



Laboratoire de
Biomécanique et
Modélisation Humaine

Thèse de doctorat



Laboratoire de
Mécanique des
Contact et des solides

Modélisation par éléments finis de la face humaine en vue de la simulation de sa réponse au choc

Barbara AUTUORI

16 Avril 2004

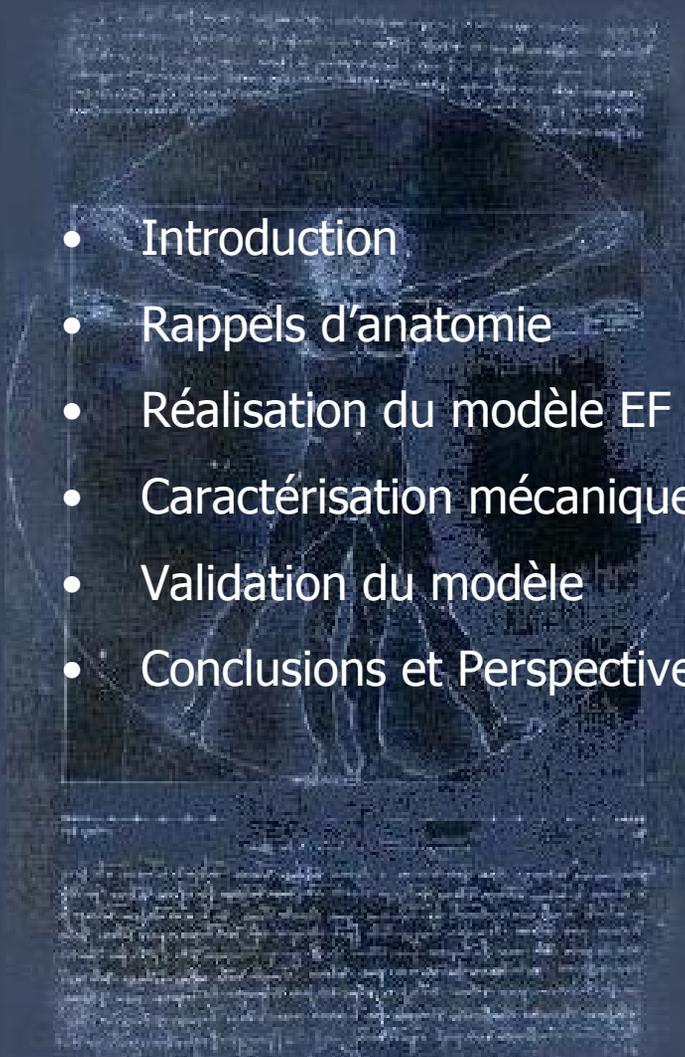
Directeurs:

Jean-Pierre VERRIEST (INRETS)

Michel BRUNET (INSA)



Plan de l'exposé

- 
- Introduction
 - Rappels d'anatomie
 - Réalisation du modèle EF
 - Caractérisation mécanique
 - Validation du modèle
 - Conclusions et Perspectives

Contexte

Introduction

- contexte

- objectif

- méthodologie

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

- **Epidémiologie**

Causes de lésions de la tête: les chutes, les rixes, les activités sportives et principalement les AVP

- ✓ Lésions de la tête: nombre important et lésions sévères
- ✓ Lésions de la face: nombre important et lésions mineures

→ Blessures à la face laissant des séquelles esthétiques invalidantes

- **Enjeu en sécurité des transports**

Nécessité de prédire les risques de blessures: critères

Contexte

Introduction

- contexte
- objectif
- méthodologie

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

Conclusion et perspectives

• Prédiction des risques de blessures

✓ Critère « tête » de la réglementation

Head Injury Criterion

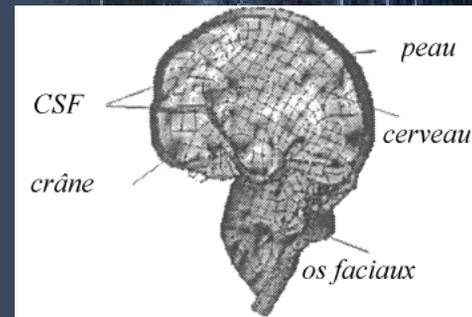
$$HIC = (t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right)^{2.5}$$



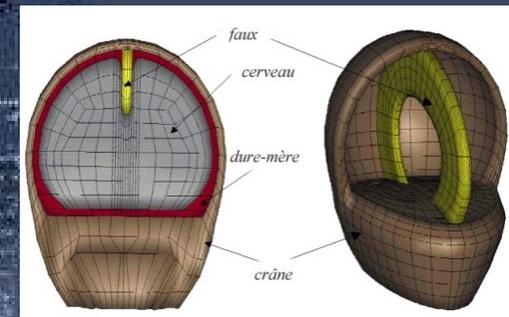
Contenu intra-crânien

✓ Critères utilisant une modélisation en éléments finis

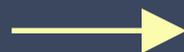
Fondés sur des paramètres locaux calculés



Modèle ULP



Modèle Simon



Face non représentée

Objectif

Introduction

- contexte
- *objectif*

- méthodologie

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

Conclusion et perspectives

Réalisation d'un modèle numérique de la face:

- prédire les risques de blessures de la face
- mieux prédire ceux du contenu intracrânien

Méthodologie

Introduction

- contexte
- objectif
- *méthodologie*

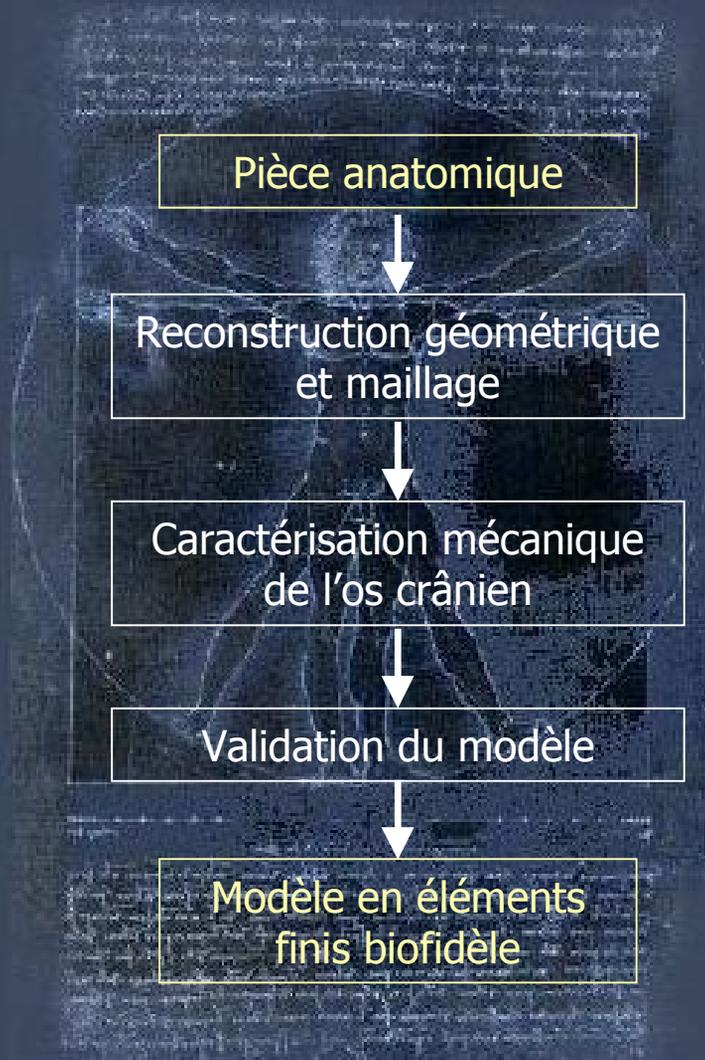
Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives



L'os crânien

Introduction

Rappels d'anatomie

- l'os crânien

- le crâne

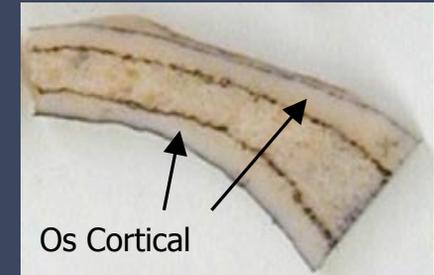
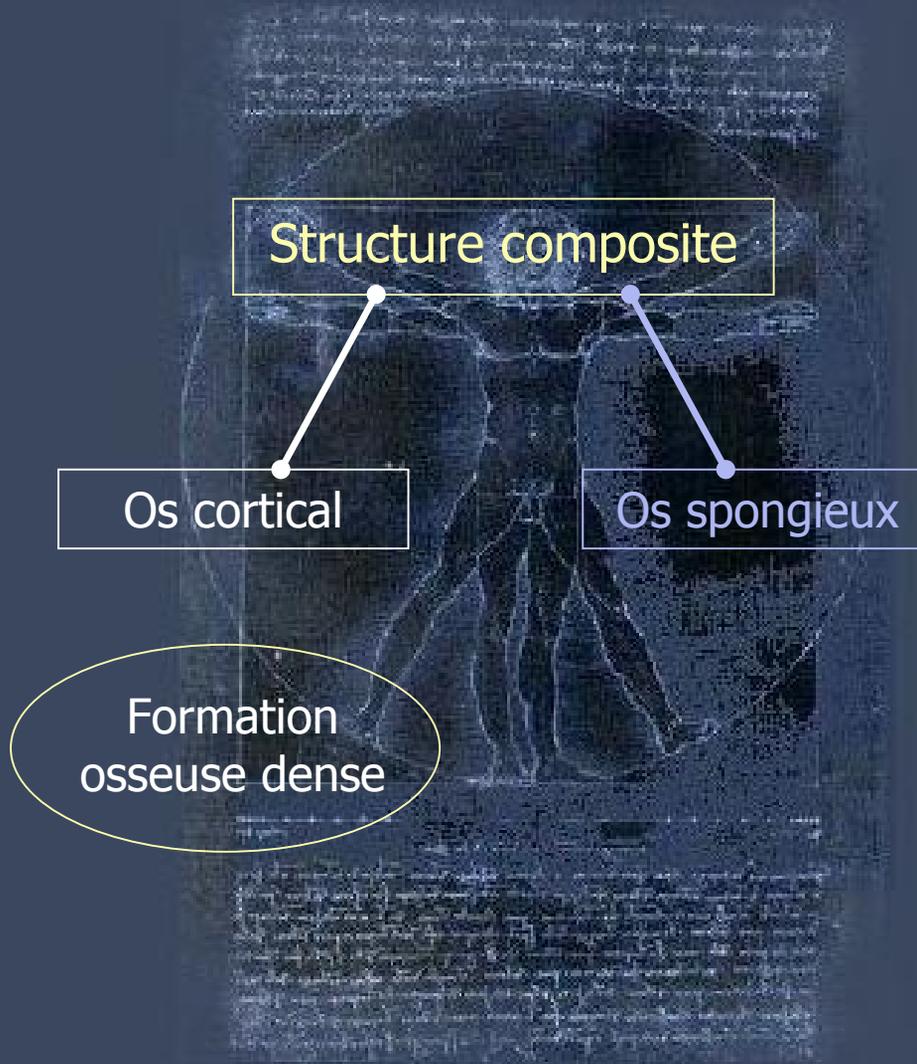
- la face

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives



L'os crânien

Introduction

Rappels d'anatomie

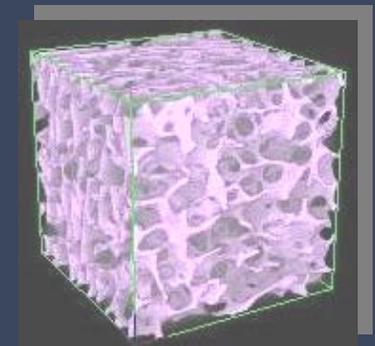
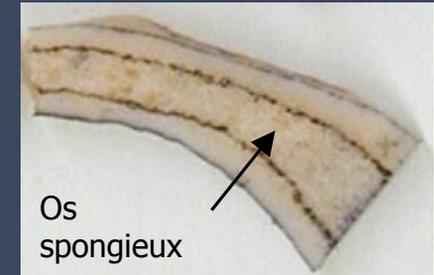
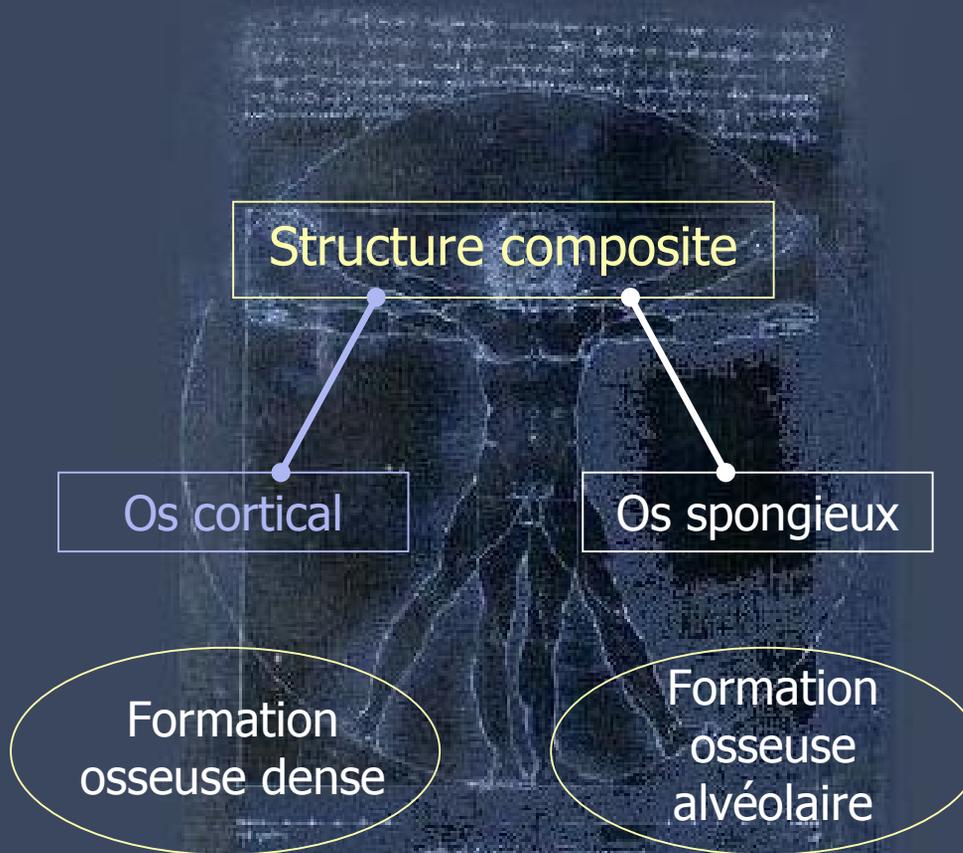
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives



Grande variabilité inter-site et
inter- individu

Le crâne

Introduction

Rappels d'anatomie

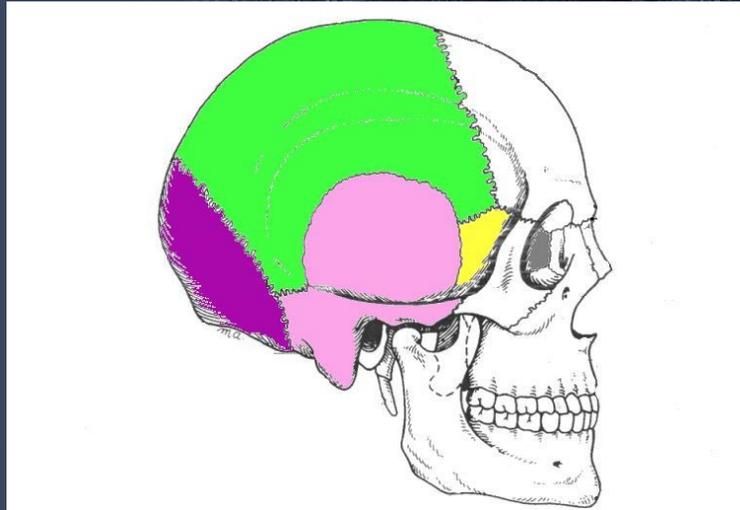
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives



- 8 os reliés par des sutures

Le crâne

Introduction

Rappels d'anatomie

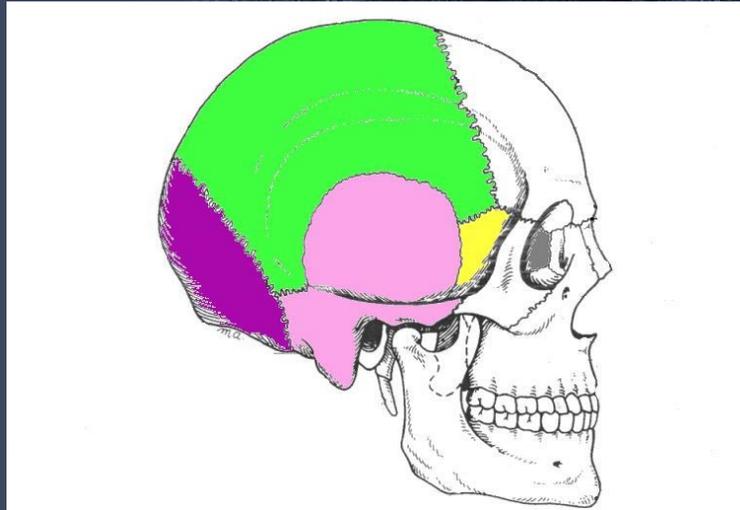
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

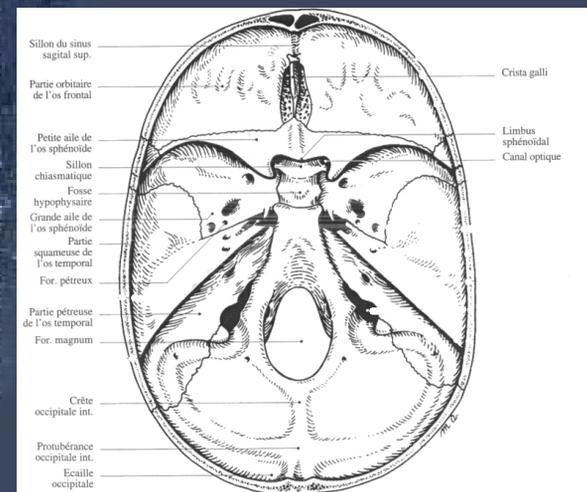
Conclusions et Perspectives



- 8 os reliés par des sutures

- Avec une structure intracrâniale complexe

Face interne de la base du crâne



Le crâne

Introduction

Rappels d'anatomie

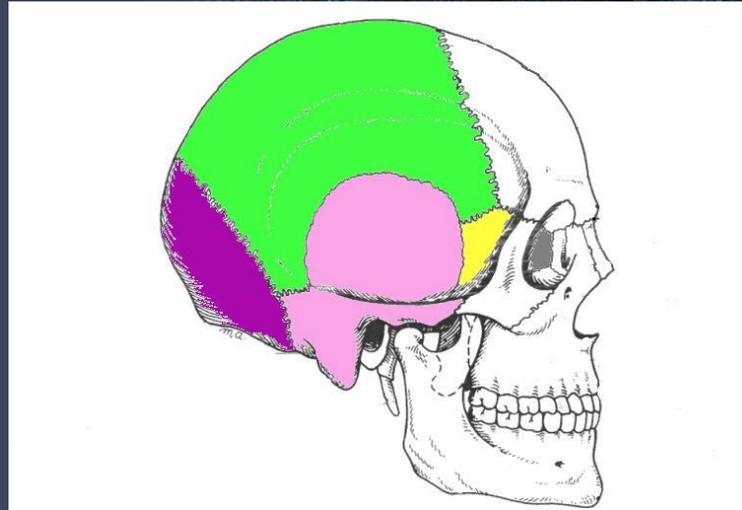
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives



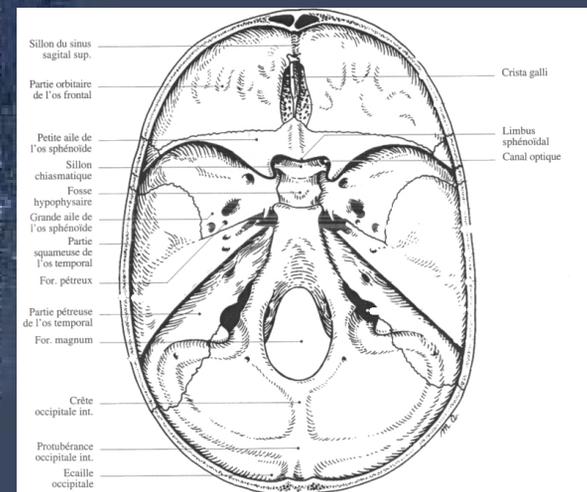
- 8 os reliés par des sutures

- Avec une structure intracrâniale complexe



Protection du contenu intra-crânien

Face interne de la base du crâne



La face

Introduction

Rappels d'anatomie

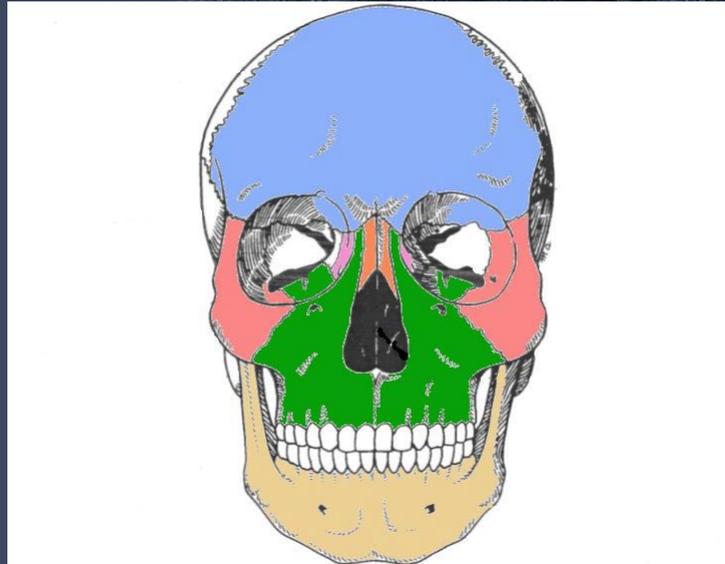
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives



- 14 os reliés
par des
sutures

La face

Introduction

Rappels d'anatomie

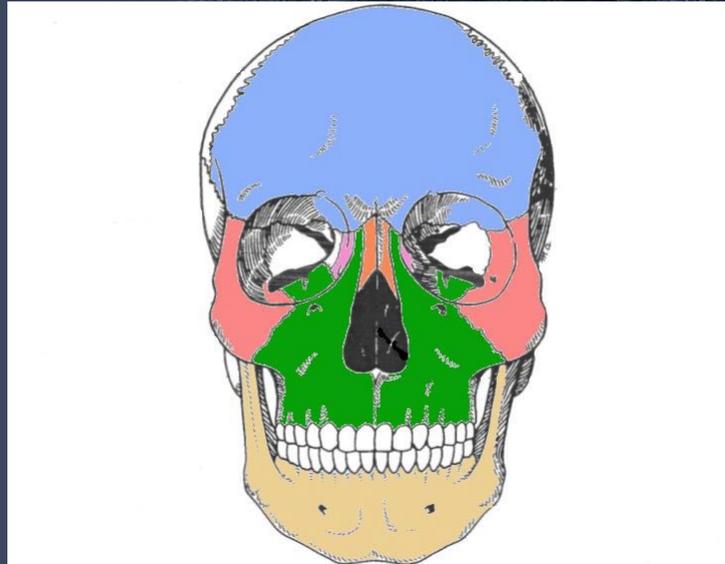
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

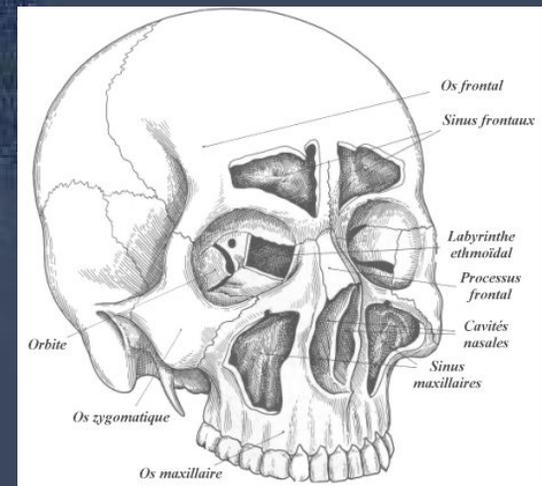
Validation du modèle

Conclusions et Perspectives



- 14 os reliés par des sutures

- Multiples cavités



La face

Introduction

Rappels d'anatomie

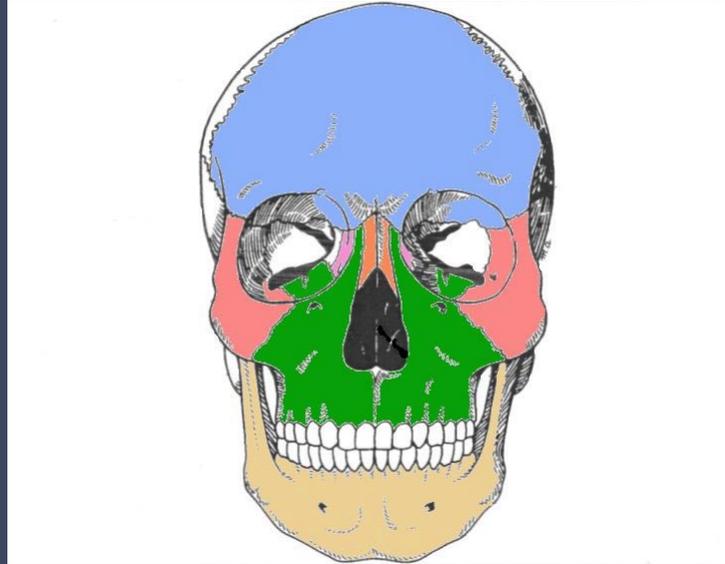
- l'os crânien
- le crâne
- la face

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

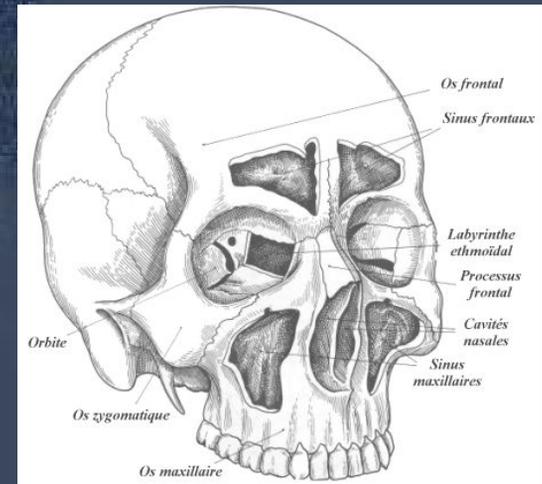
Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives



- 14 os reliés par des sutures

- Multiples cavités
- Et des renforts verticaux et horizontaux



Méthodologie

Introduction

Rappels d'anatomie

*Réalisation du
modèle EF*

- méthodologie

- géométrie

- maillage briques

- maillage plaques

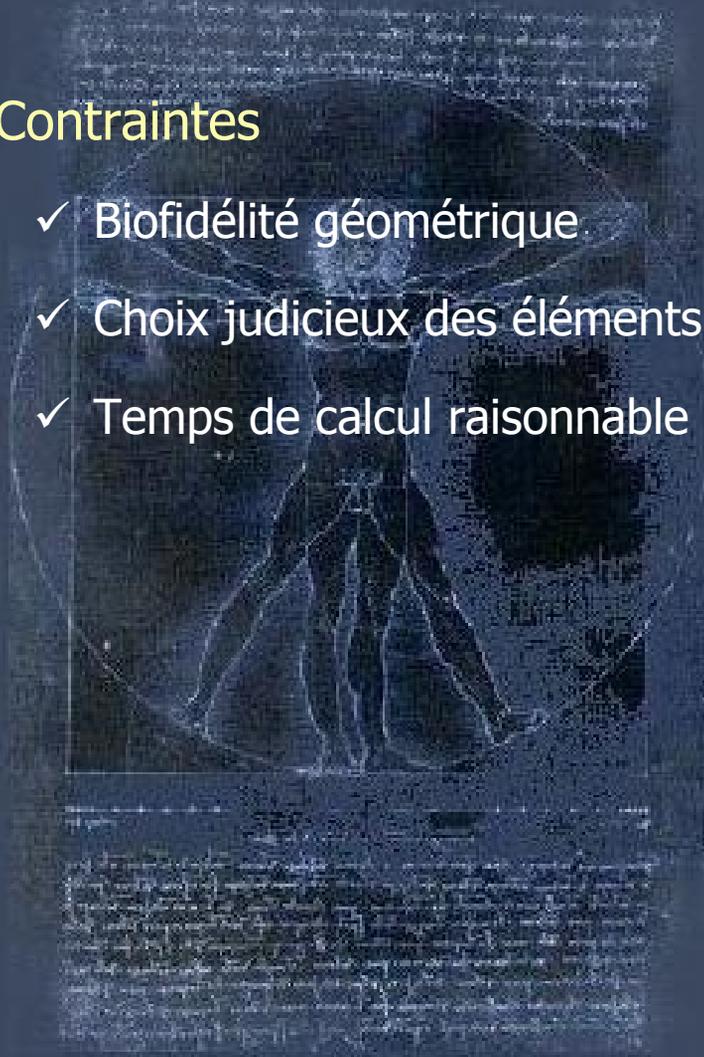
Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

- **Contraintes**

- ✓ Biofidélité géométrique
- ✓ Choix judicieux des éléments
- ✓ Temps de calcul raisonnable



Méthodologie

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

- méthodologie

- géométrie

- maillage briques

- maillage plaques

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

- **Contraintes**

- ✓ Biofidélité géométrique
- ✓ Choix judicieux des éléments
- ✓ Temps de calcul raisonnable

- **Solutions**

- ✓ Acquisition d'images scanner
- ✓ Maillage en éléments briques: méthode automatique
- ✓ Maillage en éléments plaques: optimisation du nombre d'éléments

Géométrie

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

- méthodologie
- géométrie
- maillage briques
- maillage plaques

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

• Acquisition

scanner



199 coupes
avec un pas
égal à 1 mm

• Traitement

seuillage



Pixels blancs:
Matériau osseux



Maillage en éléments briques

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

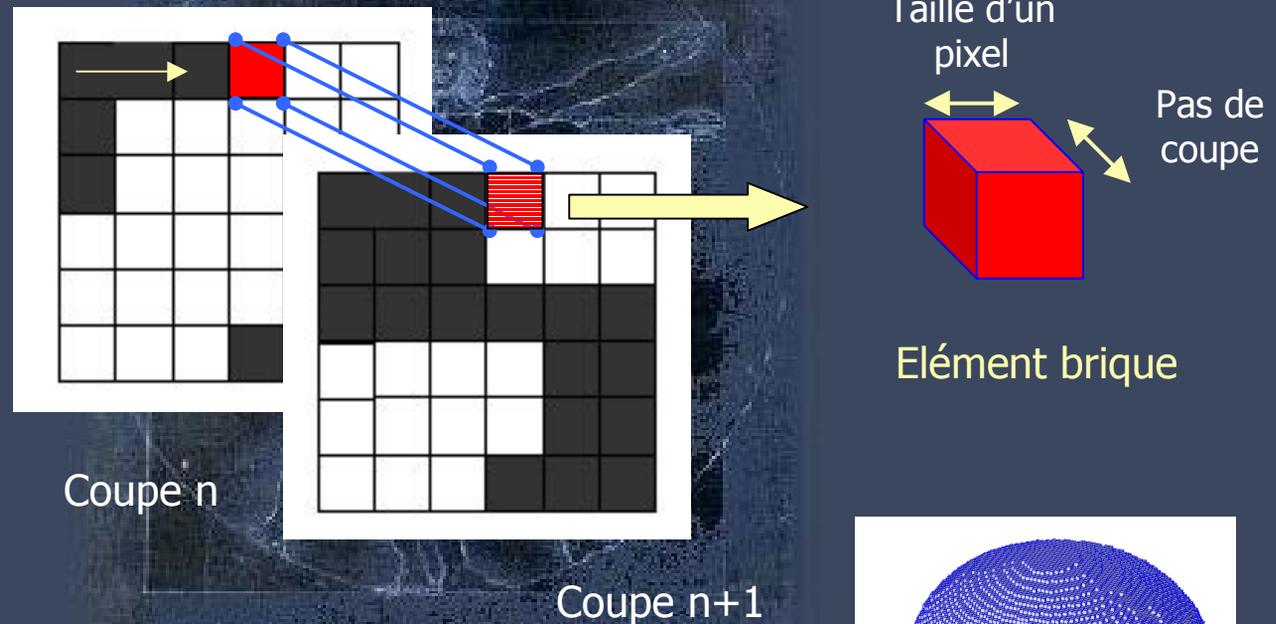
- méthodologie
- géométrie
- maillage briques
- maillage plaques

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

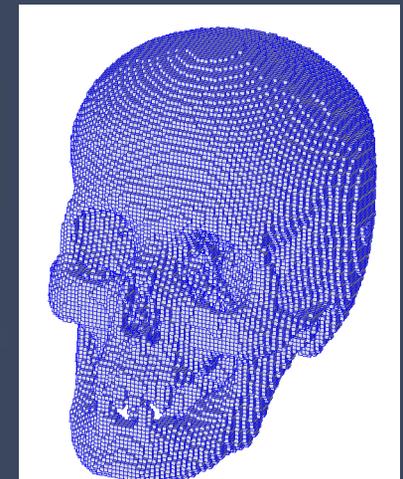
Conclusions et Perspectives

• Principe



• Résultat

72600 éléments de 2 mm de côté



Maillage en éléments plaques

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

- méthodologie
- géométrie
- maillage briques
- *maillage plaques*

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives

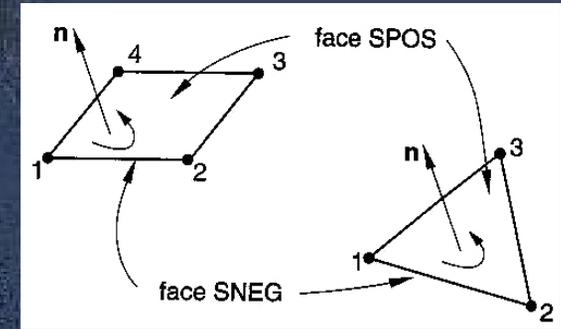
• Principe

Extraction du contour moyen

Reconstruction surfacique

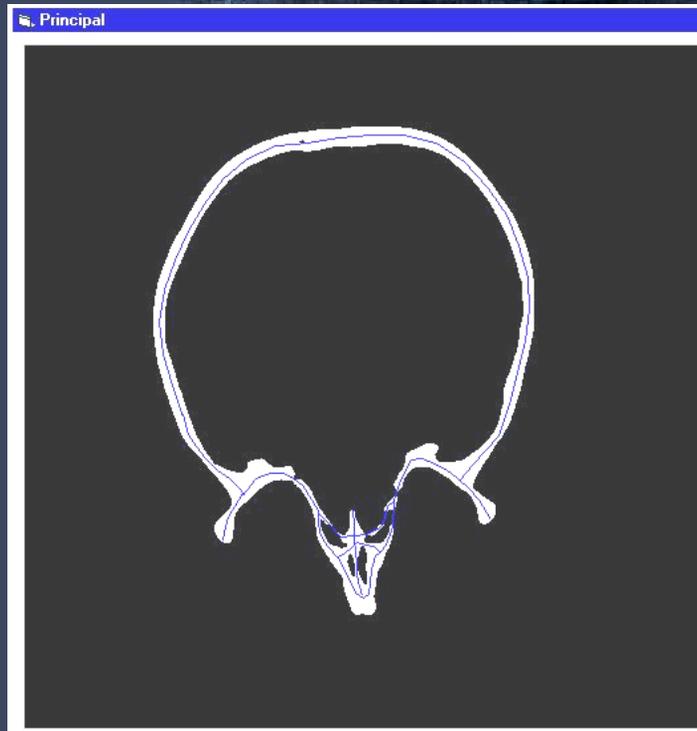
Maillage

Calcul de l'épaisseur



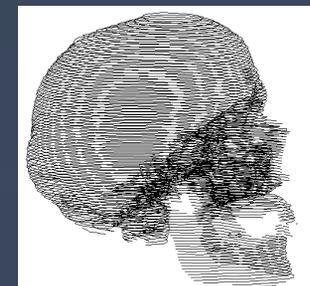
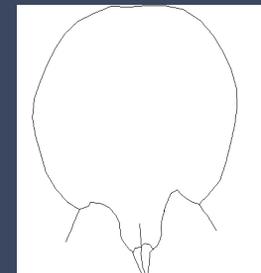
Maillage en éléments plaques

- Extraction des contours



2 étapes:

- ✓ Extraction automatique
- ✓ Extraction manuelle



Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

- méthodologie
- géométrie
- maillage briques
- *maillage plaques*

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

Maillage en éléments plaques

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

- méthodologie
- géométrie
- maillage briques
- *maillage plaques*

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives

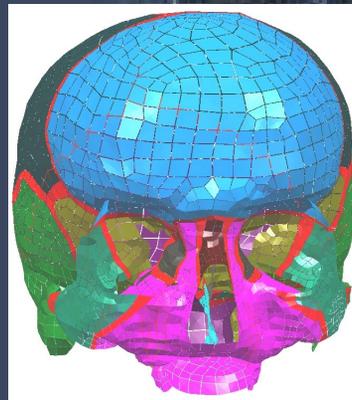
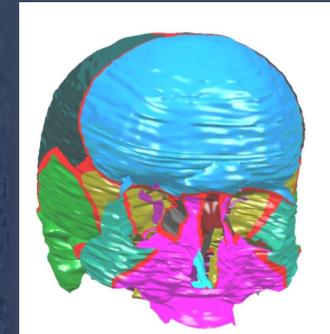
- **Reconstruction surfacique**

Catia V4

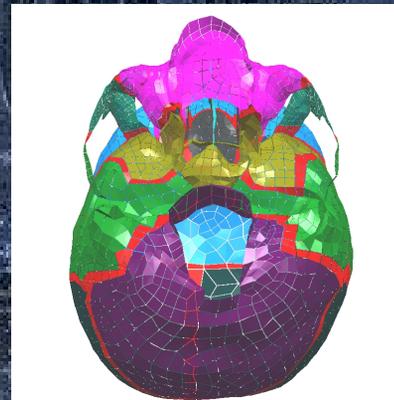
Intégration des sutures

- **Maillage**

Catia V4



Vue de face



Vue de dessous

Nombre: 4413
quadrangles et 270
triangles

Taille: de 1,5 mm² à
1,5 cm²

Qualité satisfaisante

Maillage en éléments plaques

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

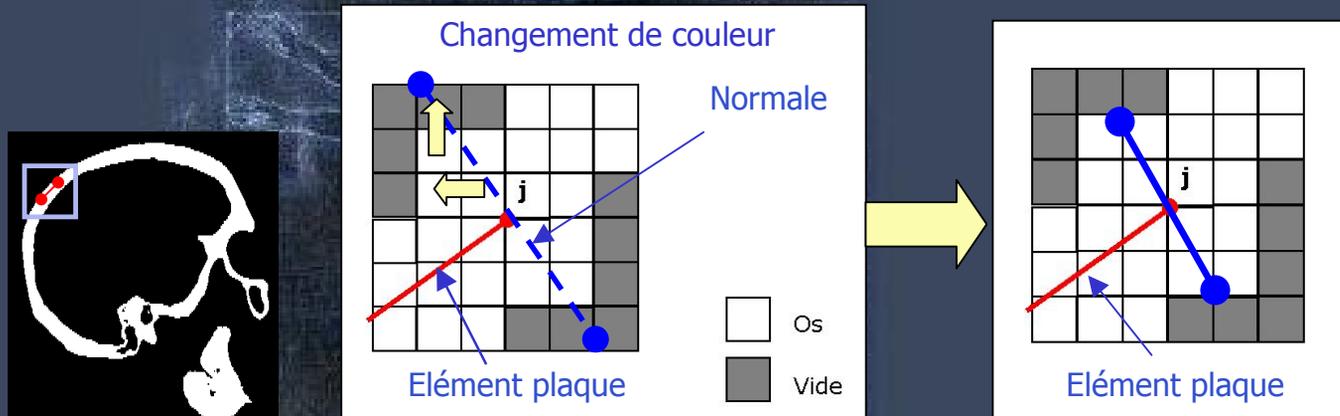
- méthodologie
- géométrie
- maillage briques
- maillage plaques

Caractérisation mécanique

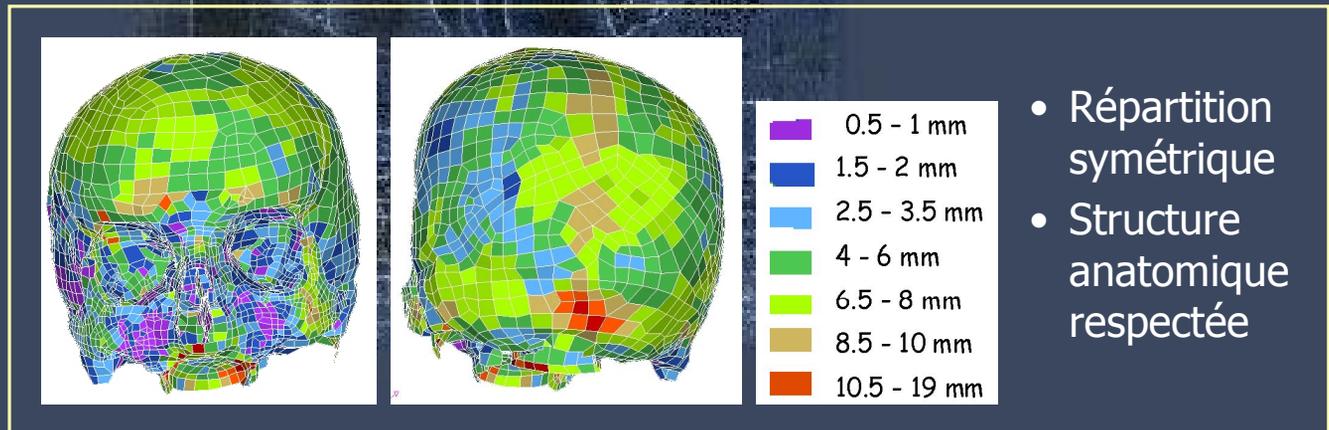
Validation du modèle

Conclusions et Perspectives

• Calcul de l'épaisseur



Schématisation 2D: vue perpendiculaire à l'élément



Objectifs

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

*Caractérisation
mécanique*

- *objectifs*

- matériel et méthode

- résultats

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

Caractérisation mécanique
de l'os crânien

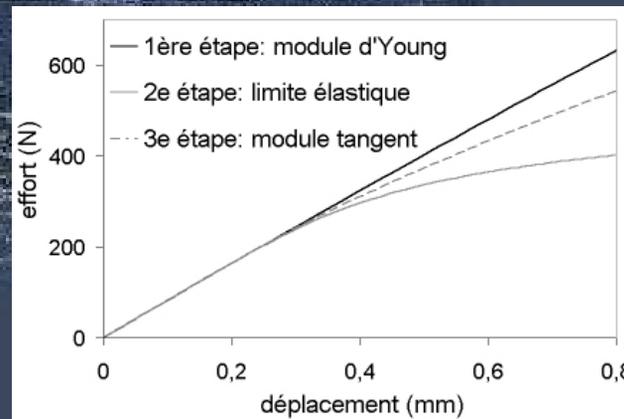
Hypothèses: matériau homogène,
isotrope, loi élastoplastique

Essais de
flexion

Simulation
numérique

Identification

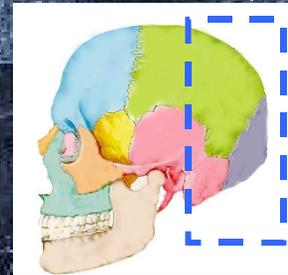
Module d'Young E , Limite élastique σ_e ,
Module tangent E'



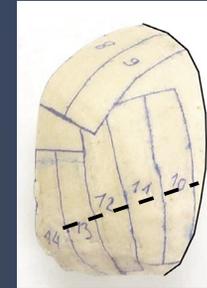
Matériel et méthode

- Expérimentation

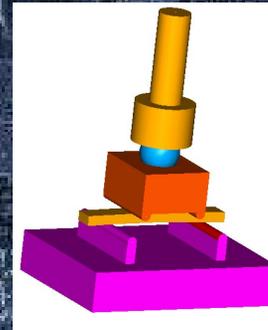
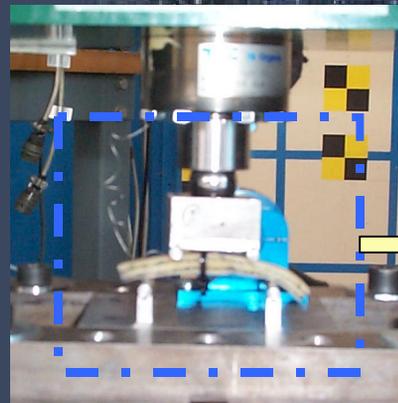
14 éprouvettes testées : os pariétal, occipital, temporal



Zone de prélèvement



Calotte arrière



Essais de flexion
4 points

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

- objectifs

- matériel et méthode

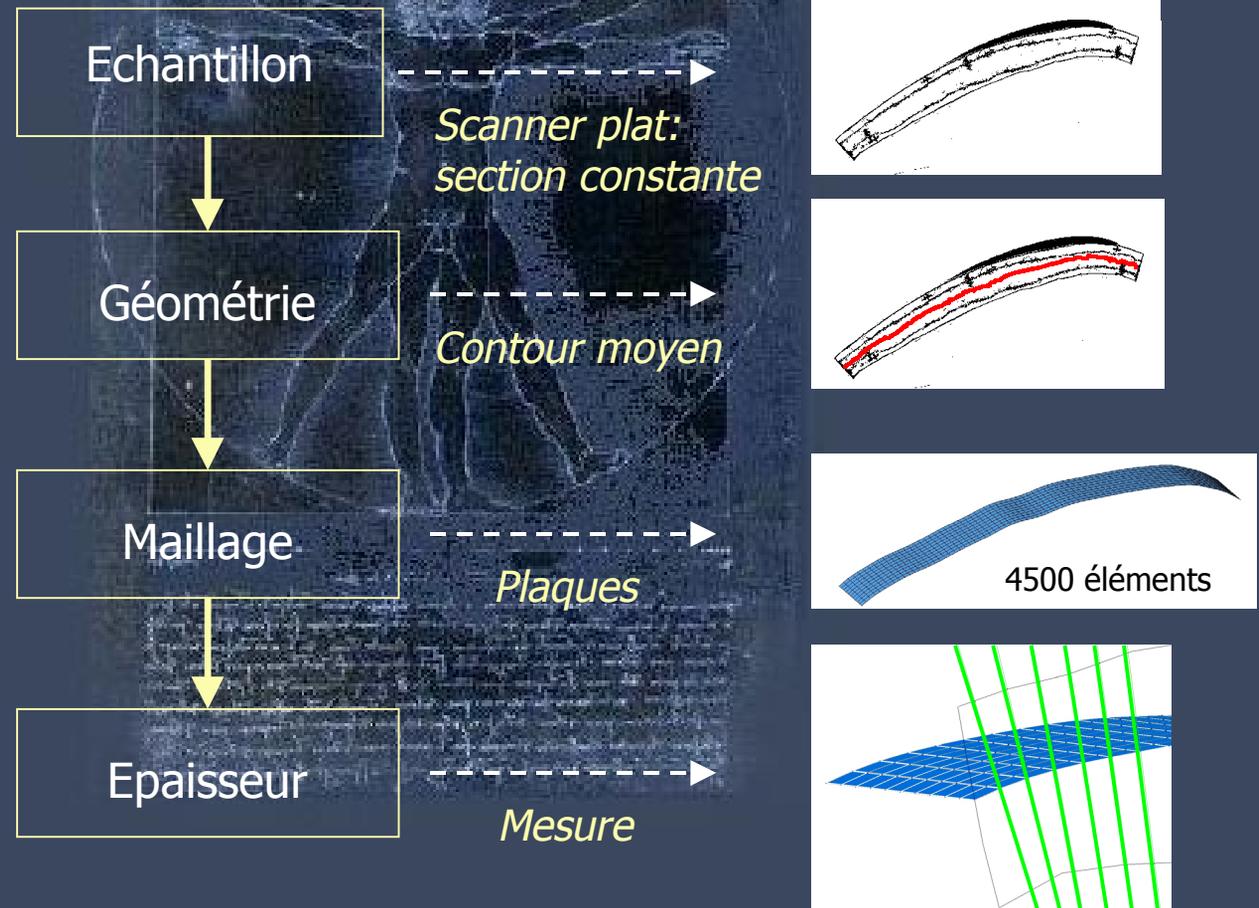
- résultats

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives

• Modélisation

5 échantillons: 3 avec suture



Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

*Caractérisation
mécanique*

- objectifs

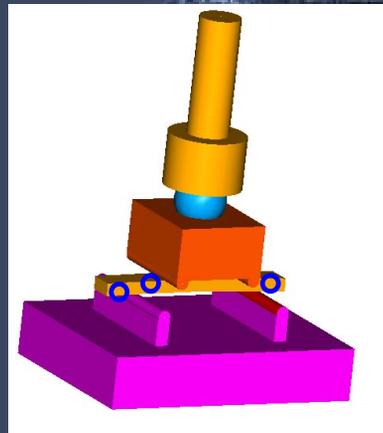
- *matériel et méthode*

- résultats

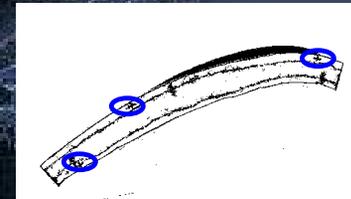
Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

- Simulation



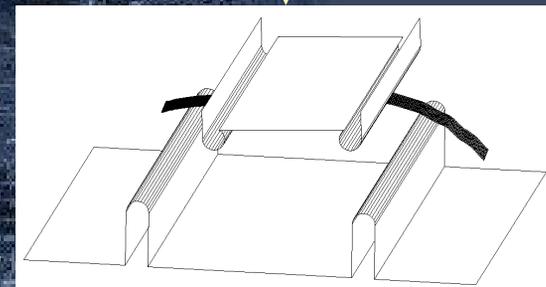
Repérage 3D lors
des essais



Repère de
transformation



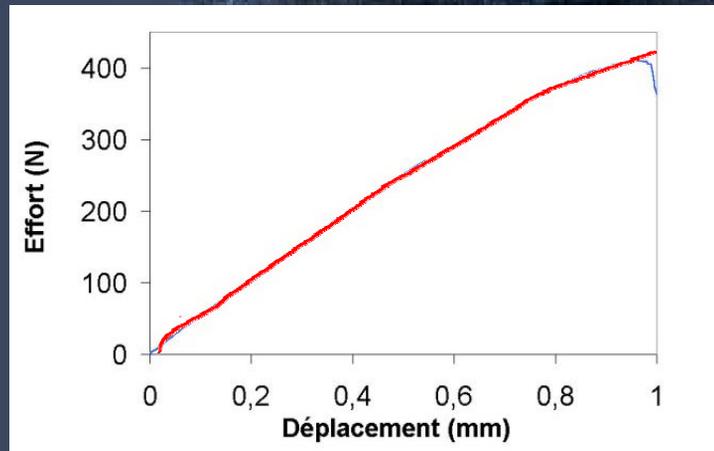
Repère de
simulation



Simulation code Abaqus: pilotage
en déplacement des pièces rigides

Résultats

- Caractéristiques mécaniques



Identification:
 $E=7065$ MPa,
 $\sigma_e=26$ MPa,
 $E'=3500$ MPa

	E (MPa)	σ_e (MPa)	E' (MPa)
Moyenne	3763	24	2725
Min-Max	2074 - 7065	20 - 30	2000 - 3500

- ✓ en accord avec les données bibliographiques *Delille (2002) McElhaney (1970)*
- ✓ influence de la proportion os cortical/ os spongieux

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives

Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

Validation du modèle

Conclusions et Perspectives

- Rupture

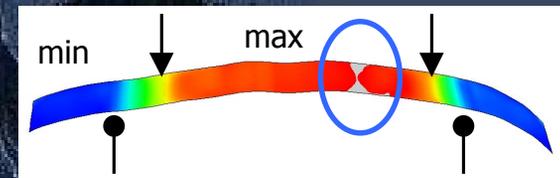
Coïncidence du lieu de rupture avec les contraintes maximales



4 éprouvettes sur 5



Eprouvette rompue



Distribution des contraintes

$\sigma_{\max} = 55 \text{ MPa}$,

$\epsilon_{\max} = 0.024$

	F_{\max} (N)	σ_{\max} (MPa)	ϵ_{\max}
Moyenne	632	39	0.02
Ecart type	331	10	0.0034

✓ déformations peu dispersées

✓ contrainte moyenne équivalente à la biblio
*McElhane*y

Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

*Caractérisation
mécanique*

- objectifs

- matériel et méthode

- *résultats*

Validation du
modèle

Conclusions et
Perspectives

- **Etude paramétrique**

Matériau osseux homogène, sans
suture, avec épaisseur réelle

Prédiction exacte :
4 sur 5

**Une modélisation plus détaillée pourrait-elle
modifier ce résultat ?**

Modélisation composite et différenciation des sutures :
même répartition des contraintes

Modélisation de la face: matériau
homogène, élastoplastique, avec
épaisseur variable, sans suture

Objectifs

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

*Validation du
modèle*

1 - Statique

- objectifs

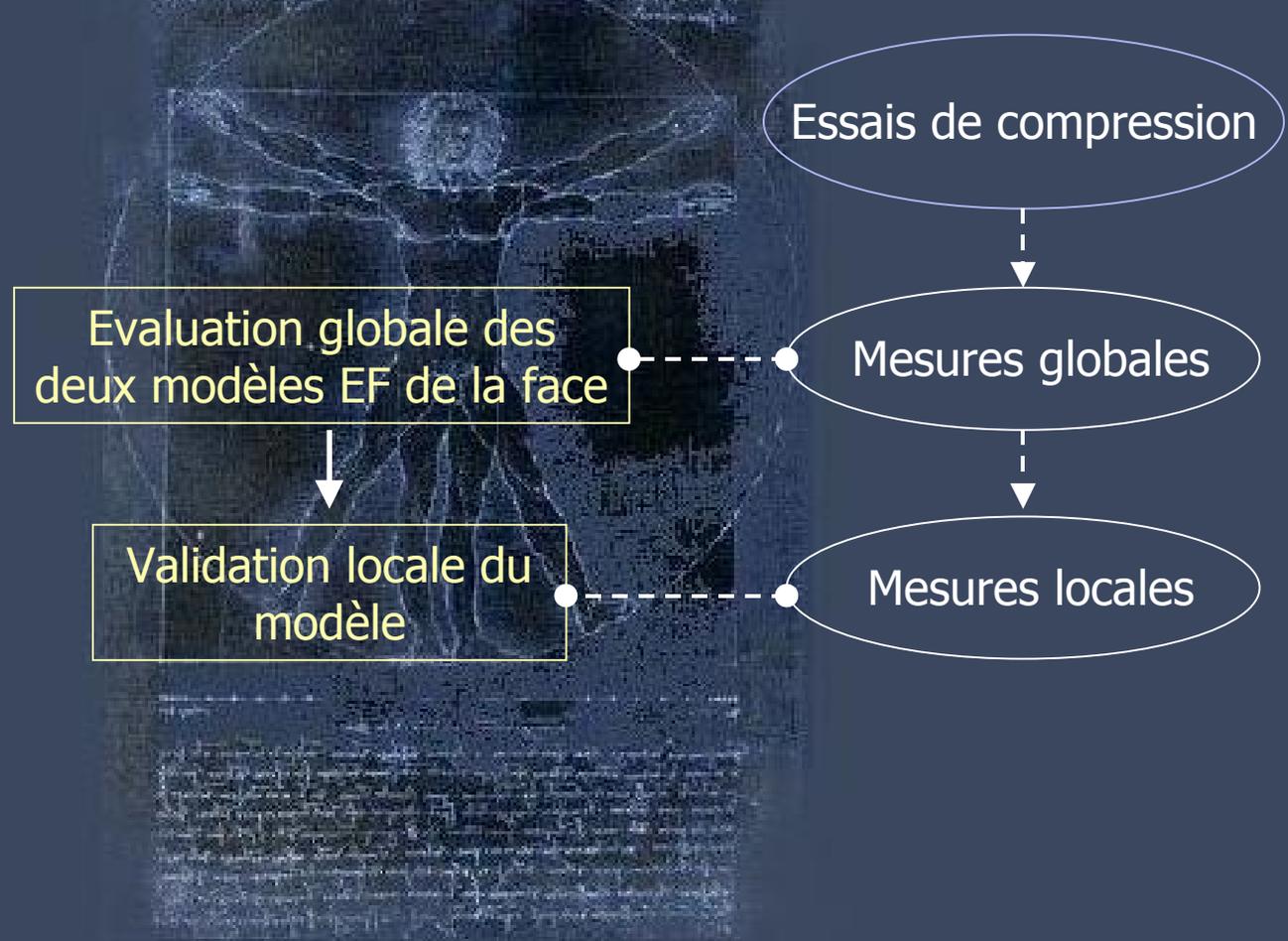
- matériel et méthode

- résultats

2 - Anatomique

3 - Dynamique

Conclusions et
Perspectives



Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

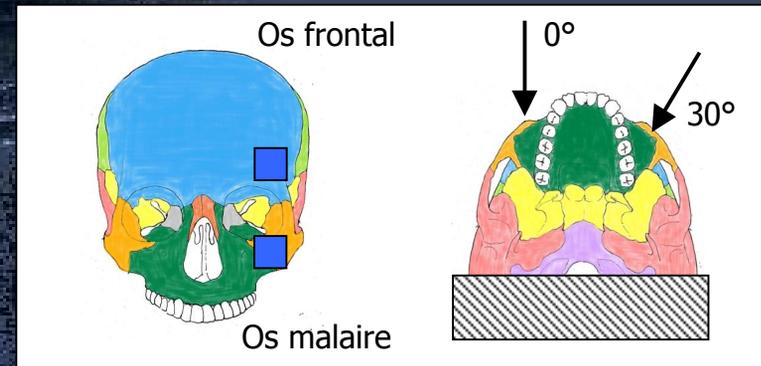
2 - Anatomique

3 - Dynamique

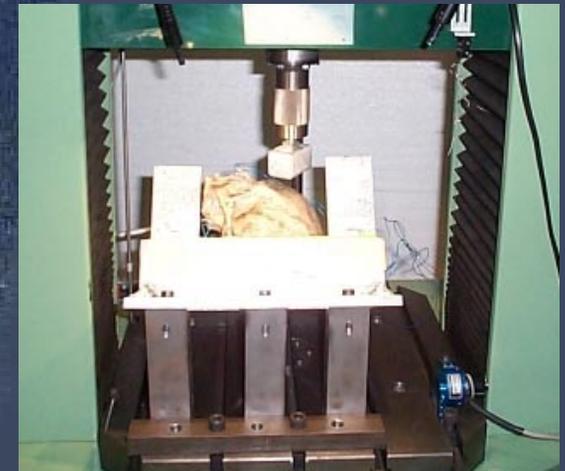
Conclusions et Perspectives

• Dispositif expérimental

2 pièces anatomiques:
H80 ans et F80 ans



Compression statique: 0.5 mm/min
Total de 9 essais avec et sans endommagement



Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

2 - Anatomique

3 - Dynamique

Conclusions et Perspectives

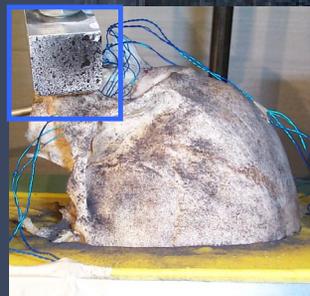
• Mesures

Mesures globales

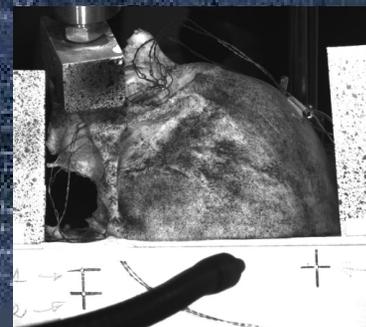
+

Mesures locales

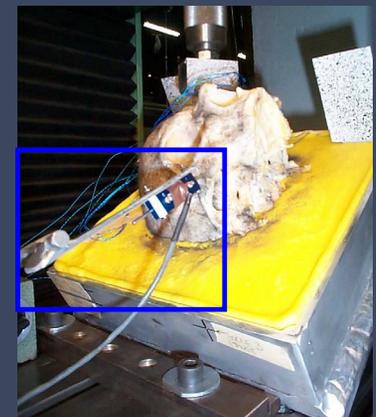
Effort et déplacement



Champs de déplacement 2D par corrélation d'images: dépôt d'un mouchetis



Capteur de déplacement à tige



Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

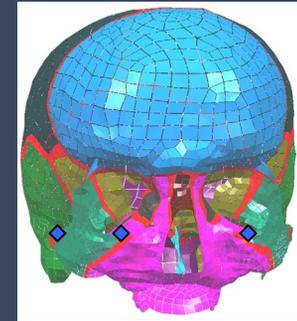
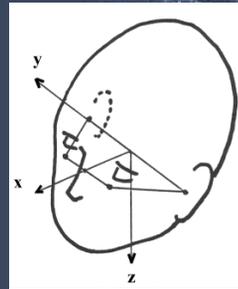
2 - Anatomique

3 - Dynamique

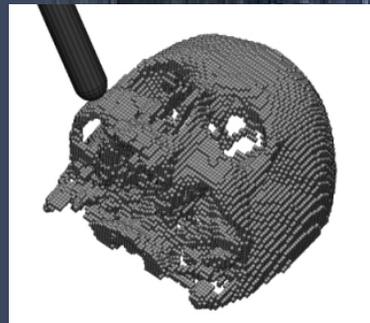
Conclusions et Perspectives

• Simulation

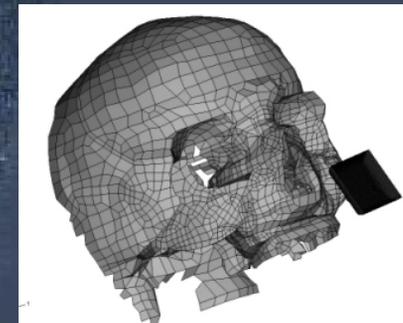
✓ Localisation des conditions aux limites: repérage 3D



✓ Simulation numérique: code Abaqus



Modèle briques: 32000 éléments



Modèle plaques: 3600 éléments

Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1 - Statique

- objectifs

- matériel et méthode

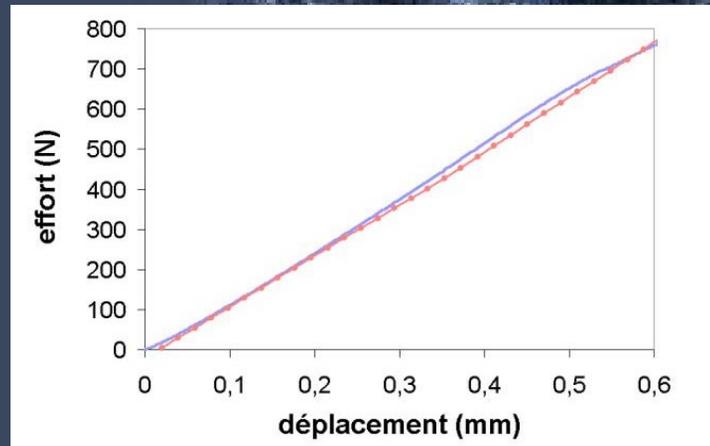
- résultats

2 - Anatomique

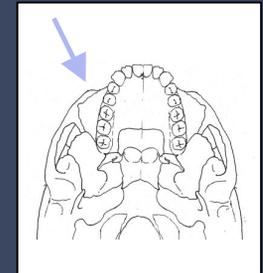
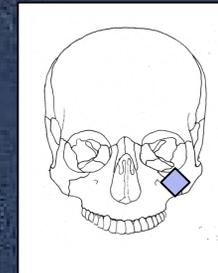
3 - Dynamique

Conclusions et Perspectives

- Identification et évaluation: domaine élastique



H80 ans



- Modèle briques

Orientation 30°: $E=5960\text{MPa}$

Orientation 0° $E=3205\text{MPa}$

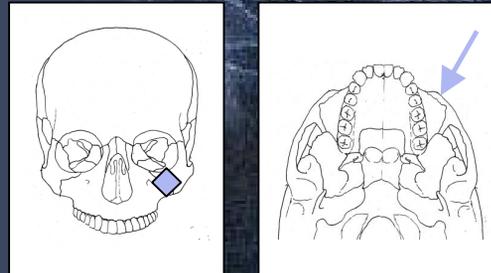
- Modèle plaques

Orientation 30° $E=4300\text{MPa}$

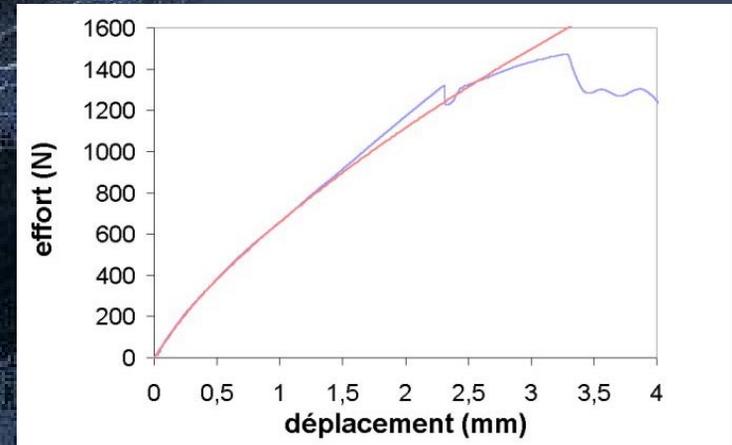
Orientation 0° $E=4300\text{MPa}$

Résultats

- Modèle plaques: identification élastoplastique

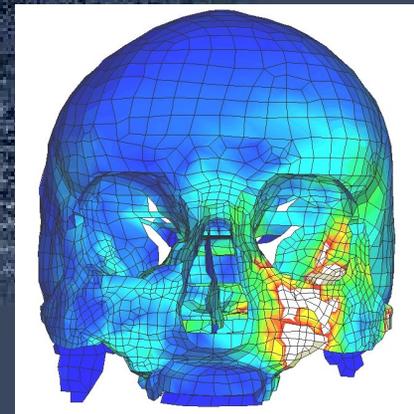


F80 ans



Identification:

$E=1600$ MPa, $\sigma_e=5$ MPa,
 $E'=1400$ MPa



Distribution des
contraintes de Von
Mises

$\sigma_{\max}=35$ MPa

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

1- Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

2 - Anatomique

3 - Dynamique

Conclusions et
Perspectives

Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

1 - Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

2 - Anatomique

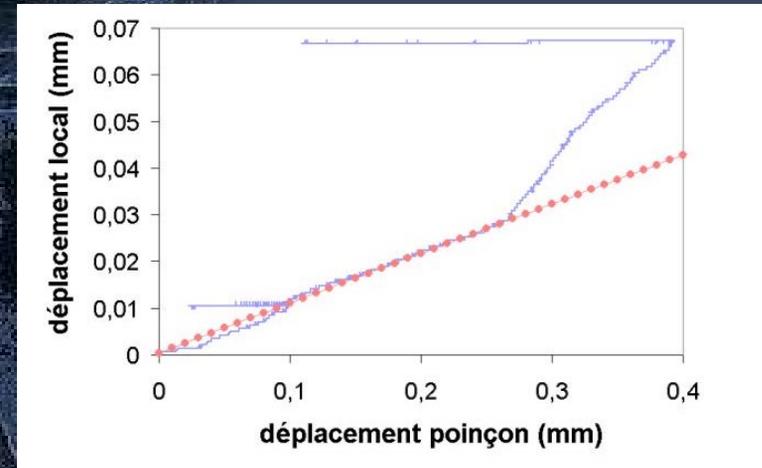
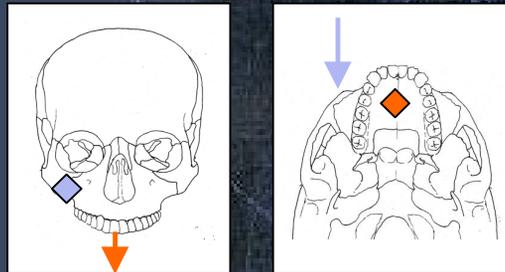
3 - Dynamique

Conclusions et
Perspectives

• Validation du modèle plaques

Validation locale:
capteur à tige

Propriétés mécaniques calibrées



Bonne correspondance sur la partie exploitable de la
mesure

Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1 - Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

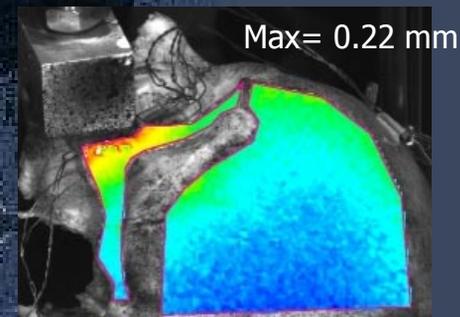
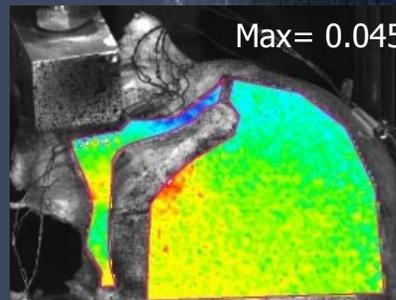
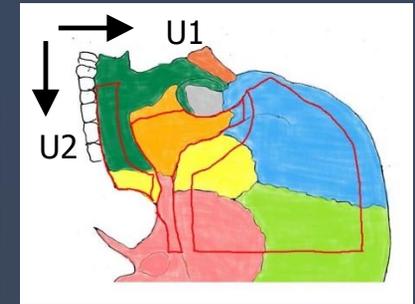
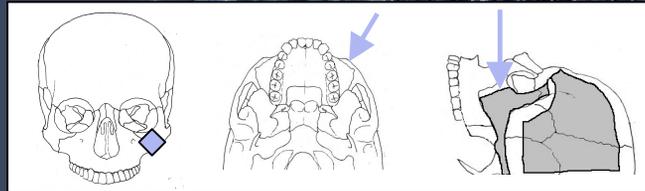
2 - Anatomique

3 - Dynamique

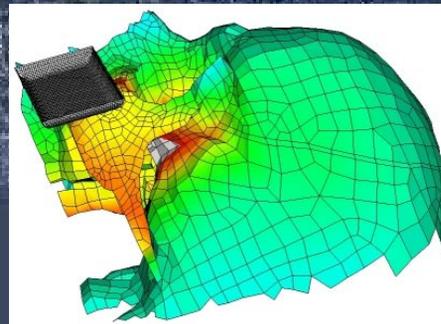
Conclusions et Perspectives

• Validation du modèle plaques

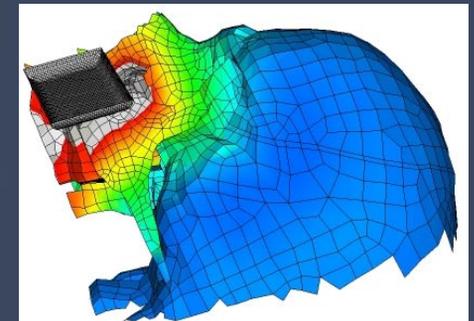
Champs de déplacement: qualitatif



→ U1



↓ U2



Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

- objectifs

- matériel et méthode

- résultats

2 - Anatomique

3 - Dynamique

Conclusions et Perspectives

• Validation du modèle plaques

Champs de déplacement: quantitatif

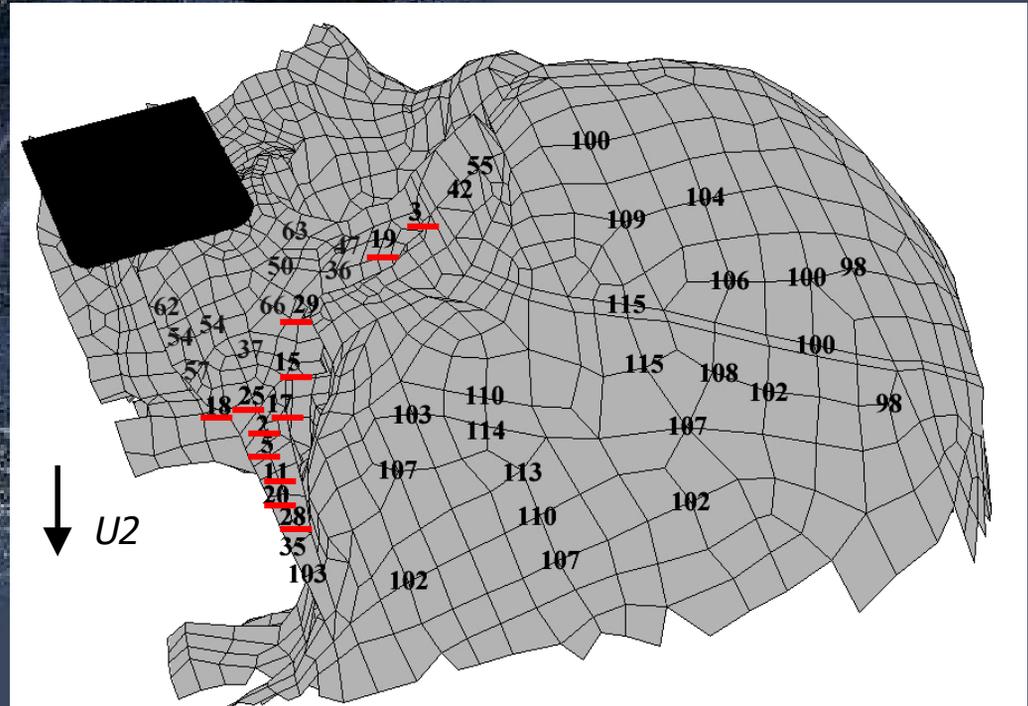
$$e_r = \frac{U_{\text{exp}} - U_{\text{sim}}}{U_{\text{exp}}}$$

Erreur relative entre les déplacements mesurés et calculés

Erreur relative

- ✓ Direction U1: déplacements trop petits
- ✓ Direction U2: bons résultats localement

— Erreur relative < 30%



Objectif et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

*Validation du
modèle*

1- Statique

2- Anatomique

- *objectif et méthode*

- *résultats*

3- Dynamique

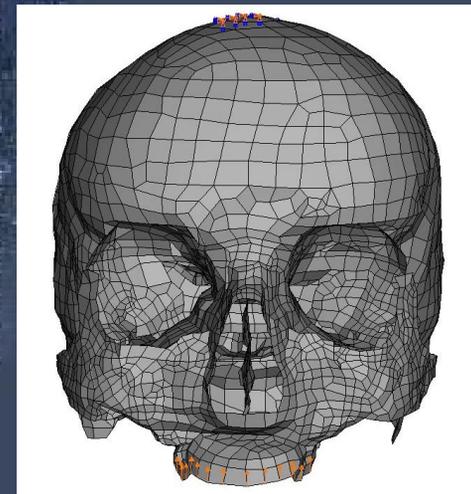
Conclusions et
Perspectives

Validation architecturale du
modèle plaques



Systématisation
biomécanique de la
face

Sollicitation numérique
reproduisant la
mastication



Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

1- Statique

2- Anatomique

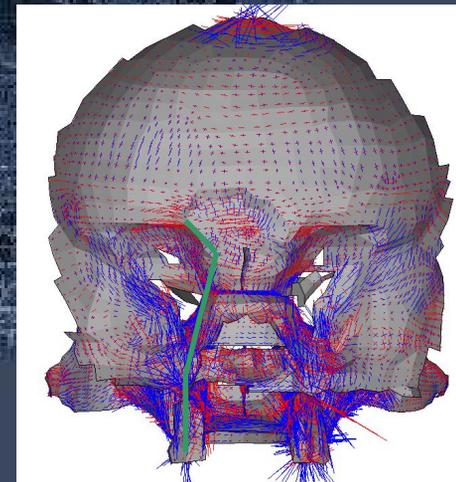
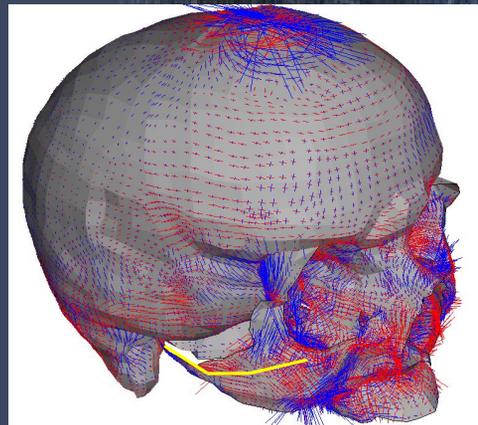
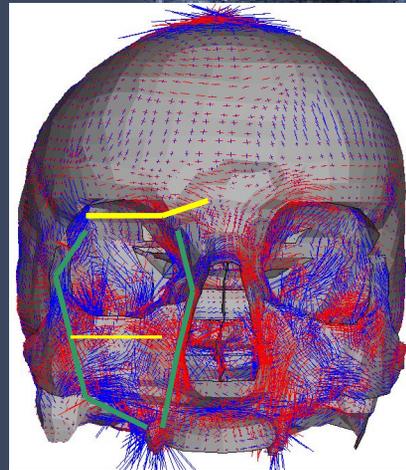
- objectif et méthode

- résultats

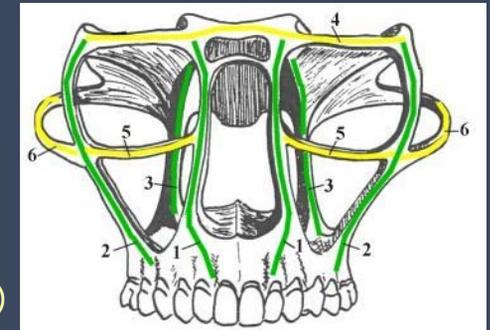
3- Dynamique

Conclusions et
Perspectives

Directions des contraintes principales



Ferré
(selon Deffez)



Systématisation
biomécanique: renforts

Vue
interne de
la face

Objectif

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

*Validation du
modèle*

1- Statique

2- Anatomique

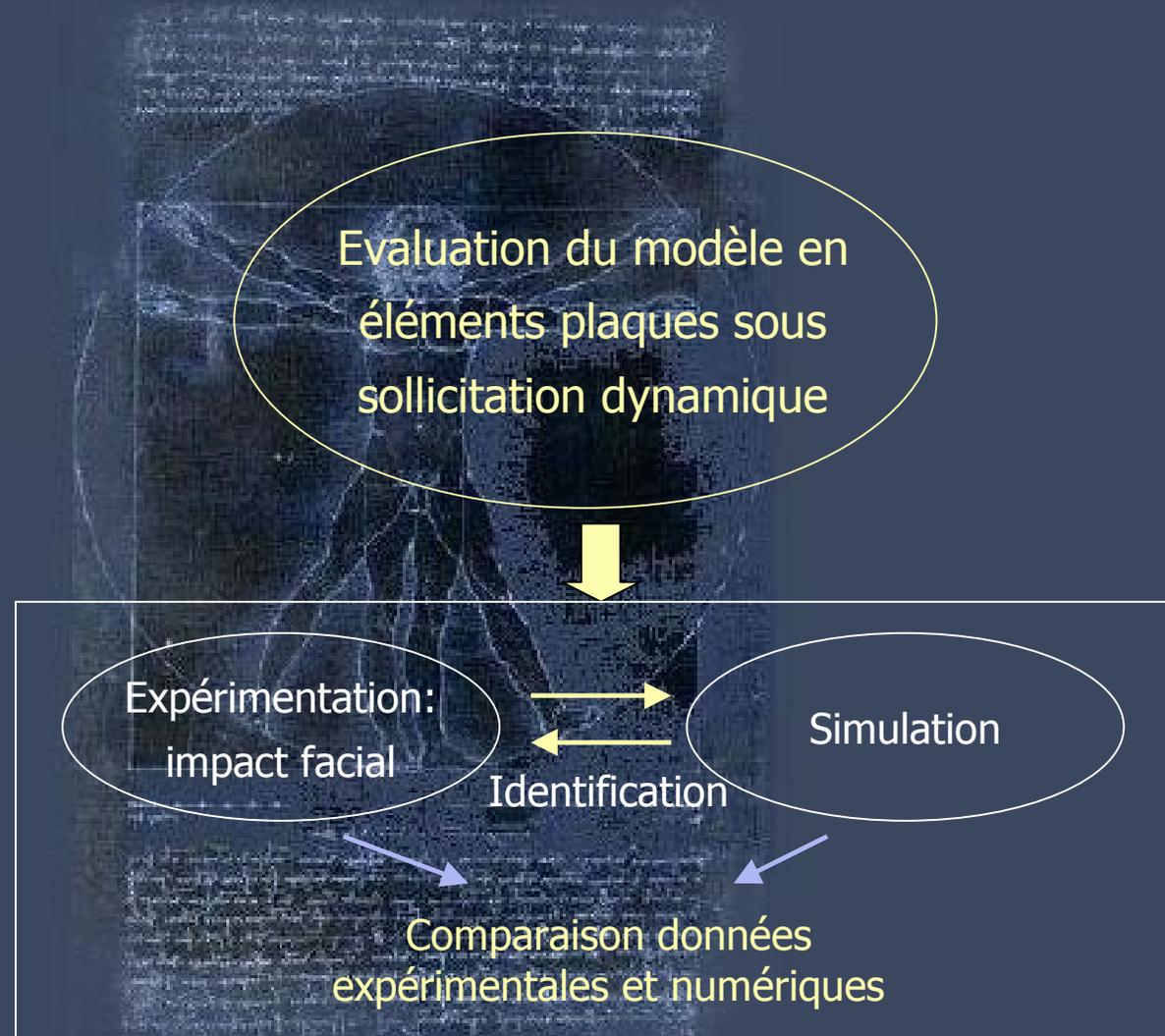
3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

- résultats

Conclusions et
Perspectives



Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

2- Anatomique

3 - Dynamique

- objectif

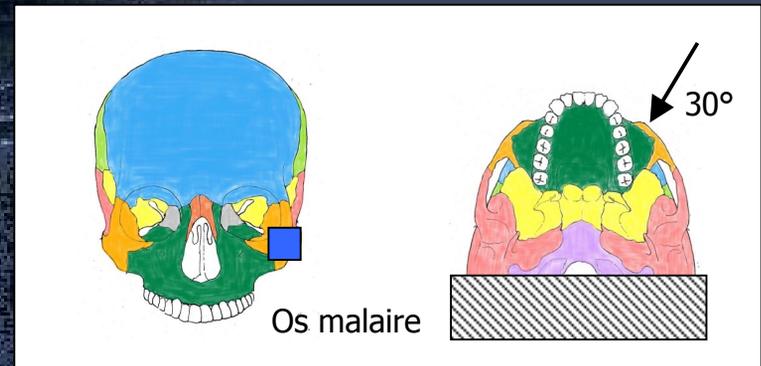
- matériel et méthode

- résultats

Conclusions et Perspectives

- **Dispositif expérimental**

pièce anatomique:
H82 ans



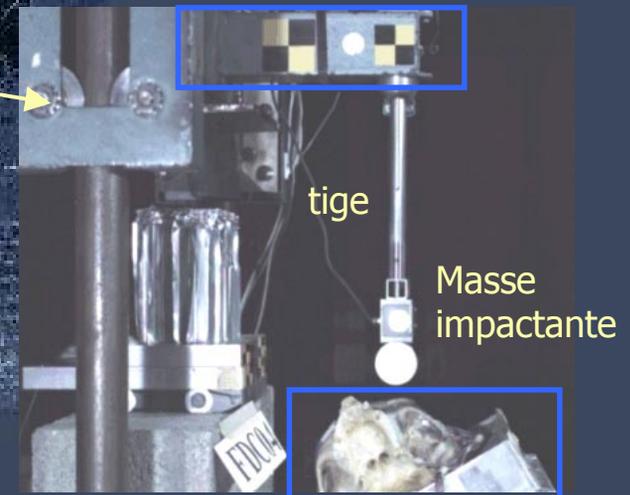
Chariot guidé

Impact: vitesse = 3m/s

1 essai infra-lésionnel: m=750 g

1 essai lésionnel: m=1,17 kg

Mesures: accélération et déplacement



Matériel et méthode

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

*Validation du
modèle*

1- Statique

2- Anatomique

3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

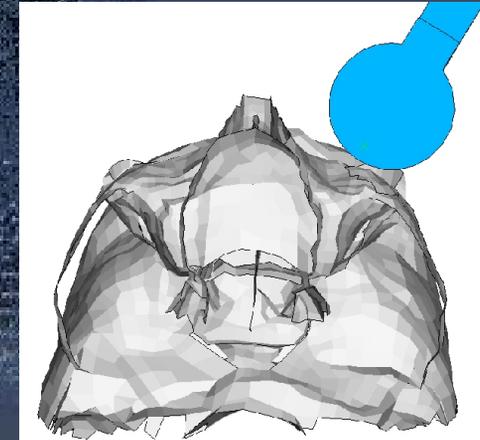
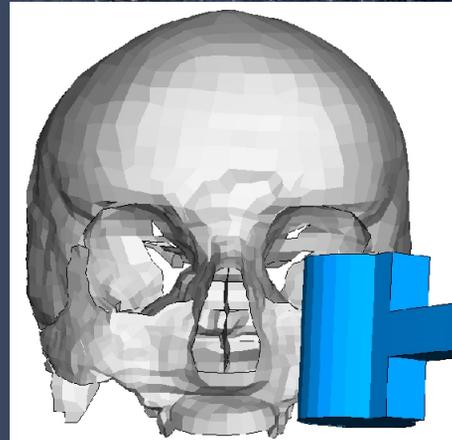
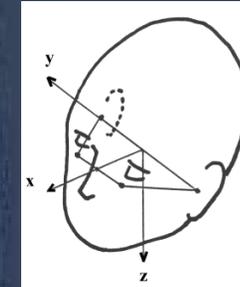
- résultats

Conclusions et
Perspectives

- **Simulation**

Localisation des
conditions limites

Calcul: Abaqus explicite



Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

2- Anatomique

3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

- résultats

Conclusions et Perspectives

• Expérimentations

Essai lésionnel

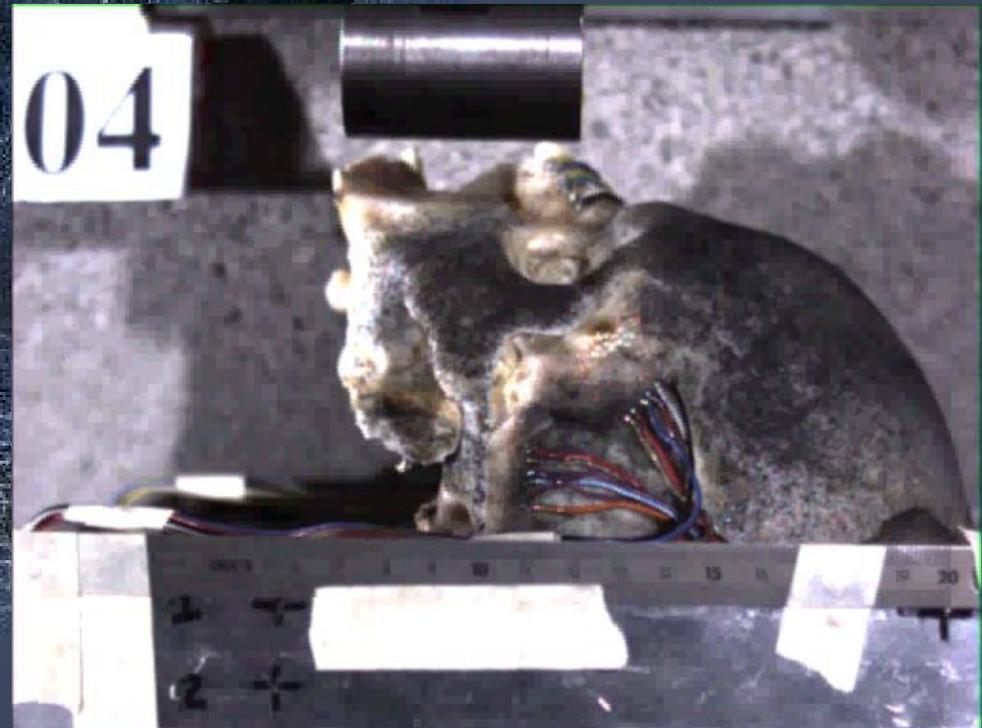
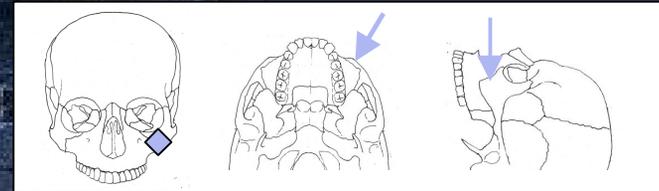
Vitesse = 3m/s

Masse = 1,17 kg

Effort à rupture:

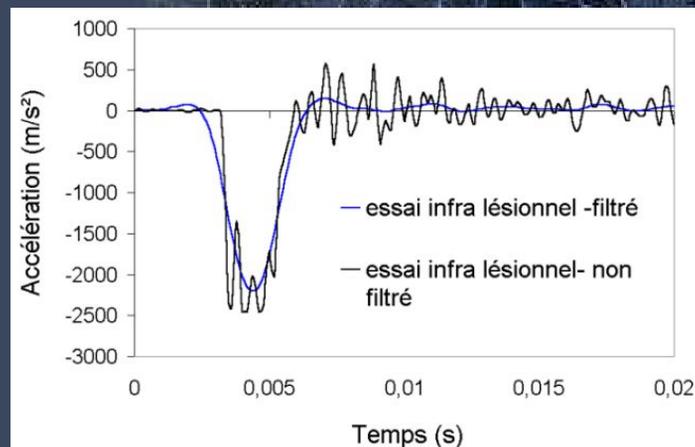
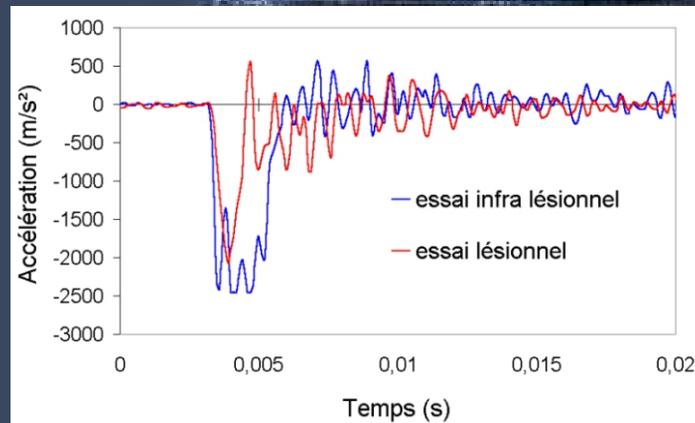
1650 N

**Similaire à
Yoganadan 1988**



Résultats

- Données expérimentales



Vibrations



Essai lésionnel non exploitable dans le domaine temporel



Filtrage essai infra-lésionnel 180 Hz

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

2- Anatomique

3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

- résultats

Conclusions et Perspectives

Résultats

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

*Validation du
modèle*

1- Statique

2- Anatomique

3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

- résultats

Conclusions et
Perspectives

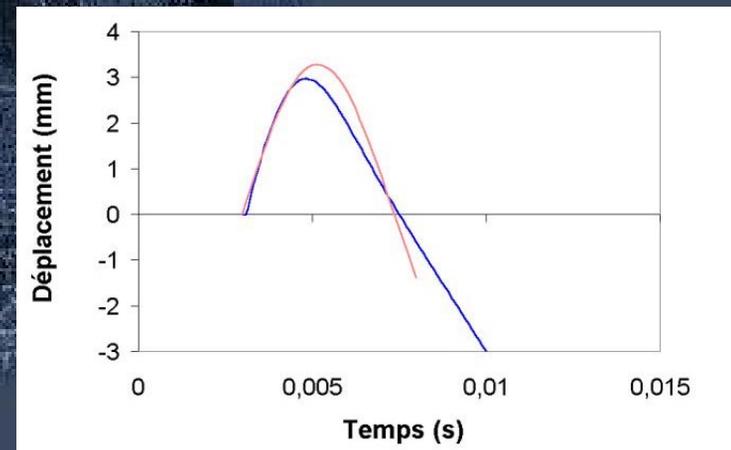
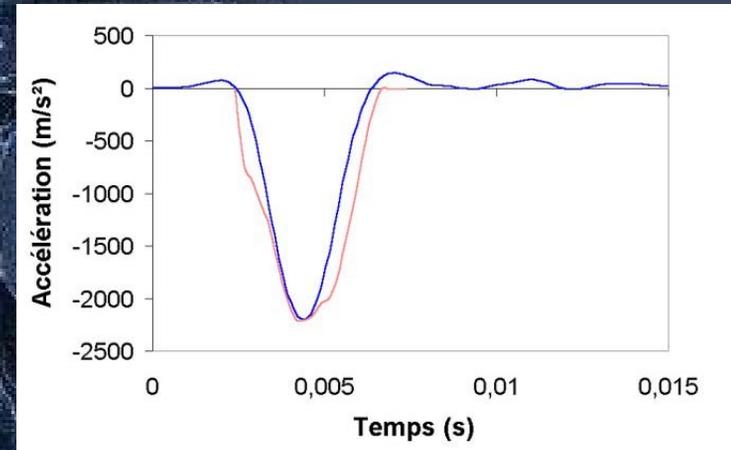
- Réponse numérique: essai infra-lésionnel

Identification

$E=1300 \text{ MPa}$

Validation
globale

Bonne
correspondance



Résultats

- Réponse numérique: essai infra-lésionnel

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du modèle EF

Caractérisation mécanique

Validation du modèle

1- Statique

2- Anatomique

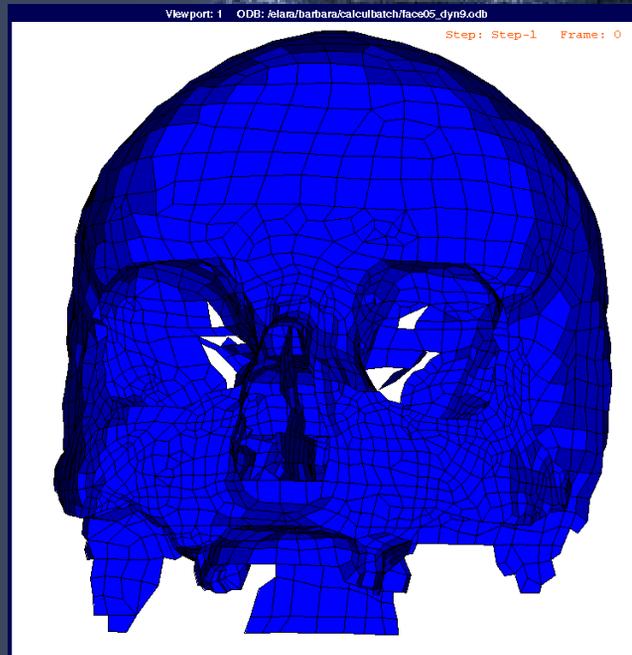
3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

- résultats

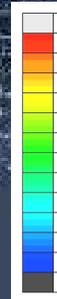
Conclusions et Perspectives



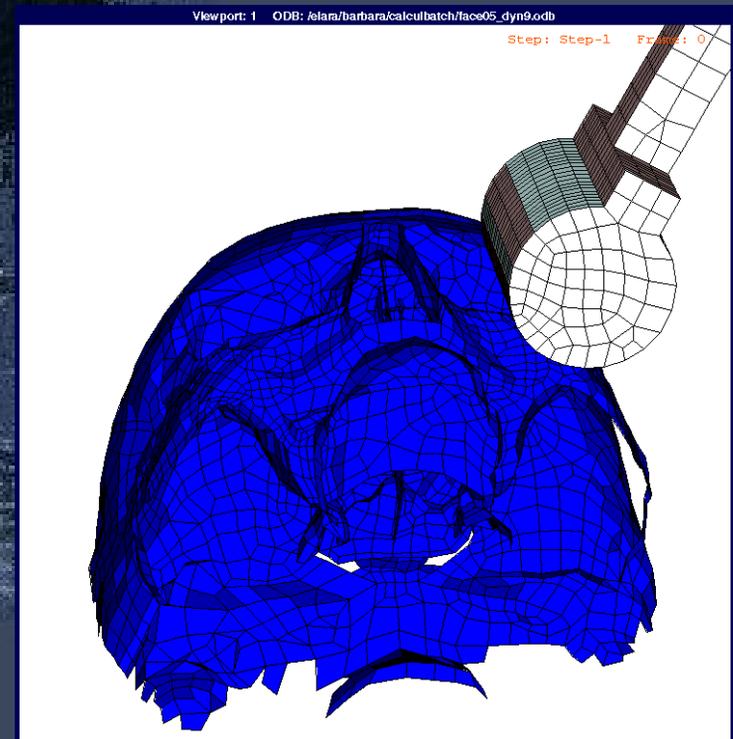
$\sigma_{\max} = 35$
MPa

max

min

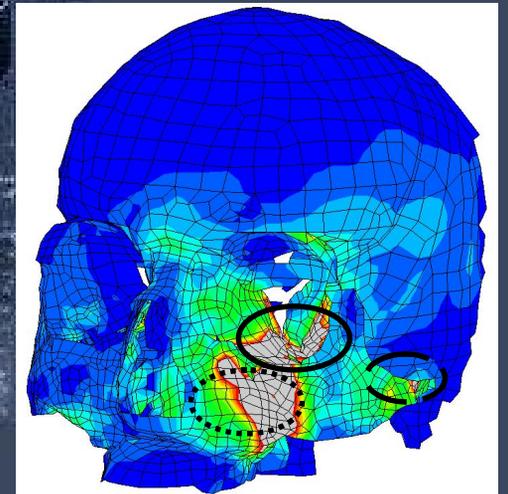
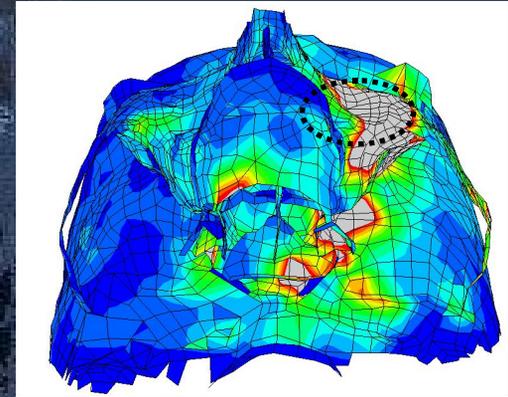
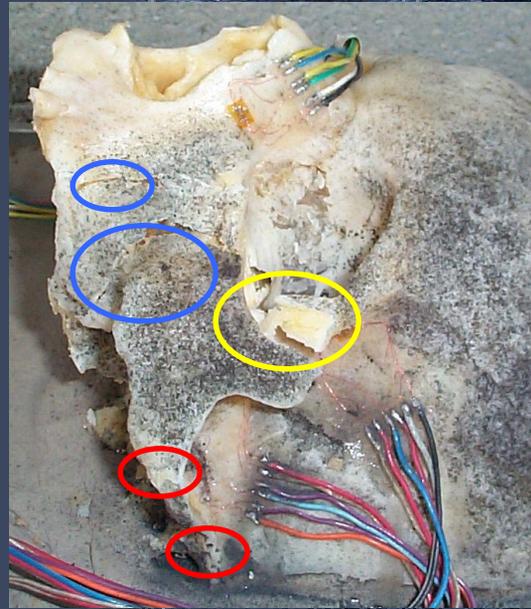


Contraintes de Von Mises



Résultats

- Prédiction des fractures



Os maxillaire, orbite,
arche zygomatique

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

*Validation du
modèle*

1- Statique

2- Anatomique

3 - Dynamique

- objectif

- matériel et méthode

- résultats

Conclusions et
Perspectives

Conclusions et Perspectives

Introduction

Rappels d'anatomie

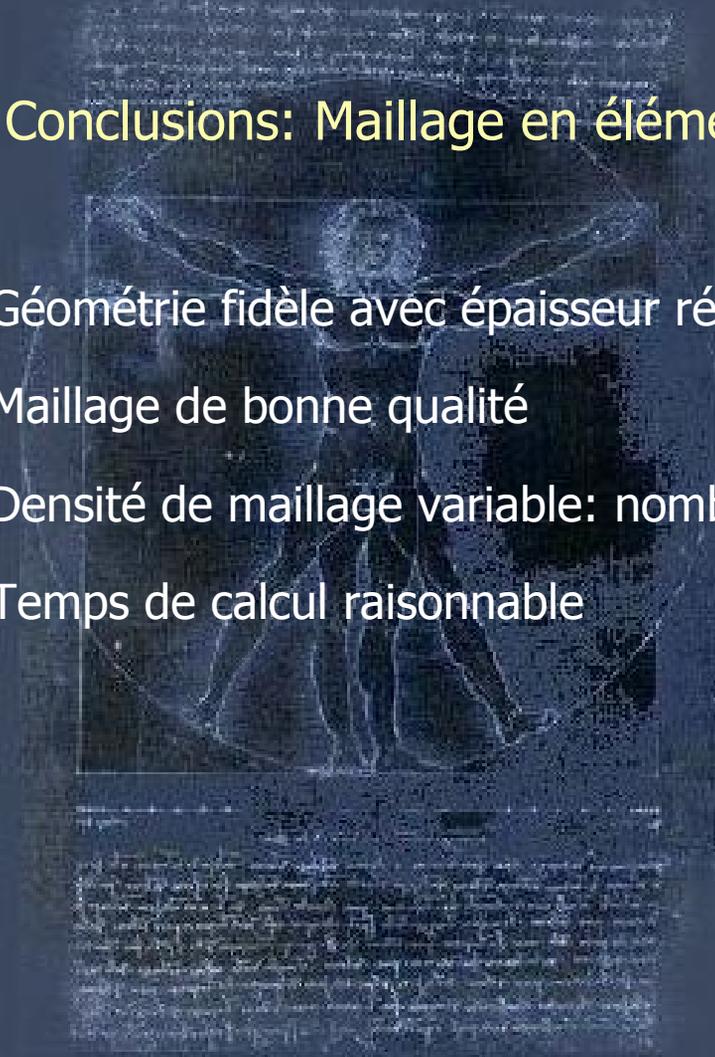
Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

*Conclusions et
Perspectives*

- **Conclusions: Maillage en éléments plaques**
 - ✓ Géométrie fidèle avec épaisseur réelle
 - ✓ Maillage de bonne qualité
 - ✓ Densité de maillage variable: nombre d'éléments limité
 - ✓ Temps de calcul raisonnable



Conclusions et Perspectives

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

*Conclusions et
Perspectives*

- **Conclusions: Caractérisation mécanique**
 - ✓ Etude des propriétés élastoplastiques
 - ✓ Propriétés obtenues: grande variabilité, influencée par la structure interne
 - ✓ Modélisation composite et intégration des sutures: ne change pas la prédiction du lieu de rupture
 - ✓ *Limites:*

Hypothèse de section constante trop simplificatrice

Caractère viscoélastique de l'os

Nombre d'éprouvettes limité

Conclusions et Perspectives

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

*Conclusions et
Perspectives*

- **Conclusions: Validation du modèle en statique**
- ✓ Propriétés identifiées: variabilité (4300 et 1600 Mpa)
- ✓ Validation locale:
 - Méthode de mesure originale
 - Qualitatif: similitude de la distribution des déplacements
 - Quantitatif: résultats très bons localement (arche zygomatique)
- ✓ *Limites:*
 - Localisation des conditions limites*
 - Mesure par corrélation (3D)*
 - Identification globale sur la structure*

Conclusions et Perspectives

Introduction

Rappels d'anatomie

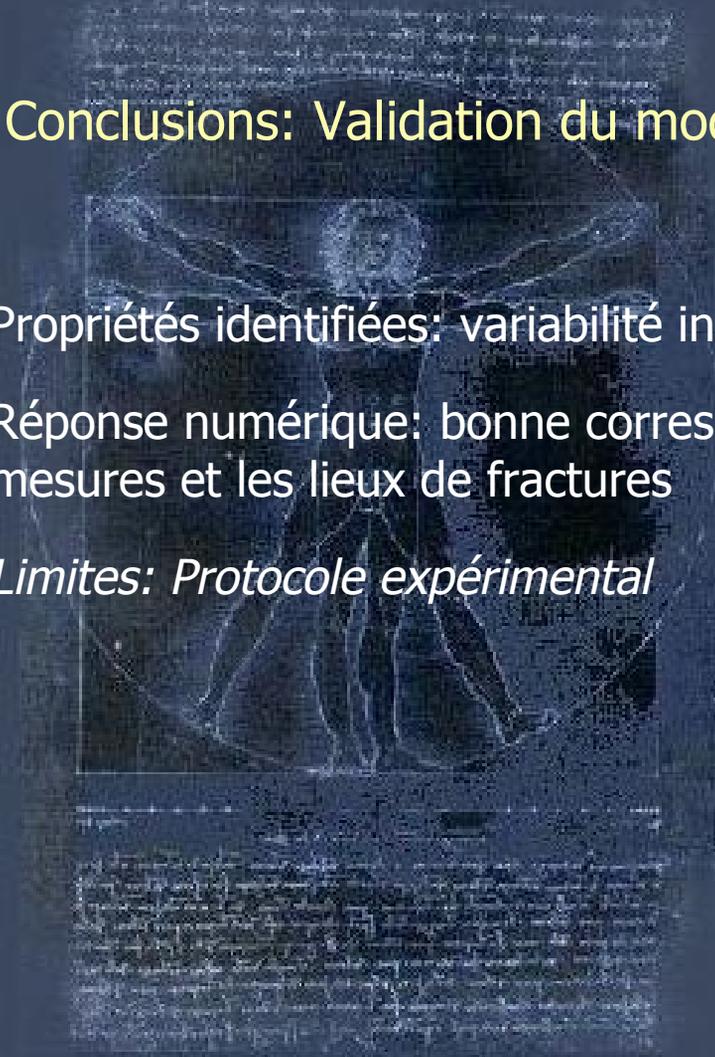
Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

*Conclusions et
Perspectives*

- **Conclusions: Validation du modèle en dynamique**
 - ✓ Propriétés identifiées: variabilité inter-individu
 - ✓ Réponse numérique: bonne correspondance avec les mesures et les lieux de fractures
 - ✓ *Limites: Protocole expérimental*



Conclusions et Perspectives

Introduction

Rappels d'anatomie

Réalisation du
modèle EF

Caractérisation
mécanique

Validation du
modèle

*Conclusions et
Perspectives*

- **Perspectives**

- ✓ Géométrie: personnalisation
- ✓ Propriétés osseuses: approfondir l'étude
- ✓ Validation: mesures locales en dynamique
- ✓ Outil de prédiction des blessures de la tête

Autres applications

- ✓ Outil de simulation chirurgicale

