y2 [...] X51, Y51) de x1 jusqu'à x51 puisque 51 *sliding semi-landmark* ont été définis. Ces points de contours ont ensuite été définis grâce à l'utilisation du logiciel Tps. Dig, la prise de points s'effectuant toujours dans le même ordre et le même sens (Figure 32, Figure 33). La détermination des *sliding semilandmarks* a été réalisée grâce à l'utilisation du logiciel Tps. Util (Figure 32) (voir Annexe 13 sur l'utilisation du logiciel Tps Util). L'algorithme utilisé pour faire glisser les *semi landmarks* est celui de la *Bending Energy* (Cucchi *et al.* 2015) effectué sous Tps relw (Rohlf 2005) (voir Annexe 15 sur l'utilisation du logiciel Tps relw).

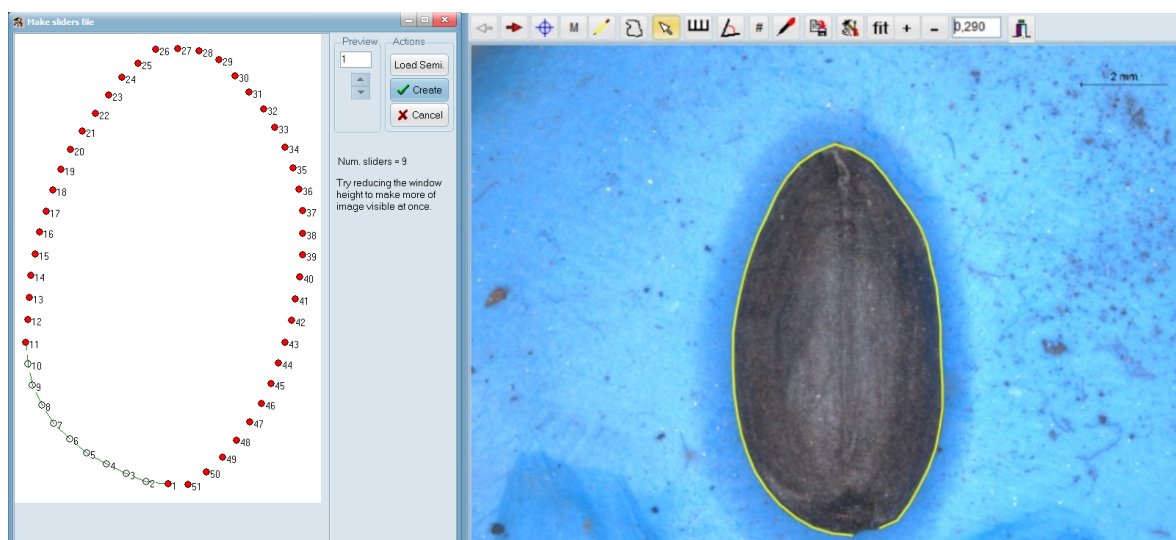


Figure 32 : Définition des points glissants (sliding semi-Landmark) sous TPS util

Figure 33 : Prise de contour d'une graine sous TPS Dig

#### **4.6.5. Analyses statistiques**

##### **4.6.5.1. La reproductibilité des mesures réalisées**

Les mesures de morphométrie traditionnelle et géométrique ont été testées selon différents paramètres afin de s'assurer de la reproductibilité des tests réalisés. Plusieurs tests ont ainsi été réalisés afin de mesurer les effets des variations des paramètres méthodologiques entrant en compte dans la réalisation des analyses statistiques de morphométrie de cette étude.

##### **4.6.5.1.1. Test de biais de logiciels**

Un biais possible de l'étude était l'utilisation de deux logiciels différents pour mesurer, en morphométrie traditionnelle, les graines de cotons. Une analyse MANOVA a été



réalisée sur un échantillon de graines modernes (30 graines de l'échantillon 0006\_Barb\_BG1406), afin de vérifier si la prise de mesures faite sur deux logiciels différents entraînait des différences de variations. L'échantillon de 30 graines a donc été mesurés parallèlement avec le logiciel « Nis Elements » et le logiciel « Image J » afin de mesurer les différences entre les prises de mesures. Les résultats de ce test ont montré qu'il n'existait pas de différence significatives entre les deux modes d'acquisition des mesures ( $p > 0,05$ ,  $p = 0,0643$ ). L'utilisation des logiciels « Nis Elements » ou « Image J » ne constitue donc pas un paramètre de variation dans les échantillons.

#### 4.6.5.1.2. Test de biais inter-opérateur

Un test inter opérateur a été effectué sur la prise de mesure sous TPS. Dig. Un second opérateur a pris les contours de 10 graines avec pour consignes le même protocole de mesures et les mêmes logiciels. Des tests de MANOVA inter-opérateurs ont ensuite été réalisés sur une combinaison des deux opérateurs afin d'observer la différence entre les prises de mesure. Les résultats des tests montrent des différences significatives ( $p < 0,05$ ,  $p = 1,25^E-56$ ) qui permettent de montrer que les mesures en morphométrie sont fiables et répétables uniquement dans le cas d'un opérateur unique. Le but était donc de démontrer que le changement de l'opérateur, qui prend les mesures et positionne les points d'intérêts est un facteur de variations et un biais important. C'est la raison pour laquelle le choix d'un unique opérateur pour toutes la phase de prise de photographies mais également pour celle de la prise de points et de contours est préférable et même indispensable.

#### 4.6.5.1.3. Test de biais intra-opérateur

Un test de biais intra opérateur a été effectué afin d'évaluer le degré de variabilité du protocole de positionnement et de la prise de mesure sous Tps. Dig. Pour chacune des quatre espèces de coton, 5 individus ont été pris en photos 10 fois. Grâce à des MANOVA, les variations ont pu être testées et sont considérées comme non-significatives ( $p > 0,05$   $p = 0,07129$ ). Les résultats montrent l'absence d'erreurs significatives et permettent de conclure sur la reproductibilité des mesures intra-opérateur.

Grâce à ces résultats, on peut dire que toutes les mesures faites pendant cette étude sont reproductibles et fiables et ne constituent pas un biais méthodologique à l'étude morphologique.

#### 4.6.5.2. Analyse des différences de variation (ANOVA) des tailles centroïdes et représentations

Les variations des tailles centroïdes sont testées par des analyses de Variances également appelées ANOVA. L'ANOVA globale permet de tester si les différences sont

significatives entre les groupes définis. On peut également faire des ANOVA deux à deux, si les différences sont significatives pour voir avec plus de précision entre quels groupes ces différences sont significatives (observation de la p-value et de la valeur de la permutation. Les comptes rendus de toutes les ANOVA réalisées sont disponibles en Annexes (Annexe 10). Le test de Kruskal Wallis a été utilisé dans cette étude, il fait partie des tests non-paramétriques présents dans les comptes rendus d'ANOVA sur le logiciel Past et permet de tester s'il existe une différence significative entre les groupes si la p-value est acceptée ( $p < 0,05$ ).

Les données de tailles centroïdes sont représentées au moyen de boîtes à moustache (*boxplot*) réalisés sous R (package *ggplot* (R Core Team 2018)). Cette représentation nous renseigne sur la dispersion des valeurs mais aussi les moyennes, médianes et écart-type.

#### 4.6.5.3. Analyse des patrons de variation de la forme des graines (mesures traditionnelles et géométriques)

En ce qui concerne les autres paramètres étudiés (en excluant les tailles centroïdes), on utilise les tests de MANOVA. En effet, les tests de variance ou ANOVA étudiant une seule variable, ne peuvent pas servir lorsque l'on s'occupe de statistiques multivariées. Lorsque l'on veut tester, pour un ensemble de groupes donné, l'existence de différences significatives entre les groupes, il faut faire le test de Wilk's lambda. Le compte-rendu complet de ce test, réalisé sur le logiciel Past (Hammer *et al.* 2001) est disponible en Annexe (Annexe 11 et détails des classifications des AFD en Annexe 12). Le test de Pillai trace, lui, nous renseigne sur les mêmes aspects mais se trouve être, en revanche, plus robuste statistiquement. Il est donc intéressant de noter et regarder à la fois la p-value ( $p$ ) acceptée par le test de Wilks' lambda et celle acceptée par le test de Pillai trace. Lorsque les tests de Wilks' lambda et Pillai trace ont des p-value acceptables, on considère que le test est significatif ce qui veut dire que les groupes d'individus diffèrent significativement dans leur variation.

Une fois les différences validées, on peut visualiser les patrons de variations de la forme des graines. Que ce soit pour la morphométrie traditionnelle ou la morphométrie géométrique, ces patrons de variations ont été réalisés de trois différentes façons. Les représentations les plus courantes, pour la morphométrie traditionnelle et la morphométrie géométrique sont les ACP (analyse en composantes principales) (Bonhomme *et al.* 2017 ; Burger *et al.* 2011 ; Cucchi *et al.* 2015 ; García-Granero *et al.* 2016 ; Ros *et al.* 2014). Elles sont souvent utilisées car elles permettent de visualiser rapidement la structuration des données dans un espace de dimension réduite et en déformant le moins possible la réalité. Ici, elles ont été réalisées sur les logiciels Past (Hammer *et al.* 2001) et Tps. Elles permettent de visualiser les axes principaux de variations des individus entre eux mais aussi de visualiser la

déformation des graines le long de ces axes (en ce qui concerne la morphométrie géométrique). Cette visualisation de la déformation en morphométrie géométrique, est notamment possible lors de la réalisation des ACP sur le logiciel Tps Relw. La plateforme permet de se déplacer le long des axes d'interprétation de l'ACP en y visualisant les consensus fictifs de déformations. Cette visualisation s'obtient à l'aide des grilles de représentations des déformations montrant les changements de conformations entre les individus (Cucchi *et al.* 2015).

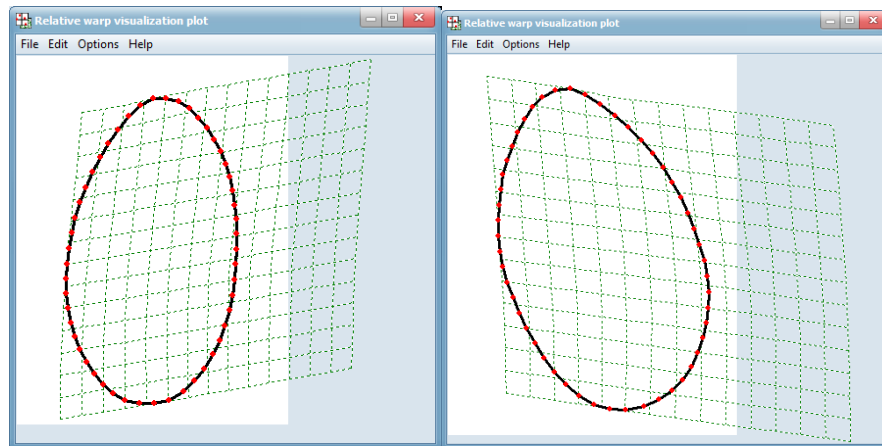


Figure 34 : Grilles de déformations des graines de *G. barbadense carbonisées*, visualisation avec le logiciel Tps Relw

En utilisant la morphométrie géométrique on peut observer ainsi la conformation des graines. Pour étudier la forme des graines de cotons, il faut combiner les deux aspects de tailles centroïdes et de conformations. Il faut faire des tests à partir de la morphométrie géométrique et des valeurs des coordonnées Procuste des variables alignées (ou points de contours) en ajoutant une variable sur le jeu de données, les tailles centroïdes. Afin que le signal soit plus visible, on utilise non pas les valeurs des tailles centroïdes mais le logarithme de ces valeurs. Cela permet de visualiser la forme des graines de cotons : taille et conformation, et non pas uniquement la taille avec les valeurs de tailles centroïdes ou les données de conformations avec les coordonnées Procuste des spécimens alignés. Outre les ACP, les analyses factorielles discriminantes multi groupes (AFD ou LDA *linear discriminant analysis* en anglais) sont souvent utilisées pour les études en morphométries (Bonhomme *et al.* 2017 ; Bourgeon *et al.* 2017 ; Cucchi *et al.* 2015 ; Pagnoux *et al.* 2015 ; Ros *et al.* 2014). Réalisées sous le logiciel Past (Hammer *et al.* 2001), elles permettent la visualisation des patrons de différenciation et de classifications entre plusieurs groupes. Les graphiques ainsi obtenus nous montrent les deux premiers plans factoriels de l'AFD. Par exemple, elles permettent de faire apparaître des groupes taxonomiques entre un corpus actuel et des échantillons archéologiques. Une autre façon d'observer les variations de la forme des

graines et est d'effectuer un approche en clustering à l'aide de la librairie Mclust (Fraley *et al.* 2012) (sous R (R Core Team 2018)). A la différence des analyse factorielles discriminantes (AFD) qui vont optimiser les différences entre des groupes a priori, l'approche en clustering sous Mclust recherche une structuration de la variation des variables de formes et de conformation sans facteurs de groupe a priori à l'aide de modèles bayésiens qui permettra d'identifier le nombre de groupes le plus probable d'après la structuration de la variation des jeux de données. Cette approche a été réalisée sur les scores de l'ACP, les 3 axes pour la morphométrie traditionnelle et les 3 premiers axes, mesurant 95% ou plus de la variabilité pour les données en morphométrie géométrique. Elle peut donc être réalisée aussi bien sur les données de morphométrie traditionnelle que géométrique (conformation et forme). Les résultats de ces tests se présentent sous la forme de graphique de densité montrant à la fois les groupes que le test a mis en évidence et la densité de ces groupes en fonction du nombre d'individus inclus dedans.

Les données de tailles (morphométrie traditionnelle) ou de conformation (coordonnées Procruste) et même celles concernant la forme (concaténation des spécimens alignés et coordonnées Procruste et les tailles centroïdes) peuvent également être représentées, sous forme d'arbres grâce à l'algorithme du neighbour joining et en se basant sur des moyennes de groupes. Cette approche permet ainsi de visualiser rapidement les relations de similarité et de dissimilarité entre les groupes. Ces arbres ne peuvent être réalisés que lorsque la p-value (tests d'ANOVA ou de MANOVA est significative). Pour les données de forme, taille et conformation, on peut utiliser plusieurs distances différentes comme les distances Mahalanobis (Bourgeon *et al.* 2017 ; Ros *et al.* 2014), mais également les distances euclidiennes qui font parties des distances de base utilisées dans ce genre de représentations et qui seront utilisées pour cette étude.

## **5. Résultats**

Cette partie concernant les résultats de l'étude combine à la fois les méthodes de morphométrie traditionnelle et de morphométrie géométrique. Ces méthodes sont appliquées au corpus de graines modernes, fraîches et carbonisées expérimentalement, puis au corpus de graines archéologiques carbonisées.

## 5.1. Etude morphométrique du corpus moderne

### 5.1.1. Morphométrie traditionnelle

La morphométrie traditionnelle de cette étude se base sur trois mesures : la longueur, la largeur et l'épaisseur des graines de coton. Le corpus moderne utilisé ici pour les analyses se compose de 296 graines, 90 pour chacune des espèces *G. hirsutum*, *G. arboreum* et *G. barbadense* ainsi que 87 pour *G. herbaceum* (Tableau 6 dans 4.5 page 32). La MANOVA montre qu'il existe bien des différences de taille entre les quatre espèces de coton *G. arboreum*, *G. herbaceum* et *G. hirsutum*, *G. barbadense* (tests de Wilks' lambda,  $p = 1,189^E-128$  et test de Pillai trace,  $p = 1,093^E-77$ ). La visualisation graphique de la variation à l'aide de l'AFD (Figure 35) indique un fort recouvrement morphologique entre les 4 groupes d'espèces qui est confirmé par le faible pourcentage de classification correcte qui n'est que de 62,76%. Ce recouvrement ne s'effectue pas entre tous les groupes mais selon une structuration bien particulière. En effet, les cotons d'origine africaine et asiatique (*G. arboreum* et *G. herbaceum*) et les cotons d'origine américaine (*G. hirsutum* et *G. barbadense*) se superposent entre eux en formant deux grands ensembles comme c'est visible ici, sur l'ACP et l'AFD (Figure 35). Cette visualisation des données est confirmée par les modèles bayésien et les tests de Mclust réalisés sur ces données et qui distinguent très clairement les deux grands ensembles (Figure 36).

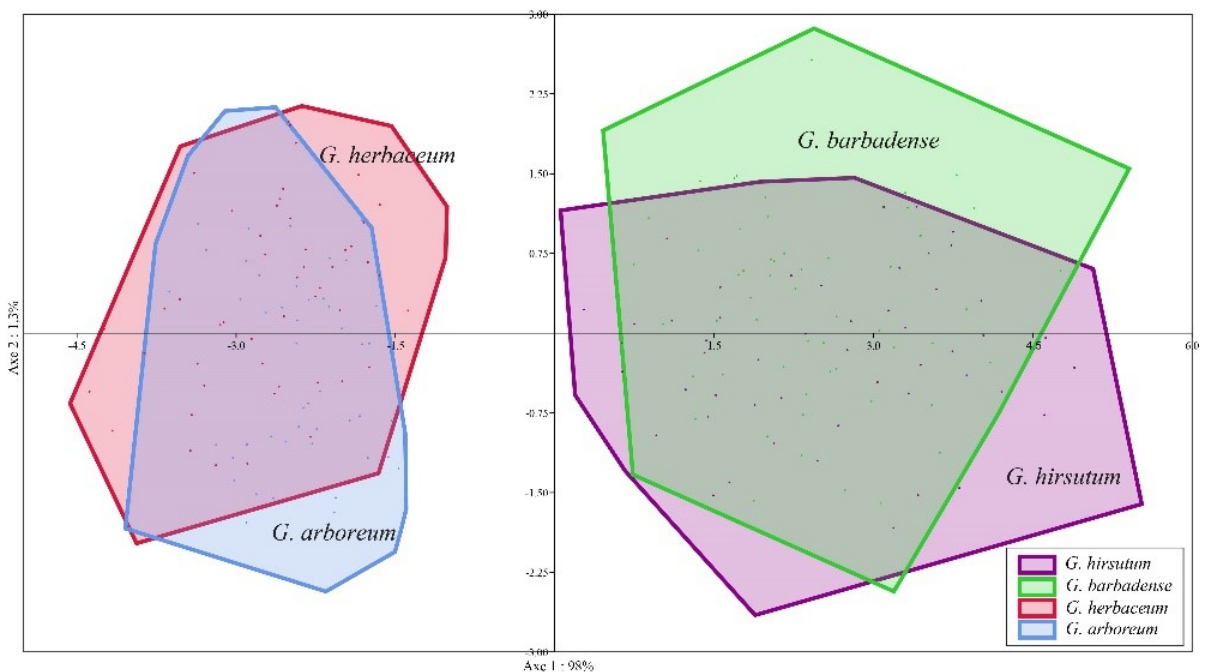


Figure 35 : Premier plan factoriel de l'AFD de la taille (longueur, largeur, épaisseur) des individus modernes / effectif total 296 graines (Axe 1 : 98% Axe 2 : 1,3%)



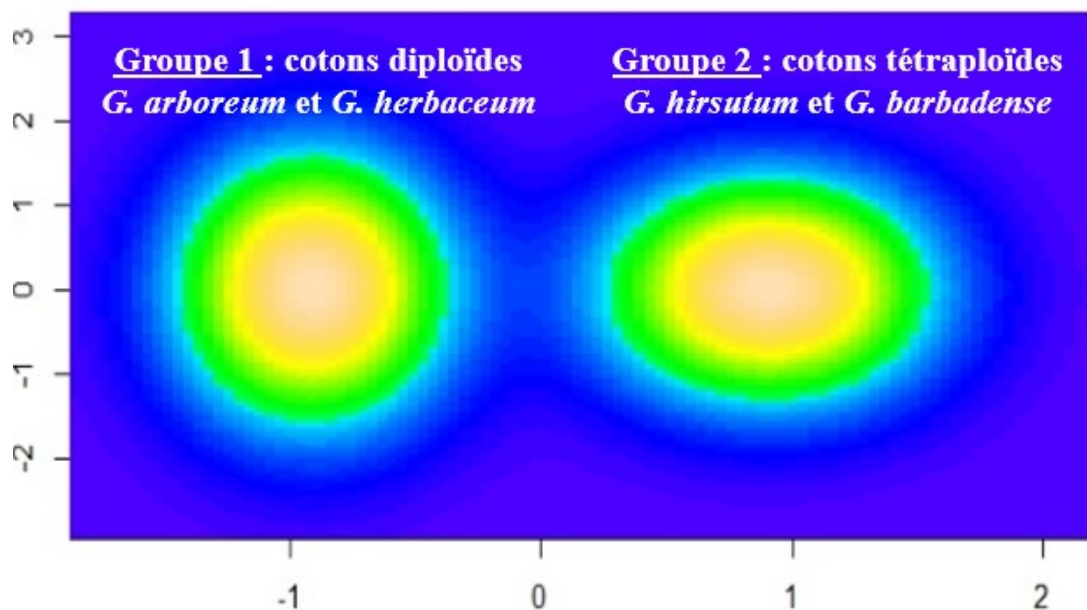


Figure 36 : Graphique de densité réalisé par la méthode du clustering avec modèle bayésien (Mclust) sur les données de morphométrie traditionnelle des graines de coton moderne (N=296), montrant les deux ensembles diploïde et tétraploïdes (Contribution des axes de l'ACP, PC1 : 89,2 % - PC2 : 7,2 %)

### 5.1.2. Morphométrie géométrique

Trois critères différents sont observés : la conformation des graines, les tailles centroïdes des individus et la forme, qui combine ces deux aspects.

#### 5.1.2.1. Etude de la conformation

La conformation des graines est testée à l'aide des coordonnées Procruste (51 car 51 *Landmark* ont été utilisés) des individus alignés. Les tests de Wilks' lambda et Pillai trace confirment qu'il existe bien des différences de conformation entre les 4 taxons (respectivement,  $p = 2,687^E-33$  et  $p = 6,498^E-28$ ). Contrairement aux résultats obtenus en morphométrie traditionnelle, les grands ensembles de cotons diploïdes et tétraploïdes ne sont pas séparés les uns des autres visuellement par l'AFD (Figure 37), mais cette dernière montre cependant un taux de classification correcte des individus (83,94%). L'ACP en revanche, continue à présenter une structuration en deux groupes, un comprenant les espèces diploïdes et l'autre les deux espèces tétraploïdes.

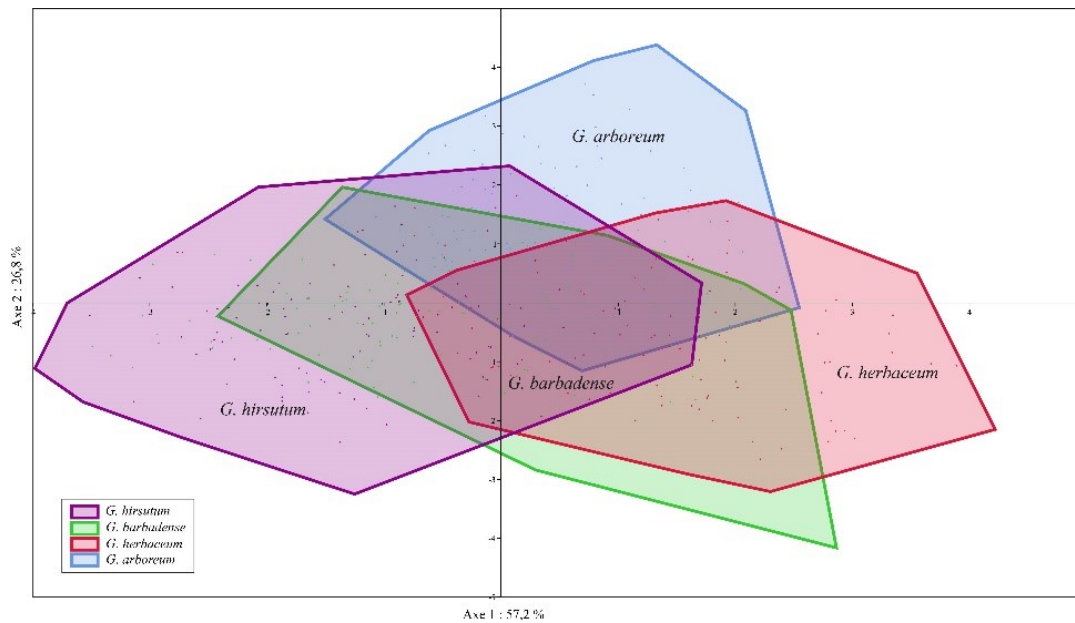


Figure 37 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus modernes, effectif total 296 graines (Axe 1 : 57,2% Axe 2 : 26,8%)

### 5.1.2.2. Etude des tailles centroïdes

L'ANOVA des tailles centroïdes, obtenues après la superposition Procuste, indique qu'il existe des différences de taille centroïde hautement significative entre les 4 taxons (test de Kruskal-Wallis,  $p = 1.556 \times 10^{-46}$  et  $p$  avec permutation =  $1.025 \times 10^{-30}$ ). Les deux espèces de coton diploïde ont des médianes de tailles centroïdes plus petites que les deux espèces de coton tétraploïdes (Figure 38). Il est à noter, en plus que la variation des tailles centroïdes des cotons diploïdes est plus importante que celle des cotons tétraploïdes. Là encore, les deux groupes diploïdes et tétraploïdes se structurent séparément.

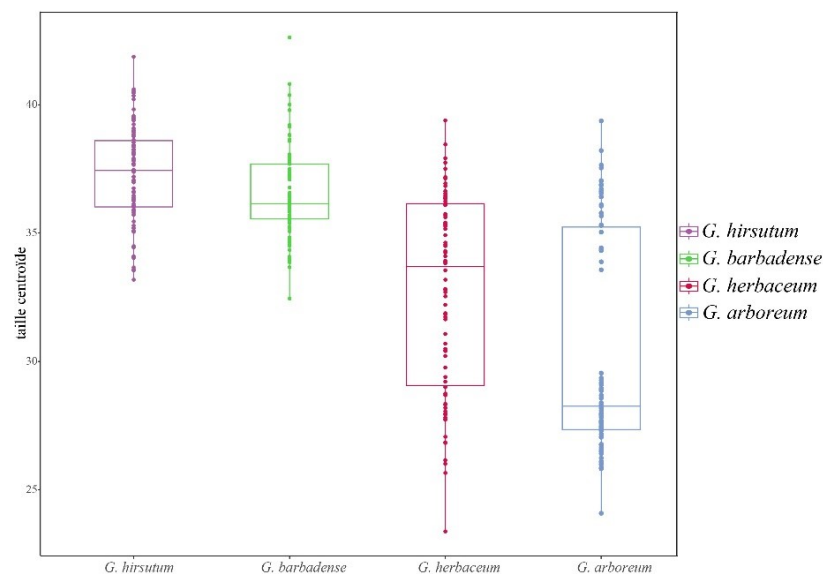


Figure 38 : Boîte à moustache (Boxplot) représentant les tailles centroïdes des 4 espèces de coton, effectif total 296 graines

### 5.1.2.3. Etude de la forme

L'étude de la forme des graines en morphométrie géométrique est effectuée en combinant dans un même jeu de donnée la conformation et les tailles centroïdes. La MANOVA montre qu'il existe des différences significatives de forme entre les 4 taxons (test de Wilks' lambda,  $p = 3,555E-51$ , Pillai trace,  $p = 1,423^{-38}$ ), l'AFD montre un recouvrement important des 4 groupes et un taux de reclassement correct de 89,3% (Figure 39).

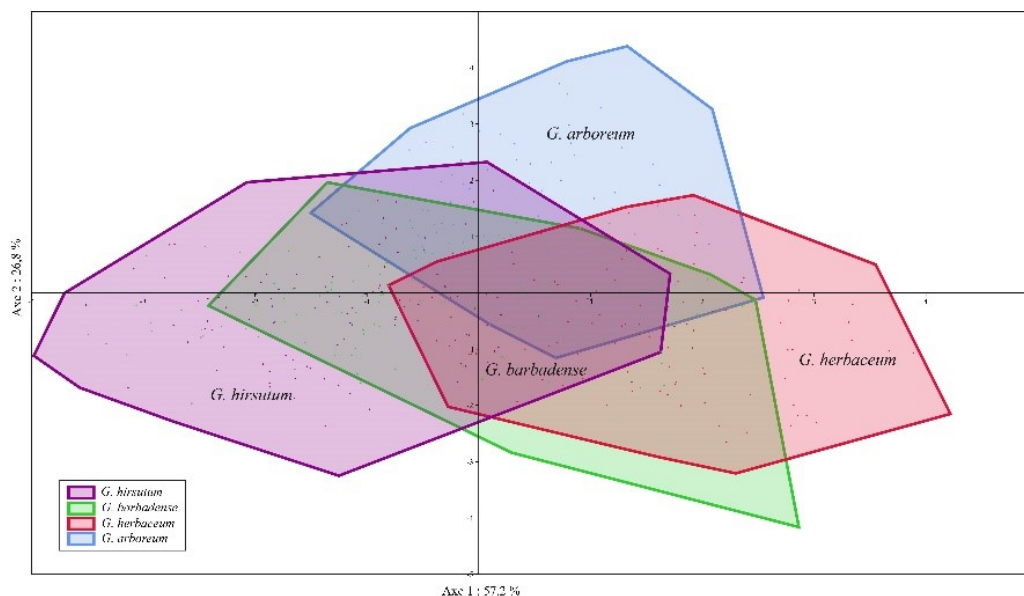


Figure 39 : Premier plan factoriel de l'AFD de la forme des individus modernes, effectifs 296 graines (Axe 1 : 57,2% - Axe 2 : 26,8%)

Ces premiers résultats montrent que l'analyse de la forme est la méthode qui fonctionne le mieux pour identifier les graines de coton selon l'espèce avec un taux de reclassement élevé (Tableau 7). La morphométrie traditionnelle présente le taux de reclassement le plus faible (62,76%). De plus, les méthodes de morphométrie traditionnelle et géométrique, particulièrement les tailles centroïdes permettent de séparer les cotons en deux grands groupes : diploïdes et tétraploïdes comme on le voit sur les représentations d'ACP. Toutes les méthodes permettent de reclasser les espèces diploïdes et tétraploïdes à 100%, ce sont les reclassements des cotons au rang de l'espèce qui pose plus de problème et augmente lors de l'utilisation des données de forme pour arriver à un taux de reclassement de 89,3% (Tableau 7).

Méthode utilisée	Corpus utilisé	p de la MANOVA		Pourcentage de classification de l'AFD
		Wilks' lambda	Pillai trace	
Morphométrie traditionnelle	Moderne	1.189E-128	1.093E-77	62,76%
Morphométrie géométrique (=conformation)	Moderne	2,69E-33	6,50E-28	83,94%
Morphométrie géométrique, forme (=conformation + tailles centroïdes)	Moderne	3,56E-51	1,42E-38	89,30%

Tableau 7 : Résultats des MANOVA et taux de classement par AFD des graines de coton moderne selon les différentes méthodes morphométriques utilisées, effectif total 296 graines

### 5.1.3. Cas d'étude sur les spécimens de l'Herbier

Le corpus moderne utilisé ici pour les analyses se compose de 296 graines, 90 pour chacune des espèces *G. hirsutum*, *G. arboreum* et *G. barbadense* ainsi que 87 pour *G. herbaceum* celui de l'Herbier revient à 125 graines (4.5 page 32 Tableau 6, voir Annexe 3). En morphométrie traditionnelle, les résultats de la MANOVA réalisée à la fois sur les spécimens modernes non carbonisés et les spécimens de l'Herbier (4 groupes, effectif total 421 graines) confirment qu'il existe des différences significatives entre les quatre espèces de coton (test de Wilks' lambda,  $p = 7,647^E-41$  et test de Pillai trace,  $p = 1,025^E-35$ ). L'AFD reclasse les individus à 61,58%. L'ACP continue de distinguer les espèces diploïdes africaine et indienne des espèces tétraploïdes américaines que ce soit grâce à la morphométrie traditionnelle ou grâce à la conformation des graines. L'AFD réalisée sur les données de morphométrie géométrique en conformation donne une classification plus importante de 75,85% (MANOVA, tests de Wilks' lambda,  $p = 1,798^E-24$  et test de Pillai trace,  $p = 8,42^E-22$ ), L'AFD de la forme (MANOVA, tests de Wilks' lambda  $p = 2,339^E-41$  et test de Pillai trace,  $p = 5,632^E-32$ ) indique un taux de reclassement meilleur que pour la conformation ou la morphométrie traditionnelle puisqu'il s'élève à 77,9%.

La morphométrie traditionnelle et géométrique permet donc, en partie, de vérifier les identifications visuelles et botaniques réalisés sur les spécimens de l'Herbier, en particulier au niveau des deux grands groupes de cotons, diploïdes ou tétraploïdes qu'elle distingue parfaitement. Le spécimen P06612653 est un exemple de coton de l'espèce *G. barbadense* identifié comme tel à son arrivée d'Hawaï dans les collections de l'Herbier en 1924. L'identification taxonomique est soutenue par les résultats des différentes AFD réalisées. Un autre exemple d'application de ce modèle : les graines venant de la planche d'Herbier N°P00574278, ayant pour origine Madagascar, ont été enregistrées comme *Gossypium* sp. Le spécimen a été identifié grâce à la clef de détermination (voir partie Matériel et méthode) comme appartenant à l'espèce *G. barbadense*, notamment en raison de la présence de graines nues (sans ouate) et des épicalices en formes de filaments. Cette identification est confirmée par les différentes AFD classifiant ce coton comme appartenant à l'espèce *G. barbadense*. Un autre exemple intéressant est celui de la planche N°P06610164 datant de 1932 (Algérie) et enregistré dans la base de données de l'Herbier comme étant un spécimen de *G. herbaceum* mais dont l'identification, faute de critères anatomiques suffisants, n'avait pas pu être confirmée. Les AFD l'ont également classifié comme étant un exemplaire de *G. herbaceum*. Ces exemples montrent que les analyses permettent d'appuyer les identifications botaniques et historiques de l'Herbier. Ces interprétations ne sont pas totalement fiables. En effet, si les

deux grands groupes, espèces diploïdes et tétraploïdes se distinguent nettement et à 100% par toutes les méthodes de mesures, les espèces au sein des groupes ne sont pas, elles, tout le temps identifiables.

En effet, plus même que pour les planches d'Herbier où l'on peut observer le plant de coton et les caractéristiques botaniques (voir Annexe 3), les spécimens de l'Herbier présents eux sans les planches nécessitent une aide de la morphométrie afin de déterminer l'identification. En effet, sans la présence de feuilles, épicalices, ou même des données écrites, ces spécimens sont souvent mal identifiés. Grâce à l'analyse discriminante et aux classifications, on peut voir que l'échantillon provenant du Turkestan contrairement à l'identification proposée, n'est sans doute pas un *G. herbaceum* mais plutôt un coton de l'espèce *G. barbadense*. Il en est de même pour l'échantillon originaire des Indes (datant de 1866) de *G. arboreum* qui apparaît correspondre à l'espèce *G. barbadense* encore une fois. De plus, ces graines présentent la caractéristique d'être nues, qui est une caractéristique unique de l'espèce *G. barbadense*.

Ces AFD semblent fonctionner relativement bien (taux de classification entre 62 et 78%) et donner des résultats d'interprétations aidant à la caractérisation et à l'identification des espèces même si ces interprétations ne sont pas totalement fiables. En effet, si les deux grands groupes, espèces diploïdes et tétraploïdes se distinguent très nettement par toutes les méthodes de mesures, les espèces au sein des groupes ne sont pas, elles, tout le temps identifiable.

#### **5.1.4. Cas d'étude sur le spécimen de récolte MS Flora 14 (Arabie Saoudite)**

Le corpus moderne utilisé ici pour les analyses se compose de 296 graines, 90 pour chacune des espèces *G. hirsutum*, *G. arboreum* et *G. barbadense* ainsi que 87 pour *G. herbaceum* celui de la récolte, MS\_Flora\_14 est de 30 (Tableau 6 dans 4.5 page 32) pour un total de 326 graines. Le spécimen de coton récolté en Arabie Saoudite lors de la mission de terrain en 2018 (MS\_Flora\_14) a été identifié comme étant un spécimen de *G. barbadense* grâce à la lecture des flores et à l'observation sur le terrain (Figure 40). La clef de détermination des cotons a également mené à cette conclusion. Il constitue donc un bon exemple pour tester les identifications du modèle réalisé avec le corpus moderne de graines.





Figure 40 : Photographie du plan de *Gossypium* (MS\_Flora\_14), détail sur les feuilles et l'épicalice © Bouchaud et Milon

La MANOVA réalisée sur les mesures de morphométrie traditionnelle des graines de coton du corpus moderne et du spécimen MS\_Flora\_14 montre des différences significatives entre les groupes (tests de Wilks' lambda,  $p = 3,15^E-74$ , test de Pillai trace,  $p = 1,53^E-48$ ). L'AFD reclasse les 30 graines de MS\_Flora\_14 comme appartenant à l'espèce *G. barbadense*.

La méthode du clustering avec modèle bayésien (Mclust) et les classifications qu'il effectue à partir des spécimens modernes du CIRAD et du spécimen MS\_Flora\_14 en morphométrie traditionnelle définit deux grands ensembles des graines correspondant aux deux groupes observés lors de l'ACP entre les cotons diploïdes et tétraploïdes (Figure 41).

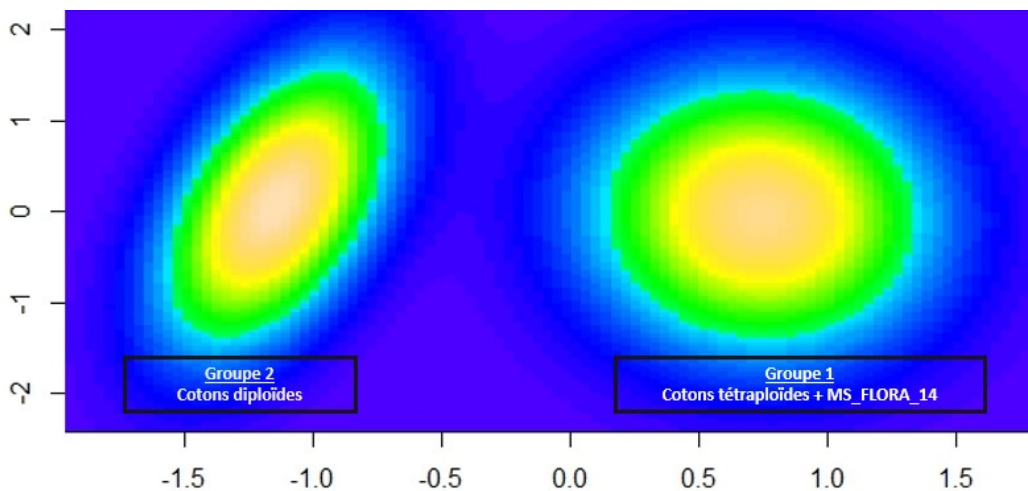


Figure 41 : Graphique de densité réalisé par la méthode du clustering avec modèle bayésien (Mclust) sur les données de morphométrie traditionnelle des graines de coton moderne (N=296) et du spécimen MS\_Flora\_14 (N=30), montrant les deux ensembles diploïde et tétraploïde (Contribution des axes de l'ACP, PC1 : 87,8 % - PC2 : 7,9 %)

Le groupe N°1 regroupe les spécimens appartenant aux espèces *G. hirsutum* et *G. barbadense* et l'échantillon récolté en Arabie Saoudite (MS\_Flora\_14) ce qui confirme que l'identification réalisée à partir de l'observation. Le groupe N°2 regroupe les échantillons de *G. arboreum* et *G. herbaceum*. Encore une fois on peut observer la différenciation des deux groupes de cotons, diploïdes et tétraploïdes. En revanche, ce résultat, confirmé par les tests de Mclust et la représentation (Figure 41) permet d'affirmer cette différenciation jusqu' alors observer et montrer par les différents reclassements. A l'aide d'un arbre de distances (Neighbour joining) entre les moyennes des groupes à partir des variables de morphométrie traditionnelle (Figure 42), on voit que MS\_Flora\_14 est plus proche de *G. barbadense* et de *G. hirsutum* et très éloigné des moyennes des cotons diploïdes.

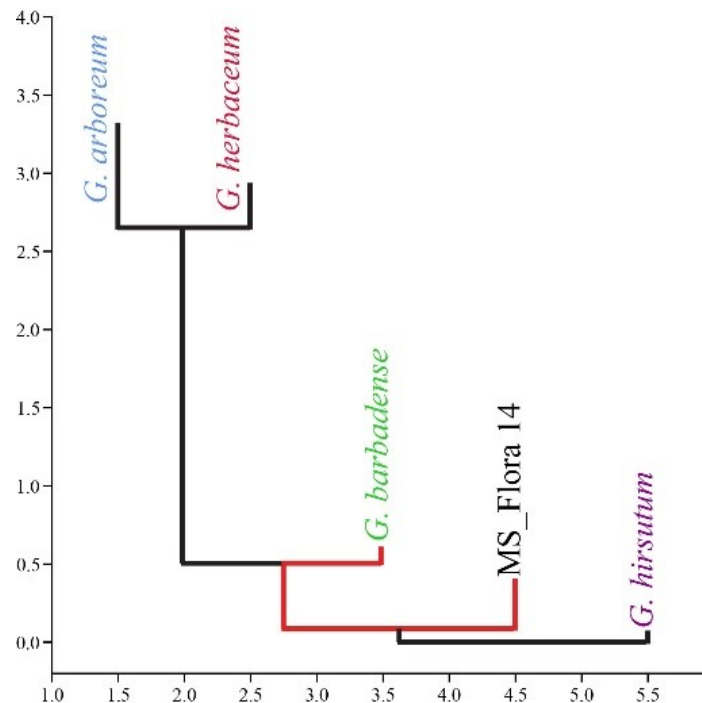


Figure 42 : Arbre de distance de Neighbour joining visualisation les distances euclidiennes entre les différents groupes de cotons (moderne et MS\_Flora\_14)

L'AFD de la conformation du même corpus (moderne et MS\_Flora\_14) classe correctement les individus à 85,19%. Les 30 graines de MS\_Flora\_14 sont classifiées comme étant des spécimens de *G. barbadense*. (MANOVA, tests de Wilks' lambda,  $p = 1,722^E-53$  et test de Pillai trace,  $p = 2,55^E-52$ )

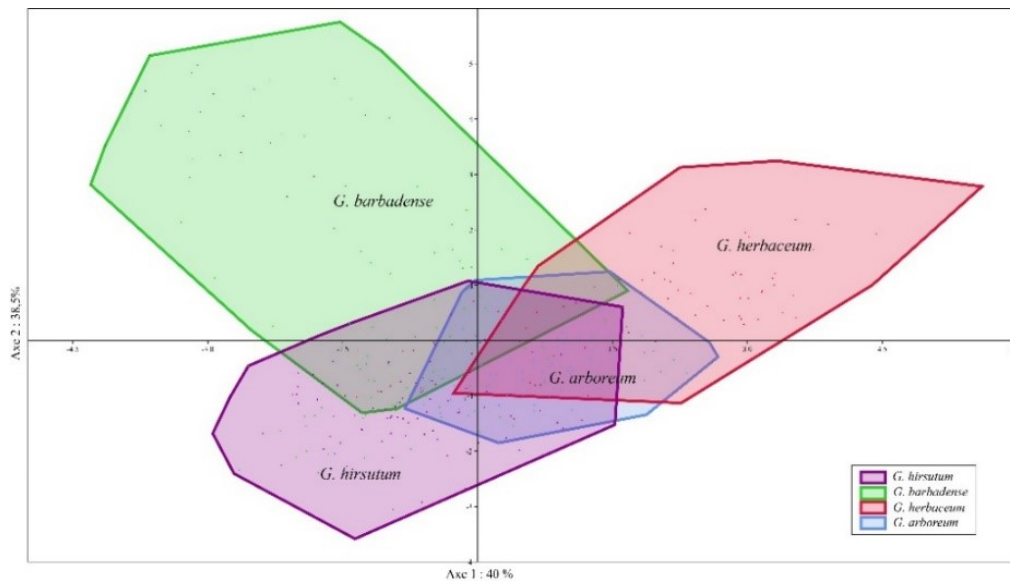


Figure 43 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus moderne et de l'échantillon de récolte, effectifs 356 graines (Axe 1 : 40%- Axe 2 : 38,5%)

L'AFD de la forme classifie les individus à 88,05% (Figure 44) (MANOVA, tests de Wilks' lambda,  $p = 6,488 \times 10^{-66}$  et test de Pillai trace,  $p = 2,545 \times 10^{-53}$ ).

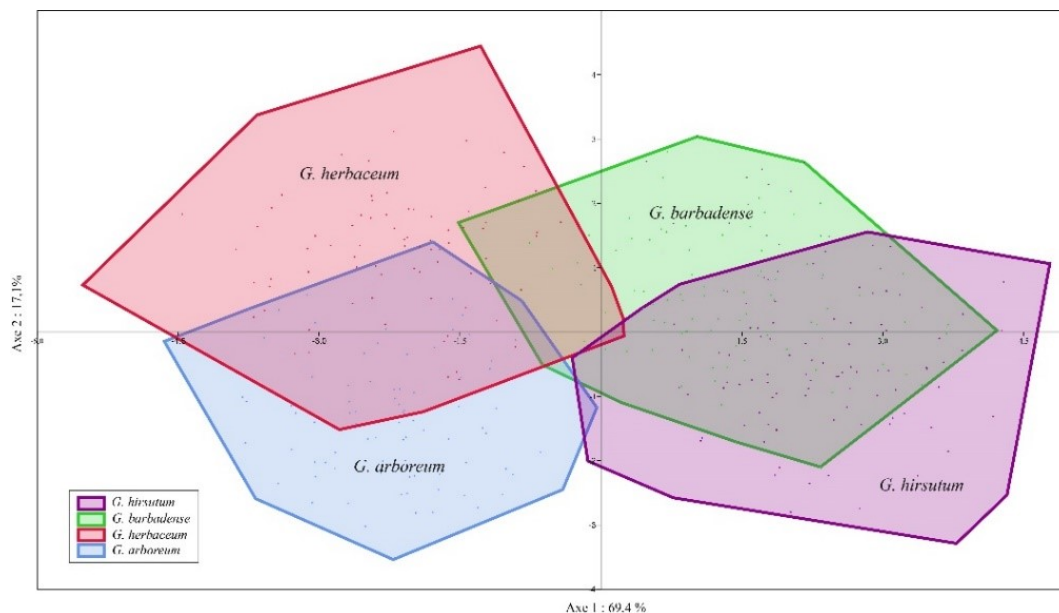


Figure 44 : Premier plan factoriel de l'AFD sur la forme des individus moderne et de l'échantillon récolté, effectif de 356 graines (Axe 1 : 69,4%- Axe 2 : 17,1%).

Cet exemple permet également de montrer que le modèle et le corpus de graines modernes en utilisant toutes les méthodes permet de vérifier une identification de graines de coton modernes à l'espèce.

Les résultats mise en avant grâce à l'étude du corpus moderne ne permettent pas d'aller jusqu'à l'espèce mais permettent très nettement de différencier les deux grands groupes génétiques des cotons diploïdes et tétraploïdes c'est-à-dire des cotons diploïdes et des cotons américains. Les spécimens modernes venant des collections de l'Herbier ne présentent pas des

résultats de classification très bons. Ils font passer, en morphométrie traditionnelle par exemple le taux de classification des individus modernes de 62,76% à 61,58% lorsqu'on les inclut (Tableau 8). Il en va de même pour toutes les méthodes de morphométrie. Les identifications fournies par les données des planches d'Herbier ne peuvent, en conséquence, pas être remise en cause uniquement par les résultats des études morphométriques. En revanche, la morphométrie se révèle être un outil complémentaire aux vérifications d'espèces de cotons réalisées à partir de flores, de clefs de déterminations et d'observations et permet des classifications entre 61,6% et 89,3% (Tableau 8). L'exemple de l'échantillon récolté en Arabie Saoudite dont les déterminations sont prouvées par la morphométrie nous montre le fonctionnement des analyses. Ces résultats montrent également que l'étude de la forme est la méthode la plus efficace afin de différencier les espèces de coton mais que les deux autres méthodes sont également efficaces.

Méthode utilisée	Corpus utilisé	p de la MANOVA		Pourcentage de classification de l'analyse discriminante
		Wilks' lambda	Pillai trace	
Morphométrie traditionnelle	<b>Moderne</b>	<b>1.189E-128</b>	<b>1.093E-77</b>	<b>62,76%</b>
	4 espèces (moderne et Herbier mélangé)	7,65E-41	1,03E-35	61,58%
	4 espèces (moderne et MS_Flora_14 mélangé)	3,15E-74	1,53E-48	74,50%
Morphométrie géométrique (=conformation)	<b>Moderne</b>	<b>2,69E-33</b>	<b>6,50E-28</b>	<b>83,94%</b>
	4 espèces (moderne et Herbier mélangé)	1,80E-24	8,42E-22	75,85%
	4 espèces (moderne et MS_Flora_14 mélangé)	1,72E-53	2,55E-52	85,19%
Morphométrie géométrique, forme (=conformation + tailles centroïdes)	<b>Moderne</b>	<b>3,56E-51</b>	<b>1,42E-38</b>	<b>89,30%</b>
	4 espèces (moderne et Herbier mélangé)	2,34E-41	5,63E-32	77,90%
	4 espèces (moderne et MS_Flora_14 mélangé)	6,49E-66	2,55E-53	88,05%

Tableau 8 : Récapitulatif des méthodes utilisées, des résultats de classifications par AFD et des tests de MANOVA associés sur le corpus moderne, les spécimens de l'Herbier et MS\_Flora\_14

Il s'agit ensuite de tester les effets de la carbonisation sur la discrimination inter et intra-espèces au sein des assemblages. La carbonisation permet-elle de discriminer les espèces ou uniformise-t-elle les données ?

## 5.2. Les expérimentations de carbonisation

Dans le but d'obtenir des résultats sur l'identification des graines archéologiques à partir d'une approche comparative basée sur un corpus actuel, la carbonisation de certains spécimens a été testée pour tenter d'approcher les conditions et morphologies des graines

archéologiques. Cette partie de l'étude morphométrique porte donc sur les individus carbonisés, ce qui représente un effectif total de 120 graines.

### 5.2.1. Morphométrie traditionnelle

La morphométrie traditionnelle, comme pour l'étude du corpus moderne non carbonisé sépare de façon très distincte les grands ensembles diploïdes et tétraploïdes lorsque l'on réalise une AFD (MANOVA, tests de Wilks' lambda et Pillai trace :  $p = 2,451 \times 10^{-55}$  et  $3,458 \times 10^{-25}$ ). Mais elle ne permet pas de bien distinguer l'espèce des graines à l'intérieur de ces ensembles (Figure 45) le taux de classifications correctes est de 63,87%.

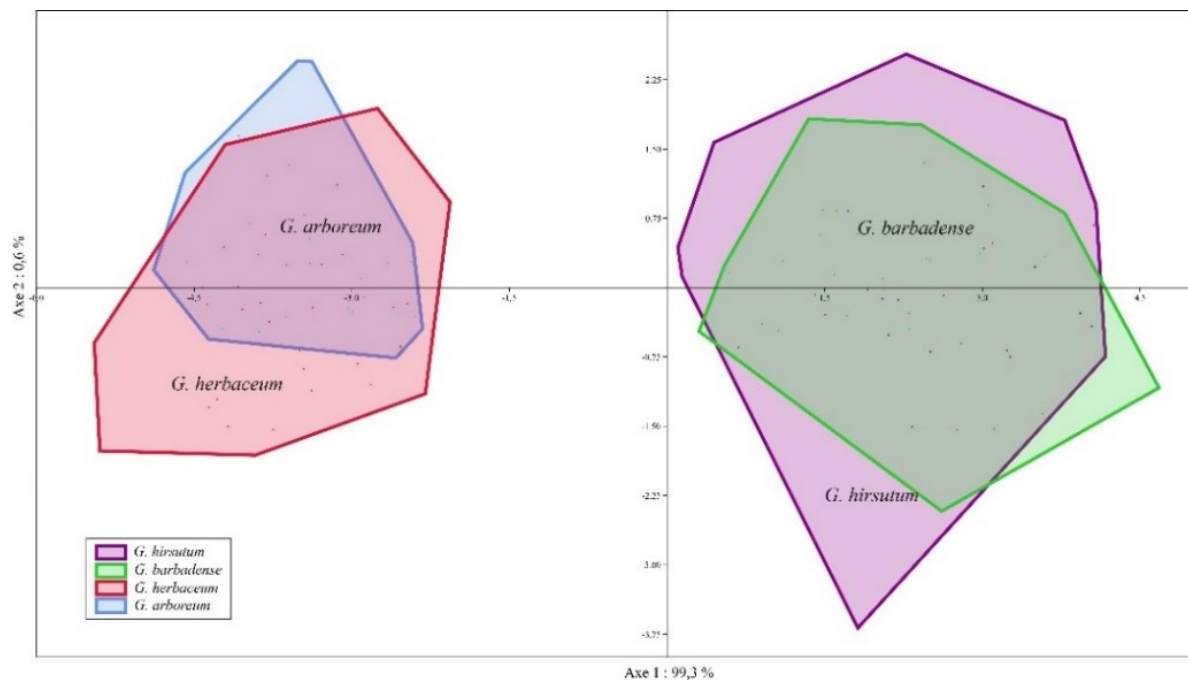


Figure 45 : Premier plan factoriel de l'AFD de la taille (longueur, largeur, épaisseur) des individus carbonisés, effectifs 120 graines (Axe 1 : 99,3% - Axe 2 : 0,8%)

### 5.2.2. Morphométrie géométrique

#### 5.2.2.1. Etude de la conformation

L'AFD de la conformation des graines de coton modernes carbonisées confirme les résultats obtenus sur les individus non carbonisés selon lesquelles la conformation est plus performante que la morphométrie traditionnelle avec une très bonne différenciation des groupes taxonomique (Figure 46) et une classification correcte des individus à 100% (MANOVA, test de Wilks' lambda,  $p = 0,0004117$  et test de Pillai trace  $p = 0,00166$ ).



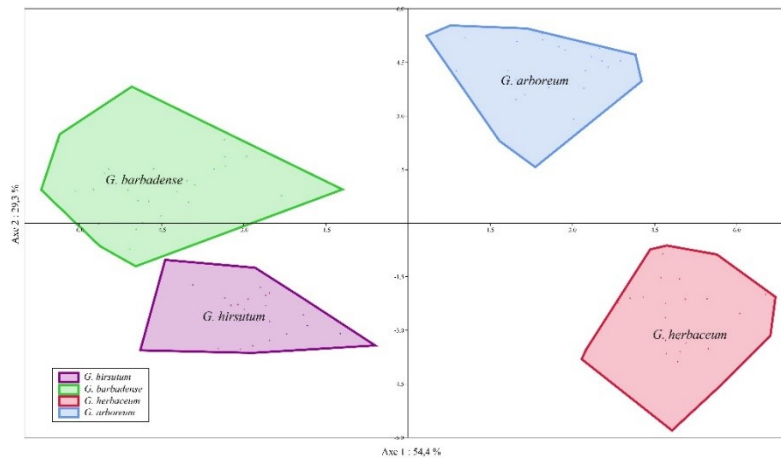


Figure 46 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus carbonisés, effectifs 120 graines (Axe 1 : 54,4%- Axe 2 : 9,3%)

### 5.2.2.2. Etude des tailles centroïdes

L'analyse de variance des tailles centroïdes en ANOVA montre qu'il existe des différences de tailles hautement significatives entre les groupes (test de Kruskal-Wallis  $p = 2,752 \times 10^{-18}$ ). Contrairement aux résultats de l'AFD faite sur la conformation (Figure 46), les tailles centroïdes sur les individus carbonisés ne permettent même pas de discriminer les ensembles d'espèces diploïdes et tétraploïdes et présentent une distribution des valeurs très réduite (Figure 47), exceptée pour l'espèce *G. barbadense* qui présente la distribution de valeurs la plus étendue. Ce qui peut s'expliquer par les très grandes variations de formes et de déformations observées pour les graines carbonisées de cette espèce à l'œil nu. Cette grande disparité intra spécifique pour *G. barbadense* visible sur les tailles centroïdes.

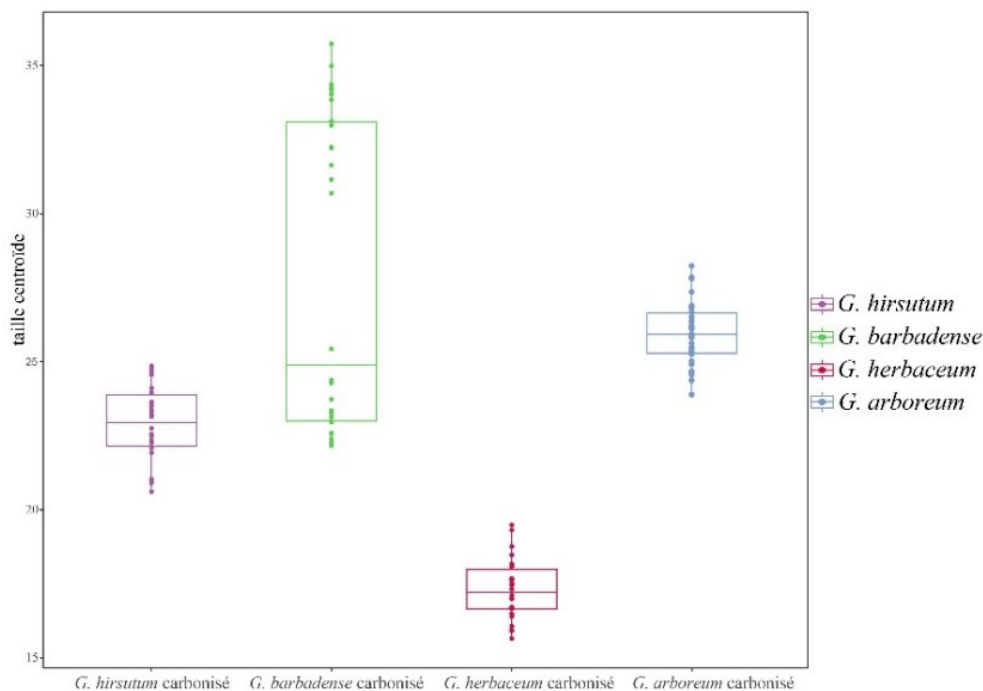


Figure 47 : Boîte à moustache (boxplot) représentant les tailles centroïdes des individus carbonisés, effectif 120 graines

### 5.2.2.3. Etude de la forme

L'AFD de la forme des graines de coton modernes carbonisées montre que les groupes sont significativement différents (tests de Wilks' lambda et Pillai trace  $p = 3.621 \times 10^{-5}$  et  $p = 0.0005671$ ). Les individus sont correctement reclassés à 100% (Figure 48).

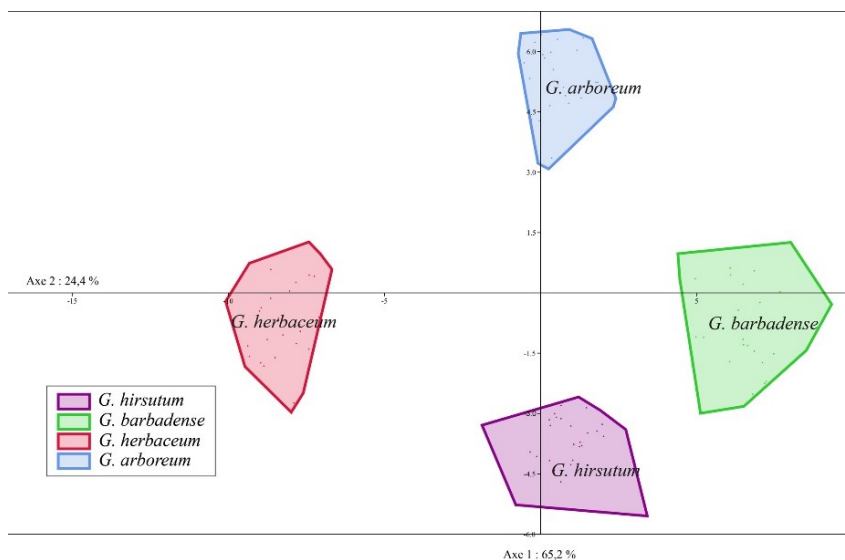


Figure 48 : Premier plan factoriel de l'AFD de la forme des individus carbonisés, effectif 120 graines (Axe 1 : 65,2%- Axe 2 : 24,4%)

### 5.2.3. Comparaison du matériel moderne frais et carbonisé

Les déformations liées à la carbonisation sont visibles en morphométrie traditionnelle et géométrique. L'AFD réalisée sur les données de taille des individus modernes carbonisés et non carbonisés, (MANOVA tests de Wilks' lambda et Pillai trace :  $p = 8,15 \times 10^{-125}$  et  $p = 8,935 \times 10^{-77}$ ) montre une distribution des individus sur le premier axe de l'AFD (contribution : 93,7%) qui peut s'expliquer par une évolution des tailles (diminution après carbonisation). Les deux groupes diploïde et tétraploïde restent différenciables (Figure 49).

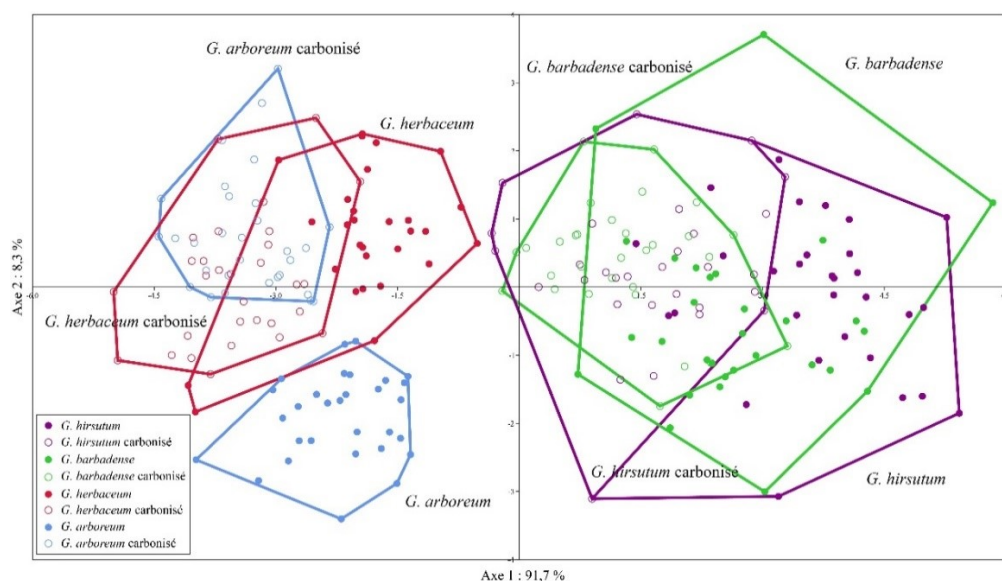


Figure 49 : Premier plan factoriel de l'AFD des données de morphométrie traditionnelle sur le corpus moderne carbonisé et non carbonisé, effectif total 416 graines (Axe 1 : 91,7%, Axe 2 : 8,3%) forme pleine : non carbonisé, forme vide : carbonisé

L'AFD réalisée sur les données de forme des mêmes individus (MANOVA tests de Wilks' lambda et Pillai trace :  $p = 3,28^E-05$  et  $p = 3,54^E-176$ ) indique également une variation de la forme tout en conservant les différences entre les deux groupes. Le *boxplot* des tailles centroïdes (test de variance, ANOVA  $p = 2,373^E-148$  et Kruskal-Wallis  $p = 1,274^E-66$ ) montre que la taille centroïde des individus diminue avec la carbonisation, ce que l'on observe également à l'œil nu (Figure 51, Figure 52). Les graines de coton ont tendance à diminuer de taille et à s'arrondir avec la carbonisation. Par ailleurs, les espèces diploïdes présentent, à leurs surfaces, moins de signes de déformations (éléments fondus, brillance) que les espèces tétraploïdes (voir Annexe 5).

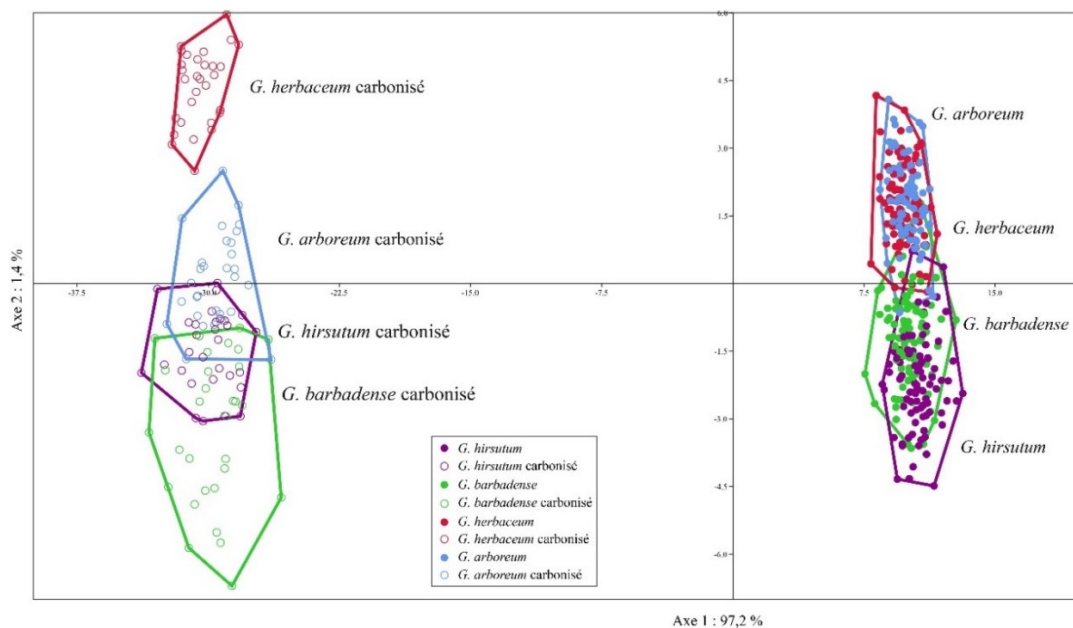


Figure 50 : Premier plan factoriel de l'AFD des données de forme sur le corpus moderne carbonisé et non carbonisé, effectif total 416 graines (Axe 1 : 97,2 %, Axe 2 : 1,4 %) forme pleine : non carbonisé, forme vide : carbonisé



Figure 51 : Graines de coton des quatre espèces domestiquées, dans l'ordre de gauche à droite, *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. arboreum* et *G. herbaceum* (0015\_hirs\_G4-0002\_barb\_G1-0001\_arb\_G20-0008\_herb\_C12) © J. Milon



Figure 52 : Graines de coton des quatre espèces domestiquées et carbonisées, dans l'ordre de gauche à droite, *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. arboreum* et *G. herbaceum* (0005\_hirs\_G6--0006\_barb\_G1--0011\_arb\_G7--0004\_herb\_G27) © J. Milon

La deuxième chose que l'on observe à partir des tailles centroïdes c'est que la carbonisation a un effet de diminution de la variation des valeurs intra spécifique (Figure 53).

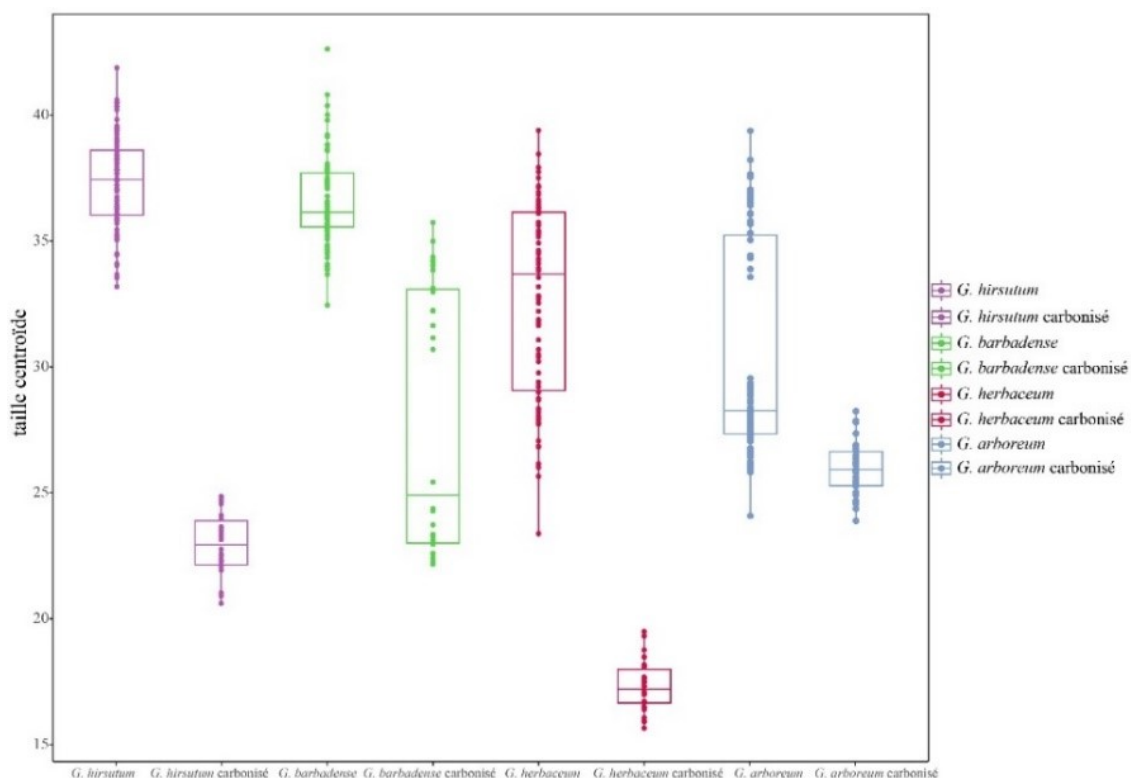


Figure 53 : Boite à moustaches représentant les tailles centroïdes des individus moderne non-carbonisés et carbonisés, effectif total 389 graines

La carbonisation affecte donc positivement la discrimination inter spécifique et permet la distinction parfaite des 4 espèces pour la conformation et la forme (Tableau 9). Les résultats de cette étude sur le corpus moderne et carbonisé (Tableau 9) ont conduit à des choix concernant l'analyse des spécimens archéologiques. Il a été décidé, au regard des résultats particulièrement discriminants sur les individus carbonisés de ne comparer les échantillons archéologiques qu'avec le corpus moderne carbonisé afin d'augmenter les chances de classifications des individus archéologiques.

Tableau 9 : Récapitulatif des méthodes utilisées, des résultats de classifications et des tests de MANOVA sur le corpus moderne

Méthode utilisée	Corpus utilisé	p de la MANOVA		Pourcentage de classification de l'analyse discriminante
		Wilks' lambda	Pillai trace	
Morphométrie traditionnelle	Moderne	1.189E-128	1.093E-77	62,76%
	4 espèces (moderne et carbonisé mélangé)	1,67E-95	3,97E-55	58,74%
	Moderne (4 groupes, un par espèce) + carbonisé (4 groupes, un par espèce)	7,89E-192	7,33E-110	49,86%
Morphométrie géométrique (=conformation)	Carbonisé	2.451E-55	3.458E-25	63,87%
	Moderne	2,69E-33	6,50E-28	83,94%
	4 espèces (moderne et carbonisé mélangé)	2,52E-51	7,85E-46	79,79%
Morphométrie géométrique, forme (=conformation + tailles centroïdes)	Moderne (4 groupes, un par espèce) + carbonisé (4 groupes, un par espèce)	0	2.79E-135	86,32%
	Carbonisé	0,0004117	0,00166	100%
	Moderne	3,56E-51	1,42E-38	89,30%
Morphométrie géométrique, forme (=conformation + tailles centroïdes)	4 espèces (moderne et carbonisé mélangé)	3,72E-68	3,52E-52	83,60%
	Moderne (4 groupes, un par espèce) + carbonisé (4 groupes, un par espèce)	0	3.54E-176	89,68%
	Carbonisé	3.621E-05	0.0005671	100%

### 5.3. Étude morphométrique des spécimens archéologiques

#### 5.3.1. Morphométrie traditionnelle

L'AFD des données de morphométrie traditionnelle sur les spécimens archéologiques des deux sites et les individus carbonisés expérimentalement sépare significativement les groupes (tests de Wilks' lambda et Pillai trace :  $p = 2,332^E-185$  et  $2,67^E-138$ ) et présente un taux de reclassement correct de 77,39% (Figure 54). Deux grands ensembles se dessinent, un comprenant les espèces américaines de coton et l'autre regroupant les individus archéologiques des deux sites et les espèces de diploïdes.

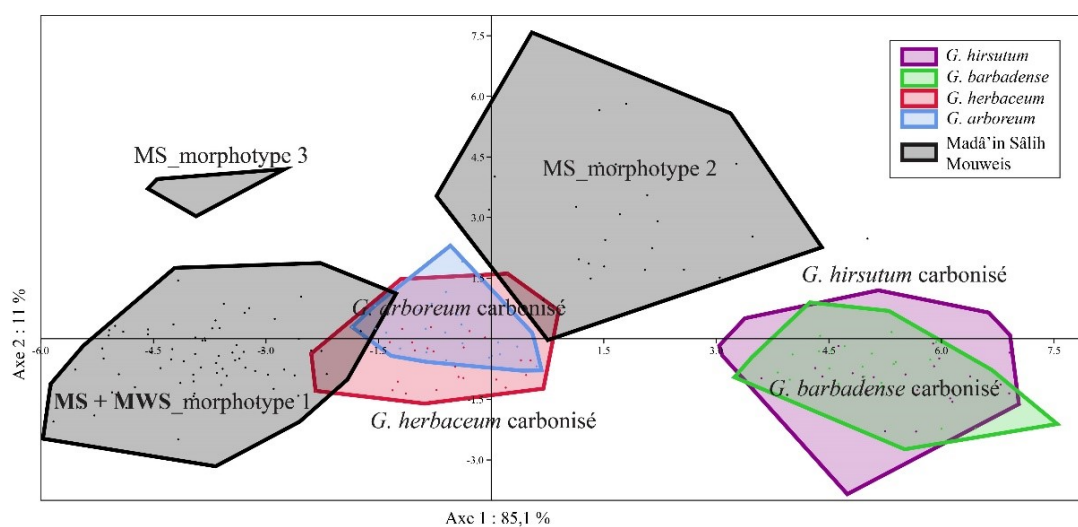


Figure 54 : Premier plan factoriel de l'AFD des données de morphométrie traditionnelle sur le corpus carbonisé et archéologiques, effectif total 235 graines (Axe 1 : 85,1%, Axe 2 : 11%) MS= Madâ'in Sâlih, MWS=Mouweis



La méthode du clustering avec modèle bayésien (Mclust) définit 3 groupes (Figure 55). Les deux premiers groupes comprennent les individus archéologiques et *G. herbaceum* / *G. arboreum* qui possèdent un pont entre eux, montrant une ressemblance entre les groupes. Le troisième groupe très divergent contient les deux espèces américaines. Etant donné les résultats de classifications des individus carbonisés en morphométrie traditionnelle, de 63,87%, il n'est pas surprenant de ne pouvoir déterminer au rang de l'espèce les identifications des exemplaires archéologiques.

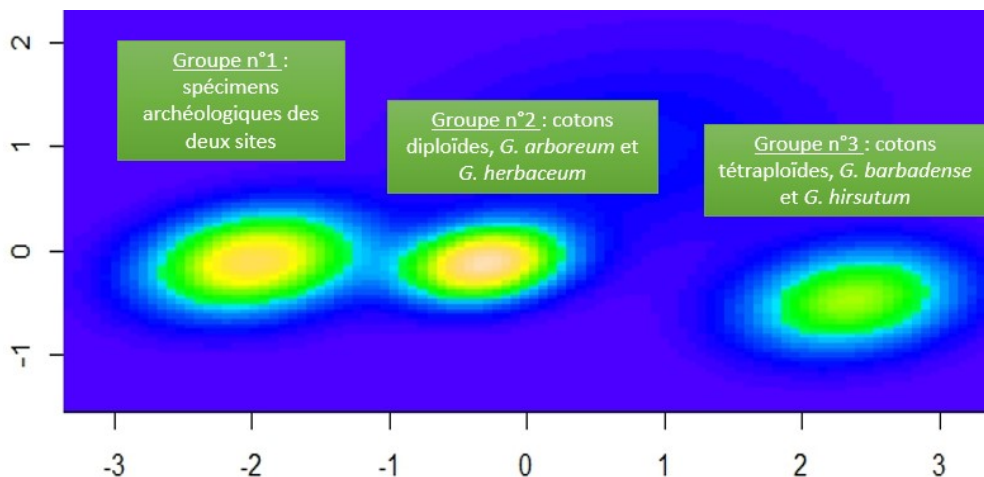


Figure 55 : Graphique de densité, Mcclust, obtenu sur les données en morphométrie traditionnelle sur les individus carbonisés et archéologiques, effectif total 235 graines (Contribution des axes de l'ACP, Axe 1 : 85,1%- Axe 2 : 11%)

Au sein des assemblages archéologiques, on peut également noter une structuration particulière en ce qui concerne les graines provenant du site de Madâ'in Sâlih. Leur variation morphologique semble se partager en trois groupes. Ce postulat mis en évidence par l'ACP réalisé sur les individus de Madâ'in Sâlih en morphométrie traditionnelle est confirmé par le modèle bayésien qui met en évidence ces trois groupes et permet de classer chacune des graines comme appartenant à un de ces groupes (Figure 56, voir description des morphotypes Annexe 7). Ces trois morphotypes ne se retrouvent pas à Mouweis qui présente quant à lui une homogénéité morphologique. En revanche, le morphotype présent à Mouweis correspond au morphotype n°1 de Madâ'in Sâlih. En observant les graines une à une, et en vérifiant leur contexte d'accumulation et leur position stratigraphique, il apparaît que toutes les graines d'une même couche stratigraphique se retrouve dans un des groupes de morphotypes et n'appartiennent pas à des groupes différents. De plus, les formes des graines de cotons du groupe 2, légèrement plus allongées ne ressemble pas aux graines affiliées au groupe 1, plus rondes que les autres (Figure 57, Figure 58, Figure 59).

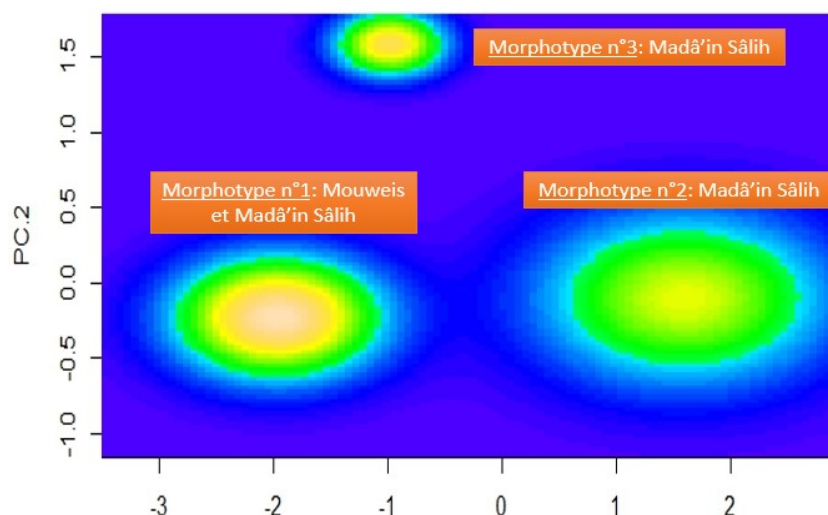


Figure 56 : Graphique de densité, Mcclus obtenu sur les données en morphométrie traditionnelle sur l'ensemble des graines archéologiques, effectif 115 graines (PC1 : 89,2%- PC2 : 6,1 %)

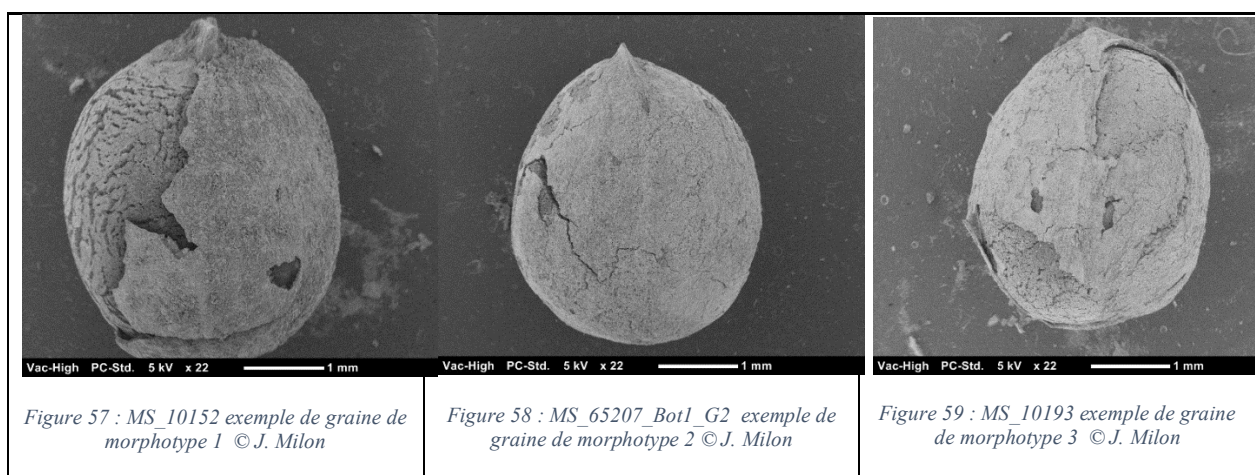


Figure 57 : MS\_10152 exemple de graine de morphotype 1 © J. Milon

Figure 58 : MS\_65207\_Bot1\_G2 exemple de graine de morphotype 2 © J. Milon

Figure 59 : MS\_10193 exemple de graine de morphotype 3 © J. Milon

Lorsqu'on analyse les individus archéologiques de Mouweis et de Madâ'in Sâlih sans utiliser les différents groupes définis, l'analyse MANOVA indique qu'il n'y a pas de différences significatives entre les deux sites archéologiques ( $p = 0,06284$ ). En revanche, lorsque l'on découpe le site de Madâ'in Sâlih en trois grands groupes morphologiques, la MANOVA nous montrent que les groupes sont significativement différents (test de Wilks' lambda  $p = 6.826 \times 10^{-60}$ , test de Pillai  $p = 8.401 \times 10^{-41}$ ). Les résultats des tests deux à deux nous montre en plus que le morphotype 1 de Madâ'in Sâlih n'est pas significativement différent du morphotype de Mouweis (Tableau 10).

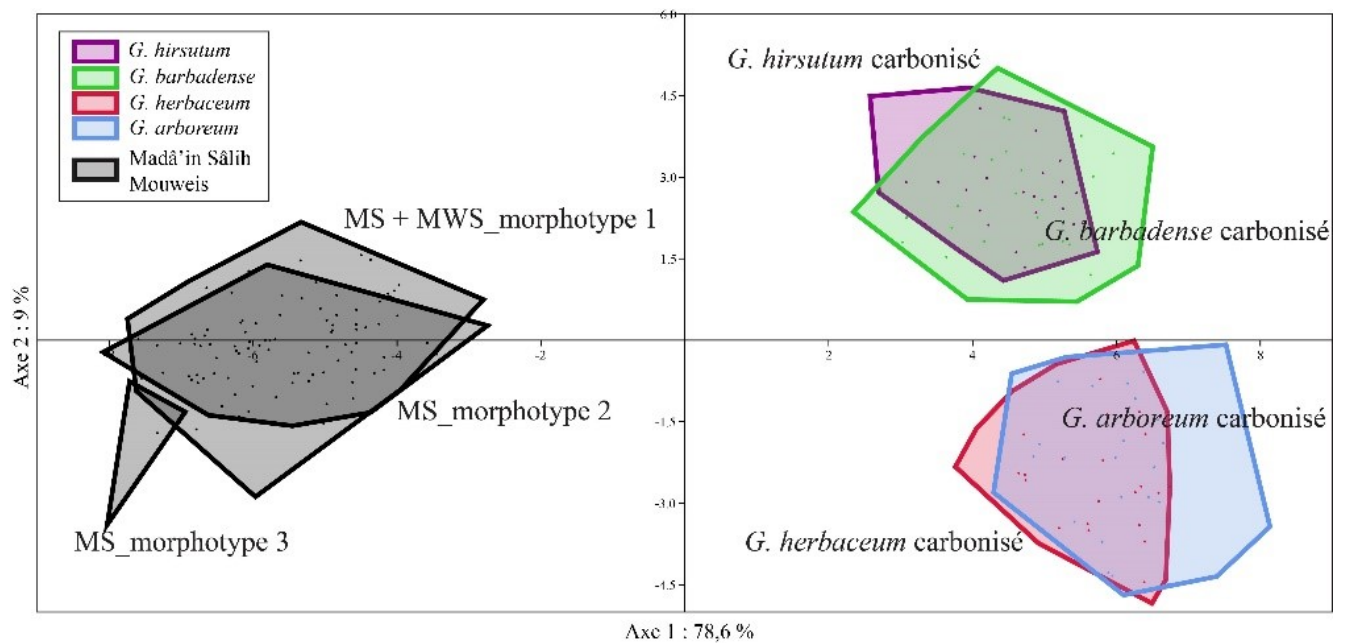
Tableau 10 : Récapitulatif des résultats deux à deux du test de MANOVA sur les données morphométriques traditionnelles mesurées sur les spécimens archéologiques, effectif 115 graines

	MS_Morphotype 2	MS_Morphotype 1	MS_Morphotype 3	Mouweis
MS_Morphotype 2		3.2584E-39	8.8867E-12	5.4447E-20
MS_Morphotype 1	3.2584E-39		1.217E-15	0.10497
MS_Morphotype 3	8.8867E-12	1.217E-15		2.3891E-07
Mouweis	5.4447E-20	<b>0.10497</b>	2.3891E-07	

### 5.3.2. Morphométrie géométrique

#### 5.3.2.1. Etude de la conformation

L'AFD de la conformation des graines carbonisées et archéologiques permet, elle aussi, de différencier les graines de cotons diploïdes, tétraploïdes et archéologiques (test de Wilks' lambda,  $p = 8,057^E-57$  et test de Pillai trace,  $p = 5,62^E-28$ ) et classe correctement les individus à 95,65%. Ce que l'analyse discriminante ne permet pas en revanche c'est de déterminer l'(les)espèce(s) présente(nt) sur les sites archéologiques alors que les résultats de classifications pour la conformation des individus carbonisées étaient de 100% (Figure 60).



L'ACP de la conformation montre, elle, les recouvrements entre les espèces et les cotons archéologiques et particulièrement entre les espèces diploïdes et les graines archéologiques (Figure 61). Il est également intéressant de noter que les morphotypes archéologiques mis à jour par la modélisation bayésienne en morphométrie traditionnelle n'apparaissent pas sur les données de conformation. En effet, les données bayésiennes sur la conformation ne mettent en évidence qu'un seul groupe au sein des spécimens de Madâ'in Sâlih (Figure 63). Il n'existe aucune structuration sur les données de conformation chez les spécimens alignés archéologiques de Madâ'in Sâlih (Figure 62).

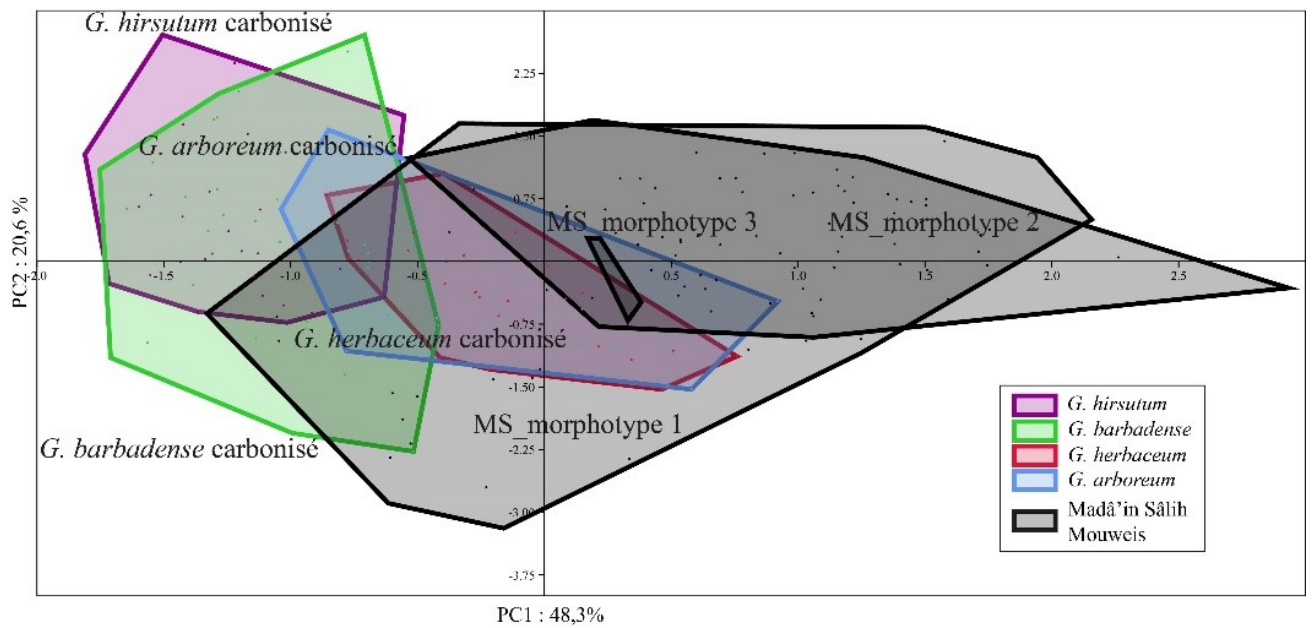


Figure 61 : ACP de la conformation des individus carbonisés et archéologiques, effectifs 235 graines (PC1 : 48,3% - PC2 : 20,6%)

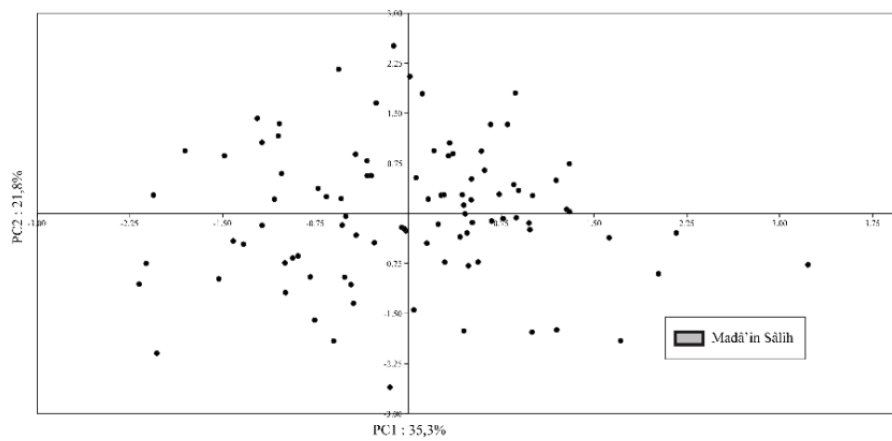


Figure 62 : ACP en morphométrie géométrique sur les individus archéologiques de Madâ'in Sâlih, effectifs 99 graines (PC1 : 35,3% - PC2 : 21,8%)

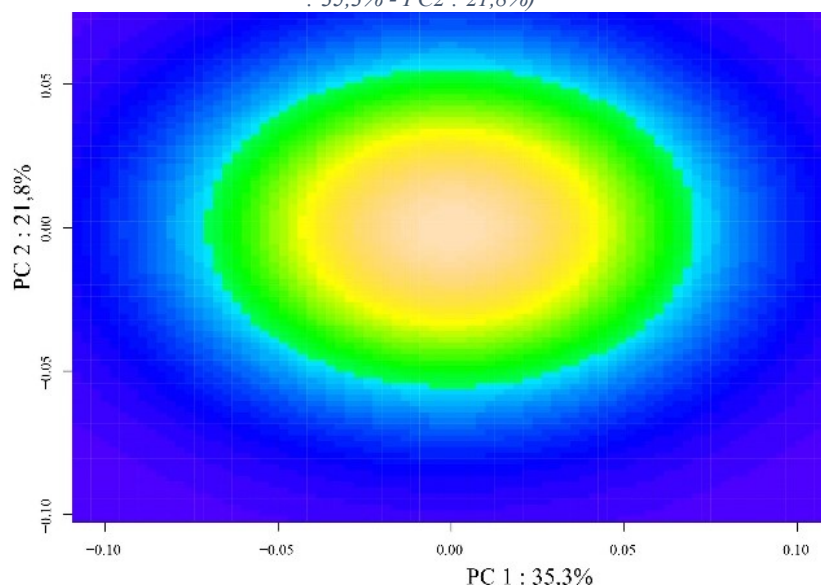


Figure 63 : Graphique de densité, Mcclus obtenus sur les données de conformation du site de Madâ'in Sâlih, effectif 99 (PC1 : 35,3% - PC2 : 21,8%)

### 5.3.2.2. Etude des tailles centroïdes

L'ANOVA des tailles centroïdes montre des différences de morphotypes dans les assemblages archéologiques qui n'étaient pas visible sur les données de conformations ( $p = 1,03^E-56$  et test de Kruskal Wallis,  $p = 2,101^E-32$ ). De plus, la structuration des tailles centroïdes des morphotypes confirment les résultats de Mclust des données de morphométrie traditionnelle et rassemble le morphotype n°1 de Madâ'in Sâlih et les graines de Mouweis. De plus, les tailles centroïdes des spécimens archéologiques (Madâ'in Sâlih et Mouweis confondus) se rapprochent de celles des graines de *Gossypium herbaceum* carbonisé, en rouge sur le *Boxplot* (Figure 64). Ce résultat ne permet pourtant pas d'affirmer que les spécimens archéologiques correspondent à des graines de cotons de l'espèce *G. herbaceum*.

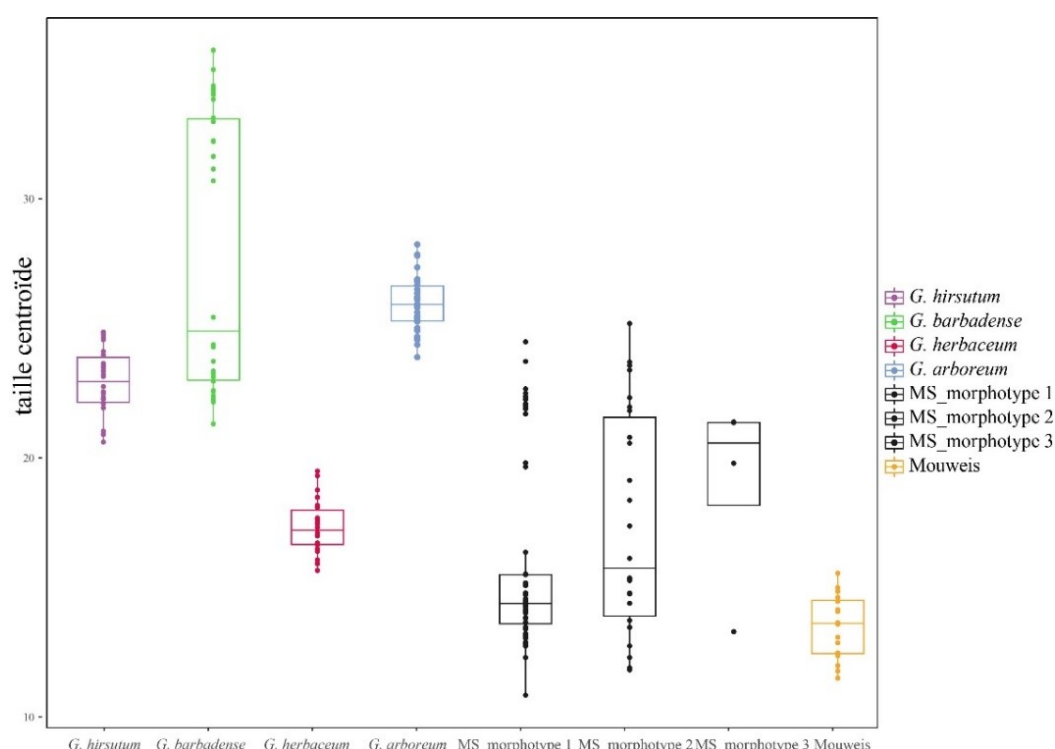


Figure 64 : Boite à moustache représentant les tailles centroïdes des individus carbonisés et archéologiques, effectif 235 graines

### 5.3.2.3. Etude de la forme

La MANOVA de la forme montre que les groupes sont significativement différents (test de Wilks' lambda,  $p = 3.542^E-155$ , test de Pillai trace,  $p = 6.251^E-63$ ). La visualisation de l'ACP nous montre un fort recouvrement entre les graines archéologiques et les graines carbonisées de *G. herbaceum* (Figure 65). Cependant, l'information concernant les morphotypes et la structuration à l'intérieur des échantillons archéologiques est perdue comme nous le montre les données obtenues grâce aux tests bayésiens qui mélange les trois morphotypes en deux groupes totalement hétérogènes. En effet, avec les tests de Mclust sur la forme, on obtient deux groupes au sein des individus de Madâ'in Sâlih qui ne correspondent



pas aux morphotypes définis en morphométrie traditionnelle et ne sont plus homogènes quant aux données stratigraphiques. Les graines d'une même unité stratigraphiques sont présents à la fois dans le groupe 1 et le groupe 2 ce qui n'était pas le cas avec les données de morphométrie traditionnelle. Les graines venant de Mouweis se retrouvent isolées des graines de Madâ'in Sâlih (Figure 66). Encore une fois, l'AFD, malgré un taux de résolution excellent, 98,68%, ne permet pas de définir l'(les)espèce(s) présente(nt) sur les sites archéologiques.

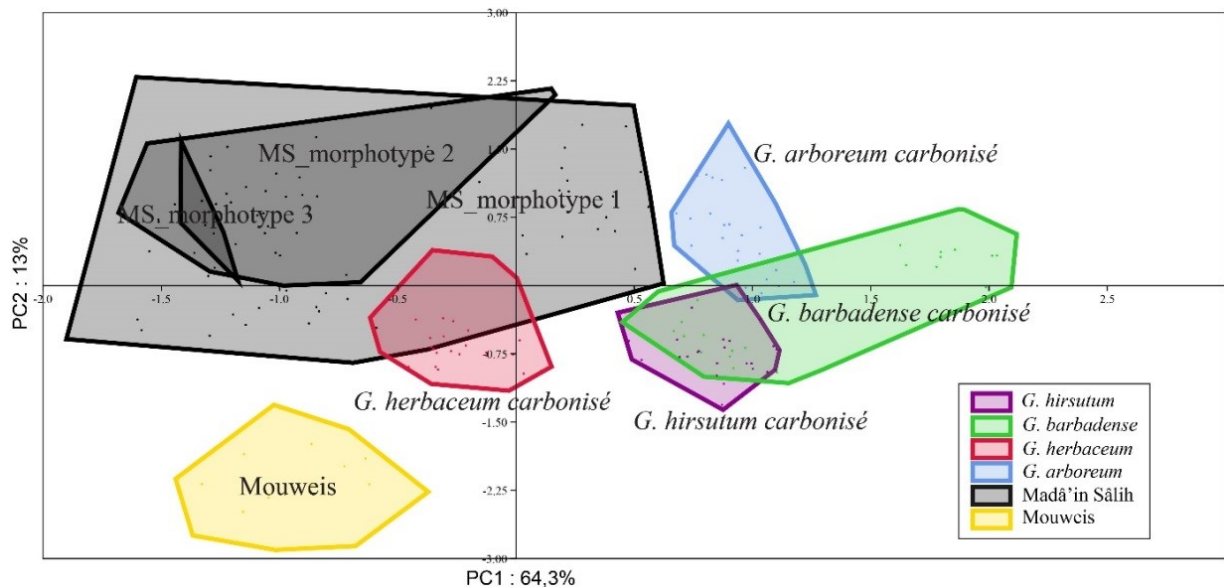


Figure 65 : ACP de la forme des individus carbonisés et archéologiques, effectif 235 graines (PC1 : 64,3% et PC2 : 13%)

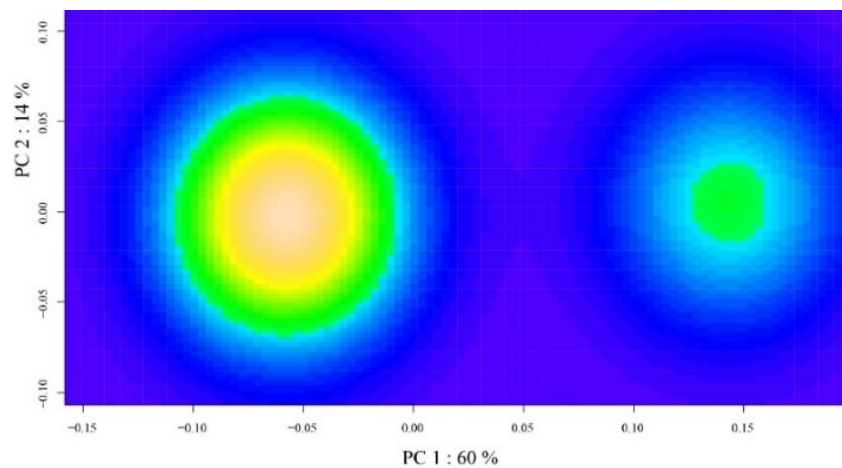


Figure 66 : Graphique de densité, Mcclust obtenu sur les données de forme des graines archéologiques de Madâ'in Sâlih, effectif 99 (PC1 : 60% - PC2 : 14%)

Afin de tenter de rapprocher le plus possible les spécimens archéologiques d'une espèce moderne appartenant au corpus, nous avons effectué un arbre des relations morphologiques à l'aide de l'algorithme neighbour joining appliquée aux distances euclidiennes entre les formes moyennes pour chaque groupe moderne et archéologique (Figure 67). Les résultats montrent des similarités fortes au sein des assemblages archéologiques, y compris, et surtout, entre le morphotype 1 de Madâ'in Sâlih et l'unique

morphotype de Mouweis. Ce que cette représentation montre également c'est que l'espèce *G. herbaceum* est l'espèce du corpus moderne dont la forme de la graine est la plus proche des spécimens archéologiques. Grâce à la méthode de clustering, on peut noter qu'en distances euclidiennes, les deux espèces tétraploïdes sont très proches, de même que les deux espèces diploïdes. Les deux groupes de graines de cotons mis en évidence sur les spécimens modernes et carbonisés se retrouvent ici.

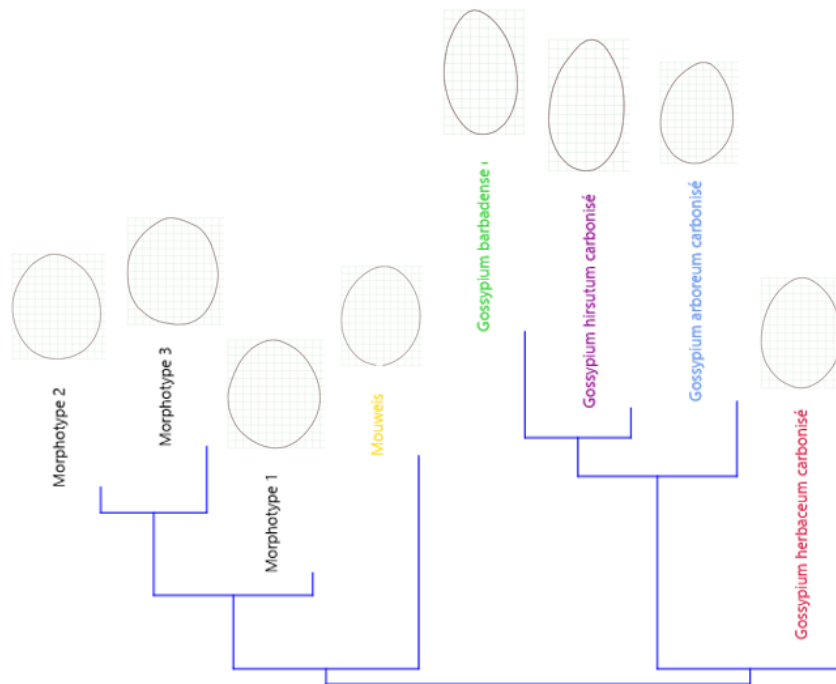


Figure 67 : Arbre du plus proche parent, méthode de clustering neighbour joining, calculé sur les distances euclidiennes entre les formes moyennes de graines modernes carbonisées et les individus archéologiques, effectif 235 graines

## 6. Discussion

Les résultats obtenus grâce à cette étude morphométrique sur les graines de cotons moderne frais et carbonisés et les graines archéologiques peuvent se résumer en plusieurs points importants (Figure 68). Tout d'abord, l'ensemble des méthodes utilisées permet la distinction des graines de cotons modernes en deux groupes diploïdes et tétraploïdes. L'analyse de la forme est la méthode qui permet la plus grande distinction à l'espèce du phénotype actuel. Par ailleurs, la carbonisation n'impacte pas la différence taxonomique et maximise les différences inter spécifique. Cette étude met également en avant les limites de l'approche actualiste sur une application archéologique, puisque les morphotypes archéologiques présentent une variabilité de taille, de conformation et de forme différente et plus étendue que les cultivars modernes. Les analyses des tailles centroïdes et de la forme montrent que les spécimens archéologiques semblent se rapprocher de l'espèce *G. herbaceum*.

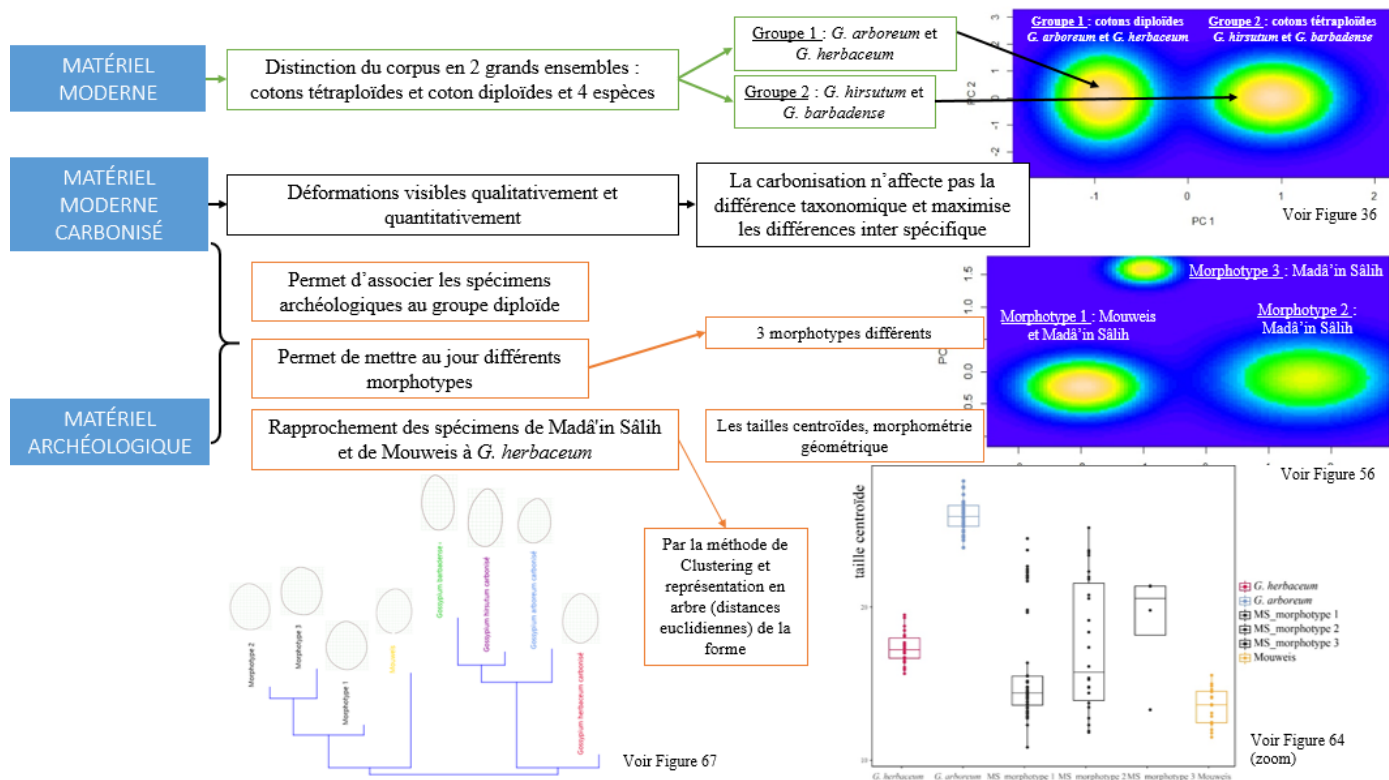


Figure 68 : Schéma récapitulatif des résultats obtenus à partir des différentes méthodes morphologiques, la légende des figures utilisées renvoie aux figures correspondantes présentes dans la partie résultats

## 6.1. Comparaisons des différentes méthodes utilisées par l'étude morphométrique sur le corpus moderne

### 6.1.1. La forme en morphométrie géométrique, outil morphométrique d'optimisation des distinctions

A la vue des différents résultats obtenus sur le matériel moderne, les analyses de morphométrie traditionnelle et géométrique apparaissent comme étant des outils performants et complémentaires, comme cela se remarque également dans les autres études de morphométrie (voir Annexe 9). L'ensemble des méthodes étudiées en morphométrie traditionnelle (taille) et géométrique (conformation, taille centroïde, forme) permet au minimum de distinguer cotons de l'Ancien monde, diploïdes, d'une part et cotons américains, tétraploïdes, d'autre part. Autrement dit, les quatre espèces de coton se différencient les unes des autres, plus ou moins clairement en fonction de la méthode utilisée (Tableau 1), et toujours de façon très marquée entre les espèces diploïdes et tétraploïdes. Les graines diploïdes sont plus petites et plus rondes tandis que les deux espèces tétraploïdes sont de taille plus grande et présente une forme ovoïde plus marquée. Les différentes AFD réalisées montrent que l'analyse de la forme est la méthode discriminant le mieux les taxons actuels.

### **6.1.2. Les limites de la projection des données actuelles, hybridations et diversité moderne des morphotypes**

La distinction intra spécifique difficile, mais en revanche toujours possible entre les espèces diploïdes et tétraploïdes vient en grande partie de l'état hybridé des individus modernes. La non-détermination, par les tests statistiques, au sein des groupes tétraploïdes et diploïdes est un indice de proximité phénotypique des formes de graines entre les espèces *G. herbaceum* et *G. arboreum* et entre les espèces *G. hirsutum* et *G. barbadense*. Les processus d'hybridations des dernières décennies ont profondément marqués les cultures actuelles dont est constitué le corpus moderne, en créant des formes intermédiaires présentant des caractères morphologiques proches limitant leur distinction. Contrairement à beaucoup d'autres taxons (arbres fruitiers comme les cerisiers (Burger *et al.* 2016), les pommiers mais aussi les céréales et plantes adventices) et à leurs diversifications variétales visibles sur les dernières décennies, le coton a en effet perdu beaucoup de diversité et s'est homogénéisé pour répondre à des besoins économiques recherchés par l'Homme.

### **6.1.3. Les identifications et classifications des spécimens de l'Herbier, apport des méthodes morphométriques**

Les spécimens de l'Herbier correspondent à des échantillons de graine de petit effectif. Ils n'ont donc pas été utilisés pour mettre en place le protocole morphométrique mais ont été exploités pour vérifier la fonctionnalité des méthodes morphométriques utilisées et pour vérifier les identifications réalisées à partir des observations anatomiques et morphologiques. L'étude morphométrique apparaît comme un outil intéressant, non pour déterminer des spécimens à l'espèce, mais pour orienter les identifications soit vers le groupe diploïde, soit vers le groupe tétraploïde. En prenant de fortes précautions sur l'utilisation des résultats, les individus mal reclassés (concernant 38 à 22% des effectifs selon les méthodes utilisées) peuvent indiquer des mauvaises identifications. Les résultats de ces spécimens mal classifiés, sont sûrement faussés par les hybridations entre les espèces de cotons ou les mauvaises conservations des graines. Ils peuvent également être dus à la conservation non homogène des graines de coton, parfois abîmées par leur passage sous les presses après leur cueillette. Par exemple, le spécimen N°P06623358 récolté à Saint-Barthélémy en 1939 et identifié comme *G. hirsutum* se révèle être classé en tant que *G. barbadense*. L'absence d'épicalices rendant impossible l'identification sur critères botaniques on doit se rendre à l'évidence d'un défaut d'identification lors de la récolte, d'hybridation ou encore d'une mauvaise classification par le modèle d'analyse. L'étude morphométrique peut aider aux identifications des spécimens de

l'Herbier mais ne peut pas se substituer aux observations botaniques et identifications antérieures. Dans ce cas, les spécimens de l'Herbier, non carbonisés, peuvent constituer un appui au corpus moderne mais ne peuvent pas s'y substituer.

## **6.2. Carbonisation expérimentale, les résultats obtenus et implications méthodologiques**

Les carbonisations expérimentales ont été conduites en premier lieu, afin de pouvoir comparer le matériel archéologique carbonisé et le matériel moderne frais. Il s'agit de tenter de supprimer ou du moins réduire un biais majeur rencontré lors des études archéobotaniques se basant sur du matériel archéologique carbonisé. Le problème étant, tout d'abord, d'arriver à retrouver les conditions de carbonisations des graines archéologiques que l'on ne connaît pas (Bonhomme *et al.* 2017). C'est la raison pour laquelle, l'état carbonisé des graines archéologiques constitue une limite et un biais important de l'étude. Les tests entrepris permettent de tenter d'approcher de ces conditions. Malheureusement, il faudrait réaliser une multitude de tests faisant varier les paramètres de combustions (durée et température) afin de se rapprocher au plus près de ces conditions. Il est donc possible que la carbonisation expérimentale, en voulant se rapprocher de l'état des individus archéologiques n'atteignent que peu ou pas son but.

Malgré les limites d'une telle approche il est intéressant d'observer les effets de la carbonisation sur les graines de coton. La carbonisation a en effet un résultat surprenant sur les graines de cotons, puisqu'elle maximise les différences inter spécifique et minimise les variations de taille, de conformation et de forme intra spécifiques. Ce que l'on observe finalement à la vue des différents résultats c'est que le signal taxonomique est plus fort que la carbonisation. La taille des individus diminue et la forme évolue avec la carbonisation. C'est également la conclusion à laquelle parvient les études de (Bonhomme *et al.* 2017 ; Ros *et al.* 2014). Cette conclusion est confirmée par l'observation visuelle des graines de coton avant et après carbonisation. Celle-ci change d'aspect, rétrécissent tout en devenant plus ronde, observations communes avec d'autres carbonisations de végétaux (Bonhomme *et al.* 2017 ; García-Granero *et al.* 2016 ; Ros *et al.* 2014). La taxonomie prévaut donc sur la carbonisation. De plus, les individus carbonisés permettent de différencier les quatre espèces de cotons domestiques ce qui n'est pas possible sur le matériel frais.

La carbonisation augmente la distinction entre les espèces de coton. Ce sont des raisons qui pourraient expliquer pourquoi la carbonisation des graines de coton entraîne une augmentation du pouvoir de discrimination des analyses de forme, conformation et tailles. La



carbonisation confirme également les conclusions faites sur le matériel moderne, faisant de l'étude de la forme la méthode la plus fiable et adéquate (Tableau 11).

Méthode utilisée	Non carbonisé	Carbonisé
Morphométrie traditionnelle	62,76%	63,87%
Morphométrie géométrique (=conformation)	83,94%	100%
Morphométrie géométrique, forme (=conformation + tailles centroïdes)	89,30%	100%

Tableau 11 : Récapitulatif des méthodes utilisées, des résultats de classifications des AFD sur le corpus moderne et carbonisé

Les précédentes études menées sur du matériel moderne carbonisé végétal montrent que les carbonisations n'affectent pas la discrimination des taxons. L'étude conduite par V. Bonhomme (Bonhomme *et al.* 2017), sur les caryopses d'orge et de deux blés, montre que la carbonisation n'affecte pas la distinction des morphotypes jusqu'à une température de 260°C mais qu'elle la complique au-delà. Il en va de même pour les études conduites par J. Ros et J.J. García-Granero (García-Granero *et al.* 2016 ; Ros *et al.* 2014) qui montrent que la discrimination entre les taxons reste possible mais est plus complexe. L'étude de J. Ros montre que le taux de classification des sous-espèces est moins fort pour les individus carbonisés que pour les individus frais.

### 6.3. Application de la morphométrie à du matériel archéologique

#### 6.3.1. Les limites d'une comparaison basée sur des cultivars modernes carbonisés, la divergence des phénotypes actuels et passés

De cette comparaison entre matériel carbonisé et archéologique, plusieurs points sont notables. Tout d'abord, les spécimens archéologiques se rapprochent très nettement des deux espèces diploïdes en termes de taille, conformation et forme et se détachent des deux espèces tétraploïdes. Cette structuration est parfaitement en accord avec l'histoire des domestications des cotons et la chronologie des sites archéologiques. Ce résultat apparaît logique, les espèces américaines n'ont pas pu être cultivées au Soudan ou en Arabie Saoudite aux périodes antiques. En revanche, ce résultat montre également la faiblesse du modèle qui n'est pas en mesure de donner une identification à l'espèce des graines de cotons archéologiques.

Par ailleurs, les morphotypes archéologiques reconnus ne recourent aucune des deux espèces diploïdes montrant que la diversité moderne ne reflète pas la diversité passée (Burger *et al.* 2016) et ce probablement à cause des nombreuses hybridations récentes entre les espèces de coton. La diversité morphologique des cultivars actuels n'est plus comparable aux premiers cultivars. Le biais de l'hybridation, absent des assemblages archéologiques et qui ne peut être supprimé des assemblages modernes, constitue un des biais les plus importants pour

l'application d'une approche comparative. Un autre problème afin de comparer de façon équitable et juste les graines archéologiques et modernes sont les déformations et pertes liés aux processus taphonomiques et à la durée d'ensevelissement des graines (Burger *et al.* 2016). Malheureusement ces deux derniers paramètres sont difficiles à quantifier et à reproduire pour une étude comme celle-ci. Malheureusement, même les individus carbonisés ne permettent pas de déterminer l'(les) espèce(s) présente(nt) sur les sites archéologiques. Ceci montre que malgré les efforts et tests pour approcher les conditions de carbonisations des graines archéologiques et supprimer un biais majeur, les graines modernes domestiques carbonisées ne présentent pas les mêmes déformations que les graines archéologiques et ne suffisent pas à réduire les biais et limites de l'approche comparative entre cultivars moderne et spécimens archéologiques.

Un autre facteur pouvant expliquer la divergence phénotypique entre coton moderne et archéologique est que les cotons actuels sont cultivés comme des plantes annuelles (Deschamps 1885 ; Lagièrre 1966) tandis que, les cotons antiques en revanche étaient très probablement cultivés sous forme pérenne. Plusieurs indices pointent dans cette direction comme la mention du coton parmi une liste d'arbres à valeur économique, sur un texte provenant de l'oasis de Kharga (Egypte) et datant de 164-165 ap. J.-C. En revanche, jusqu'à maintenant, il n'a jamais été trouvé du bois ou du charbon de bois de coton sur les sites archéologiques (Bouchaud *et al.* sous presse). Cette lacune est un réel frein à la compréhension des systèmes agraires liés à la culture du coton (Bouchaud *et al.* sous presse).

### **6.3.2. La diversité des morphotypes archéologiques**

On observe trois grands ensemble de morphotypes différents sur les sites dont un en commun entre le site de Mouweis et de Madâ'in Sâlih. Il est intéressant de noter que ces résultats ne sont visibles que grâce à la morphométrie traditionnelle et que la morphométrie géométrique ne permet pas de mettre en lumière ces différents groupes. C'est donc la taille qui joue dans la distinction de ces morphotypes. Ces morphotypes peuvent être le signal d'une diversité phénotypique à Madâ'in Sâlih. La présence d'un morphotype unique sur le site de Mouweis entre le 2<sup>ème</sup> et le 4<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C. montre peut-être une homogénéité du phénotype.

Les graines de cotons de Madâ'in Sâlih se regroupent dans les différents morphotypes selon leurs appartenances à des unités stratigraphiques (US). Chaque US comptant plusieurs graines se retrouve dans un même groupe de morphotype. En revanche, ces groupes de morphotypes ne correspondent ni à une structuration temporelle, ni spatiale. La diversité des

morphotypes s'observent sur au moins 4 siècles, de la fin du 1<sup>er</sup> siècle aux 4-5èmes siècles ap. J.-C. (voir Annexe 6). Ces morphotypes ne correspondent pas non plus à une cohérence spatiale au sein du site de Madâ'in Sâlih. Le morphotype 1 regroupe des échantillons venant d'unités stratigraphiques des zones 10, 92, 80 du secteur résidentiel (voir Annexe 6). De même les morphotypes 2 et 3 se retrouvent à la fois dans les zone 10 et 80. On ne peut donc pas expliquer les différences de morphotypes présents à Madâ'in Sâlih par des changements chronologiques ou par des contextes différents. La présence de morphotypes différents au sein d'un même site archéologique peut s'expliquer par la plasticité. La plasticité est la capacité d'un génotype à produire des phénotypes différents au sein d'une même espèce à cause de critères variés comme les conditions environnementales ou les pratiques culturelles différentes. Les différents morphotypes archéologiques peuvent être expliqués par des paramètres multiples liés à leur acclimatation à des environnements différents. Les facteurs peuvent être liés aux différences de sols et de climats. Les différentes populations de plants, la provenance des graines/plants de cotons, les différences de cultures (intensives, extensives, vivrières ou économique, ordonnée...), les différences d'origine géographique (particulièrement visible sur les pépins de raisins (Bouby 2010 ; Pagnoux *et al.* 2015 ; Terral *et al.* 2010) voir Annexe 9), les différences d'irrigations sont également autant de facteurs possibles d'explications de ces morphotypes... Peut-être ainsi peut-on imputer les différents morphotypes visibles à Madâ'in Sâlih à des origines différentes. La description de ces différents morphotypes pose en outre la question d'un usage différencié lié aux différentes catégories de coton. Les morphotypes pourraient en effet être le reflet de diversité correspondant à des couleurs de fibres différentes (Deschamps 1885 ; Lagièrre 1966), des qualités de fibres, de richesses en huile... et donc cadrer avec des usages différenciés du coton dans les économies.

### **6.3.3. Relations entre les espèces diploïdes, indienne et africaine, et les spécimens archéologiques**

En plus de la diversité de morphotypes présente chez les graines de cotons archéologiques, un autre apport des méthodes morphométriques concerne l'espèce présente sur les sites soudanais et saoudiens de Mouweis et de Madâ'in Sâlih. Une attribution taxonomique des spécimens archéologiques serait trop risquée mais un faisceau d'indices mène dans la même direction. Dans l'état actuel des choses et de la comparaison, les individus archéologiques sont plus proches morphologiquement de l'espèce *G. herbaceum*. L'étude des tailles centroïdes, l'ACP réalisée sur la forme et les distances euclidiennes

rapprochent en effet les cotons archéologiques de l'espèce africaine. Ces indices sont d'autant plus intéressants qu'ils ne s'opposent à aucune piste qui irait dans le sens d'une identification différente. Les connaissances actuelles sur les domestications du coton restent partielles et très largement lacunaires. Elles sont surtout basées sur des études génétiques (Kulkarni *et al.* 2009) et des exemples trouvés sur les sites archéologiques attestant de la présence de coton dans un lieu à une période donnée mais renseignant souvent bien peu sur la domestication. Jusqu'à présent, seule l'analyse archéogénomique d'une graine de coton du site égyptien de Qasr Ibrim, datée du 4<sup>ème</sup> siècle ap. J.-C. allait dans le sens d'une culture de coton africain *G. herbaceum* (Palmer *et al.* 2012). Par ailleurs, il a souvent été suggéré que le coton trouvé en Arabie ou en Afrique, et à plus forte raison encore pour la péninsule arabique, du fait de son commerce dans l'océan Indien, venait d'Inde et était donc associé à l'espèce *G. arboreum*. Or, ces résultats vont dans le sens de la seule étude archéogénomique du site de Qasr Ibrim, qui identifie l'espèce *G. herbaceum* à cette époque, en Egypte. Le fait que cette espèce puisse être cultivée dans les premiers siècles de notre ère au Soudan central et au Nord de la péninsule arabique contribue à soutenir l'hypothèse de la domestication de *G. herbaceum* en Ethiopie (Bouchaud *et al.* sous presse). Elle se serait ensuite propagée, par le biais de la vallée du Nil et des nombreux échanges transitant par la Mer Rouge, entre l'Afrique et la péninsule arabique (via les ports de la mer Rouge, la corne de l'Afrique ou le nord de l'Egypte (Bouchaud *et al.* sous presse)). La présence de *G. herbaceum* sur les deux sites de l'étude irait combattre cette hypothèse selon laquelle le coton viendrait d'Inde par les routes de commerce et serait un indice fort pour montrer le rôle du royaume méroïtique dans la diffusion du coton pendant les premiers siècles de notre ère.

## **7. Conclusions et perspectives**

Les études en morphométries, traditionnelle et géométrique, sur les quatre espèces de cotons domestiqués, permettent de discriminer les cotons diploïdes ayant pour origines l'Afrique et l'Asie (*G. herbaceum* et *G. arboreum*) des cotons tétraploïdes ayant pour origine l'Amérique (*G. hirsutum* et *G. barbadense*). La discrimination la plus forte s'observe en regardant les données de forme. La difficulté et limite de ces méthodes résident dans la séparation des espèces au sein des deux groupes, diploïde et tétraploïde. Les déformations liées aux carbonisations restent mineures et n'impactent pas la différenciation taxonomique, ce qui permet de comparer individus carbonisés et archéologiques. Cette comparaison montre une tendance au rapprochement entre les individus archéologique et *G. herbaceum*.

Cette étude préliminaire ouvre des perspectives de recherches très intéressantes sur l'histoire du coton en Afrique du Nord-Est et de la péninsule Arabique pendant l'Antiquité. Elle permet de mettre au jour, différents morphotypes présents sur les sites archéologiques et présentant des ressemblances avec l'espèce *G. herbaceum*. Ces premiers résultats sont encourageants pour la poursuite de cette étude, qui testerait d'autres méthodes analytiques et serait basée sur un corpus plus étendu et diversifié. L'ajout de spécimens archéologiques pourrait permettre de suivre l'évolution des formes de cultures et des morphotypes des graines de coton dans un périmètre spatio-temporel plus vaste. Il serait ainsi intéressant d'utiliser des données de sites asiatiques (le sous-continent indien étant l'aire de domestication de *G. arboreum*) et des sites américains notamment du Pérou et de Mésoamérique, aires de domestications de *G. hirsutum* et *G. barbadense*. La multiplication des individus et des assemblages modernes ainsi que des carbonisations expérimentales, dont les paramètres températures et durée seraient optimisés, pourrait permettre d'obtenir un meilleur signal de différenciation entre les espèces de coton. Il a été noté, en effet, pour plusieurs études morphométriques que les référentiels étendus sont nécessaires à de telles études (Bouby 2010). Ainsi, il est intéressant et nécessaire de multiplier les origines, provenances, cultivars et récoltes parmi les individus modernes et de récolter le plus de données sur les sites et individus archéologiques (Bourgeon *et al.* 2017 ; Pagnoux *et al.* 2015 ; Ros *et al.* 2014 ; Terral *et al.* 2012). Inclure des données sur les espèces sauvages dans le corpus moderne comme cela a déjà été fait pour certaines études de morphométrie en archéobotanique serait également essentiel (Pagnoux *et al.* 2015 ; Terral *et al.* 2012). Cela permettrait d'explorer la variabilité morphologique entre individus sauvages et domestiques, d'affiner les modèles de classifications et de voir où se situent les morphotypes archéologiques par rapport à ces assemblages. Une autre perspective serait d'explorer les liens éventuels entre la morphologie des graines et les conditions de croissance des plantes (apport en eau, type de sol, position des graines dans le fruit).

Les difficultés soulevées par un tel projet sont nombreuses. Elles sont constituées principalement des difficultés relatives à l'approche morphométrique et de la conservation différentielle du matériel archéologique carbonisé. La difficulté rencontrée pour définir des *Landmark* n'en fait pas un matériel d'étude morphométrique idéal. L'analyse en morphométrie traditionnelle et la multiplication des prises de mesures autres que la longueur, largeur et l'épaisseur comme, par exemple, le calcul du volume (Burger *et al.* 2016) sont des axes qui semblent intéressants de développer. L'étude de morphométrie géométrique par la méthode des *sliding semilandmarks* pourrait également combiner l'analyse du contour de la



vue dorsale avec les deux autres vues des graines de coton non retenues dans cette étude, à savoir les vues latérales et proximales (Bonhomme *et al.* 2017). L'analyse des Transformées de Fourier Elliptiques semble se définir pour la suite de l'étude comme une des alternatives également envisageables.

Une autre perspective de recherches intéressante serait d'utiliser la 3D surfacique. Cela pourrait permettre de changer les paramètres que l'on observe et remédier au manque de *Landmark* présents sur les graines de cotons et à la faiblesse morphométrique de ceux-ci (Cucchi *et al.* 2015). En effet, les *Landmark* utilisés dans cette étude sont les extrémités du raphé des graines de cotons. Même si ce critère apparaît sur chaque individu et qu'il est lié à un caractère morphologique, il n'est pas aussi puissant et intéressant que des *Landmark* comme l'extrémité d'un embryon (Ros *et al.* 2014). La perspective de l'utilisation de l'approche l'archéogénomique est également intéressante et prometteuse même si elle nécessite un matériel non carbonisé, rare. Elle permet l'examen direct des taxons et pourrait confirmer la présence de *G. herbaceum*. Elle permettrait de comprendre les événements évolutifs concernant le génome du genre *Gossypium*. Des études sont d'ailleurs en cours pour essayer de récupérer de la matière organique sur des restes partiellement carbonisés et sur lesquels un protocole d'extraction du génome pourrait être tenté. Dans la même veine, il pourrait être intéressant de multiplier les analyses sur le matériel desséché de coton. Ce type de matériel, principalement égyptien et par conséquent non sujet à l'extradition, en fait un frein aux études archéogénomiques cependant, certaines données, issues de fouilles anciennes seraient aptes à nous aider. Les études sur les tissus desséchés, plus nombreux que les fruits et graines, pourraient également servir, notant tout de même que des déplacements sont plus probables pour ces artefacts que pour des graines, d'où l'intérêt des études de morphométrie. La poursuite des études de génétiques sur les variétés sauvages notamment *G. herbaceum* var. *africanum* proche parente et ancêtre supposé de *G. herbaceum* pourrait permettre de faire avancer les connaissances en matières de circulations du coton.



## Table des illustrations

Figure 1 : Champ de coton et détail d'une balle de coton (fruit) à Las Chapatales, Espagne (G. hirsutum variété Amazona) © C. Bouchaud	3
Figure 2 : Graines de coton des quatre espèces domestiquées, dans l'ordre de gauche à droite, G. hirsutum, G. barbadense, G. arboreum et G. herbaceum (0015_hirs_G4-0002_barb_G1-0001_arb_G20-0008_herb_C12) © J. Milon	4
Figure 3 : Phylogénie du coton (genre Gossypium sp.) (Wendel et al., 2009)	6
Figure 4 : Graine de coton archéologique provenant de Madâ'in Sâlih montrant les différents critères anatomiques d'une graine de coton (MS_80166_G18)	8
Figure 5 : Intérieur d'une graine de coton sans glande à gossypol, G. hirsutum (0013_Hirs_CIRAD), photographie au microscope électronique à balayage (MEB)	9
Figure 6 : Détail de l'intérieur d'une graine 0004_Herb_BG1524_CIRAD_glandes à gossypol	9
Figure 7 : Caractéristiques morphologiques d'une graine de coton archéologique (MEB)	9
Figure 8 : Carte situant les deux sites archéologiques de l'étude	11
Figure 9 : Le royaume nabatéen et la localisation du site de Madâ'in Sâlih © d'après (Nehmé et al, 2006)	12
Figure 10 : Vue sur les tombeaux du Jabal al Khaymat et les environs © Hubert Raguet	13
Figure 11 : La zone résidentielle montrant les localisations des fouilles depuis 2008 © Mission archéologique de Madâ'in Sâlih (Nehmé, 2017)	14
Figure 12 : Carte représentant le site de Mouweis et la région (d'après (Chaix 2016))	17
Figure 13 : Carte générale du site de Mouweis, © Mission archéologique de Mouweis (rapport inédit) Millet, 2015)	18
Figure 14 : Vue du secteur 3 © Mission archéologique de Mouweis, 2014	20
Figure 15 : Carte représentant les origines des spécimens modernes du CIRAD, Montpellier et de Las Chapatales, Séville (Google maps)	21
Figure 16 : Schéma montrant les différents niveaux et de numérotation du corpus	22
Figure 17 : Carte recensant les spécimens de Gossypium sélectionnés des planches de l'Herbier (Google maps) Les couleurs suivent les catégories géographiques de l'Herbier (vert=Amériques, Bleu= Afrique tropicale, Marron=Madagascar, Jaune=Asie, gris=cultivés)	23
Figure 18 : Détail de "Planche de l'Herbier d'un Gossypium herbaceum, P00574278"	24
Figure 19 : Détail d'une planche botanique représentant un spécimen de Gossypium herbaceum (Hutchinson, JB, RA Silow, et SG Stephens, 1947)	24
Figure 20 : Planche de l'Herbier d'un Gossypium herbaceum P00574278	24
Figure 21 : Détail de " Spécimen de Gossypium arboreum à l'Herbier du MNHN (P04642158)"	25
Figure 22 : Détail d'une planche botanique représentant un spécimen de Gossypium arboreum (Hutchinson, JB, RA Silow, et SG Stephens, 1947)	25
Figure 23 : Spécimen de Gossypium arboreum à l'Herbier du MNHN (P04642158)	25
Figure 24 : extrait de la clef de détermination interactive générée sur Xper3	26
Figure 25 : Prélèvements manuel des graines de coton sur les planches de l'Herbier	27
Figure 26 : détail du spécimen P06612924 montrant l'épicalice réfutant l'identification faite de G. arboreum	27
Figure 27 : Représentation des différents aspects extérieurs des graines de coton après carbonisation	30
Figure 28 : MS_80166 graines de coton fragmentées du site de Madâ'in Sâlih	32
Figure 29 : Une graine de coton moderne (0008_herb_BG7510_G7) en vue dorsale et latérale	34
Figure 30 : Mesures de longueur et largeur en vue dorsale (gauche) et d'épaisseur en vue latérale (droite) d'une graine de coton G. barbadense (0006_Barb_BG1406)	35
Figure 31 : Graine de coton montrant pour les 3 vues les points de repères homologues (Landmark) et le sens de la prise des points de contours	36
Figure 32 : Définition des points glissants (sliding semi-Landmark) sous TPS util	37

Figure 33 : Prise de contour d'une graine sous TPS Dig	37
Figure 34 : Grilles de déformations des graines de <i>G. barbadense</i> carbonisées, visualisation avec le logiciel Tps relw	40
Figure 35 : Premier plan factoriel de l'AFD de la taille (longueur, largeur, épaisseur) des individus modernes / effectif total 296 graines (Axe 1: 98% Axe 2 : 1,3%)	42
Figure 36 : Graphique de densité réalisé par la méthode du clustering avec modèle bayésien (Mclust) sur les données de morphométrie traditionnelle des graines de coton moderne (N=296), montrant les deux ensembles diploïde et tétraploïdes (Contribution des axes de l'ACP, PC1 : 89,2 % - PC2 : 7,2 %)	43
Figure 37 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus modernes, effectif total 296 graines (Axe 1 : 57,2% Axe 2 : 26,8%)	44
Figure 38 : Boîte à moustache (Boxplot) représentant les tailles centroïdes des 4 espèces de coton, effectif total 296 graines	44
Figure 39 : Premier plan factoriel de l'AFD de la forme des individus modernes, effectifs 296 graines, (Axe 1 : 57,2%- Axe 2 : 26,8%)	45
Figure 40 : Photographie du plan de <i>Gossypium</i> (MS_Flora_14), détail sur les feuilles et l'épicalice © Bouchaud et Milon	48
Figure 41 : Graphique de densité réalisé par la méthode du clustering avec modèle bayésien (Mclust) sur les données de morphométrie traditionnelle des graines de coton moderne (N=296) et du spécimen MS_Flora_14 (N=30), montrant les deux ensembles diploïde et tétraploïde (Contribution des axes de l'ACP, PC1 : 87,8 % - PC2 : 7,9 %)	48
Figure 42 : Arbre de distance de Neighbour joining visualisation les distances euclidiennes entre les différents groupes de cotons (moderne et MS_Flora_14)	49
Figure 43 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus moderne et de l'échantillon de récolte, effectifs 356 graines (Axe 1 : 40%- Axe 2 : 38,5%)	50
Figure 44 : Premier plan factoriel de l'AFD sur la forme des individus moderne et de l'échantillon récolté, effectif de 356 graines (Axe 1 : 69,4%- Axe 2 : 17,1%).	50
Figure 45 : Premier plan factoriel de l'AFD de la taille (longueur, largeur, épaisseur) des individus carbonisés, effectifs 120 graines (Axe 1 :99,3%- Axe 2 : 0,8%)	52
Figure 46 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus carbonisés, effectifs 120 graines (Axe 1 : 54,4%- Axe 2 : 9,3%)	53
Figure 47 : Boîte à moustache (boxplot) représentant les tailles centroïdes des individus carbonisés, effectif 120 graines	53
Figure 48 : Premier plan factoriel de l'AFD de la forme des individus carbonisés, effectif 120 graines (Axe 1 : 65,2%- Axe 2 : 24,4%)	54
Figure 49 : Premier plan factoriel de l'AFD des données de morphométrie traditionnelle sur le corpus moderne carbonisé et non carbonisé, effectif total 416 graines (Axe 1 : 91,7%, Axe 2 : 8,3%) forme pleine : non carbonisé, forme vide : carbonisé	54
Figure 50 : Premier plan factoriel de l'AFD des données de forme sur le corpus moderne carbonisé et non carbonisé, effectif total 416 graines (Axe 1 : 97,2 %, Axe 2 : 1,4 %) forme pleine : non carbonisé, forme vide : carbonisé	55
Figure 51 : Graines de coton des quatre espèces domestiquées, dans l'ordre de gauche à droite, <i>G. hirsutum</i> , <i>G. barbadense</i> , <i>G. arboreum</i> et <i>G. herbaceum</i> (0015_hirs_G4-0002_barb_G1-0001_arb_G20-0008_herb_C12) © J. Milon	55
Figure 52 : Graines de coton des quatre espèces domestiquées et carbonisées, dans l'ordre de gauche à droite, <i>G. hirsutum</i> , <i>G. barbadense</i> , <i>G. arboreum</i> et <i>G. herbaceum</i> (0005_hirs_G6--0006_barb_G1--0011_arb_G7--0004_herb_G27) © J. Milon	56
Figure 53 : Boîte à moustaches représentant les tailles centroïdes des individus moderne non-carbonisés et carbonisés, effectif total 389 graines	56

Figure 54 : Premier plan factoriel de l'AFD des données de morphométrie traditionnelle sur le corpus carbonisé et archéologiques, effectif total 235 graines (Axe 1 : 85,1%, Axe 2 : 11%) MS= Madâ'in Sâlih, MWS=Mouweis 57	
Figure 55 : Graphique de densité, Mcclust, obtenu sur les données en morphométrie traditionnelle sur les individus carbonisés et archéologiques, effectif total 235 graines (Contribution des axes de l'ACP, Axe 1 : 85,1%- Axe 2 :11%)	58
Figure 56 : Graphique de densité, Mcclust obtenus sur les données en morphométrie traditionnelle sur l'ensemble des graines archéologiques, effectif 115 graines (PC1 : 89,2%- PC2 : 6,1 %)	59
Figure 57 : MS_10152 exemple de graine de morphotype 1 ©J. Milon	59
Figure 58 : MS_65207_Bot1_G2 exemple de graine de morphotype 2 ©J. Milon	59
Figure 59 : MS_10193 exemple de graine de morphotype 3 ©J. Milon	59
Figure 60 : Premier plan factoriel de l'AFD de la conformation des individus carbonisés et archéologiques, effectif 235 graines (Axe1 : 78,6% - Axe 2 : 9%)	60
Figure 61 : ACP de la conformation des individus carbonisés et archéologiques, effectifs 235 graines (PC1 : 48,3%- PC2 : 20,6%)	61
Figure 62 : ACP en morphométrie géométrique sur les individus archéologiques de Madâ'in Sâlih, effectifs 99 graines (PC1 : 35,3%- PC2 : 21,8%)	61
Figure 63 : Graphique de densité, Mcclust obtenus sur les données de conformation du site de Madâ'in Sâlih, effectif 99 (PC1 : 35,3 % - PC2 : 21,8 %)	61
Figure 64 : Boite à moustache représentant les tailles centroïdes des individus carbonisés et archéologiques, effectif 235 graines	62
Figure 65 : ACP de la forme des individus carbonisés et archéologiques, effectif 235 graines (PC1 : 64,3% et PC2 : 13%)	63
Figure 66 : Graphique de densité, Mcclust obtenus sur les données de forme des graines archéologiques de Madâ'in Sâlih, effectif 99 (PC1 : 60% - PC2 : 14 %)	63
Figure 67 : Arbre du plus proche parent, méthode de clustering neighbour joining, calculé sur les distances euclidiennes entre les formes moyennes de graines modernes carbonisées et les individus archéologiques, effectif 235 graines	64
Figure 68 : Schéma récapitulatif des résultats obtenus à partir des différentes divisions du corpus d'étude et des différentes méthodes morphologiques, la légende des figures utilisées renvoie aux figures correspondantes présentes dans la partie résultats	65

### Table des illustrations (tableaux)

Tableau 1 : Récapitulatif du corpus de graines de coton moderne étudiées	21
Tableau 2 : Détails des carbonisations expérimentales réalisées sur l'échantillon test 0014_Hirs_CIRAD_Test	29
Tableau 3 : Récapitulatif des carbonisations expérimentales recensées dans la littérature scientifique	29
Tableau 4 : Dates radiocarbone des échantillons du corpus de coton de Madâ'in Sâlih	31
Tableau 5 : Dates radiocarbone des restes végétaux de Mouweis, échantillons du corpus	31
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des origines et des quantités de graines et d'échantillons	33
Tableau 7 : Résultats des MANOVA et taux de classement par AFD des graines de coton moderne selon les différentes méthodes morphométriques utilisées, effectif total 296 graines	45
Tableau 8 : Récapitulatif des méthodes utilisées, des résultats de classifications par AFD et des tests de MANOVA associés sur le corpus moderne, les spécimens de l'Herbier et MS_Flora_14	51
Tableau 9 : Récapitulatif des méthodes utilisées, des résultats de classifications et des tests de MANOVA sur le corpus moderne	57
Tableau 10 : Récapitulatif des résultats deux à deux du test de MANOVA sur les données morphométriques traditionnelles mesurées sur les spécimens archéologiques, effectif 115 graines	59
Tableau 11 : Récapitulatif des méthodes utilisées, des résultats de classifications des AFD sur le corpus moderne et carbonisé	68





## Bibliographie

Baud, M., 2010. Culture d'Afrique, modèles égyptiens et influences méditerranéennes, in *Méroé Un Empire Sur Le Nil*. Paris: Musée du Louvre, 76–89.

Bonhomme, V., E. Forster, M. Wallace, E. Stillman, M. Charles et G. Jones, 2017. Identification of inter- and intra-species variation in cereal grains through geometric morphometric analysis, and its resilience under experimental charring, *Journal of Archaeological Science* (86), 60–67.

Bouby, L., 2010. *Agriculture dans le bassin du Rhône, du Bronze Final à l'Antiquité, agrobiodiversité, économie, cultures*, EHESS.

Bouby, L., I. Figueiral, A. Bouchette, N. Rovira, S. Ivorra, T. Lacombe, T. Pastor, S. Picq, P. Marinval et J.-F. Terral, 2013. Bioarchaeological Insights into the Process of Domestication of Grapevine (*Vitis vinifera* L.) during Roman Times in Southern France, *PLoS ONE* 8(5), e63195.

Bouchaud, 2011. *Paysages et pratiques d'exploitation des ressources végétales en milieux semi-aride et aride dans le sud du Proche-Orient : approche archéobotanique des périodes antique et islamique (IVe Siècle Av. J.-C. – XVIe Siècle Ap. J.-C.)*, Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne.

Bouchaud, C., 2013. Exploitation végétale des oasis d'Arabie: Production, commerce et utilisation des plantes. L'exemple de Madâ'in Sâlih (Arabie Saoudite) entre le IVe siècle av. J.-C. et le VIIe siècle apr. J.-C., *Revue d'ethnoécologie* (4).

Bouchaud, C., A.J. Clapham, C. Newton, G. Tallet et U. Thanheiser, sous presse. *Cottoning on to Cotton (Gossypium Spp.) in Arabia and Africa during Antiquity*.

Bouchaud, C., I. Sachet, P. Dal Prà, N. Delhospital, R. Douaud et M. Leguilloux, 2015. New discoveries in a Nabataean tomb. Burial practices and 'plant jewellery' in ancient Hegra (Madâ'in Sâlih, Saudi Arabia), *Arabian Archaeology and Epigraphy* 26(1), 28–42.

Bouchaud, C., I. Sachet et N. Delhospital, 2011. Les bois et les fruits des tombeaux nabatéens de Madâ'in Sâlih/Hégra (Arabie Saoudite): les provenances des végétaux et leur utilisation en contexte funéraire, in *Actes Du Colloque «Des Hommes et des plantes. Exploitation et gestion des ressources végétales de la Préhistoire à nos jours»*. Session usages et symboliques des plantes XXXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes. 22-24 Octobre 2009, Antibes. Antibes: Anthropobotanica 1, 22–24.

Bouchaud, Thomas et Tengberg, 2012. Optimal use of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) during Antiquity: anatomical identification of plant remains from Madâ'in Sâlih (Saudi Arabia), *Wood and charcoal. Evidence for human and natural history*, Badal, E, Carrión, Y, Macias, M, Ntinou, M.(eds). *Sagvntvm. Papeles del Laboratorio de Arqueologia de Valencia. Extra* 13, 53–64.

- Bourgeon, O., C. Pagnoux, S. Mauné, E.G. Vargas, S. Ivorra, V. Bonhomme, M. Ater, A. Moukhli et J.-F. Terral, 2017. Olive tree varieties cultivated for the great Baetican oil trade between the 1st and the 4th centuries ad: morphometric analysis of olive stones from Las Delicias (Ecija, Province of Seville, Spain), *Vegetation History and Archaeobotany* 27, 463–76.
- Braadbaart, F., 2007. Carbonisation and morphological changes in modern dehusked and husked *Triticum dicoccum* and *Triticum aestivum* grains, *Vegetation History and Archaeobotany* 17(1), 155–66.
- Braadbaart, P.J. Wright, J. van der Horst et J.J. Boon, 2007. A laboratory simulation of the carbonization of sunflower achenes and seeds, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 78(2), 316–27.
- Brite, E.B. et J.M. Marston, 2013. Environmental change, agricultural innovation, and the spread of cotton agriculture in the Old World, *Journal of Anthropological Archaeology* 32(1), 39–53.
- Brubaker, C.L., A.H. Paterson et J.F. Wendel, 1999. *Comparative genetic mapping of allotetraploid cotton and its diploid progenitors*, 42, 20.
- Burger, P., M.-P. Ruas, L. Bouby et J.-F. Terral, 2016. Approche historique de l'agrobiodiversité du Cerisier (*Prunus avium* L. / *Prunus cerasus* L.) en Europe Nord-Occidentale, *Food and History* 14(2–3), 131–63.
- Burger, P., J.-F. Terral, M.-P. Ruas, S. Ivorra et S. Picq, 2011. Assessing past agrobiodiversity of *Prunus avium* L. (Rosaceae): a morphometric approach focused on the stones from the archaeological site Hôtel-Dieu (16th century, Tours, France), *Vegetation History and Archaeobotany* 20(5), 447–58.
- Castroviejo, S., C. Aedo et S. Cirujano (eds.), 1993. *Flora Iberica*. Madrid: Real jardín botánico.
- Chaix, L., 2016. Archéozoologie méroïtique et chrétienne en Nubie, *Dotawo: A Journal of Nubian Studies* 3(1), 7.
- Chowdhury, K.A. et G.M. Buth, 1971. Cotton seeds from the Neolithic in Egyptian Nubia and the origin of Old World cotton, *Biological Journal of the Linnean Society* 3(4), 303–12.
- Cornu, A., F. Delpeuch et J.-C. Favier, 1977. Utilisation en alimentation humaine de la graine de coton sans gossypol et de ses dérivés, *Annales de la nutrition et de l'alimentation* 31(3), 17.
- Cucchi, T., M. Baylac, A. Evin, O. Bignon-Lau et J.-D. Vigne, 2015. Morphométrie géométrique et archéozoologie: Concepts, méthodes et applications, in *Messages d'os: archéométrie du squelette animal et humain*, eds. M. Balasse et J.-P. Brugal. Paris: Éditions des archives contemporaines, 25.
- Dal-Prà, 2012. Etudes des textiles, in *Madâ'in Sâlih, Campagne 2012 rapport sur les opérations effectuées*. Paris: UMR 8057 Orient et Méditerranée.

- Dao, V.T., 2002. *Le gossypol et ses nouveaux dérivés : synthèse et étude d'activités biologiques*, Université Paris Sud-Paris XI.
- Demange, F., 2010. Les caravanes de l'encens, in *Routes d'Arabie, Archéologie et Histoire Du Royaume d'Arabie Saoudite*. Paris: Louvre Editions, 132–36.
- Dentzer, J.-M., 2008. Les Nabatéens et l'eau : technologie et culture. La conduite d'eau du Jebel Ithlib à Mada'in Salih (Arabie Saoudite), *Syria* 5–17.
- Deschamps, L., 1885. *Etudes élémentaires sur le coton*. Rouen: Imprimerie Espérance Cagniard.
- Dillehay, T.D., J. Rossen, T.C. Andres et D.E. Williams, 2007. Pre-ceramic Adoption of Peanut, Squash, and Cotton in Northern Peru, *Science* 316(5833), 1890–93.
- Florence, J., 1997. *Flore de la Polynésie française*. Paris: Office de la recherche scientifique et technique Outre-Mer.
- Fraley, C., A.E. Raftery, T.B. Murphy et L. Scrucca, 2012. Mclust Version 4 for R: Normal Mixture Modeling for Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation, *Technical Report* (597).
- Fuller, D.Q., 2007. Contrasting Patterns in Crop Domestication and Domestication Rates: Recent Archaeobotanical Insights from the Old World, *Annals of Botany* 100(5), 903–24.
- Fuller, D.Q., 2008. The spread of textile production and textile crops in India beyond the Harappan zone: an aspect of the emergence of craft specialization and systematic trade, in *Linguistics, Archaeology and the Human Past*, eds. T. Osada et A. Uesugi (Indus Project Research institute for Humanity and Nature). Kyoto, 27.
- García-Granero, J.J., J. Arias-Martorell, M. Madella et C. Lancelotti, 2016. Geometric morphometric analysis of *Setaria italica* (L.) P. Beauv. (foxtail millet) and *Brachiaria ramosa* (L.) Stapf. (browntop millet) and its implications for understanding the biogeography of small millets, *Vegetation History and Archaeobotany* 25(3), 303–10.
- Hammer, O., D.A.T. Harper et P.D. Ryan, 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, *Palaeontologia Electronica* 4 (1), 9.
- Hooker, J.D., 1897. *The Flora of British India*. Londres: L. Reeve and Co.
- Hutchinson, J., R. Silow et S. Stephens, 1947. *The evolution of gossypium and the differentiation of the cultivated cottons* (Empire cotton growing corporation). Oxford: Oxford university press.
- Jaussen et Savignac, 1997. *Mission archéologique en Arabie, coutumes de la tribu arabe des Fuqarâ*. Le Caire: Institut français d'archéologie orientale.
- Johnson, R.K. et B.G. Decker, 1980. Implications of the distribution of names for cotton (*Gossypium* spp.) in the Indo-Pacific, *Asian Perspectives* 23(2), 249–307.

- Kulkarni, V.N., B.M. Khadi, M.S. Maralappanavar, L.A. Deshapande et S.S. Narayanan, 2009. The Worldwide Gene Pools of *Gossypium arboreum* L. and *G. herbaceum* L., and Their Improvement, in *Genetics and Genomics of Cotton* (Plant Genetics and Genomics: Crops and Models). New York: Springer, 69–97.
- Kürschner, H. et R. Neef, 2011. A first synthesis of the flora and vegetation of the Tayma oasis and surroundings (Saudi Arabia), *Plant Diversity and Evolution* 129(1), 27–58.
- Lagière, R., 1966. *Le cotonnier* (Techniques agricoles et productions tropicales IX). Paris: Maisonneuve et Larose.
- Lecomte, H., 1900. *Le coton, monographie culture - histoire économique*. Paris: Georges Carré et C. Naud.
- Maillot, M., 2008. Palais du royaume de Méroé, les relais du pouvoir central, *Camena* 2, 8.
- Milon, J., 2017. *Rapport de Stage de Master 1 : Etude carpologique du site méroïtique de Mouweis (Soudan) : Caractérisation des systèmes agraires et carbonisations expérimentales*, Mémoire de master, Museum national d'histoire naturelle.
- Moulherat, C., M. Tengberg, J.-F. Haquet et B. Mille, 2002. First Evidence of Cotton at Neolithic Mehrgarh, Pakistan: Analysis of Mineralized Fibres from a Copper Bead, *Journal of Archaeological Science* 29(12), 1393–1401.
- Nehmé, L., 2018. Pétra et Hégra, deux villes nabatéennes, *Dossiers d'archéologie, Pétra et le royaume nabatéen* (386), 14–20.
- Nehmé, L., 2004. Explorations récentes et nouvelles pistes de recherche dans l'ancienne Hégra des Nabatéens, moderne Al-Hijr/Madâ'in Sâlih (Arabie du Nord-Ouest), *Comptes-rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres* 148(2), 631–82.
- Nehmé, L. (ed.), 2011. *Report on the Fourth Excavation Season (2011) of the Madâ'in Sâlih Archaeological Project*. Paris: UMR 8057 Orient et Méditerranée.
- Nehmé, L. (ed.), 2012. *Madâ'in Sâlih, Campagne 2012 rapport sur les opérations effectuées*. Paris: UMR 8057 Orient et Méditerranée.
- Nehmé, L. (ed.), 2016. *Rapport 2016 de la mission archéologique de Madâ'in Sâlih*. Paris: UMR 8057 Orient et Méditerranée.
- Nehmé, L. (ed.), 2017. *Report on the 2017 Season of the Madâ'in Sâlih Archaeological Project*. Paris.
- Nehmé, L., D. Al-Tahi et F. Villeneuve, 2010. Hégra d'Arabie heureuse, in *Routes d'Arabie, archéologie et histoire du Royaume d'Arabie Saoudite*. Louvre Editions. Paris: Louvre Editions, 286–308.
- Pagnoux, C., L. Bouby, S. Ivorra, C. Petit, S.-M. Valamoti, T. Pastor, S. Picq et J.-F. Terral, 2015. Inferring the agrobiodiversity of *Vitis vinifera* L. (grapevine) in ancient Greece by



comparative shape analysis of archaeological and modern seeds, *Vegetation History and Archaeobotany* 24(1), 75–84.

Palmer, S.A., A.J. Clapham, P. Rose, F.O. Freitas, B.D. Owen, D. Beresford-Jones, J.D. Moore, J.L. Kitchen et R.G. Allaby, 2012. Archaeogenomic Evidence of Punctuated Genome Evolution in *Gossypium*, *Molecular Biology and Evolution* 29(8), 2031–38.

Paterson, A.H. (ed.), 2009. *Genetics and Genomics of Cotton*. New York: Springer US.

R Core Team, 2018. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienne: R Foundation for Statistical Computing.

Reimer, P., E. Bard et A. Bayliss, 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP, *Radiocarbon* 55(4), 1869–1887.

Reis, D., C. Bajon et B. Vian, 2006. *Le monde des fibres*. Paris: Belin.

Rohlf, F., 2005. TpsRelw 1.41-Thin Plate Spline Relative Warp, *Ecology et Evolution*.

Ros, J., A. Evin, L. Bouby et M.-P. Ruas, 2014. Geometric morphometric analysis of grain shape and the identification of two-rowed barley (*Hordeum vulgare* subsp. *distichum* L.) in southern France, *Journal of Archaeological Science* 41, 568–75.

Smith, C.E. et S.G. Stephens, 1971. Critical identification of Mexican archaeological cotton remains, *Economic Botany* 25(2), 160–68.

Stephens, S.G., 1975. A Reexamination of the Cotton Remains from Huaca Prieta, North Coastal Peru, *American Antiquity* 4(40), 406–19.

Stephens, S.G., 1949. The cytogenetics of speciation in *Gossypium*. I. Selective elimination of the donor parent genotype in interspecific backcrosses, *Genetics* 34(5), 627.

Stephens, S.G., 1970. The botanical identification of archaeological cotton, *American Antiquity* 35(3), 367–73.

Stephens, S.G. et M.E. Moseley, 1974. Early domesticated cottons from archaeological sites in central coastal Peru, *American Antiquity* 39(1), 109–22.

Studer, J., 2011. Preliminary study of the animal bones analysed in 2011, in *Report on the Fourth Excavation Season (2011) of the Madâ'in Sâlih Archaeological Project*, ed. L. Nehmé. Paris: UMR 8057 Orient et Méditerranée, 315–24.

Tang, Y., M.G. Gilbert et L.J. Dorr, 2007. *Flora of China, Vol XII, Hippocastanaceae through Theaceae*. Pékin: Missouri Botanical Garden Press and Science Press.

Tengberg, M., 2012. Beginnings and early history of date palm garden cultivation in the Middle East, *Journal of Arid Environments* 86, 139–47.

Tengberg, M. et C. Moulhérat, 2008. Les «arbres à laine». Origine et histoire du coton dans l'Ancien Monde, *Les nouvelles de l'archéologie* (114), 42–46.

Terral, J.-F., C. Newton, S. Ivorra, M. Gros-Balthazard, C.T. de Morais, S. Picq, M. Tengberg et J.-C. Pintaud, 2012. Insights into the historical biogeography of the date palm (*Phoenix*

*dactylifera* L.) using geometric morphometry of modern and ancient seeds: Historical biogeography of date palm agrobiodiversity, *Journal of Biogeography* 39(5), 929–41.

Terral, J.-F., E. Tabard, L. Bouby, S. Ivorra, T. Pastor, I. Figueiral, S. Picq, J.-B. Chevance, C. Jung, L. Fabre, C. Tardy, M. Compan, R. Bacilieri, T. Lacombe et P. This, 2010. Evolution and history of grapevine (*Vitis vinifera*) under domestication: new morphometric perspectives to understand seed domestication syndrome and reveal origins of ancient European cultivars, *Annals of Botany* 105(3), 443–55.

Villeneuve, F., D. Al-Tahi et L. Nehmé, 2008. Résultats préliminaires de la première campagne de fouille à Madâ'in Sâlih en Arabie Saoudite, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres* 152(2), 651–91.

Wendel, J.F., 1989. New World tetraploid cottons contain Old World cytoplasm, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 86(11), 4132–36.

Wendel, J.F., C. Brubaker, I. Alvarez, R.C. Cronn et J. Stewart, 2009. Evolution and Natural History of the Cotton Genus, in *Genetics and Genomics of Cotton*, ed. A.H. Paterson. New York: Springer, 3–22.

Wendel, J.F. et R.C. Cronn, 2003. Polyploidy and the evolutionary history of cotton, *Advances in Agronomy* 78, 139–86.

Wendel, J.F., L.E. Flagel et K.L. Adams, 2012. Jeans, Genes, and Genomes: Cotton as a Model for Studying Polyploidy, in *Polyploidy and Genome Evolution*, eds. P.S. Soltis et D.E. Soltis. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 181–207.

Yvanez, E., 2016. Spinning in Meroitic Sudan: Textile Production Implements from Abu Geili, *Dotawo: A Journal of Nubian Studies* 3(1), 9.

Zhang, Z., C.-Y. Xu, M.E.-H. El-Tahir, J. Cao et V.P. Singh, 2012. Spatial and temporal variation of precipitation in Sudan and their possible causes during 1948–2005, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 26(3), 429–41.

Le coton (*Gossypium* sp.) comprend quatre espèces domestiquées de façon indépendante : deux espèces diploïdes, *G. herbaceum* en Afrique et *G. arboreum* dans le sous-continent indien, et deux espèces tétraploïdes, *G. hirsutum* en Amérique centrale et *G. barbadense* au Pérou. La compréhension de l'histoire des diffusions de ces cotons est limitée par le fait que les graines, régulièrement trouvées en contexte archéologique, ne peuvent être déterminées au rang de l'espèce en se basant uniquement sur des observations morphologiques. Cette étude explore donc le potentiel des analyses morphométriques, traditionnelle et géométrique sur des graines modernes afin d'extraire un signal taxinomique pouvant être appliqué à un matériel archéologique. Le corpus moderne est composé de variétés des quatre espèces domestiquées de coton, provenant de culture sous serre (Montpellier, CIRAD) et en plein champ (Espagne et Arabie Saoudite). Des spécimens de graines de l'Herbier datant des 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècles sont également pris en compte. Le corpus est complété par des graines archéologiques du site soudanais de Mouweis (période méroïtique, 1<sup>er</sup>-4/5<sup>ème</sup> siècles ap. J.-C) et du site saoudien de Madâ'in Sâlih (période nabatéo-romaine, 1<sup>er</sup>-4/5<sup>ème</sup> siècles ap. J.-C). Du fait de la conservation par carbonisation des spécimens archéologiques, des carbonisations expérimentales ont été effectuées sur les graines modernes afin d'évaluer l'impact de la carbonisation sur la forme des graines. La forme des graines moderne et archéologique a été capturée à l'aide de deux approches. (1) Des mesures linéaires (morphométrie traditionnelle) et (2) des analyses de contours, *Landmark* et *sliding semi-Landmark* (morphométrie géométrique). Ces approches permettent de discriminer les espèces diploïdes des espèces tétraploïdes et de différencier les espèces au sein du corpus moderne. La carbonisation des graines n'affecte pas cette discrimination taxinomique et maximise les différences. L'approche actualiste comparative semble rapprocher les graines archéologiques de l'espèce *G. herbaceum* sans pour autant l'affirmer clairement. Ces données offrent de nouvelles hypothèses sur les dynamiques de circulations du coton en Afrique et dans la péninsule Arabique durant l'Antiquité.

---

Cotton (*Gossypium* sp.) includes four independently domesticated species: two diploid species, *G. herbaceum* in Africa and *G. arboreum* in the Indian subcontinent, and two tetraploid species, *G. hirsutum* in Central America and *G. barbadense* in Peru. The understanding of the diffusion history of these cottons is limited by the fact that the seeds, regularly found in archaeological context, cannot be determined at the rank of the species based solely on morphological observations. This study therefore explores the potential of morphometric, traditional and geometric analyses on modern seeds to extract a taxonomic signal that can be applied to archaeological material. The modern corpus is composed of varieties of the four domesticated species of cotton, cultivated in greenhouse (Montpellier, CIRAD) and in the field (Spain and Saudi Arabia). Specimens of herbarium seeds (MNHN) from the 19th and 20th centuries are also taken into account. The corpus is completed by archaeological seeds from the Sudanese site of Mouweis (Meroitic period, 1st-4/5th c. AD) and the Saudi site of Madâ'in Sâlih (Nabateo-Roman period, 1st-4/5th c. AD). Because of the conservation by carbonization of archaeological specimens, experimental carbonizations were carried out on modern seeds in order to evaluate the impact of carbonization on the shape of the seeds. The shape of the modern and archaeological seeds was captured using two approaches. (1) A log shape ratio of linear measurements (traditional morphometric analyses) and (2) an outline analyses with a sliding semi-landmarks approach (geometric morphometric analyses). These approaches discriminate diploid species from tetraploid species and differentiate species within the modern corpus. Seed carbonization does not affect this taxonomic discrimination and seems, on the contrary, to maximize taxonomic differences. The comparative approach seems to approximate the archaeological seeds of the species *G. herbaceum* without however affirming it clearly. These data offer new hypotheses on the dynamics of cotton circulation in Africa and the Arabian Peninsula during Antiquity.

## Table des matières des annexes

Annexe 1 : Inventaire des échantillons de cotons modernes (CIRAD, Las Chapatales)

Annexe 2 : Inventaire des échantillons de *Gossypium* sp. de l'Herbier

Annexe 3 : Inventaire des échantillons sélectionnés au sein des spécimens de *Gossypium* sp. de l'Herbier

Annexe 4 : Protocole de carbonisation expérimentale

Annexe 5 : Observation de la surface des graines après carbonisation

Annexe 6 : Provenance et précisions stratigraphiques sur le matériel archéologique de Madâ'in Sâlih

Annexe 7 : Description des morphotypes archéologiques

Annexe 8 : Détail des prises de photographies prises au microscope électronique à balayage

Annexe 9 : Résumé des publications en morphométrie avec applications archéobotanique

Annexe 10 : Comptes rendus des tests d'ANOVA

Annexe 11 : Comptes rendus des tests de MANOVA

Annexe 12 : Détails des classifications des AFD

Annexe 13 : Manuel d'utilisation du logiciel Tps. Util

Annexe 14 : Manuel d'utilisation du logiciel Tps. Dig

Annexe 15 : Manuel d'utilisation du logiciel Tps. Relw

Nom de l'échantillon		0001_Arb_BG1557	0011_Arb_BG7408	0012_Arb_BG7502	0002_Barb_BG1382	0006_Barb_BG1406	0007_Barb_BG2011	0003_Herb_BG1515	0004_Herb_BG1524	0008_Herb_BG7510	0005_Hirs_BG2166	0010_Hirs_Acala_Maxxa	0013_Hirs_CIRAD	0014_Hirs_CIRAD
Espèces		<i>G. arboreum</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. hirsutum</i>
Informations supplémentaires		B10	AR0001	SCHW 1289	GIZH 12	PIMA 557-4	C2IC PNS 63				IAN 425	Antiguas / Acala Maxxa		
Provenance		CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD	CIRAD		CIRAD	CIRAD
Pays d'acquisition		Inde	Cameroun	Cameroun	Egypte	USA	USA	Iran	Vietnam	Cameroun	Amérique du Sud	Californie, EE.UU, 1990		
	Lieu d'acquisition							Benmi Sahhele Semen	Co Phu Khamh			Material de Mejora		
Lieu de culture		Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Montpellier	Las Chapatales (Esp)	Montpellier	Montpellier
Méthode de culture		sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	sous serre	plein champ	sous serre	sous serre
Nombre de graines		50	51	38	39	47	40	29	41	31	48	92	41	57
	dont graines déformées	0	10 (éclatements /fissures)	4 (éclatements /fissures)	0	0	0	0	0	4 (éclatements /fissures)	0	27	0	0
Numéro d'inventaire des graines		G1 à G50	G1 à G51	G1 à G38	G1 à G39	G1 à G47	G1 à G40	G1 à G29	G1 à G41	G1 à G31	G1 à G48	G1 à G30	G1 à G30	G1 à G57
	Système de numérotation	0001_Arb_BG1557_G1	0011_Arb_BG7408_G1	0012_Arb_BG7502_G1	0002_Barb_BG1382_G1	0006_Barb_BG1406_G1	0007_Barb_BG2011_G1	0003_Herb_BG1515_G1	0004_Herb_BG1524_G1	0008_Herb_BG7510_G1	0005_Hirs_BG2166_G1	0010_Hirs_Acala_Maxxa_G1	0013_Hirs_CIRAD_G1	0014_Hirs_CIRAD_G1
Nombre de graines sélectionnées		30	30	30	30	30	30	29	30	27	30	30	30	30 (test carbonisation)



Inventaire des échantillons de *Gossypium* sp. de l'Herbier

## Annexe 2

Numéro de casier	Numéro d'inventaire	Rentré dans la base géolocalisée	Code espèce	Espèce identifiée	intérêt pour l'étude carpologique	intérêt pour l'étude des fibres	Matériel suffisant pour l'étude	Numéro de récolte	Aire géographique (herbier)	Pays	Localité informations	Année de collecte	Cultivé
1	P06701744	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Non	-	FRA	France	Céhalonie	1836	-
	P06701742	?	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	A voir	-	FRA	-	Mourzouk	1861	-
	-	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Non	Non	Non	-	FRA	Grèce	-	-	-
	P06701741	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	FRA	Grèce	Athènes	1834	Cultivé
	P06701753	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	FRA	Grèce	archipel grec	1821	-
	P04642158	Oui	arb	<i>Gossypium herbaceum-revue en Arboreum</i>	Oui	Oui	A voir	-	EUR	Grèce	Céhalonie	1834	Cultivé
	P06701769	?		<i>Gossypium hispidum</i>	Oui	Oui	Oui	-	EUR		Silicien	-	-
	P06610158	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFN	Egypte	-	-	Cultivé
	P06610154	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum-durandoum</i>	Oui	Oui	Oui	?-12	AFN	Egypte-?	-	1840	-
	P06610161	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFN	Egypte	Gizeh-bord du Nil	1866	-
	P06610164	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum - obtusifolium ancien nom d'herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	42.285	AFN	Algérie	Oasis de Reggan-Sahara central	1932	-
	P06610162	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum - obtusifolium ancien nom d'herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	42.263	AFN	Algérie	Oasis de Reggan-Sahara central	1933	-
2	P06611113	Oui	herb	<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	892	AFT	Sénégal	Trochain	2014 ou 1930 ?	-
	P04643568	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	14	AFT	Sénégal	Dakar	1941	Cultivé
	P04643570	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	14	AFT	Sénégal	Dakar	1942	Cultivé
	P06593039	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Syrie	Damas	1908	Cultivé
	P06592999	Oui	herb	<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	3.901	AFT	Sierra-Leone	Kamaron	1952	Cultivé
	P06592998	Oui	herb	<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	8956	AFT	Sierra-Leone	-	1966	-
	P06593010	Oui	herb	<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	25751	AFT	Sénégal	Mit-Afifi / Cercle de Pador Mbantou Maine près de Podor	1902	Cultivé
	P06593007	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	A voir	26021	AFT	Mali	Raffis près Kayes	1902	Cultivé
3	P02143591	Oui		<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	3591	AFT	Guinée	Dendano	1949	-
	P02143573	Oui		<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	3599	AFT	Guinée	Dendano	1949	Cultivé
	P06593013	Impossible		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	A voir	9860	AFT	-	-	-	-
	P06593011	Oui		<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	25737	AFT	Sénégal	Richard-Rolf bords du bas fleuve	1912	-
	P06593029	Oui		<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	16775	AFT	Angola	Environs de Quilenge au sud-est de Benguela	1937	Subspontané
	P06593001	Oui		<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	2321	AFT	Sénégal	depression mondale de n'Denibo	1933-1934	-
	P06593022	Oui		<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	île Aldabra	Océan indien	reçues en 1954	-
5	P06722944	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum var sanguineum</i>	Oui	Oui	Oui	4	AFT	Cameroun	Kontiaho- au sud du Tchad, Garona	1917	Cultivé
	P06722939	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum var sanguineum</i>	Oui	Oui	A voir	24218	AFT	Bénin	Monts Atacora, pays de Combas près de Bocorona à Kouandé	1910	Cultivé
	P06722968	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum var sanguineum</i>	Oui	Oui	Oui	23069	AFT	Bénin	Zagnanado	1910	-
	P06722951	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum var soudanensis</i>	Oui	Oui	Oui	1134	AFT	Soudan	Khartoum	1907	Cultivé
	P06724713	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	Oui	Oui	A voir	-	AFT	Syrie	Damas	1908	Cultivé
	P06724712	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom)</i>	Oui	Oui	A voir	033-??	AFT	Nigéria	Lagos	1902-1905-1906-1913	Cultivé
	P06724711	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	14016	AFT	Nigéria	Lagos	1905	-
6	P06724731	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom) Hirsutum-peruvianum</i>	Oui	Oui	Oui	22953	AFT	Bénin	Dahomey : cercle de Zagnanado Pays des Hollis, Adjaouéré	1910	-
	P06724730	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom) Hirsutum-peruvianum</i>	Oui	Oui	Oui	22953	AFT	Bénin	Dahomey : cercle de Zagnanado Pays des Hollis, Adjaouéré	1910	-

	P06724678	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom) Hirsutum-peruvianum</i>	Oui	Oui	Oui	34567	AFT	Guinée	Dubreka	1930	Cultivé
	P06724680	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Guinée	jardin de Dalaba	-	Cultivé
	P06724706	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom)</i>	Oui	Oui	Oui	8732	AFT	Ethiopie	ouest de Dire Dawa 5800 pieds d'altitude (9°14'N, 41°07'E)	1964	Cultivé
	P06724736	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom)</i>	Oui	Oui	Oui	104	AFT	Arabie Saoudite	ad Dabar	1895-1896	-
7	P06724766	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	Oui	Oui	Oui	2	AFT	Cameroun	Garona	1917	-
	P06724758	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	Oui	Oui	Oui	12	AFT	Annobon island	-	1959	-
	P06724760	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense (peruvianum ancien nom)</i>	Oui	Oui	Oui	1	AFT	Cameroun	Garona	1917	-
	P06724669	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	50646	AFT	Guinée	Kenieto	1958	-
	P06724749	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	Oui	Oui	Oui	142	AFT	Gabon	-	1864	-
	P06724607	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum var africanum</i>	Oui	Oui	Oui	344	AFT	Mozambique	-	1947	-
	P06724610	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum var africanum</i>	Oui	Oui	Oui	2677	AFT	Mozambique	Maputo	1947	-
8	P06724656	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	11062	AFT	Tchad	territoires des baguirmi	1903	Cultivé
	P06724630	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum (Gossypium herbaceum var. obtusifolium)</i>	Oui	Oui	Oui	23614	AFT	Bénin	territoire de Dahomey pays des Massas-porto novo(capitale)	1910	-
	P06724638	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Niger	mission Tilho	1895 reçu 1910	-
	P06724644	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Niger	mission Tilho	1895 reçu 1910	-
	P06724601	Oui	herb	<i>Herbaceum var africanum</i>	Oui	Oui	Oui	4214	AFT	Swaziland	Near Golela	1948	-
	P06724602	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Zambie	rive droite du fleuve Zambèze	1927	-
	P06724605	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Zambie	rive droite du fleuve Zambèze	1927	-
9	P06724612	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Zambie	haut-Zambèze	1896	Sauvage (coton des forêts)
	P06724614	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Zambie	haut-Zambèze	1894	-
	P06611311	?	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	-	-	1870	-
	P06724618	Oui	herb	<i>Herbaceum (Gossypium herbaceum/obtusifolium var africanum)</i>	Oui	Oui	Oui	28830	AFT	Bénin	Save	1911	-
	P06724539	Oui	hirs	<i>Gossypium glabrum Lamarck var purpurascens</i>	Oui	Oui	Oui	2386	AFT	Guinée	Friguiagbé	1941	cultivé dans un terrain indigène près de la gare
	P06724587	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	5236	AFT	Niger	Bilma	1935	cultivé-bordure de la palmeraie
	P06724571	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Niger	Dijaba	1939	cultivé
10	P06724564	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Mauritanie	Atar	1911	cultivé ? Récolté dans un jardin mais mention que ce coton n'est pas cultivé
	P06724544	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	766	AFT	Mali ?	Kolima	1935	Cultivé
	P06724575	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Gabon	Mouila	1939	cultivé dans les villages
	P06724574	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Gabon	Mouila	1939	cultivé dans les villages
	P06724579	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFT	Bénin	Agomé	1939	cultivé
11	P06724592	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	22986	AFT	Bénin	Zagnanado	1910	cultivé
	P06724591	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	23196	AFT	Bénin	territoire de Dahomey pays des Massas-porto novo(capitale)	1910	cultivé par l'association cotonnière
	P06724590	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	23197	AFT	Bénin	territoire de Dahomey pays des Massas-porto novo(capitale)	1910	cultivé par l'association cotonnière
	P06724557	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	327	AFT	Soudan	-	1899	-

	P06724556	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	173	AFT	Soudan	Soudan occidental	1885	-
	P06698720	?	hirs ?	<i>Gossypium hirsutum</i> à revoir probablement herbaceum	Oui	Oui	Oui	1125	AFT	Mozambique ?	?	1890	cultivé
	P06698675	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	B115	AFT	Ethiopie	Royaume Abyssinie	1854	-
	P06698711	?		<i>Gossypium hopi</i>	Oui	Oui	Oui	-	?	?	?	1920	cultivé
13	P00574397	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	15957	AFM	Madagascar	district de Betsioky	1940	-
	P00574261	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	2587	AFM	Madagascar	Baie de Diego-Suarez	1848	-
	P00574276	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	Oui	Oui	Oui	425	AFM	Madagascar	des bords de l'Onilaly vers lanakafy	1924	sauvage
	P00574278	Oui		<i>Gossypium arboreum</i> ou <i>barbadense</i> ?	Oui	Oui	Oui	-	AFM	Madagascar	île sainte Marie	1847	cultivé
14	P06699685	?	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	-	AFM	Madagascar ?	?	1934	-
	P06699679	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	Oui	Oui	Oui	21,394	AFM	La Réunion	La Possession	1972	-
	P00574287	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFM	Madagascar	Tulear	1909	-
15	P00037097	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	9328	AFM	Iles Comores	Archipel de l'île des Comores	1850	-
	P00273148	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	653	AFM	Mayotte	Mtsamboro	2002	-
16	P00574326	?	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	264	AFM	?	?	1921	-
	P00574303	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	14,485	AFM	Madagascar	Maromandia	1939	Spontané
	P06642258	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	4194	AFM	Seychelles	Mahé	1982	Spontané
	P06699694	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	6060	AFM	La Réunion	Butor, saint-denis	1979	-
	P06699697	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AFM	Maurice	Rodrigues-île Maurice	1875	-
17	P04697501	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	11257	ASI	Chine	Guangdong	1923	-
	P06612924												
	P06612923	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	Oui	Oui	Oui	175	ASI	Vietnam	152 km de Saigon sur la route 20 à quelques km de la frontière Cochinchine	1934	cultivé
18	P06612906	?	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	1043	ASI	?	?	1872	cultivé
	P06612242	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> var. <i>brasiliense</i>	Oui	Oui	Oui	72664	ASI	Chine	île de Hainan	1935	cultivé
19	P04642635	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	ASI	Kazakhstan	plaines du Turkestan	1881	-
	P04642636	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	ASI	Kazakhstan	plaines du Turkestan	1881	-
	P04642634	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	33010	ASI	Vietnam	région de Kom tum	1947	cultivé
	P06612233	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	11396	ASI	Vietnam	région de Quang Tri	1924	-
20	P06612206	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	9860	ASI	Vietnam	Ba Ran près de Phan Rang	1924	-
	P06612208	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	9860	ASI	Vietnam	Ba Ran près de Phan Rang	1924	-
23	P06613678	Oui	Pur	<i>Gossypium purpurascens</i>	Oui	Oui	Oui	-	ASI	Thailand	Bangkok	avant 1935	cultivé
	P06722908	Oui	Sang	<i>Gossypium sanguineum</i>	Oui	Oui	Oui	2977	ASI	Java	Surabaya	?	cultivé
	P06613666	Oui	Vitif	<i>Gossypium vitifolium</i> Lam.	Oui	Oui	Oui	17291	ASI	Vietnam	Biên Hòa, Province de Đông Nai	1930	cultivé
	P06699851	Oui	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	Oui	Oui	Oui	-	OCE	Indonésie-Timor	île de timor	1800-1804	-
24	P06587840	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	20064	OCE	Tahiti	-	avant 1870	-
	P06587847	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	34	OCE	Polynésie française	-	1849	-
	P06587849	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	593	OCE	Polynésie française	Papeete- Motu Uta	1963	-
25	P06589743	Oui	Bras	<i>Gossypium brasiliense</i> Macfad.	Oui	Oui	Oui	14,824	OCE	Nouvelle-Calédonie	La Roche	1951	-
	P06699853	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	OCE	Indonésie-Timor	île de timor	1800-1804	-
	P06737765	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	64781	OCE	Polynésie française	Maupiti	1985	-
	P06589715	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> - <i>Gossypium punctatum</i> Schumach. & Thonn.	Oui	Oui	Oui	614	OCE	France-Nouvelle-Calédonie	Nouméa	1868	cultivé à côté de l'artillerie
26	P06605899	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	18879	CAL	France-Nouvelle-Calédonie	Fayaoué	1968	cultivé
27	P06612700	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	381	AME	Nicaragua	environ de Granada	1870	cultivé
	P06612666	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	1278	AME	Guadeloupe	Pointe à Pitre	1936	cultivé et spontané
	P06612667	Oui		<i>Gossypium sp.</i>	Oui	Oui	Oui	-	AME	Nicaragua	Granada	1860	-
	P06642277	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	13925	AME	Mexique	Las Aguilas	1969	-
	P06612655	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	135	AME	Bahamas	île de Nassau	1903	-
	P06612653	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	C242211	AME	Etats-Unis	Hawai-entre Barbers Point	1924	-

											and Nanakuli, Oahu		
28	P06612752	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	975	AME	Caraïbes	Barbade	-	-
	P06612757	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	-	AME	France-Guadeloupe	-	avant 1971	-
	P06612772	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	242	AME	Indes occidentales	-	1880	-
	P06612773	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	242	AME	Indes occidentales	-	1880	-
	P06623429	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	-	AME	France-Guyane	Cayenne	-	-
29	P06623418	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	107	AME	Equateur	Guayaquil	1836	-
	P06623430	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Oui	Oui	Oui	-	AME	France-Guyane	Rémiré	1900	cultivé
	P06623400	Oui		<i>Gossypium brasiliense</i>	Oui	Oui	Oui	10088	AME	République dominicaine	Saint-Domingue	1896	-
	P06623387	Impossible	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AME	-	-	-	-
	P06623386	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AME	Etats-Unis	-	-	-
	P06623368	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	Oui	Oui	Oui	-	AME	Brésil	Brésil du Sud-Est - Etat de Sao Paulo - Campinas	1928	cultivé
30	P06623360	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> var <i>marie-galante</i>	Oui	Oui	Oui	4381	AME	France-Guadeloupe	Saint-Anne	1988	-
	P06623358	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Oui	Oui	Oui	929	AME	Saint-Barthélemy	-	1939	-
	P06623370	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Oui	Oui	Oui	13484	AME	Costa Rica	péninsule de Nicoya	1900	-
	P06623375	Impossible	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Oui	Oui	Oui	92	AME	?	-	1845	-
	P06623453	Oui		<i>Gossypium peruvianum</i> Cav.	Oui	Oui	Oui	-	AME	Bolivie	-	-	-
	P06623441	Oui	hirs ?	<i>Gossypium uliginosum</i> = <i>Gossypium hirsutum</i> var. <i>uliginosum</i> = <i>hirsutum</i> ?	Oui	Oui	Oui	5655	AME	Etats-Unis / Floride	Key West	1896	-
	P06623435	Oui	barb?	<i>Gossypium vitifolium</i> Lam. = <i>Gossypium barbadense</i> ?	Oui	Oui	Oui	-	AME	Brésil	Minas Geraes	1816 et 1821	-
	P06623440	Oui	barb?	<i>Gossypium vitifolium</i> Lam. = <i>Gossypium barbadense</i> ?	Oui	Oui	Oui	-	AME	Brésil	Minas Geraes	1816 et 1821	-
	P06623434	Oui	barb?	<i>Gossypium vitifolium</i> Lam. = <i>Gossypium barbadense</i> ?	Oui	Oui	Oui	-	AME	Brésil	Minas Geraes	1816 et 1821	-
31	P04639273	Oui		<i>Gossypium</i> sp.	Oui	Oui	Oui	-	CLT	Vietnam	Đà Lạt, Lâm Đồng	-	cultivé
	P06642293	Oui		<i>Gossypium</i> sp.	Oui	Oui	Oui	-	CLT	Vietnam	Tu Phap = Lê Duẩn	1887	cultivé
	P06701766	Oui	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	Oui	Oui	Oui	-	CLT	Vietnam	ancienne Cochinchine	1862-1866	cultivé
	P04642637	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i> L.	Oui	Oui	Oui	3731	CLT	?	?	1863	cultivé
	P06642266	Oui	herb	<i>Gossypium herbaceum</i> L.	Oui	Oui	Oui	-	CLT	Algérie	Djanet	1965	cultivé
	P04642626	Impossible	herb	<i>Gossypium herbaceum</i> L.	Oui	Oui	Oui	?	CLT	?	?	1933	cultivé
	P06699856	Oui	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Oui	Oui	Oui	31703	CLT	Cambodge	Pnom Penh Mékong	1914	cultivé
	P06699855	Impossible	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	Oui	Oui	Oui	-	CLT	?	?	?	cultivé
32	P06701756	Oui		<i>Gossypium indicum</i> Lam.	Oui	Oui	Oui	-	CLT	Grèce	Céphonie	1854	cultivé
	P06642222	Oui		<i>Gossypium religiosum</i> L.	Oui	Oui	Oui	4,5,6,7,8	CLT	Côte d'Ivoire	cercle de Baouli	?	cultivé
	P06701755	Oui		<i>Gossypium vitifolium</i> Lam.	Oui	Oui	Oui	-	CLT	Espagne	Murcia	1851	cultivé

## Planches d'Herbier

Numéro de casier	Numéro d'échantillon pour photos	Numéro d'inventaire	Précision d'identification et des caractéristiques de la plante	Nombre de graines sélectionnées pour l'étude morphologique	Code espèce	Espèce identifiée	Information supplémentaire	Numéro de récolte	Aire géographique que (herbier)	Pays	Localité informations	Année de collecte
1	40	P06701753	herbaceum possible mais aussi arboreum	1	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	-	-	FRA	Grèce	archipel grec	1821
	39	P06610158	identification pas claire entre arboreum et herbaceum : rangé en herbaceum mais les dents de l'épicalice sont plus larges que longues	1	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	-	-	AFN	Egypte	-	-
	38	P06610161	apparemment barbadense à cause des graines sans ouate et épicalice filamenteux et non denticulé _ peut-être espèce de <i>Gossypium herbaceum</i> spéciale	2	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	Fleur	-	AFN	Egypte	Gizeh-bord du Nil	1866
	37	P06610164	identification pas vérifiable	2	herb	<i>Gossypium herbaceum - obtusifolium</i> ancien nom d' <i>herbaceum</i>	-	42.285	AFN	Algérie	Oasis de Reggan-Sahara central	1932
2	36	P06593010	en sp dans l'herbier selon la graine avec ouate et l'épicalice cela serait herbaceum d'une variété entre herbaceum et barbadense-graines sans ouate qui sont nues	2	herb	<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	Cultivé par l'association cotonnière coloniale à Mbantou	25751	AFT	Sénégal	Mit-Afifi / Cercle de Pador Mbantou Maine près de Podor	1902
3	35	P06593011	graines nues sans ouate_ identification de l'herbier en sp - barbadense mais variété particulière peut-être indigène (Nouvelle-Calédonie)	2	herb	<i>Gossypium sp. (herbaceum?)</i>	coton dit de Nouvelle Calédonie	25737	AFT	Sénégal	Richard-Rolf bords du bas fleuve	1912
5	34	P06722944	arboreum confirmé avec l'épicalice	2	arb	<i>Gossypium arboreum var sanguineum</i>	longue tige de 3m, cultivé par les Kridés dans les montagnes	4	AFT	Cameroun	Kontiaho- au sud du Tchad, Garona	1917
	32	P06722939	arboreum identification vérifiée car la taille et forme de l'épicalice denticulé avec des dents plus larges que longues et peu nombreuses	1	arb	<i>Gossypium arboreum var sanguineum</i>	400 à 600m d'altitude- coton à fleurs rouges	24218	AFT	Bénin	Monts Atacora, pays de Combas près de Bocorona à Kouandé	1910
	33	P06722968	arboreum vérifié avec la fleur et épicalice et appartient à l'herbier chevalier	1	arb	<i>Gossypium arboreum var sanguineum</i>	fruits séparés	23069	AFT	Bénin	Zagnanado	1910
	31	P06722951	identification impossible à vérifier	3	arb	<i>Gossypium arboreum var soudanensis</i>	fruits dans enveloppe séparée	1134	AFT	Soudan	Khartoum	1907
7	28	P06724669	graines abimées et semblent pourries (absorbées) - identification à revoir marqué comme un herbaceum mais épicalice ressemble à <i>hirsutum</i> avec le filament central nettement plus grand que les autres (identification morphologique à confirmer avec les graines)	3	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	fruits dans enveloppe séparée	50646	AFT	Guinée	Kenieto	1958
	29	P06724607	herbaceum var africanum : épicalice visibles sont denticulés donc cela pourrait être bon	3	herb	<i>Gossypium herbaceum var africanum</i>	-	344	AFT	Mozambique	-	1947
	30	P06724610	herbaceum var africanum : épicalice visibles sont denticulés donc cela pourrait être bon	4	herb	<i>Gossypium herbaceum var africanum</i>	fruits dans enveloppe séparée	2677	AFT	Mozambique	Maputo	1947
8	27	P06724656	herbaceum ok épicalice peu visible mais semble bon	1	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	-	11062	AFT	Tchad	territoires baguirmi	1903
	26	P06724630	herbaceum var obtusifolium : ok semble bon à la vue des épicalices mais on ne peut pas dire avec certitude	2	herb	<i>Gossypium herbaceum (Gossypium herbaceum var. obtusifolium)</i>	-	23614	AFT	Bénin	territoire de Dahomey pays des Massas-porto novo(capitale)	1910
	25	P06724644	rangé en herbaceum mais taille des filaments de l'épicalice et la forme générale des graines fait penser à <i>hirsutum</i> + deuxième identification de 1913 (première de 1910) donne punctatum (variété d' <i>hirsutum</i> )_ graines plus ou moins nues, ouate pas agglomérée	3	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	fruits dans enveloppe séparée	-	AFT	Niger	mission Tilho	1895 reçu 1910
	23	P06724601	ouate très agglomérée sur la graine-pas d'épicalice	2	herb	<i>Herbaceum var africanum</i>	fruits dans enveloppe séparée	4214	AFT	Swaziland	Near Golela	1948
	24	P06724605	entre herb et arb par rapport à l'épicalice	3	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	-	-	AFT	Zambie	rive droite du fleuve Zambèze	1927
9	22	P06724612	identification pas vérifiable dit coton des forêts-ouate très agglomérée sur la graine	6	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	fruits dans enveloppe séparée	-	AFT	Zambie	haut-Zambèze	1896
	21	P06724618	herbaceum : vérifier les noms car identifier à obtusifolium var africanum / herbaceum car épicalice présent provient d'une fleur trop jeune - bourgeon	2	herb	<i>Herbaceum (Gossypium herbaceum/obtusifolium var africanum)</i>	-	28830	AFT	Bénin	Save	1911
13	20	P00574278	barbadense les graines sont sans ouate et épicalice filamenteux	3		<i>Gossypium arboreum ou barbadense ?</i>	cultivé près des cases malgaches _ Voyage de M. Boivin 1847-1852	-	AFM	Madagascar	île sainte Marie	1847
14	19	P06699679	arboreum identification non certaine : filaments sur épicalice et non denticules // graines nues => barbadense ?	4	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	1,5-2m petite fleur jaune pâle, rougissant, sous bois sec, bord de mer	21,394	AFM	La Réunion	La Possession	1972
17	18	P06612924	identifié en arboreum mais non ! Probablement barb ou hirs à cause des filaments de l'épicalice	1	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	coton planté de 1m a 1m50	175	ASI	Vietnam	151 km de Saigon sur la route 20 à quelques km de la frontière	1934

											Cochinchine	
17	P06612923	arborescent non sur car pas épicalice, vérification impossible	1	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	coton planté de 1m à 1m50	175	ASI	Vietnam	152 km de Saigon sur la route 20 à quelques km de la frontière Cochinchine	1934	
23	P06699851	identification pas claire pour arboreum : herbier mal conservé	4	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	voyage du Capitaine N.Baudin en Nouvelle-Hollande, Australie entre 1800-1804	-	OCE	Indonésie-Timor	île de timor	1800-1804	
27	P06642277	barbadense oui pour épicalice par contre graines avec ouate	7	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	là 2m de haut-fleurs jaunes-commun dans les zones rocaillieuses et sableuses	13925	AME	Mexique	Las Aguilas	1969	
	P06612655	identification barbadense ok graine sans ouate et épicalice filamenteux	3	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	-	135	AME	Bahamas	île de Nassau	1903	
	P06612653	barbadense ok pour les graines sans ouate et épicalice non visible _graines percées mangées par des animaux	2	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	-	C242211	AME	Etats-Unis	Hawai-entre Barbers Point and Nanakuli, Oahu	1924	
28	P06612757	barbadense sur : pas de ouate, épicalice filamenteux	1	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	-	-	AME	France-Guadeloupe	-	avant 1971	
	P06612772	fibres partout présence de ouate/ présence de la fleur et donc caractères différents mais pas d'épicalice très visible, l'épicalice serait filamenteux donc hirs ou barb	2	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	-	242	AME	Indes occidentales	-	1880	
	P06623429	graines collées ensemble - caractères visible barbadense		barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	plants avec des fleurs jaunes	-	AME	France-Guyane	Cayenne	-	
29	P06623418	barbadense ok pour les graines sans ouate et épicalice non visible	2	barb	<i>Gossypium barbadense</i> L.	Voyage de M. Gaudichaud sur la Bonite 1836-1837	107	AME	Equateur	Guayaquil	1836	
	P06623368	identification hirsutum mais pas claire peut-être barbadense ?	1	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	collection Auguste Chevalier	-	AME	Brésil	Brésil du Sud-Est - Etat de Sao Paulo - Campinas	1928	
30	P06623360	identification ok pour hirsutum et vérifier marie galante car les graines semblent nues, sans ouate	2	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i> var <i>marie-galante</i>	arbuste haut de 1,80m - fleurs jaunes soufre à pétales tachetés de pourpre à la base	4381	AME	France-Guadeloupe	Saint-Anne	1988	
	P06623358	ok hirsutum	3	hirs	<i>G. hirsutum</i> L.	-	929	AME	Saint-Barthélémy	-	1939	
	P06623370	hirsutum et non barbadense comme la première identification car graine avec ouate et seconde ident hirs	3	hirs	<i>G. hirsutum</i> L.	arbriseau à fleurs jaunes	13484	AME	Costa Rica	péninsule de Nicoya	1900	
	P06623441	identification ok _graines se nettoient relativement facilement, fibres blanches mais ouate colorée en marron-orangé	5	hirs ?	<i>Gossypium uliginosum</i> = <i>Gossypium hirsutum</i> var. <i>uliginosum</i> = <i>hirsutum</i> ?	-	5655	AME	Etats-Unis / Floride	Key West	1896	
	P06623434	barbadense ? Car la graine se nettoie facilement= à vérifier avec brasiliense (dernière identification)	1	barb?	<i>Gossypium vitifolium</i> Lam. = <i>G. barbadense</i> ?	Voyage d'Auguste de Saint-Hilaire de 1816 à 1821	-	AME	Brésil	Minas Geraes	entre 1816 et 1821	
31	P06642293	sp. A priori arboreum	1		<i>Gossypium sp.</i>	fleurs jaunes puis rougeatres	-	CLT	Vietnam	Tu Phap = Lê Duân Huyên	1887	
	P06701766	identifications pas claires : peruvianum ou vitifolium => rangé en barbadense	3	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	voyage de M. le Dr Thorel 1862-1866	-	CLT	Vietnam	ancienne Cochinchine - Sud du Vietnam actuel	1862-1866	

## Carpothèque de l'Herbier

Numéro de casier	Rentré dans la base géolocalisée	Technique de conditionnement	Numéro d'inventaire	Code espèce	Espèce	Aire géographique (Herbier)	Pays	Précision de localité	Année de récolte
4	Oui	Minigrip	-	barb	<i>Gossypium barbadense</i>	AFN	Egypte	Basse-Egypte	-
4	Oui	Minigrip	-	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	ASI	Turkestan	-	1881
4	Oui	Minigrip	-	hirs	<i>Gossypium hirsutum</i>	AME	Etats-Unis	Tennessee-Memphis	-
5	Oui	Boite en carton	-	arb	<i>Gossypium arboreum</i>	ASI	Indes	-	1866
5	Oui	Boite en carton	-	herb	<i>Gossypium herbaceum</i>	ASI	Tadjikistan	Karatag	-

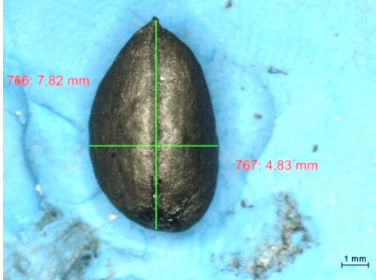




**Étape 1**

**Morphométrie traditionnelle NIS Elements**

**Morphométrie géométrique Tps**



+



(Logiciel d'acquisition d'images NIS elements 3.1 Nikon associé à l'appareil photo Nikon SM2 1000) Leica LAS Core\_LAS V4.8

Photographies et mesures des individus pour la morphométrie traditionnelle et géométrique

(Appareil photo statique : appareil photo numérique D5300 avec objectif AF-S Micro NIKKOR 60mm f/2,8G ED)  
+ logiciel Nis Elements / Image J et Tps Dig  
Sur le plateau de morphométrie du MNHN (Leica LAS Core\_LAS V4.8)

**Étape 2**



Préparation des individus (un échantillon pour chacune des quatre espèces) pour la carbonisation

Atmosphère réductrice : Emballé dans du papier aluminium, individualisé et recouvert de sable (couche d'épaisseur environ 2cm)

**Étape 3**



Four (Nabertherm More then Heat 30-3000°C – Trademark)



Carbonisation des individus en atmosphère réductrice

Echantillon test 0014\_Hirs\_CIRAD : pendant des durées et de températures différentes

- 200°C : 3h
- 250°C : 2,5h
- 300°C : 2h

Echantillons du corpus : 2,5h à 250°C

**Étape 4**

Photographies et mesures des individus (Logiciel d'acquisition d'images NIS elements 3.1 Nikon associé à l'appareil photo Nikon SM2 1000) et sous TPS Dig

**Étape 5**

Analyse et représentations des données : logiciels TPS, R et Past

**Étape 6**

Interprétation des données

## Effets de la carbonisation sur les graines de cotons, résultats des carbonisations expérimentales

Observations visuelles et description de l'aspect extérieur des graines

Après les carbonisations expérimentales, les graines ont fait l'objet d'observations minutieuses. D'après ces observations, on remarque que les graines de coton ne réagissent pas de manière similaire à la carbonisation selon leurs espèces (Figure 1). On remarque notamment une nette différence du nombre de graines possédant des éléments fondus entre les deux espèces diploïdes et tétraploïdes. Les deux espèces tétraploïdes possèdent plus de graines présentant ces déformations en surface du tégument (voir Tableau 1), voir même des glandes de gossypol visibles à la surface (voir Tableau 1).

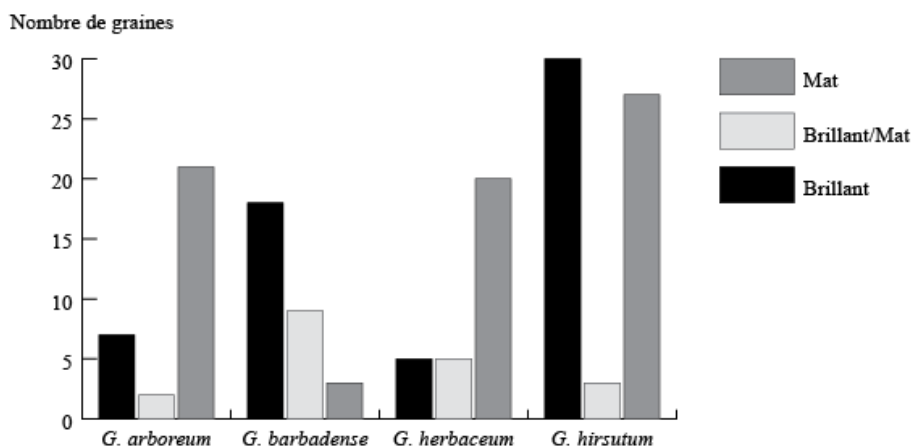


Figure 1 : Graphique représentant l'aspect extérieur des graines, après carbonisation, selon leur espèce

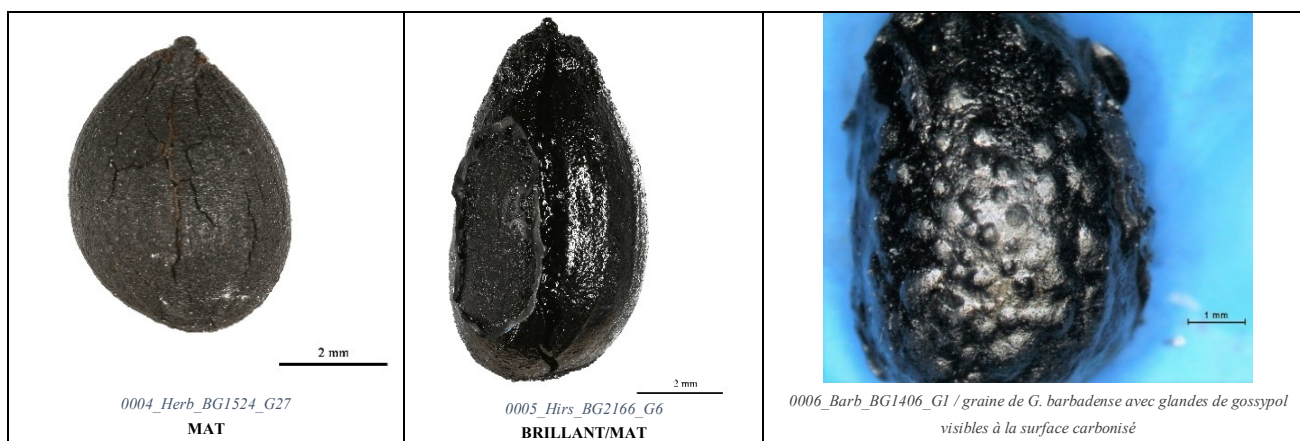


Tableau 1 : Représentation des différents aspects extérieurs des graines de coton après carbonisation

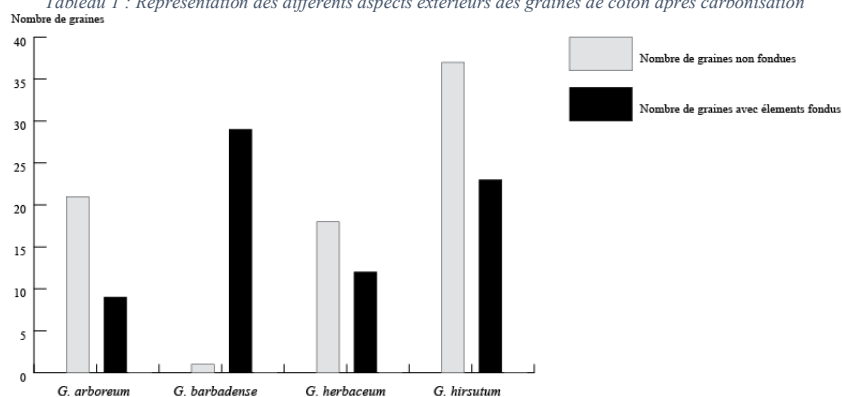
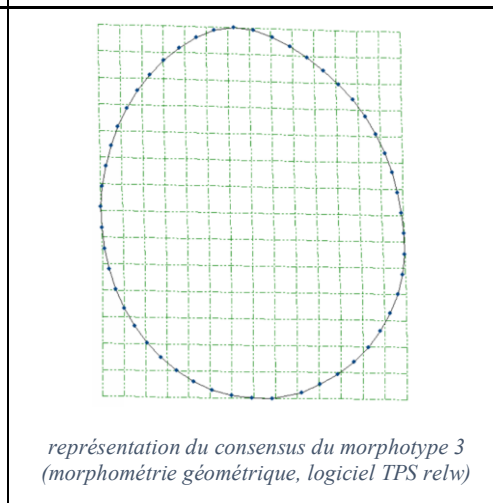
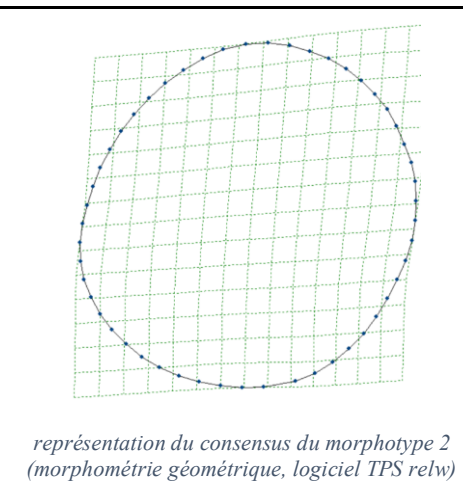
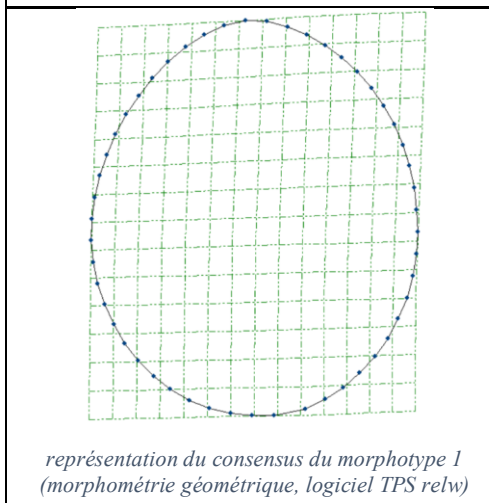
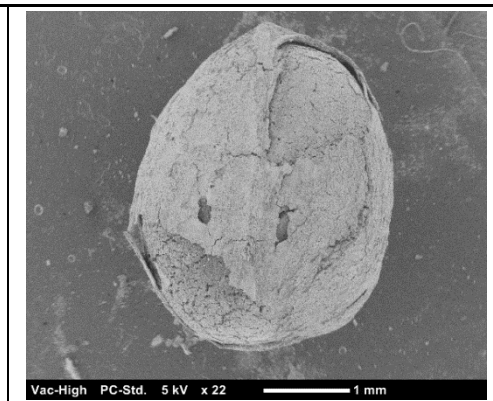
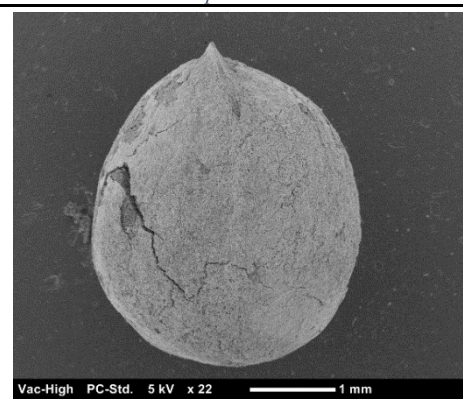
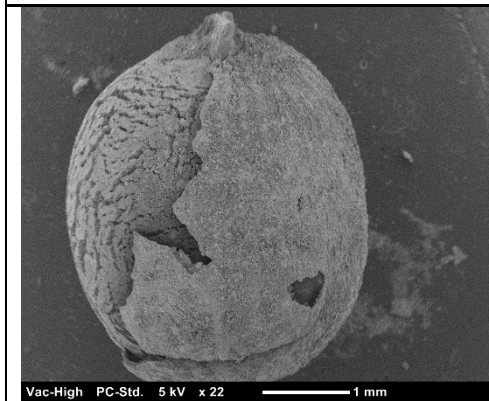
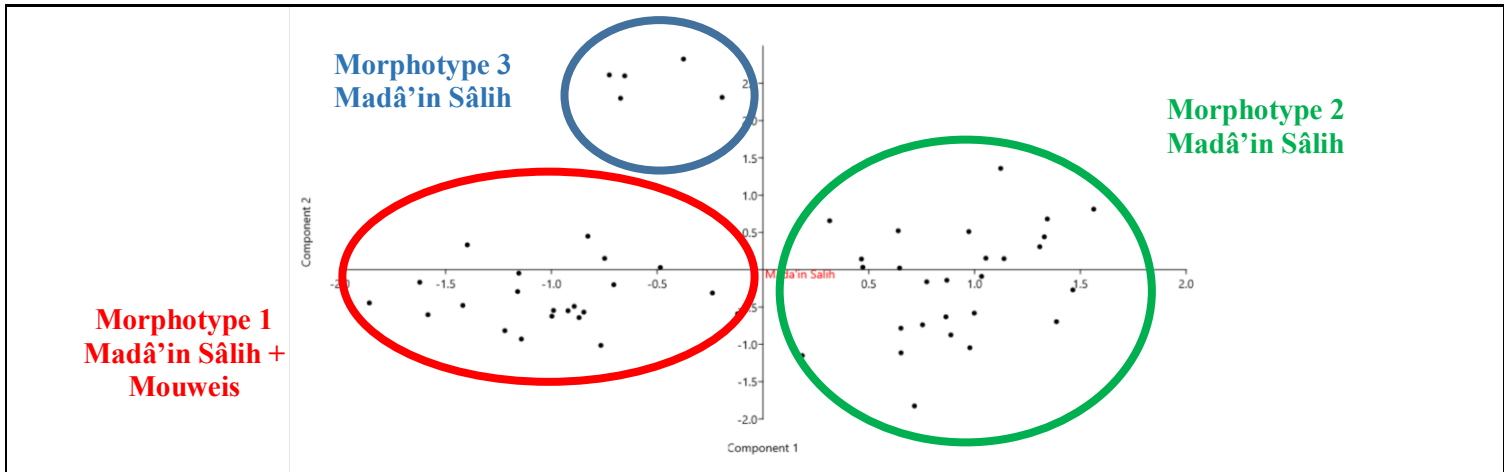


Figure 2 : Graphique montrant les déformations extérieures visibles après carbonisation selon l'espèce de coton

Un autre point important que l'on observe immédiatement après la carbonisation est l'aspect extérieur de la graine, son grain et sa texture générale « Brillant » ou « Mat ». Les graines de coton tétraploïdes présentent un aspect brillant alors que les deux espèces diploïdes présentent, elles, un aspect plutôt mat (Figure 2). Cette différence serait liée, selon toute vraisemblance, à la quantité d'huile contenue dans la graine de coton et qui serait plus importante chez les espèces *G. hirsutum* et *G. barbadense*. Le CIRAD ayant analysé les lots « 0002\_BarbBG1382 et 0001\_ArbBG1557 », les informations concernant les taux d'huile contenus dans les graines varient entre 23,8% pour le lot de l'espèce *G. barbadense*, et 19,9% pour celui de *G. arboreum*. Cette information tant à corroborer la théorie envisagée selon laquelle le taux d'huile influe sur l'aspect après carbonisation et donnerait cet aspect brillant.





Numéro d'échantillon	Secteur	Nature du secteur	Nature du contexte archéologique	Echantillons associés	Datation
MS_10057	1000	secteur résidentiel	foyer, pièce 10114		4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10061	1000	secteur résidentiel	foyer, pièce 10113		cal. 70-224 ap. J.-C.
MS_10065	1000	secteur résidentiel	probable zone de rejet, pièce 10110	MS_10192 // MS_10193	4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10152	1000	secteur résidentiel			4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10156	1000	secteur résidentiel	sol, pièce 10190		4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10159	1000	secteur résidentiel	foyer culinaire		4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10192	1000	secteur résidentiel	foyer, pièce 10110	MS_10065 // MS_10193	4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10193	1000	secteur résidentiel	foyer, pièce 10110	MS_10065 // MS_10192	4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_10274	1000	secteur résidentiel	foyer culinaire		4 <sup>ème</sup> – 5 <sup>ème</sup> ap. J.-C.
MS_34220	3400	camp romain	sol		Phase 4 : milieu 3 <sup>ème</sup> début du 4 <sup>ème</sup> siècle ap. J.-C
MS_60612	6000	secteur résidentiel	poche cendreuse contenue dans le bassin n°2		4 <sup>ème</sup> -5 <sup>ème</sup> siècles ap. J.-C
MS_60628	6000	secteur résidentiel	poche contenue dans le bassin n°4		4 <sup>ème</sup> -5 <sup>ème</sup> siècles ap. J.-C
MS_60639	6000	secteur résidentiel	rejet		4 <sup>ème</sup> -5 <sup>ème</sup> siècles ap. J.-C
MS_60814	6000	secteur résidentiel	domestique, habitats à l'intérieur du téménos (sanctuaire nabatéen)		3 <sup>ème</sup> siècle ap. J.-C.
MS_60897	6000	secteur résidentiel	occupation tardive à l'intérieur du téménos du sanctuaire nabatéen foyer antérieur à l'occupation artisanale ou domestique		terminus post quem 275 ap. J.-C
MS_65207	6500	secteur résidentiel	2nd occupation dans la construction du mur 65200		datation C14 prévue
MS_80106	8000	secteur résidentiel	restes activité de combustions, fours /niveau de cendres, proche du mur 80122	au-dessous de MS_80124	cal. 85-235 ap. J.-C.
MS_80124	8000	secteur résidentiel	aire de "cob" juste dessus d'un niveau considéré comme un four	au-dessus de MS_80106	cal. 126-322 ap. J.-C.
MS_80129	8000	secteur résidentiel	restes activités de combustions, fours		2 <sup>ème</sup> siècle-4 <sup>ème</sup> siècle ap. J.-C.
MS_80166	8000	secteur résidentiel	poche cendreuse, foyer		cal. 245-389 ap. J.-C.
MS_92306	9200	secteur résidentiel	foyer		fin 3 <sup>ème</sup> – début 4 <sup>ème</sup> siècle ap. J.-C.

Numéro d'échantillon	Numéro du spécimen	Qualité	Site	Espèce	Nombre de photos	Vue d'ensemble	Vues de détails	Détail tégument	Détail Apex	Détails cotylédon	Commentaires
0013_Hirs_CIRAD_C	-	Moderne	-	<i>G. hirsutum</i>	4	1	3	3	0	0	Absence de glandes à gossypol-général
0004_Herb_BG1524_CIRAD_C	-	Moderne	-	<i>G. herbaceum</i>	9	3	6	2	2	0	glandes à gossypol-aspect général
0007_Barb_BG2011_CIRAD_C	-	Moderne	-	<i>G. barbadense</i>	6	1	5	3	1	1	glandes à gossypol-aspect général
0012_Arb_BG7502_CIRAD_C	-	Moderne	-	<i>G. arboreum</i>	8	2	6	3	2	0	glandes à gossypol-aspect général
MS_10192	G2	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	5	1	4	2	1	1	Aspect général-détails
MS_10192	G6	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	10	3	7	5	2	5	Aspect général-détails
MS_10192	VL	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	6	1	5	2	3	0	Aspect général-détails
MS_80106	Cup	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	2	2	0	0	0	0	Aspect général-détails
MS_80166	G3	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	9	1	8	5	1	2	Aspect général-détails
MS_80166	-	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	4	2	2	0	0	2	Aspect général-détails
MWS14_3023_Bot1	-	Archéologique	Mouweis	-	6	1	5	3	2	0	Aspect général-détails
MWS14_3023_Bot1_2	-	Archéologique	Mouweis	-	10	5	5	1	2	1	Aspect général-détails
MS_10057	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	3	3	0	0	0	0	Morphotype 1
MS_10152	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	4	4	0	0	0	0	Morphotype 1
MS_60628	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	2	2	0	0	0	0	Morphotype 2
MS_60897	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	7	6	1	0	0	1	Morphotype 2
MS_65207	G2	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	2	2	0	0	0	0	Morphotype 2
MS_65207	G6	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	4	2	2	2	0	0	Morphotype 2
MS_80129	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	2	2	0	0	0	0	Morphotype 2
MS_10193	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	4	2	2	2	0	0	Morphotype 3
MS_80166	G1	Archéologique	Madâ'in Sâlih	-	2	2	0	0	0	0	Morphotype 3

# Résumé des publications en morphométrie avec applications archéobotanique

# Annexe 9

Auteurs de l'étude		Pagnoux et al.	Garcia-Granero et al.	Ros et al.	Bonhomme et al.	Terral et al.	Terral et al.	Burger et al.	Milon et al.
Sujet de l'étude		<i>Vitis vinifera</i> L. (grapevine)	<i>Setaria italica</i> (L.) et <i>Brachiaria ramosa</i> (L.)	<i>Hordeum vulgare</i> subsp. <i>distichum</i> L.	Cereal grain, <i>Hordeum vulgare</i> /Triticum <i>dicoccum</i> /Triticum <i>monococcum</i>	Date palm ( <i>Phoenix dactylifera</i> L.)	Grapevine ( <i>Vitis vinifera</i> )	<i>Prunus avium</i> L. (Rosaceae)	Coton ( <i>Gossypium</i> sp.)
		caractérisation de l'ancienne diversité des raisins cultivés par rapport aux cultivars actuels	Visualisation et compréhension des variations et la biogéographie des millets	distinction entre les orges à 2 et 6 rangs avant et après carbonisations	variations entre les 3 espèces de céréales domestiquées avant et après carbonisations	aperçu de la biogéographie historique et analyse des noyaux de dattes	discrimination entre les cépages sauvages et les cultivars modernes et pour comprendre les changements dans les caractères fonctionnels en relation avec le processus de domestication	Assessing past agrobiodiversity des fruitiers à travers l'exemple de <i>Prunus avium</i> L.	distinction entre les 4 espèces de coton domestiques
Date de publication		*2015	*2016	*2014	*2017	*2012	*2010	*2011	-
Référence bibliographique		PAGNOUX C. <i>et al.</i> , 2015, « Inferring the agrobiodiversity of <i>Vitis vinifera</i> L. (grapevine) in ancient Greece by comparative shape analysis of archaeological and modern seeds », <i>Vegetation History and Archaeobotany</i> , 24, 1, p. 75-84.	GARCÍA-GRANERO J.J. <i>et al.</i> , 2016, « Geometric morphometric analysis of <i>Setaria italica</i> (L.) P. Beauv. (foxtail millet) and <i>Brachiaria ramosa</i> (L.) Stapf. (browntop millet) and its implications for understanding the biogeography of small millets », <i>Vegetation History and Archaeobotany</i> , 25, 3, p. 303-310.	ROS J. <i>et al.</i> , 2014, « Geometric morphometric analysis of grain shape and the identification of two-rowed barley ( <i>Hordeum vulgare</i> subsp. <i>distichum</i> L.) in southern France », <i>Journal of Archaeological Science</i> , 41, p. 568-575.	BONHOMME V. <i>et al.</i> , 2017, « Identification of inter- and intra-species variation in cereal grains through geometric morphometric analysis, and its resilience under experimental charring », <i>Journal of Archaeological Science</i> , 86, p. 60-67.	TERRAL J.-F. <i>et al.</i> , 2012, « Insights into the historical biogeography of the date palm ( <i>Phoenix dactylifera</i> L.) using geometric morphometry of modern and ancient seeds: Historical biogeography of date palm agrobiodiversity », <i>Journal of Biogeography</i> , 39, 5, p. 929-941	TERRAL J.-F. <i>et al.</i> , 2010, « Evolution and history of grapevine ( <i>Vitis vinifera</i> ) under domestication: new morphometric perspectives to understand seed domestication syndrome and reveal origins of ancient European cultivars », <i>Annals of Botany</i> , 105, 3, p. 443-455.	BURGER P. <i>et al.</i> , 2016, « Approche historique de l'agrobiodiversité du Cerisier ( <i>Prunus avium</i> L. / <i>Prunus cerasus</i> L.) en Europe Nord-Occidentale », <i>Institut européen d'Histoire et des Cultures de l'Alimentation. Food and History</i> , 14, 2-3, p. 131-163.	-
Matériels et méthodes									
Nombre de graines total		10.518	145	-	162 (?)	-	-	1259	730
Matériel moderne		Présence	Présence	Présence	Présence	Présence : 61 variétés	Présence	Présence	Présence
Nombre		352	69	300				542	615
Cultivé		269	Oui	5 espèces de 2 rangs et 5 espèces de 6rangs	Oui	Oui : 45 variétés	Oui : (30 graines par cultivars) pour 45 cultivars	P. avium (N = 419), P. cerasus (N = 98) and P. gondouinii (N = 25)	615 de 63 provenances différentes
Provenance		INRA Grape Germplasm Repository du domaine de Vassal, Marseillan, France	Collection du laboratoire de BioGeoPal (CaSEs, Barcelona, Spain)	-	Turquie / Jordanie/ Iran et Syrie	Diverses origines géographiques	Inra	Inra	MNHN, Herbier/Montpellier, CIRAD/Las Chapates, Espagne Origines diverses
Sauvage		83	-	-	-	Oui : 9 individus	+ 10 graines de 3 buissons différents ont été échantillonnées pour 3 cultivars afin de tester la variation intra-cultivar Oui (sans certitude pour tous les individus) : 370 graines de 13 individus femelles	-	-
Provenance		France, Espagne, Italie, Grèce, Turquie, Géorgie	-	-	-	sauvages de trois populations originaires d'Oman	12 locations en France, Allemagne, Suisse, Espagne, Italie	-	-
Nombre de graines par échantillons		30	-	30	18	-	-	-	30
Matériel archéologique		Présence	Présence	Présence	Absence	Présence	-	Présence	Présence
Nombre de spécimens		197	15	330	-	151	-	717	115
Origine (pays)			Pakistan	Sud de la France	-	Egypte	-	France et Suisse	Soudan/Arabie Saoudite
Sites		Grèce	Shikarpur	4 sites (100 graines pour Petit-Clos/Bourbousson III/Dassargues + 30 Manresa)	-	Thèbes/' Ayn-Ziya' da/Hawara/Umm Balad/' Ayn-Mana' wir/	-	Hôtel-Dieu (Tours) /	2 sites : Mouweis/ Madâ'in Sâlih
Date		7 <sup>ème</sup> siècle av J.-C.	5 <sup>ème</sup> millénaire av. J.-C.	Périodes romaines et médiévales	-	14 <sup>ème</sup> siècle av. J.-C. jusqu'au 8 <sup>ème</sup> siècle ap. J.-C.	-	Du 1 <sup>er</sup> siècle ap. J.-C. jusqu'au 16 <sup>ème</sup> siècle	1 <sup>er</sup> -3 <sup>e</sup> siècles. ap. J.-C.
Etudes morpho et statistiques		Morphométrie géométrique	Morphométrie géométrique	Morphométrie géométrique	Morphométrie géométrique	Morphométrie géométrique basée sur (Terral et al. 2010)	Morphométrie géométrique	Morphométrie traditionnelle	Morphométrie traditionnelle et géométrique
Photographies		-	Leica EZ4D stereoscope	Leica DFC420 / Tps.Dig2 v2.16	Leica Z6 / Retiga 2000R/ Media Cybernetics / Image Pro Premier 9 software	-	-	Caméra digitale (60 mm f/2.8D lens) placée à distance fixe de 35cm des noyaux. Les photographies ont dû être	Leica LAS Core LAS V4.8 / Tps.Dig2 v2.22



								converties en noir et blanc avant de les analysées pour étude morphométrique	
Nombre de vues par grâmes		2 (Dorsale + Latérale)	1 dorsale (vue de l'embryon)	2 (Central=Dorsale et Latérale)	3 (Dorsale, Latérale et Proximale)	2 (dorsale and latérale)	-	1 ventral	3 (Dorsale + Latérale + Proximale)
Logiciel utilisé pour le contour		-	Tps Dig	-	Adobe Photoshop CS6	-	-	-	Tps. Dig 2
Méthode de contours		-	-	-	-	Landmark pseudo-homologues	-	2 Landmarks (la base du noyau et son apex)	Coordonnées Procruste
		-	-	-	-	-	-	Longueur, épaisseur et aire utilisant les analyses de photographiques	-
Nombre de points par contour		64	9 dont 3 landmarks et 6 sliding semi-landmarks	3 landmarks and 32 semi-landmarks (15 par côté et 2 en bas en haut)	2 landmarks (Olsen and Westneat, 2015)	2 landmarks (apex and base) + 64 points par contours	-	20 équidistants	2 landmarks + méthode de contours (51 sliding semi-landmarks)
Nombre d'harmoniques par contour		5 (Terral et al, 2010)	-	-	8 harmoniques (99% du total des harmoniques ainsi préservé)	Après la détermination du centre du contour grâce à l'harmonique H0, définition de 2 coefficients (A0, C0), 32 harmoniques (H1, H2,... H32) (Crampton, 1995)	-	-	-
Nombre de coefficients par harmoniques		-	-	-	-	4	-	-	-
Méthode morphologie utilisée		Elliptic Fourier Transform method (Terral et al, 2010-2012)	Generalized Procrustes Analysis (GPA)	Generalized Procrustes Analysis (GPA)	Elliptical Fournier Transforms (Giardina and Kuhl, 1977 ; Kuhl and Giardina, 1982)	Elliptic Fourier transforms (EFT)	Elliptic Fourier transforms (EFT)	-	Coordonnées Procuste et spécimens alignés
Variables utilisée par grâmes		40 (20 par vue)	-	-	4	-	-	-	-
Logiciels utilisés (morpho)		R software v2.13 (R Development core team 2011)	R	TPS Relw v.1.49	R 3.2.4 environnement	R software (R Development Core Team, 2005)	-	R software (R Development Core Team, 2005)	R software (R Development Core Team, 2018)
Programme utilisés (morpho)		Momocs package (Bonhomme et al. 2014)	(R Development Core Team 2008)	-	Momocs 1.0.10 (Bonhomme et al, 2014)	-	-	-	Mclust package + ggplot package
Logiciels utilisés (statistiques)		R software lda() and dist() functions	Morpho J et R	-	R 3.2.4 environnement	R software (R Development Core Team, 2005)	-	-	R software (R Development Core Team, 2018) + Past (Hammer, Harper, et Ryan 2001)
Tests utilisés et représentations graphiques (statistiques)		Linear Discriminant Analysis (LDA)	PCA et LDA	MANOVA / Canonical Variate Analyses (CVA)	Kruskal-Wallis tests + Wilcoxon tests pour faire : PCA / PC / PC1 et PC2 / LDA	PCA + LDA + CA	-	PCA + DA	MANOVA Wilks' lambda + Pallai trace / ANOVA Kruskal Wallis PCA + Linear Discriminant Analysis (LDA)+ Mclust + Boxplot
<b>Carbonisation</b>		-	OUI (plusieurs tests de températures et de durées)	OUI (Bowman, 1966)	OUI (Charles et al, 2015)	-	-	-	Oui (Bonhomme et al. 2017; Braadbaart 2007; Braadbaart et al. 2007; Garcia-Granero et al. 2016; Ros et al. 2014; Stephens et Moseley 1974; Bouby 2010; Milon 2017)
Température		-	250°C	250°C	230°C / 260°C (+- 2°C)	-	-	-	250°C (tests à 200°C, 250°C et 300°C)
Temps de cuisson		-	3 heures	50min	6h	-	-	-	2.5h (test à 2h, 2.5 et 3h)
Matériel utilisé pour la cuisson		-	Four	Four	Four	-	-	-	Four Nabertherm More then Heat 30-3000°C – Trademark
Type de carbonisation		-	Réductrice	Réductrice (sable et individualisation dans aluminium)	Réductrice (sable et individualisation dans aluminium)	-	-	-	Réductrice (sable et individualisation dans aluminium)

## Comptes rendus complets des analyses statistiques univariées ANOVA réalisées sur les tailles centroïdes (morphométrie géométrique)

### ANOVA sur les tailles centroïdes des individus moderne non carbonisé

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	2882,67	3	960,891	99,24	1,56E-46
Within groups:	3398,44	351	9,68215	Permutation p (n=99999)	
Total:	6281,11	354	1,00E-05		
Components of variance (only for random effects):					
Var (group):	10,7191	Var (error):	9,68215	ICC:	0,525413
omega2:	0,4536				
Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	6,44E-32			
Levene's test, from medians	p (same):	3,78E-13			
Welch F test in the case of unequal variances: F=91,48, df=185, p=2,413E-36					

#### Test de Kruskal-Wallis

H (chi2):	142,6
Hc (tie corrected):	142,6
p (same):	1,03E-30

### ANOVA tailles centroïdes moderne et Herbier

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	8,58E+07	13	6,60E+06	221,5	1,05E-189
Within groups:	1,39E+07	465	29807,4	Permutation p (n=99999)	
Total:	9,97E+07	478	1,00E-05		
Components of variance (only for random effects):					
Var (group):	209100	Var (error):	29807,4	ICC:	0,875235
omega2:	0,8568				
Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	1,13E-245			
Levene's test, from medians	p (same):	1,17E-49			
Welch F test in the case of unequal variances: F=1083, df=43,01, p=1,188E-49					

#### Test de Kruskal-Wallis

H (chi2):	331,1
Hc (tie corrected):	331,1
p (same):	7,35E-63

### ANOVA tailles centroïdes moderne et échantillon provenant de la récolte (MS\_Flora\_14)

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	4823,69	4	1205,92	132,4	1,02E-70
Within groups:	3459,85	380	9,10488	Permutation p (n=99999)	
Total:	8283,55	384	1,00E-05		
Components of variance (only for random effects):					
Var (group):	15,9151	Var (error):	9,10488	ICC:	0,636096
omega2:	0,5773				
Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	4,39E-36			
Levene's test, from medians	p (same):	7,61E-15			
Welch F test in the case of unequal variances: F=364,3, df=150,8, p=2,181E-76					

#### Test de Kruskal-Wallis

H (chi2):	195,6
-----------	-------

Hc (tie corrected):	195,6
p (same):	3,40E-41

### ANOVA tailles centroïdes modernes carbonisé et non carbonisé

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	15159,2	7	2165,61	234,2	2,37E-148
Within groups:	4318,28	467	9,24685	Permutation p (n=99999)	
Total:	19477,5	474	1,00E-05		
Components of variance (only for random effects):					
Var (group):	37,6357	Var (error):	9,24685	ICC:	0,802765
omega2:	0,7746				
Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	3,24E-64			
Levene's test, from medians	p (same):	1,86E-26			
Welch F test in the case of unequal variances: F=1194, df=149,8, p=6,305E-128					

#### Test de Kruskal-Wallis

H (chi2):	326,6
Hc (tie corrected):	326,6
p (same):	1,27E-66

### ANOVA tailles centroïdes moderne carbonisé

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	1909,65	3	636,548	80,27	3,55E-28
Within groups:	919,845	116	7,9297	Permutation p (n=99999)	
Total:	2829,49	119	1,00E-05		
Components of variance (only for random effects):					
Var (group):	20,954	Var (error):	7,9297	ICC:	0,725461
omega2:	0,6646				
Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	6,51E-44			
Levene's test, from medians	p (same):	2,14E-16			
Welch F test in the case of unequal variances: F=370,4, df=62,06, p=1,514E-39					

#### Test de Kruskal-Wallis

H (chi2):	84,88
Hc (tie corrected):	84,88
p (same):	2,75E-18

### ANOVA tailles centroïdes archéologiques et moderne carbonisé

	Sum of sqrs	df	Mean square	F	p (same)
Between groups:	5450,75	7	778,679	78,92	1,03E-56
Within groups:	2190,38	222	9,86656		
Total:	7641,13	229			
omega2:	0,7034				
Levene's test for homogeneity of variance, from means	p (same):	2,43E-30			
Levene's test, from medians	p (same):	2,43E-13			
Welch F test in the case of unequal variances: F=247,5, df=39,88, p=8,66E-31					

#### Test de Kruskal-Wallis

H (chi2):	165,6
Hc (tie corrected):	165,6
p (same):	2,10E-32

## Comptes rendus complets des analyses statistiques multivariées MANOVA

**MORPHOMETRIE TRADITIONNELLE**Matériel moderne non carbonisé

Wilks' lambda:	0.05541	Pillai trace:	1.371
df1:	21	df1:	21
df2:	658.1	df2:	693
F:	54.49	F:	27.77
p (same):	1.189E-128	p (same):	1.093E-77

Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>
<i>G. herbaceum</i>		1.3253E-26	6.4558E-31	0.00021342
<i>G. hirsutum</i>	1.3253E-26		1.0652E-08	7.997E-25
<i>G. barbadense</i>	6.4558E-31	1.0652E-08		3.1127E-28
<i>G. arboreum</i>	0.00021342	7.997E-25	3.1127E-28	

Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'Herbier

Wilks' lambda:	0,3426	Pillai trace:	0,8069
df1:	9	df1:	9
df2:	479,6	df2:	597
F:	29,46	F:	24,41
p (same):	7,65E-41	p (same):	1,03E-35

Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. barbadense</i>		9,72E-13	1,75E-19	0,15015
<i>G. arboreum</i>	9,72E-13		6,25E-13	3,02E-14
<i>G. herbaceum</i>	1,75E-19	6,25E-13		7,14E-21
<i>G. hirsutum</i>	0,15015	3,02E-14	7,14E-21	

Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'échantillon de récolte (MS Flora 14)

Wilks' lambda:	0,077	Pillai trace:	1,301
df1:	9	df1:	9
df2:	348,2	df2:	435
F:	72,25	F:	36,99
p (same):	3,15E-74	p (same):	1,53E-48

Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. barbadense</i>		2,44E-37	7,31E-35	0,014593
<i>G. arboreum</i>	2,44E-37		1,19E-11	3,63E-27
<i>G. herbaceum</i>	7,31E-35	1,19E-11		4,98E-26
<i>G. hirsutum</i>	0,014593	3,63E-27	4,98E-26	

Matériel moderne non carbonisé et matériel moderne carbonisé

Wilks' lambda:	0,1692	Pillai trace:	0,8881
df1:	9	df1:	9
df2:	640,2	df2:	795
F:	76,49	F:	37,15
p (same):	1,67E-95	p (same):	3,97E-55

**Pairwise (comparaison deux à deux des variables)**

	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>
<i>G. hirsutum</i>		0,34017	7,53E-56	9,00E-53
<i>G. barbadense</i>	0,34017		1,69E-42	3,39E-40
<i>G. arboreum</i>	7,53E-56	1,69E-42		0,00028974
<i>G. herbaceum</i>	9,00E-53	3,39E-40	0,00028974	

**Matériel moderne carbonisé et matériel archéologique (selon la classification des morphotypes)**

Wilks' lambda:	0,01582	Pillai trace:	1,944
df1:	18	df1:	18
df2:	625,6	df2:	669
F:	115,8	F:	68,44
p (same):	2,33E-185	p (same):	2,67E-138

**Pairwise (comparaison deux à deux des variables)**

	<i>G. hirsutum</i> carbonisé	<i>G. herbaceum</i> carbonisé	<i>G. arboreum</i> carbonisé	<i>G. barbadense</i> carbonisé	morphotype 2	morphotype 1	morphotype 3
<i>G. hirsutum</i> carbonisé		3,23E-28	3,05E-28	0,44884	9,06E-25	9,57E-67	4,74E-18
<i>G. herbaceum</i> carbonisé	3,23E-28		0,17643	7,18E-27	5,74E-20	1,06E-26	5,18E-13
<i>G. arboreum</i> carbonisé	3,05E-28	0,17643		7,67E-27	9,91E-18	4,96E-28	1,53E-12
<i>G. barbadense</i> carbonisé	0,44884	7,18E-27	7,67E-27		1,33E-23	4,74E-65	1,37E-17
morphotype 2	9,06E-25	5,74E-20	9,91E-18	1,33E-23		5,80E-50	6,12E-13
morphotype 1	9,57E-67	1,06E-26	4,96E-28	4,74E-65	5,80E-50		4,10E-20
morphotype 3	4,74E-18	5,18E-13	1,53E-12	1,37E-17	6,12E-13	4,10E-20	

**MORPHOMETRIE GEOMETRIQUE (CONFORMATION)**

**Matériel moderne non carbonisé**

Wilks' lambda:	0,09312	Pillai trace:	1,563
df1:	306	df1:	306
df2:	750,8	df2:	756
F:	2,96	F:	2,689
p (same):	2,69E-33	p (same):	6,50E-28

**Pairwise (comparaison deux à deux des variables)**

	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. arboreum</i>		0,025684	0,080507	2,02E-05
<i>G. barbadense</i>	0,025684		0,0013183	0,23904
<i>G. herbaceum</i>	0,080507	0,0013183		1,18E-07
<i>G. hirsutum</i>	2,02E-05	0,23904	1,18E-07	

**Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'Herbier**

Wilks' lambda:	0,1925	Pillai trace:	1,227
df1:	306	df1:	306
df2:	1003	df2:	1008
F:	2,399	F:	2,278
p (same):	1,80E-24	p (same):	8,42E-22

**Pairwise (comparaison deux à deux des variables)**

	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. arboreum</i>		0,93902	0,03422	7,54E-08
<i>G. barbadense</i>	0,93902		0,97835	0,083878
<i>G. herbaceum</i>	0,03422	0,97835		1,83E-13

<i>G. hirsutum</i>	7,54E-08	0,083878	1,83E-13	
--------------------	----------	----------	----------	--

### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'échantillon de récolte (MS Flora 14)

Wilks' lambda:	0,07249	Pillai trace:	1,733
df1:	306	df1:	306
df2:	840,8	df2:	846
F:	3,843	F:	3,779
p (same):	1,72E-53	p (same):	2,55E-52

#### Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. barbadense</i>		0,014107	0,72624	2,45E-11
<i>G. arboreum</i>	0,014107		0,14193	8,73E-08
<i>G. herbaceum</i>	0,72624	0,14193		7,98E-12
<i>G. hirsutum</i>	2,45E-11	8,73E-08	7,98E-12	

### Matériel moderne non carbonisé et matériel moderne carbonisé

Wilks' lambda:	0,1335	Pillai trace:	1,412
df1:	306	df1:	306
df2:	1111	df2:	1116
F:	3,474	F:	3,245
p (same):	2,52E-51	p (same):	7,85E-46

#### Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>
<i>G. herbaceum</i>		6,32E-23	0,06816	0,00054885
<i>G. hirsutum</i>	6,32E-23		0,0015466	6,10E-15
<i>G. barbadense</i>	0,06816	0,0015466		0,028838
<i>G. arboreum</i>	0,00054885	6,10E-15	0,028838	

### Matériel moderne carbonisé et matériel archéologique (selon la classification des morphotypes)

Wilks' lambda:	0,0003102	Pillai trace:	3,897
df1:	612	df1:	612
df2:	740,4	df2:	762
F:	3,45	F:	2,308
p (same):	8,06E-57	p (same):	5,62E-28

## **MORPHOMETRIE GEOMETRIQUE (FORME)**

### Matériel moderne non carbonisé

Wilks' lambda:	0,05726	Pillai trace:	1,706
df1:	309	df1:	309
df2:	747,8	df2:	753
F:	3,86	F:	3,212
p (same):	3,56E-51	p (same):	1,42E-38

#### Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. arboreum</i>		7,89E-07	0,051689	8,46E-11
<i>G. barbadense</i>	7,89E-07		1,03E-05	0,23693
<i>G. herbaceum</i>	0,051689	1,03E-05		3,39E-10
<i>G. hirsutum</i>	8,46E-11	0,23693	3,39E-10	



### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'Herbier

Wilks' lambda:	0,1318	Pillai trace:	1,366
df1:	309	df1:	309
df2:	999,8	df2:	1005
F:	3,122	F:	2,718
p (same):	2,34E-41	p (same):	5,63E-32

#### Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. arboreum</i>		3,87E-06	0,054619	1,97E-10
<i>G. barbadense</i>	3,87E-06		3,71E-07	0,20484
<i>G. herbaceum</i>	0,054619	3,71E-07		1,40E-13
<i>G. hirsutum</i>	1,97E-10	0,20484	1,40E-13	

### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'échantillon de récolte (MS Flora 14)

Wilks' lambda:	0,05431	Pillai trace:	1,75
df1:	309	df1:	309
df2:	837,8	df2:	843
F:	4,45	F:	3,819
p (same):	6,49E-66	p (same):	2,55E-53

#### Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>
<i>G. barbadense</i>		2,78E-13	3,46E-11	0,0014564
<i>G. arboreum</i>	2,78E-13		0,044713	5,11E-11
<i>G. herbaceum</i>	3,46E-11	0,044713		5,55E-10
<i>G. hirsutum</i>	0,0014564	5,11E-11	5,55E-10	

### Matériel moderne non carbonisé et matériel moderne carbonisé

Wilks' lambda:	0,09909	Pillai trace:	1,477
df1:	309	df1:	309
df2:	1108	df2:	1113
F:	4,163	F:	3,495
p (same):	3,72E-68	p (same):	3,52E-52

#### Pairwise (comparaison deux à deux des variables)

	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>
<i>G. herbaceum</i>		5,45E-22	3,60E-17	0,00094535
<i>G. hirsutum</i>	5,45E-22		0,011018	8,35E-16
<i>G. barbadense</i>	3,60E-17	0,011018		1,02E-10
<i>G. arboreum</i>	0,00094535	8,35E-16	1,02E-10	

### Matériel moderne carbonisé et matériel archéologique (selon la classification des morphotypes)

Wilks' lambda:	7.958E-07	Pillai trace:	5.157
df1:	721	df1:	721
df2:	831.5	df2:	861
F:	7.458	F:	3.342
p (same):	3.542E-155	p (same):	6.251E-63

## Classifications des analyses discriminantes (AFD)

### MORPHOMETRIE TRADITIONNELLE

#### Matériel moderne non carbonisé

	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	Total
<i>G. hirsutum</i>	45	45	0	0	90
<i>G. barbadense</i>	23	37	0	0	60
<i>G. arboreum</i>	0	0	35	25	60
<i>G. herbaceum</i>	0	0	18	41	59
Total	68	82	53	66	269

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 58,74%.

#### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'Herbier

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	Total
<i>G. barbadense</i>	14	7	7	23	51
<i>G. arboreum</i>	3	37	4	1	45
<i>G. herbaceum</i>	4	8	52	0	64
<i>G. hirsutum</i>	11	7	3	22	43
Total	32	59	66	46	203

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 61,58%.

#### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'échantillon de récolte (MS Flora 14)

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	Total
<i>G. barbadense</i>	37	0	1	22	60
<i>G. arboreum</i>	0	30	0	0	30
<i>G. herbaceum</i>	0	3	26	0	29
<i>G. hirsutum</i>	12	0	0	18	30
Total	49	33	27	40	149

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 74,50%.

#### Matériel moderne non carbonisé et matériel moderne carbonisé

	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	Total
<i>G. hirsutum</i>	45	45	0	0	90
<i>G. barbadense</i>	23	37	0	0	60
<i>G. arboreum</i>	0	0	35	25	60
<i>G. herbaceum</i>	0	0	18	41	59
Total	68	82	53	66	269

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 58,74%.

#### Matériel moderne carbonisé et matériel archéologique (selon la classification des morphotypes)

	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	morphot ype 2	morphot ype 1	morphot ype 3	Total
<i>G. hirsutum</i>	17	0	0	13	0	0	0	30
<i>G. herbaceum</i>	0	20	8	0	0	2	0	30
<i>G. arboreum</i>	0	11	18	0	1	0	0	30
<i>G. barbadense</i>	10	0	0	20	0	0	0	30
morphotype 2	0	0	2	0	24	0	0	26

morphotype 1	0	2	3	0	0	75	0	80
morphotype 3	0	0	0	0	0	0	4	4
Total	27	33	31	33	25	77	4	230

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 77,39%.

### **MORPHOMETRIE GEOMETRIQUE (CONFORMATION)**

#### **Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'Herbier**

	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	Total
<i>G. arboreum</i>	79	7	12	7	105
<i>G. barbadense</i>	4	41	1	5	51
<i>G. herbaceum</i>	9	11	68	6	94
<i>G. hirsutum</i>	19	18	7	145	189
Total	111	77	88	163	439

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 75,85%.

#### **Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'échantillon de récolte (MS Flora 14)**

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	Total
<i>G. barbadense</i>	43	5	2	10	60
<i>G. arboreum</i>	0	80	5	5	90
<i>G. herbaceum</i>	0	2	54	3	59
<i>G. hirsutum</i>	1	21	3	151	176
Total	44	108	64	169	385

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 85,19%.

#### **Matériel moderne non carbonisé et matériel moderne carbonisé**

	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	Total
<i>G. herbaceum</i>	79	1	2	7	89
<i>G. hirsutum</i>	7	149	29	21	206
<i>G. barbadense</i>	2	4	52	2	60
<i>G. arboreum</i>	12	6	3	99	120
Total	100	160	86	129	475

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 79,79%.

#### **Matériel moderne carbonisé et matériel archéologique (selon la classification des morphotypes)**

	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	morphotype 2	morphotype 1	morphotype 3	Total
<i>G. herbaceum</i>	30	0	0	0	0	0	0	30
<i>G. hirsutum</i>	0	27	3	0	0	0	0	30
<i>G. barbadense</i>	0	1	29	0	0	0	0	30
<i>G. arboreum</i>	0	0	0	30	0	0	0	30
morphotype 2	0	0	0	0	25	1	0	26
morphotype 1	0	0	0	0	5	75	0	80
morphotype 3	0	0	0	0	0	0	4	4
Total	30	28	32	30	30	76	4	230

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 95,65%.

## MORPHOMETRIE GEOMETRIQUE (FORME)

### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'Herbier

	<i>G. arboreum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	Total
<i>G. arboreum</i>	83	5	16	1	105
<i>G. barbadense</i>	5	82	9	14	110
<i>G. herbaceum</i>	18	9	92	2	121
<i>G. hirsutum</i>	3	12	3	85	103
Total	109	108	120	102	439

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 77,90%.

### Matériel moderne non carbonisé et matériel provenant de l'échantillon de récolte (MS Flora 14)

	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	Total
<i>G. barbadense</i>	101	1	3	14	119
<i>G. arboreum</i>	0	82	8	0	90
<i>G. herbaceum</i>	2	9	74	1	86
<i>G. hirsutum</i>	6	1	1	82	90
Total	109	93	86	97	385

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 88,05%.

### Matériel moderne non carbonisé et matériel moderne carbonisé

	<i>G. herbaceum</i>	<i>G. hirsutum</i>	<i>G. barbadense</i>	<i>G. arboreum</i>	Total
<i>G. herbaceum</i>	99	2	1	14	116
<i>G. hirsutum</i>	1	100	16	3	120
<i>G. barbadense</i>	1	19	95	4	119
<i>G. arboreum</i>	13	2	2	103	120
Total	114	123	114	124	475

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 83,60%.

### Matériel moderne carbonisé et matériel archéologique (selon la classification des morphotypes)

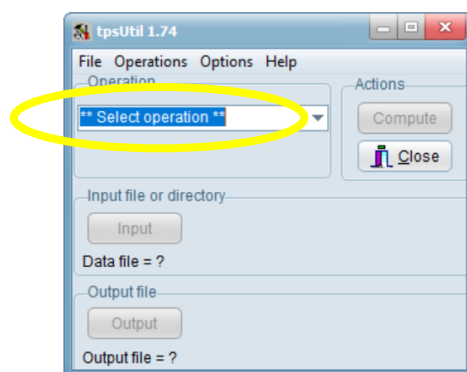
	morphoty pe 1	morphoty pe 2	morphoty pe 3	Mouw eis	<i>G. herbaceum</i> carbonisé	<i>G. arboreum</i> carbonisé	<i>G. hirsutum</i> carbonisé	<i>G. barbadense</i> carbonisé	Tot al
morphotype 1	60	3	0	0	0	0	0	0	63
morphotype 2	0	26	0	0	0	0	0	0	26
morphotype 3	0	0	4	0	0	0	0	0	4
Mouweis	0	0	0	16	0	0	0	0	16
<i>G. herbaceum</i> carbonisé	0	0	0	0	30	0	0	0	30
<i>G. arboreum</i> carbonisé	0	0	0	0	0	30	0	0	30
<i>G. hirsutum</i> carbonisé	0	0	0	0	0	0	28	0	28
<i>G. barbadense</i> carbonisé	0	0	0	0	0	0	0	30	30
Total	60	29	4	16	30	30	28	30	227

Le pourcentage de classifications correctes réalisé grâce à l'analyse discriminante s'élève à 98,82%.

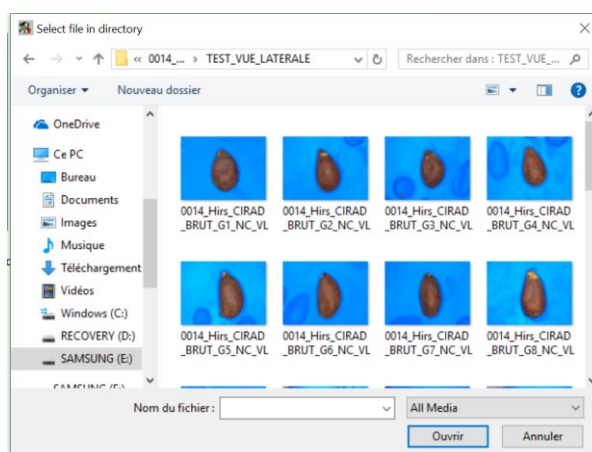
## Manuel utilisation du logiciel Tps.util

Ce logiciel est un logiciel de Free Software, disponible et téléchargeable légalement et gratuitement sur internet. Il permet de réaliser diverses opérations comme par exemple de transformer et de créer de nouveaux fichiers TPS à partir d'images. Dans le cas présent, nous allons l'utiliser pour créer un fichier TPS à partir d'un lot d'images, pour, dans un second temps, traiter ces images avec le logiciel Tps.Dig.

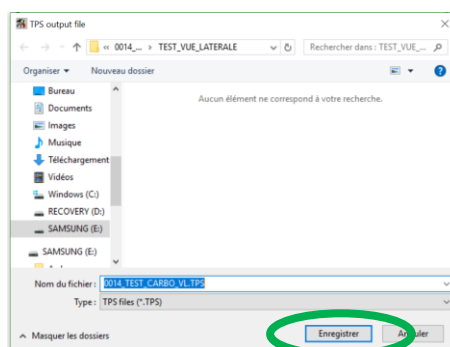
### 1. Ouvrir Tps.util



2. Choisir dans les opérations et le volet déroulant « **Build tps files from image** »
3. « **Input** » sélectionner la **première des images** que vous voulez mettre dans le fichier, par exemple ici, il suffit de sélectionner « 0014\_Hirs\_CIRAD\_BRUT\_G1\_NC\_VL », puis « **Ouvrir** »

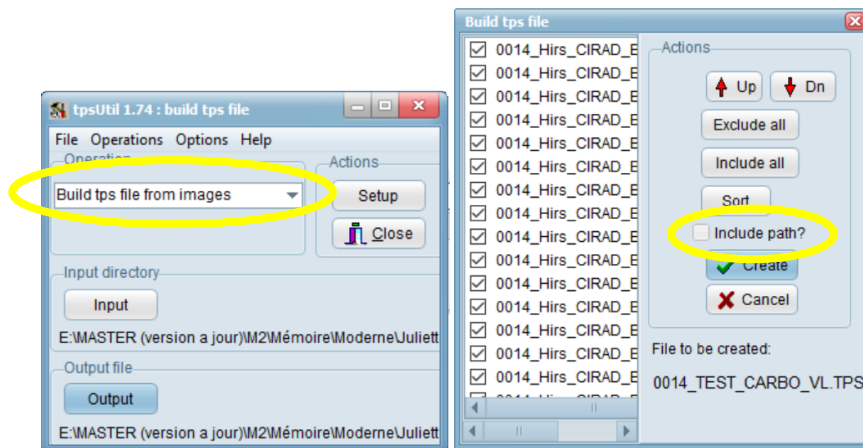


4. « **Output** » sert à créer le fichier qui contiendra toutes les images réunies et les codes de ces images. Il faut donc choisir un nom en conséquence et ne pas oublier de **rajouter .TPS** à la fin du nom. Dans le cas contraire, le logiciel ne prend pas en compte le nom et ne fonctionne pas. Ici donc le fichier a été appelé « 0014\_TEST\_CARBO\_VL.TPS », puis « **Enregistrer** ».

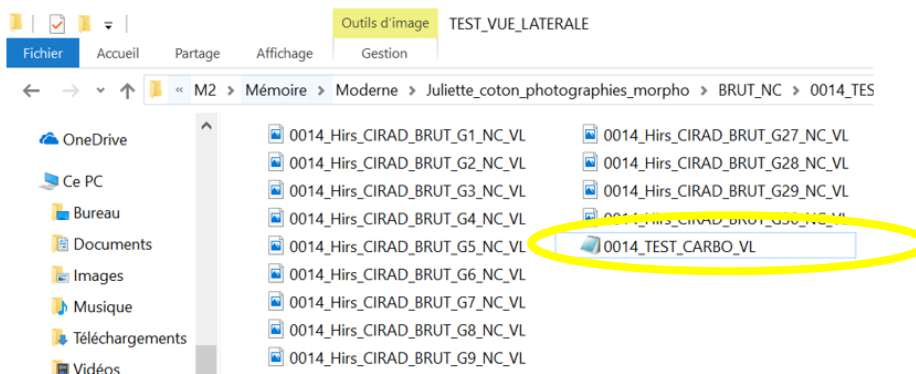


5. Cliquer sur « **Setup** ». Une nouvelle fenêtre s'ouvre alors avec tous les fichiers images du dossier contenant l'image que vous avez sélectionnée auparavant. Vous pouvez alors choisir certaines des images, en dé

sectionner plusieurs... Lorsque votre choix est arrêté, il suffit de sélectionner et cocher la petite case « **Include path ?** » puis « **Create** »



6. Dans votre dossier de départ vous aurez alors un fichier en format bloc note contenant les données créées par tps.util.



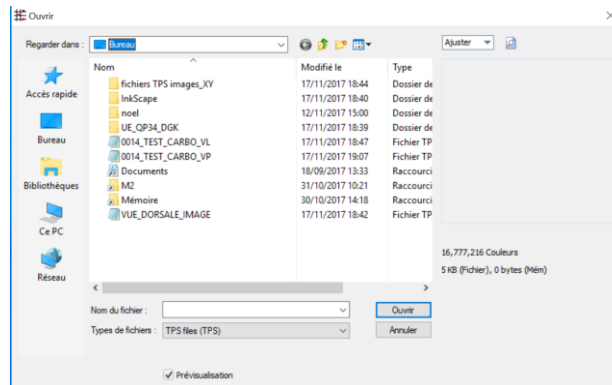
7. En ouvrant ce fichier, vous devez tomber sur une liste des noms de toutes vos images de ce format là avec pour données de vos images à chaque fois « LM=0 » ce qui signifie Landmark est égal à 0, puisque vos photos ne sont pas encore travaillées.
8. Maintenant vous pouvez ouvrir votre fichier d'images sur Tps.Dig et travailler à placer vos Landmark, dessiner les courbes...



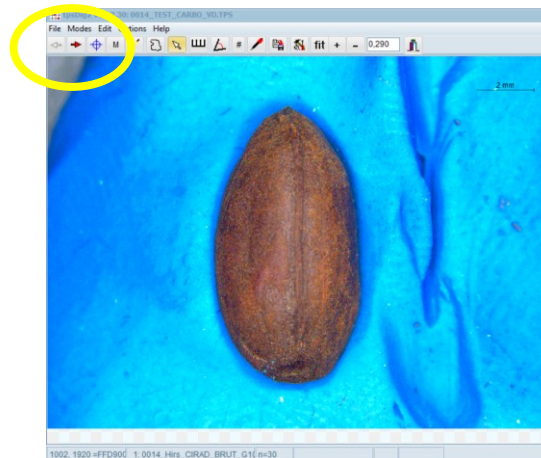
## Manuel utilisation du logiciel tsp.Dig2 ver.2.22 64 bits

Tps.Dig est un logiciel servant à placer des points et tracer des courbes à partir d'images. TpsDig est un programme de numérisation de repères et de contours pour des analyses de morphométrie géométrique. Ce logiciel comprend des opérations simples d'amélioration de l'image, de facteurs d'échelles, de prises de points d'intérêts (*Landmark*), de créations de courbes, et la prise en charge des fichiers AVI et MOV, TIFF... La sortie se fait dans le format de fichier TPS utilisé par la "série tps" des programmes. Le fichier TPS inclut le nom du fichier d'image pour chaque échantillon afin que les points de repère puissent toujours être visualisés sur l'image même après une réouverture du fichier ultérieurement. Il est disponible en libre accès et gratuitement téléchargeable pour la plupart de ses versions sur internet (<https://fr.freedownloadmanager.org/Windows-PC/tpsDig2.html>).

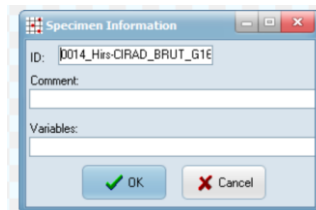
1. Ouvrir **Tps.dig**
2. Dans « **File** » choisir « **Input source** », « **File ...** » et sélectionner le fichier souhaité de type « nomdufichier\_IMAGE.TPS » (combiner auparavant dans Tps.util) ou « **Reopen** »



3. Lorsque vous avez ouvert votre fichier.TPS les images doivent s'afficher dans la console du logiciel. Vous pouvez alors jouer avec le zoom des photos afin de les voir en entier. Si votre fichier TPS contient plusieurs images, vous pouvez passer d'une image à une autre grâce aux flèches rouges et grises en haut à gauche de la console.



4. La première chose à faire ensuite est de renommer les photographies dans le fichier afin de pouvoir par la suite les retrouver et associer les points et les actions réalisées dans le logiciel avec les bons fichiers-image. Pour cela il faut aller dans « **Options** », ensuite choisir « **Specimen info...** », dans la rubrique **ID**, renseigner le nom de l'image puis « **Enter** » ou « **Ok** ».



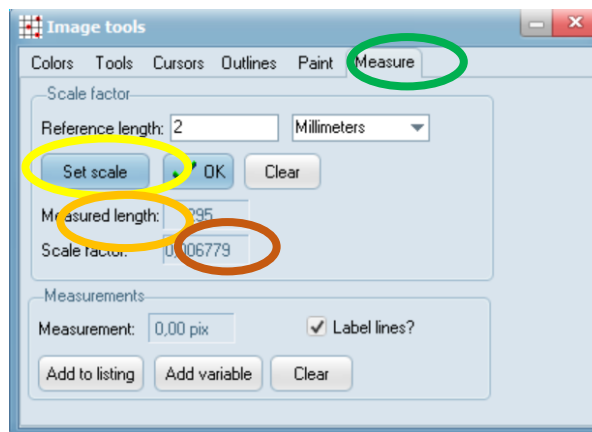
5. Une fois les informations sur la photographie enregistrées, il s'agit ensuite de créer une échelle pour l'image. Pour cela il faut aller dans l'onglet « **Image edit tools** ». On peut le trouver par deux chemins différents dans le logiciel. Tout d'abord

par l'icône situé en haut à droite représentant un marteau, un tournevis et une clef. Mais on peut également s'y rendre en passant par « Options » « Image tools ».



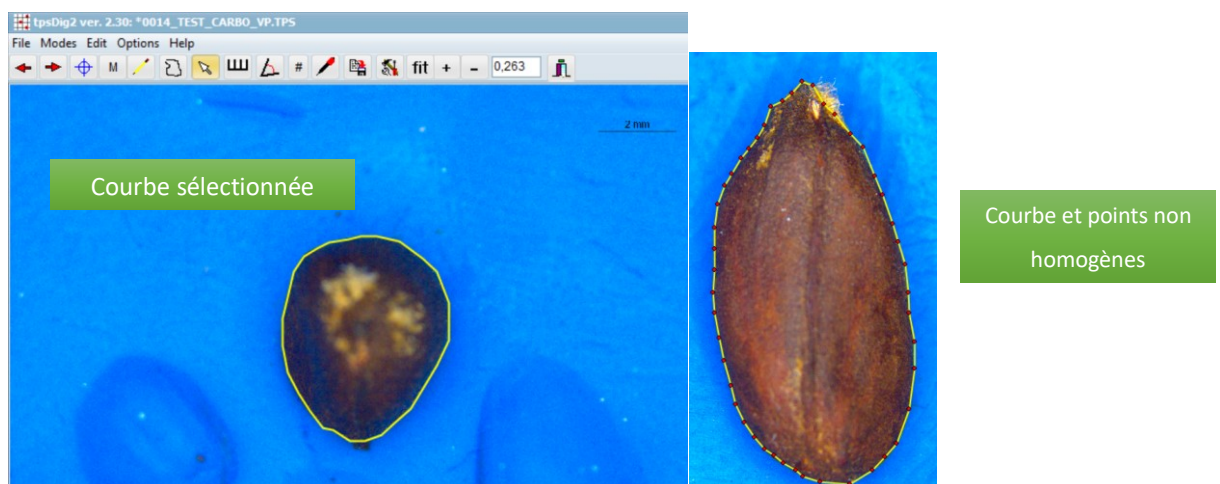
S'affiche alors une fenêtre séparée de la console principale. Dans l'onglet « Measure » il faut alors renseigner plusieurs aspects. La « reference length » c'est-à-dire la taille de l'échelle de la photographie puis sélectionner la grandeur de la mesure, soit en centimètres, soit en millimètres. Il faut alors cliquer sur « Set scale », puis avec le curseur de la souris cliquer du clic gauche sur le début de l'échelle puis faire glisser et re cliquer à la fin de l'échelle souhaitée. Lorsque vous cliquez ensuite sur « Ok » la valeur en dessous « Measured length » doit se modifier. Le logiciel Tps.dig associe l'échelle créée par le trait produit en un nombre de pixels qu'il convertit, grâce à ce trait normé en millimètres ou centimètres selon l'option choisie. La valeur qui s'affiche dans « Measured length » correspond au nombre de pixels de l'échelle.

Si votre fichier contient plusieurs images que vous avez compiler en un seul fichier à l'aide de TPS util et que les objets présents sur les photographies ont la même échelle, il n'est alors pas nécessaire de réitérer l'opération de calibration de l'échelle sur chacune des photographies. Normalement, le logiciel conserve la valeur de l'échelle (il est toutefois nécessaire de contrôler que cela a bien été fait).



6. Une fois ces étapes réalisées, on peut enfin passer aux mesures, courbes, configuration de points et de Landmarks...

Pour tracer une courbe fermée de contours d'un objet, que l'on utilise pour les mesures en morphométrie géométrique, il faut sélectionner dans « Options » « Close curve » puis cliquer sur l'icône « Draw background curves » située dans la barre de tâches. Un stylo apparaît ensuite sur la console, il suffit alors de cliquer sur les points pour faire le contour de la forme, puis quand celle-ci est complète de faire un clic droit.



La forme entière apparaît alors en jaune, un autre clic sur la courbe fait apparaître tous les points pris pour former cette courbe. Dans la barre de données en bas de l'image, outre le nom du fichier et diverses autres informations apparaît alors le nombre de points constituant la courbe.

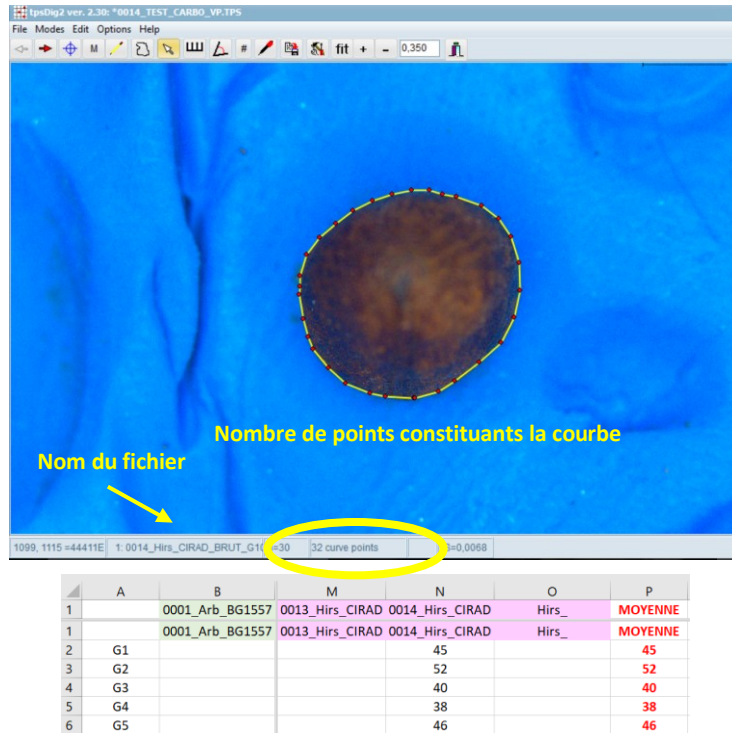
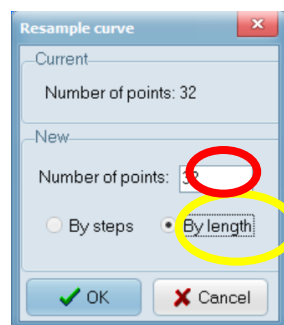


Figure 1 : extrait de tableau Excel recensant les nombres de points de courbe et les moyennes



Pour une application de morphométrie géométrique, il est intéressant de se créer un fichier type Excel (Figure 1) qui recense ces nombres de points, d'en faire une moyenne et de revenir modifier le fichier TPS en remplaçant le nombre de points de chaque courbe par la moyenne trouvée. Cela rend le protocole plus précis et permet d'adapter chaque protocole aux objets photographiés. Pour cela, il faut cliquer droit sur la courbe puis choisir dans les propositions « **Resample curve** ». Apparaît alors une nouvelle fenêtre sur la console qui indique le nombre de points de la courbe initiale, il faut alors renseigner le nouveau nombre souhaité, ne pas oublier de cocher « **By length** », puis « **Ok** ». La nouvelle courbe comprend alors le nombre de points correspondant à la moyenne mais ces points ont été, de plus, homogénéisés tout autour du tracé.

7. Ne pas oublier bien sûr de sauvegarder les données et les tracés très régulièrement. Pour cela aller dans « **File** » puis « **Save data as...** » et nommer le fichier « **nomdufichier\_XY.TPS** »
8. Le fichier enregistré apparaît alors sous la forme d'une succession de points et de coordonnées de points et s'ouvre avec une application du type « bloc note »

```
1490,00000 601,00000
1417,00000 580,00000
IMAGE=C:\Users\Juliette\Documents\MASTER (version a jour)\M2\Mémoire\Moderne\Juliette_coton_photographies_morpho\0014_TEST_CARBO\TEST_VUE_PROXIMALE\0014_Hirs
ID=0014_Hirs_CIRAD_BRUT_G10_NC_VP
SCALE=0,006826
LM=0
CURVES=1
```

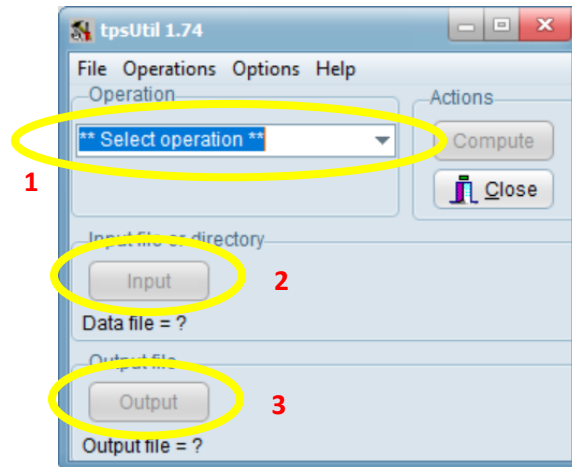
Où LM qui correspond à Landmark contient toujours 0 mais où les rubriques curve et points, indiquent des valeurs, respectivement le nombre de tracé et le nombre de points du tracé. Ensuite se décomposent toutes les coordonnées des points de la courbe et le nom du fichier image ensuite.

## Manuel utilisation du logiciel Tps.relw32

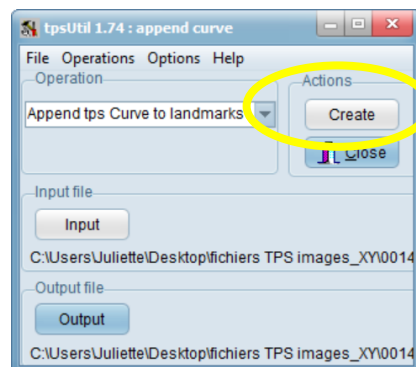
Le logiciel Tps.relw est un logiciel de traitement des données de type tps. Il sert à fabriquer des tests à partir de landmarks et de semi-landmarks (créés grâce à Tps.util).

La mise à la même échelle des relevés de formes obtenus sous Tps.dig, appelée superposition Procuste, permet de comparer les structures des individus. Les opérations de ces superpositions consistent à réaliser une mise à l'échelle des structures, leurs translations, leurs inversions éventuelles et leurs rotations.

1. Ouvrir Tps.util et sélectionner dans la barre déroulante « **Append tps Curve to landmarks** » puis « **Input** », « **Output** » et nommer le fichier « nomdufichier\_LM.TPS »



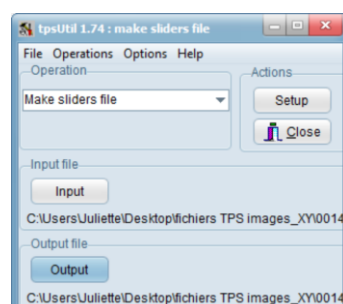
2. Lorsque le fichier a été renommé dans « **Output** » la fenêtre de Tps.util se modifie... Il faut alors cliquer sur « **Create** ». Si vous n'avez pas harmonisé le nombre de points sur les courbes le logiciel vous affichera alors un message d'erreur... Il faut que toutes les courbes aient les mêmes nombres de points sinon le logiciel ne peut pas créer de Landmarks. Si les courbes possèdent toutes le même nombre de points et que ceux-ci sont répartis de manière homogène alors le logiciel Tps.util va créer un fichier de type bloc-note.



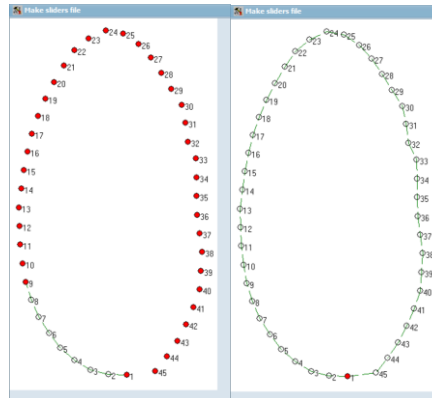
**Dans le fichier bloc note, LM=45** signifie que la courbe comprenant dans le fichier XY.TPS 45 points répartis uniformément sur la courbe **sont maintenant des Landmarks** dont les coordonnées sont mentionnées en dessous. Toutes les images du fichier initial se suivent avec toujours comme informations, le nom du fichier, le parcours qui mène au fichier initial et l'échelle

3. Dans « **Operations** » choisir « **Make sliders file** » ensuite « **Input** » et choisir le fichier « nomdufichier\_LM.TPS » puis « **Output** » pour sauvegarder le nouveau fichier qui va être créé et que l'on va noter « nomdufichier\_SLIDER.NTS ».

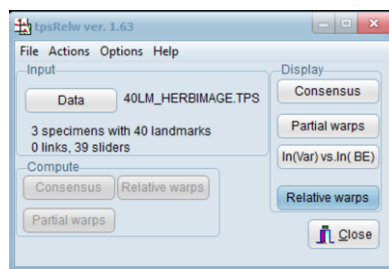
ATTENTION : à cette étape il ne faut pas oublier de **sauvegarder sous NTS et plus TPS**



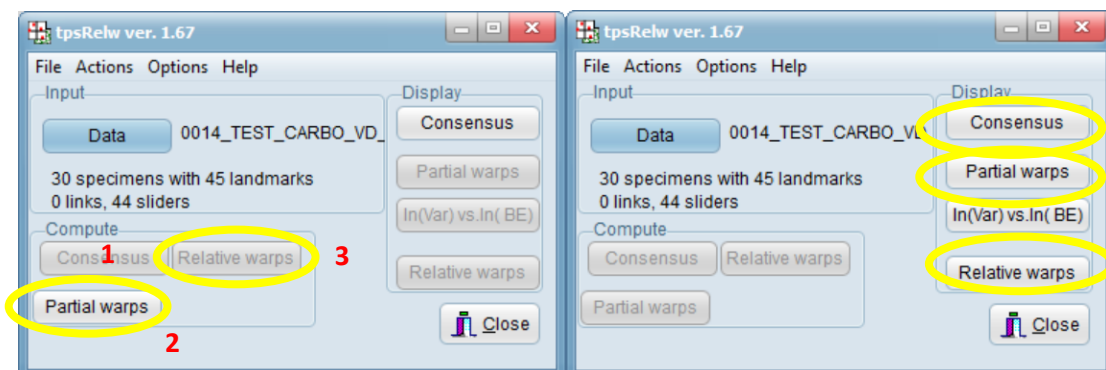
4. Cliquer sur « **Setup** ». Vous obtenez alors une forme simplifiée et moyenne de toutes les formes créées dans le fichier XY avec 45 landmarks non hiérarchisés. Le but de cette étape est donc de hiérarchiser les différents points entre les Landmarks et les semi-landmarks. Les semi-landmarks doivent être coloriés en blanc et les Landmarks en rouge. Par défaut, les points sont tous des Landmarks. Pour changer cela il faut cliquer gauche dans un des points et passer en son centre avant de rejoindre le point suivant.



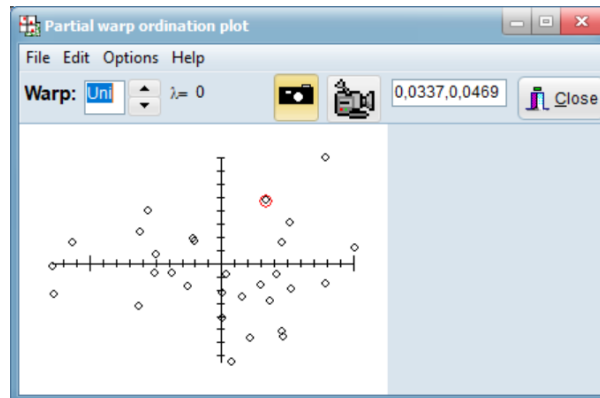
5. Il faut alors refaire la même étape que 3 et 4 mais en créant un fichier de liens « **Make link file** » en format NTS également. Ce fichier va nous permettre, par la suite, d'afficher les liaisons entre les points définissant le contour de la graine. Il permet de visualiser notamment les grilles de déformations dans Tps relw.
6. A ce stade-là on passe du logiciel de Tps.util à Tps.relw
7. Le logiciel de Tps.relw va permettre, à partir des Landmarks et semi-landmarks créés sur les formes un modèle-type en faisant un centroïde commun à ces formes puis une standardisation de la taille et enfin (la partie la plus longue et compliquée) une même orientation. Tout cela n'est possible que si toutes les étapes précédentes ont été respectées et particulièrement les échelles. Il faut également commencer la prise des points de la courbe toujours au même endroit de la graine.
8. **Ouvrir** Tps.relw



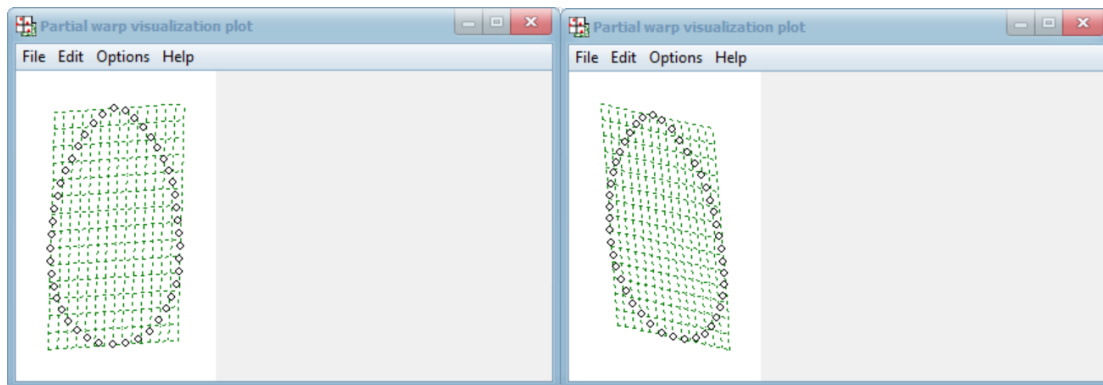
9. Cliquer sur « **Data** » et ouvrir le fichier de LM « nomdufichier\_LM.TPS ».
10. Puis dans « **File** » en haut à gauche de la console, ouvrir le fichier NTS « nomdufichier\_SLIDER.NTS ».
11. Dans « **Options** » vérifier que dans « **slide method** » c'est bien « **BE** » qui est coché.
12. Cliquer dans « **Consensus** » puis « **partial warps** » et « **relative warps** ».
13. Après avoir cliqué sur ces boutons, les boutons à droite de la console deviennent disponibles. Il faut alors sauvegarder les données. Pour cela il faut aller dans « **File** » puis « **save** » et choisir « **Aligned specimens** » et « **Centroid size** » qui sont les deux données utilisées pour l'étude et la morphométrie géométrique. En effet, ce sont les deux variables de conformations utiles pour les analyses statistiques car ce sont les formes nettoyées de l'orientation et de la taille des spécimens.



14. On peut, ensuite, en appuyant sur les trois boutons « **partial warps** » « **In(Var) vs.In(BE)** » et « **Relative warps** », faire apparaître plusieurs fenêtres différentes de la fenêtre de base qui permettent de visualiser les résultats obtenus. On peut notamment visualiser les déformations des différents spécimens. Chaque point sur le graphique correspond aux valeurs propres (eigenvalues).



Exemples de l'ACP et représentation des déformations selon les deux premiers axes de l'ACP, réalisé sur un échantillon de *G. barbadense moderne non carbonisés de l'étude (0006\_barb\_BG1406)* : 30 graines



Le graphique nommé « **relative warps** » représente l'ACP (analyse en composante principales) des données réalisées. Si l'on veut modifier les données, les ouvrir dans un autre logiciel... il ne faut pas travailler avec le fichier de Landmark mais bien celui des spécimens alignés que l'on peut sauvegarder après que le logiciel ait réalisé ses calculs dans l'onglet « **save** » « **aligned specimens** ». Ces spécimens alignés correspondent aux spécimens des photographies alignés selon la technique Procuste.