

(l'exceptionnel) **TP2 : Etude du
barrage hydroélectrique**



TP2 : Etude du barrage hydroélectrique

1

Contexte de l'étude

2

Hypothèses de modélisation

3

Modèle 2D du barrage-poids

4

Modèle 3D du barrage-poids

5

Modélisation du barrage-voûte



Contexte de l'étude

L'énergie hydro-électrique

- En France : 12% de la production d'électricité
- Centrales – lacs (ou centrales de haute chute) = associée à une retenue d'eau créée par un barrage

= utilisation de l'énergie **potentielle** de l'eau pour stocker l'énergie



Stockage durable

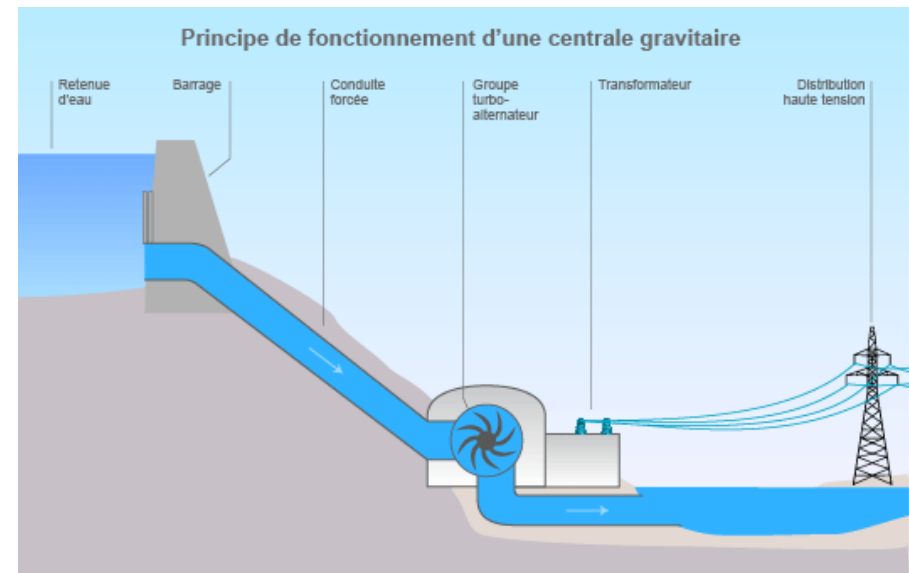
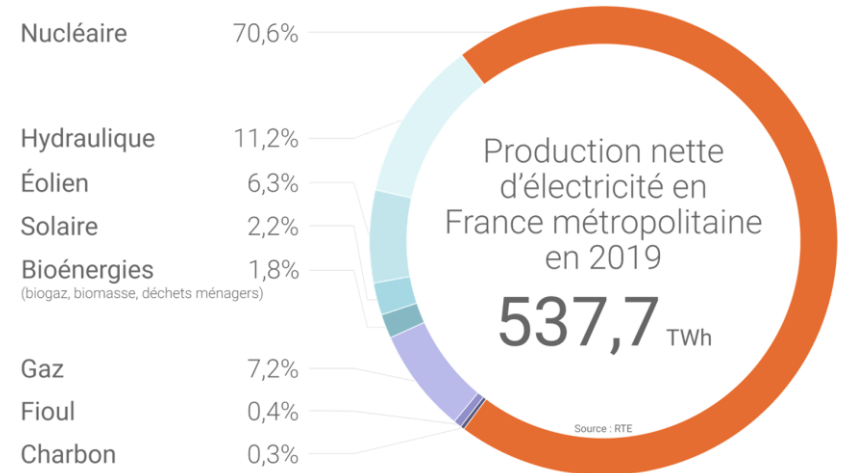
Energie à la demande



Infrastructure énorme!

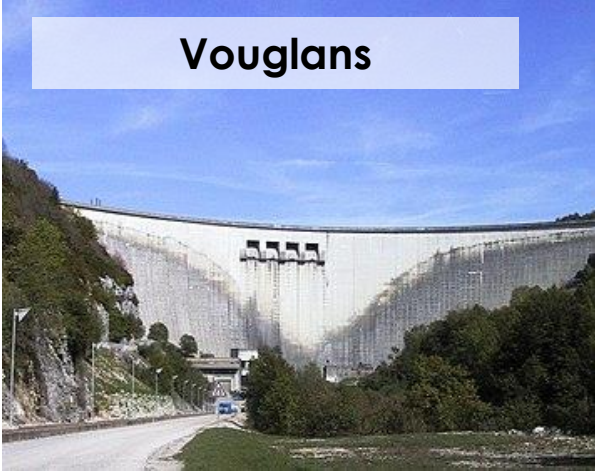
Zone géographique ensevelie
→ capacité limitée

Rupture = danger !

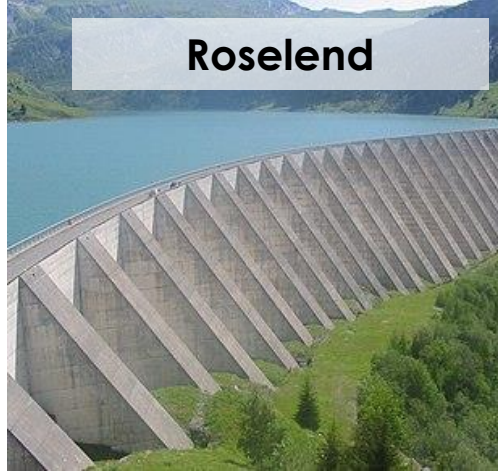


L'énergie hydro-électrique

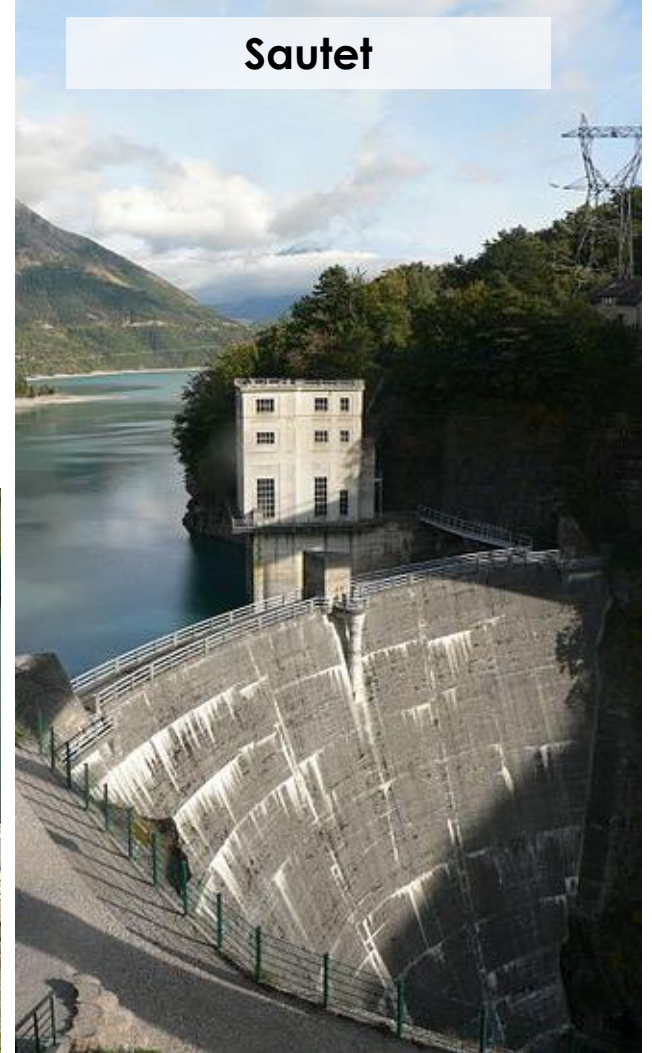
Vouglaans



Roselend



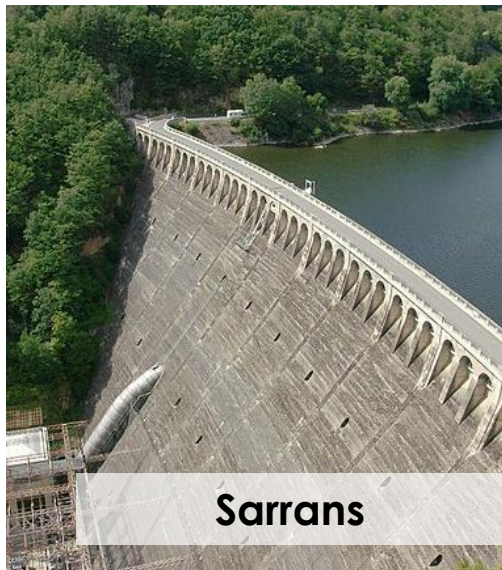
Sautet



Villefranche-de-Panat



Sarrans



L'énergie hydro-électrique



Lac noir (Vosges) : première STEP* en France
* Station de transfert d'énergie par pompage

Différents types de barrage

- ❑ **Barrage-poids** : le poids de la matière s'oppose à la pression de l'eau

Question 1 :

Pour un barrage de dimensions données, que est le **facteur de sécurité** d'un tel barrage ?

Pour ce barrage : **chaque section** du barrage est stable
→ a priori : pas de différence entre 2D et 3D !

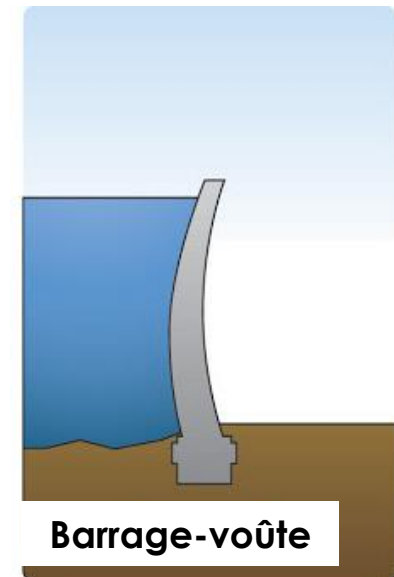
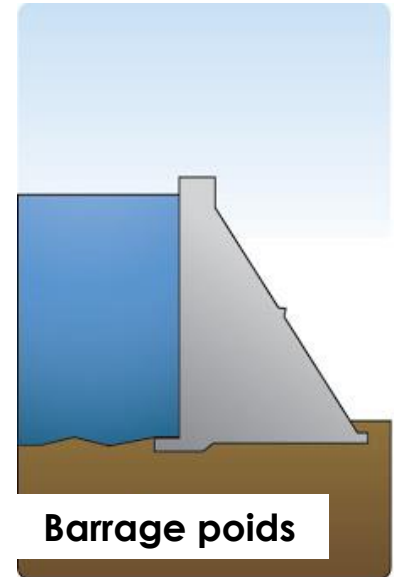
Question subsidiaire :

Y a-t-il une différence entre un modèle **2D** ou **3D** du barrage-poids?

- ❑ **Barrage-voûte** : barrage de forme arquée

Question 3 :

Quel est l'intérêt d'un barrage-voûte par rapport au barrage-poids?





Hypothèses de modélisation

Propriétés du matériau

- ✓ Tous les modèles de barrage constitués en béton
- ✓ Module d'Young : 20GPa
- ✓ Masse volumique = 2400kg/m³
→ nécessaire pour modéliser le poids propre du barrage !
- ✓ Béton : asymétrique en traction / compression !!!



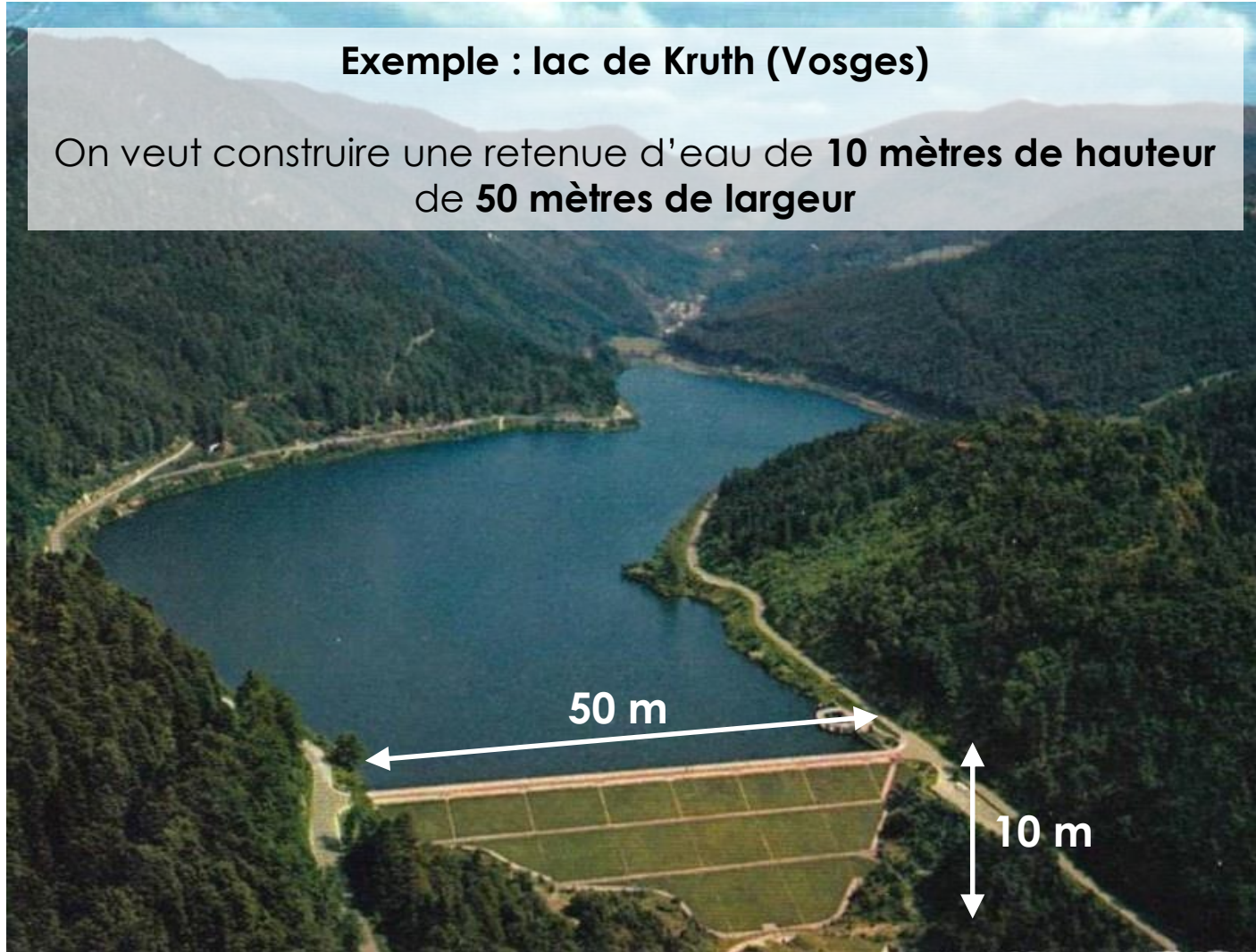
Limite élastique **en compression:**
~35MPa

Limite élastique **en traction:**
~5MPa

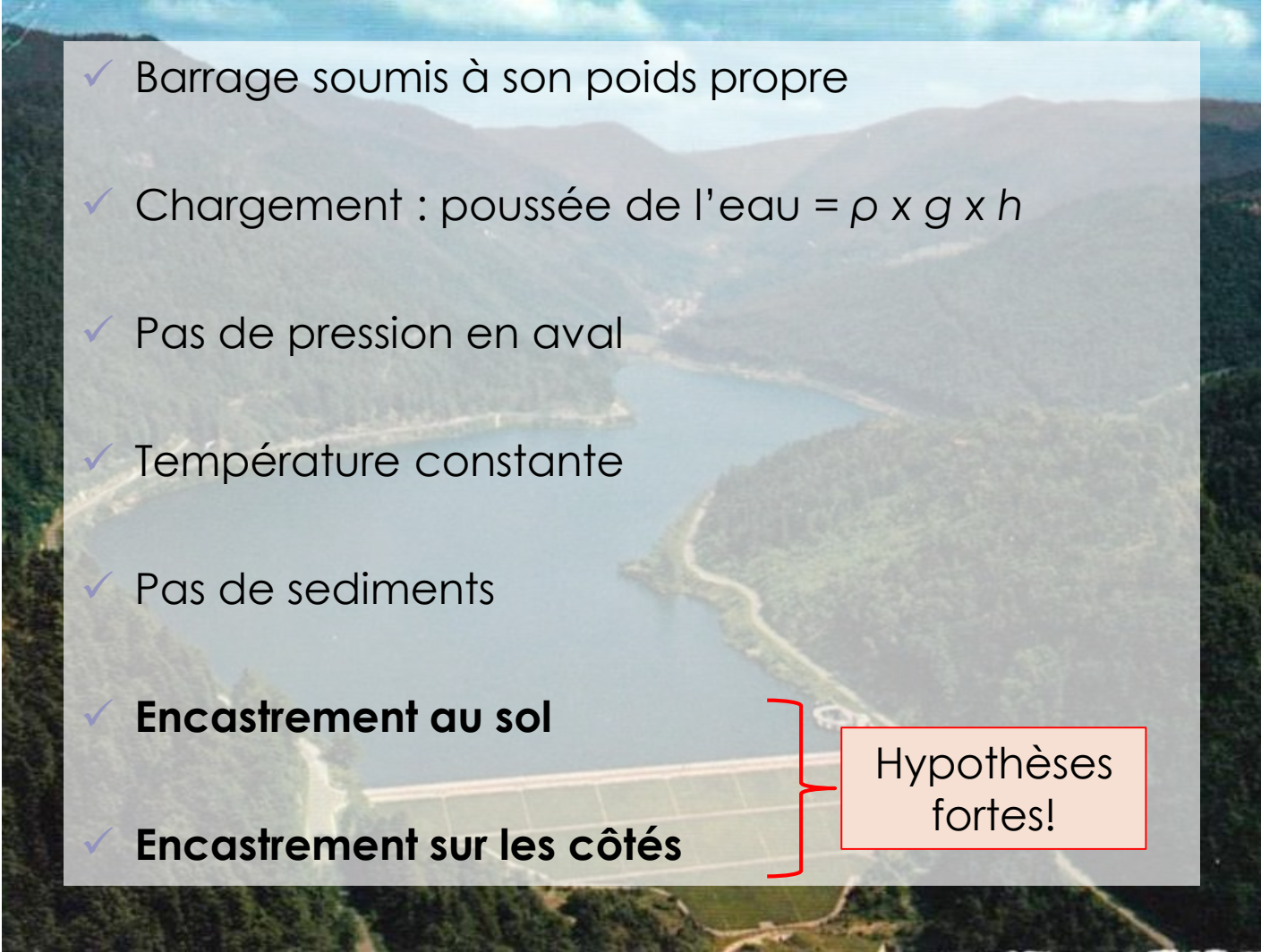
Dimensions extérieures

Exemple : lac de Kruth (Vosges)

On veut construire une retenue d'eau de **10 mètres de hauteur**
de **50 mètres de largeur**



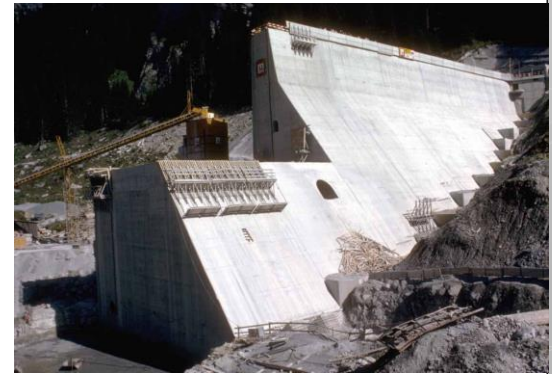
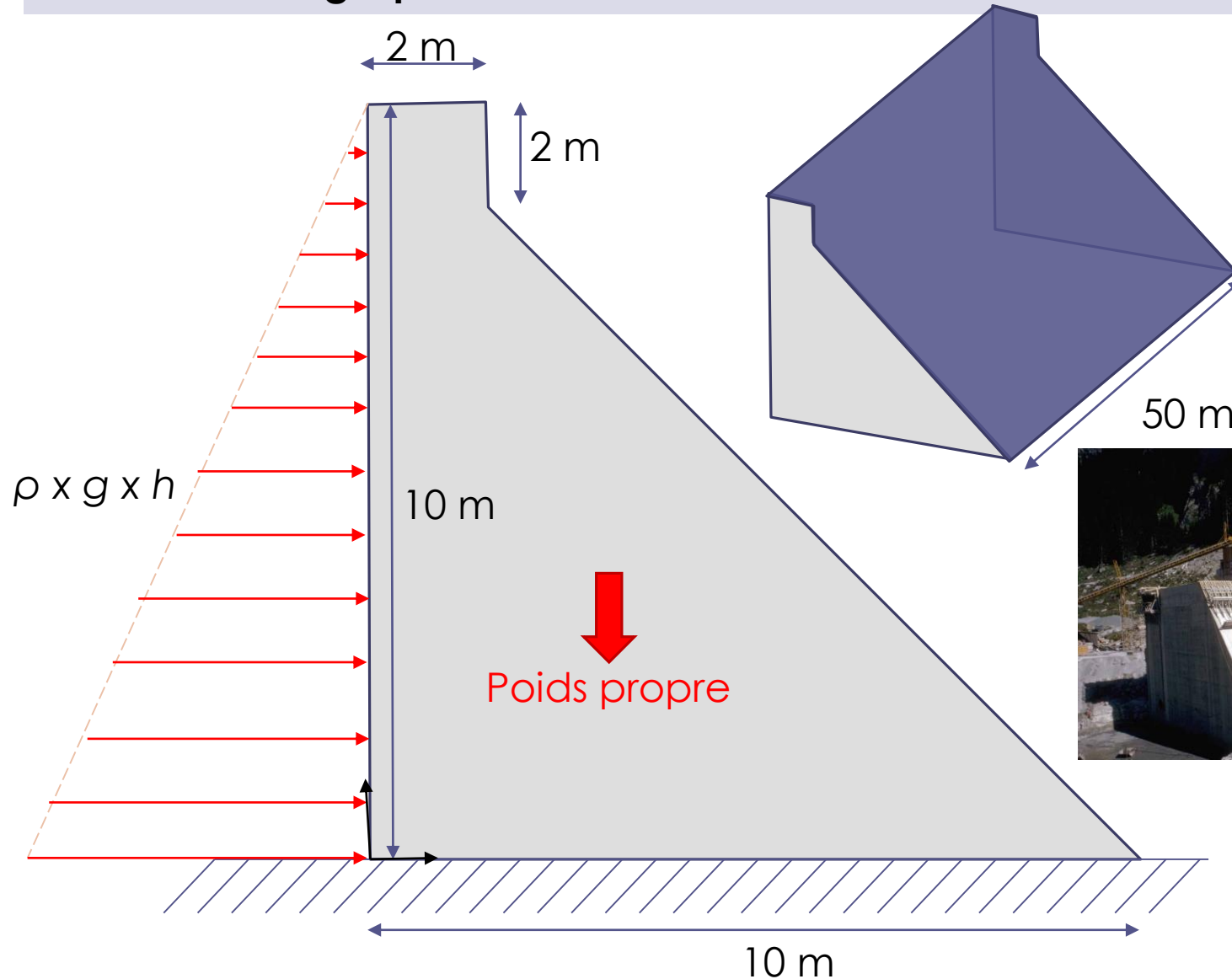
Hypothèses générales

- 
- An aerial photograph of a large dam and reservoir, likely the Hoover Dam, set against a backdrop of mountains. The reservoir is filled with blue water, and the surrounding landscape is green and hilly. The dam structure is visible in the foreground, extending across the width of the reservoir.
- ✓ Barrage soumis à son poids propre
 - ✓ Chargement : poussée de l'eau = $\rho \times g \times h$
 - ✓ Pas de pression en aval
 - ✓ Température constante
 - ✓ Pas de sediments
 - ✓ **Encastrement au sol**
 - ✓ **Encastrement sur les côtés**

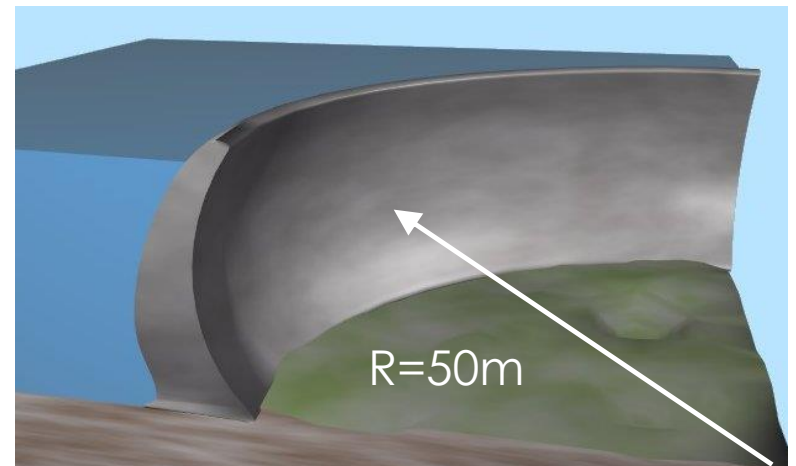
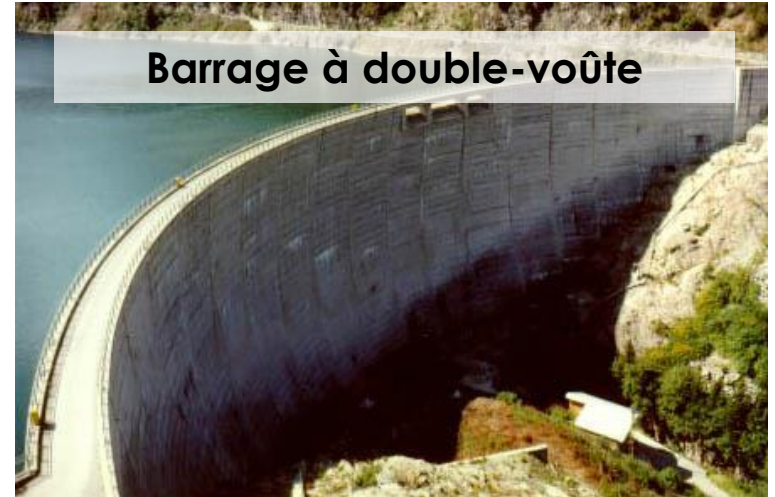
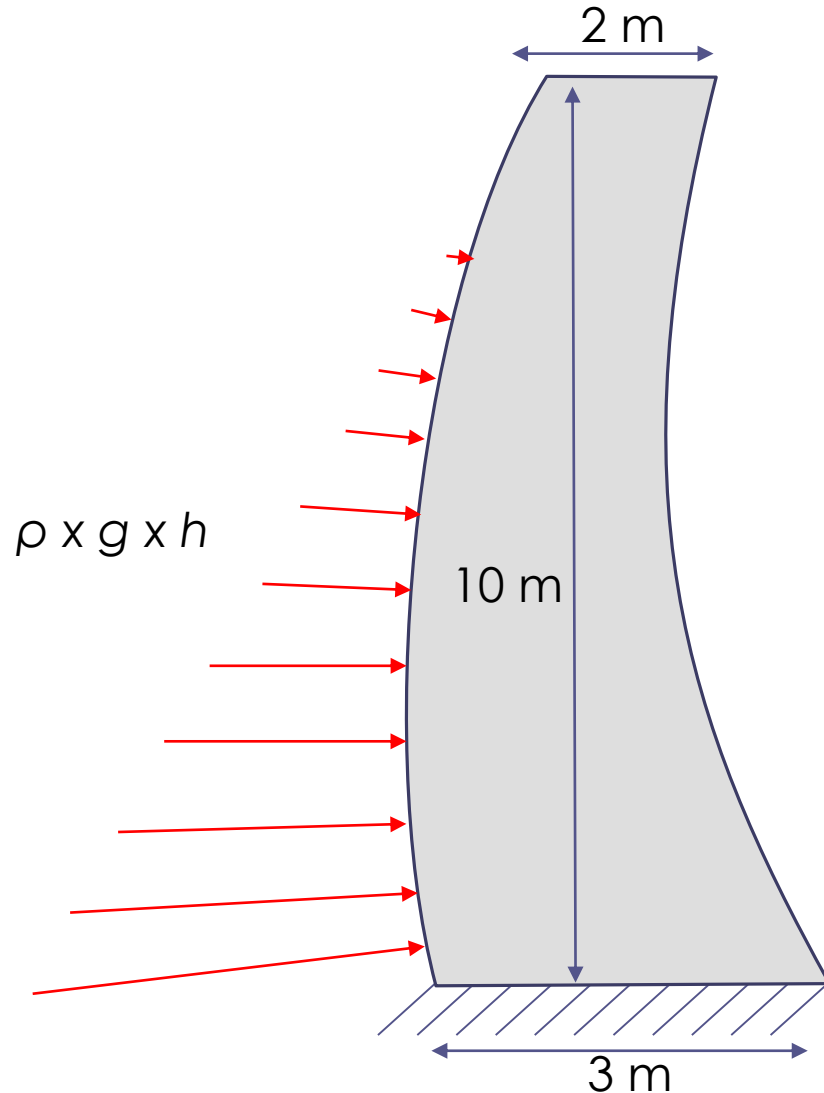
Hypothèses
fortes!

Hypothèses de modélisation

Partie 1 : barrage-poids



Partie 2 : barrage-voûte





Modèle 2D du barrage-poids

Type de modélisation

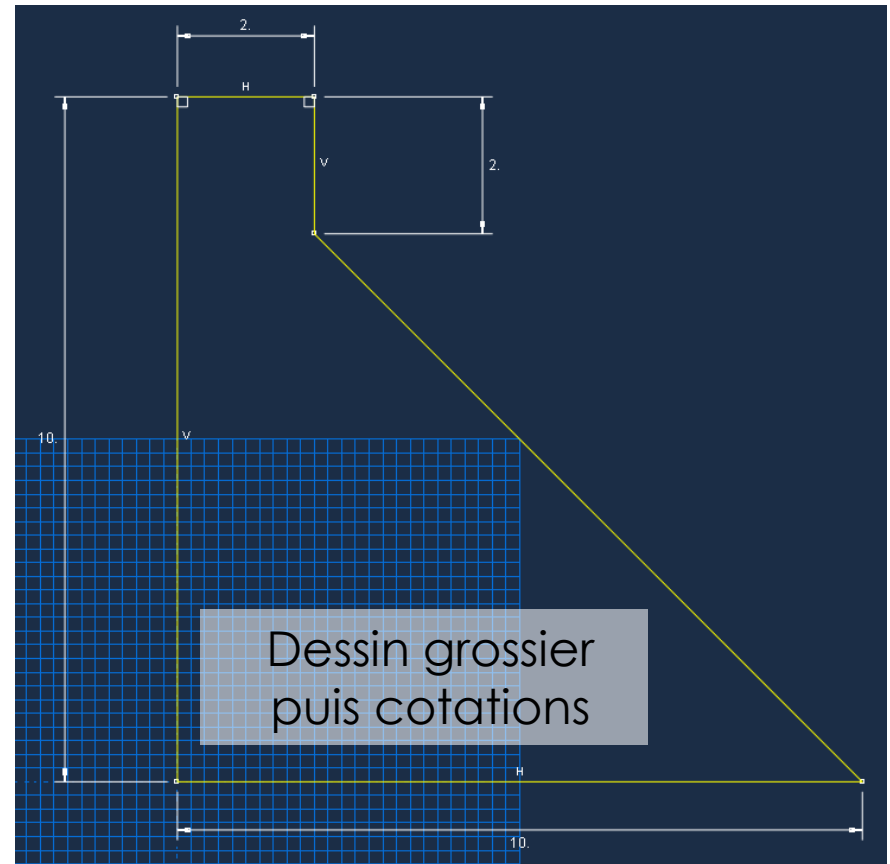
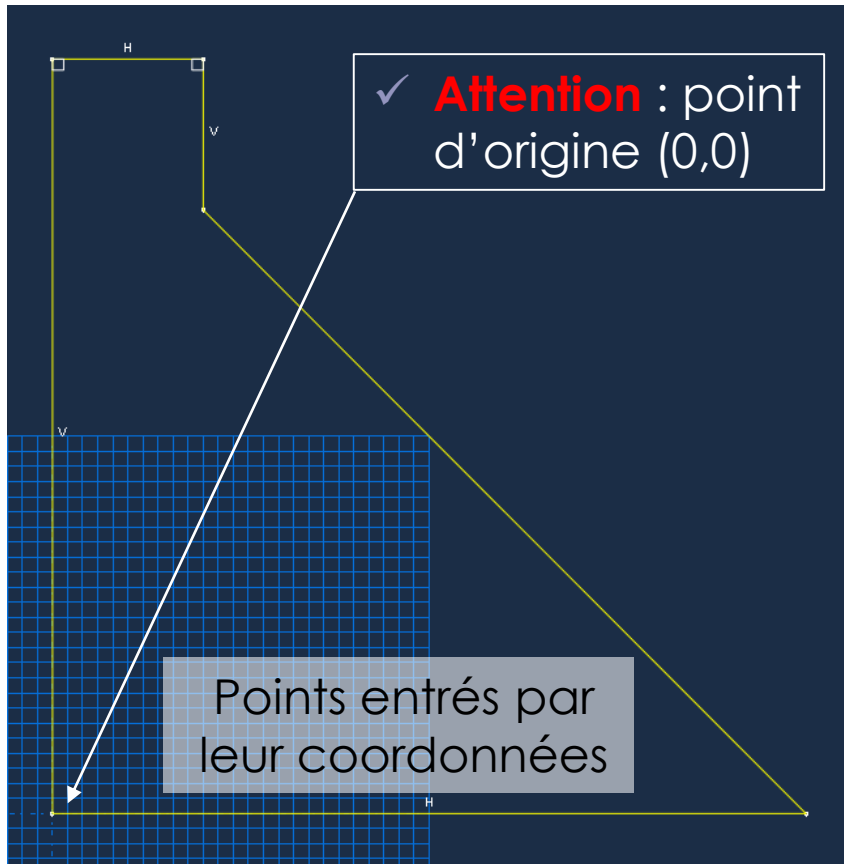
- ✓ Définir son répertoire de travail (*set work directory*)
- ✓ Créer une pièce : 
- ✓ Première étude : *2D planar, deformable*, « *base feature* » = *shell*
- ✓ Taille approximative de l'esquisse = 10

Important : les unités dans Abaqus

- ✓ Le code ne possède pas de système d'unités !!
- ✓ Cohérence : dessin en mètre → pression en $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$
dessin en millimètre → pression en $\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$
- ✓ Conseil : unités du système international tout le temps !

Barrage-poids 2D: module PART

- ✓ Créer des lignes 
 - solution #1 : entrer les coordonnées des points
 - Solution #2 : dessiner puis entrer des cotations



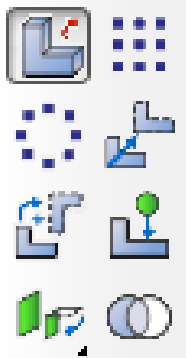
✓ Quand tout est fini →  Sketch the section for the planar shell

Matériaux

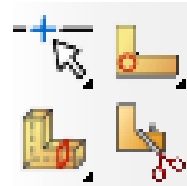
- ✓ Créer le matériau « *beton* » : propriétés élastiques + densité

Assemblage

- ✓ Comme d'habitude : un assemblage, « indépendant »
- ✓ Si besoin (pour la suite) :



- ✓ Outils de **transformation** des pièces dans l'assemblage



- ✓ Outils de **partition** des pièces pour faciliter le maillage ou les chargements

Step

- ✓ *General, static*
- ✓ *NLgeom = off* (hypothèse HPP)
- ✓ Paramètres de l'incrémentation : par défaut

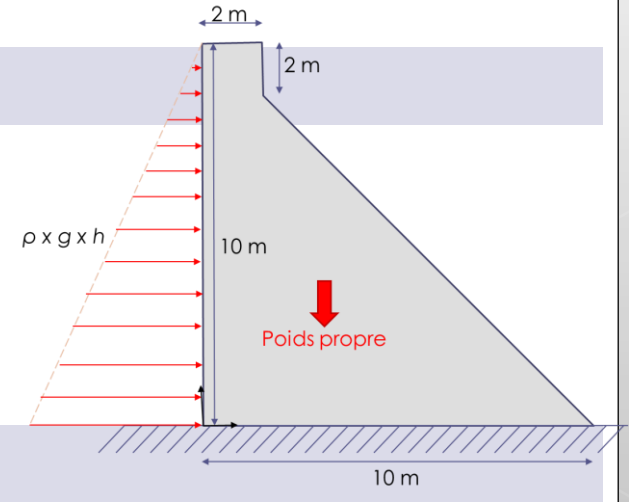
Barrage-poids 2D: module LOAD

Définir les conditions aux limites



- ✓ Définir un encastrement sur la face inférieure
→ create boundary condition : **encastre**
→ **encastrer** la face inférieure

Définir les chargements



- ✓ Définir la gravité → create load → gravity → -9,81 selon 2
- ✓ Définir la pression de l'eau → profil non uniforme !!
→ create load → pressure → créer une fonction $f(x)$
→ analytical field → entrer la fonction de x, y
- ✓ Ici : l'expression de la pression est : $\rho \times g \times (10-y)$
- ✓ pression = Amplitude $\times (10-Y)$
→ amplitude = $\rho \times g$

Distribution: (A) AnalyticalField-1 $f(x)$

Magnitude: 1000*9.81

Amplitude: (Ramp) $f(x)$

Create Expression Field

Name: AnalyticalField-1

Description:

Enter an expression by typing and selecting

Note: Parameter names and operators are

Example: 2.5*X + pow(Y,3)

10 - Y

Local system: (Global)

Local system type: Rectangular

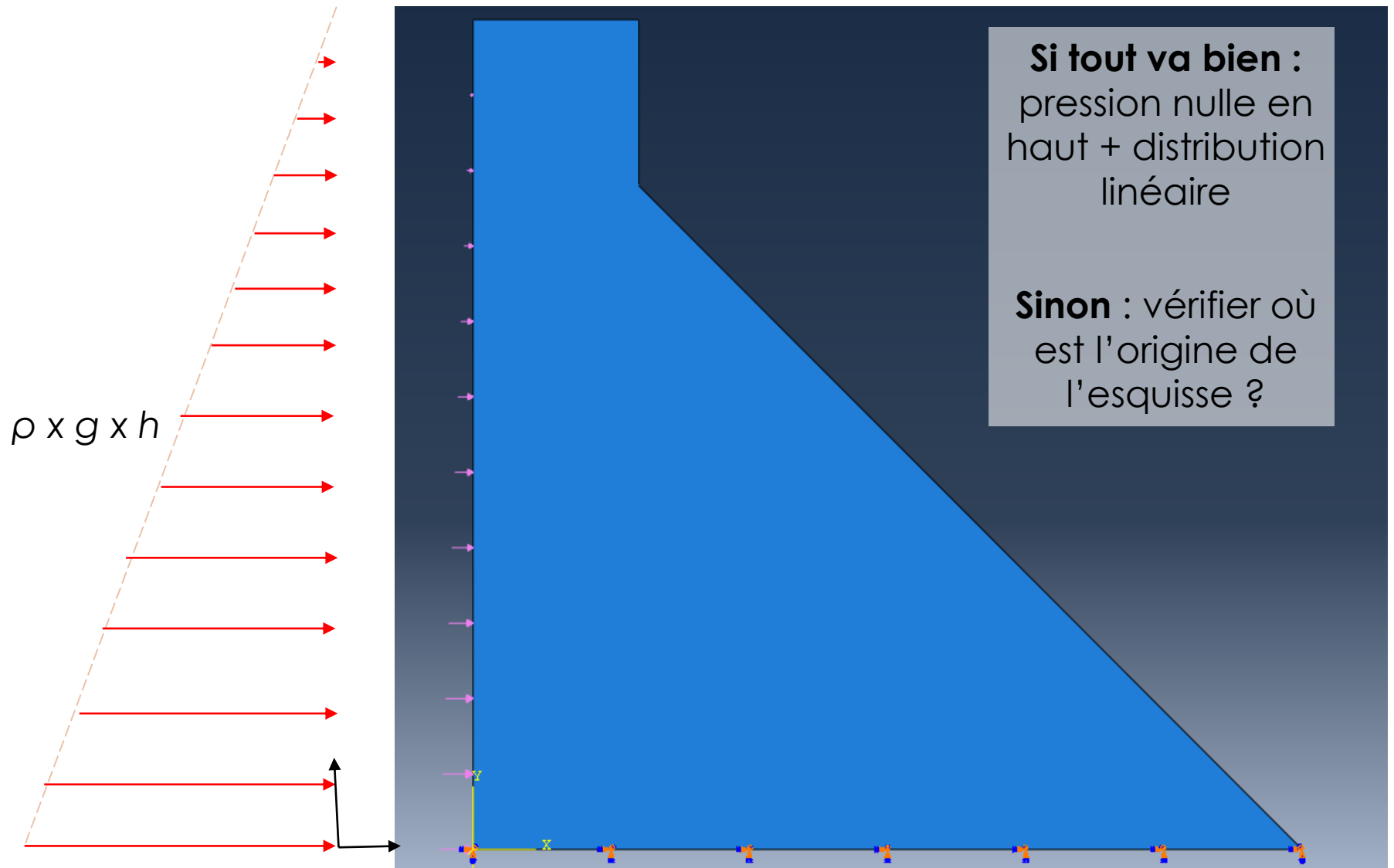
Parameter Names

X

Y

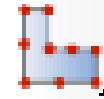
OK

Barrage-poids 2D: module LOAD



Créer un maillage (rappel)

- ✓ **Etape 1 : « semer » les points** (« *seed nodes* »)



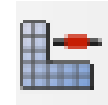
= définir la position des nœuds → taille approximative globale

→ **alternative** : côté par côté



→ par taille ou par nombre

- ✓ **Etape 2 : type de maillage** (« *assign mesh controls* »)



= choisir triangles / quadrangles / mélange des deux ?

→ suggestion : maillage « *tri* » (triangles) , « *free* »

- ✓ **Etape 3 : type d'élément** (« *assign element type* »)



Geometric Order



Linear



Quadratic

→ choisir des éléments du second ordre

- ✓ **Etape 4 : mailler !**

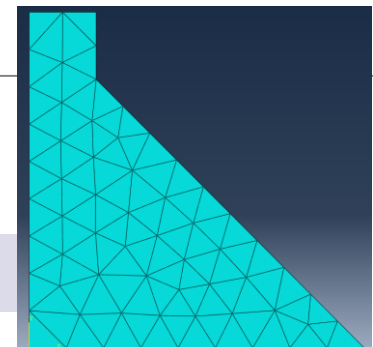


OK to mesh the part instance?

Yes

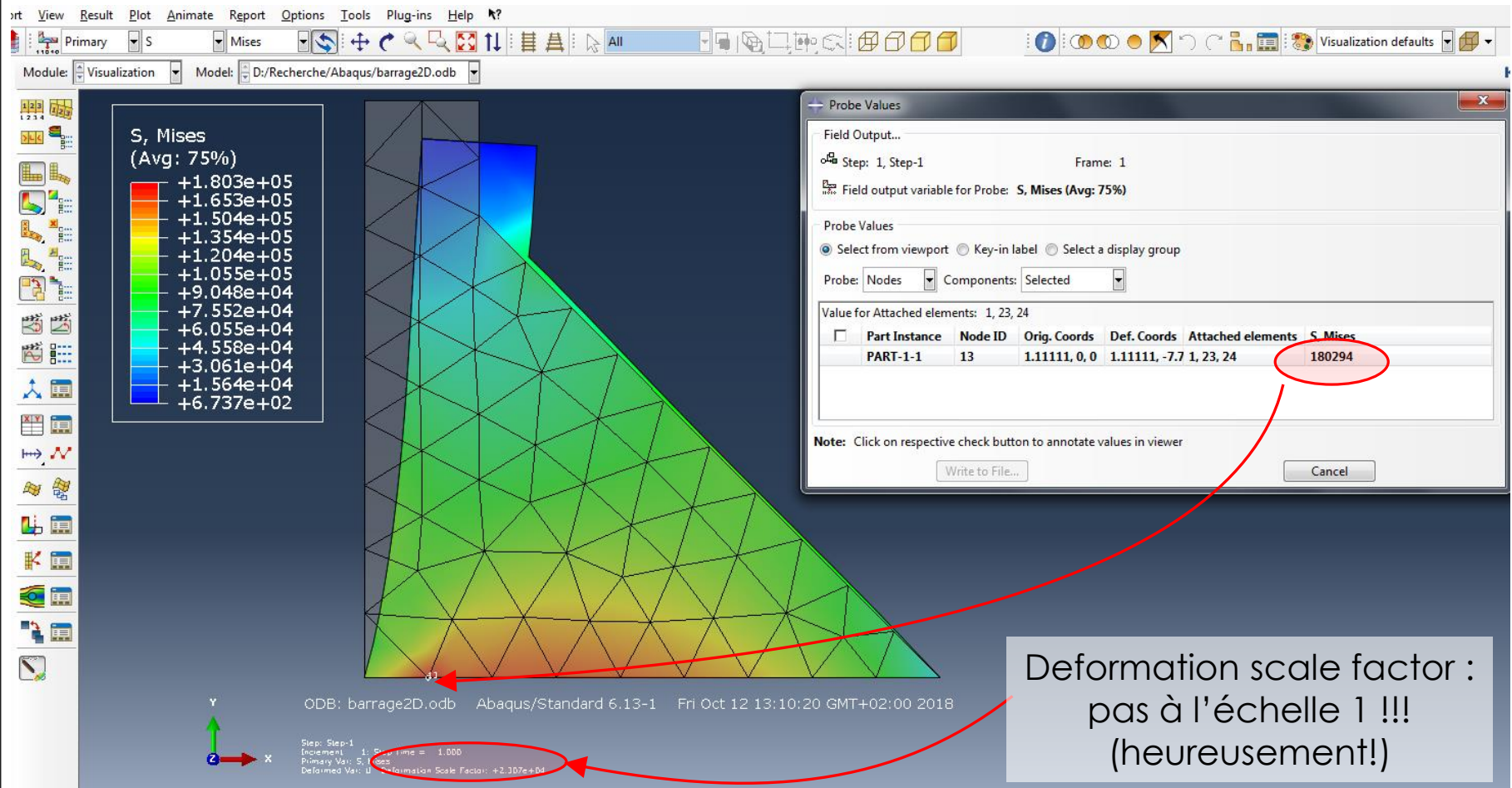
No

ENFIN : créer et soumettre un job

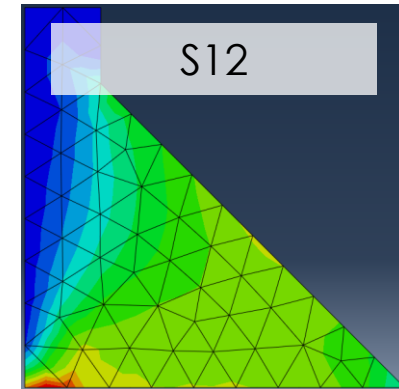
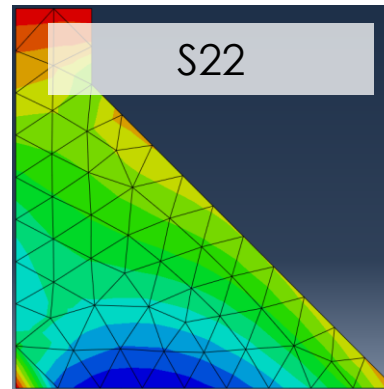
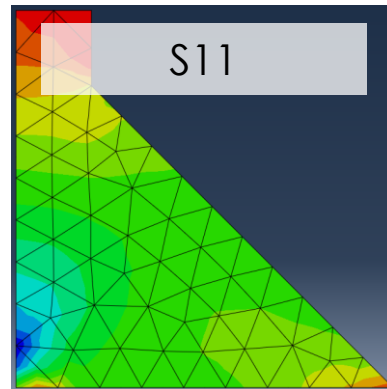
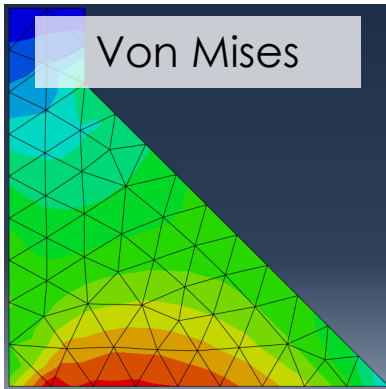


Barrage-poids 2D: onglet RESULTS

- ✓ **Exemple de visu** : superposition état de référence + état actuel
- ✓ **« Probe value »** : valeur du champ en un nœud du maillage



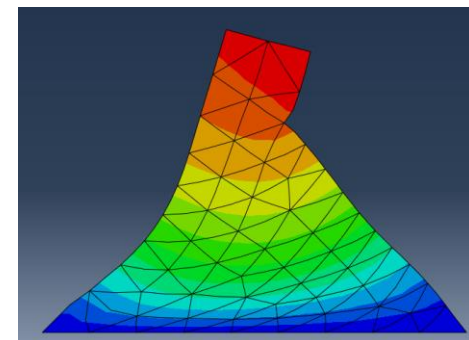
- ✓ **Comparer** les répartitions des différentes contraintes :
contrainte équivalente, S11, S12, S22



- ✓ **Rappel:** contrainte de Von Mises : positif par définition

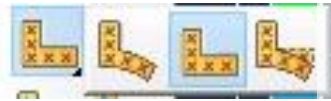
$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)}$$

- ✓ **Visualiser les déplacements** : cohérent avec les conditions aux limites ?
→ astuce : « common options » ,
« scale factor »

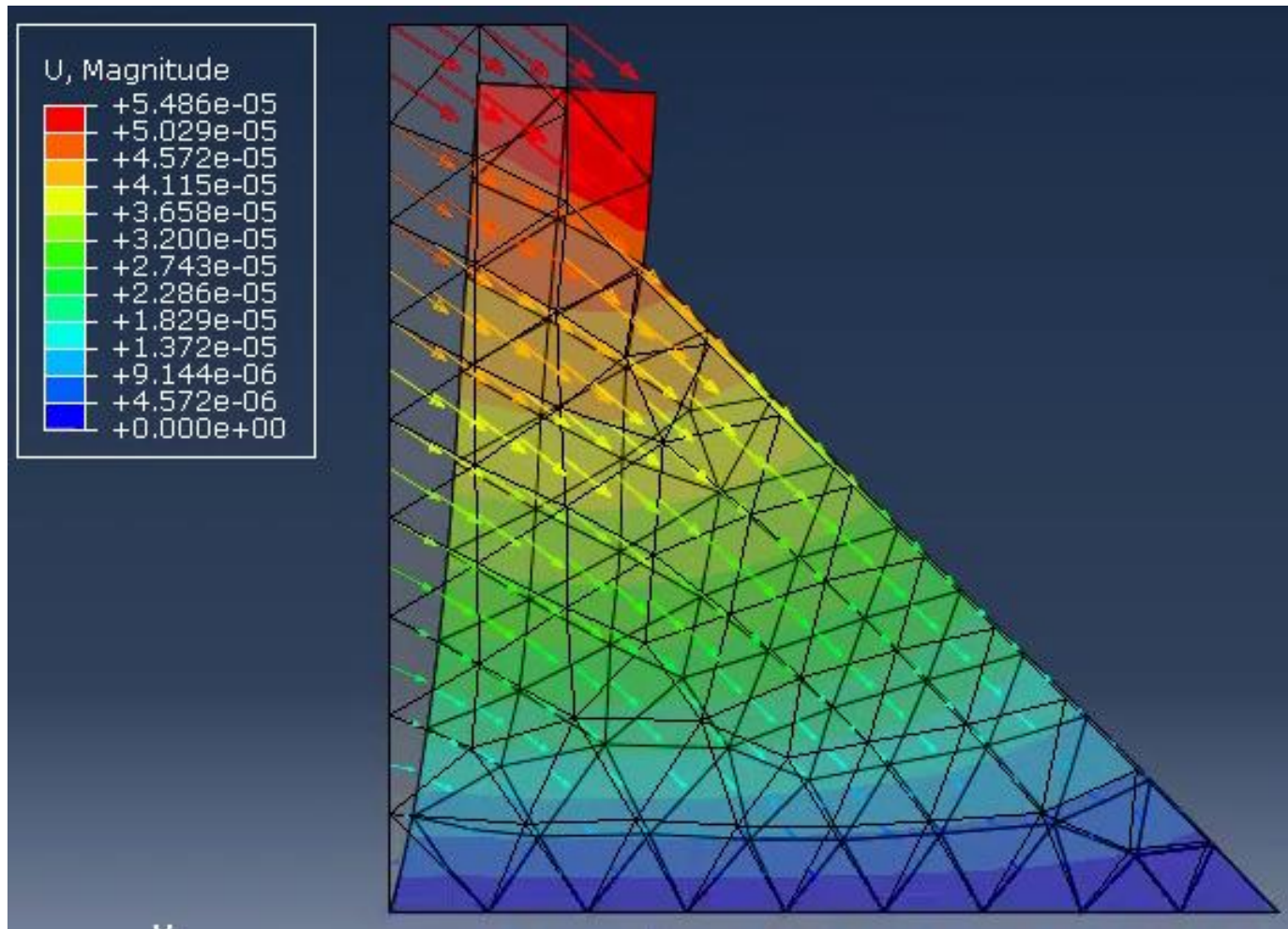


Barrage-poids 2D: onglet RESULTS

- ✓ Pour visualiser le **champ de déplacement (champ de vecteurs)**



Plot symbols on undeformed shape



- ✓ **Pour le béton** : différence de **limite d'élasticité** entre **compression** et **traction**
- ✓ Contraintes S_{11} , S_{22} , S_{12} → repère global de la structure
- ✓ Comment visualiser l'état de traction ou l'état de compression **dans le repère local de la matière** ?

Rappel : les contraintes principales

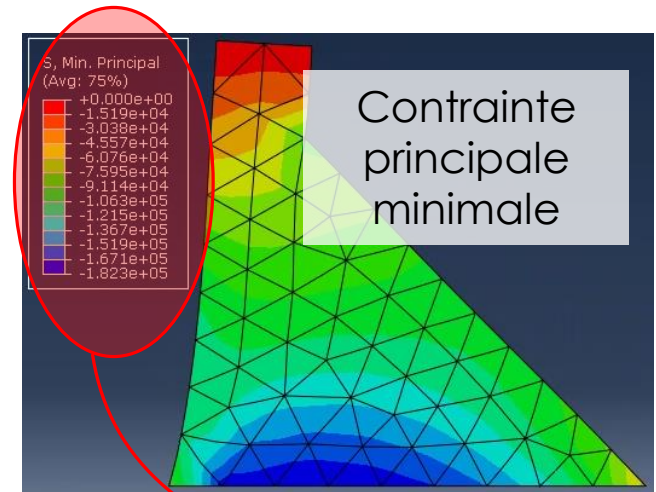
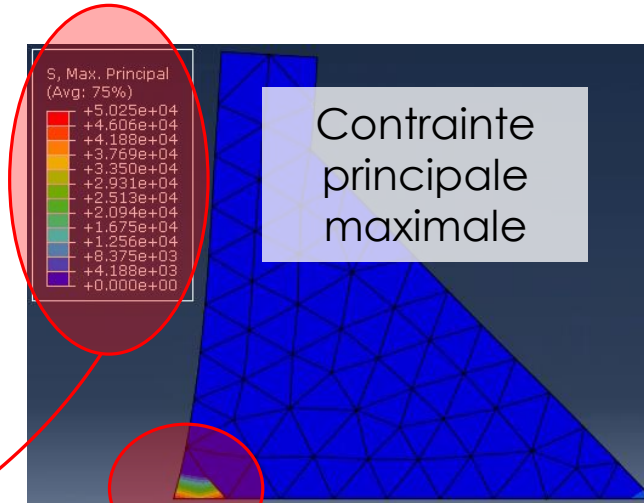
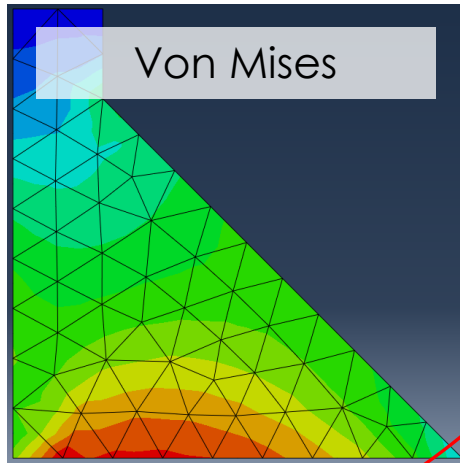
→ Il existe une base $(\underline{e}_I, \underline{e}_{II}, \underline{e}_{III})$ appelée **base principale** telle que:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \sigma_I \underline{e}_I \otimes \underline{e}_I + \sigma_{II} \underline{e}_{II} \otimes \underline{e}_{II} + \sigma_{III} \underline{e}_{III} \otimes \underline{e}_{III} \quad [\underline{\underline{\sigma}}]_{(\underline{e}_I, \underline{e}_{II}, \underline{e}_{III})} = \begin{pmatrix} \sigma_I & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{II} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{III} \end{pmatrix}$$

Par convention: $\sigma_I > \sigma_{II} > \sigma_{III}$

→ les facettes $(\underline{e}_I, \underline{e}_{II}, \underline{e}_{III})$ ne subissent que des contraintes **normales**

Barrage-poids 2D: onglet RESULTS



Positif = traction

**Zone de traction
due à
l'encastrement !**

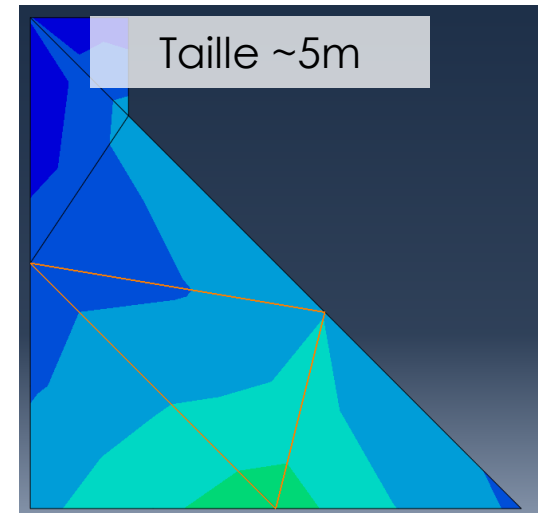
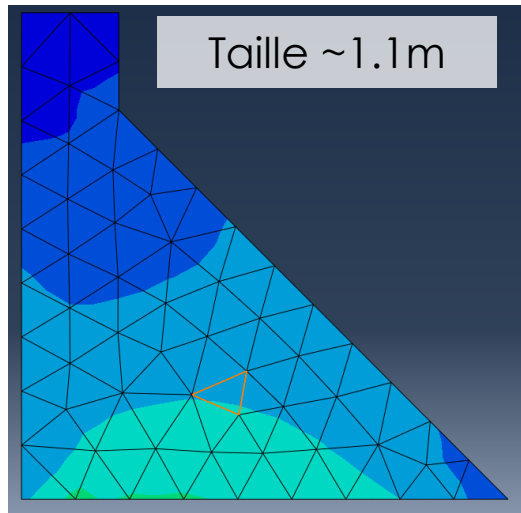
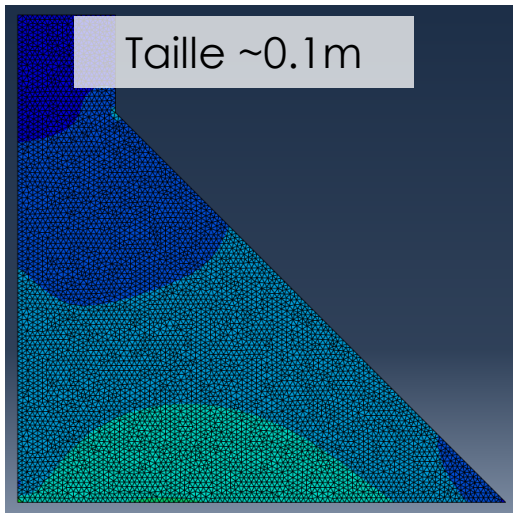
Négatif = Compression

Limite élastique **en compression:**
~35MPa

Limite élastique **en traction:**
~5MPa

Facteur de sécurité ?

- ✓ **Réaliser une étude paramétrique** sur l'influence du maillage
 - la taille du maillage a-t-elle une influence sur la **contrainte maximale** calculée ?
 - **Evolution** du facteur de sécurité avec la taille du maillage ?
 - **Evolution** de la concentration des contraintes ?



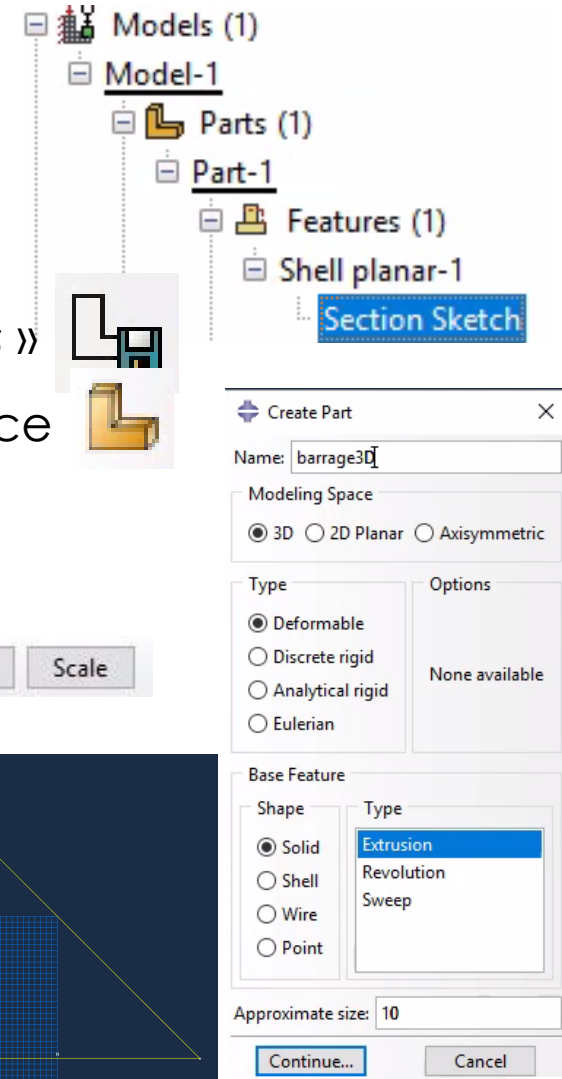
- ✓ **Comparer** maillage linéaire ou quadratique ?



Modèle 3D du barrage-poids

On veut extruder le profil précédent

- ✓ **Solution 1** : recommencer tout !
- ✓ **Solution 2** : ré-utiliser l'esquisse en cours
 - Aller éditer l'esquisse en cours
 - Sauvegarder cette esquisse « *save sketch as* »
 - Sortir de l'esquisse et créer une nouvelle pièce
 - Esquisse → « *add sketch* »
 - Il faut repositionner l'esquisse (origine en 0,0)
 - How do you want to reposition the new entities? Done Translate Rotate Mirror Scale
 - Sélectionner le point inférieur et positionner en 0,0
 - Done !
 - Extrusion : *depth* = 50m



SUPPRIMER la pièce et l'assemblage précédents + **ENREGISTRER**

Matériaux

- ✓ Le matériau est déjà créé

Section

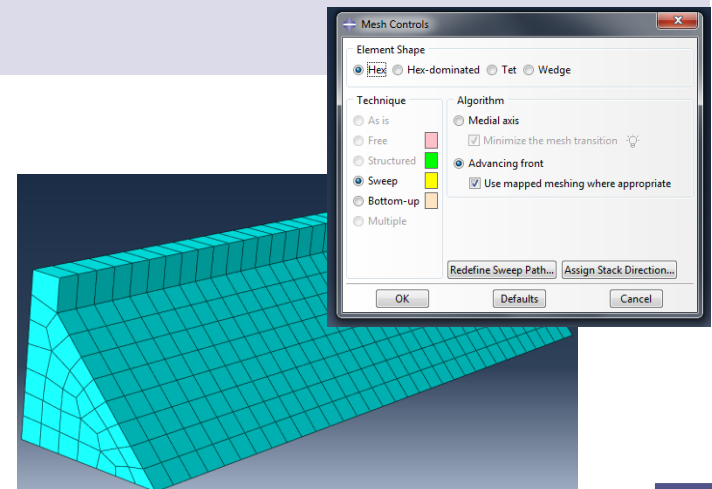
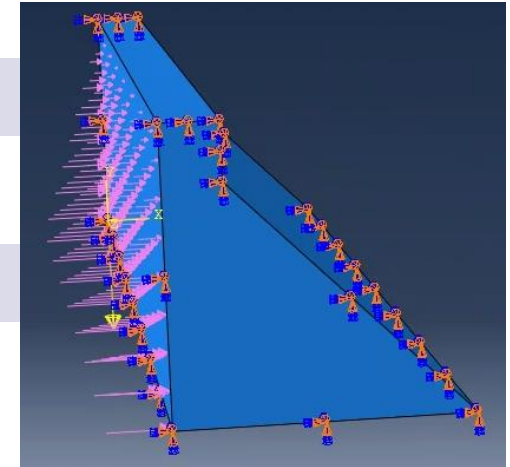
- ✓ Section « solid », « homogeneous »

Assemblage, step, load :

- ✓ Comme précédemment
- ✓ Il faut adapter les CL niveau cas 3D !!

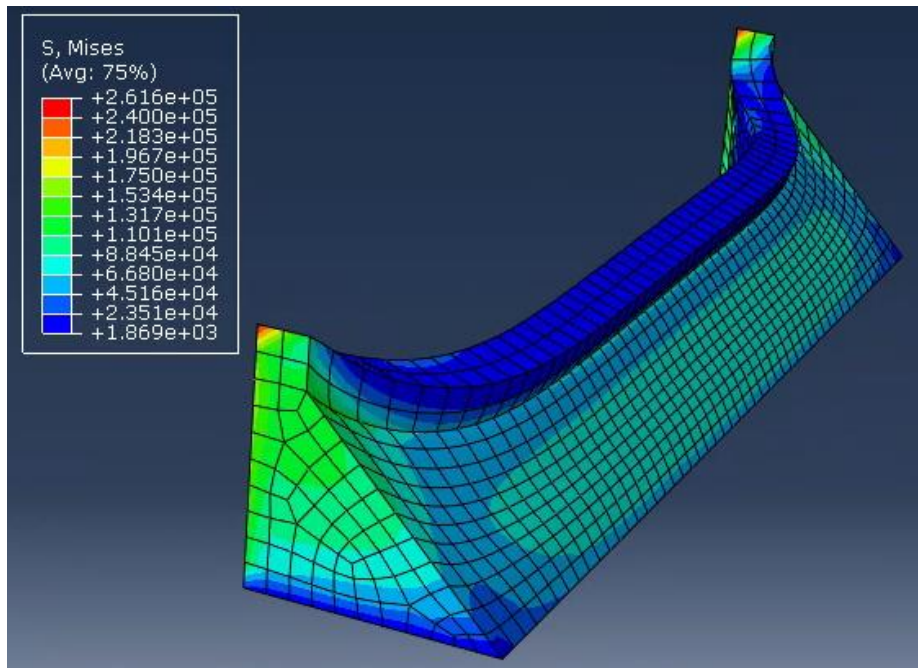
Maillage

- ✓ **type de maillage** (« assign mesh controls »)
→ essayer maillage hexaédrique avec la méthode de balayage (« sweep »)
- ✓ **type d'élément** (« assign element type ») :
quadratique



Créer un "job"

- ✓ Si statut = « completed » → **results !**
- ✓ Comparer les **temps de calcul**
(*monitor* → *data file* → fin du fichier)
- ✓ Visualiser les résultats



Job-1 Monitor

Job: Job-1 Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	1	1	0	1	1	1	1	1

Log Errors Warnings Output **Data File** Message File Status File

I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQ
MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMI
USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USE
MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE RC
BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY
ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.
(6) USING "RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA ↓

THE ANALYSIS HAS BEEN COMPLETED

ANALYSIS COMPLETE

JOB TIME SUMMARY

USER TIME (SEC)	=	1.2000
SYSTEM TIME (SEC)	=	0.10000
TOTAL CPU TIME (SEC)	=	1.3000
WALLCLOCK TIME (SEC)	=	2

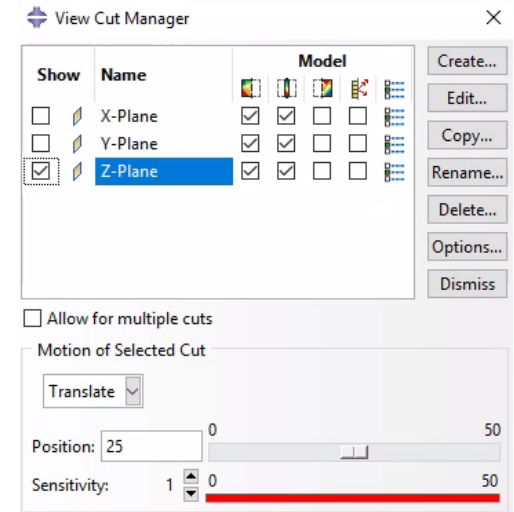
Search Text

Text to find: ☐ Match case

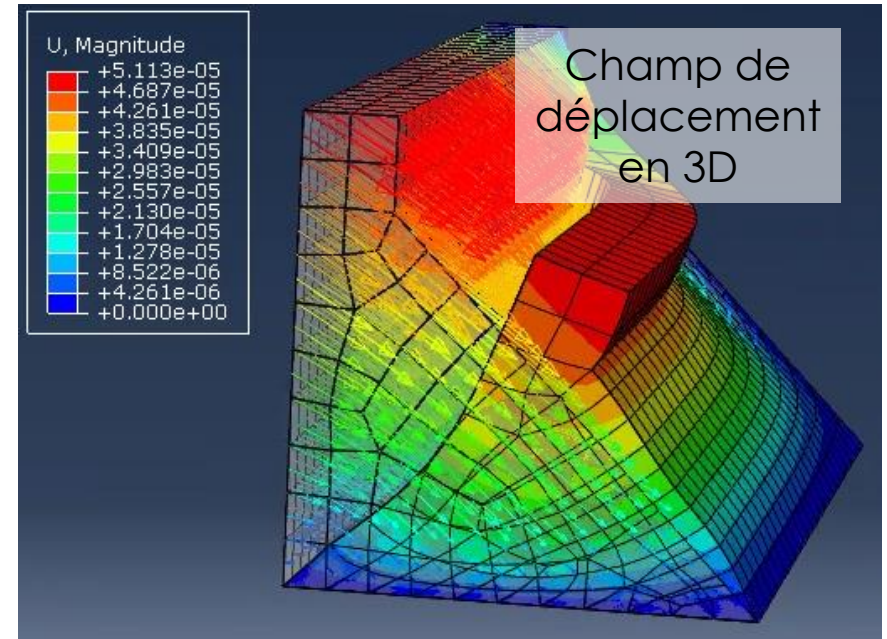
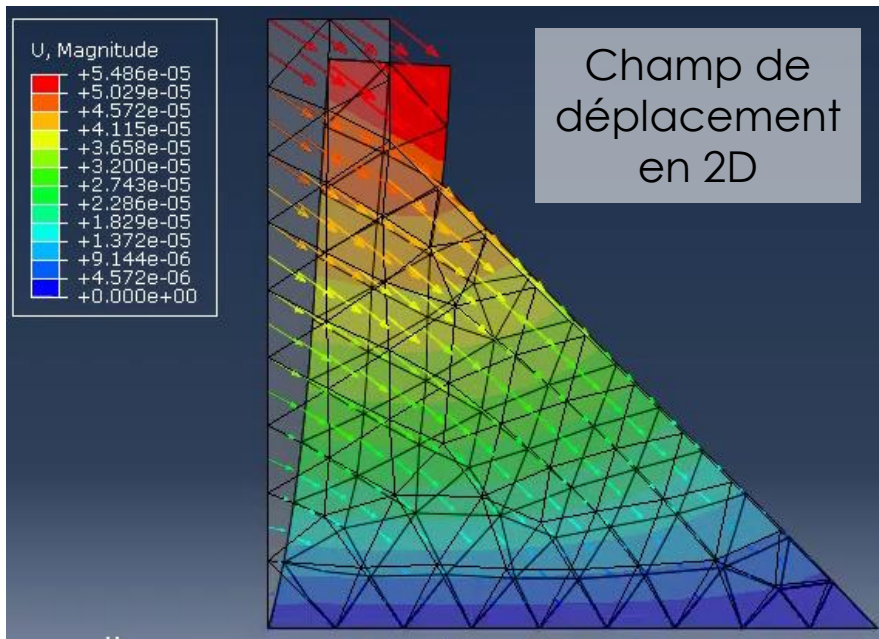
Barrage-poids 3D: onglet RESULTS

- ✓ Comparaison avec les résultats 2D précédents ?

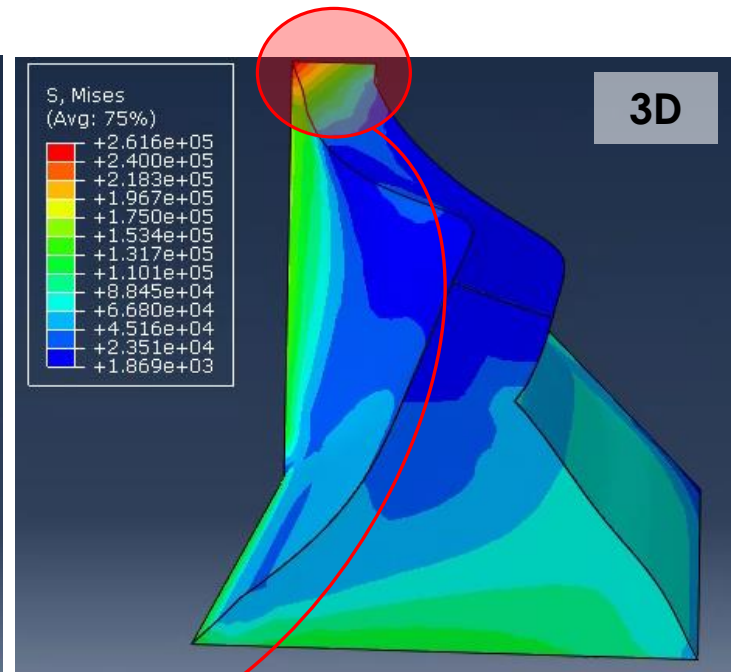
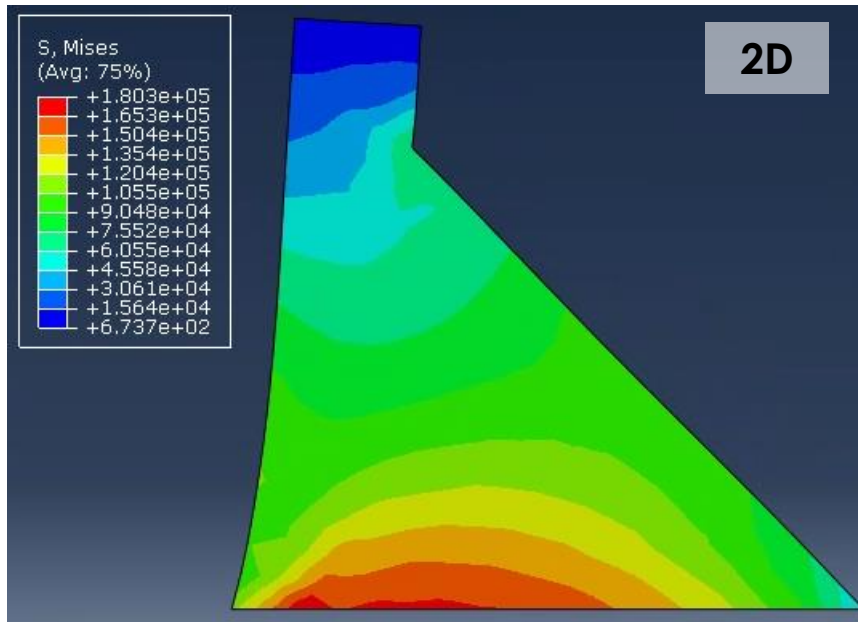
→ Coupe selon z à z=25m



- ✓ Résultat similaires (à **mais à quel point?**) en termes de **déplacements** au centre du barrage



Barrage-poids 3D: onglet RESULTS

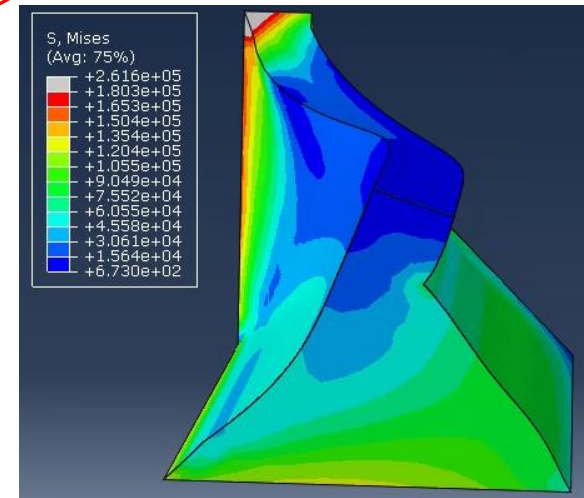


Nouvelles concentrations de contraintes sur les bords !

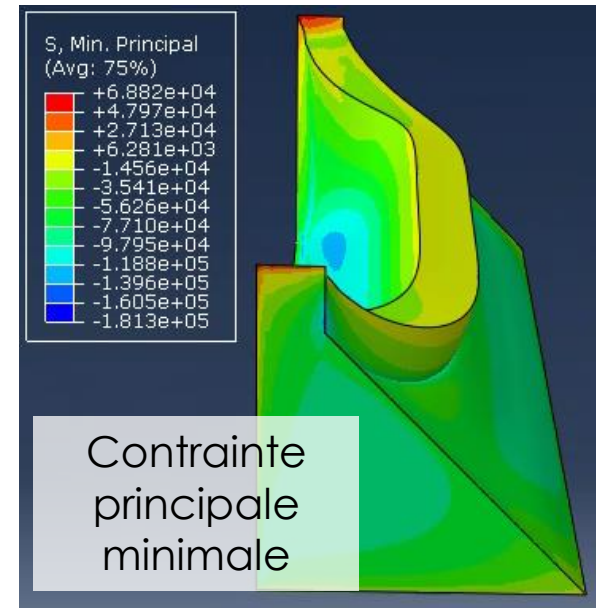
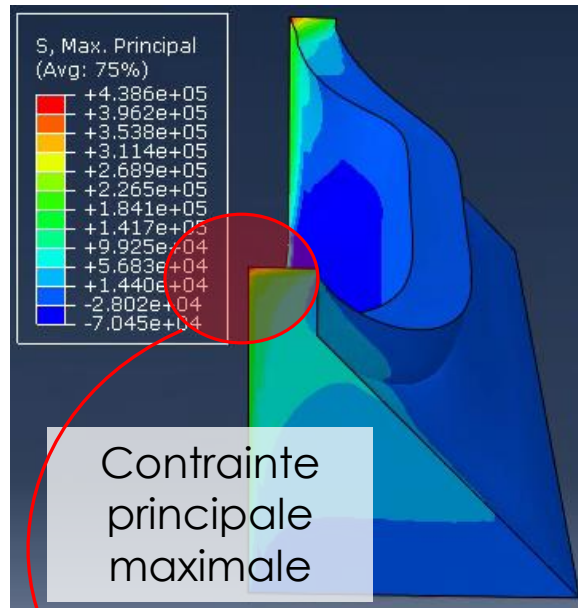
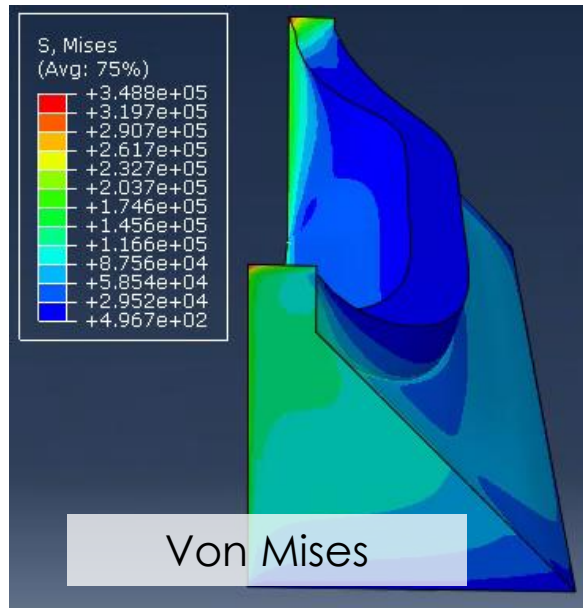
✓ En changeant l'échelle :



Répartition différente 2D / 3D !



Barrage-poids 3D: onglet RESULTS



Zone de traction due à l'encastrement !

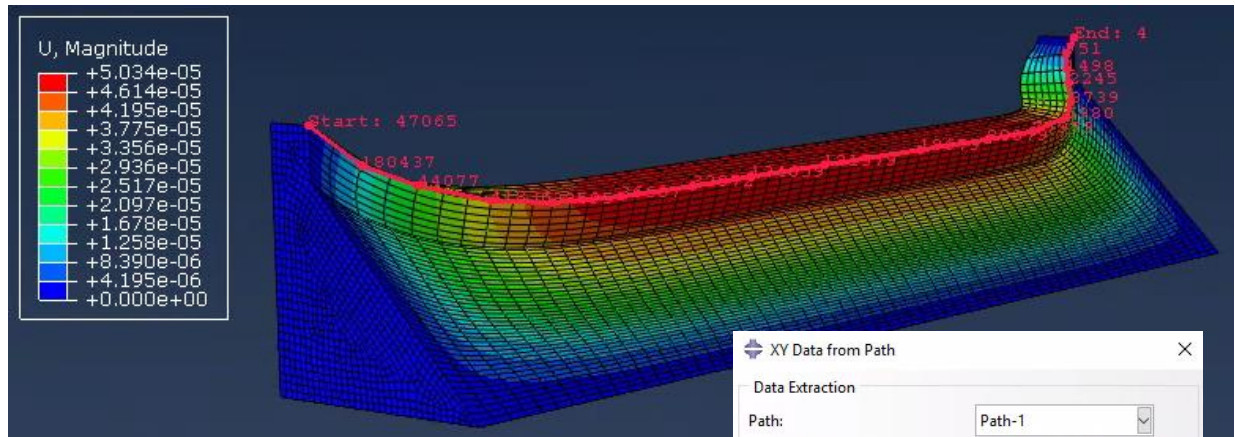
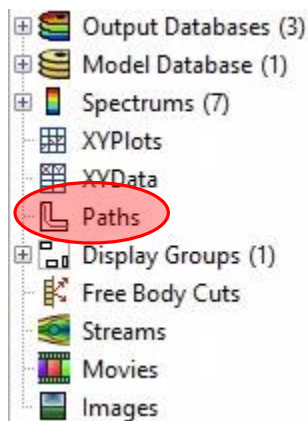
Limite élastique **en compression:**
~35MPa

Limite élastique **en traction:**
~5MPa

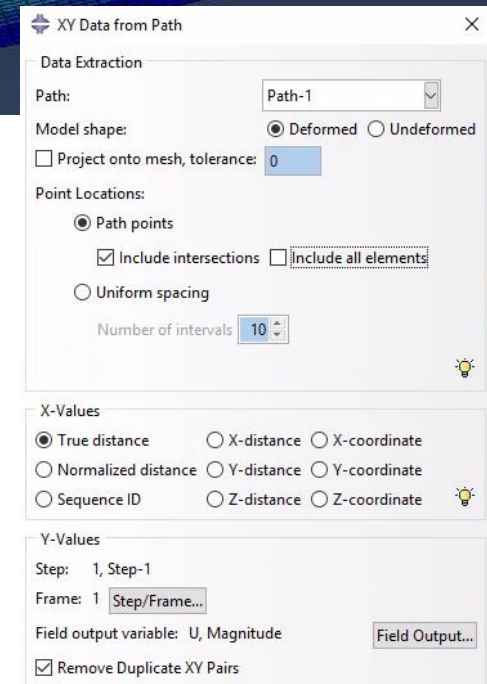
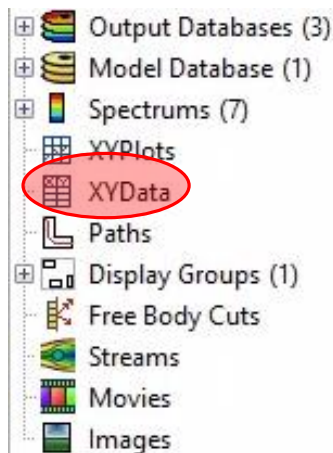
Facteur de sécurité ?

Tracé de courbes : evolution du déplacement le long du barrage

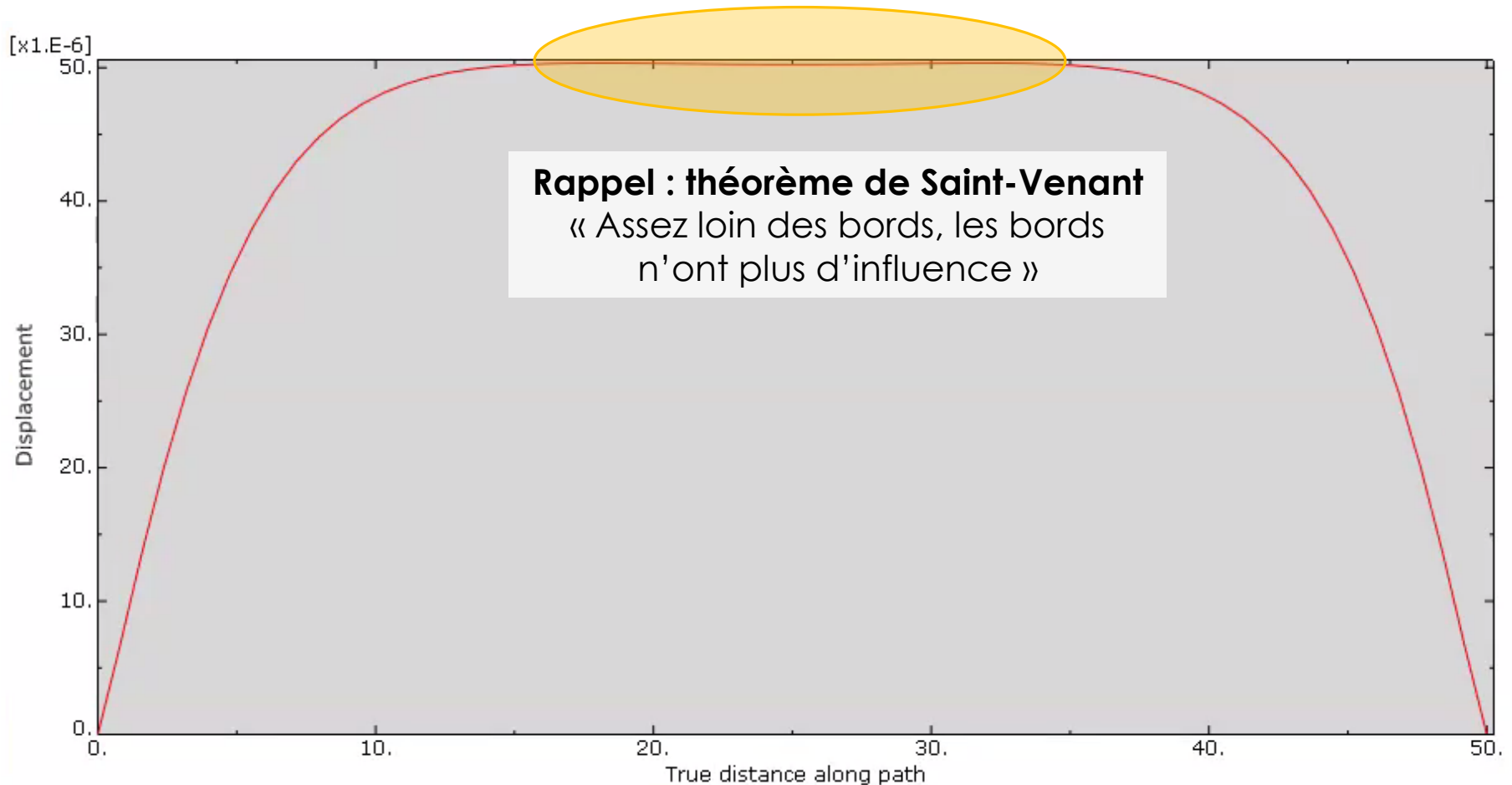
✓ *Paths* → *Node list* → *Add after* → Choisir des nœuds le long du barrage



✓ *XYData* → *Path* → *plot*



Tracé de courbes : evolution du déplacement le long du barrage



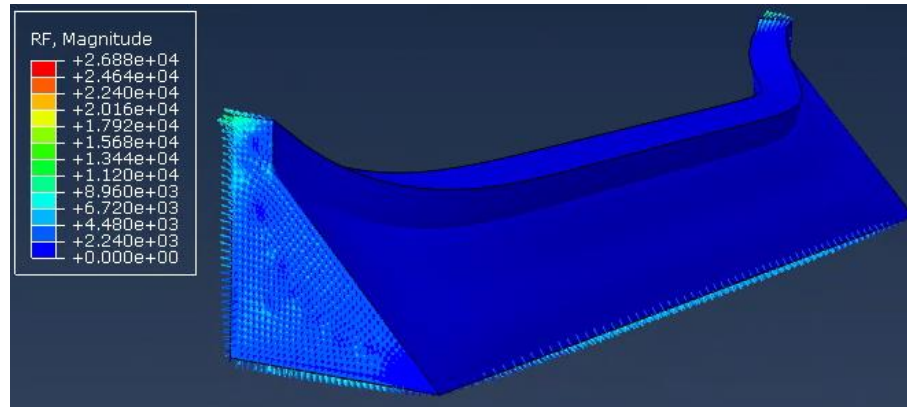
→ Evolution de l'amplitude du déplacement le long du barrage

Distribution des efforts sur les côtés ? (interface roche / barrage)

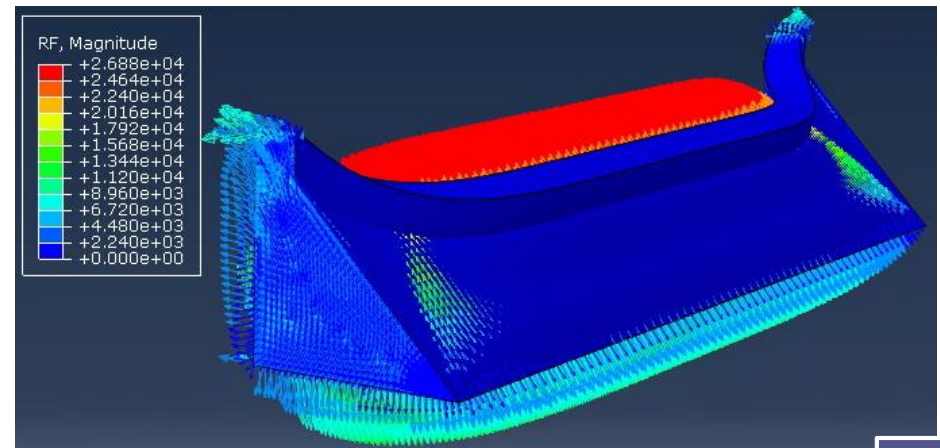
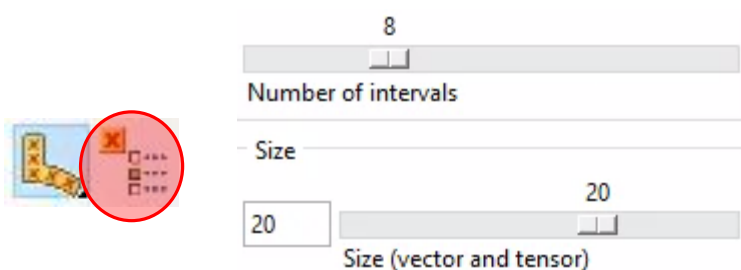
✓ Variable d'intérêt : RF « reaction forces »



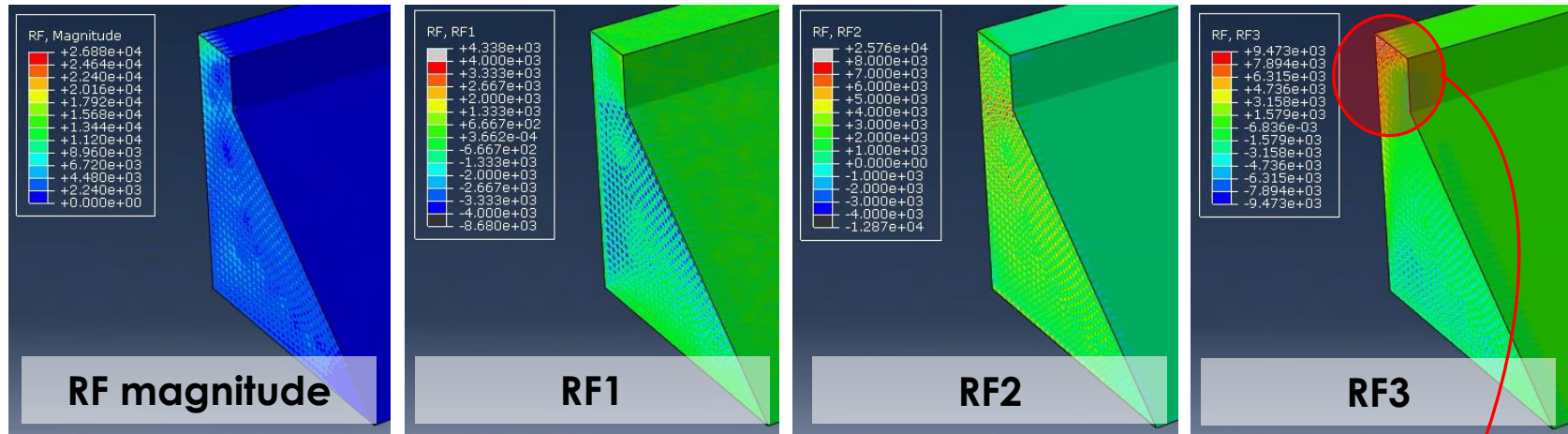
✓ Visualiser les vecteurs correspondants = **vecteurs-contraintes !!!** $\underline{t} = \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}$



✓ En augmentant la taille des vecteurs :



Distribution des efforts sur les côtés ? (interface roche / barrage)

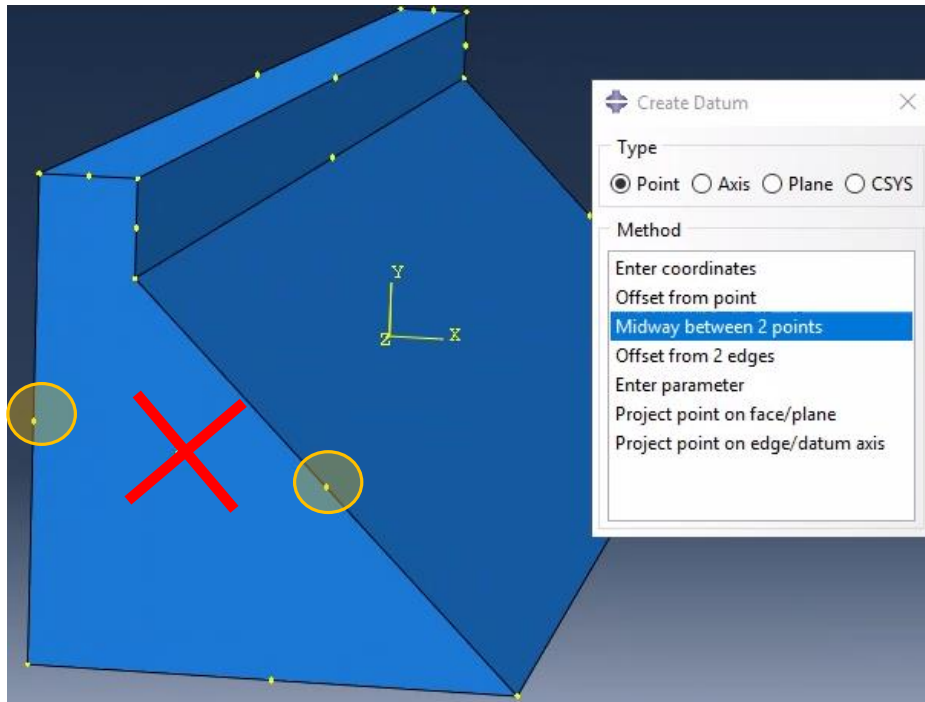


Dangereux : cisaillement à l'interface rocheuse

Dangereux : traction du béton (si encastrement...)

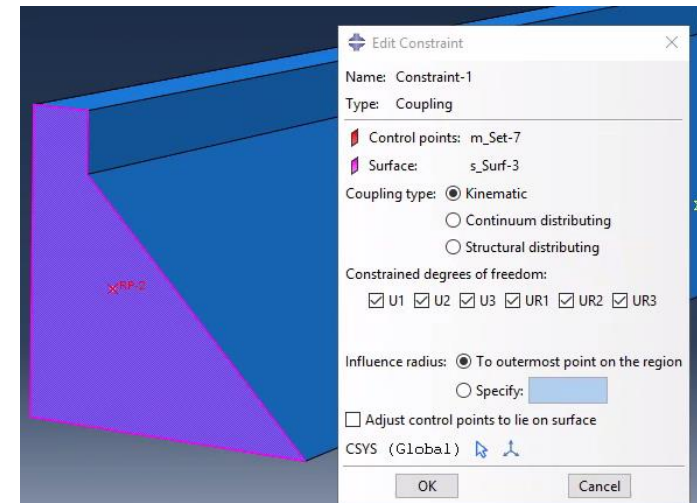
- ✓ **Question** : peut-on calculer la force de réaction totale sur cette face ?
- ✓ **UNE solution** : encastrent un seul « *reference point* » couplé à la surface

Barrage-poids 3D: module INTERACTIONS

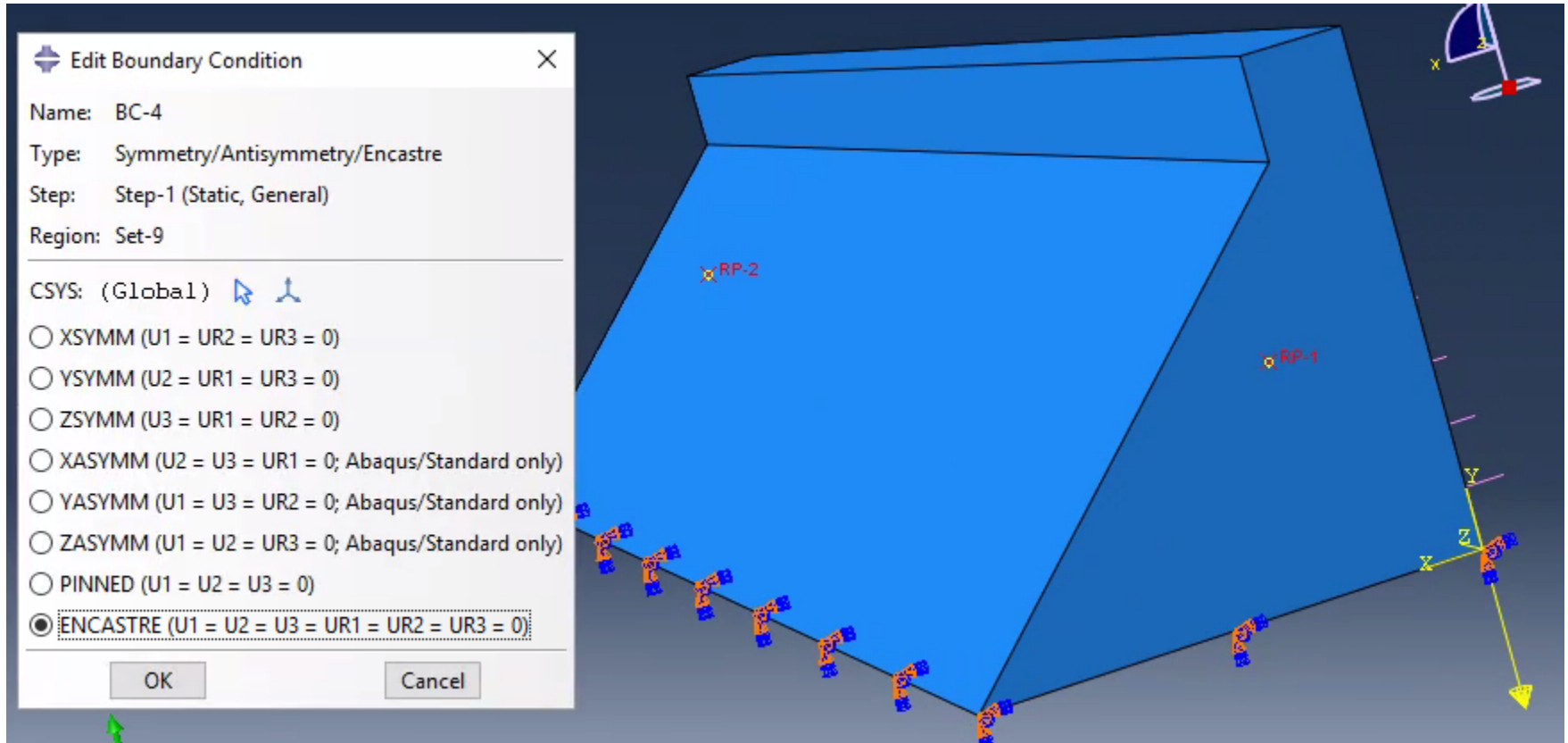


- ✓ Retour en arrière :
tools → *datum* → *midway between 2 points*
- ✓ Nouveau point qui sera défini comme « *reference point* »
- ✓ Nouveau point qui sera défini comme « *reference point RP* »

- ✓ Créer un couplage « *coupling* » entre le RP et la face
- ✓ Sélectionner la surface latérale et coupler tous les degrés de liberté
- ✓ Idem sur l'autre face !



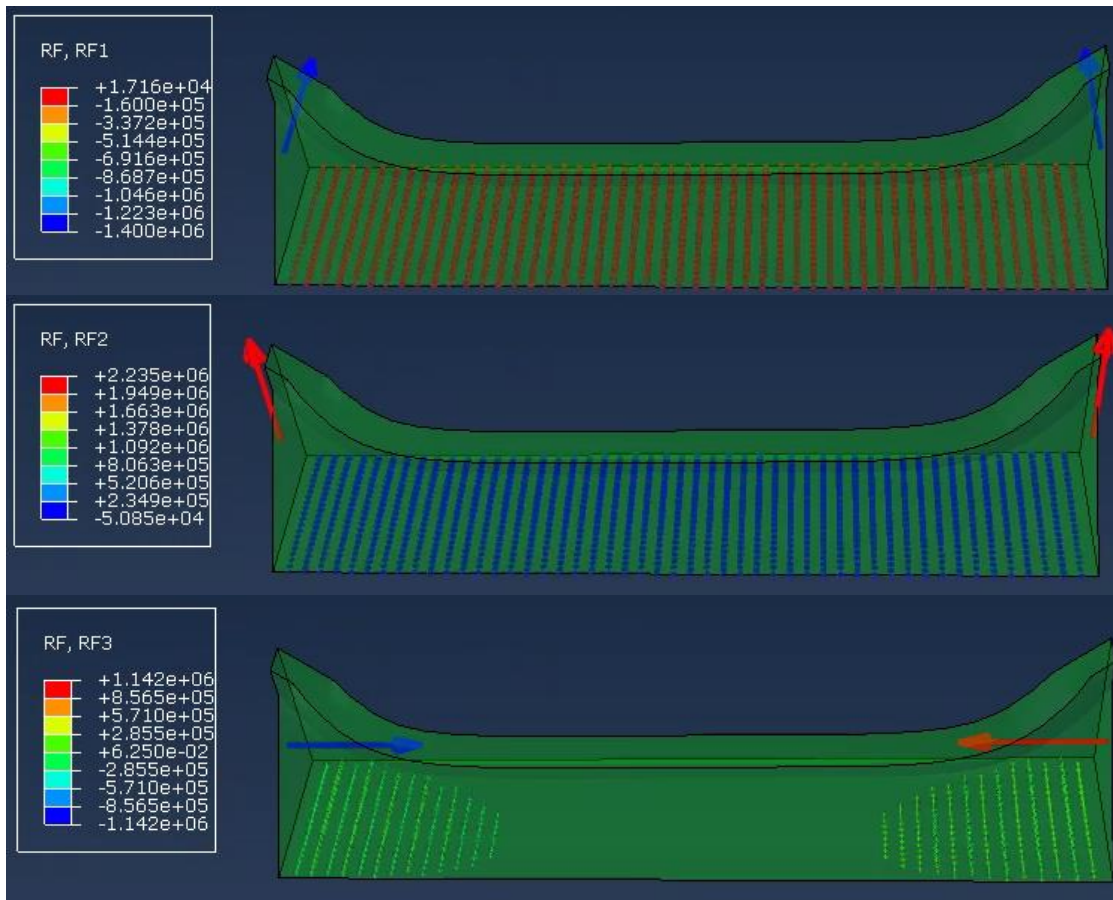
Barrage-poids 3D: module LOAD



✓ Encastrer les 2 « *reference points* » et relancer le calcul

Efforts totaux sur les parois latérales au niveau des *reference points*

- ✓ Visualiser le vecteur RF comme précédemment (échelle par défaut)
- ✓ Composantes de RF (chercher l'option « translucide » !)



Max(RF1)=-1.4e6 N

Dangereux :
cisaillement à
l'interface rocheuse

Max(RF2)=2.2e6 N

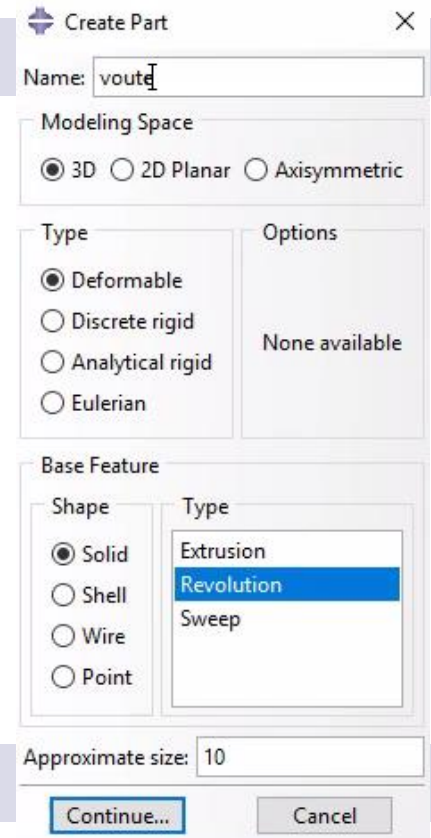
Max(RF3)=1.1e6 N



Le barrage-voûte

Création d'une nouvelle pièce de révolution

- ✓ File → New model database → Standard/explicit
- ✓ Définir son répertoire de travail (*set work directory*)
- ✓ Créer une pièce :
- ✓ Seconde étude : *3D planar*, « *base feature* » = **solid**
type=revolution
- ✓ Taille approximative de l'esquisse = 10



Quelques conseils pour dessiner l'esquisse

- ✓ Créer des points en entrant les coordonnées  Pick a point--or enter X,Y:
- ✓ Fixer le point dans l'espace en insérant une contrainte  « fixed »
- ✓ D'autres points pourront coïncider ensuite avec lui  : coïncident

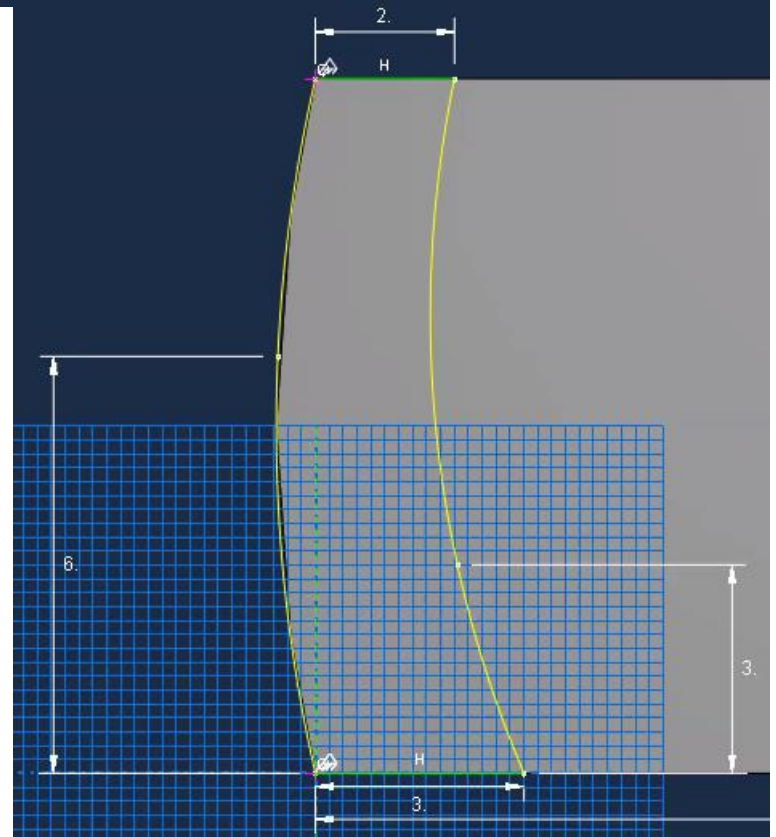
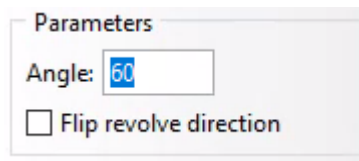
Le barrage-voûte: module PART



- ✓ Créer un axe pour la révolution à 50m de l'origine
- ✓ Créer l'esquisse ci-contre
- ✓ Quant tout est fini : *done*

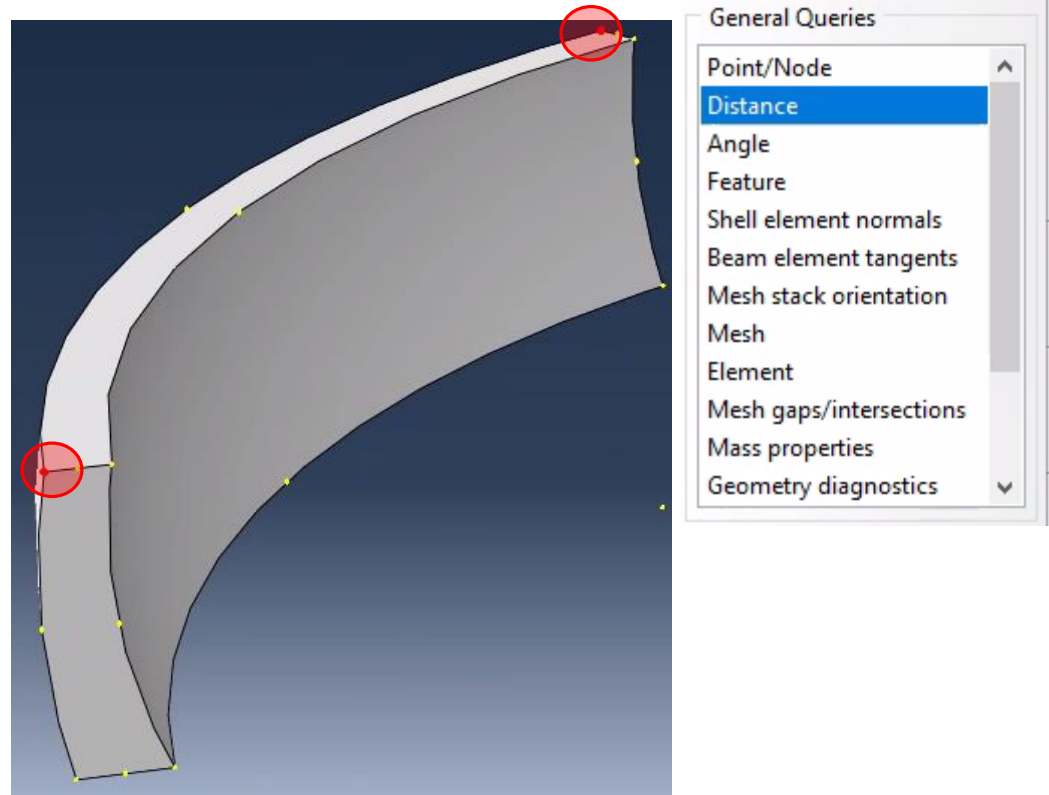
← ✗ Sketch the section for the solid extrusion Done

- ✓ Révolution d'un angle de 60°



Le barrage-voûte: module PART

- ✓ Dans le cahier des charges : longueur du barrage = 50mètre
- ✓ Comment vérifier ?
- ✓ *Tools* → *query* → *distance*



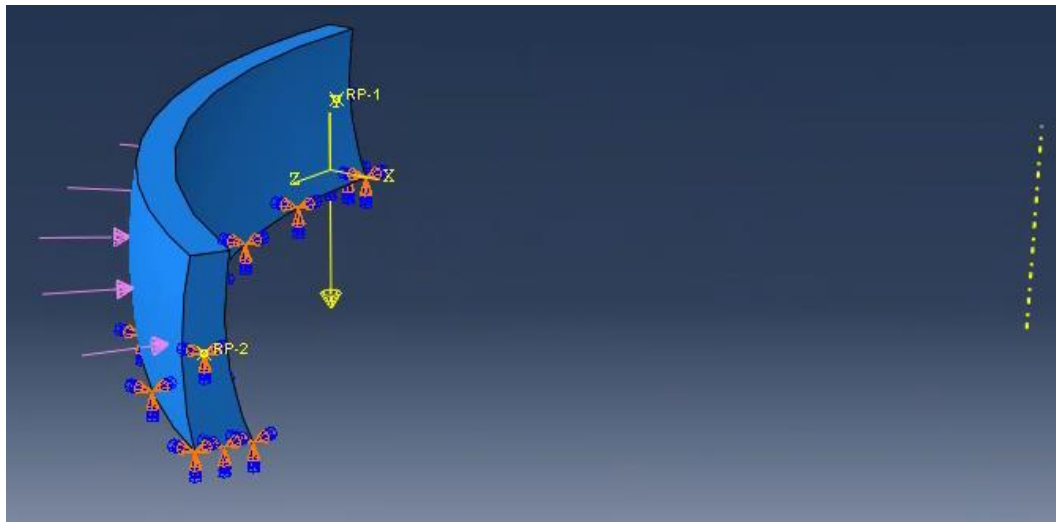
- ✓ Résultat dans la fenêtre de dialogue :

```
Point 1: 0., 10., 0. Point 2: 25., 10., 43.30127  
Distance: 50. Components: 25., 0., 43.30127
```

Matériaux, section, assemblage, step

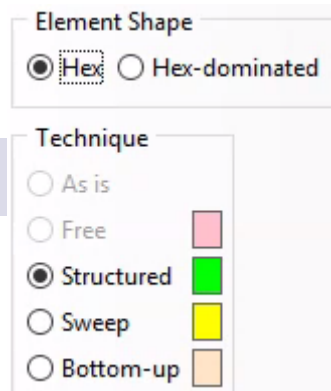
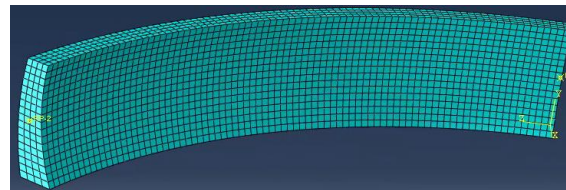
- ✓ Rien ne change !! → reprendre les points précédents

Conditions aux limites : comme précédemment = “reference points”

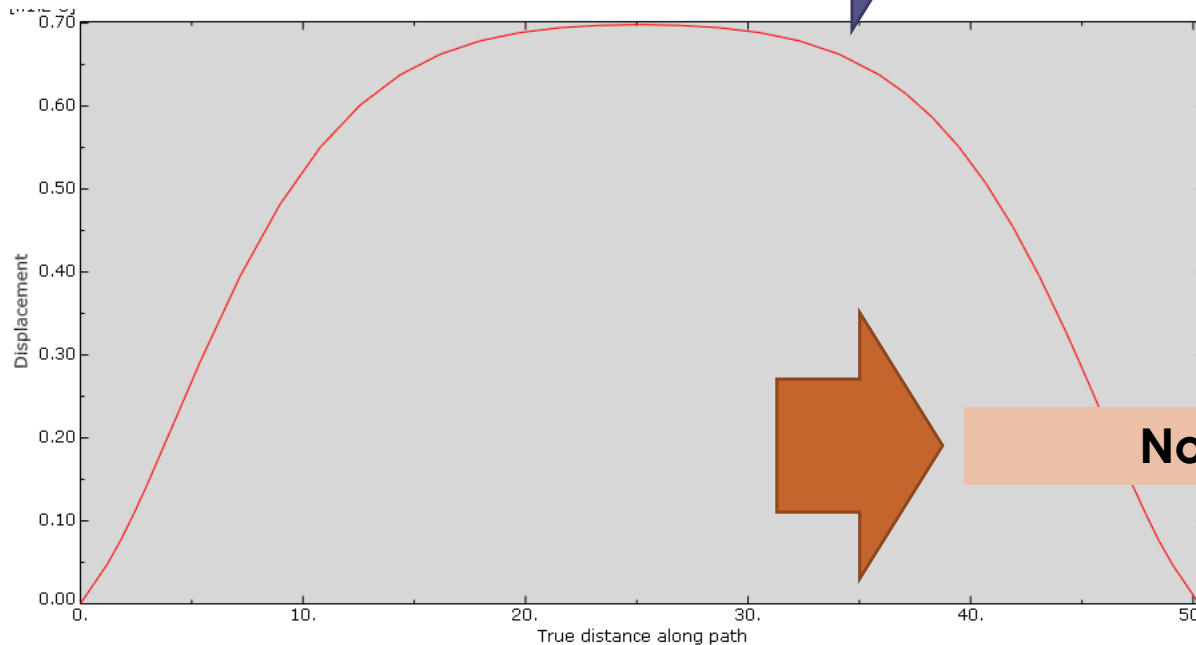
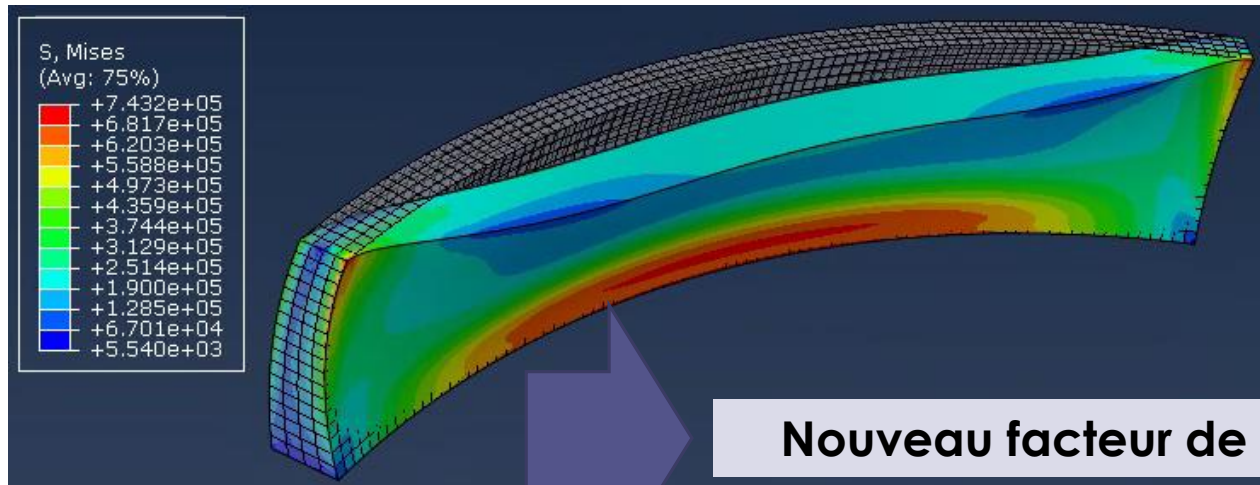


Mesh : comme précédemment

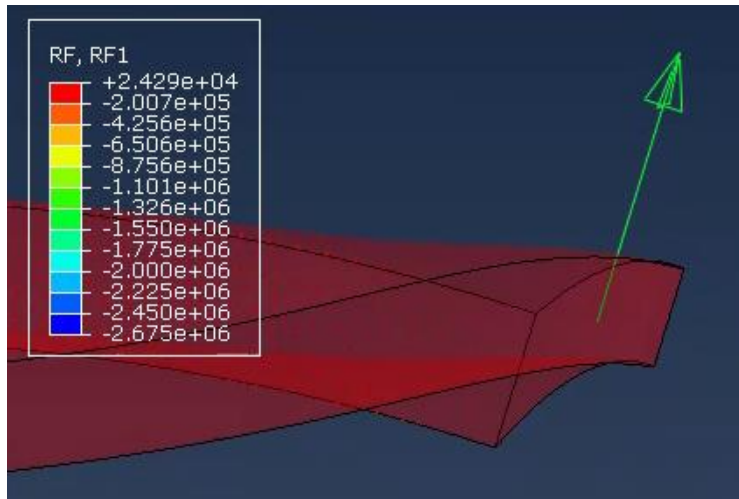
- ✓ Maillage hexaédrique, « structured »
- ✓ Éléments quadratiques



Le barrage-voûte: onglet RESULTS

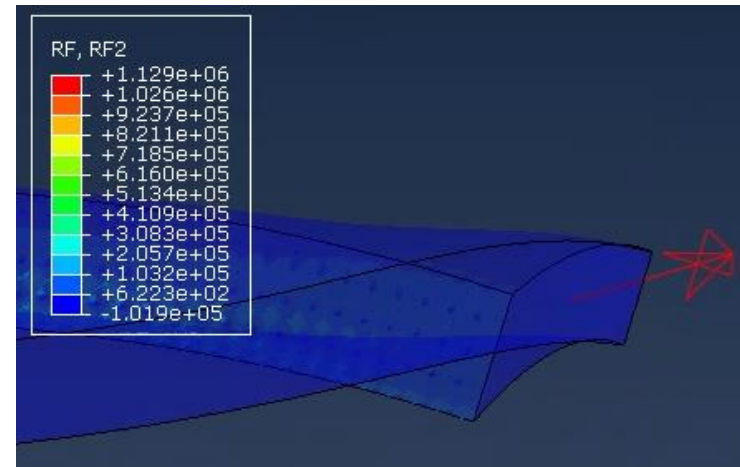


Le barrage-voûte: onglet RESULTS

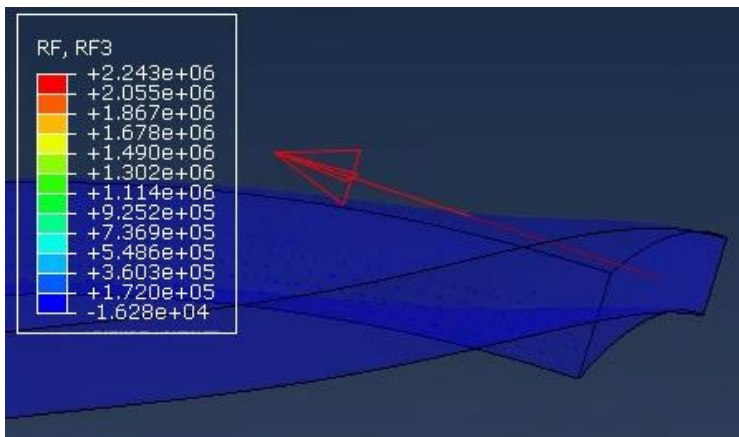


Max(RF1)=-1.5e6 N

Max(RF2)=1.1e6 N



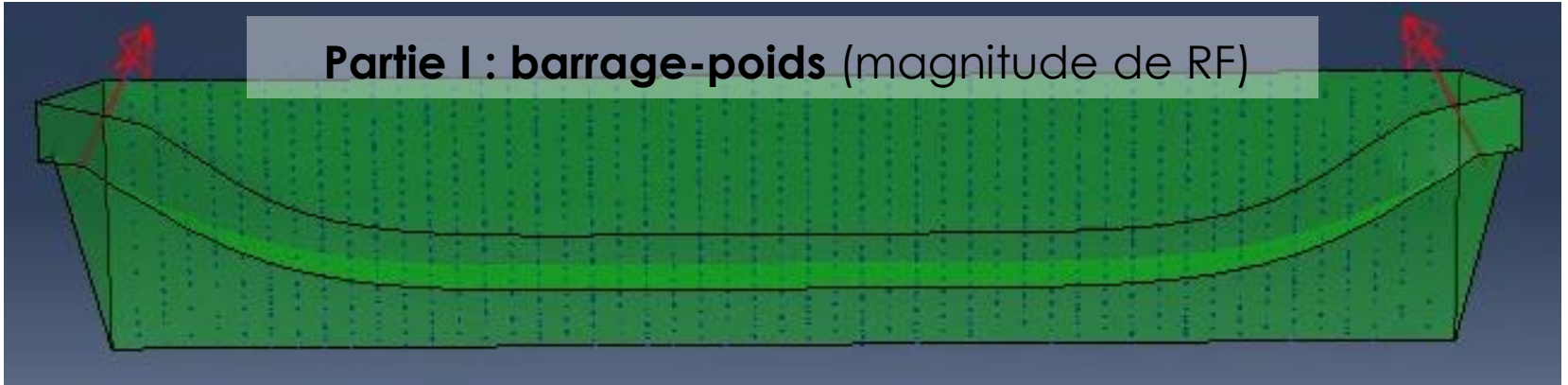
Max(RF3)=2.2e6 N



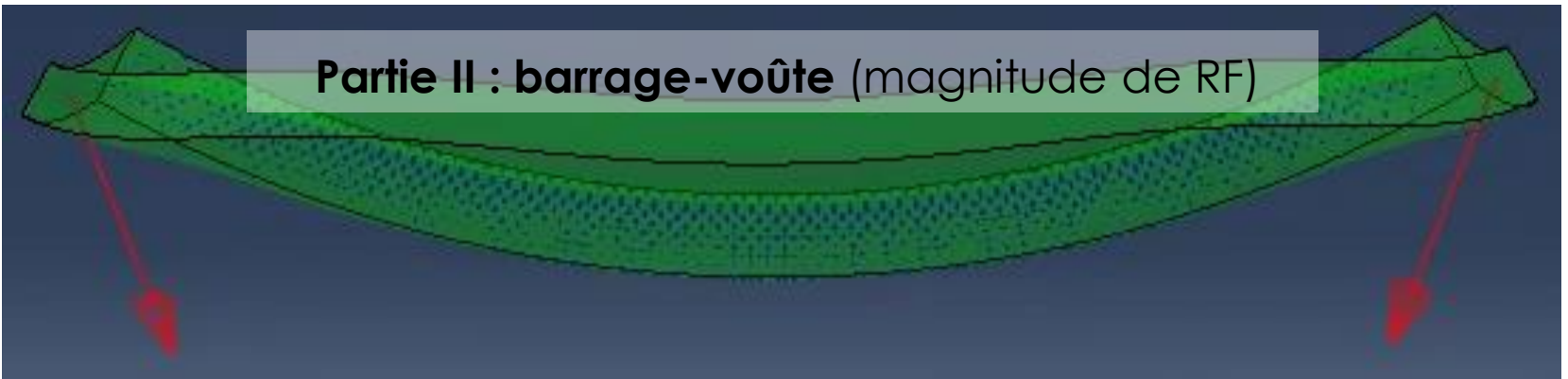
Comparatif avec barrage-poids ?

Le barrage-voûte: onglet RESULTS

Partie I : barrage-poids (magnitude de RF)



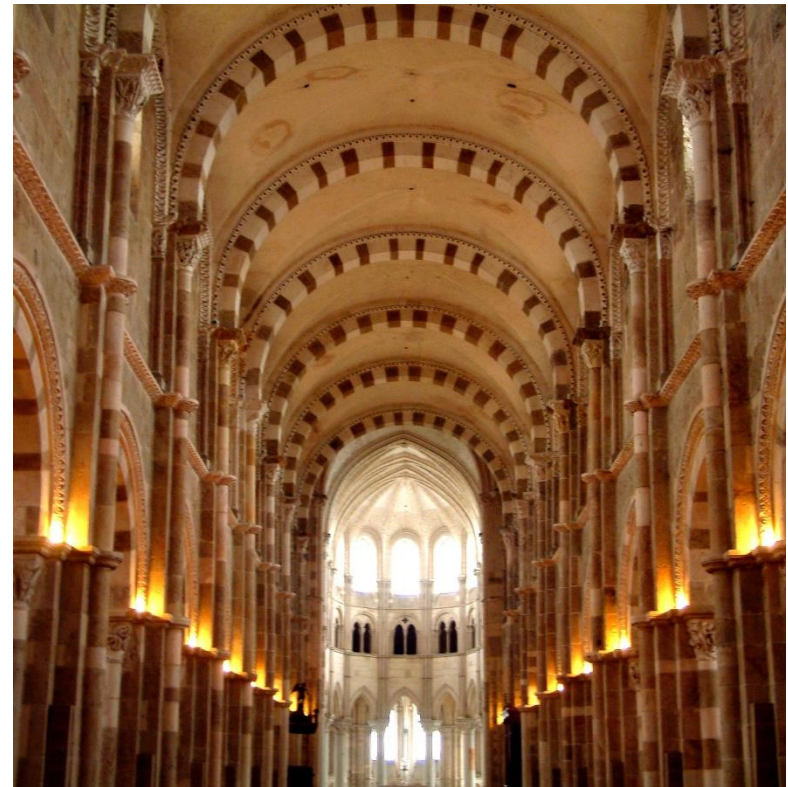
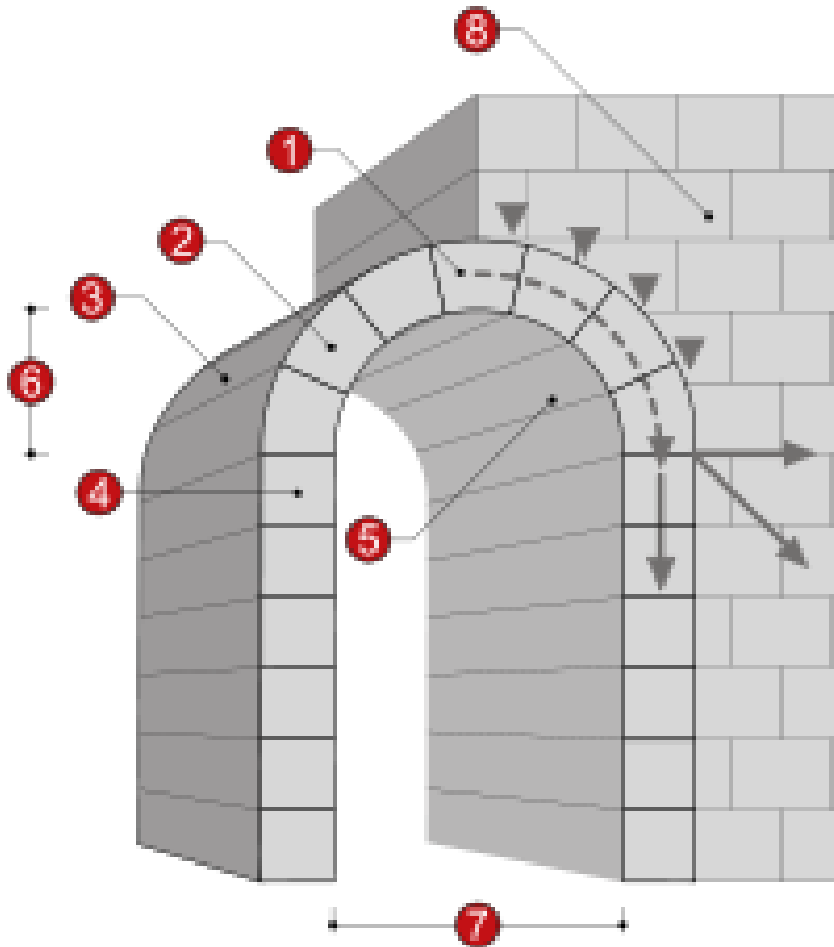
Partie II : barrage-voûte (magnitude de RF)



L'effort résultat vient comprimer le barrage plutôt que le cisailer !!



C'est le principe de la voûte !!



A retenir aujourd'hui

- ✓ Sensibilité au maillage
- ✓ Différence 2D / 3D
- ✓ Solides par extrusion ou révolution
- ✓ Analyse des contraintes et efforts résultants
- ✓ Tracé de courbes le long de chemins

