

MODELISATION NUMERIQUE DE DEUX QUARTIERS ANCIENS DE LA MINE DE SEL DE VARANGEVILLE

D. BILLAUX¹, B. DAMJANAC², M BOARD², C. BOURDEAU¹

¹: ITASCA Consultants, S.A.S

²: ITASCA Consulting Group Inc.

Remerciements:

Emmanuel Hertz, CSME

B. Feuga, GEODERIS

Approche

Le comportement d'une mine en chambres et piliers dépend à la fois

- du comportement local des piliers et
- de l'agencement à grande échelle du recouvrement et des zones non excavées.

Représenter en trois dimensions chaque pilier individuellement (ordre de grandeur : dizaine(s) de mètres) sur l'ensemble de la mine (ordre de grandeur : kilomètre(s) d'extension) conduirait à des modèles très importants

Comment étudier la stabilité à long terme?

Approche

Approche « mixte » 2D/3D qui repose sur la séparation des composantes du système.

Elle comporte :

1) des **modèles globaux 2D** des quartiers dans lesquels le système « pilier, vide, mur et toit » est représenté par une couche équivalente;

2) des **modèles 3D locaux** représentant le système « pilier, vide, mur et toit » et prenant en compte des géométries de piliers et des taux de défruitement variables.

Étapes du projet

Détermination des caractéristiques d'une couche équivalente au système « pilier + vides + mur », en trois dimensions

Calcul du déplacement initial après excavation dans un modèle 2D avec couche équivalente

Estimation de la réponse du sol à l'excavation dans un modèle 2 D: courbe effort - déplacement du recouvrement ou courbe caractéristique

Étapes du projet

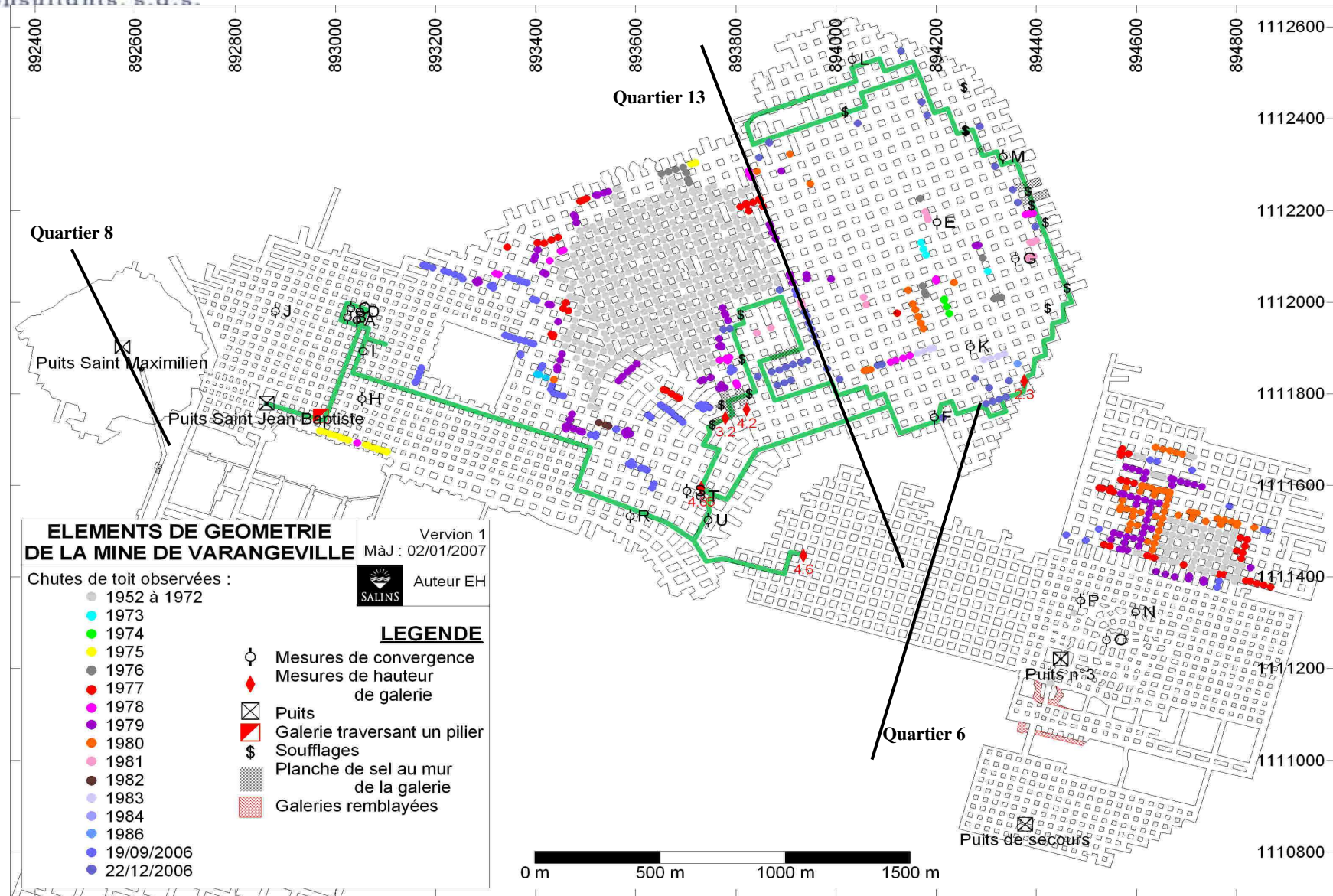
Étude du fluage des piliers en 3D avec prise en compte d'une contrainte variable en fonction du déplacement vertical (cf. courbe effort – déplacement du recouvrement):

- Calage des paramètres de la loi de fluage à partir des vitesses de déformation mesurées;
- Prédiction des vitesses de déformation verticale sur 300 ans.

Évaluation de l'endommagement lié au fluage des piliers

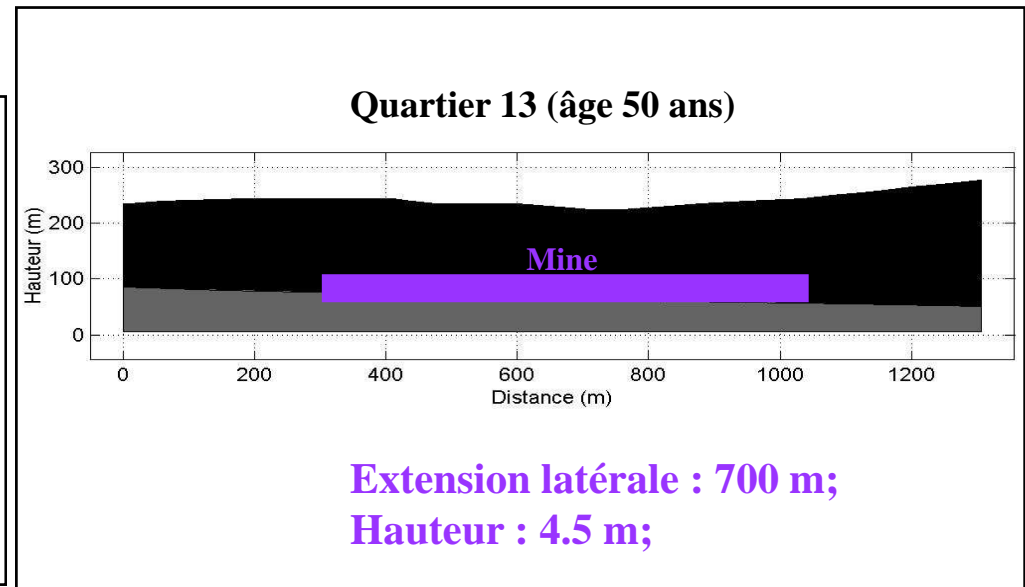
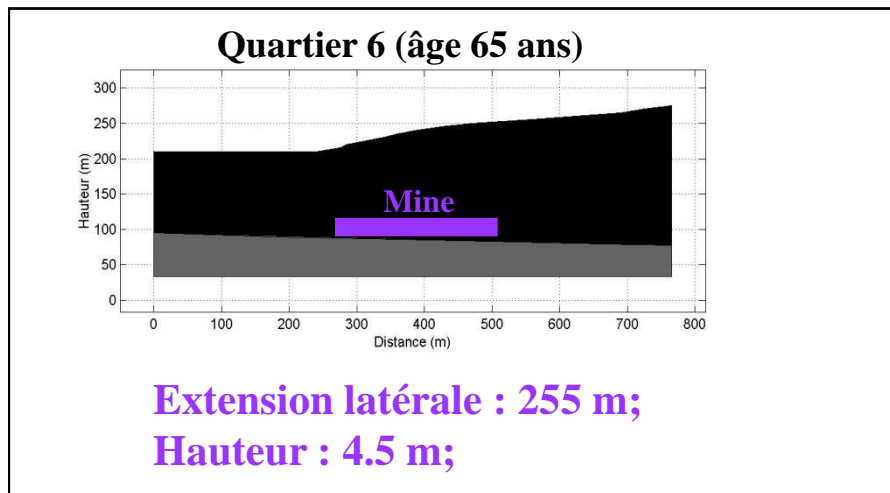
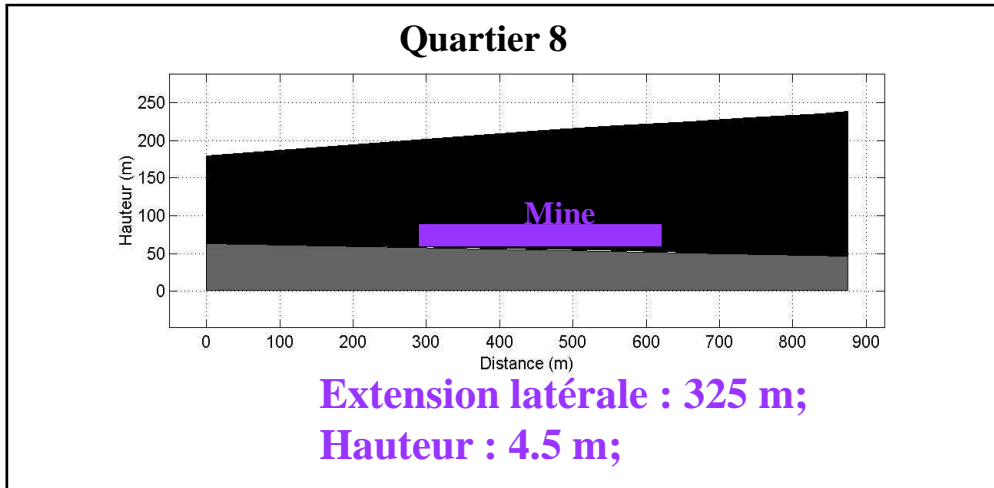
- Nouvelle courbe effort-déformation des piliers;
- Calcul de stabilité (piliers + recouvrement).

Quartiers étudiés



Modélisation: quand faut-il passer au 3D?

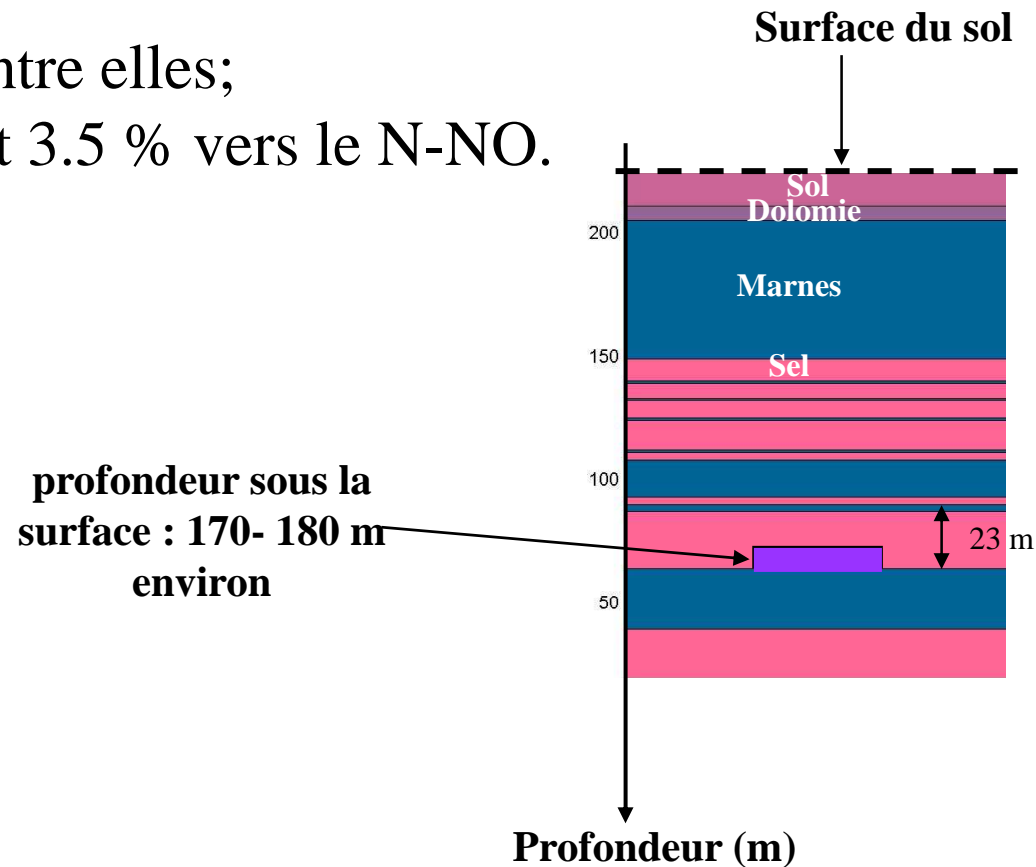
Quartiers étudiés



Coupe géologique

Hypothèses :

- 1) Couches parallèles entre elles;
- 2) Pendage : entre 1.5 et 3.5 % vers le N-NO.



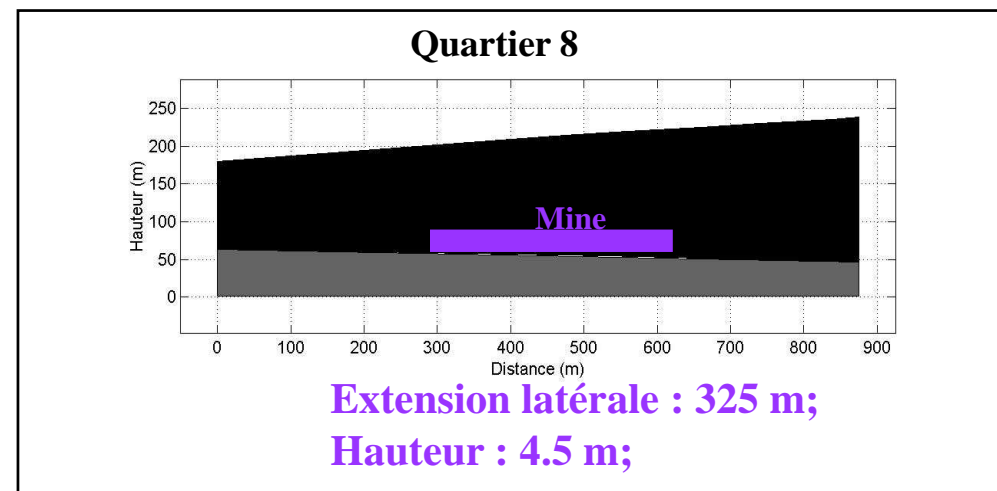
Propriétés mécaniques initiales

	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Masse volumique (kg/m³)	Cohésion (MPa)	Angle de frottement (°)	Résistance à la traction (MPa)
Sol	0.1	0.25	2500	10000	35	10000
Dolomie	45	0.24	2700	16.1	58.5	8
Marnes (couche supérieure)	5.4	0.25	2500	7.4	36	0.4
Sel	10	0.19	2300	7.1	50	3.9
Marnes (du toit et du mur)	5.4	0.13	2500	3	0	0.4
Sel (couche exploitée)	10	0.19	2300	7.1	50	3.9

Calage des paramètres du recouvrement

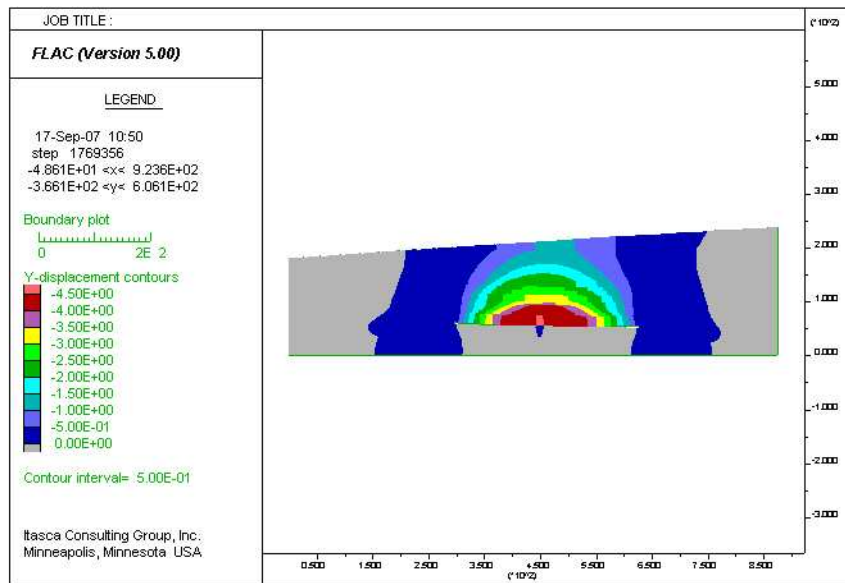
Méthode : pour caler les paramètres du recouvrement, on simule un **effondrement** survenu en 1873 dans le quartier 8

- 1) suppression totale de la couche de sel exploitée;
- 2) remplacement par une « pression de soutènement » équivalente à son effet sur le toit;
- 3) diminution progressive de cette pression jusqu'à zéro
→ affaissement du recouvrement jusqu'à sa fermeture

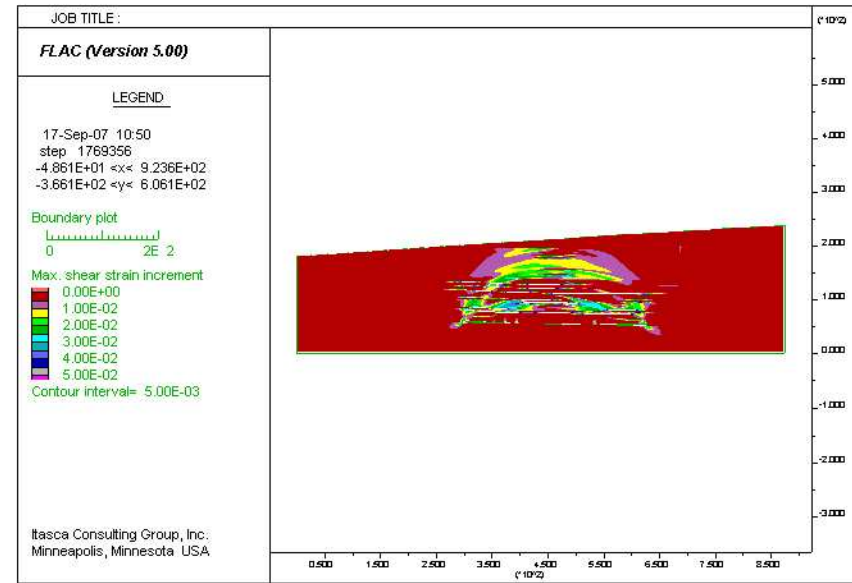


Simulation 2D du quartier 8

Déplacements verticaux (m)



Déformations de cisaillement totales



Après élimination complète des piliers, formation d'une arche: la rupture n'atteint pas la surface.

Or on sait qu'une rupture « en bloc » s'est produite en 1873 dans ce quartier → couches de surfaces trop résistantes

Modifications des propriétés mécaniques

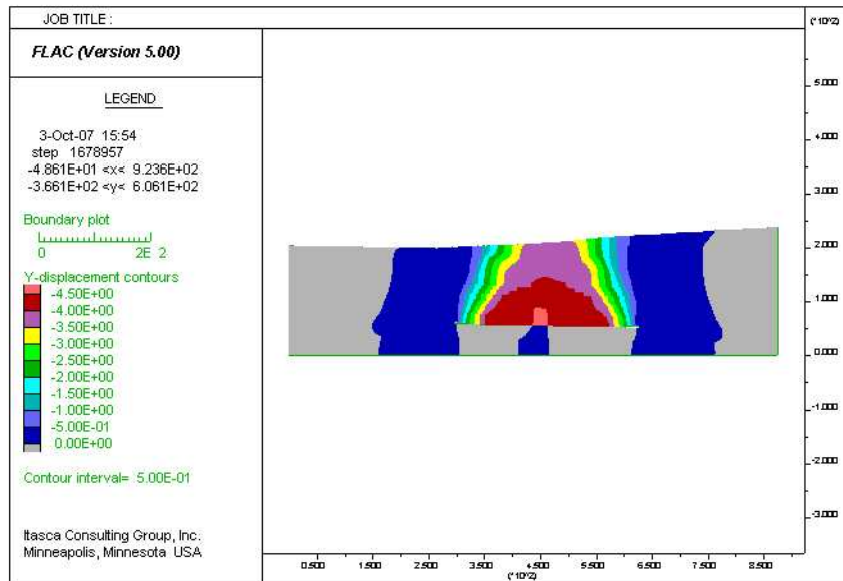
Pour interdire l'effet de voute, en particulier, modèle « à joints répartis » dans l'épaisse couche de marnes située sous la surface (propriétés des joints = 1/5 des propriétés du volume, sauf pour l'angle de frottement qui est le même)

Modifications des propriétés mécaniques

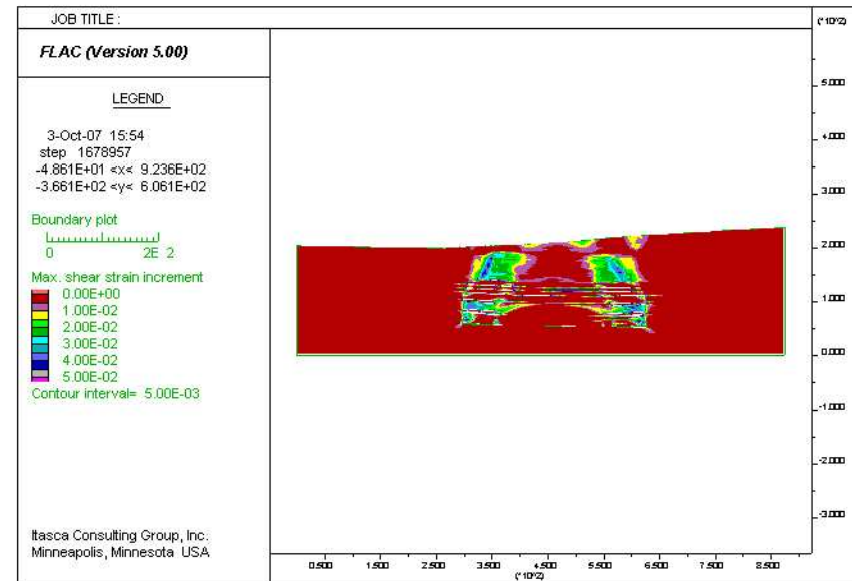
	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Masse volumique (kg/m ³)	Cohésion (MPa)	Angle de frottement (°)	Résistance à la traction (MPa)
Sol	0.1	0.25	2500	0.1	35	0
Dolomie	45	0.24	2700	2	29	0.5
Marnes (couche supérieure)	5.4	0.25	2500	7.4	36	0.4
Marnes (joints horizontaux)				1.48	36	0.08
Sel	10	0.19	2300	4.14	45	3.0
Marnes (du toit et du mur)	5.4	0.13	2500	3	0	0.4
Sel (couche exploitée)	10	0.19	2300	6.21	45	3.0

Simulation 2D du quartier 8

Déplacements verticaux (m)

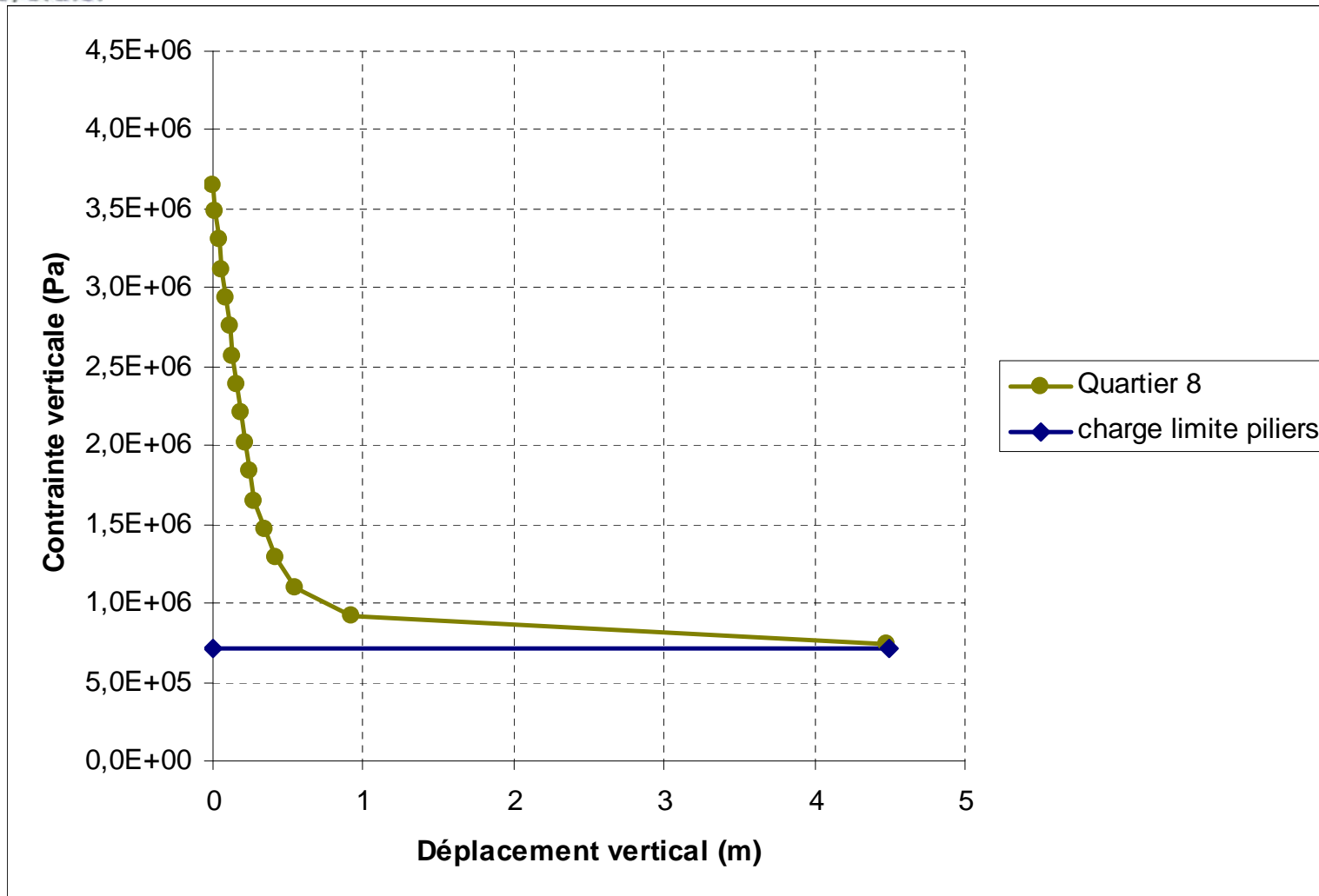


Déformations de cisaillement totales



La rupture atteint la surface → les paramètres mécaniques utilisés pour ce cas sont retenus pour les simulations des quartiers 6 et 13.

Simulation 2D du quartier 8

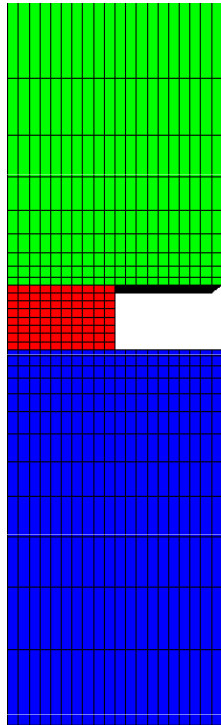


→ Le modèle prédit la rupture par poinçonnement des marnes et rupture simultanée du recouvrement, en bloc.

Modélisation: quand faut-il passer au 3D?

Couche équivalente au système

« toit + pilier + vide + mur »



Méthode :

Création d'un modèle 3D « toit + pilier + mur »;

Réalisation d'un test de compression simple;

Suivi des historiques « effort appliqué » et « déformation »;

Déduction des caractéristiques équivalentes d'une couche 2D.

Caractéristiques d'une couche équivalente au système « pilier, vide, toit et mur »

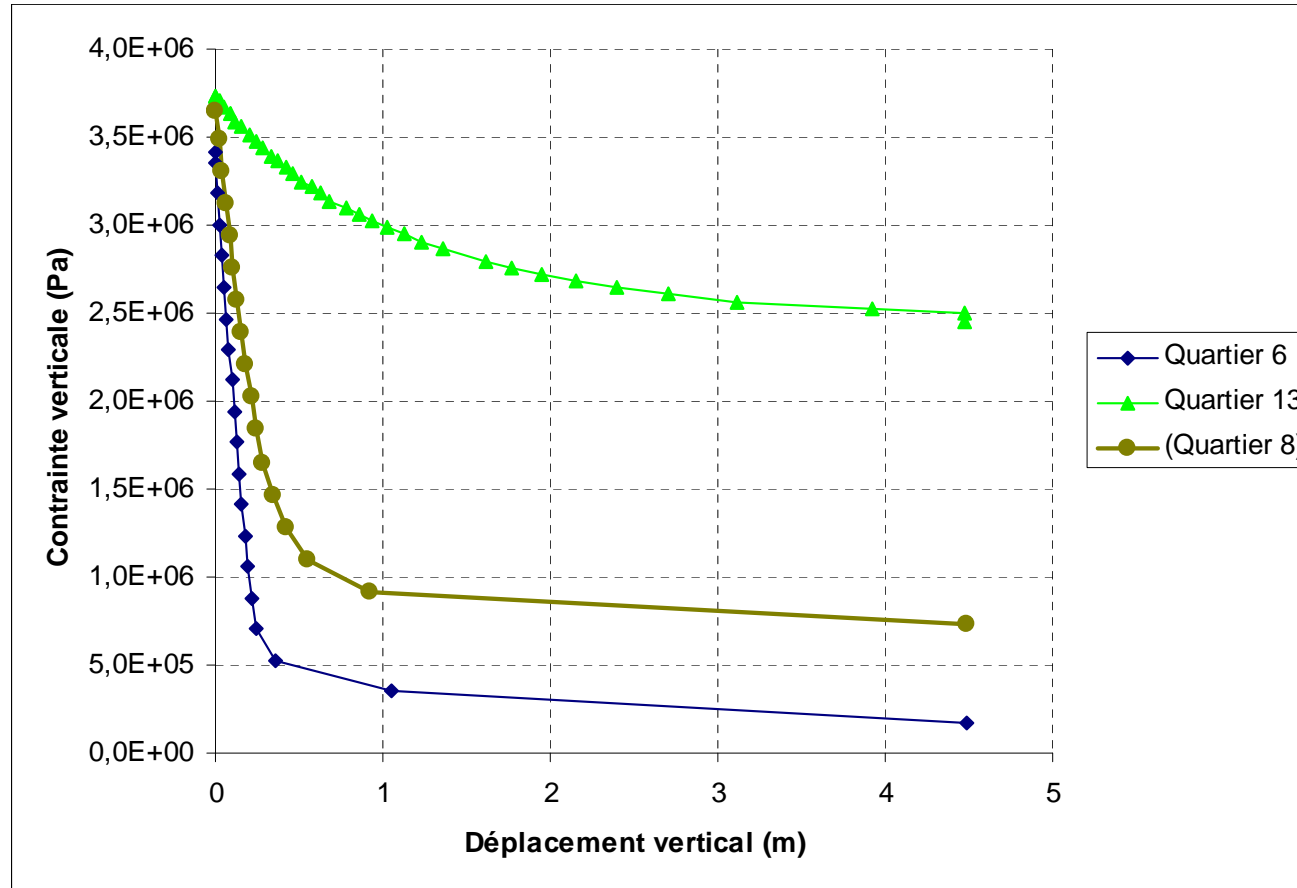
Quartier	Module de compressibilité (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Cohésion (MPa)	Angle de frottement (°)
6	345,7	518,5	3,3	0
9	245,8	368,8	2,4	0
13	173,5	260,2	2,4	0

Courbes effort – déplacement du recouvrement

Méthode : « convergence confinement » à partir de modélisations en 2D.

- 1) Suppression des matériaux de la couche excavée;
- 2) Application d'efforts équivalents sur le pourtour de la zone excavée;
- 3) Diminution progressive des efforts appliqués;
- 4) On obtient: $\sigma_{yy} = f(ydisp)$

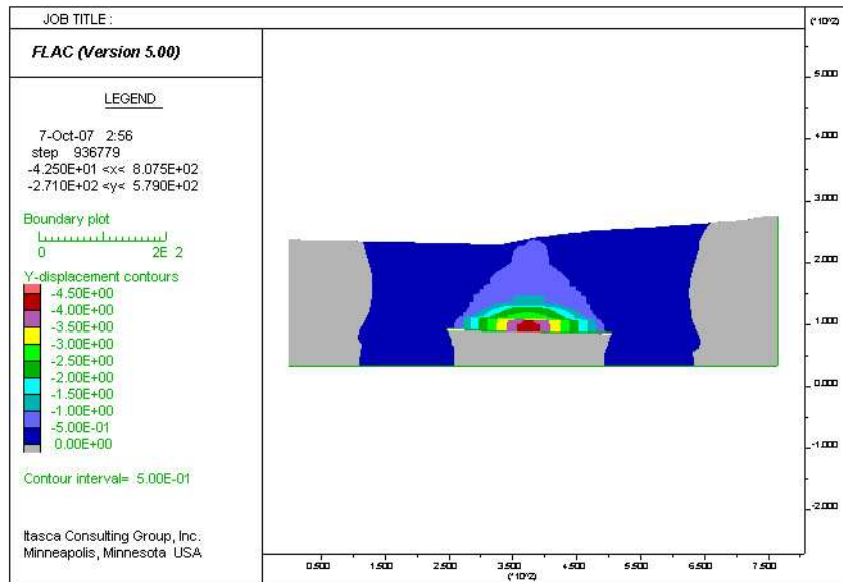
Courbes effort – déplacement du recouvrement



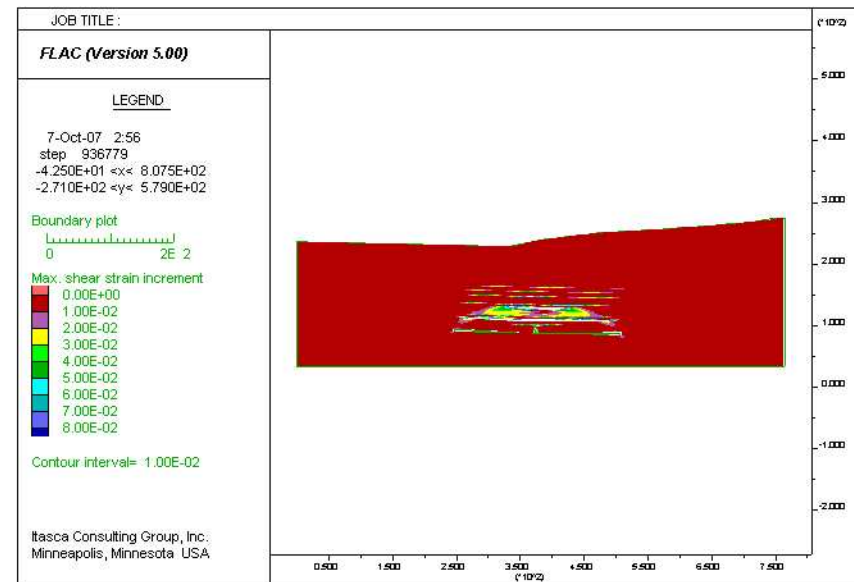
- Comparaison de la stabilité des quartiers ?
- Analyse de la possibilité d'une rupture brutale ?

État final, quartier 6

Déplacements verticaux (m)

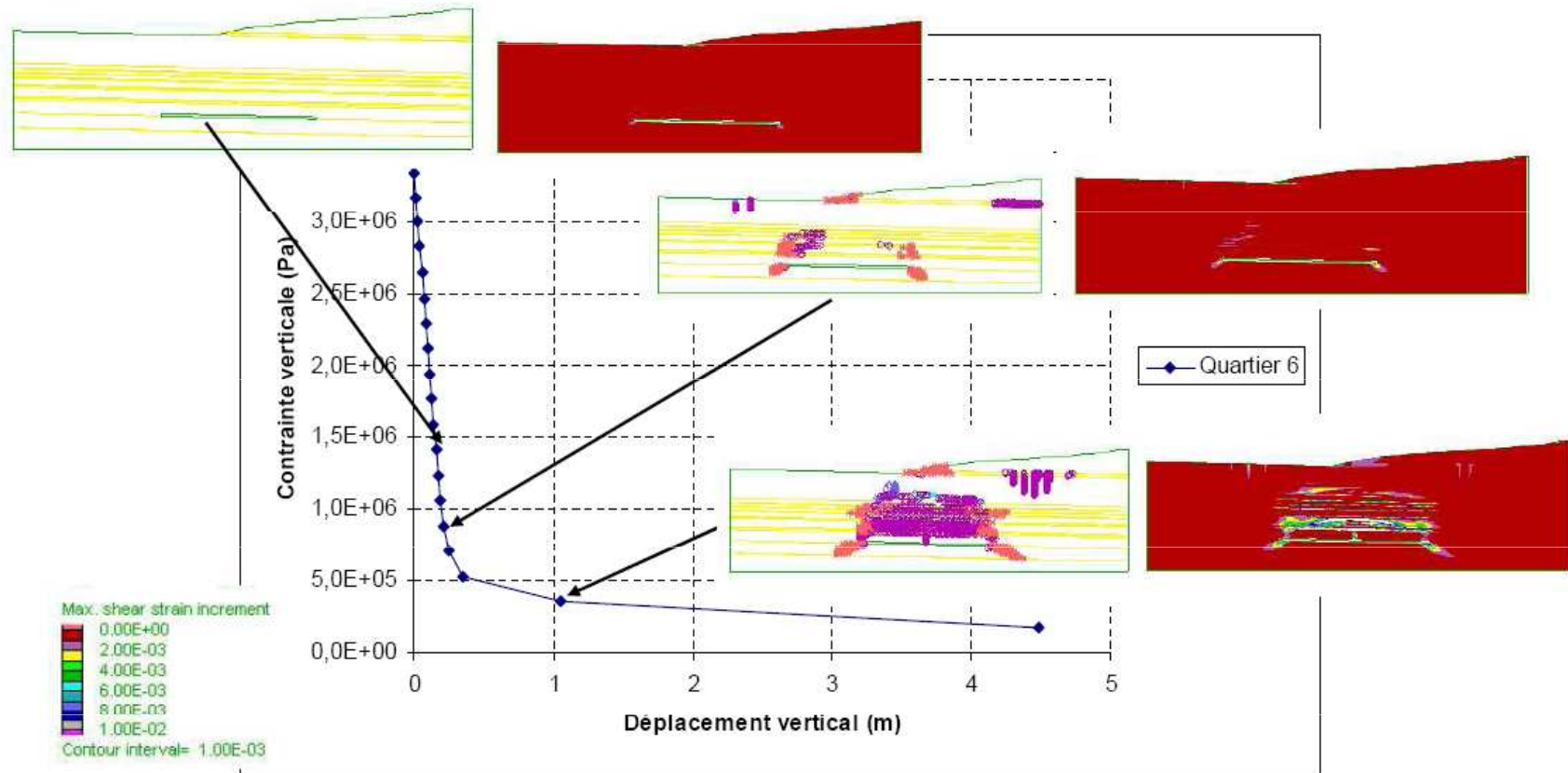


Déformations de cisaillement totales



Formation d'une arche (prévisible compte tenu de la faible extension de ce quartier).

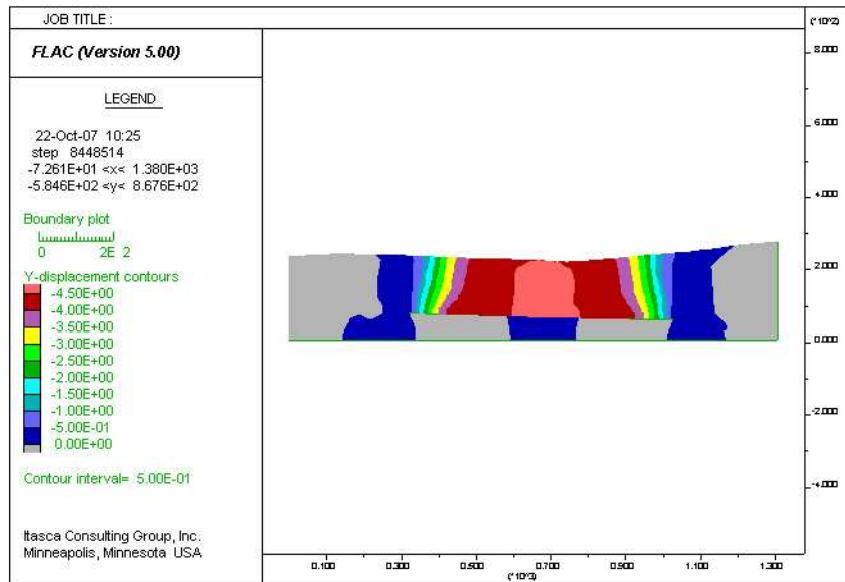
Évolution, quartier 6



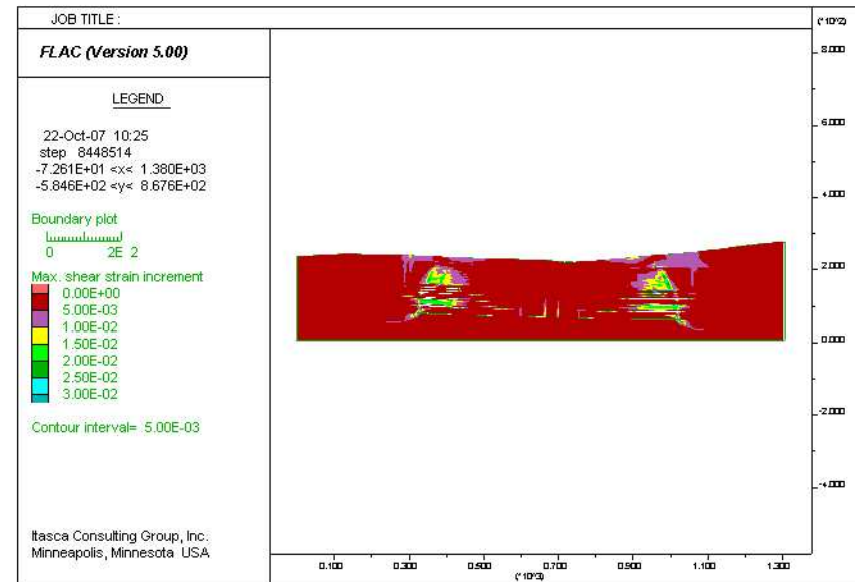
Rupture brutale par cisaillement des contreforts (points roses), puis tractions dans les bancs

État final, quartier 13

Déplacements verticaux (m)

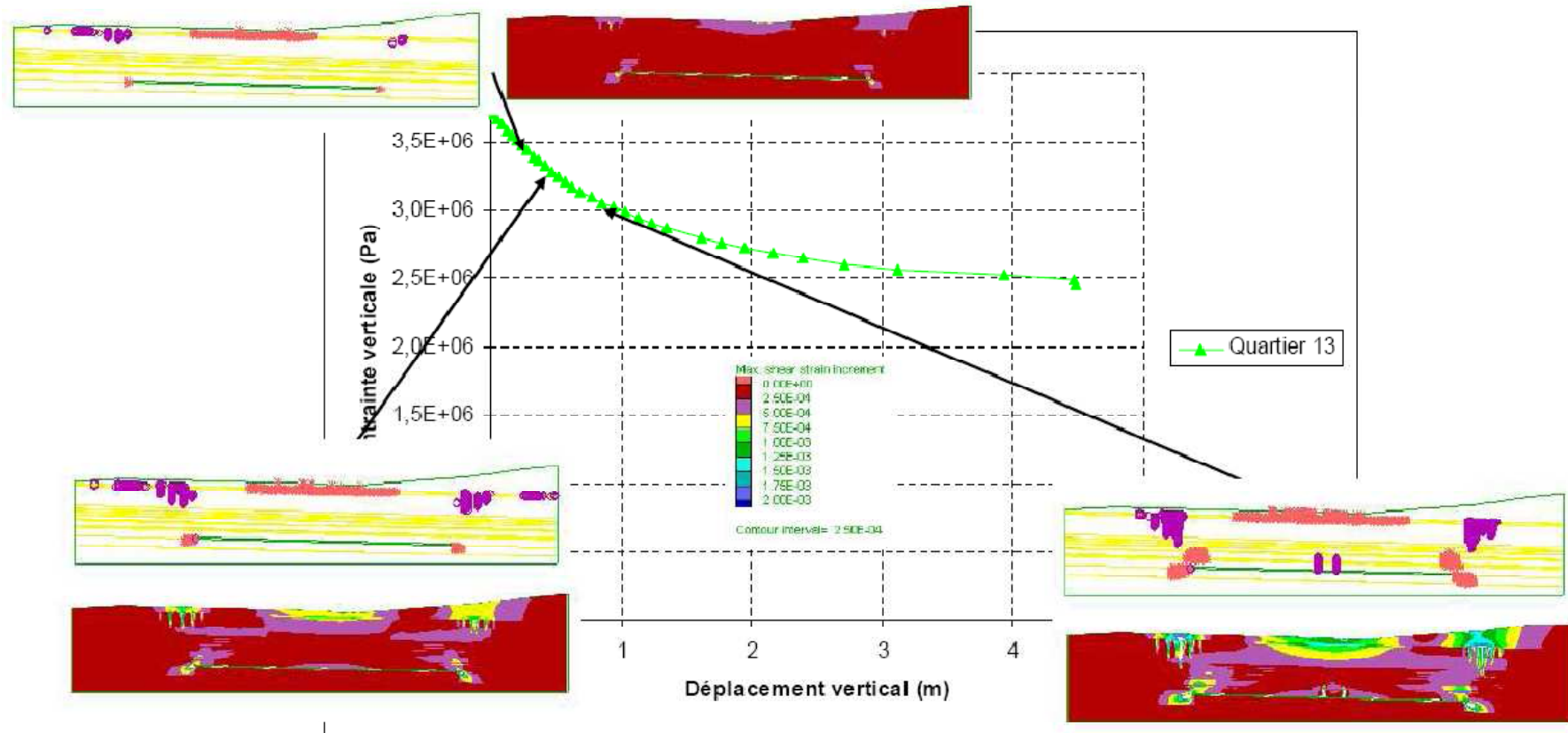


Déformations de cisaillement totales



La rupture atteint la surface.

Évolution, quartier 9



Rupture progressive par traction de la couche de marnes supérieure (points mauves), puis cisaillement des contreforts

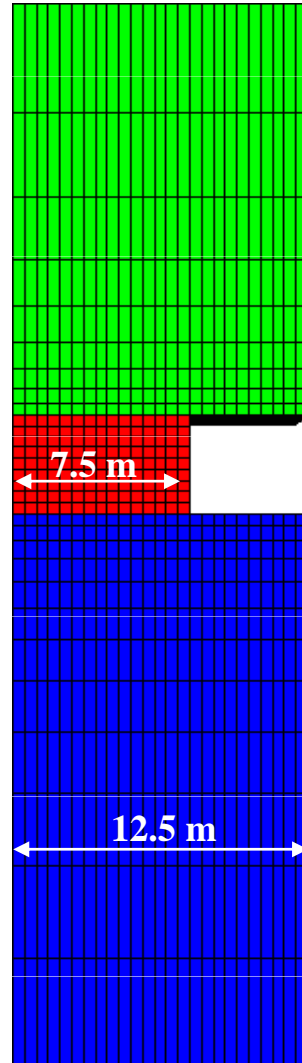
Fluage et endommagement des piliers

Méthode : calage des paramètres de la loi de fluage sur les vitesses de déformation mesurées en deux points, puis calcul prédictif.

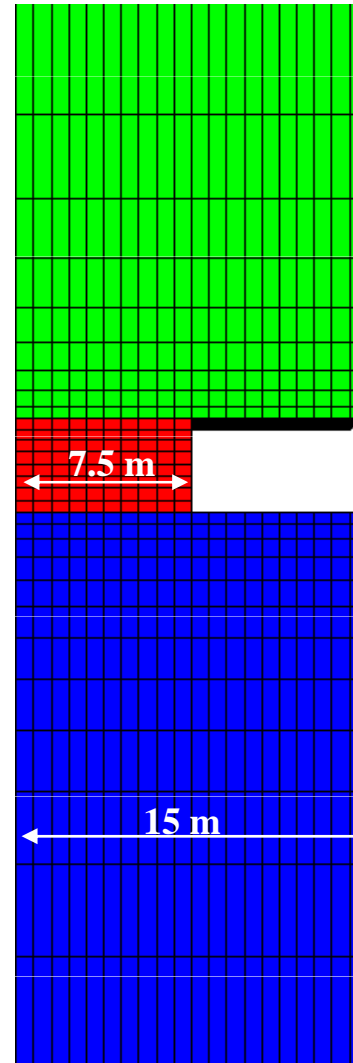
On applique pour le calcul de fluage 3D des piliers la courbe effort-déplacement du recouvrement obtenue par le modèle 2D

Simulation du fluage en 3D

Quartier 6



Quartier 13

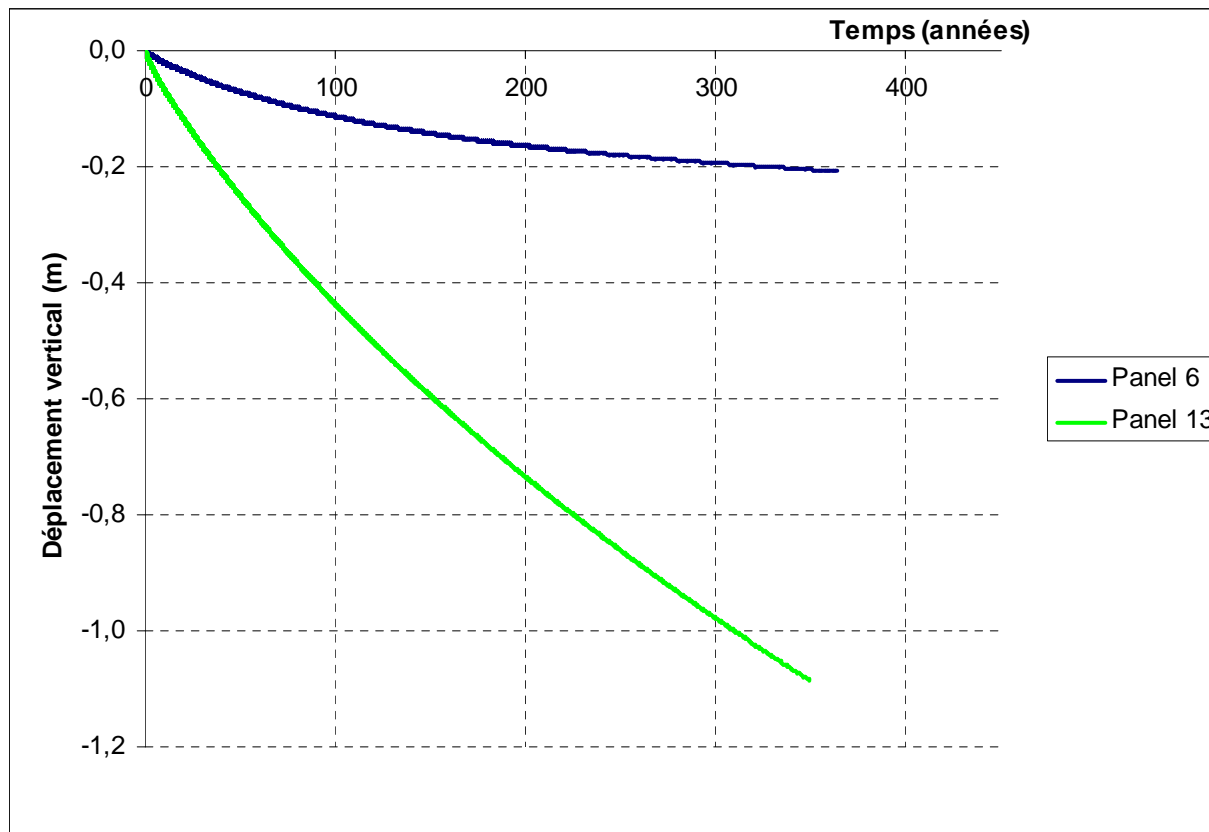


Modélisation: quand faut-il passer au 3D?

Simulation du fluage en 3D

Loi de fluage : loi puissance à un exposant ($n = 1.5$) et un coefficient multiplicateur ($A = 2.15 \cdot 10^{-5}$)

Déplacement vertical

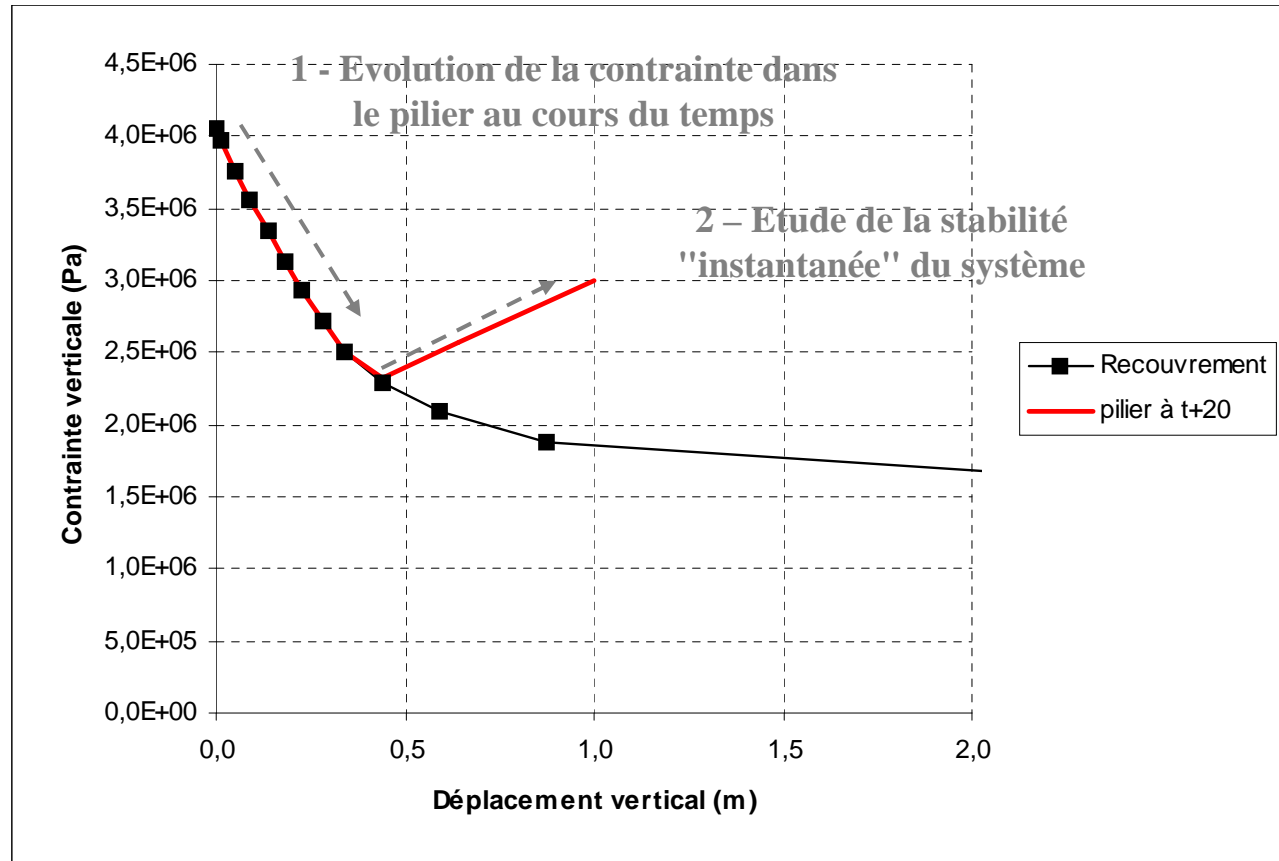


Endommagement lié au fluage des piliers

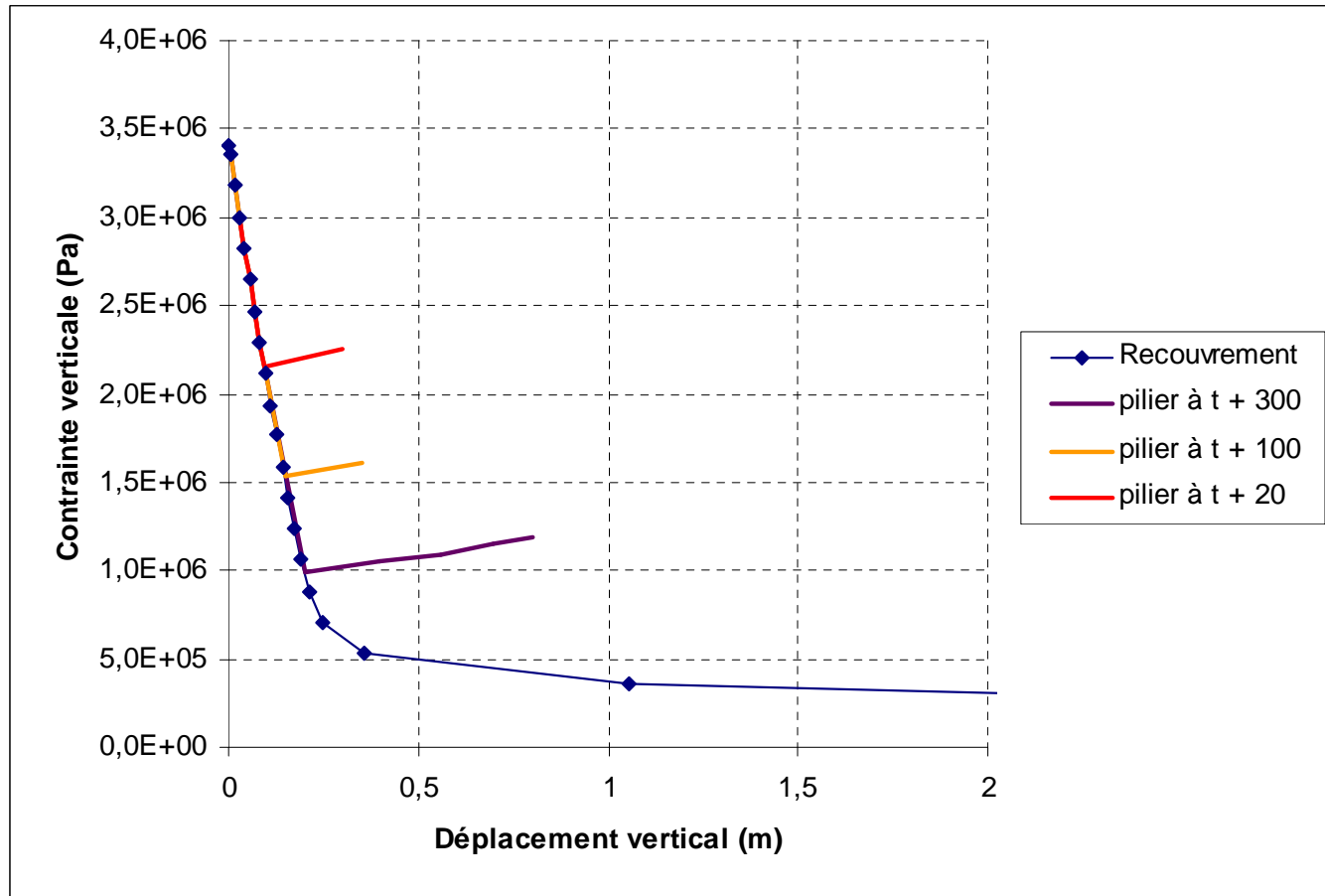
Méthode : diminution de la cohésion du sel jusqu'à obtenir un déplacement du toit équivalent au déplacement dû au fluage.

Méthode grossière, qui peut être améliorée!

Courbes « Effort–déformation » des piliers et calcul de stabilité

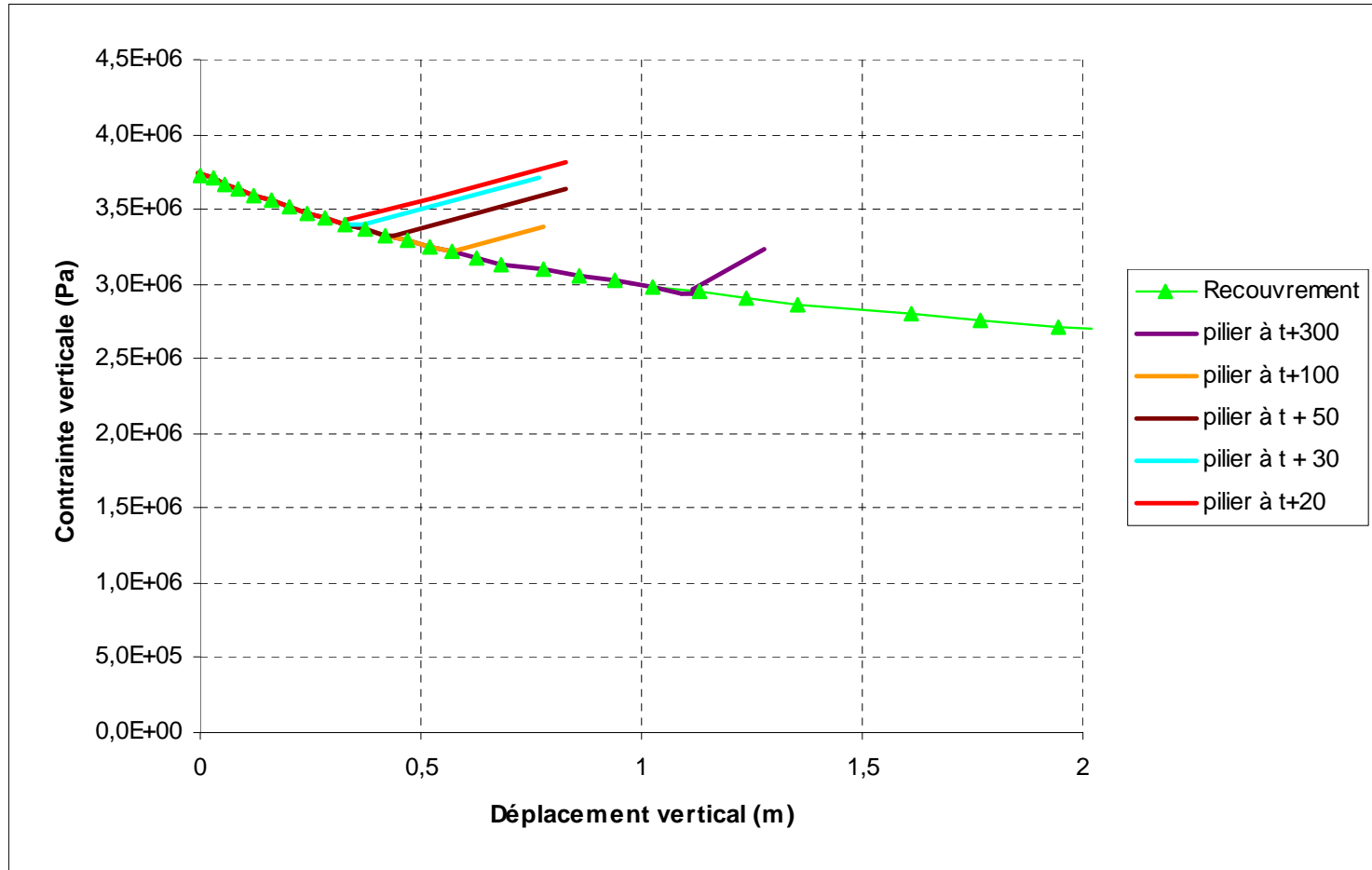


Courbes « Effort–déformation » des piliers et calcul de stabilité



Courbes « Effort–déformation » des piliers et calcul de stabilité

Quartier 13



Conclusions

Le **quartier 6** montre un comportement « raide », avec effet de voûte important. La résistance de piliers nécessaire pour assurer sa stabilité est largement assurée pour le taux de défruitement actuel. Même en cas d'envahissement par l'eau, la dégradation des marnes du mur ne suffit pas à provoquer l'effondrement. Celui-ci peut alors, bien sûr, survenir par dissolution totale des piliers. Mais celle-ci ne peut pas être instantanée.

Conclusions

Le **quartier 13** a un comportement nettement moins raide, et semble « venir » au fur et à mesure du fluage des piliers, sans effet de voûte significatif. Ceci rend une rupture brutale moins probable. Il reste que pour ce quartier la résistance de piliers nécessaire pour assurer la stabilité est importante : les piliers sont chargés significativement, et un effondrement est possible à moyen terme.