

MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE SISMIQUE ARCHÉENNE DE LA FAILLE CADILLAC

IMPLICATIONS SUR LA GENÈSE DES GISEMENTS AURIFÈRES OROGÉNIQUES

Silvain Rafini
Stéphane Faure
Réal Daigneault



Québec Exploration 2011

ALEXIS



Cameco

OSISKO
EXPLORATION

xstrata
copper

MDN inc.

CARTIER
RESSOURCES

SOQUEM

RICHMONT



xstrata
zinc

VIRGINIA

ONHYM



CRÉ CONFÉRENCE RÉGIONALE DES ÉLUS
SAGUENAY-LAC SAINT-JEAN

Ministère
du Développement
économique,
de l'Innovation
et de l'Exportation
Québec

Ressources naturelles
et Faune
Québec

Canada
Développement
économique Canada

UQÀM
Université du Québec à Montréal

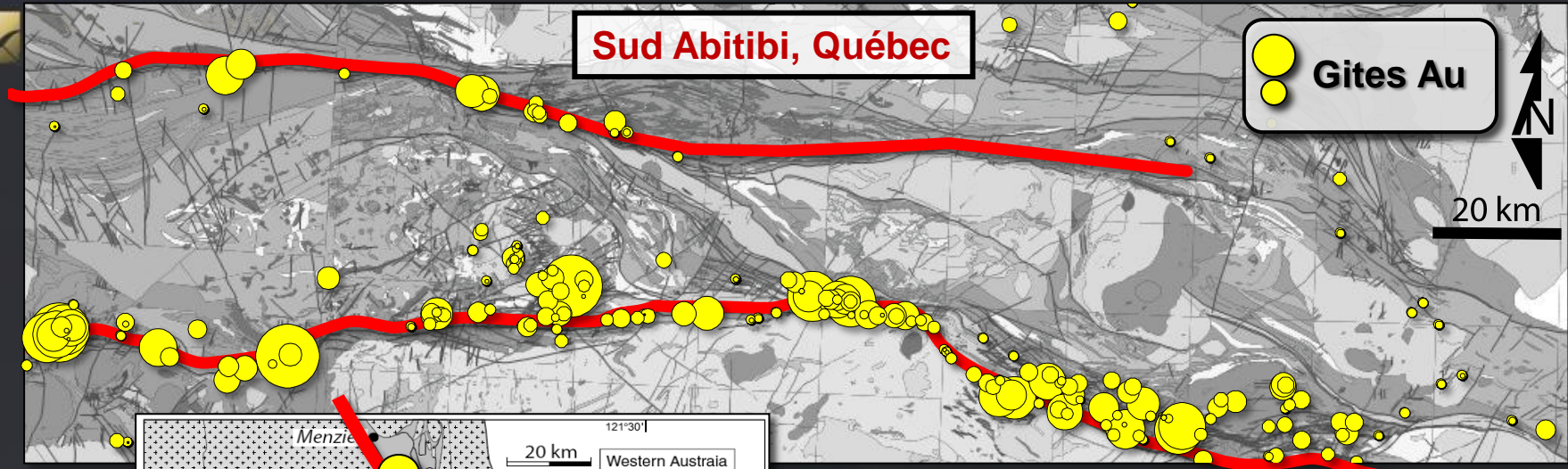
URSTM/UQAT UQAC

- 1. Introduction du principe de modélisation des paléocontraintes à des fins d'exploration**
- 2. Déformation de la croûte moyenne : régimes sismique et asismique**
- 3. Modélisation de la déformation continue régionale en Abitibi**
- 4. Modélisation de la déformation discontinue : dynamique sismique de la faille Cadillac**
- 5. Guides structuraux, conclusions, perspectives**

Sud Abitibi, Québec

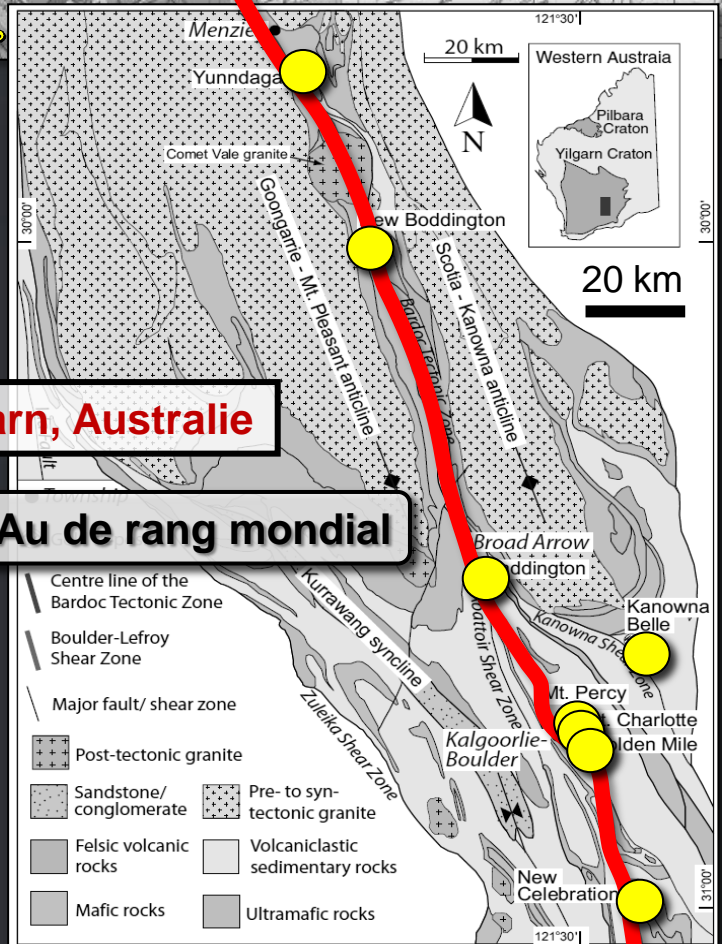
Gites Au

20 km



Yilgarn, Australie

Gites Au de rang mondial

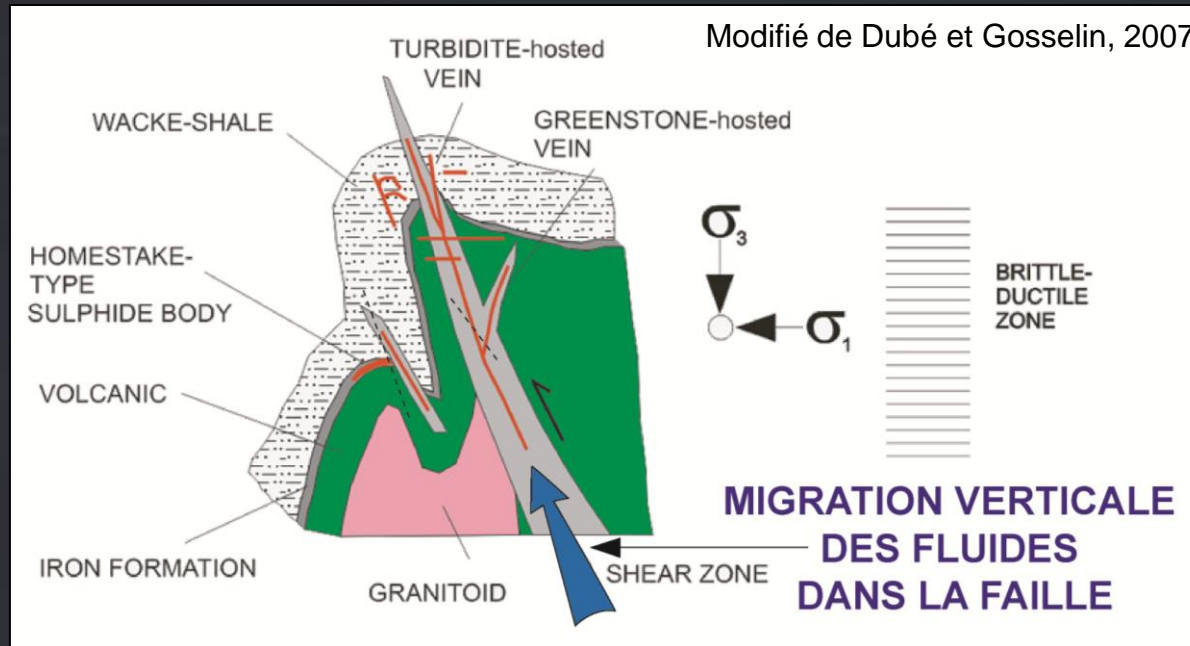


Majorité des gites aurifères orogéniques concentrée le long des failles translithosphériques régionales

- Failles Cadillac et Destor-Procupine (Québec, Ontario)
- Faille Bardoc (Australie)

Modifié de Morey et al, 2007

Modifié de Dubé et Gosselin, 2007



CONVERGENCE DES MODÈLES

Métallogéniques (e.g., Dubé et Gosselin, 2007)

Tectoniques (e.g., Sibson, 1994)

Sismologiques (e.g., Husen et Kissling, 2001)

L'activité des failles génère une migration verticale des fluides minéralisateurs depuis des sources régionales profondes

→ Migration des fluides minéralisateurs est régie par les déformations régionales / locales

→ Ceinture de roches vertes Abitibiennes : minéralisations aurifères associées aux mouvements syn- à tardi-orogénique archéens

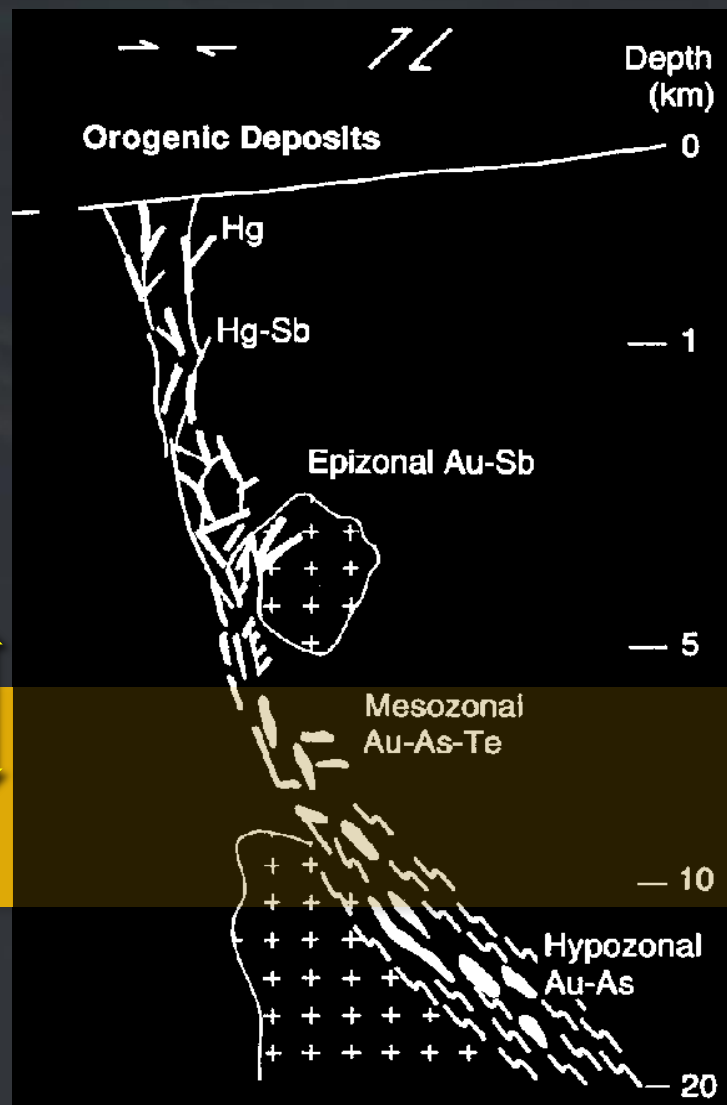
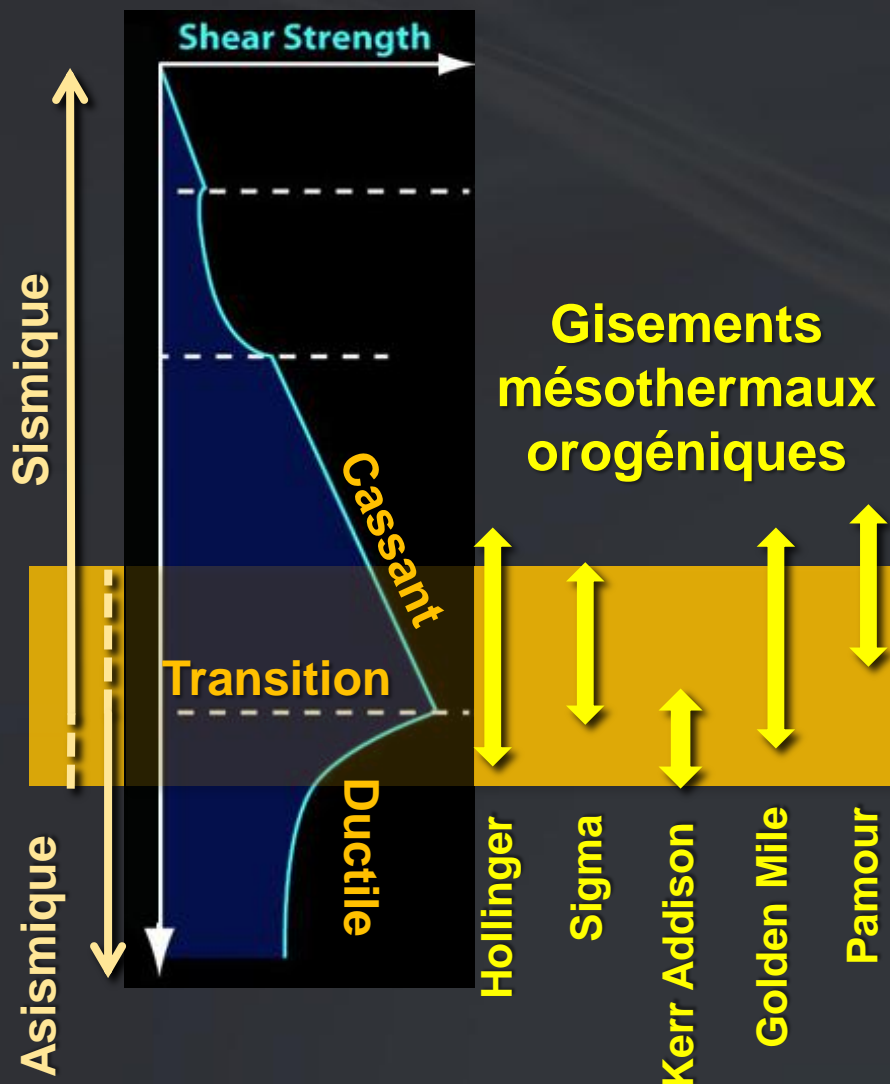
Principe de la modélisation des paléocontraintes à des fins d'exploration

Simuler numériquement les déformations tardi-orogéniques afin de reproduire les schémas de migrations des fluides minéralisateurs, et d'en déterminer les zones de réception

→ Hauts potentiels aurifères

1. Introduction du principe de modélisation des paléocontraintes à des fins d'exploration
2. **Déformation de la croûte moyenne : régimes sismique et asismique**
3. Modélisation de la déformation continue régionale en Abitibi
4. Modélisation de la déformation discontinue : dynamique sismique de la faille Cadillac
5. Guides structuraux, conclusions, perspectives

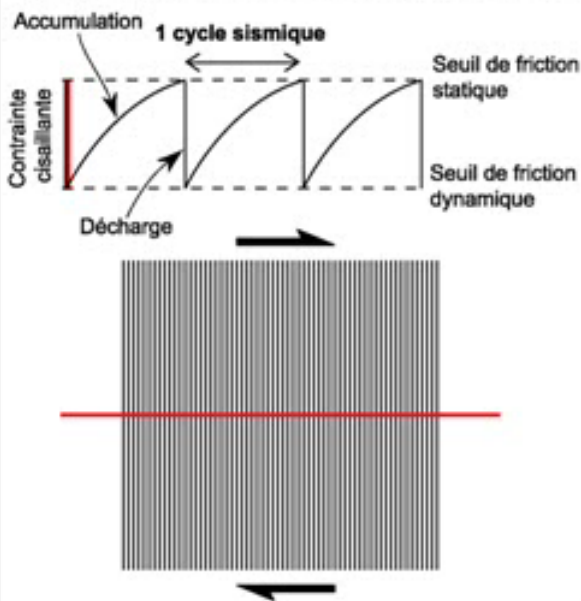
7-12 km = TRANSITION DUCTILE-CASSANT



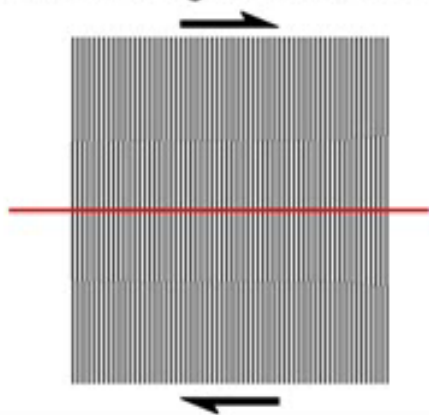
Groves et al., 2000

Profondeur obtenues par inclusions fluides :
Brown et Hagemann, WEB

Faille cassante : glissement sismique



Faille ductile : glissement asismique



GLISSEMENT SISMIQUE

- Déformation discontinue : cycle d'accumulation et de décharge de la contrainte et de la déformation élastique

DÉCHARGE = SÉISME

- FORTS taux de déformation instantanée (m/s)
- FORTS gradients de pression

GLISSEMENT ASISMIQUE (*ductile creep*)

- Déformation continue
- FAIBLES taux de déformation instantanée (cm/an)

RÉGIMES DE DÉFORMATIONS ET CIRCULATION DE FLUIDES

RÉGIME ASISMIQUE

Déformation continue

- Perméabilité globalement faible
- Faible gradient de pression de fluide
- **Migration de fluides lente et continue**

→ Fluides dirigés vers les zones de décompression (faible contrainte tectonique) générées par la déformation continue d'un patron de failles

→ RECHERCHE DES ZONES DE BASSE PRESSION

**Projets Consorem 2002,
2003, 2004, 2008-P1,
2008-P2**

RÉGIME SISMIQUE

Déformation discontinue

- Perméabilité structurale très élevée
- Forts gradients de pression de fluide
- **Migration de fluides rapide et discontinue (cycle sismique)**

→ Fluides libérés vers les zones d'ouverture de perméabilité structurale consécutive à la rupture sismique

→ RECHERCHE DES ZONES D'OUVERTURE PONCTUELLE DE LA PERMÉABILITÉ STRUCTURALE

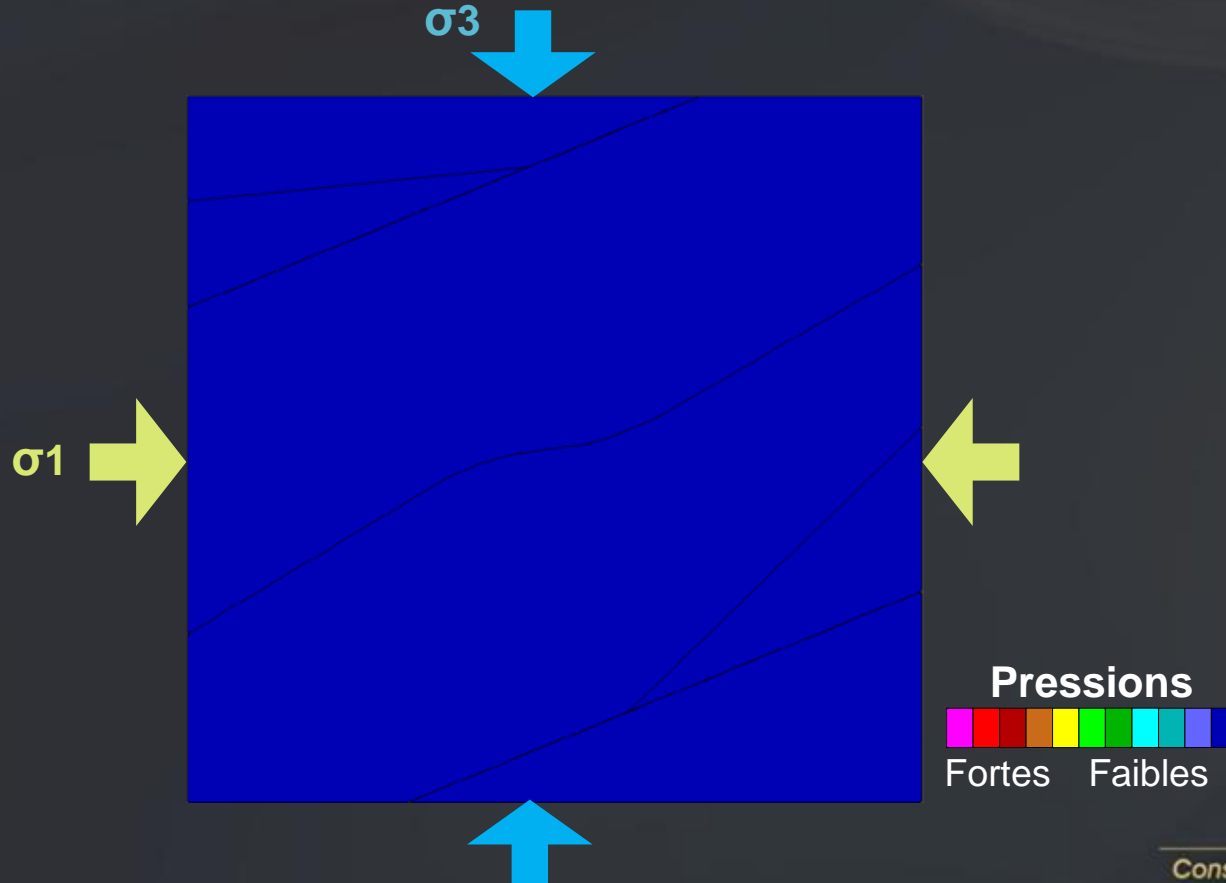
**Projet Consorem 2008-P3
Dynamique sismique de
la Faille Cadillac**

1. Introduction du principe de modélisation des paléocontraintes à des fins d'exploration
2. Déformation de la croûte moyenne : régimes sismique et asismique
- 3. Modélisation de la déformation continue régionale en Abitibi**
4. Modélisation de la déformation discontinue : dynamique sismique de la faille Cadillac
5. Guides structuraux, conclusions, perspectives

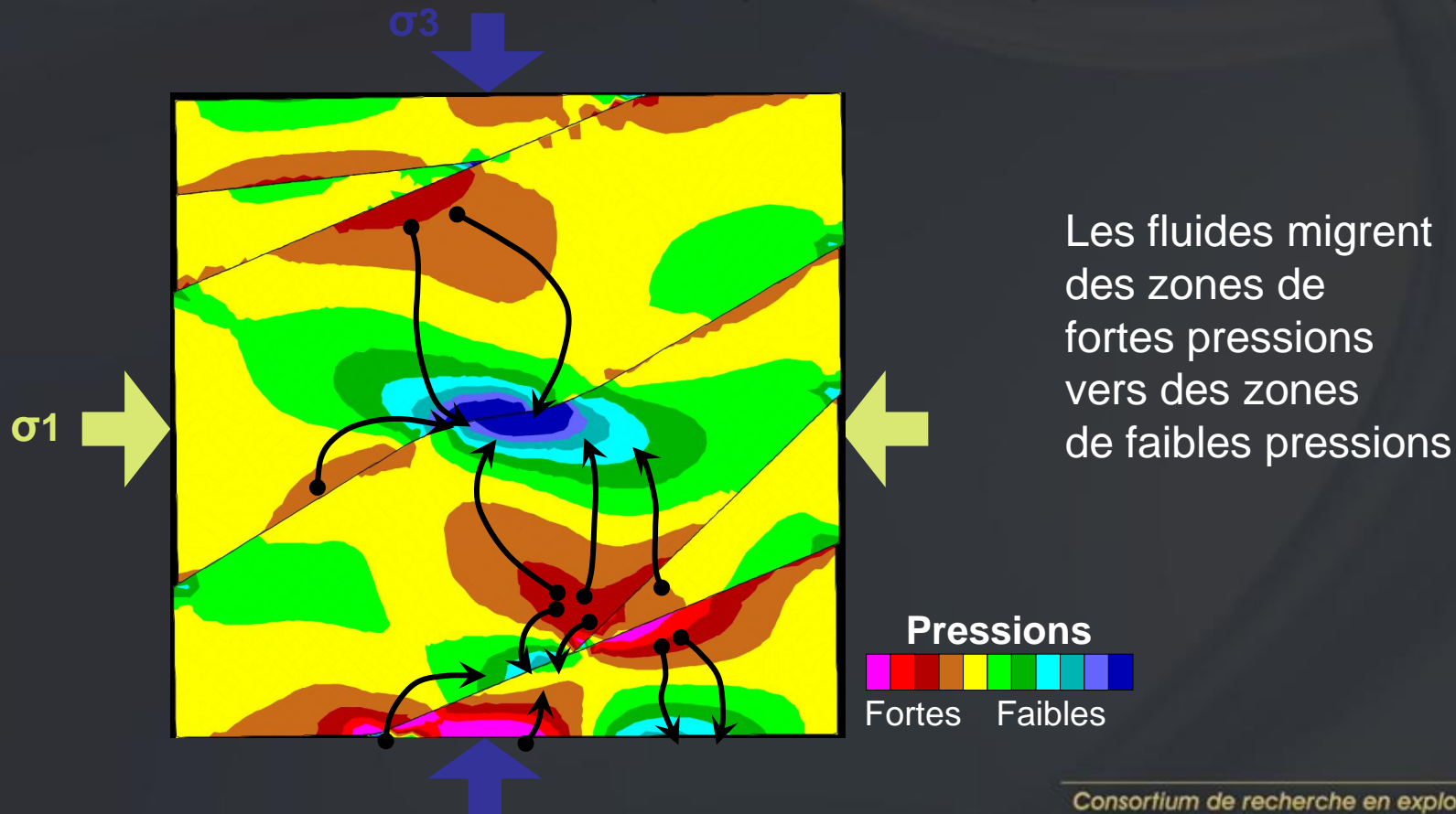
- **Modeleur géomécanique *UDEC* (*Universal Distinct Element Code*)**

- **Paramétrage des modèles :**

1. Géométrie du modèle (plan / coupe, échelle 1 km, 10 km, >100 km...)
2. Comportement rhéologique (élastique, élasto-plastique...)
3. Propriétés des failles/blocs (rigidité, cohésion, angle de friction interne...)
4. Conditions *in situ* et aux limites (compression, transpression, extension...)

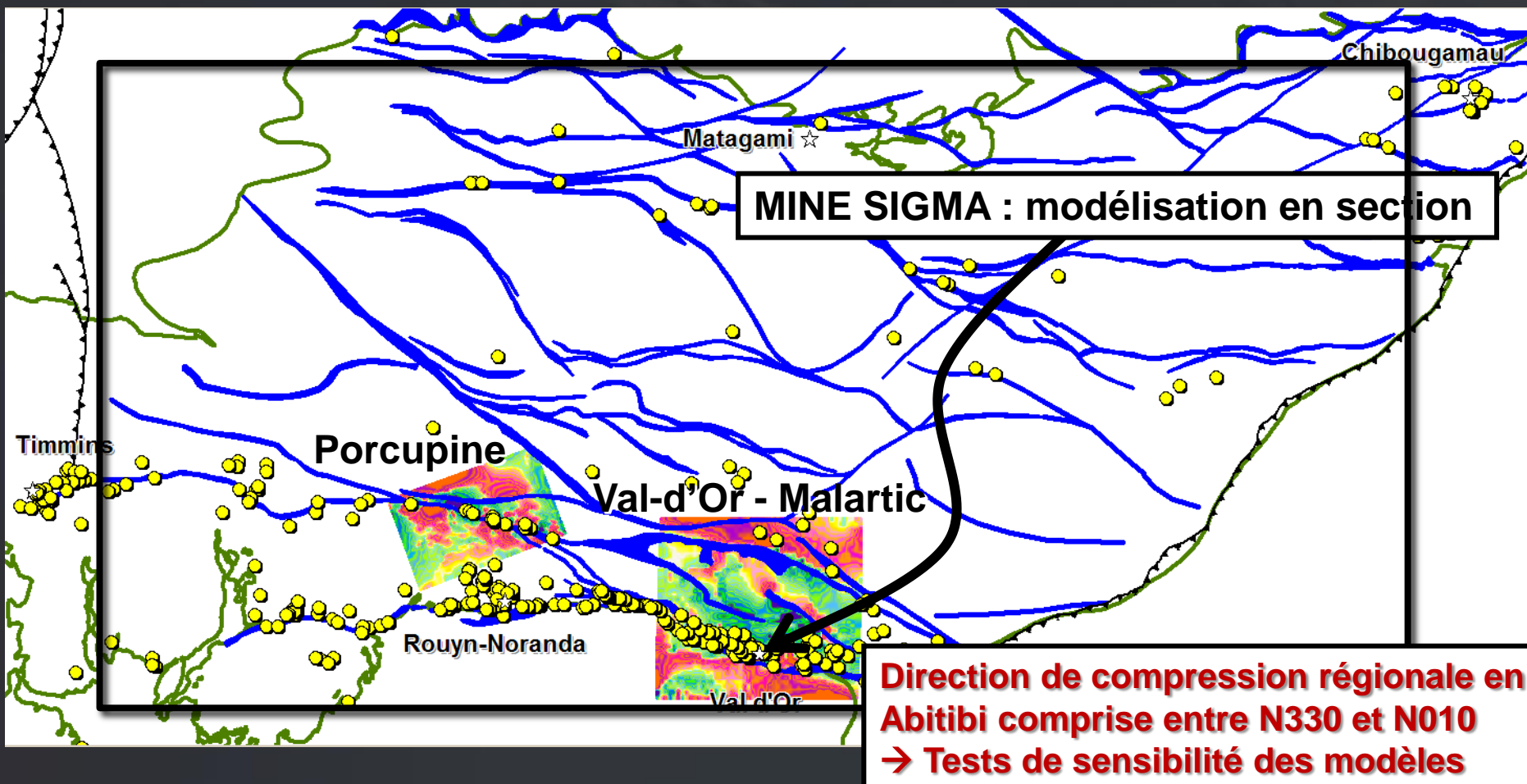


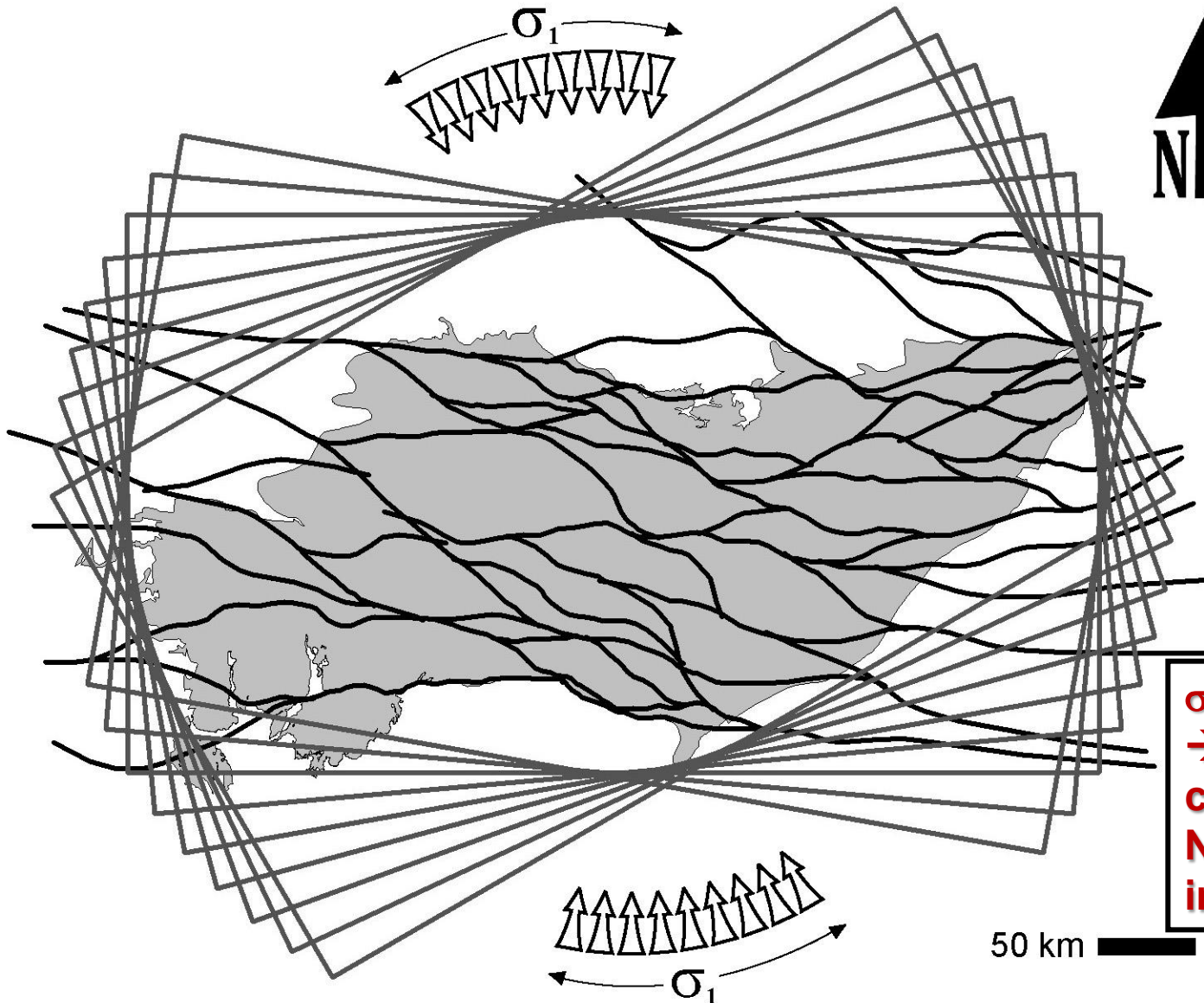
- Reproduction des champs de paléopressions induits par les déformations asismiques syn-minéralisation
- Modeleur géomécanique *UDEC (Universal Distinct Element Code)*
- Paramétrage des modèles :
 1. Géométrie du modèle (plan / coupe, échelle 1 km, 10 km, >100 km...)
 2. Comportement rhéologique (élastique, élasto-plastique...)
 3. Propriétés des failles/blocs (rigidité, cohésion, angle de friction interne...)
 4. Conditions *in situ* et aux limites (compression, transpression, extension...)



Objectifs du modèle à l'échelle de l'Abitibi :

1. Validation quantitative de l'approche à l'échelle régionale → vérifier statistiquement les corrélations entre minéralisations connues et paléopressions modélisées
2. Recherche de zones de haut potentiel aurifère dans les couloirs de failles





σ_1 : N330 – N010
→ 9 modèles
couvrant l'intervalle
N330 – N010 par
incréments de 5°

Domaine élastique homogène isotrope

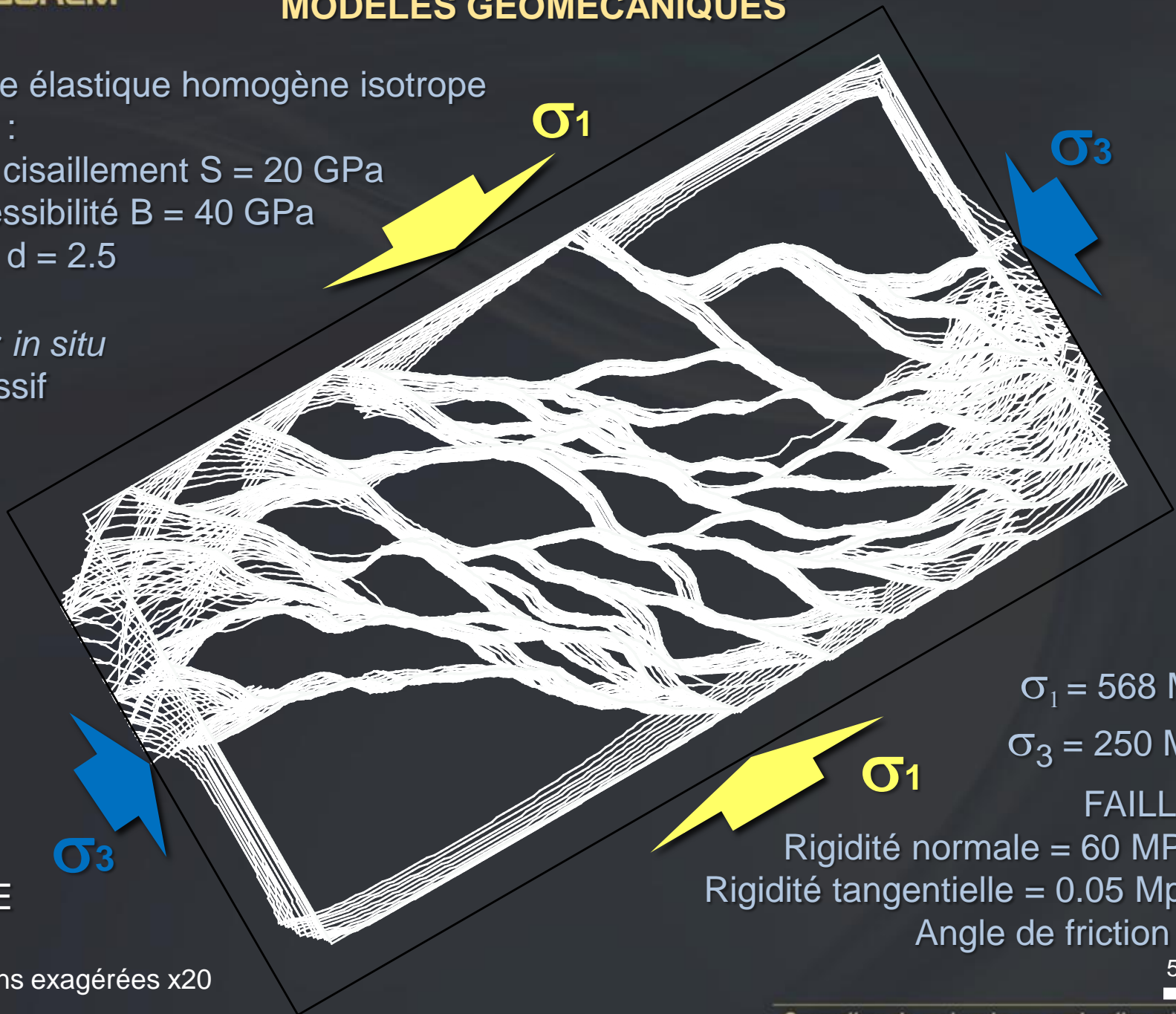
BLOCS :

Module cisaillement $S = 20$ GPa

Compressibilité $B = 40$ GPa

Densité $d = 2.5$

Tenseur *in situ*
compressif



$\sigma_1 = 568$ Mpa

$\sigma_3 = 250$ MPa

FAILLES :

Rigidité normale = 60 MPa/m

Rigidité tangentielle = 0.05 Mpa/m

Angle de friction = 5°

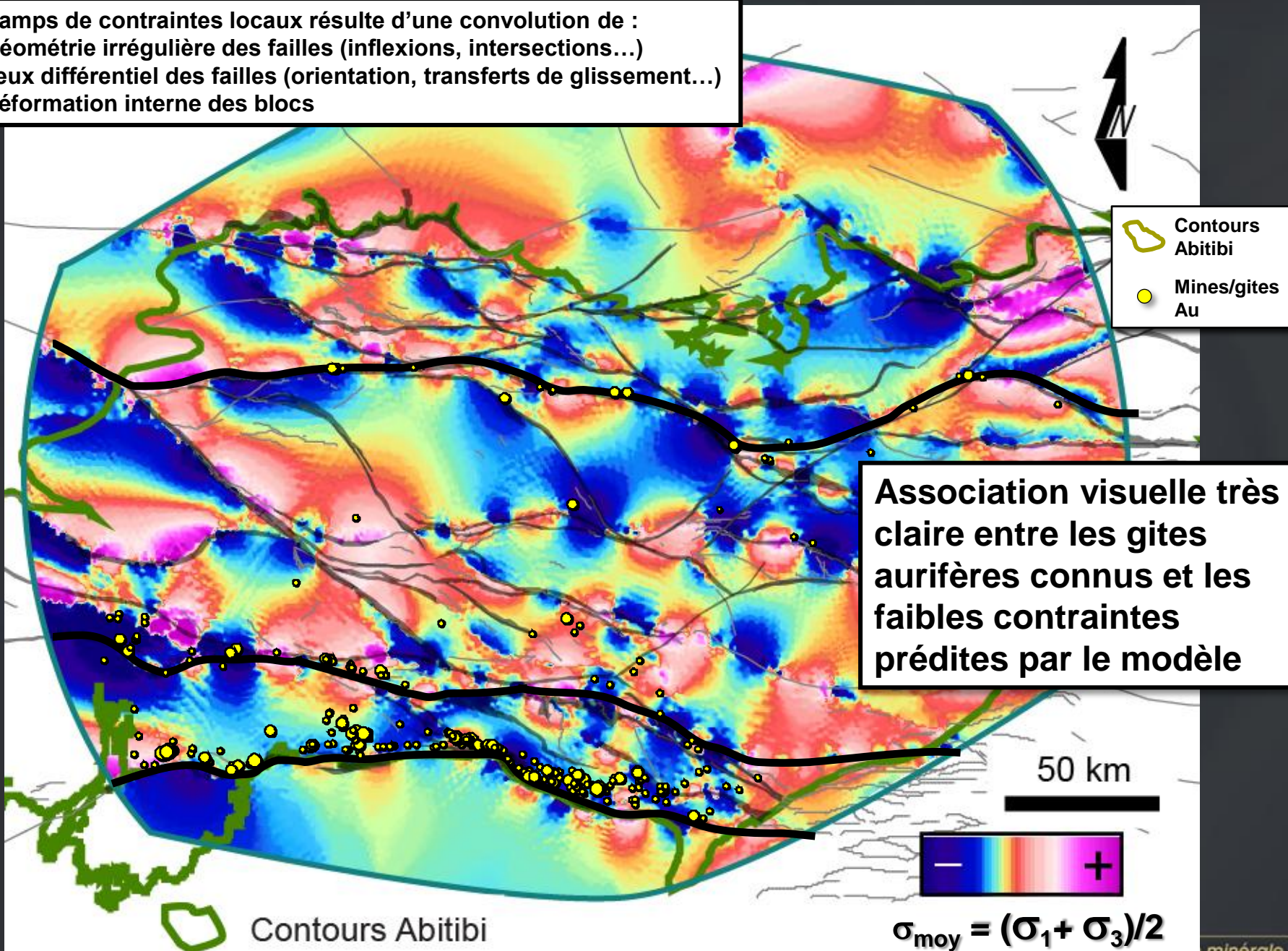
50 km

MODÈLE
N330

Déformations exagérées x20

Champs de contraintes locaux résulte d'une convolution de :

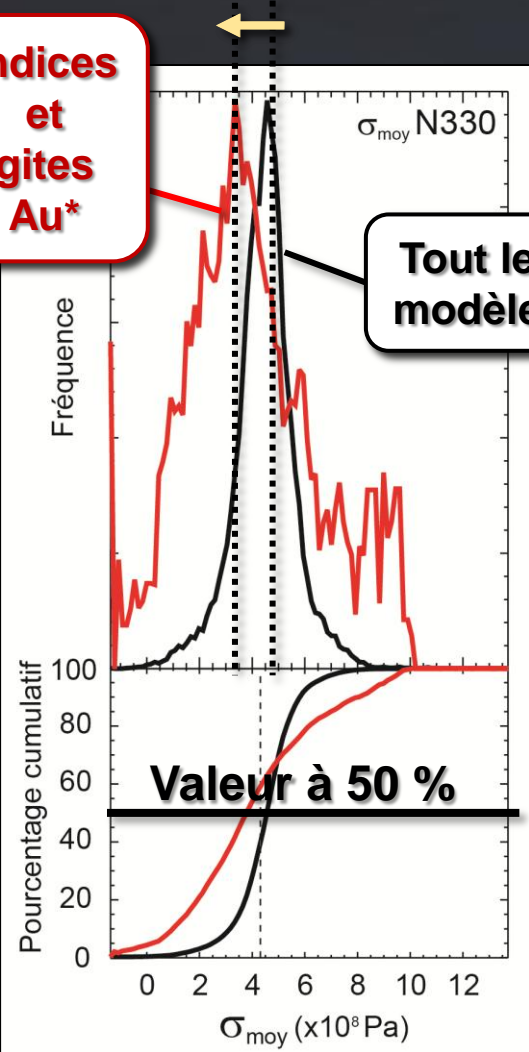
- Géométrie irrégulière des failles (inflexions, intersections...)
- Jeux différentiel des failles (orientation, transferts de glissement...)
- Déformation interne des blocs



Corrélation statistique (Au, σ), impact de la direction de compression régionale

Zones Au : moyenne décalée
~ 150 Mpa
vers les basses contraintes

Indices et gîtes Au*

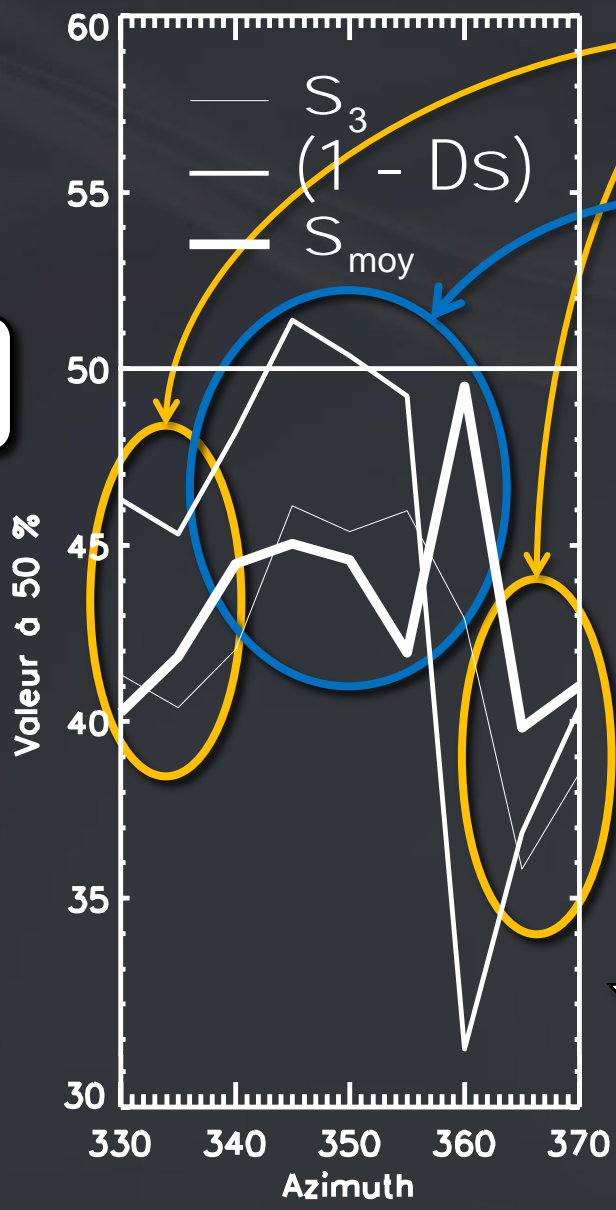


Tout le modèle

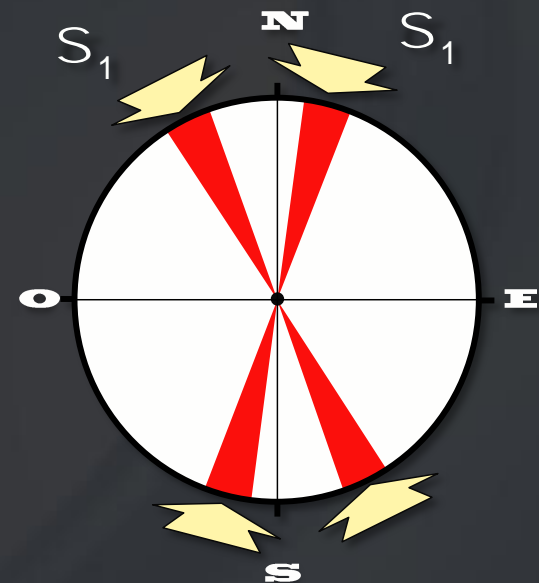
Valeur à 50 %

Meilleure corrélation pour les azimuts : N330-335 et N005-010

Corrélation moins marquée dans l'intervalle N340 – N000



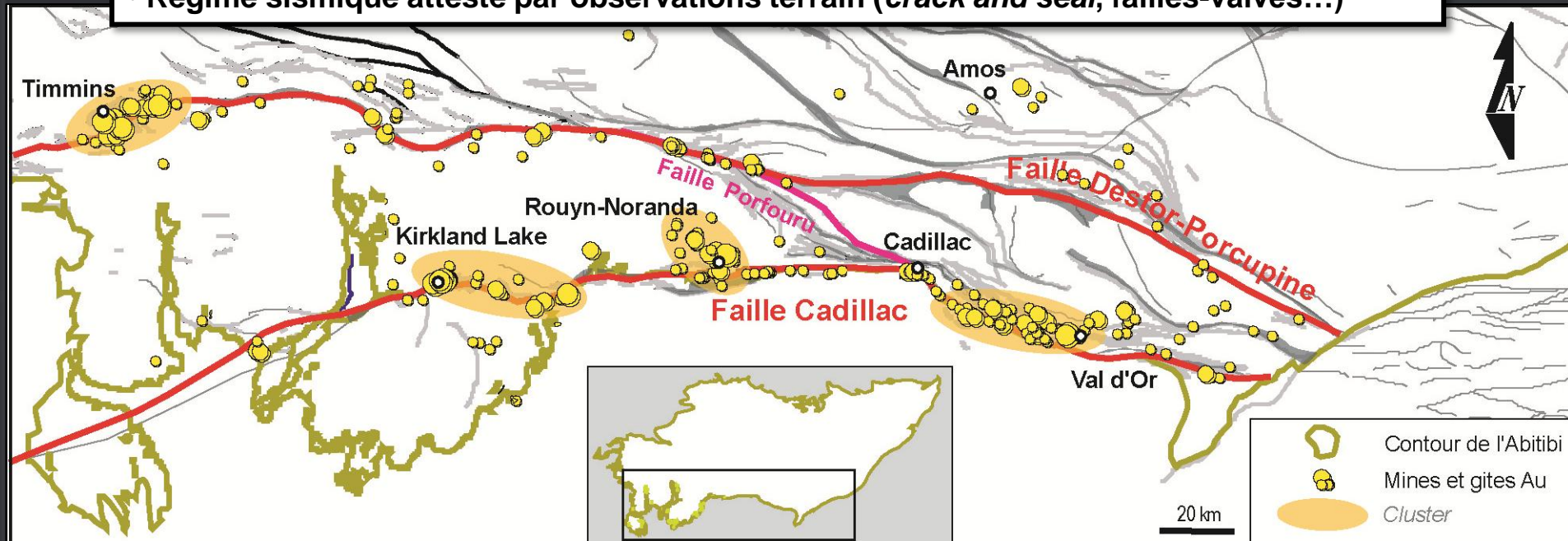
NW et NNE



1. Introduction du principe de modélisation des paléocontraintes à des fins d'exploration
2. Déformation de la croûte moyenne : régimes sismique et asismique
3. Modélisation de la déformation continue régionale en Abitibi
4. **Modélisation de la déformation discontinue : dynamique sismique de la faille Cadillac**
5. Guides structuraux, conclusions, perspectives

FAILLE CADILLAC

- Structure métallifère de rang mondial : > 37 gisements rang mondial, 3200 tAu (Québec)
- Faille transcrustale, activité archéenne polyphasée
- Jeu dextre tardi-orogénique synchroné des minéralisations Au filoniennes
- Gisements concentrés dans les failles et 2^{ème} et 3^{ème} ordre proximales
- Régime sismique attesté par observations terrain (*crack and seal*, failles-valves...)

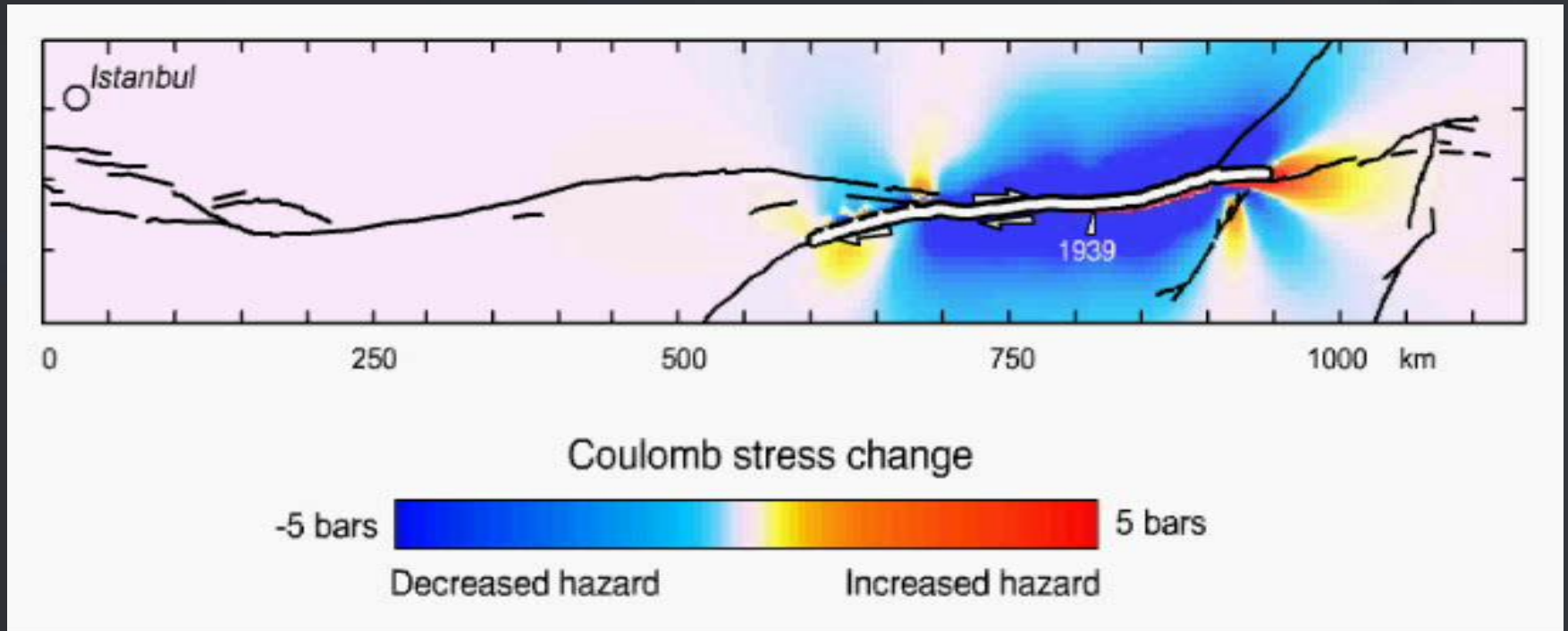


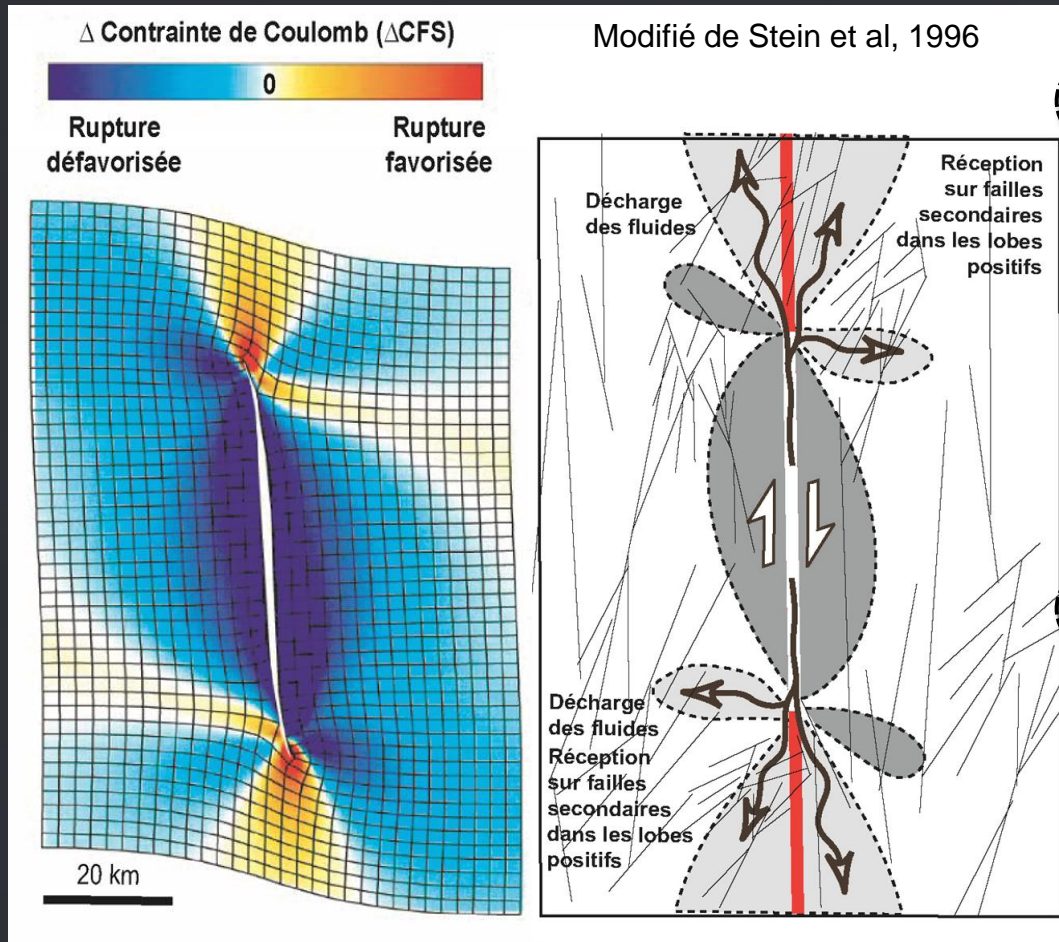
- Distribution très hétérogène à l'échelle régionale : formations d'amas de gisements (*clusters*) de longueur 30 – 50 km → camps miniers
- Phénomène observé sur autres failles translithosphériques archéennes : Faille Boulder-Lefroy (Australie, Weinberg et al, 2004) ; Faille Ashanti (Ghana, Harcouët-Menou et al, 2009)
- Segments entre les amas : 30, 50, > 50 km
- Amas souvent associées à inflexions de la faille

SÉISME ET DOMMAGES COSISMISTIQUES :

La théorie des *aftershocks*

- Théorie issue de la recherche sur les failles translithosphériques sismiques actuelles (faille San Andreas, faille Nord-Anatolienne) → analogues faille Cadillac
- **PRINCIPE** : Modéliser les zones de déformation engendrées dans l'environnement d'un séisme majeur
 - Zones de rapprochement / d'éloignement des conditions critiques de rupture
 - Cartographie du *coefficient de rupture* = contrainte de Coulomb (*Coulomb Failure Stress*)





LOBES POSITIFS

$$\Delta CFS > 0$$

Zones de dommages

- **Activité tectonique accrue**
→ Micro-sismicité
- **Activation réseau fractures/failles**
→ Perméabilité structurale +++

LOBES NÉGATIFS :

$$\Delta CFS < 0$$

- **Tectoniquement inactif**
→ Pas de micro-sismicité
- **Porosité fermée**

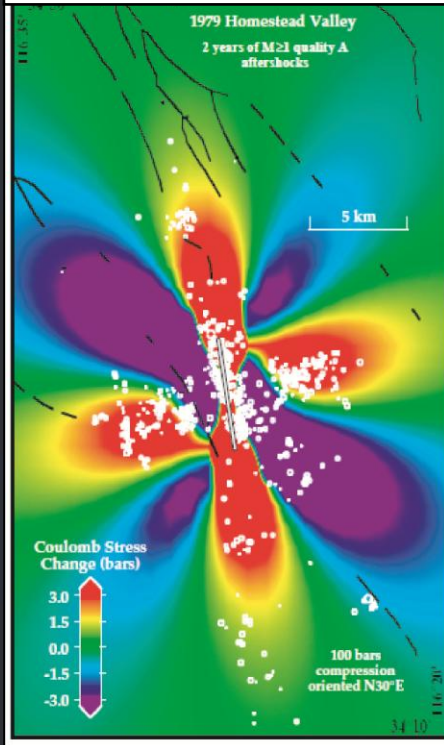
OBSERVATIONS ACTUELLES

- **Augmentation perméabilité crustale à grande échelle > 10 ordres grandeur** pendant les mois suivants une rupture majeure sur le front de subduction Chilien (Husen et Kissling, 2001)
- **Augmentation de la perméabilité des failles > 3 ordres grandeur** mesurée *in-situ* (essais de pompage) après un séisme majeur (Kitagawa et al, 2007)
- **Perturbation drastiques des aquifères communément observées** : modification niveaux piézo et réseaux hydrographiques, déclenchement hydrothermalisme (e.g., Wang et al, 2004)

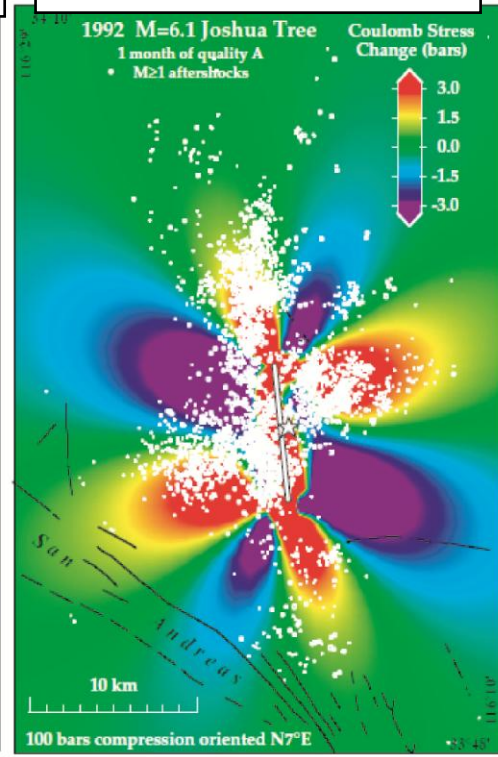
SÉISME ET DOMMAGES COSISMIQUES : La théorie des *aftershocks*

SAN ANDREAS, E.U.

1979 Homestead Valley



1992 *Joshua Tree* M6.1

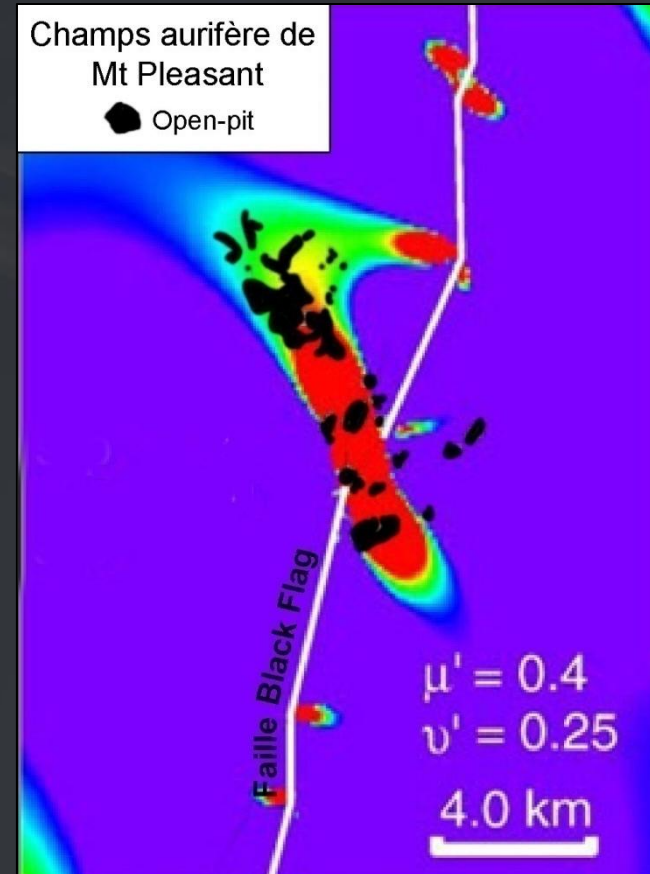


King et al, 1994

60 à 80% de la microsismicité (points blancs) se produit dans les zones de dommages modélisées

YILGARN, Australie

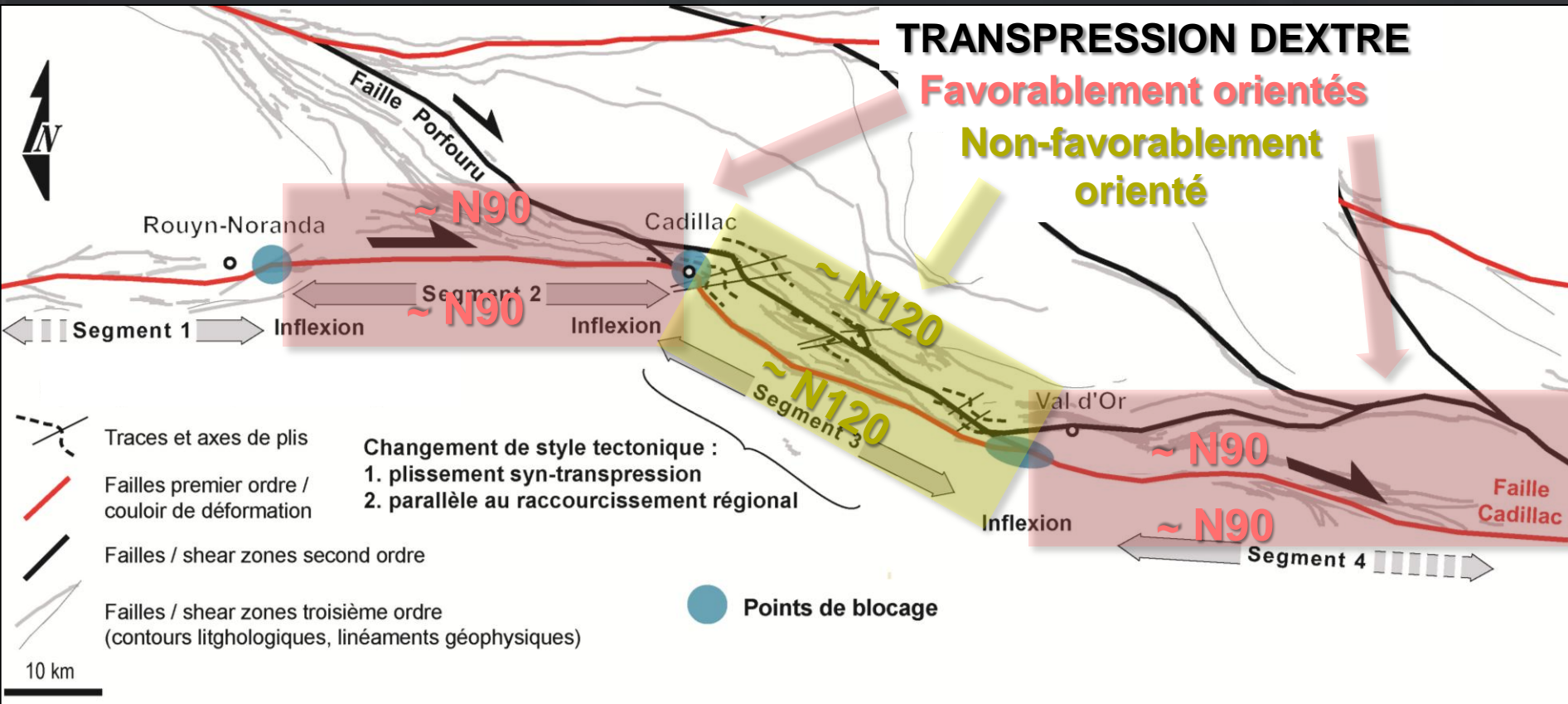
Champs aurifère de Mt Pleasant
● Open-pit



Micklethwaite et Cox (2006) :
excellente superposition
Au / zones de dommages

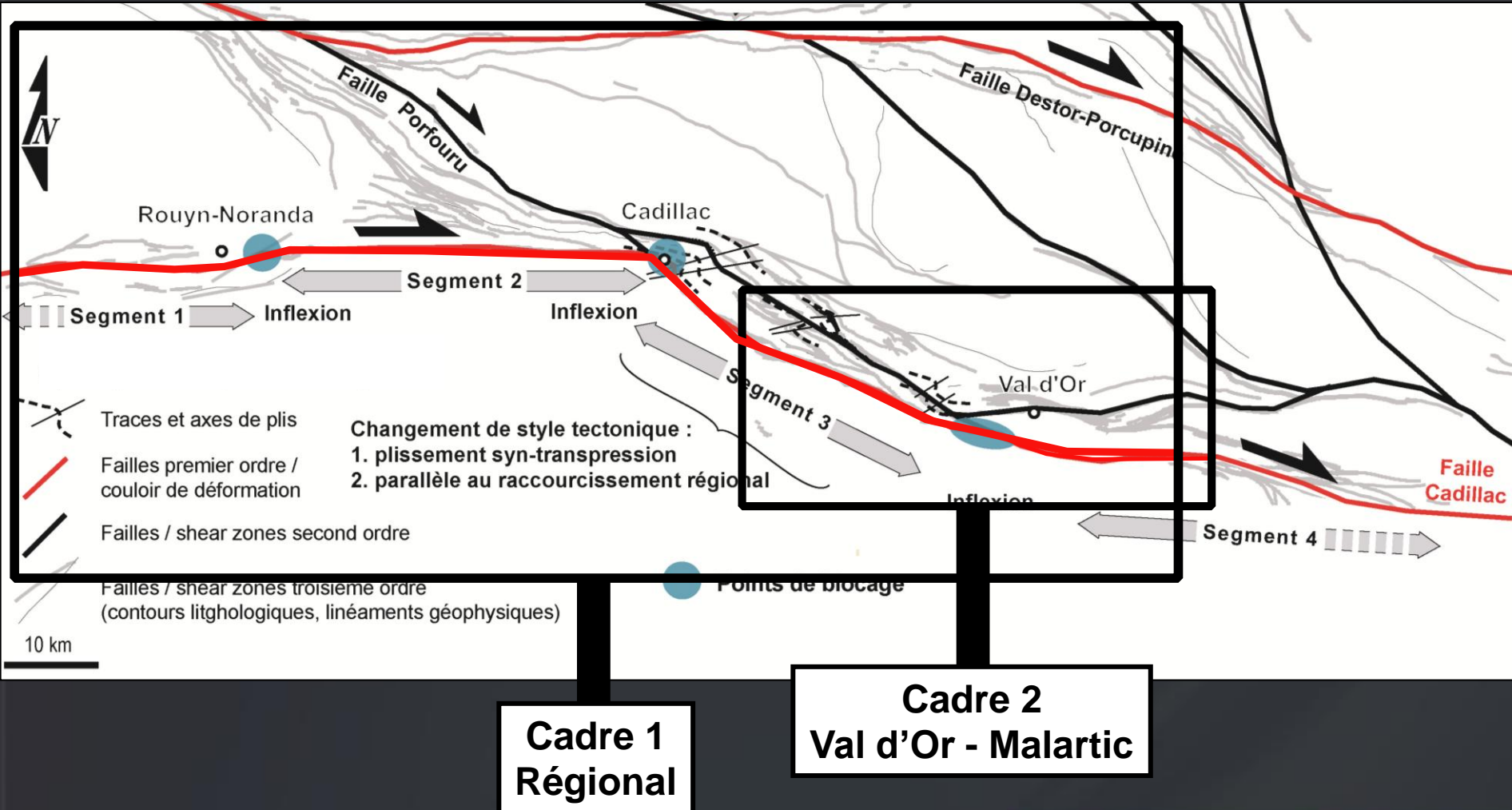
100 t Au → 10⁸ à 10¹² m³ fluide (Micklethwaite et Cox, 2004)

- Nécessite répétition d'un même schéma de migration de fluide (x100, x1000...)
- Point de blocage sismique récurrent (inflexion, décalage, intersection majeure)



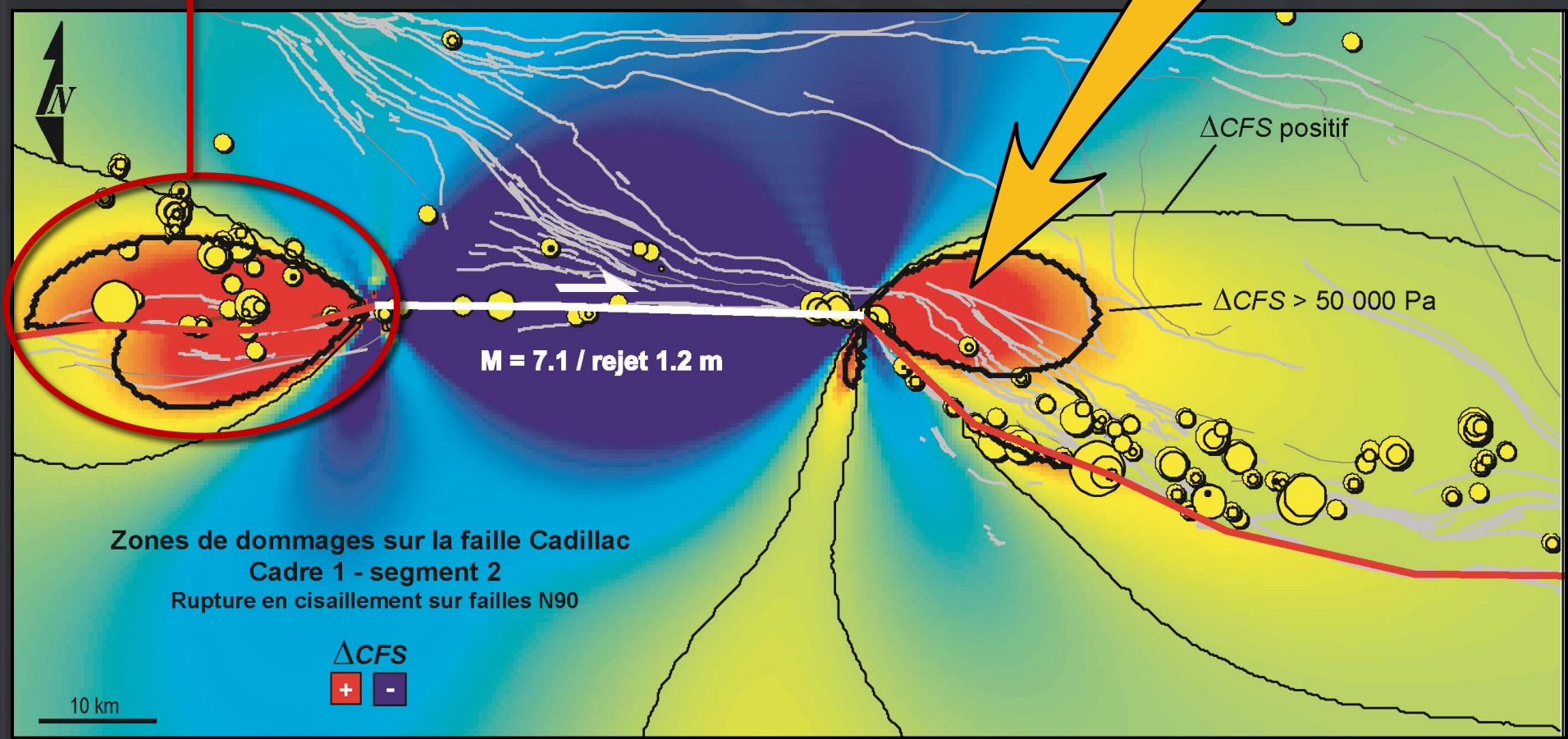
100 t Au → 10⁸ à 10¹² m³ fluide (Micklethwaite et Cox, 2004)

- Nécessite répétition d'un même schéma de migration de fluide (x100, x1000...)
- Point de blocage sismique récurrent (inflexion, décalage, intersection majeure)



Camp minier de Rouy-Noranda

- Wasamac (8 t Au)
- Francoeur (40 t Au)
- Peel-Elder (10 t Au)
- Powel (11 t Au)
- Silidor (15 t Au)
- Stadacona (14.5 t Au)



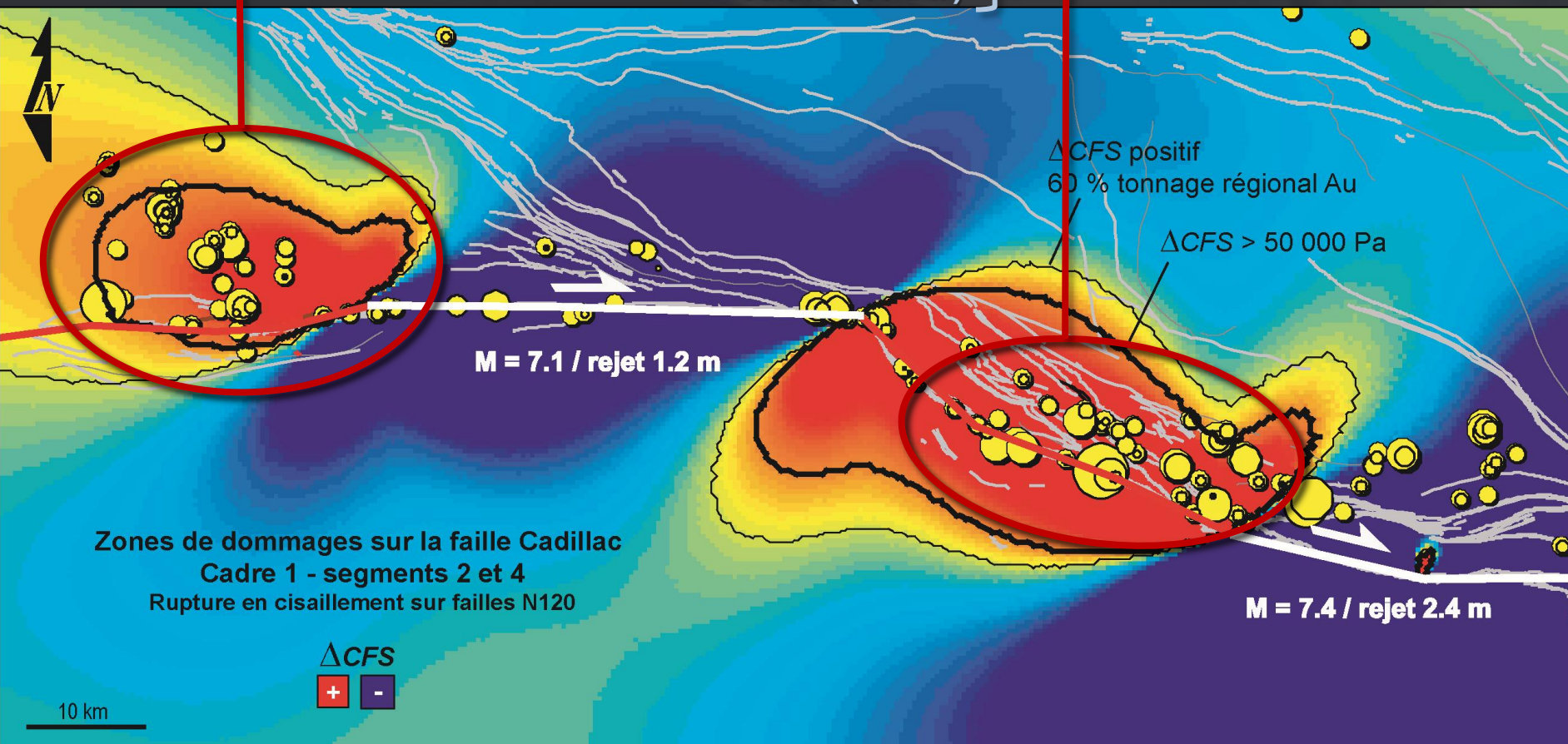
Segments ~ N90 : favorablement orientés pendant transpression régionale

Segment ~ N120 : parallèle direction raccourcissement → non-favorable = blocage

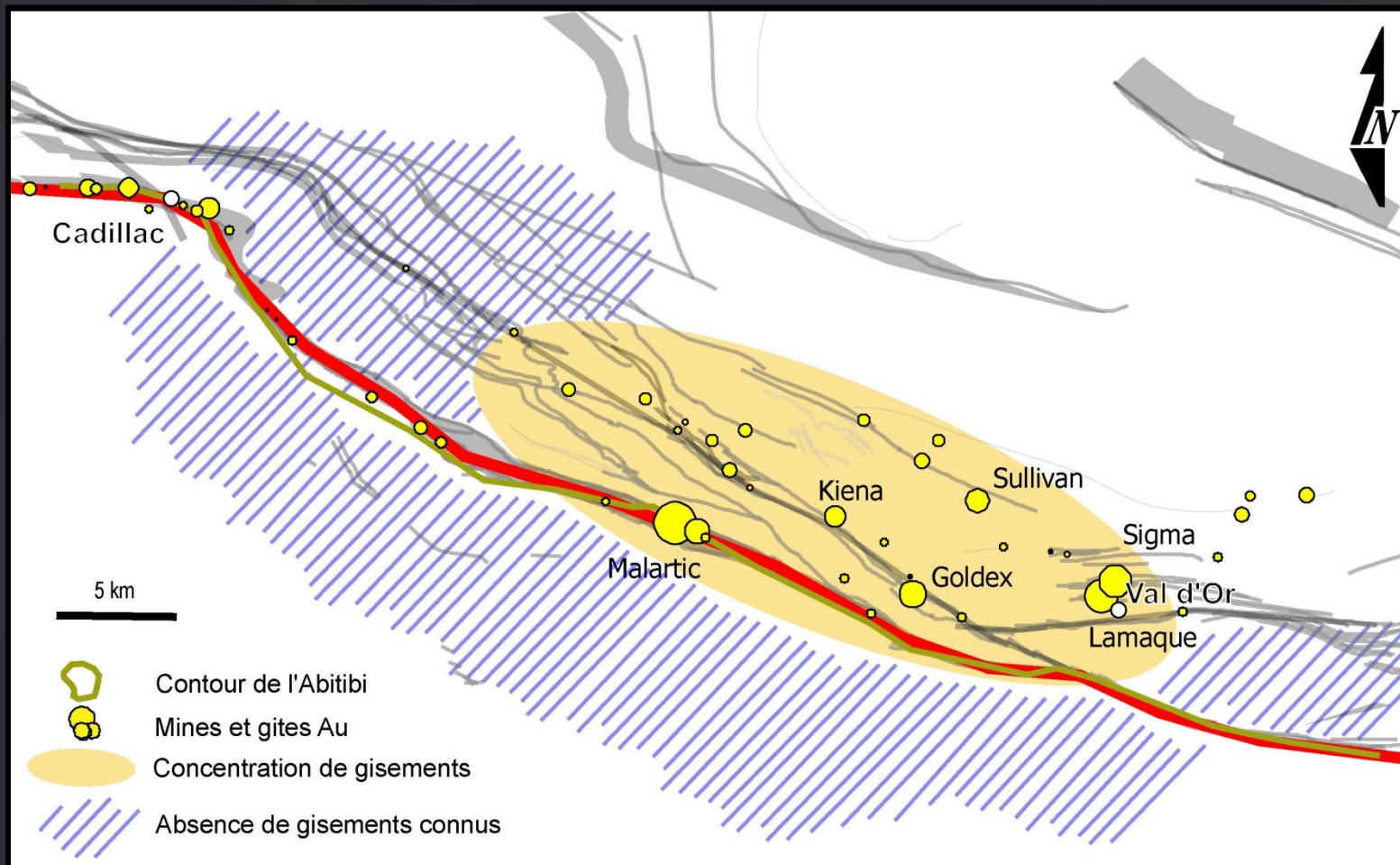
Camp minier de Rouyn-Noranda

- Malartic (200 t Au)
- Malartic Goldfield (52 t Au)
- Goldex (71 t Au)
- Sullivan (39 t Au)
- Kiena (31 t Au)
- Camflo (60 tAu)

Camp minier de Val d'Or - Malartic

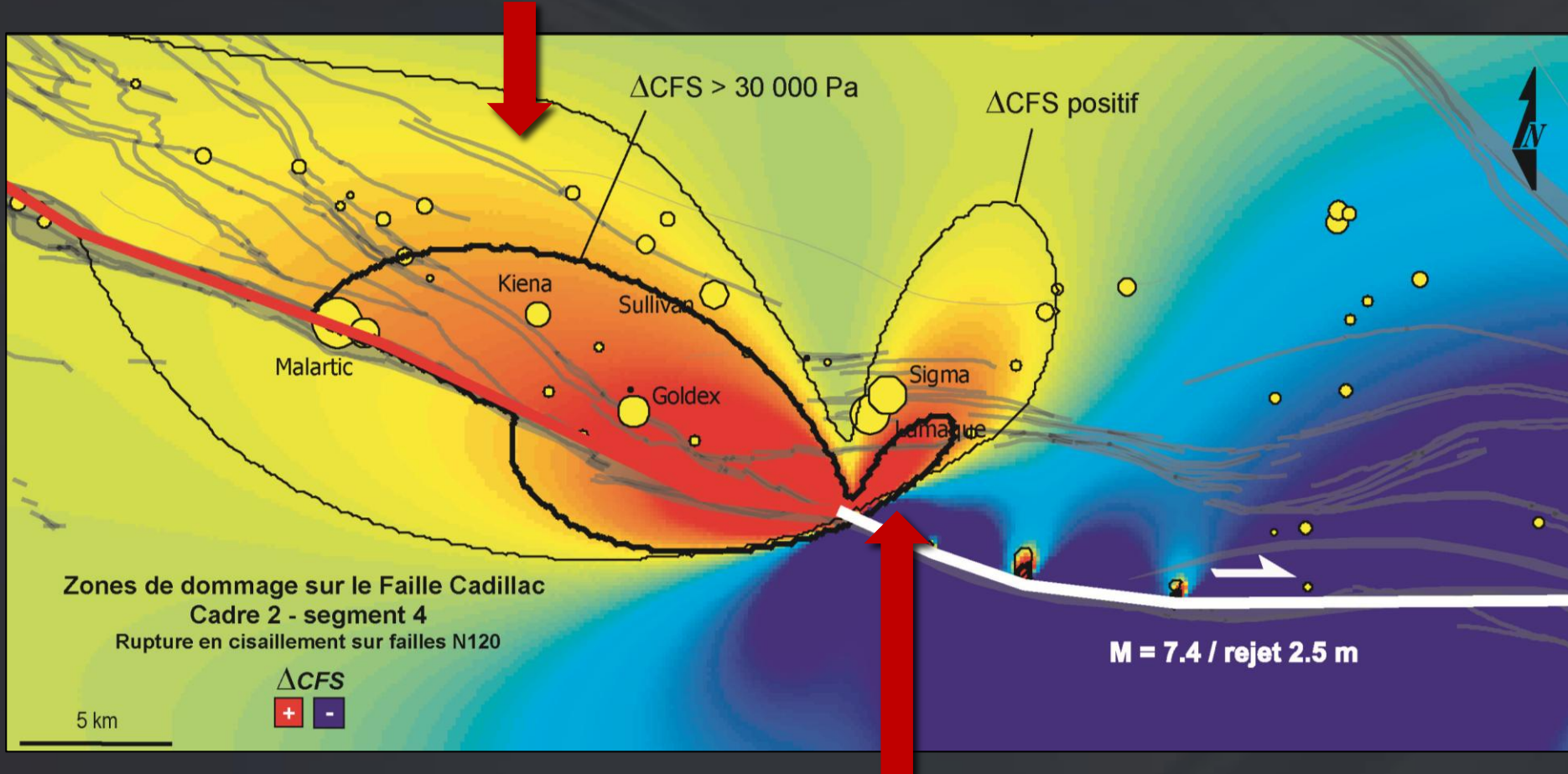


Modèle d'échelle locale sur les camps miniers de Val d'Or – Malartic – Cadillac



- Distribution très hétérogène à l'échelle du district
- Camps miniers développés sur le côté nord de la faille Cadillac

Lobe principal se développe sur le côté nord de la faille
 → camps miniers de Val d'Or – Malartic

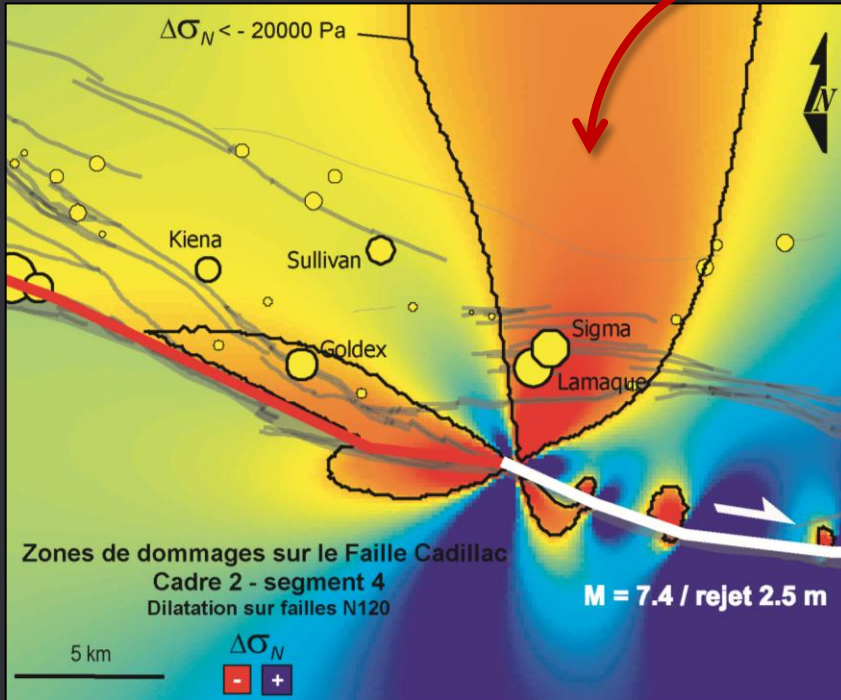


Lobe Latéral : Sigma-Lamaque

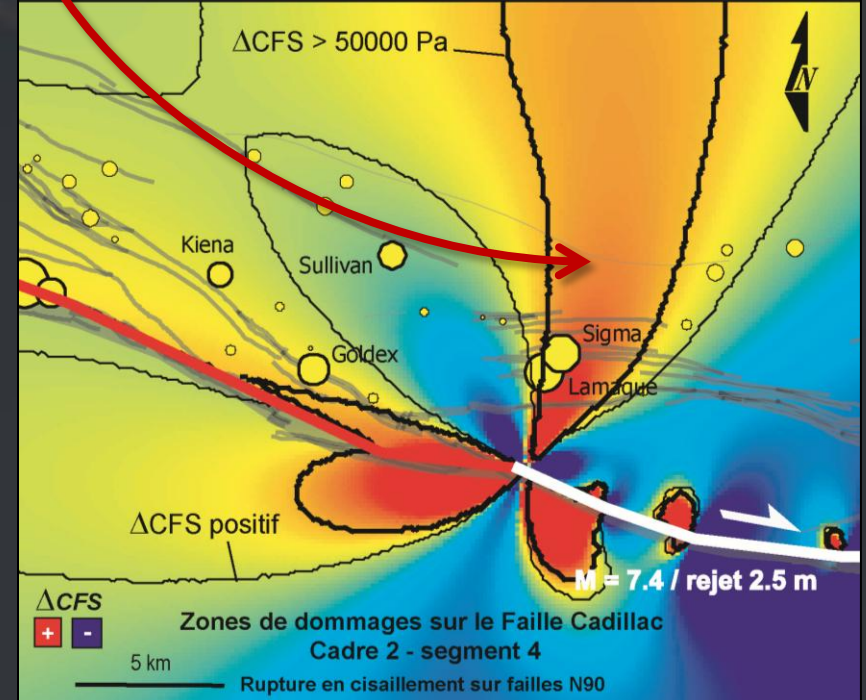
RÉSULTATS Cadre 2 SIGMA-LAMAQUE

Zones de dommage développées vers le nord

Rupture en dilatation



Structures porteuses N90



- Sur 3 zones de dommage superposées
- Extension des zones de dommage vers le nord

1. Introduction du principe de modélisation des paléocontraintes à des fins d'exploration
2. Déformation de la croûte moyenne : régimes sismique et asismique
3. Modélisation de la déformation continue régionale en Abitibi
4. Modélisation de la déformation discontinue : dynamique sismique de la faille Cadillac
5. **Guides structuraux, conclusions, perspectives**

GUIDES STRUCTURAUX D'EXPLORATION AURIFÈRE

STRUCTURES DE 1^{er} ORDRE :

Points de blocage sismique récurrent = zone d'inflexion nette, intersection de failles majeures, changement de style tectonique, décalage précoce, zone de relais...

PROCHE POINTS DE BLOCAGE (< 10 km) :

Décharge des fluides dans les « répliques » structurales (= failles 2^{ème} / 3^{ème} ordre subparallèles à la faille principale) → gisements

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

- **Déformations sismiques et asismiques coexistent pendant les périodes de minéralisation régionales** → Différents styles de gites ? Faible teneur - fort tonnage (stockwork Qtz-Carb, e.g. Malartic) vs haute teneur – faible tonnage (veines Qtz-Carb-Tourm., e.g. Sigma-Lamaque) ?

- **Interactions avec hydrothermalisme magmatique** : zones de dommages intensifiées et concentrées autour des systèmes hydrothermaux magmatiques

- **Prochaines étapes :**
 1. Modélisation des doublets sismiques
 2. Couplage sismique/géomécanique : intégration des contrastes rhéologiques (volcanites, intrusions, sédiments) dans la modélisation des séismes archéens