GENIE CIVIL

Développements récents en modélisation EF 3D

Apports pour l'Ingénierie Géotechnique

David REMAUD

itech

Contexte

- Focus sur les modèles Eléments Finis 3D
- Historique des utilisations du code CESAR
  - Modélisations des utilisateurs
  - Expertises IFSTTAR (ex LCPC)
  - Assistance à l'utilisation
- Développements récents pour la nouvelle version 5

Plan

- Passage du 2D au 3D
- Développements récents en modélisations EF 3D
- Apports pour l'ingénierie géotechnique

Passage du 2D au 3D

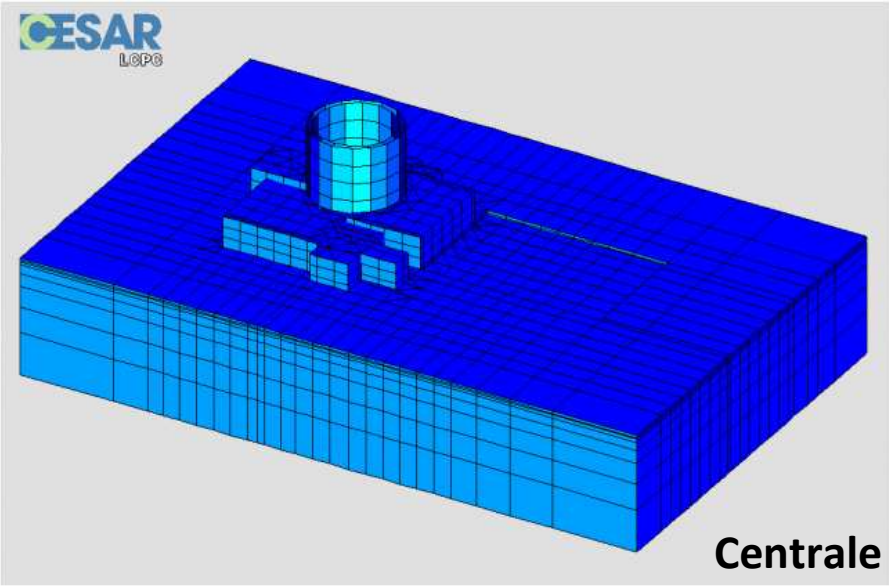
- Calculs EF en ingénierie géotechnique
  - Majoritairement 2D
  - Calculs courants en déformations planes (Remblais, talus, excavations, tunnels, Fondations superficielles…)
  - Calculs axisymétriques (Fondations superficielles, tunnels, forages…)

Passage du 2D au 3D

- Limites des calculs 2D
  = Hypothèses simplificatrices
  - Structures « linéaires » ou de révolution
  - Sols « linéaires » ou de révolution
  - Ancrages, lits d'inclusion, butons
    = rigidités équivalentes par mètre-linéaire
  - Représentation plane de ces inclusions
    => assurer la continuité des mouvements de sol

Passage du 2D au 3D

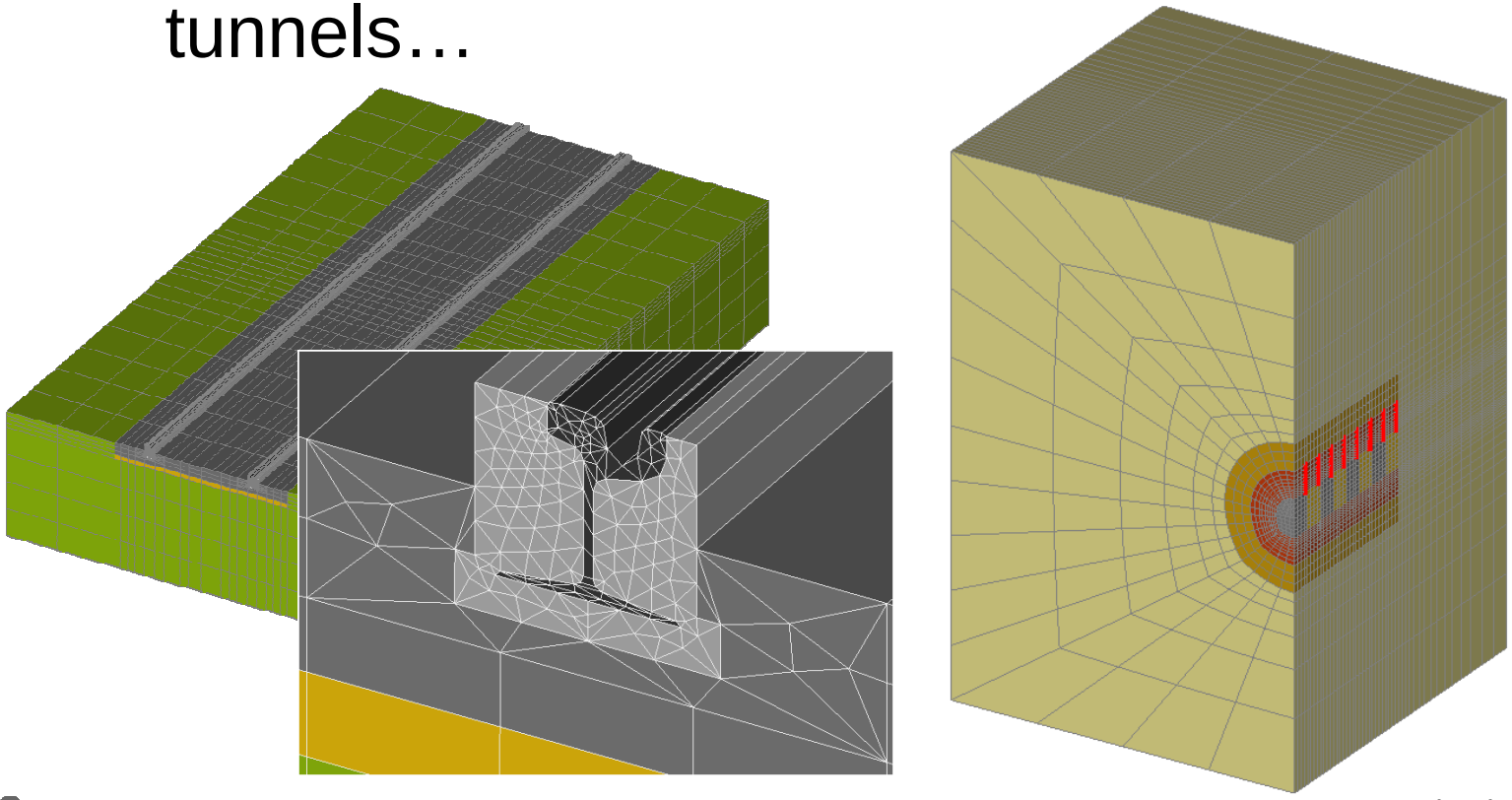
- Passage aisé du 2D au 3D
  - Extrusion verticale : fondations, fouilles, puits…



Centrale nucléaire et sa fondation
EDF – v3

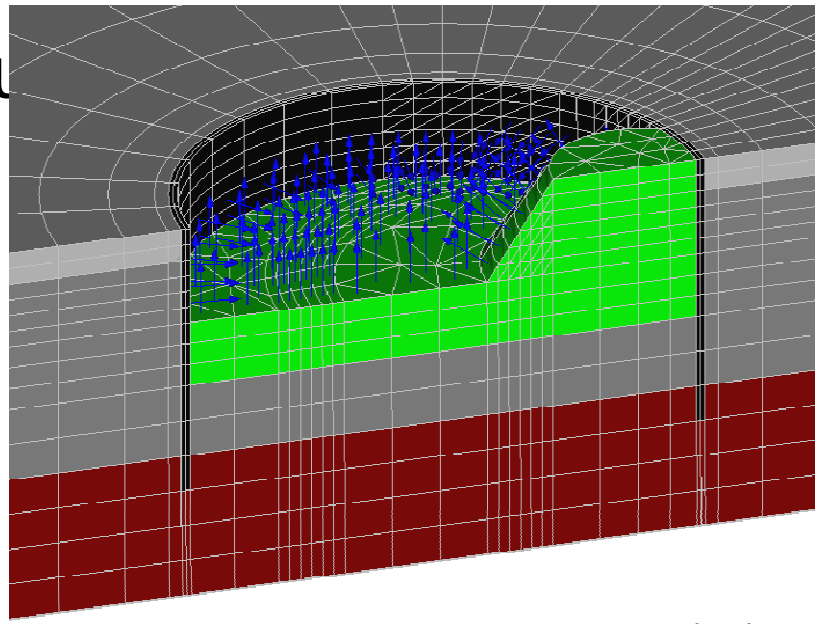
Passage du 2D au 3D

- Passage aisé du 2D au 3D
  - Extrusion horizontale : talus, linéaires, tunnels…



Passage du 2D au 3D

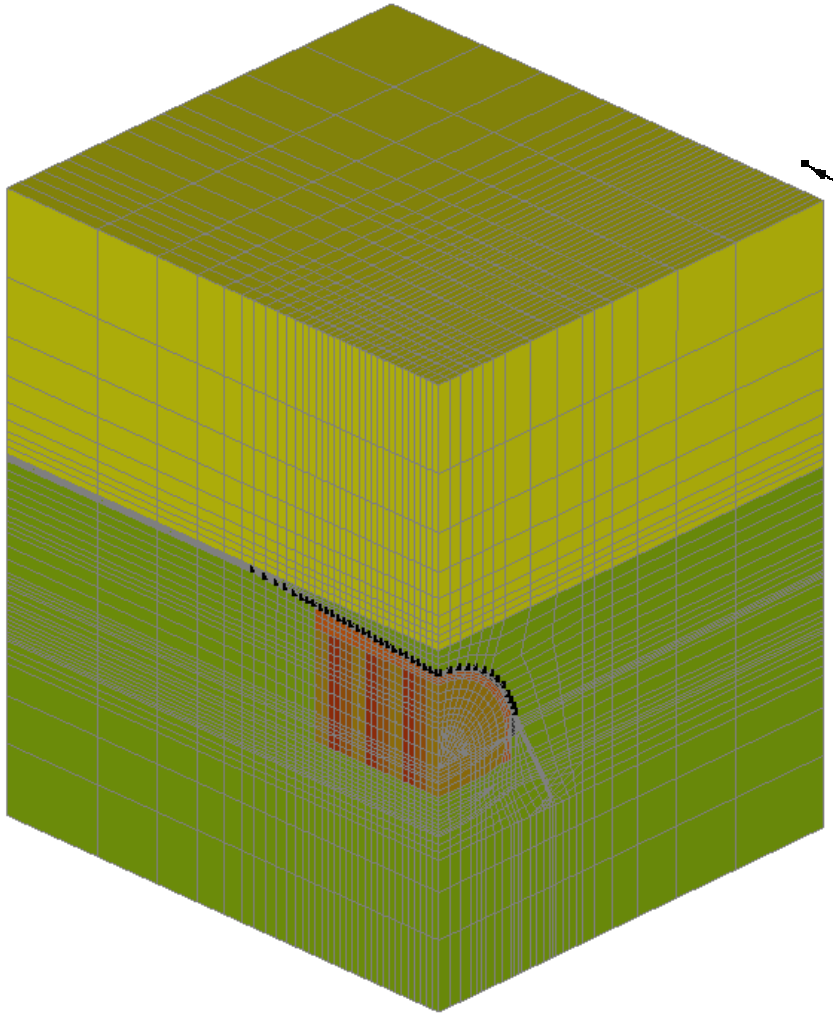
- La majorité des cas 3D nécessite une modélisation géométrique 3D
  - Stratigraphie
  - Géométrie du projet étudié
  - Phasage de travau

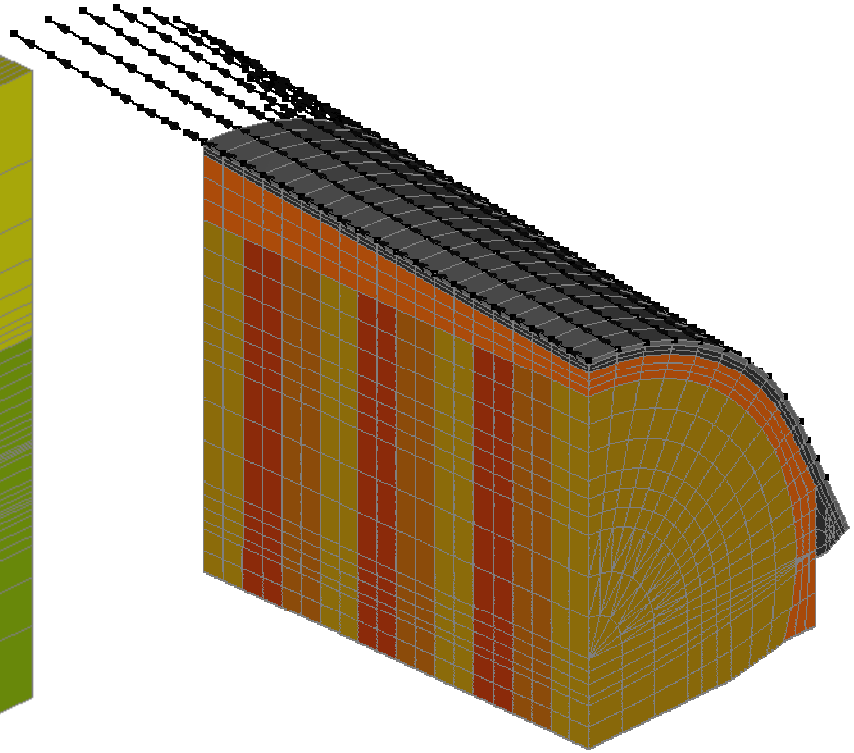


Cité des Congrès – Nantes
LCPC – Solétanche-Bachy – v3

Passage du 2D au 3D

Tunnel avec voûte parapluie
Vinci – v4

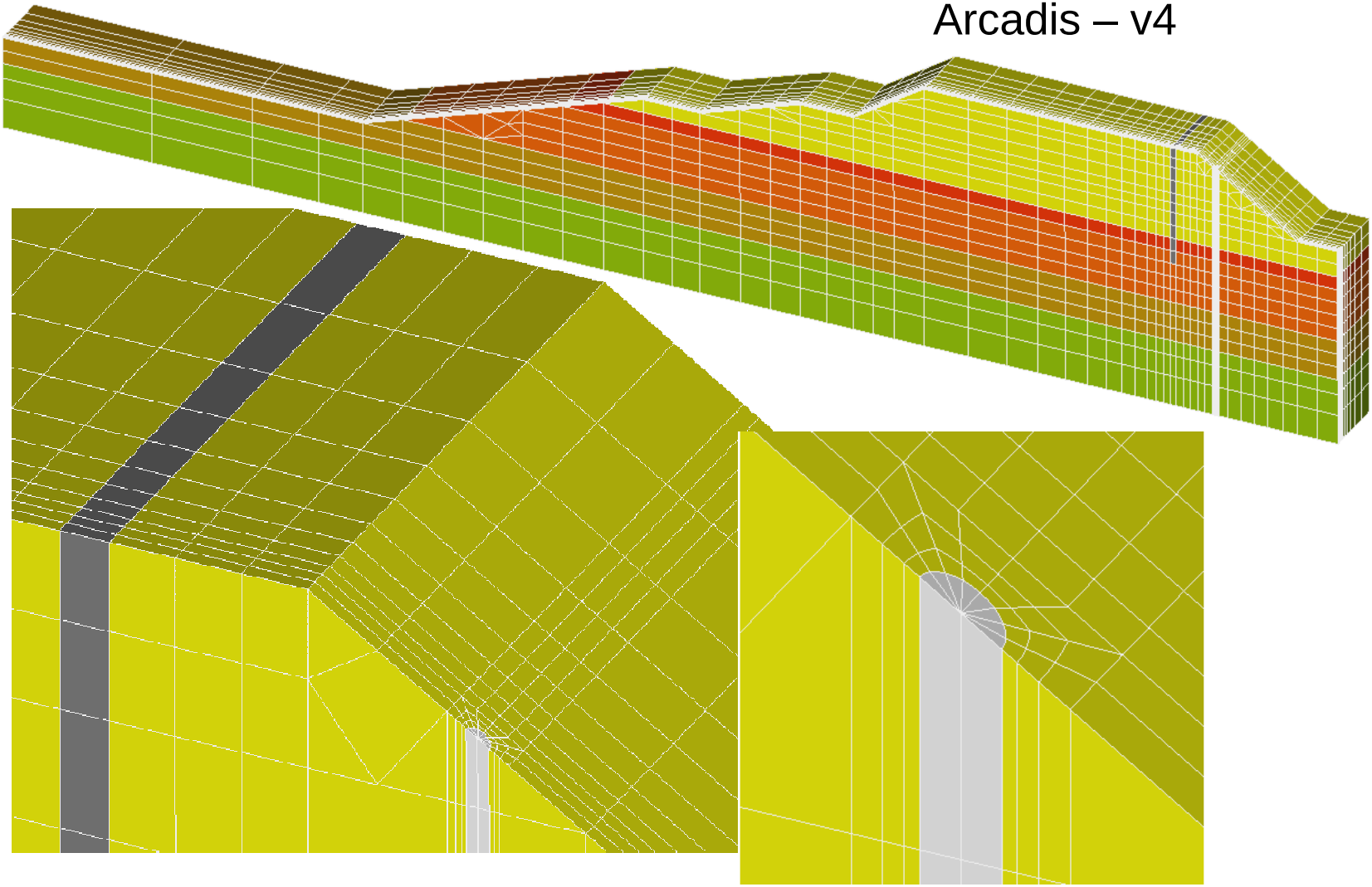




Passage du 2D au 3D

Le Havre – Port 2000

Arcadis – v4

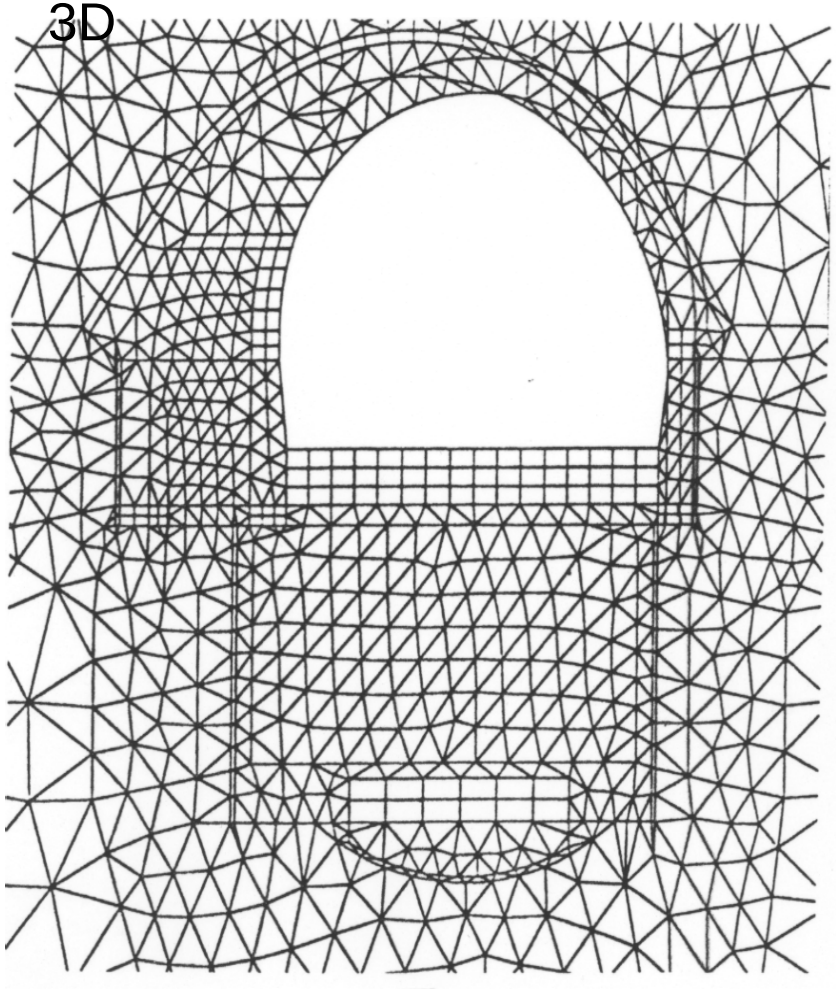


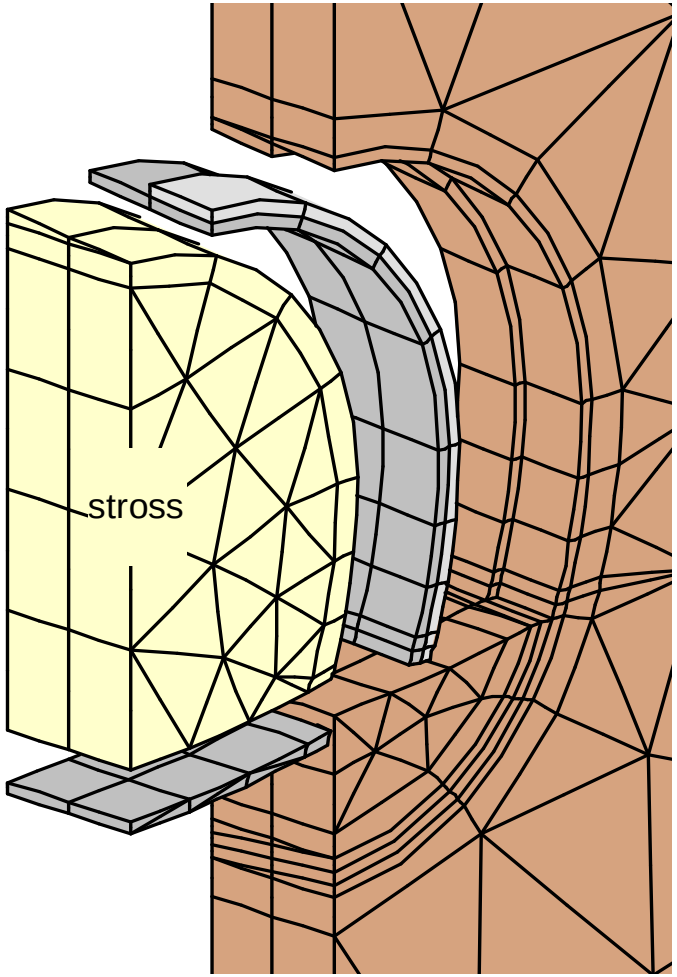
Passage du 2D au 3D

- Freins à l'utilisation des calculs 3D
  - Temps de modélisation
  - Temps de calcul
  - Outils d'analyse
  - Non-équivalence des densités de maillages 2D-3D

Passage du 2D au 3D

Illustration de la non équivalence des densités de maillages 2D-3D





Passage du 2D au 3D

- Le calcul 3D était utilisé dans de cadre de projet où le temps d'ingénierie est valorisable
  - pour les projets d'envergure,
  - en expertise.

Développements récents

- Liés à l'ingénierie logicielle (développement d'interfaces conviviales, utilisation des nouvelles capacités graphiques).
- Résultats de travaux de recherche.

Développements récents

- Outils DAO intégrés
  - Liaison avec des logiciels courants de dessin
    en BE (formats dxf, IGES ou STEP)
  - Fonctionnalités d'intersections
  - Modélisation du terrain

Développements récents

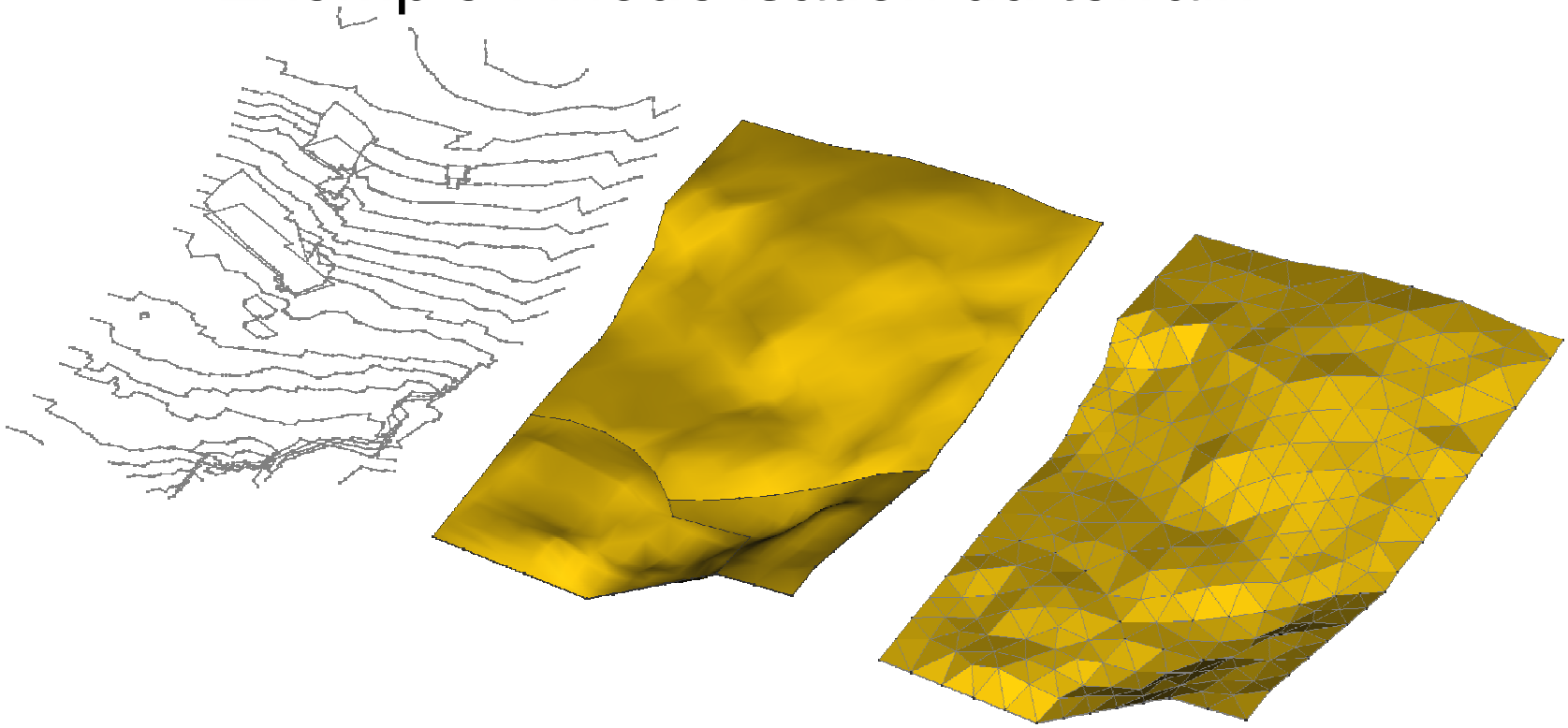
- Modélisation Eléments Finis
  - Mailleurs tétraédriques
  - Renforcements discrétisés (Ancrages, Boulonnage, Pieux…)
  - Renforcement par homogénéisation
    - Modélisation de renforcements (micro-pieux, boulonnage, inclusions
    - Pas de modélisation discrète
      - Moins de nœuds et d'éléments
      - Facilité d'étude paramétrique

Développements récents

- Calculs
  - Adaptation au environnements 64-bits
  - Algorithme de résolution multi-frontal
  - Procédures de calculs de coefficients de sécurité
    - Sur les efforts
    - Sur les résistances du sol (réduction c-phi)

Apport #1

- Facilité de modélisation géométrique
  - Exemple : Modélisation du terrain

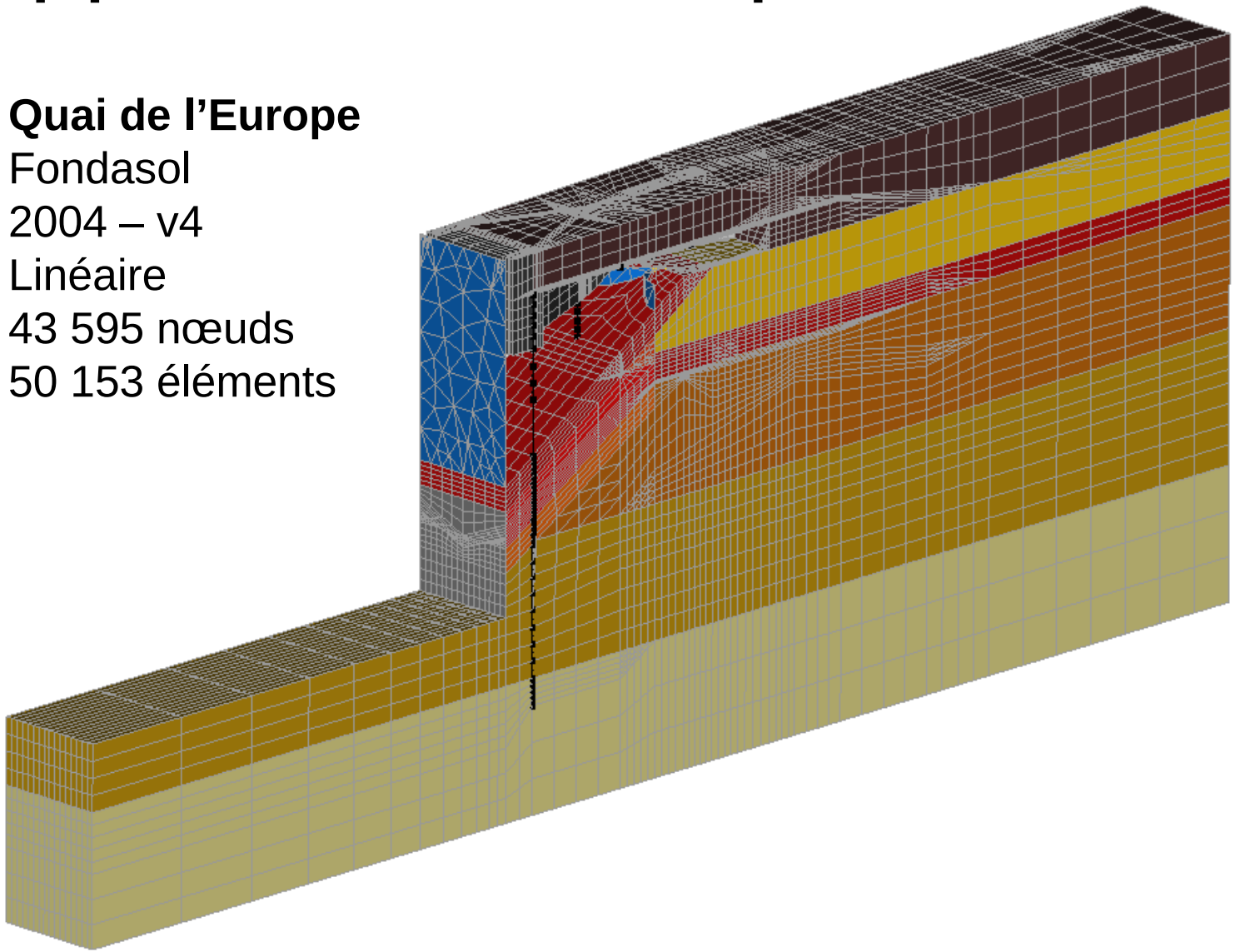


Apport #2

- Mailleurs tétraédriques
  - Détails géométriques
  - Diffusion des densités de maillage
  - Facilité pour densifier le maillage

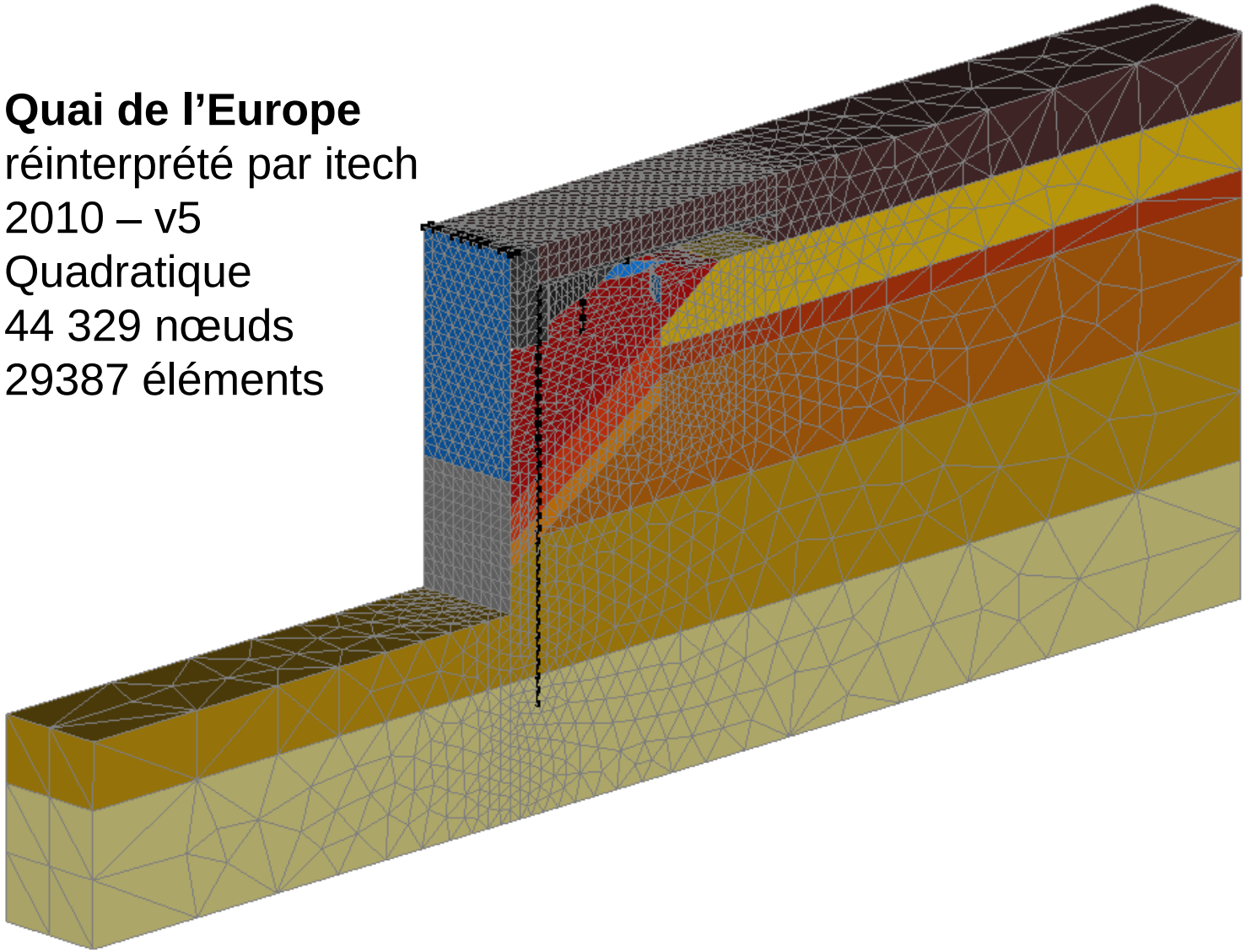
Apport #2 – Exemple 1

Quai de l'Europe
Fondasol
2004 – v4
Linéaire
43 595 nœuds
50 153 éléments

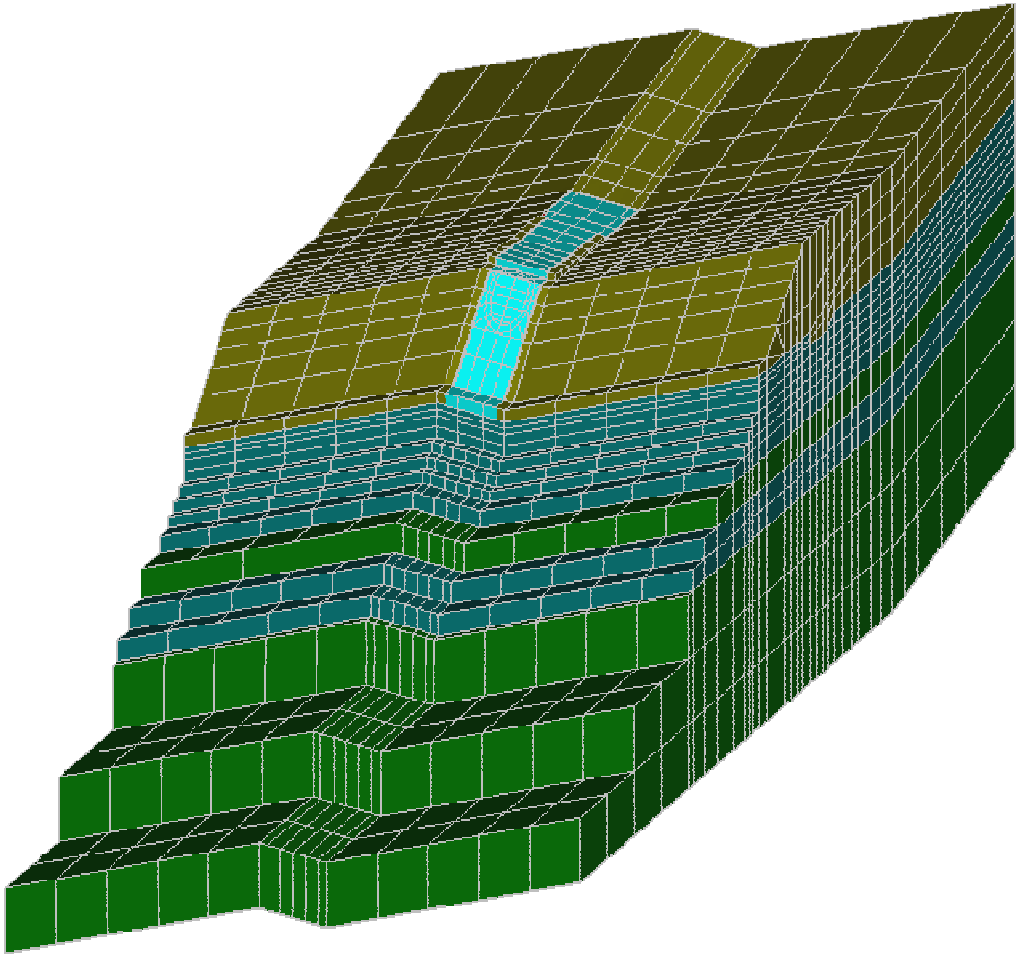


Apport #2 – Exemple 1

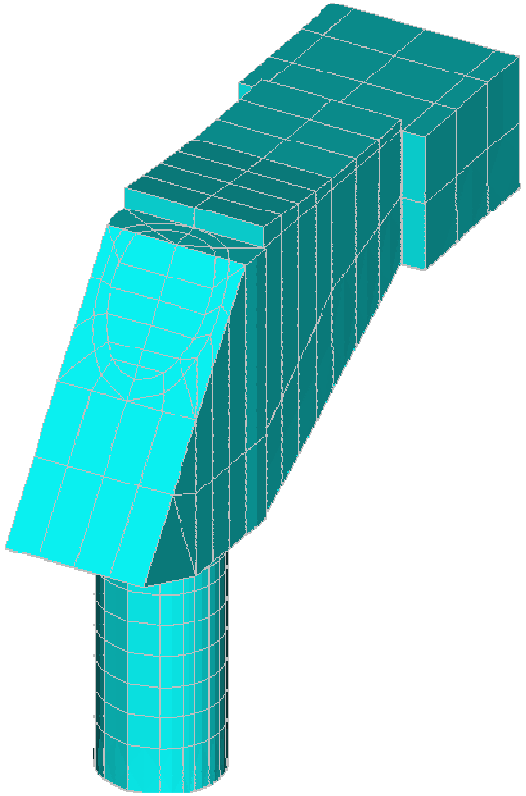
Quai de l'Europe
réinterprété par itech
2010 – v5
Quadratique
44 329 nœuds
29387 éléments



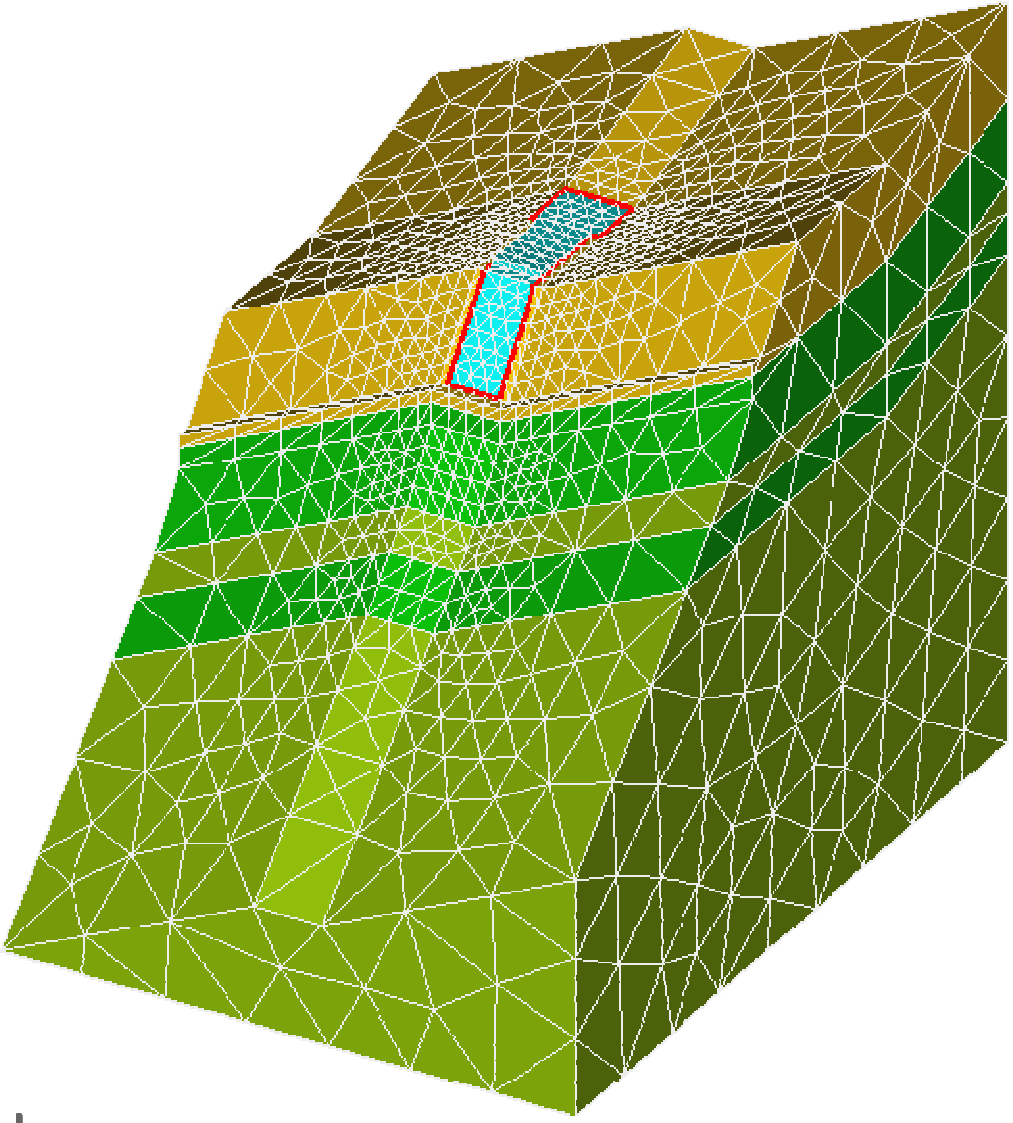
Apport #2 – Exemple 2



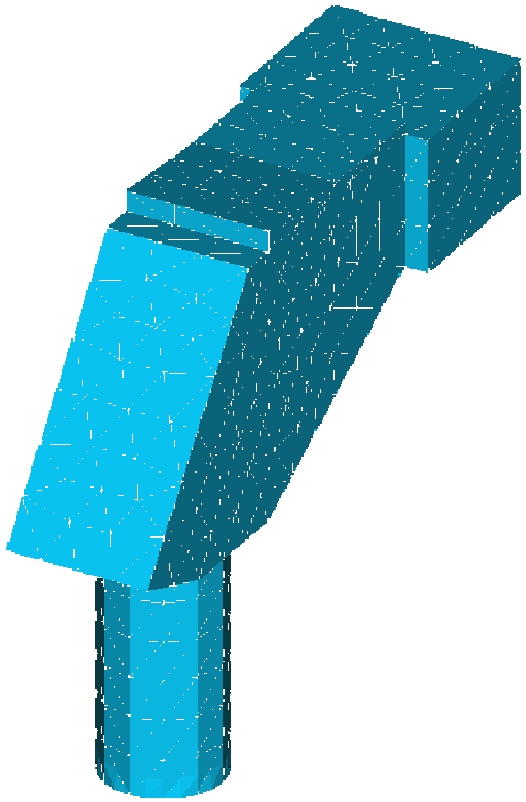
Viaduc Grande Ravine
Terrasol – 2003 – v4



Apport #2 – Exemple 2

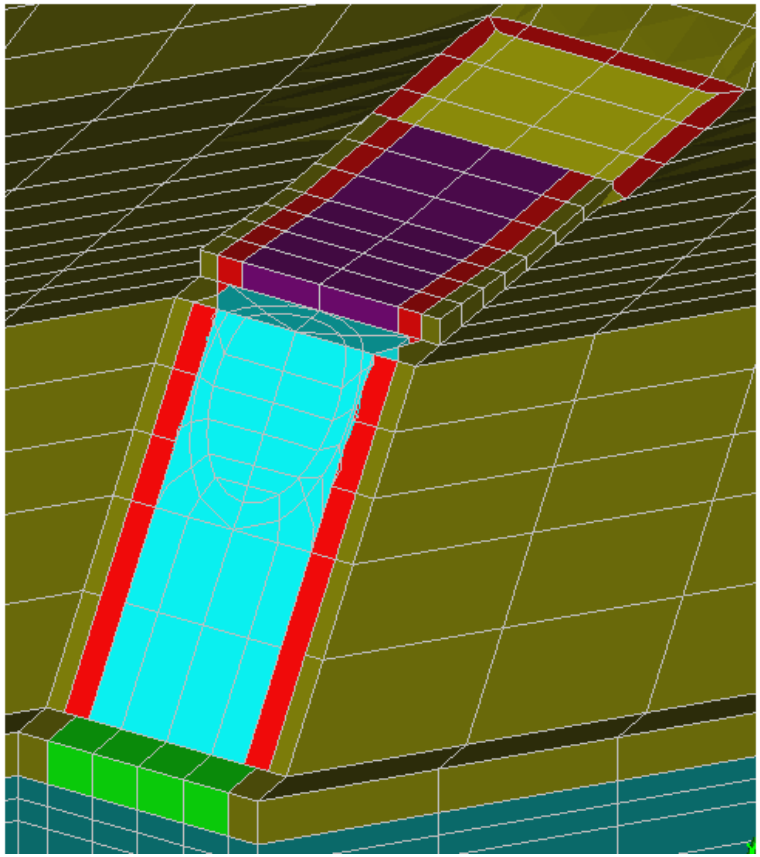


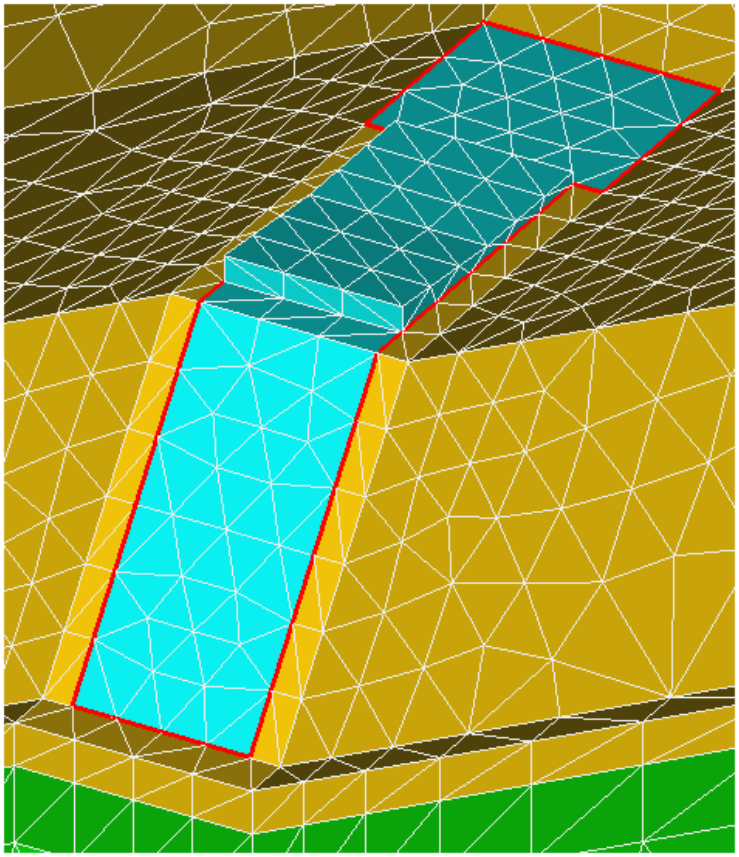
Grande Ravine
réinterprété par itech
2011 – v5



Apport #2 – Exemple 2

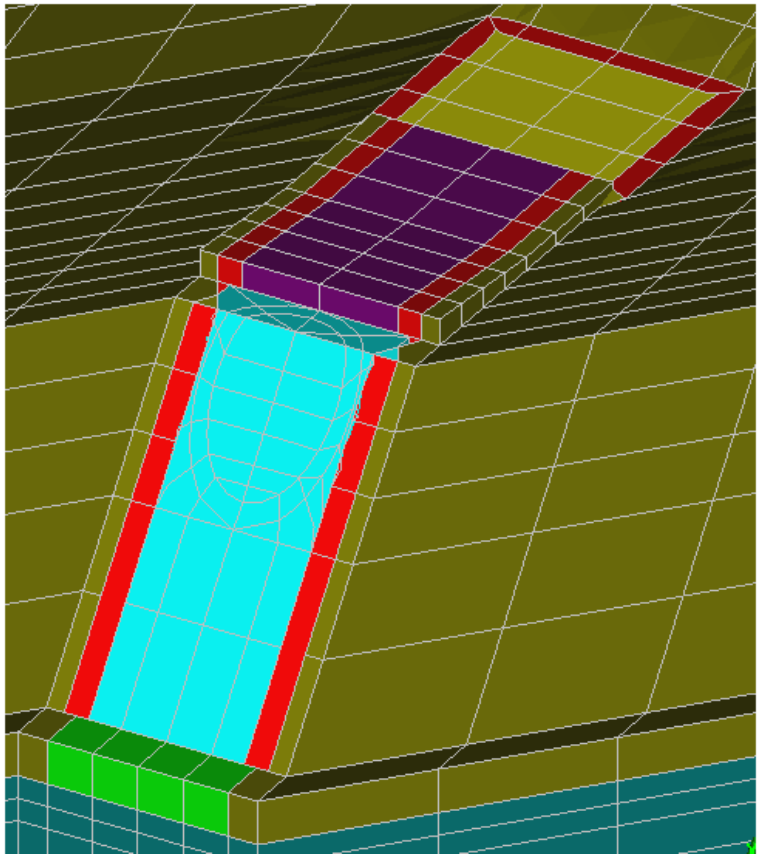
Détail de modélisation de la culée
(à nombre de nœuds total équivalent, environ 30000 nœuds)

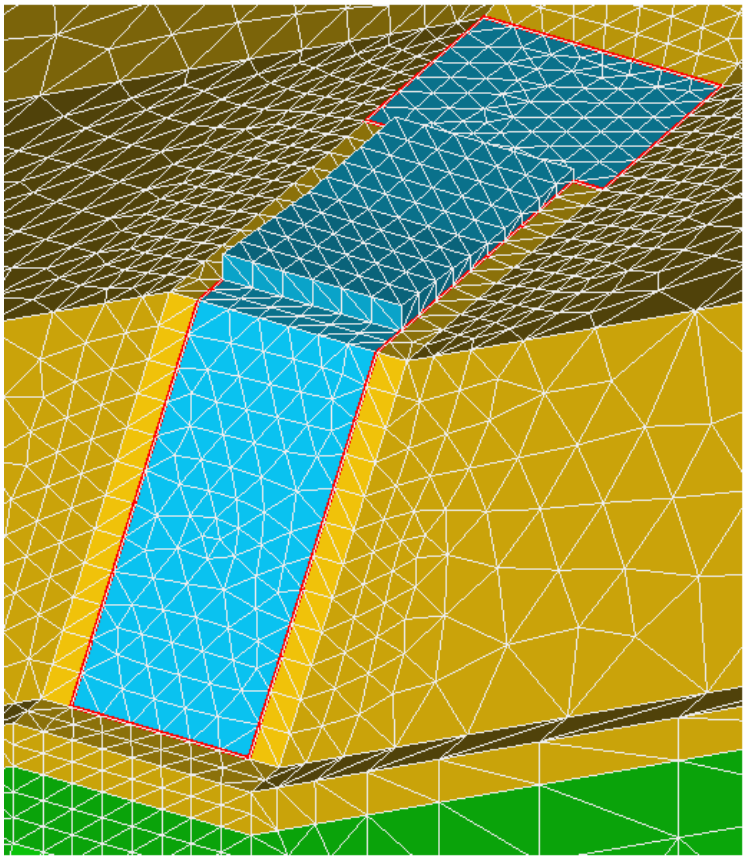




Apport #2 – Exemple 2

Détail de modélisation de la culée
(après densification du maillage, environ 90 000 nœuds)





Apport #3

- Réduction des temps de calcul
  - Comparaison des algorithmes Skyline (sky) et multi-frontal (gnd)

	$\frac{T^{fac}_{sky}}{T^{fac}_{gnd}}$	$\frac{T^{resol}_{sky}}{T^{resol}_{gnd}}$
Stras	20,1	9,5
Cube16	11,4	6
Ramses	45,5	10,0
Inter	162	18,7
Inter2	42,2	11,3
Tr10	23,7	9,2
Galmu	79	12,2

S. Rigobert
BLPC – 256-257 - 2005
RÉF. 4553 - PP. 39-51

Apport #4

Réduction des temps de modélisation

+

Réduction des temps de calcul

$\Downarrow$

+ de temps

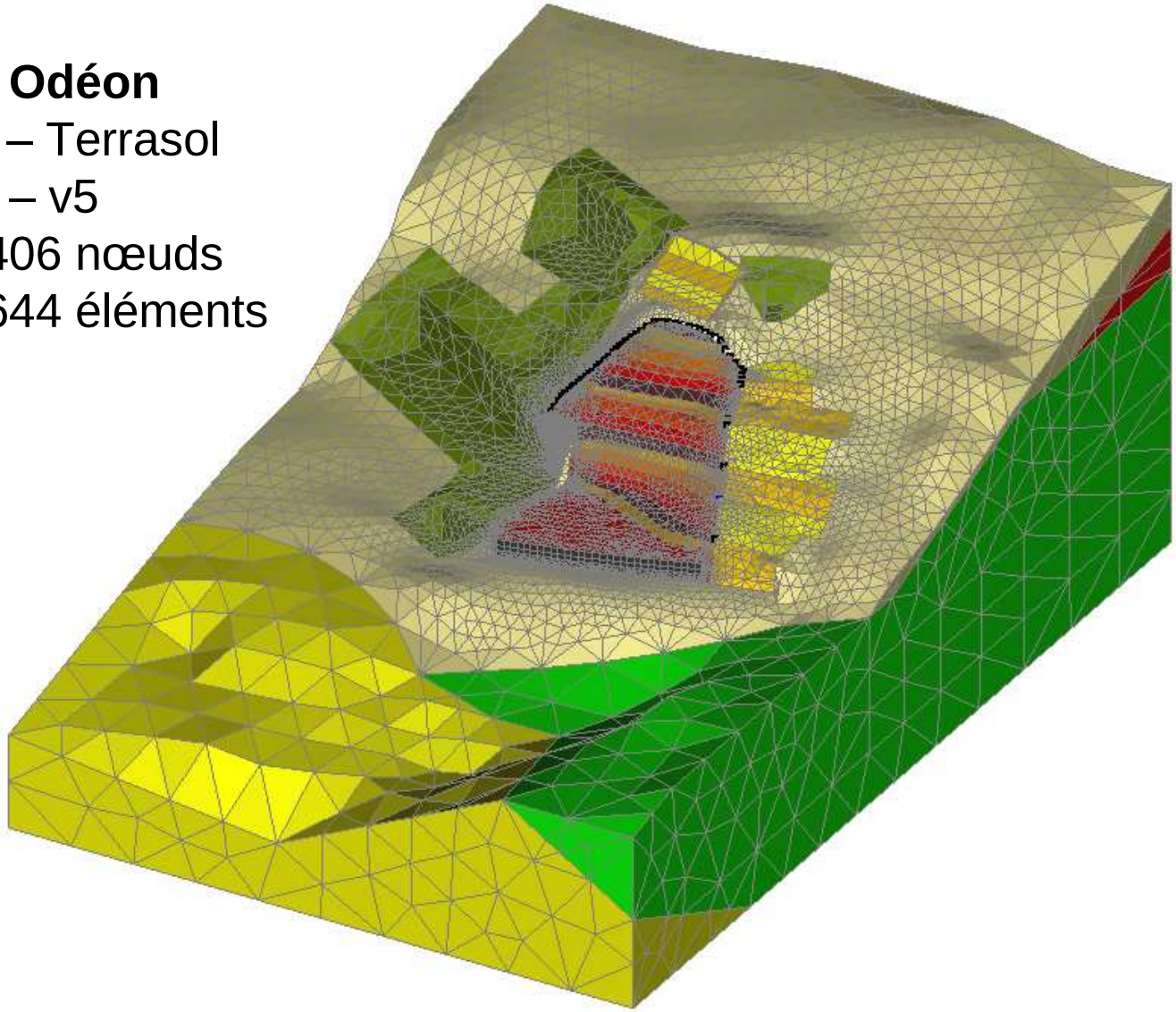
pour une modélisation en détail
et une analyse approfondie du projet

Apport #4.1

- Modélisation en détail :
  - le modèle est proche des plans d'exécution

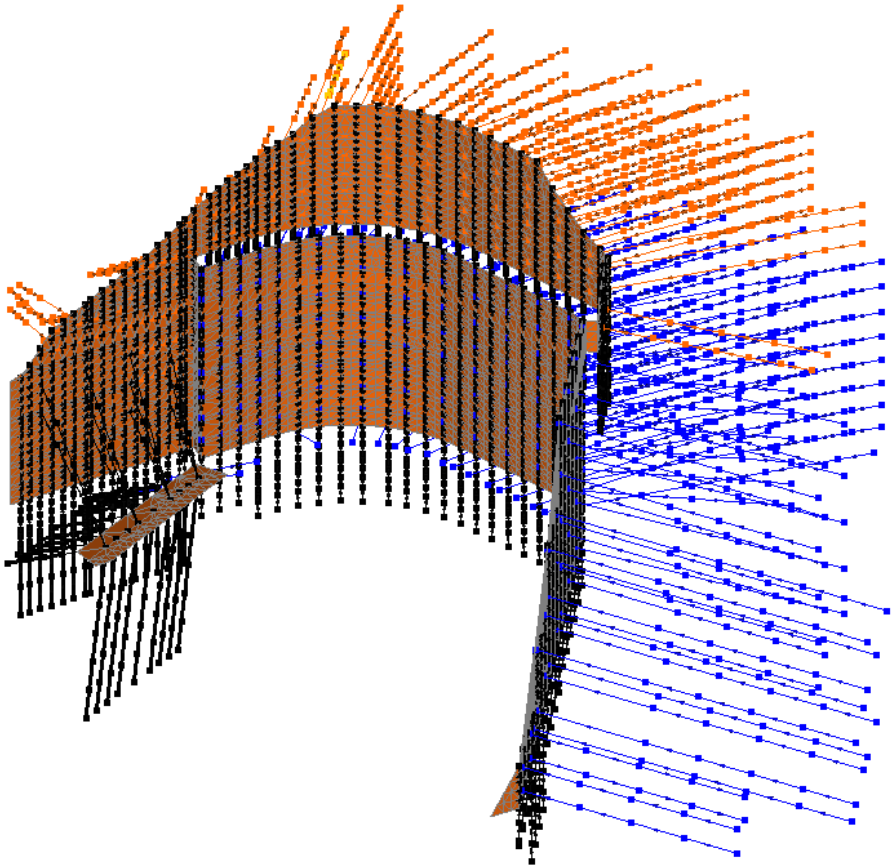
Apport #4.1 - Exemple

Tour Odéon
Itech – Terrasol
2010 – v5
107 406 nœuds
732 644 éléments



Apport #4.1 - Exemple

Tour Odéon
Itech – Terrasol
2010 – v5
107 406 nœuds
732 644 éléments



Détail :
Micro-berlinoises
et tirants

Apport #4.2

- Analyse approfondie du projet
  - Analyse d'influence du maillage

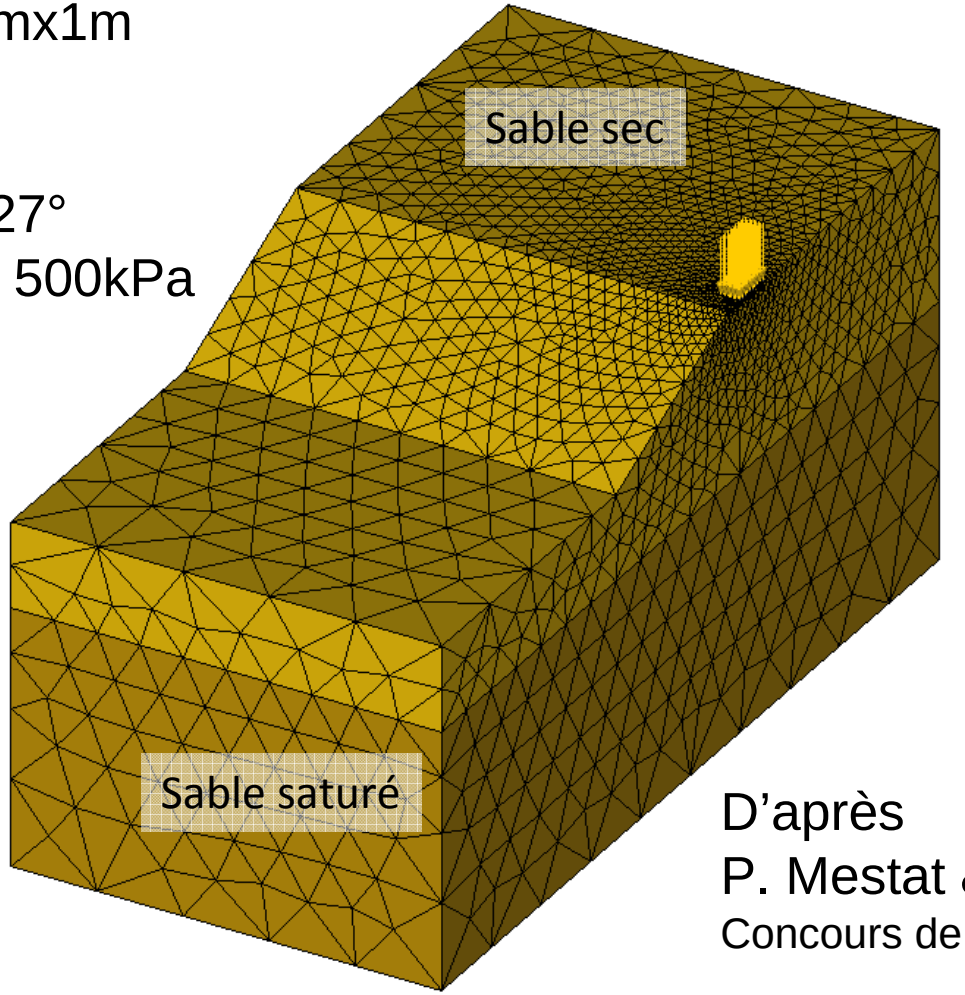
    À géométrie, propriétés physiques des matériaux et paramètres de calculs inchangés,

    Un modèle peut donner des résultats différents en fonction de la densité de maillage.

Apport #4.2 - Exemple

Fondation en bord de talus

Fondation de 1mx1m
À 0,5m du talus
Mohr-Coulomb
Pente du talus 27°
Chargement de 500kPa

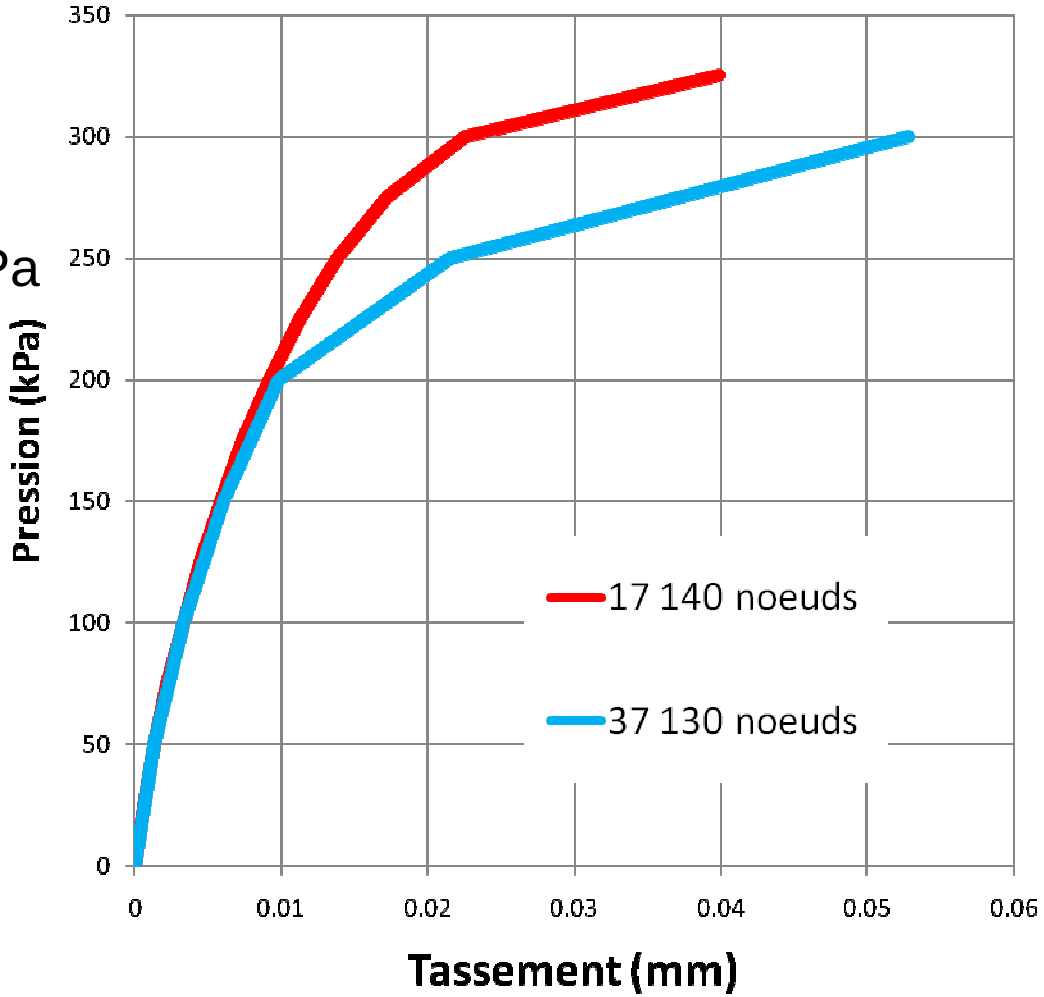


D'après
P. Mestat & Y. Riou
Concours de prévision 2003

Apport #4.2 - Exemple

Fondation en bord de talus

Fondation de 1mx1m
À 0,5m du talus
Mohr-Coulomb
Pente du talus 27°
Chargement de 500kPa



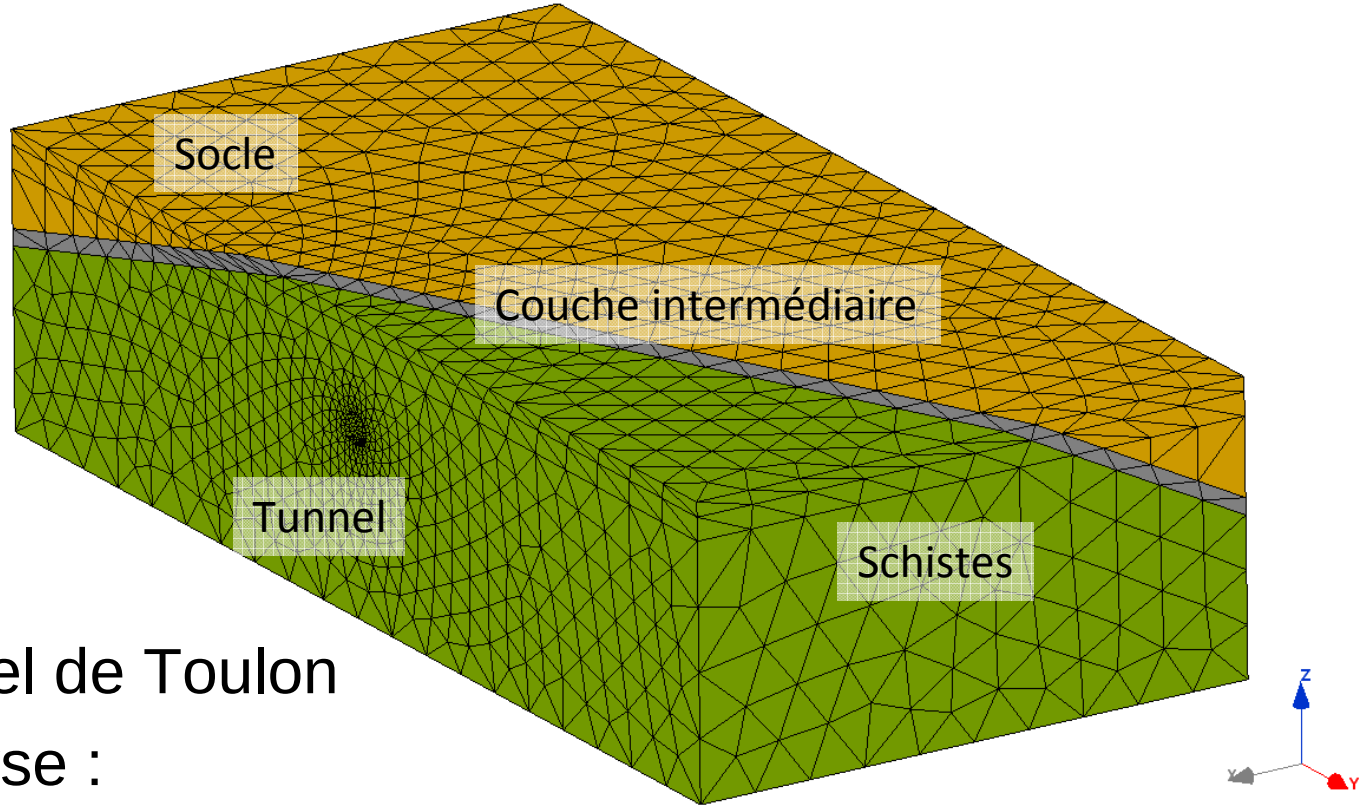
Apport #4.3

- Analyse approfondie du projet
  - Analyse paramétrique sur les aspects géométriques du projet:
    - longueurs d'ancrages,
    - épaisseurs de revêtements,
    - densité de renforcements…

Apport #4.4

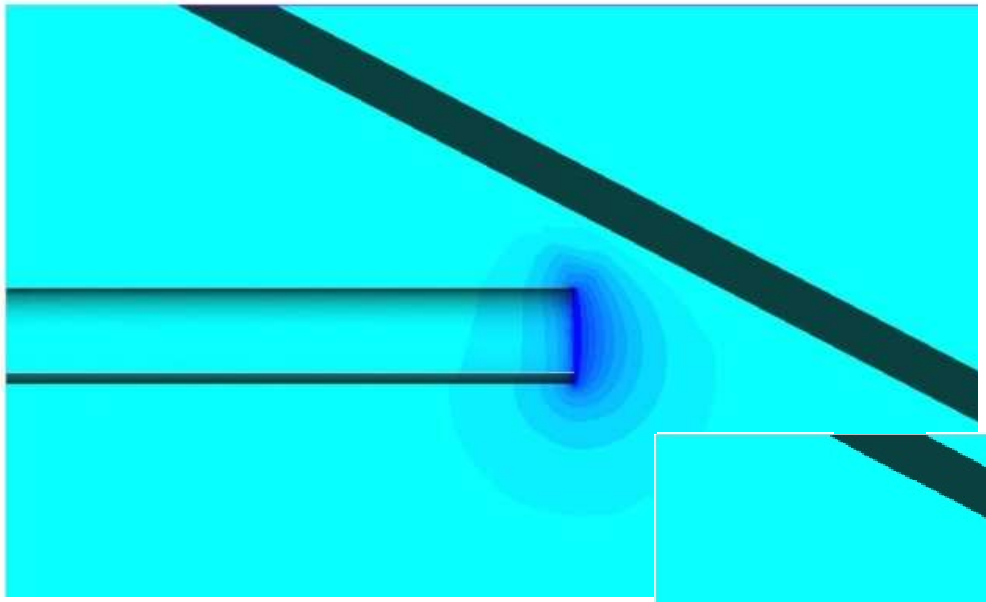
- Analyse approfondie du projet
  - Analyse paramétrique sur les propriétés des matériaux
    - Lois de comportements
    - Paramètres physiques

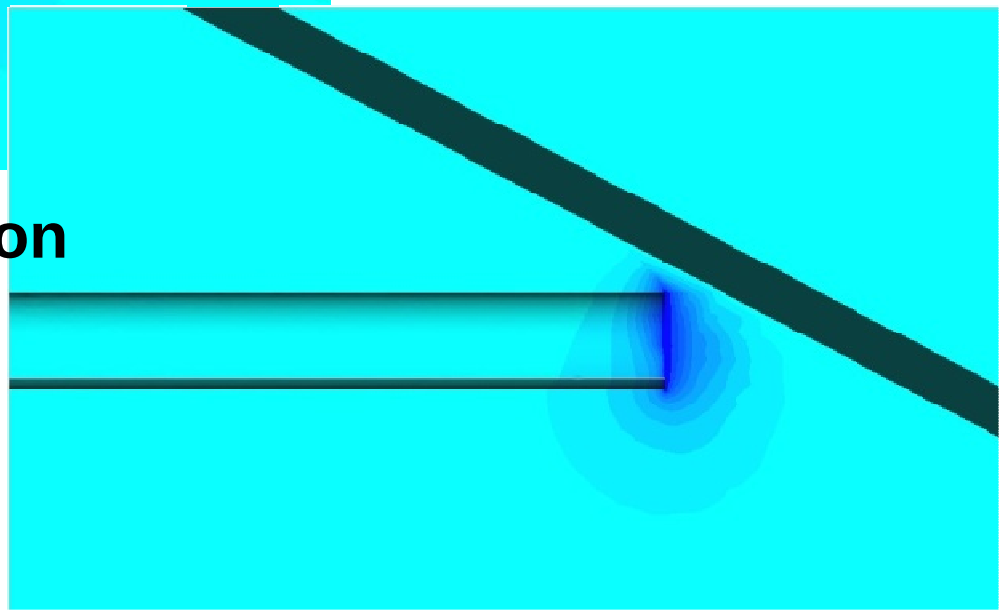
Apport #4.4 - Exemple



- Tunnel de Toulon
- Analyse :
  - Variation du rapport des perméabilités entre couches
  - Influence de la position du front de taille / couche intermédiaire

Apport #4.4 - Exemple





Influence de la position du front de taille

Isovaleurs
de charges hydrauliques

Conclusion

- Développements conjoints des capacités de calcul des ordinateurs et des capacités des outils de modélisation.
- Développement d'outils adaptés pour l'ingénierie géotechnique.
- La modélisation 3D est accessible pour des projets d'ingénierie courants.

Perspectives

- Apporter des outils d'assistance sur la qualité des modèles et des résultats.
- Eduquer les utilisateurs des Eléments Finis sur :
  - Adéquation du niveau de détails du modèle avec les données et les résultats recherchés
  - Pertinence des résultats obtenus
  - Qualité des résultats obtenus

Perspectives

- Quelles limites de modèles ?
  - Le 32-bits adressait 4 Go de mémoire maxi
  - Le 64-bits adresserait potentiellement 18.109 Go

GENIE CIVIL

Merci pour votre attention

David REMAUD
d.remaud@itech-soft.com
www.itech-soft.com
12-16 rue de Vincennes - F- 93100 Montreuil