

Esthétique et Force, étude d'une technique ancienne pour une construction moderne à l'aide de Cast3M.

Lucia Mondardini

Laboratoire GSA, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais

Pierre Pegon

Laboratoire ELSA, Centre Commun de Recherche, Commission Européenne

OBJECTIF

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

LA PRÉSENTATION MONTRE COMMENT LE CODE CAST3M A ÉTÉ UTILISÉ POUR UNE ÉTUDE DÉTAILLÉE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UNE STRUCTURE EN PIERRE MASSIVE OBTENUE PAR L'ADAPTATION DE L'APPAREILLAGE DE LA VOUTE PLATE PROPOSÉE PAR JOSEPH ABEILLE À UNE SURFACE AVEC DOUBLE COURBURE POUR OBTENIR UNE CALOTTE SPHÉRIQUE.

LA VOUTE PLATE: UN EXEMPLE DE STÉRÉOTOMIE.

1. OBJECTIF

- LA STERÉOTOMIE SE DÉVELOPPE ENTRE LE XVI^{ème} ET XVII^{ème} SIÈCLE COMME LA SCIENCE DE LA COUPE DES PIERRES POUR RÉALISER DES VOUTES DE N'IMPORTE QUELLE FORME OU DIMENSION

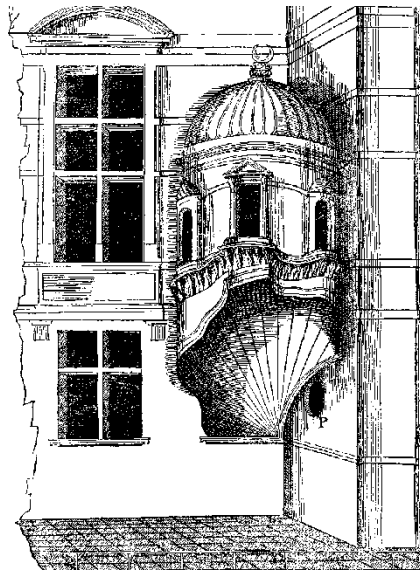
2. CADRE HISTORIQUE

- L'EXIGENCE EST D'OBTENIR DES SURFACES CONTINUES ET HOMOGÈNES EN ÉLIMINANT OU EN MINIMISANT LA PRÉSENCE DES JOINTS

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

- DESSIN, GRÂCE À DES RÈGLES PROJECTIVES, DES FORMES RÉELLES DES SURFACES DES CLAVEAUX POUR EN SIMPLIFIER LA COUPE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE



Philibert De l'Orme,
Trompe d'Anet



Ardouin Mansart 1673
Hotel de Ville, Arles

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

LA VOUTE PLATE: CONTEXTE DE L'INVENTION.

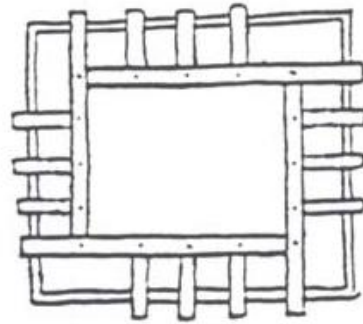
1. OBJECTIF

DIFFICULTÉ DE TROUVER
DES POUTRES DE
DIMENSION SUFFISANTE

RÉALISATION DE
LA STRUCTURE
AVEC DES
ÉLÉMENTS DE
PETITES
DIMENSIONS

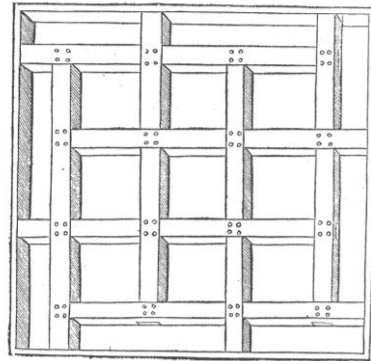
NAISSANCE DU
**PLANCHER À
BATONS ROMPUS**

2. CADRE HISTORIQUE



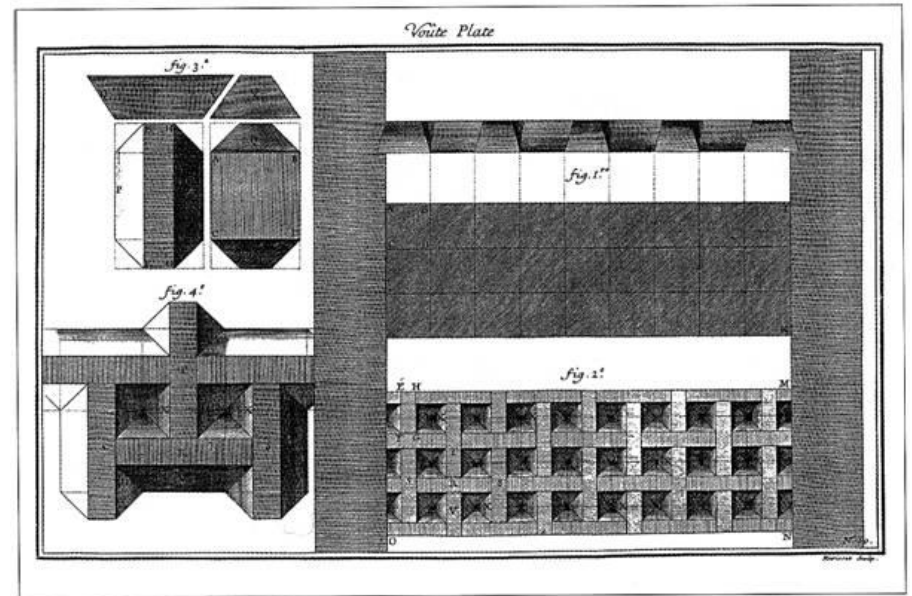
Villard de Honnecourt,
XIII siècle

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE



Serlio, 1545

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE



Voûte plate de Joseph Abeille, extrait de Gallon 1735

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES

LA VOUTE PLATE: JOSEPH ABEILLE 1699.

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

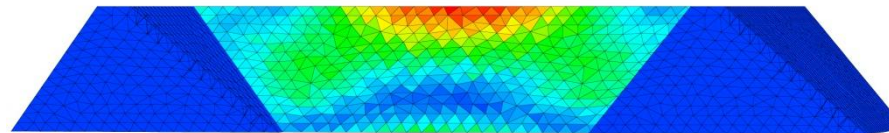
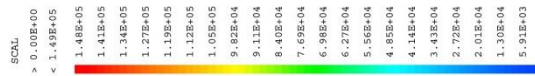
3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES



Claveau et assemblage des claveaux pour réaliser la voute plate.



Coupe d'un claveau soutenu par deux autres claveaux: on peut voir l'arche de décharge et les efforts plus importants dus à la somme de la force appliquée et l'arche de la poussée.

- LE CLAVEAU EST UN POLYÈDRE AYANT LES DEUX **COUPES AXIALES EN FORME DE TRAPÈZE ISOCÈLE** ORIENTÉES DANS DEUX DIRECTIONS OPPOSÉES

- CHAQUE CLAVEAU **SOUTIEN ET EST SOUTENU** AFIN QUE LA VOUTE DEVIENNE OPÉRATIONNELLE QUAND L'ASSEMBLAGE EST COMPLET

- LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE EST CELUI D'UNE **POUTRE ÉPAISSE**

- LA **POUSSÉE EST PARTAGÉE PAR LES QUATRE MURS** GRÂCE À LA STÉRÉOTOMIE DES CLAVEAUX

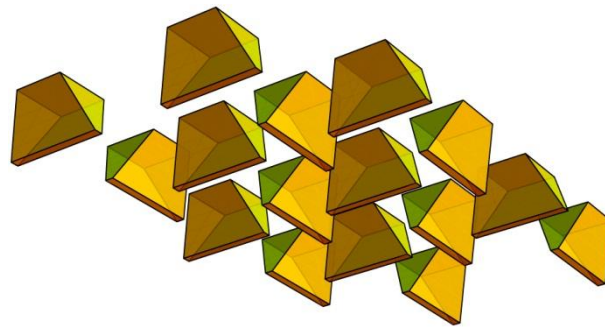
L'ÉTUDE NUMÉRIQUE À L'AIDE DE CAST3M.

MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE.

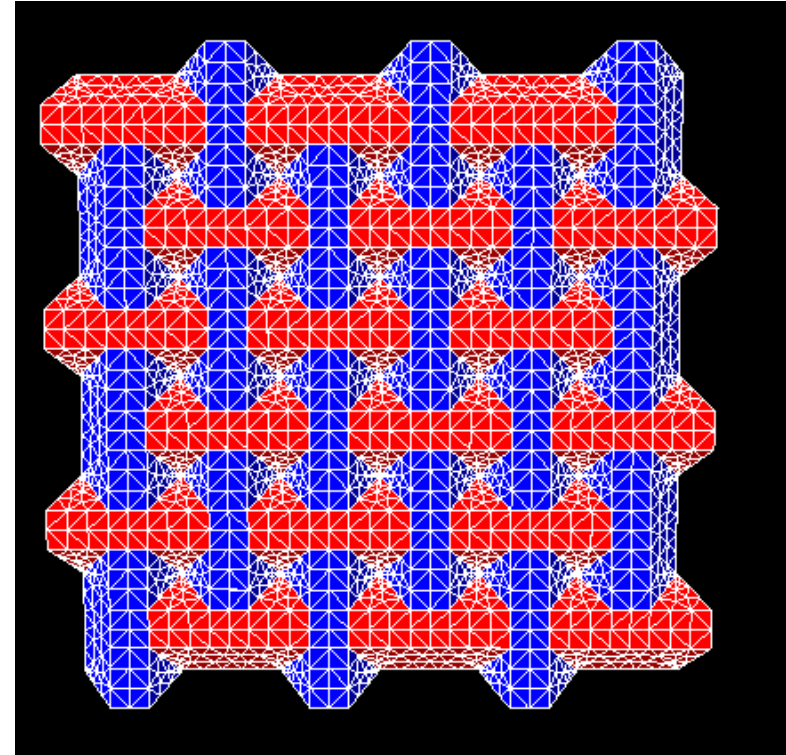
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE



4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE



5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES

MODÉLISATION DE LA VOUTE PLATE A L'AIDE DE WOLFRAM MATHEMATICA ET CAST3M.

La mise en œuvre de la voute est optimisée du fait de l'utilisation d'une unique forme de claveaux, son comportement mécanique ne change pas si on inverse l'intrados avec l'extrados.

LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE.

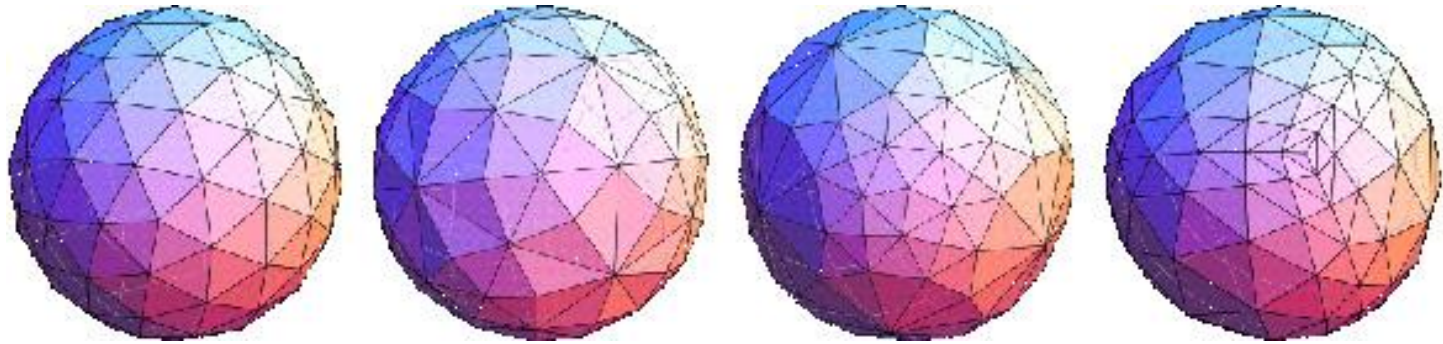
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

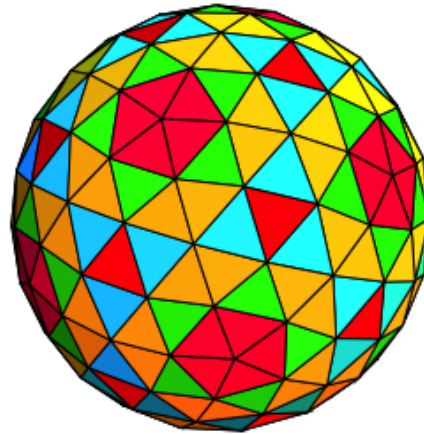
3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES



Géodes obtenues à partir de différents solides générateurs, la première à gauche est obtenue à partir d'un icosaèdre, comme la structure objet de l'étude.



Selon le choix du polyèdre générateur et de la fréquence, on peut obtenir des géodes avec des régularités différentes.

Par exemple, l'image à gauche montre les triangles qui composent la surface de la géode de fréquence 4 à partir d'un icosaèdre, avec des couleurs différentes selon leur surface.

La voute qu'on va présenter est constituée de 8 claveaux différents.

LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE.

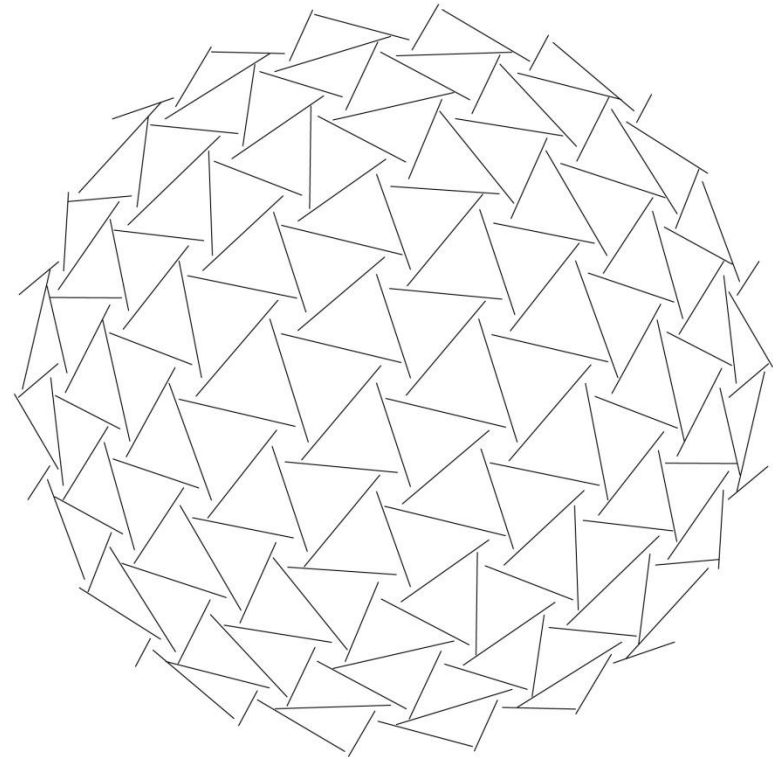
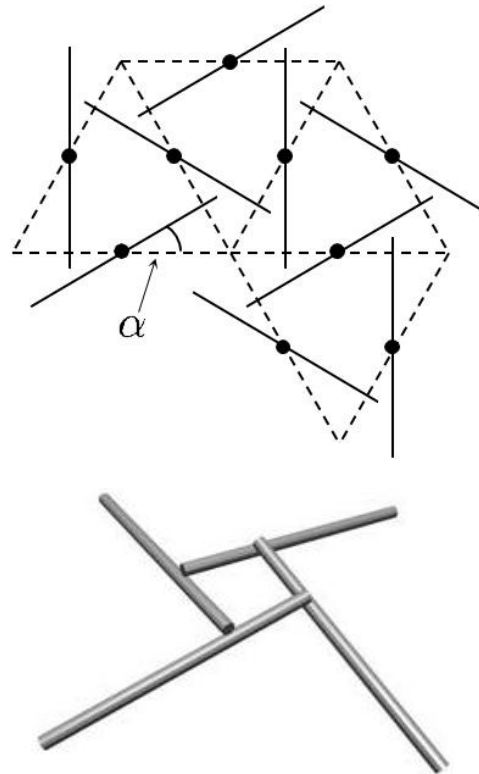
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES



Dés qu'on a réalisé la géode il est nécessaire d'identifier le nexorade auquel correspond le comportement structurel de la voute. Etant donné une subdivision du plan en polygones, on peut définir les axes des NEXORS, en tournant chaque élément des côtés du pavage du même angle autour d'un axe qui passe pour son point médian et le centre de la sphère. Si le pavage se trouve sur une surface courbe, la rotation sera faite sur le plan tangent à la surface.

LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE.

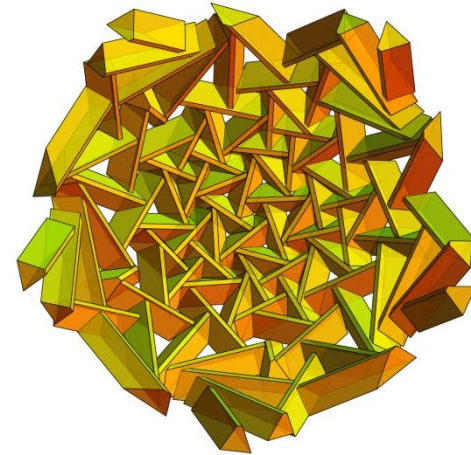
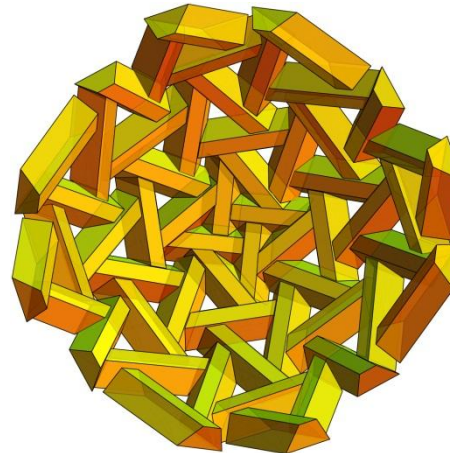
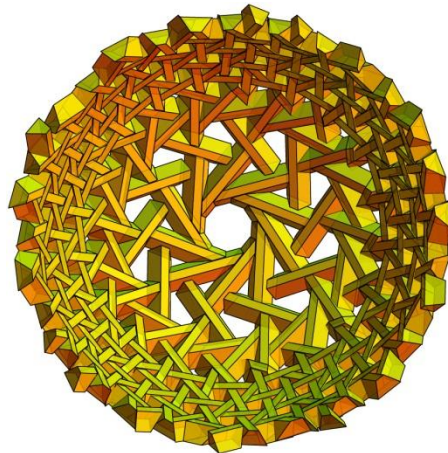
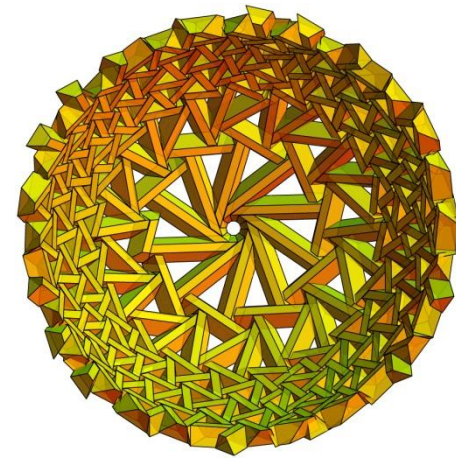
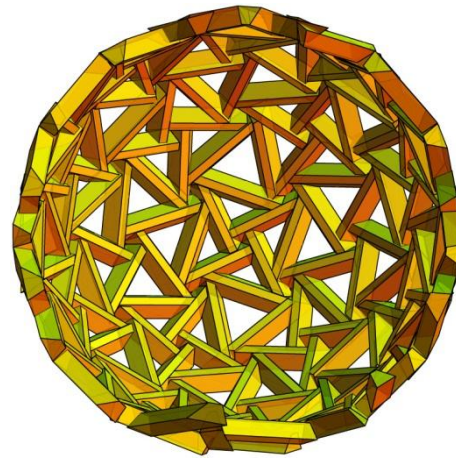
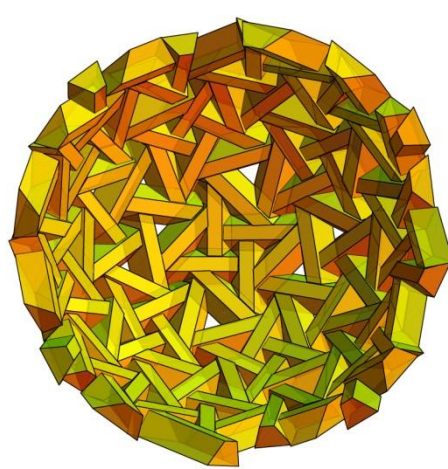
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES



LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE.

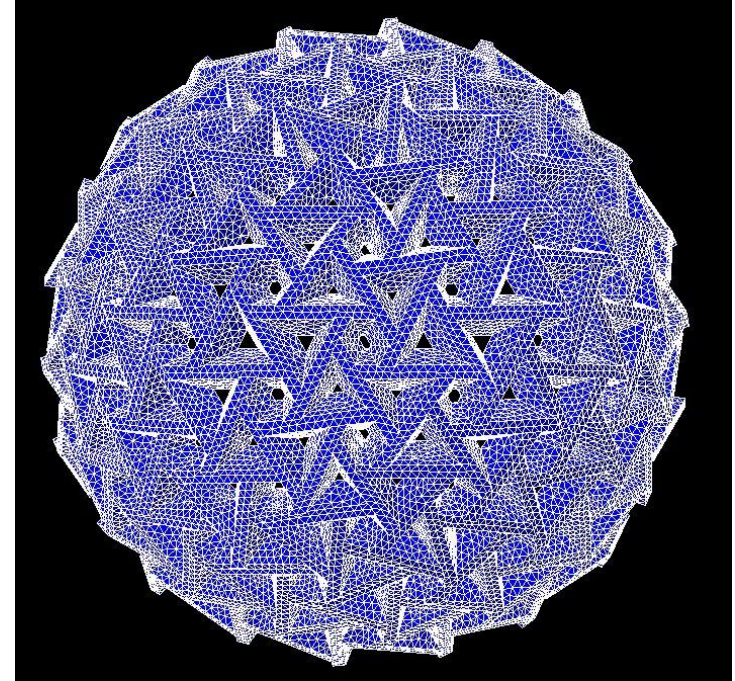
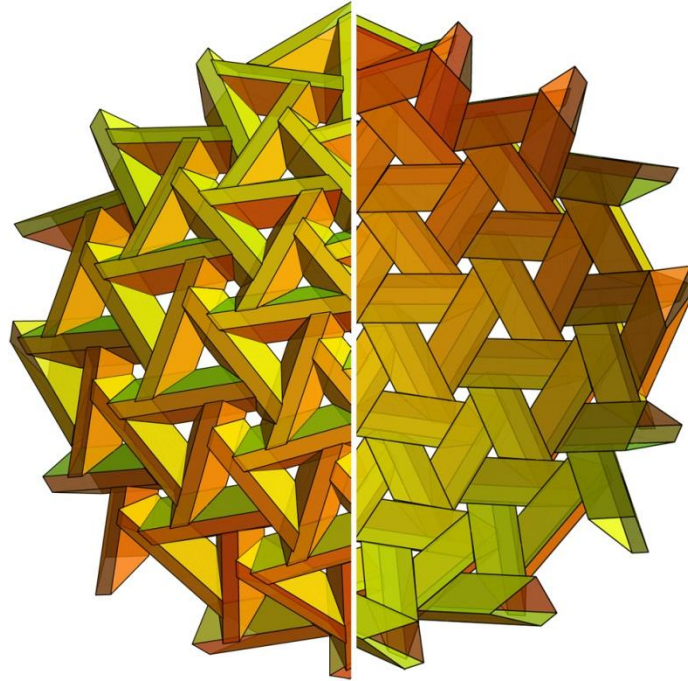
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. **LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE**

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES



MODELISATION DE LA VOUTE A L'AIDE DE WOLFRAM MATHEMATICA ET CAST3M

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

CHOIX DU MODÈLE.

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. **LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES**

LES STRUCTURES SONT CARACTÉRISÉES PAR LES PIERRES (LES CLAVEAUX) ET LES INTERFACES MINCES REMPLIES AVEC DU MORTIER (LES JOINTS). LA LITTÉRATURE PROPOSE PLUSIEURS MODÈLES POUR LES ÉTUDIER:

- LES CLAVEAUX ET LES JOINTS SONT DES SOLIDES DÉFORMABLES AVEC UN COMPORTEMENT NON LINÉAIRE DONT ON EXTRAIT MODÈLE HOMOGENE ÉQUIVALENT
- LA DÉFORMATION DES CLAVEAUX EST IGNORÉE ET ON MODÉLISE LE SYSTÈME DISCRET OÙ LES DÉPLACEMENTS SE CONCENTRENT AUX INTERFACES ENTRE LES BLOCS RIGIDES
- ANALYSE LIMITE ET D'UN SYSTÈME CONSTITUÉ PAR DES ÉLÉMENTS DISCRETS
- ON UTILISE UN MODÈLE HÉTÉROGÈNE: LES ÉLÉMENTS SOLIDES AVEC UN COMPORTEMENT ÉLASTIQUE LINÉAIRE ET LES INTERFACES AVEC UN COMPORTEMENT NON LINÉAIRE.

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

CHOIX DU MODÈLE.

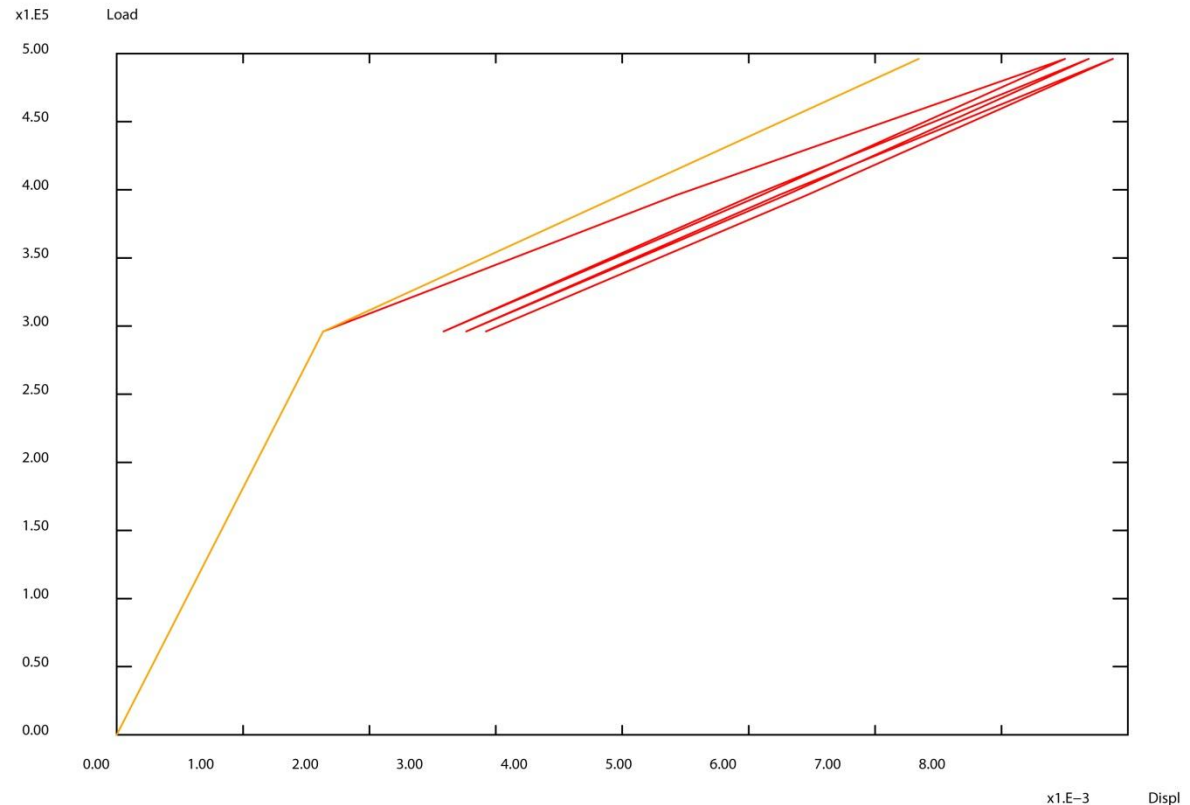
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES



Comparaison des courbes force-déplacement obtenues avec un modèle homogénéisé (orange) et le modèle utilisé pour obtenir les résultats qui seront présentés. Le Module de Young du modèle homogénéisé a été choisi pour faire coïncider le premier trait de la courbe avec celui de la courbe obtenue avec un modèle qui considère les claveaux et les joints séparément ($E_h=1/50E_c$).

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

CHOIX DU MODÈLE.

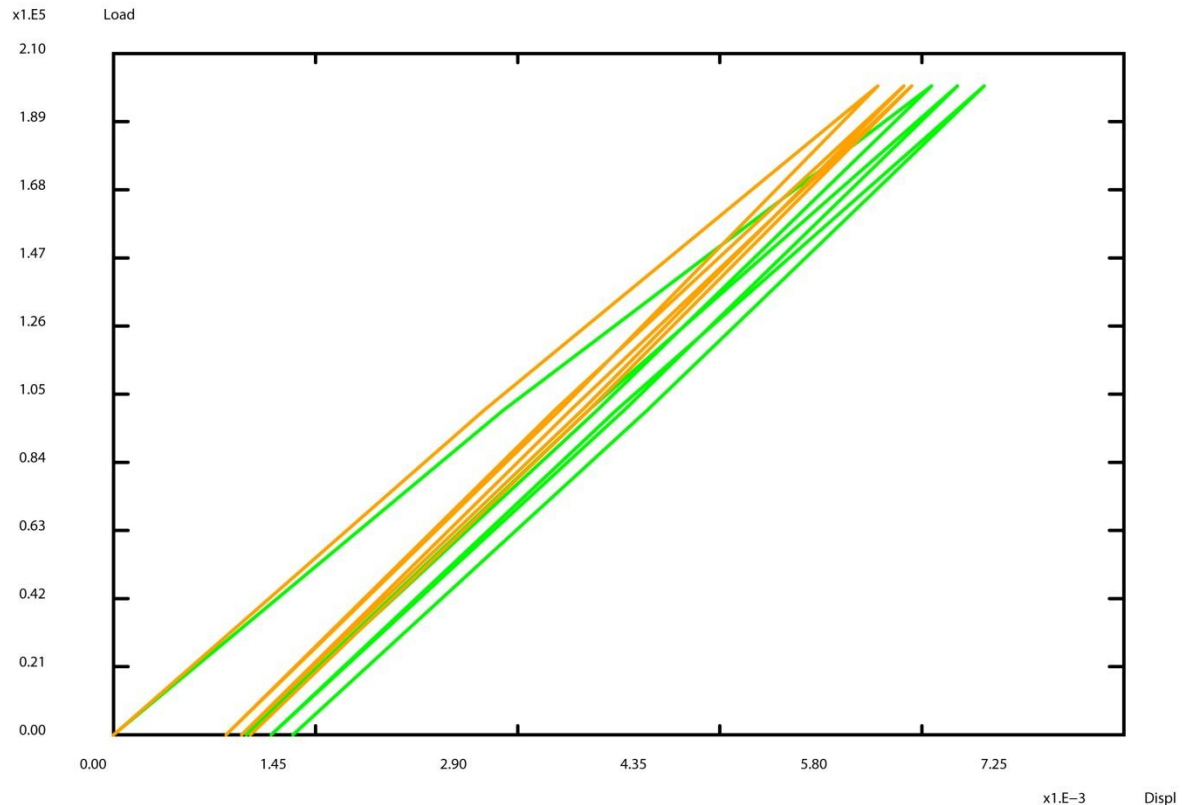
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. **LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES**



GIBI FECIT

Comparaison entre les courbes force-flèche pour une voute obtenue en considérant les claveaux rigides (orange) ou déformables (vert).

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

DÉFINITION DU MODÈLE.

- NÉCESSITÉ DE CRÉER UNE INTERFACE POUR IMPORTER LE MODÈLE GÉOMÉTRIQUE DE MATHEMATICA DANS CAST3M
- AJUSTEMENT DU MAILLAGE CAR LE CONTACT ENTRE LES CLAVEAUX N'EST PAS TOUJOURS LE MÊME (OPÉRATEUR **CBLO**)
 1. Création d'une table qui contient les faces (taba) de chaque claveau et d'une table qui contient les solides (tabt)
taba . i = table 'liste_de_faces';
tabt=tabl 'liste_de_blocs';
 2. Ensuite on applique l'opérateur **cblo** pour obtenir des blocs compatibles à partir des blocs dont on ne connaît que les enveloppes simples
tabtt=**cblo** tabt (large/100);
 3. On génère les maillage d'enveloppes et les volumes
tdum=genesurf tabi;
envi=genenvel tabi;
elim (envi et ssupi) (large/100);
tabbk . (dime tabbk)=coul (volu envi) 'bleu';

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

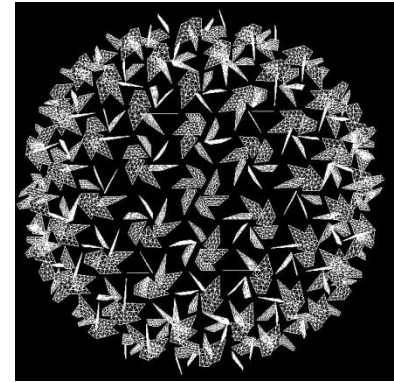
5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

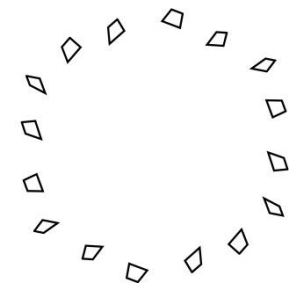
DÉFINITION DU MODÈLE.

- DÉTECTION AUTOMATIQUE DES CONTACTS (OPERATEUR **GENJ**) POUR GÉNÉRER LES JOINTS

joint0=**genj** meshT (large/100);



- LES CLAVEAUX: MODÈLE MÉCANIQUE ÉLASTIQUE LINÉAIRE,
DENSITÉ 2000 KG/M3
MODULE D'YOUNG 0,3 GPA
COEFFICIENT DE POISSON 0,27
- LES INTERFACES : MODÈLE MÉCANIQUE ÉLASTIQUE ISOTROPE PLASTIQUE COULOMB
DENSITÉ 2500 KG/M3
RAIDEUR A COMPRESSION $6 \text{ e}^8 \text{ N/m}$
RAIDEUR A TRACTION $3 \text{ e}^8 \text{ N/m}$
COHÉSION 0
ANGLE DE FROTTEMENT $\pi/4$
- LES CONDITIONS AUX LIMITES: ENCASTREMENT D'UNE SURFACE DES CLAVEAUX QUI FONT PARTIE DE L'ANEAU EXTÉRIEURE



1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

ANALYSES: PROBLÈMES DE MAILLAGE.

1. OBJECTIF

ON A EFFECTUÉ LES ANALYSES POUR ÉVALUER LA SENSIBILITÉ À DEUX PARAMÈTRES :

2. CADRE HISTORIQUE

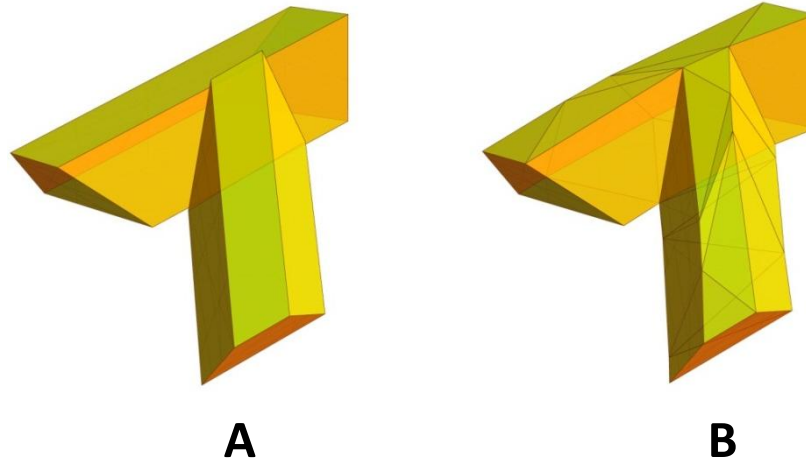
L'ANGLE DE ROTATION DES CLAVEAUX (α)

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

L'ANGLE DE COUPE DES FACES INCLINÉES (ϕ)

| $\phi \backslash \alpha$ | $\frac{3\pi}{20}$ | $\frac{19\pi}{120}$ | $\frac{\pi}{6}$ | $\frac{7\pi}{40}$ | $\frac{11\pi}{60}$ | $\frac{23\pi}{120}$ |
|--------------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| $\frac{8\pi}{45}$ | B | - | B | B | A | B |
| $\frac{7\pi}{45}$ | B | AB | AB | AB | B | AB |
| $\frac{2\pi}{15}$ | AB | AB | B | B | AB | AB |
| $\frac{\pi}{9}$ | AB | B | AB | AB | AB | AB |
| $\frac{4\pi}{45}$ | B | AB | AB | AB | AB | AB |
| $\frac{\pi}{15}$ | AB | AB | AB | AB | AB | AB |

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE



Les deux familles de claveaux: la première (A) est plus facile à réaliser dans la pratique constructive, mais la deuxième (B) a permis d'avoir un intrados et un extrados courbes, donc plus intéressant d'un point de vue esthétique et au même temps de résoudre des problèmes de génération de maillage dans Cast3M liés à des éléments de très petite taille sur les surfaces enveloppes.

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

ANALYSES: ANGLES DE RÉFÉRENCE.

1. OBJECTIF

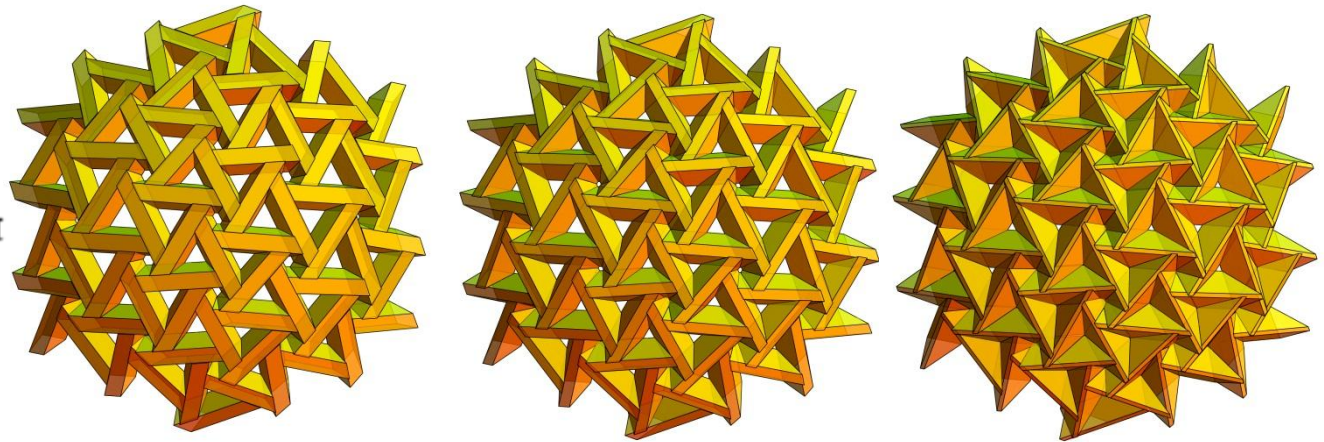
2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

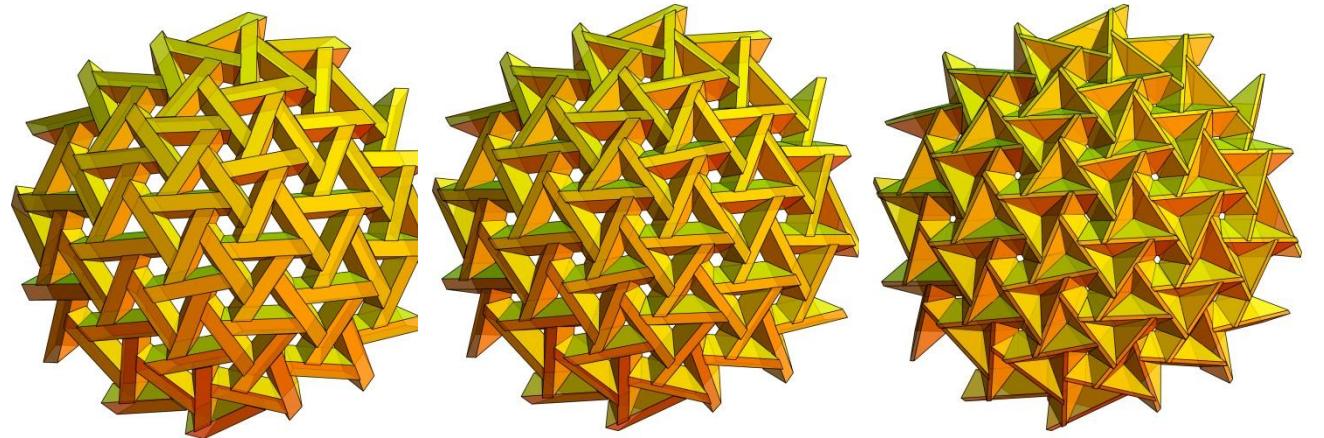
4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

$$\alpha = \frac{23}{120} \pi$$



$$\alpha = \frac{3}{20} \pi$$



$$\varphi = \frac{1}{15} \pi$$

$$\varphi = \frac{1}{9} \pi$$

$$\varphi = \frac{8}{45} \pi$$

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES. ANALYSES.

DES ANALYSES NUMÉRIQUES ONT ÉTÉ FAITES POUR ÉVALUER L'APPAREILLAGE OPTIMAL SELON LES CRITÈRES SUIVANTS:

- POIDS TOTAL DE LA STRUCTURE
- POUSSÉE MAXIMALE EXERCÉE PAR UN CLAVEAU DE L'ANNEAU EXTÉRIEUR
- FLÈCHE MAXIMALE SOUS POIDS PROPRE AFIN D'EXTRAIRE LE DÉPLACEMENT ACTIF
- FLÈCHE MAXIMALE SOUS LE PREMIER PAS DE CHARGE
- FLÈCHE MAXIMALE APRÈS LA CONSOLIDATION DE LA STRUCTURE AVEC DES CYCLES DE CHARGE-DÉCHARGE
- GLISSEMENT CUMULATIF MAXIMAL APRÈS LES CYCLES
- FORCE APPLIQUÉE VS FLÈCHE MAXIMALE

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

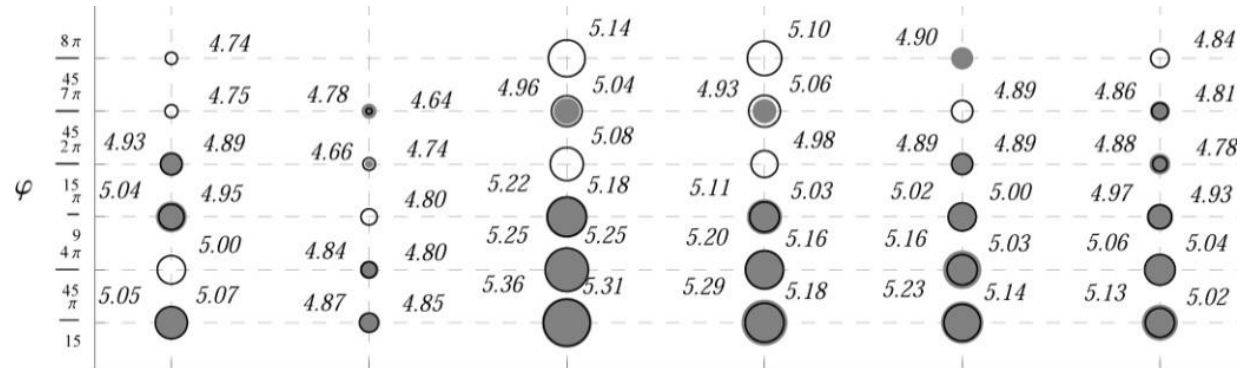
4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. **LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES**

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

ANALYSES: LES RÉSULTATS.

POUSSE



- LA POUSSÉE TEND À SE REDUIRE AVEC UNE AUGMENTATION DE ϕ
- LA RAPPORT ENTRE LA POUSSÉE ET LE POIDS PROPRE RESTE PRESQUE CONSTANT POUR TOUTES LES VOUTES (ENTRE 0.15 ET 0.17) ET DONC QUE LE COMPORTEMENT DES VOUTES EST SIMILAIRE DU POINT DE VUE DE L'EFFET ARCHE

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

ANALYSES: LES RÉSULTATS.

1. OBJECTIF

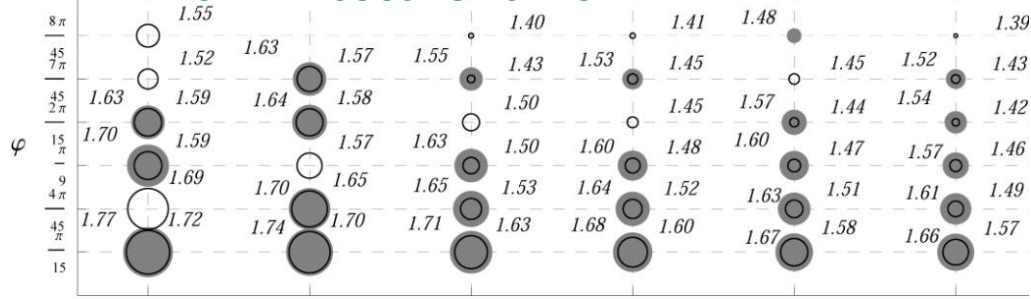
2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

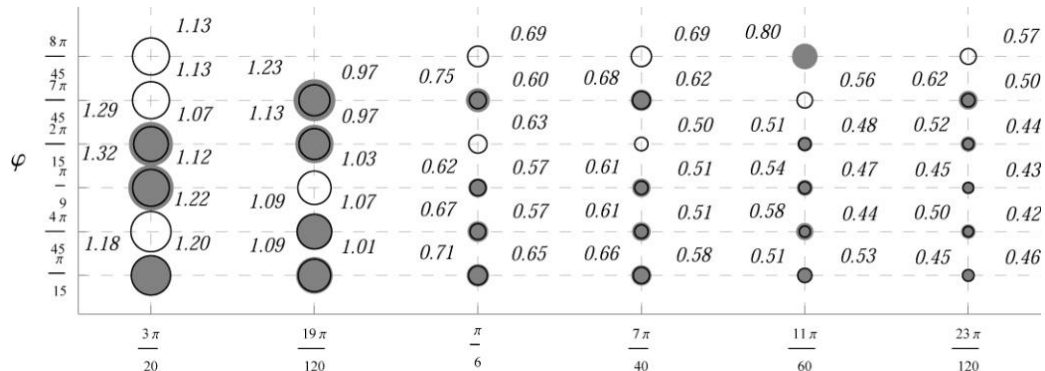
4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES

DEPLACEMENT SOUS POIDS PROPRE



DEPLACEMENT RESIDUAL



LA FLÈCHE SOUS POIDS PROPRE MONTRE QUE LES STRUCTURES LES PLUS RIGIDES CORRESPONDENT AUX GRANDES VALEURS DE α ET ϕ

PAR CONTRE, DU POINT DE VUE DE LA FLÈCHE RÉSIDUELLE, LES STRUCTURES QUI CÈDENT LE MOINS CORRESPONDENT AUX GRANDES VALEURS DE α MAIS AUX PETITES VALEURS DE ϕ

LES COURBES FORCE/FLÈCHE QUI SUIVENT MONTRENT QUE LES STRUCTURES TENDENT À SE CONSOLIDER PLUS VITE POUR LES PETITES VALEURS DE α

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES. ANALYSES.

LES IMAGES QUI SUIVENT MONTRENT:

- COURBES FORCE-FLECHE APRÈS TROIS CYCLES DE CHARGE ET DECHARGE (CHAQUE IMAGE FAIT RÉFÉRENCE Á DES VOUTES AVEC LA MÊME VALEUR DE α).

- DIAGRAMMES RADAR OÙ LES AXES REPRÉSENTENT LE RAPPORT ENTRE LA VALEUR D'UN PARAMÈTRE CHOISI ET LA VALEUR MAXIMALE OBTENUE ENTRE TOUTES LES VOUTES ETUDIÉES

FLÊCHE RESIDUELLE APRÈS LES CYCLES
GLISSEMENT CUMULÉ MAXIMAL

FLÊCHE RESIDUELLE TOTALE APRÈS LES CYCLES
RAPPORT ENTRE LA RIGIDITÉ INITIALE ET LA RIGIDITÉ FINALE
LA RÉCIPROQUE DE LA RIGIDITÉ INITIALE
POUSSÉE MAXIMALE EXERCÉE PAR UN CLAVEAU DE L'ANNEAU EXTERIEUR

LE DIAGRAMME AYANT LA PLUS PETITE SURFACE DONNE LA VOUTE LA PLUS PERFORMANTE.

$$\text{CHOIX OPTIMAL: } \alpha = \frac{23\pi}{120} \quad \varphi = \frac{\pi}{9}$$

1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES

LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

ANALYSES: LES RÉSULTATS.

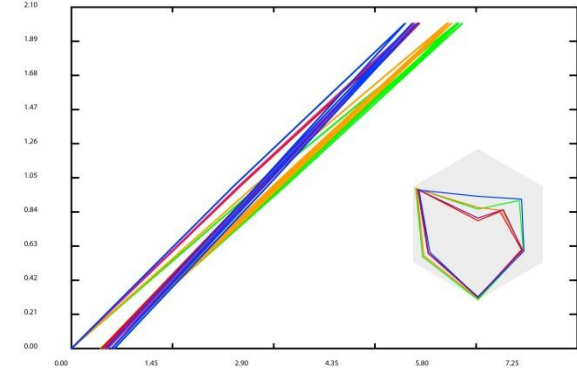
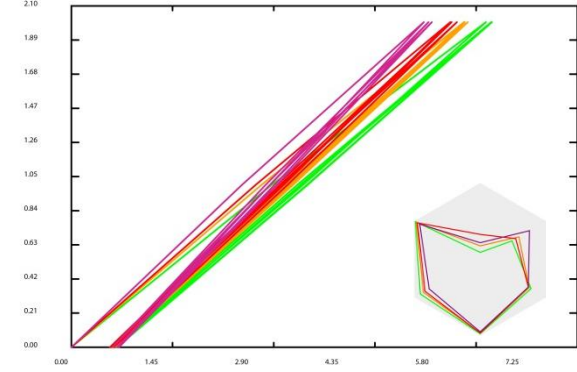
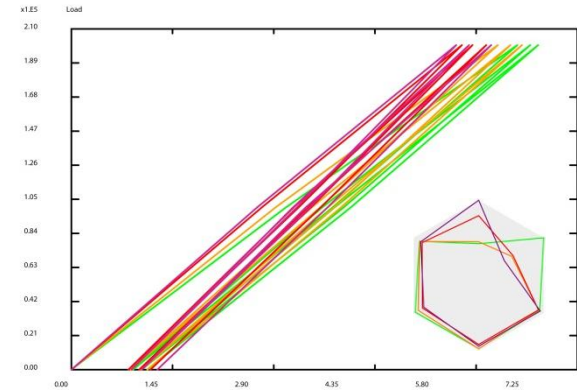
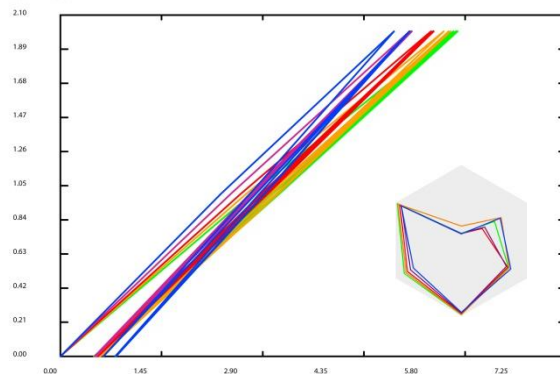
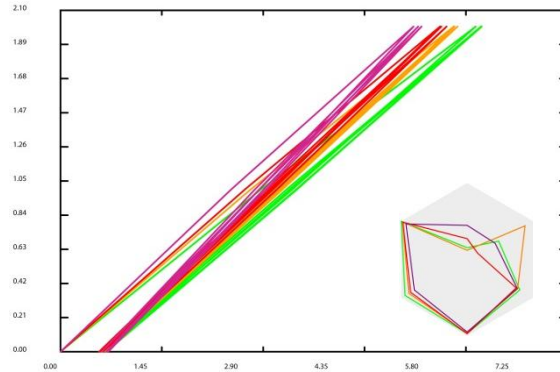
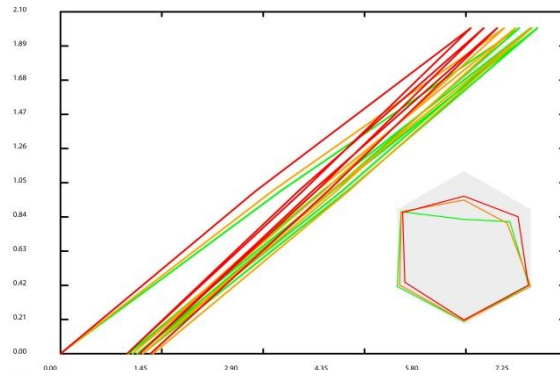
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES



LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

ANALYSES: LES RÉSULTATS.

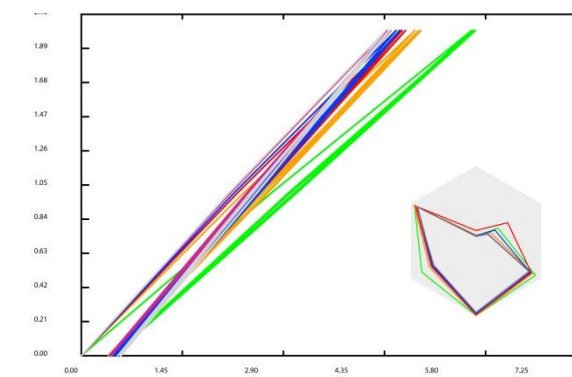
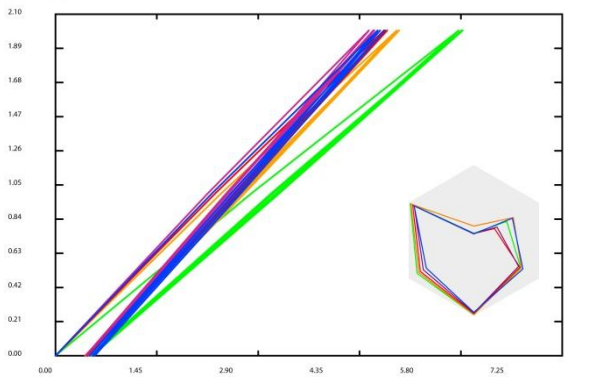
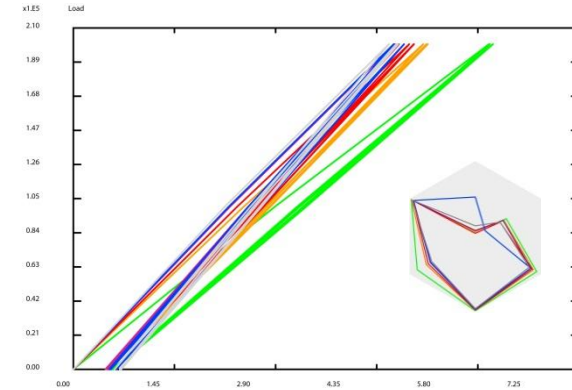
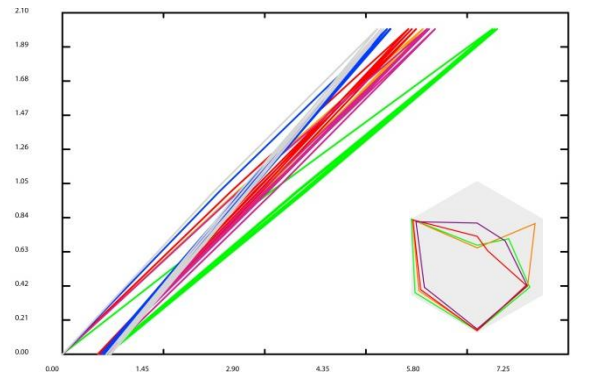
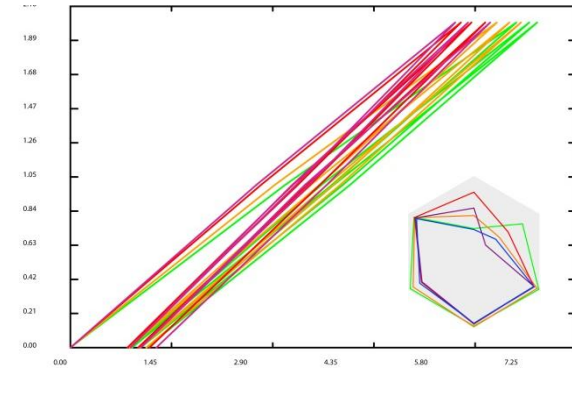
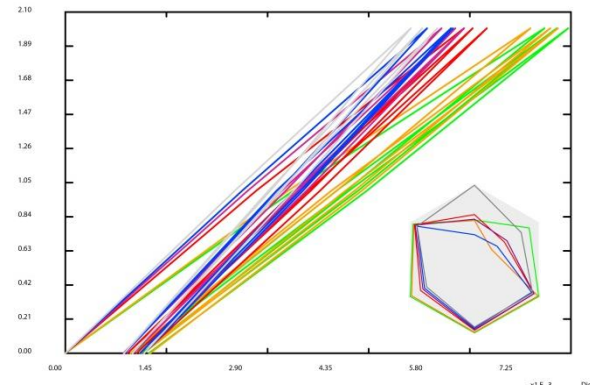
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES



LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

LA VOUTE OPTIMALE: DÉPLACEMENT VERTICAL.

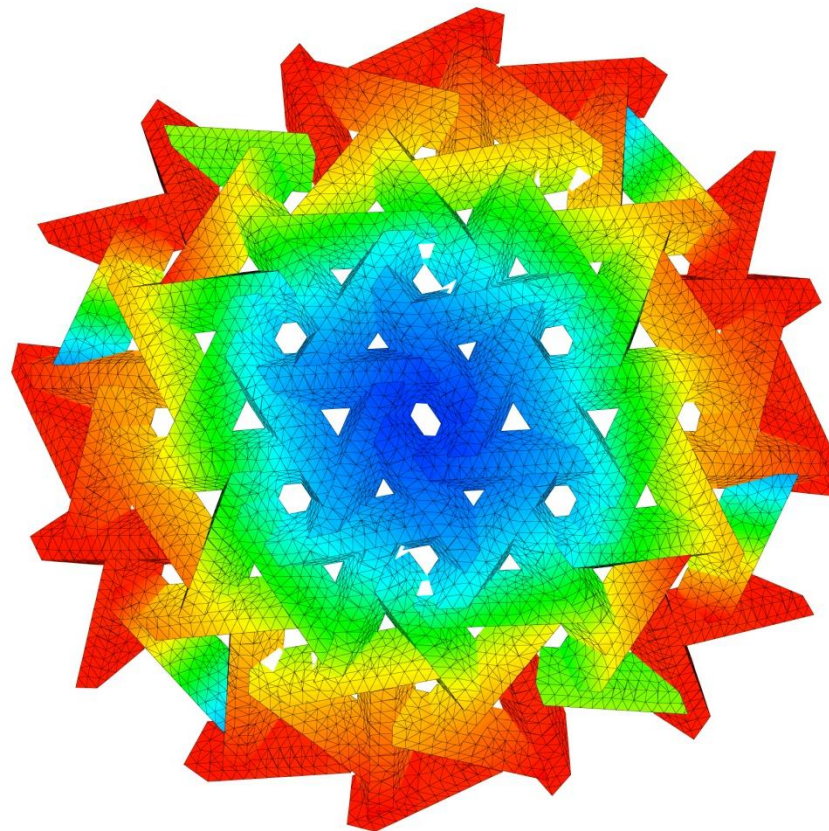
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

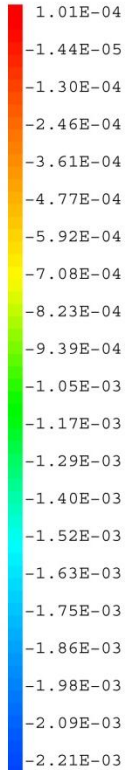
3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE

4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES



VAL - ISO
>-2.31E-03
< 1.20E-04



LA VOUTE SPHÉRIQUE: CALCULS MÉCANIQUES.

LA VOUTE OPTIMALE: LE GLISSEMENT CUMULATIF DANS LES JOINTS.

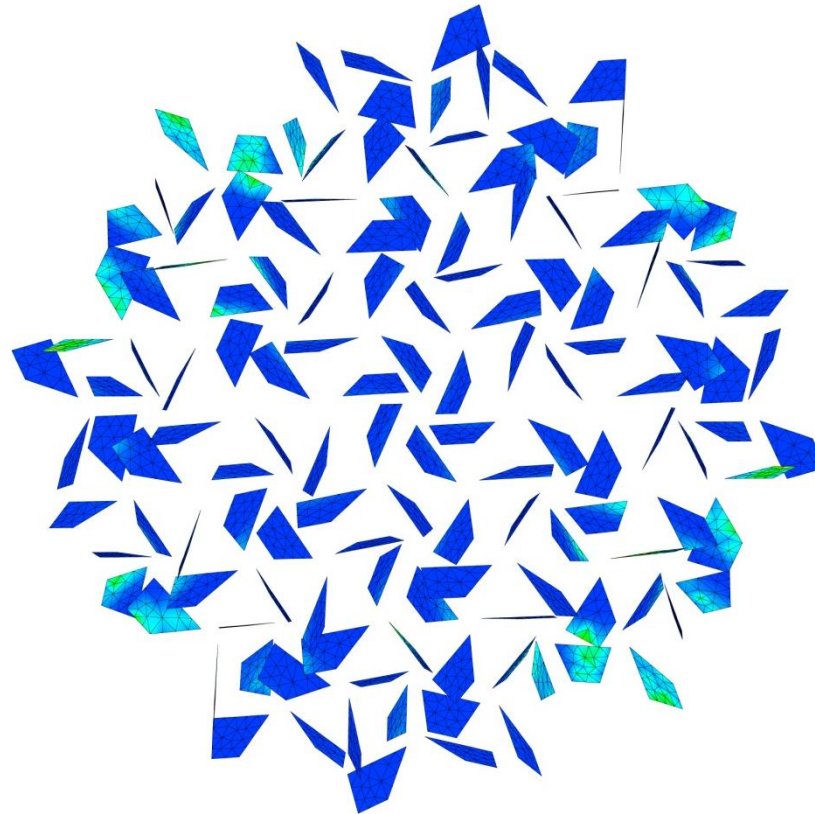
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

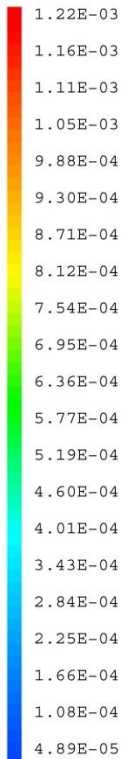
3. L'ORIGINE: LA VOUTE PLATE

4. LE DÉVELOPPEMENT: LA VOUTE SPHÉRIQUE

5. LA VOUTE SPHÉRIQUE: LES CALCULS MÉCANIQUES



VAL - 150
> 0.00E+00
< 1.23E-03



LA VOUTE SPHÉRIQUE: EXPÉRIMENTATIONS. LES GRANDS ATELIERS DE L'ISLE D'ABEAU

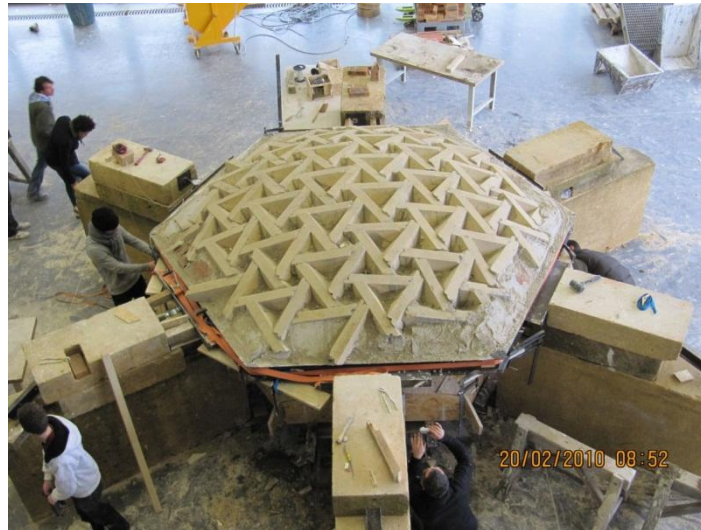
1. OBJECTIF

2. CADRE HISTORIQUE

3. L'ORIGINE: LA
VOUTE PLATE



4. LE
DÉVELOPPEMENT:
LA VOUTE
SPHÉRIQUE



5. LA VOUTE
SPHÉRIQUE: LES
CALCULS
MÉCANIQUES

MERCI POUR L'ATTENTION