



SCAN'16 Toulouse

Séminaire de Conception Architecturale Numérique

Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet

Sous la direction de Jean-Pierre Goulette et Bernard Ferries

PUN - Editions Universitaires de Lorraine.

ISBN: 978-2-8143-0289-1

Titre de la publication :

Réinterprétation des Muqarnas Persan : éléments de conceptions, génération et modélisation paramétrique

Auteurs :

Mohammad Mansouri



Cette publication (présentée dans ce document en version auteur acceptée), est parue dans les actes du Séminaire de Conception Architecturale Numérique SCAN'16 – Toulouse - *Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet*, 07-09 septembre 2016, Toulouse

Tout usage du contenu de cette publication doit mentionner la référence de l'ouvrage, du titre et de(s) auteur(s).

Réinterprétation des Muqarnas Persan : éléments de conceptions, génération et modélisation paramétrique

Mohammad Mansouri

*Laboratoire GSA, ENSAPM, France
smb.mansouri@gmail.com*

RÉSUMÉ. Cet article se focalise sur une partie d'un travail de recherche en cours de développement dans le cadre d'une thèse en architecture cherchant à réinterpréter les Voutes en Muqarnas pour un usage contemporain. Le Muqarnas est un élément décoratif et structurel de l'architecture iranienne en période islamique. L'essentiel du travail porte sur la mise en place de modèles paramétriques capable de générer de nouveau type de Muqarnas, en reprenant les caractéristiques géométrique et morphologique des Muqarnas traditionnels. Deux approches différentes de génération et modélisation paramétrique de nouveau type de Muqarnas vont être expliquées dans le cadre de cet article.

MOTS-CLÉS : Muqarnas, Géométrie, Architecture paramétrique, Conception numérique

ABSTRACT. This article focuses on a part of an ongoing doctoral thesis research in architecture which seeks to reinterpret Muqarnas vaults for a contemporary use. The Muqarnas is a decorative and structural element of Iranian architecture in the Islamic period. Most of the thesis work concerns the establishment of different parametric models for generating new type of Muqarnas, repeating geometric and morphological characteristics of the traditional ones. Two different approaches to generation and parametric modelings new type of Muqarnas will be explained in this article.

KEYWORDS: Muqarnas, Geometry, Parametric architecture, Digital design

1. Introduction

« The architect must renew architecture from the moment when it was abandoned; and he must try to bridge the existing gap in its development by analyzing the elements of change, applying modern techniques to modify the valid methods established by our ancestors, and then developing new solutions that satisfy modern needs. »¹

L'objectif de cette recherche est de fournir des éléments méthodologiques et des outils pratiques permettant une réappropriation de l'approche géométrique-mathématique qui caractérisait historiquement l'architecture iranienne, en vue de la définition de nouvelles formes constructives. En effet, l'étude de la géométrie et des mathématiques fut incontestablement une des caractéristiques fondamentales de l'architecture iranienne, particulièrement pendant la période islamique.

Dans ce cadre, le Muqarnas a été désigné comme l'objet de l'étude. Les Muqarnas sont en effet considérés comme l'élément le plus riche et le plus sophistiqué d'un point de vue géométrique de l'architecture iranienne ancienne. La réactualisation d'une démarche basée sur une approche géométrique est d'autant plus fascinante aujourd'hui, avec les très grandes possibilités qu'offrent des logiciels paramétriques tels que Grasshopper et Rhinocéros dans la génération et dans la manipulation des formes géométriques complexes. Il a été question dans un premier temps d'effectuer une analyse historique des Muqarnas afin de comprendre leur origine, mais également pour pouvoir retracer l'évolution de leur fonction, suspendue entre structure et décoration. De cette analyse ont été déduits, dans un deuxième temps, des principes géométriques et morphologiques récurrents des Muqarnas persans, qui pourront être transcrits sous la forme de règles de conception pour la génération de nouveaux éléments architecturaux - essentiellement des couvertures et des toitures.

1 H. Fathy, *Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Relevance to Hot Arid Climates*. University of Chicago Press (Chicago, IL), 1986. p xxiii.

2. Les Muqarnas

1. Définition

Un Muqarnas est un élément architectural tridimensionnel de l'époque islamique. Le Muqarnas est composé de différents éléments concaves, formant des niveaux. Chaque niveau est porté par le niveau inférieur par rapport auquel il est décalé. Le résultat est une forme en forme d'escalier dont dans certains cas est nommé 'voute en forme de nids d'abeilles' ou 'Stalactites'. Les éléments sont construits avec de différents matériaux selon leur origine géographique. Des Muqarnas en pierre, en bois, en plâtre, en briques ont été identifiés jusqu'à aujourd'hui. [Al Assad, 1994]

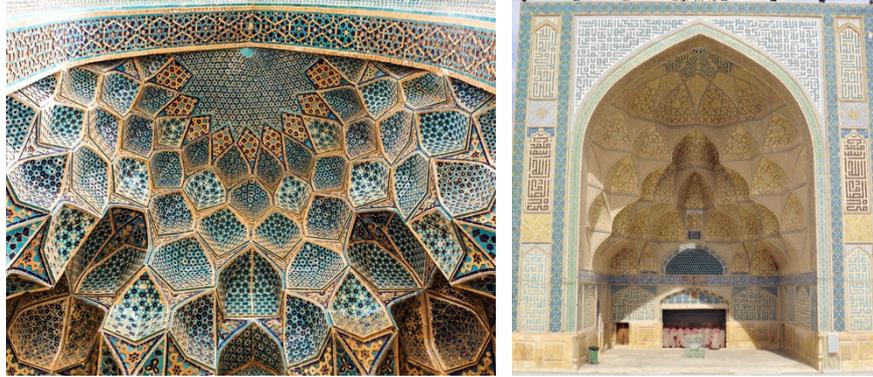


Figure 1. et 2. Muqarnas de la Grande mosquée de Natanz et de la Grande mosquée d'Isfahan, Iran

2. Éléments du Muqarnas

D'après l'ouvrage d'Al-Kashi, les Muqarnas sont composés de différentes cellules. Le terme Cellule et la traduction du mot arabe bayt .Al-Kashi donne ainsi une définition à ce qu'est une cellule de Muqarnas : Les deux (facettes) peuvent être considérés comme se tenant sur un plan parallèle à l'horizon. Les deux (facettes) avec leur toit sont appelés une cellule [bayt]. Ensuite il précise que tous les éléments ne sont pas des cellules, mais dans certains cas les blocs qui remplissent l'espace vide entre de cellules sont appelés éléments intermédiaires. Il faut savoir que tous les éléments qui connectent deux cellules ne sont pas des éléments intermédiaires, mais peuvent être des cellules. Plus précisément selon

[Harb, 1978, p. 34], un élément intermédiaire est un élément qui relie les toits de deux éléments consécutifs.

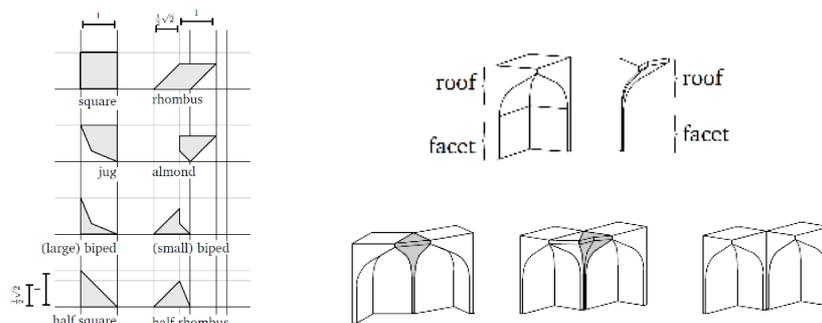


Figure 3. A gauche: Projection horizontale des différents éléments des Muqarnas persan. A droite: Composants des éléments et les différents type d'agencement des cellules et des éléments intermédiaires(en gris).

3. Réinterprétation et génération de nouveaux Muqarnas

À partir d'une analyse morphologique et géométrique des Muqarnas traditionnels, on s'est concentrés sur l'élaboration de plusieurs algorithmes afin de créer des modèles paramétriques de Muqarnas.

Le cadre dans lequel s'inscrivent ces recherches formelles a été une des questions fondamentales de cette thèse. Autrement dit il a fallu, à l'issue d'un travail d'analyse rigoureux sur la morphologie et la géométrie des Muqarnas tout au long de son histoire, arriver à déduire des principes morphologique et géométrique de cet élément. C'est à dire de définir ce qui a caractérisé cet élément durant son histoire et ce qui pourra inspirer des nouvelles interprétations en vue d'un usage contemporain de cet élément. Ces recherches formelles ont conduit à la mise en place de deux approches différentes pour la génération de nouveaux Muqarnas. Les algorithmes génératifs² qui caractérisent ces deux approches sont illustrés ci-après.

² Toutes les modélisation et le développement des algorithm de génération ont été effectués grace aux logiciel Rhinoceros 5 et Grasshopper.

1. Génération à partir d'une surface

Dans cette première tentative de génération de Muqarnas, l'objectif était de sortir du cadre des méthodes traditionnelles de la construction des Muqarnas qui consiste à dessiner dans un premier temps la projection horizontale (le plan) et ensuite construire le volume de chaque élément à partir de ce plan.

Donc il a été question de chercher une méthode alternative de génération des Muqarnas qui soit indépendante du traçage du plan.

Cette réflexion a finalement abouti à une approche de génération à partir d'une surface. C'est-à-dire qu'il s'agit de générer des éléments de Muqarnas directement sur la surface qui caractérise le volume final de la voûte.

Panelisation de la surface

La donnée de base dans cette approche est une surface quelconque. Comme les cellules des Muqarnas sont basées en général sur des quadrilatères (dérivés du carré et du losange), la logique a été de diviser cette surface en sous-surfaces en forme de quadrilatères pour finalement pouvoir les transformer en élément de Muqarnas.

Pour construire des tuiles en forme de losange sur la surface il a fallu générer les points de cette surface sur l'intersection des isocourbes U et V. Ensuite un point sur deux des points U de la surface a été retiré afin transformer cette grille rectangulaire en une grille en losanges. Enfin, une surface quadrilatérale a été construite par les quatre points définissant un losange.

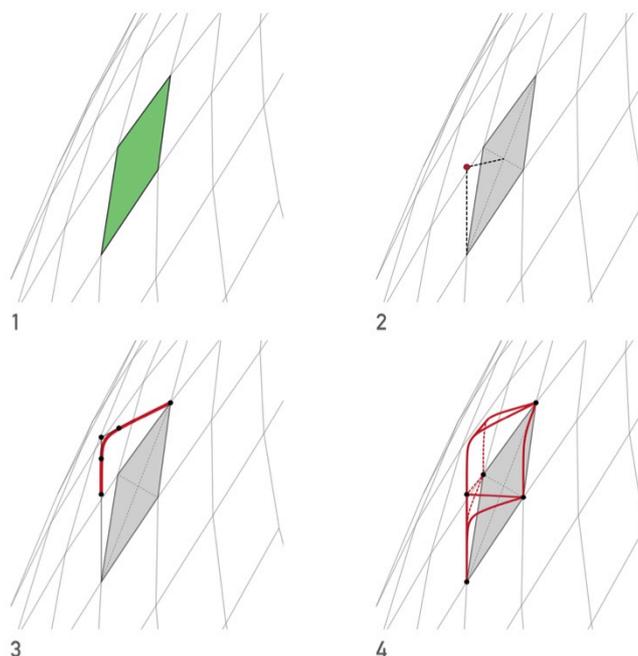


Figure 4. Construction d'un bloc de Muqarnas sur la base d'une tuile en forme de losange

Construction des éléments sur la base des tuiles

Une fois que la surface a été coupée en tuiles en forme de losanges, il a fallu les transformer en élément de Muqarnas. Comme il a été expliqué au début, une cellule de Muqarnas est formée par une surface générée à partir de trois courbes. Il en est de même concernant les éléments intermédiaires. Ainsi afin de créer un bloc simple de Muqarnas (une cellule et un élément intermédiaire) sur la base d'une tuile en forme de losange(ou un quadrilatère) il faut construire ces trois courbes sur deux des côtés et la grande diagonale des quadrilatères. Concernant la grande courbe, elle sera construite dans le plan vertical formé par les points A, C et la projection horizontale de A. Le point de départ de cette courbe est le point E créé par la translation du point C de vecteur $Z1$ (composant Z du vecteur CO). Ainsi il est possible de construire la courbe entre les deux points E

et A selon la méthode traditionnelle expliquée par Al-Kashi. Les deux autres courbes quant à eux sont construites sur la base des côtés AB et AD. Ainsi la cellule peut être générée à partir de ces trois courbes.

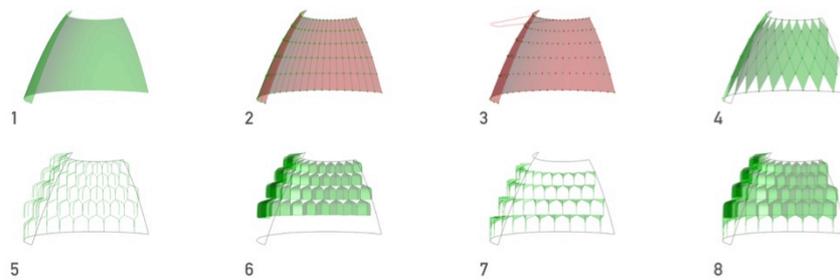


Figure 5. Processus de génération de Muqarnas à partir d'une surface

Ensuite pour compléter ce Bloc de Muqarnas il faut créer deux autres courbes sur la base de BC et DA ainsi que la construction de la droite EC. Ces deux courbes et cette droite permettent la construction de l'élément intermédiaire du bloc. Ainsi l'application de ce processus sur l'ensemble des tuiles de la surface va finalement créer un Muqarnas composé de ce type de bloc.

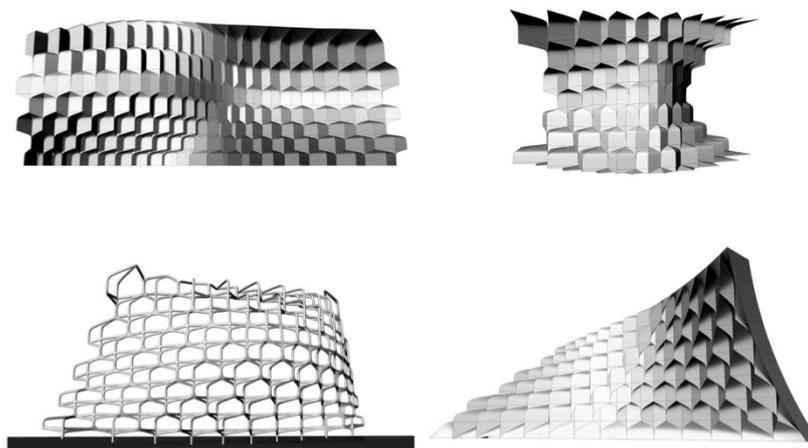


Figure 6. Différents Muqarnas générés par l'algorithme mis en place. Les éléments s'adaptent au changement de courbure des surfaces.

2. Génération à partir du plan

La méthode précédente avait pour but la génération de nouveaux Muqarnas sans suivre la démarche traditionnelle, où le tracé du plan est l'étape fondamentale.

À partir du XIV siècle, les architectes ont constamment cherché à complexifier et à varier la géométrie des Muqarnas. C'est sans doute la maîtrise et l'enrichissement de la géométrie du plan qui a permis cette diversification au niveau du volume global. Ainsi dans le but de créer des nouvelles typologies de Muqarnas, la problématique principale a été la complexification de la géométrie et la variation de l'agencement des éléments. Cela a abouti au développement d'une nouvelle approche générative qui, sur la base de la méthode traditionnelle - c'est-à-dire le traçage du plan -, permet de générer des Muqarnas morphologiquement plus variés et plus complexes.

Analyse des plans existants

La première étape de cette recherche a été d'analyser les plans des Muqarnas existants afin d'en comprendre la logique d'agencement des éléments, l'appartenance des éléments au niveau correspondant et les différentes possibilités d'assemblage de bloc (cellule + élément intermédiaire).

L'une des difficultés du décryptage du plan des Muqarnas classique est de repérer les "niveaux" sur le plan. C'est à dire arriver à définir le niveau auquel chaque élément appartient. Cette étude analytique a été facilitée en utilisant le corpus de Shiro Takahashi, qui a accompli un travail remarquable sur la représentation en plan des Muqarnas³.

³ <http://www.shiro1000.jp/muqarnas/default.htm>

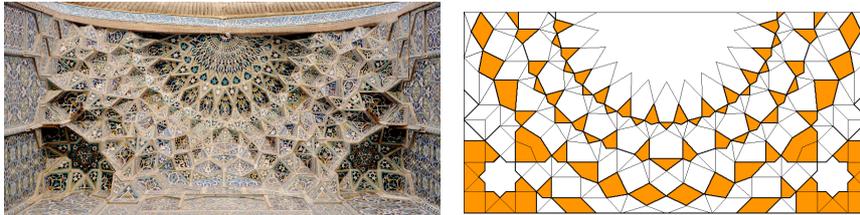


Figure 7. A gauche. Muqarnas de la Grande mosquée de Kerman, Iran. A droite: Analyse du plan montrant les niveaux.

Définition des différents “blocs” d’éléments

En étudiant et en comparant plusieurs plans de Muqarnas, il a été déduit que dans la majorité des cas, chaque niveau du Muqarnas est composé d’un enchaînement de plusieurs “blocs”. Ces blocs sont en réalité composés d’une cellule et d’un élément intermédiaire. Chaque bloc est positionné sur deux niveaux du Muqarnas. C’est-à-dire que la cellule représente un niveau, et l’élément intermédiaire qui lui est attaché en dessous, représente le niveau inférieur.

Selon les analyses effectuées sur les Muqarnas persans, ces blocs varient en fonction de la forme de l’élément intermédiaire. C’est-à-dire que la projection horizontale de ces blocs est toujours un quadrilatère (losange ou carré) et ce qui différencie les différentes familles de bloc est la projection de l’élément intermédiaire. La projection de l’élément intermédiaire peut donc être soit une fléchette, soit un triangle, soit un losange ou bien être représentée par deux droites (confondues avec les deux côtés du quadrilatère global). Cette nouvelle interprétation des éléments est très intéressante du point de vue de l’algorithme permettant notamment de générer des éléments très variés. Ce qui n’était pas le cas dans l’approche précédente surfacique.

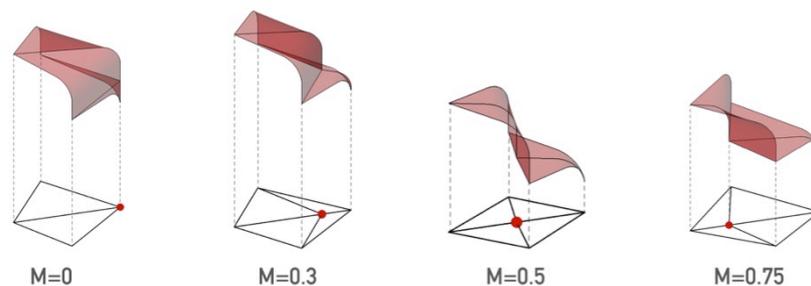


Figure 8. Les différentes familles de blocs, générées en fonction de la position du point *M*.

Les “courbes de niveau”

Comme il a été évoqué précédemment, en faisant une lecture du Muqarnas par blocs, la projection horizontale des lignes séparatrices des niveaux apparaît comme fondamentale. Ainsi, une fois la logique de génération des blocs trouvée, il faut parvenir à organiser un agencement de ces blocs de façon à ce que ces derniers forment un Muqarnas, c'est-à-dire soient placés dans le bon niveau.

La solution qui a été trouvée pour ce problème est de générer le nouveau Muqarnas à partir des “courbes de niveau”. Ces courbes de niveau ne sont pas les poly-lignes séparant les niveaux sur le plan, mais il s'agit de courbes qui relient les centres des blocs de chaque niveau.

Ces courbes de niveau serviront comme paramètre de base pour la génération du Muqarnas. Le nombre de ces courbes détermine le nombre des niveaux.

Génération du plan

Après avoir créé les courbes des niveaux, il est question de générer les blocs (quadrilatères) sur la base de ces courbes. Il existe sans doute plusieurs solutions pour générer ces blocs, mais la méthode choisie dans le cadre de cette recherche est celle qui prévoit de diviser la première courbe en *n* point. Les autres courbes de niveau vont être divisées à partir

de la première courbe, en trouvant sur chaque courbe le point le plus proche par rapport au point de la première courbe.

L'étape suivante consiste à tracer les quadrilatères (bloc) entre deux courbes de niveau. Il faut souligner que la forme de ces quadrilatères dépend de la forme des courbes et qu'ils peuvent être tous différents, à la différence des Muqarnas traditionnelles où il existe 8 types d'éléments définis. Ensuite, une fois que le plan a été couvert par les quadrilatères (bloc), il faut distinguer la cellule de l'élément intermédiaire dans chaque bloc. Cette partie est et la plus importante, car elle rend possible la diversification des éléments et évite le fait d'avoir une forme homogène composée de bloques identiques. Donc comme il a été expliqué plus haut, il s'agit de créer les quatre familles de blocs sur la base des quadrilatères. Cela a été possible en modifiant la position du point M sur le diamètre des quadrilatères. La position du point M varie entre 0, 0.3, 0.5 et 0.75 de la longueur du diamètre du quadrilatère.

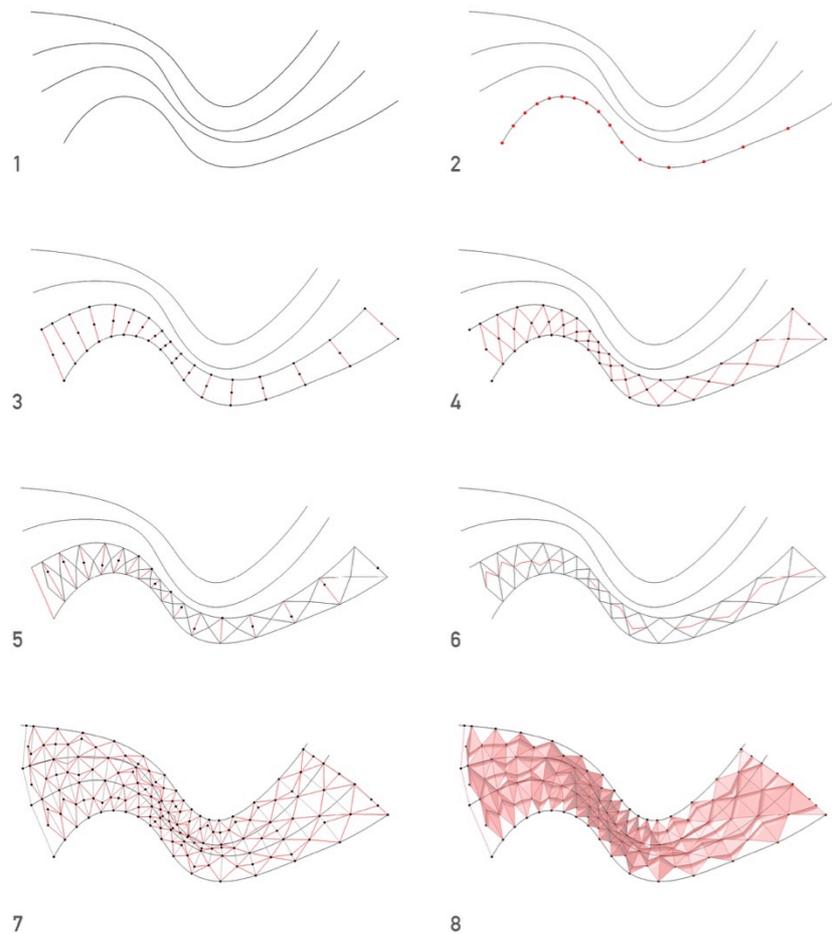


Figure 9. *Les différentes étapes de la génération du Plan*

La construction des cellules et des éléments intermédiaires sur la base des blocs est presque identique à celle expliquée dans l'approche surfacique. Une fois les éléments générés sur la base des blocs, il ne reste qu'à les déplacer dans la direction Z pour atteindre le niveau correspondant.

Cette simple variation du point M permet de différencier la morphologie des blocs, ce qui les rend très proches de la variété des éléments dans un Muqarnas traditionnelle. En plus de cette variété au niveau des blocs, le fait de pouvoir générer le plan à partir des courbes permet aussi de gérer la morphologie globale de la forme, ainsi que la dimension des blocs. Donc finalement grâce à cette approche il est possible de générer de nouveaux types de Muqarnas avec une grande liberté sur la forme globale, qui n'est pas nécessairement concentrique, comme le sont les Muqarnas traditionnels. En plus il permet de paramétrer le nombre de blocs dans chaque niveau.

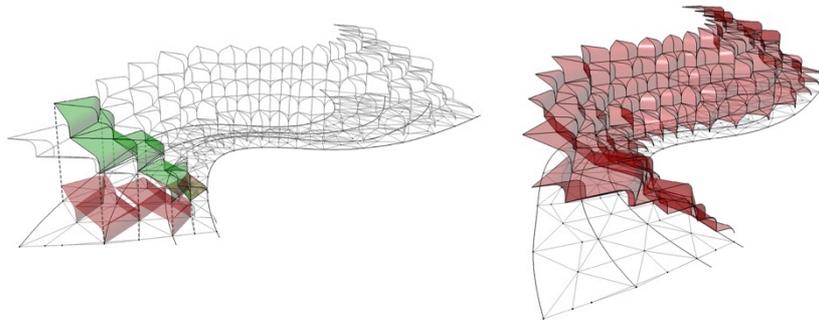


Figure 10. *A gauche: Déplacement des blocs vers les niveaux correspondants. A droite: Modélisation finale du Muqarnas*

3. Conclusion

En analysant les deux approches de génération, on peut considérer l'approche de génération à partir du plan être, du point de vue de la variété des éléments, la plus intéressante. Car le fait de concevoir des familles de blocs et de les appliquer de façon aléatoire aux quadrilatères du plan a donné plus de complexité à la forme finale, ce qui n'était pas possible dans le cas de l'approche surfacique où on perçoit une certaine homogénéité au niveau des blocs. Mais en revanche, comme dans l'approche surfacique les propriétés de la surface sont conservées, les blocs de Muqarnas sont toujours bien adaptés au sens de la surface. Cette adaptation est très intéressante au niveau de la morphologie globale, car elle

permet une adaptation des blocs au changement de courbure de la surface dans les deux sens u et v (courbure positive et négative).

En prenant du recul par rapport à ces deux approches, il semble envisageable de mettre en place une approche hybride, c'est-à-dire d'utiliser la méthode de diversification des familles de blocs sur l'approche surfacique. Ceci pourrait être possible en traçant la projection horizontale des tuiles de la surface et récupérer ainsi un plan de Muqarnas sur lequel appliquer la deuxième approche.

3. Bibliographie

- Necipoglu, G., & Al- Asad, M. (1995). *The Topkapi Scroll: Geometry and Ornament in Islamic Architecture* Topkapi Palace Museum Library Ms H. 1956. Sketchbooks & Albums. Santa Monica (Calif.): Getty center for the history of art and the humanities.
- Dold-Samplonius, Y. (1992). "Practical Arabic Mathematics: Measuring the Muqarnas by Al-Kashi."
- Hillenbrand, R. (1994). *Islamic Architecture: Form, Function and Meaning*. Edinburgh: Edinburgh univ. press.
- Memarian, G.H, Safaeipoor, H, & Dadkhah, N. (2014). "Traditional Complex Modularity in Islamic and Persian Architecture: Interpretations in Muqarnas and Patkâné Crafts, Focusing on Their Prefabricated Essence."
- Piran McClary, R. (2014). "Brick Muqarnas on Rûm Saljuq Buildings - The Introduction of an Iranian Decorative Technique into the Architecture of Anatolia."
- Rosintal, J. (1928). *Pendentifs, trompes et stalactites dans l'architecture orientale...* Paris: P. Geuthner.
- Sakkal, M. (1988). "An Introduction to Muqarnas Domes Geometry."
- Stierlin, H. (1979). *Architecture de l'islam: de l'Atlantique au Gange*. Paris: Société française du Livre.
- Tabbaa, Yasser. 1985. "The Muqarnas Dome: Its Origin and Meaning."