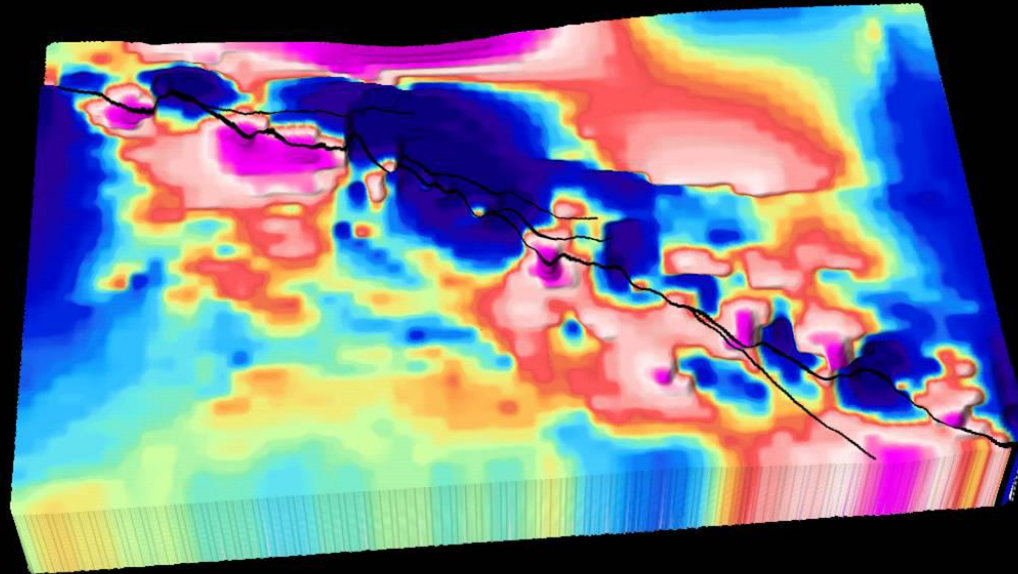


Modélisation géomécanique des paléocontraintes pour l'exploration de l'or orogénique en Abitibi



Stéphane Faure, Silvain Rafini et Sylvain Trépanier

Utilisation des outils et méthodes du Consorem
Québec Exploration, Château Frontenac, 22 Novembre 2010

ALEXIS

Cameco

MDN inc.

SOQUEM

VIRGINIA

AURIZON

AGNICO-EAGLE

xstrata
copper

CARTIER
RESSOURCES

stornoway
DIAMOND CORPORATION

Ressources
d'ARIANNE

xstrata
zinc

ONHYM

GERTM

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

Plan

Introduction: gisements d'or de type orogénique

Principes, méthodes, hypothèses, paramètres

Résultats de modélisations géomécaniques en Abitibi

Section au sommet de la mine Sigma

Camp minier de Val-d'Or - Malartic

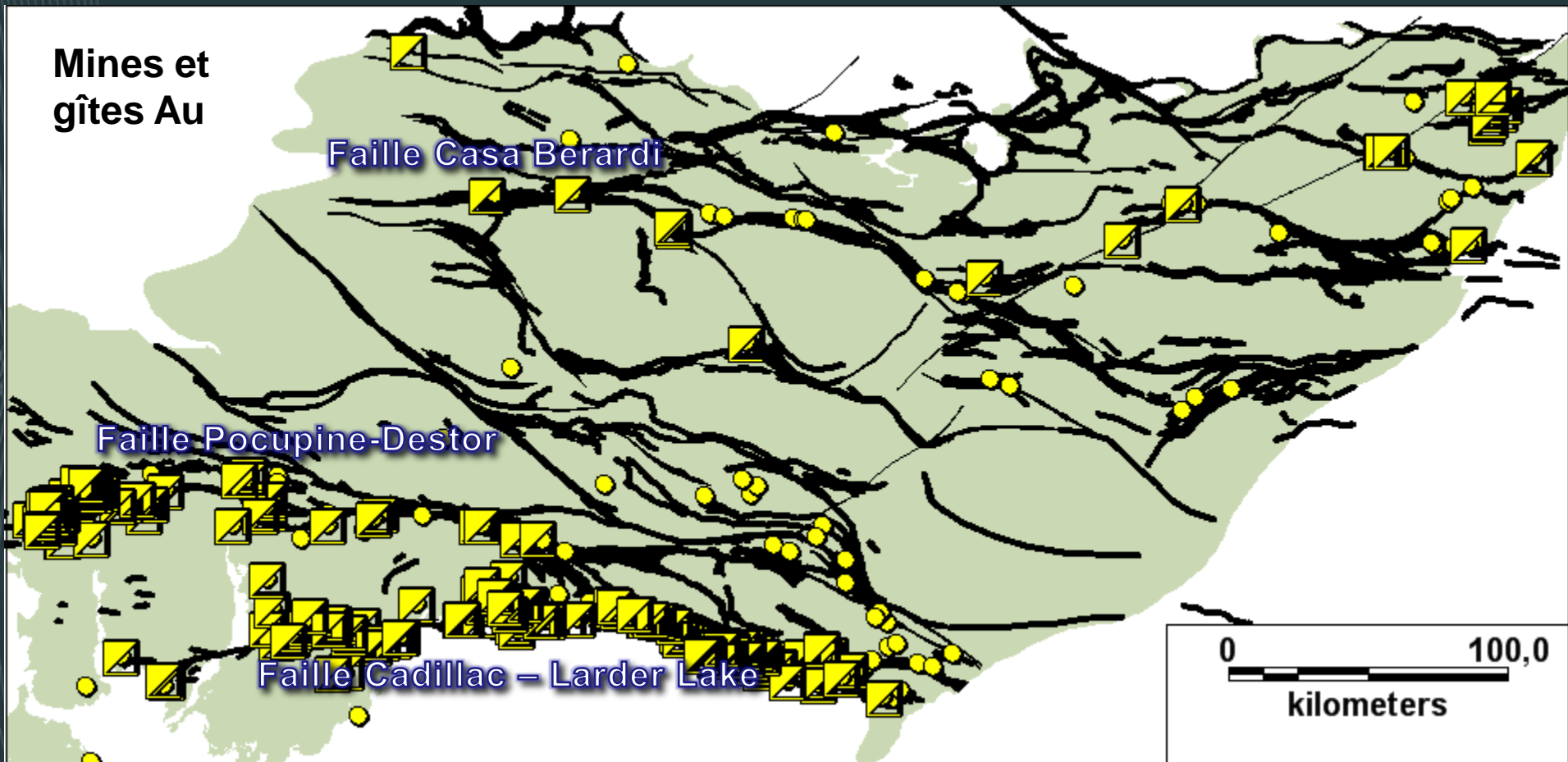
Faïlle Porcupine - Destor

A l'échelle de l'Abitibi

Conclusion

Gisements d'or orogénique

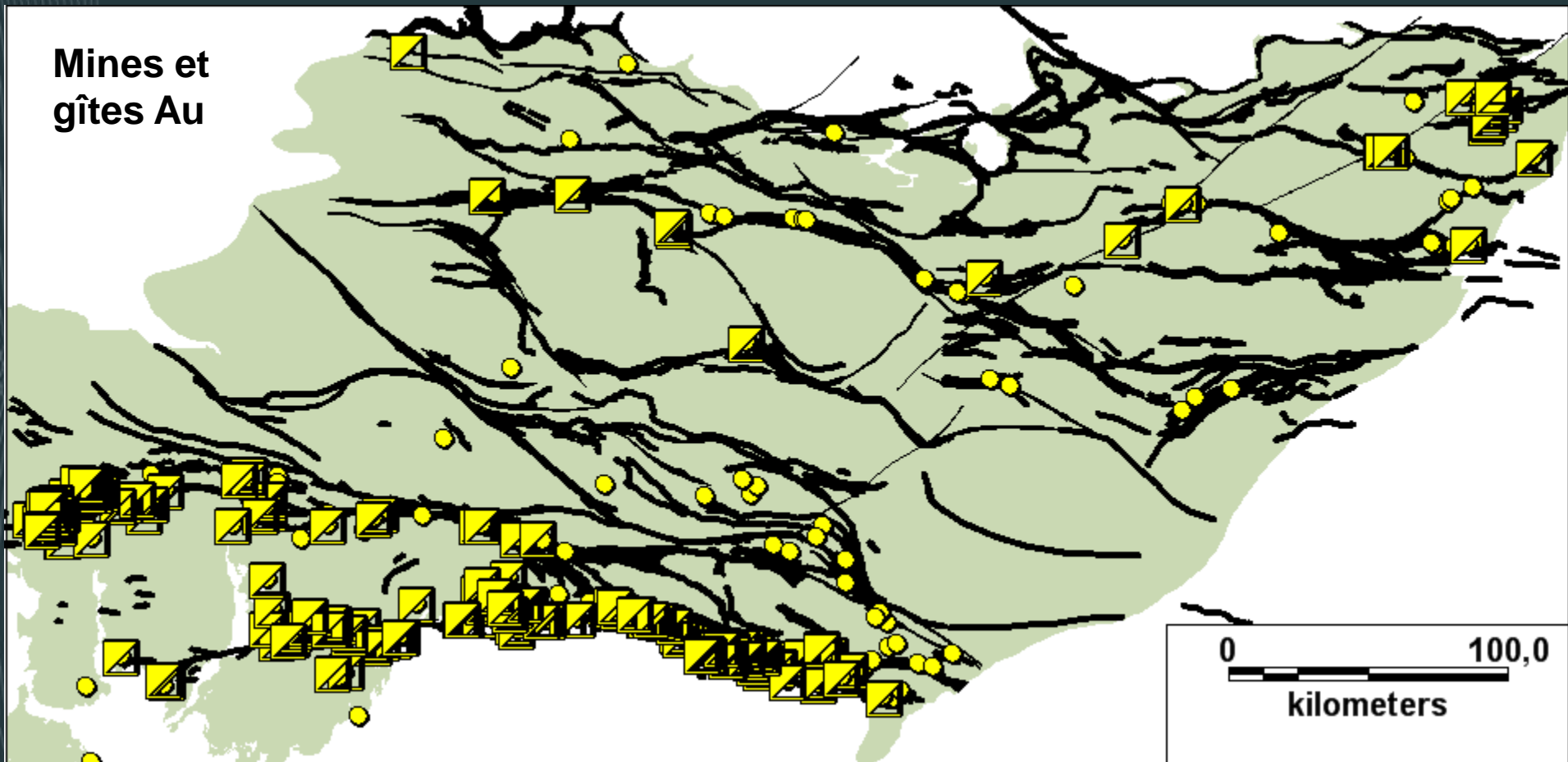
Il est connu que les minéralisations aurifères empruntent et se concentrent autour et le long de couloirs de déformation qui servent de conduits pour les fluides hydrothermaux



Failles Sigeom et Daigneault 1996

Gisements d'or orogénique

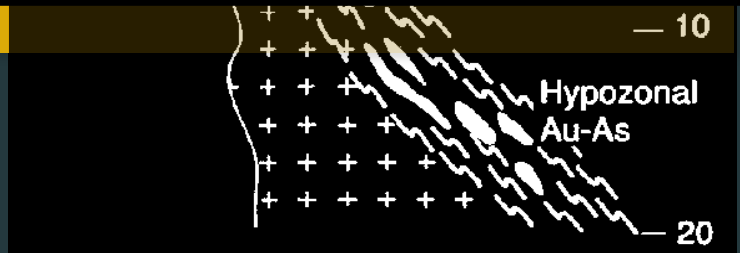
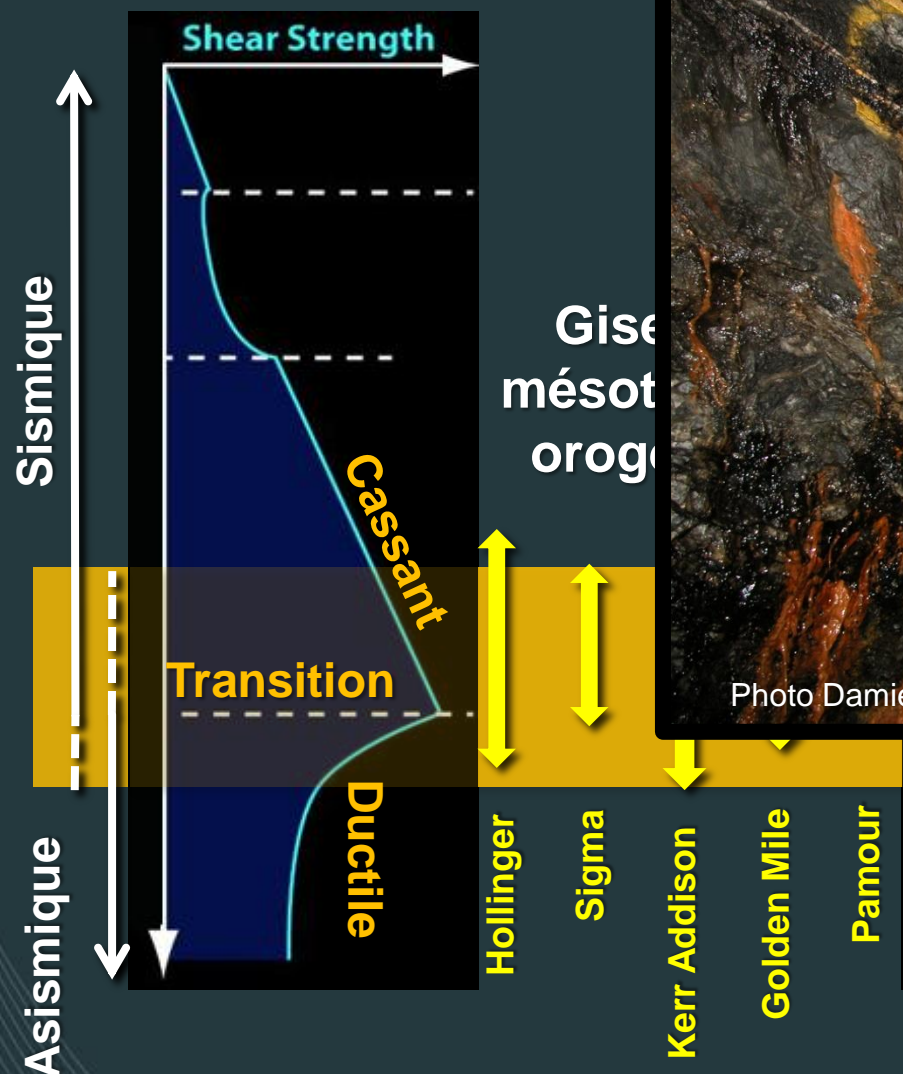
Ces couloirs sont connus en Abitibi, mais où chercher le long de ceux-ci?



Failles Sigeom et Daigneault 1996

Contexte de mise en place des gisements orogéniques

7-12 km = TRANSITION DUCTILE-

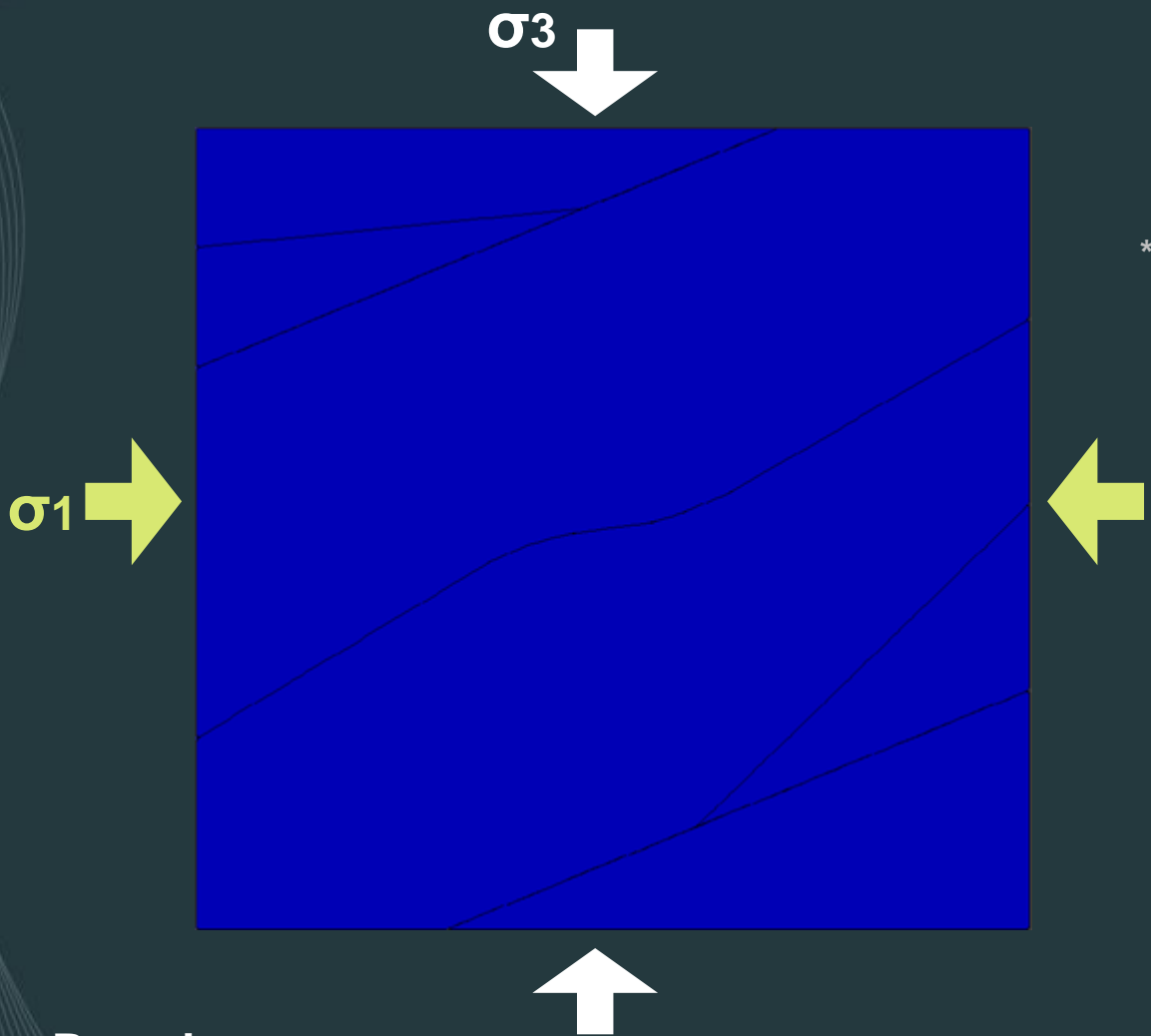


Groves et al., 2000

Profondeur obtenues par inclusions fluides
(Brown et Hagemann, WEB)

Principe des paléopressions et hypothèses

Principes



Modélisation des pressions avec UDEC*

**Universal Distinct Element Code*

Pressions



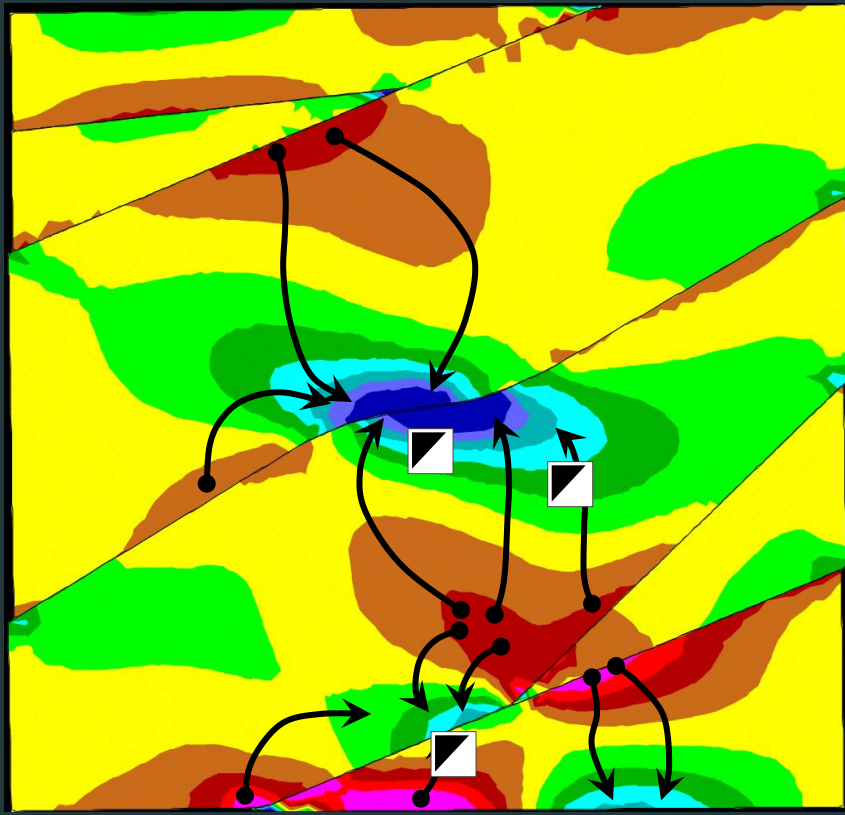
Fortes Faibles

Principes

σ_3 ↓

État d'équilibre interséismique

σ_1 →



Les fluides migrent des zones de fortes pressions vers les zones de faibles pressions récurrentes sur une longue période de temps (assez pour former un gisement)

La localisation des altérations et des minéralisations devrait valider cette hypothèse

Pressions
Fortes Faibles



Objectifs de la modélisation

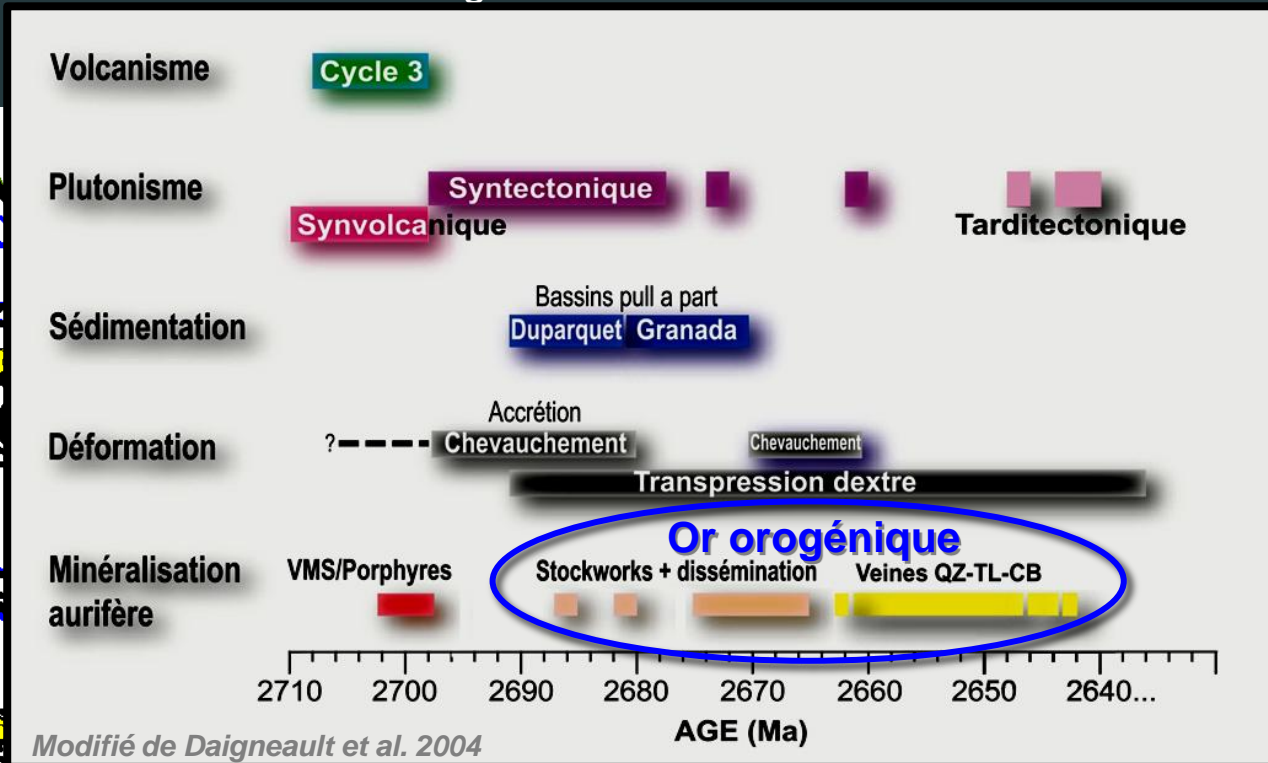
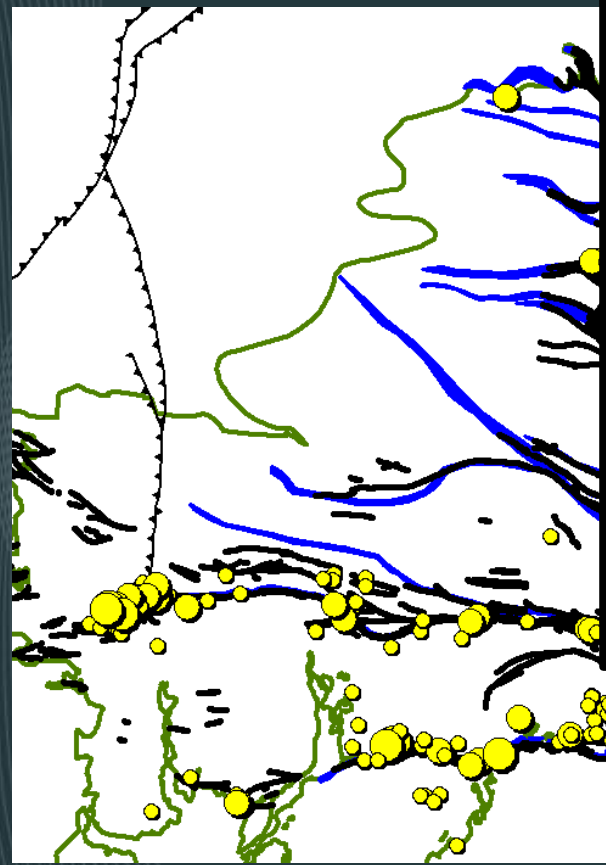
Utiliser une méthode numérique de reconstitution des paléopressions tectoniques (modeleur géomécanique UDEC*) afin de:

- 1- Déterminer la « perméabilité structurale » le long des couloirs de déformation de l'Abitibi (zones dépressurisées)
- 2- Générer de nouvelles cibles d'exploration le long de ces couloirs majoritairement recouverts par le Quaternaire
- 3- Mieux déterminer et comprendre les facteurs structuraux et rhéologiques qui contrôlent la mise en place de l'or orogénique dans les ceintures RV

* *Universal Distinct Element Code*

Réseau de failles modélisées

Postulat : la géométrie des failles modélisées s'apparente à celle qui prévalait lors de l'épisode de minéralisation vers la fin de l'orogénie



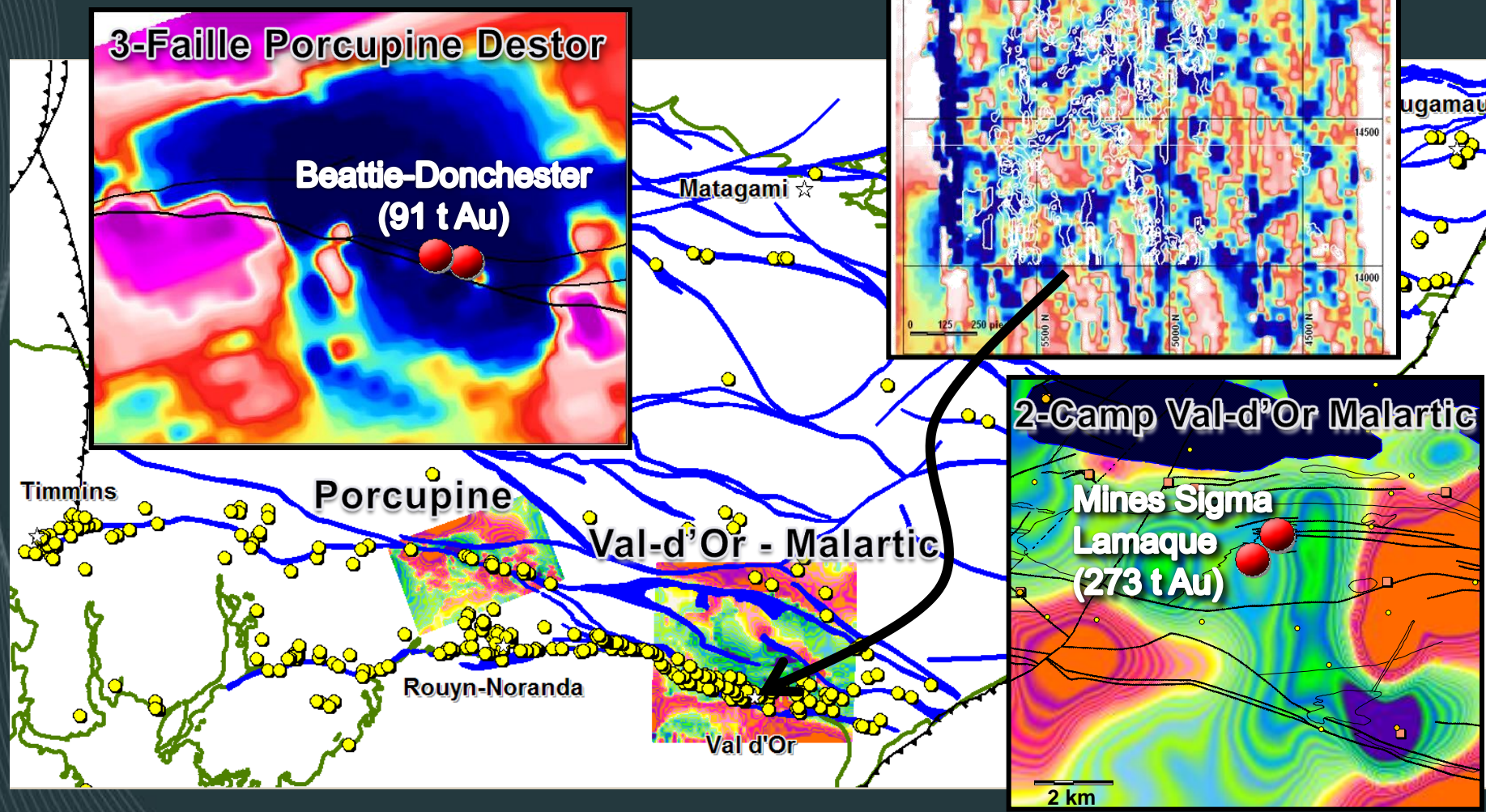
100 km

Failles Sigeom et Daigneault 1996

Principaux projets réalisés depuis 2000

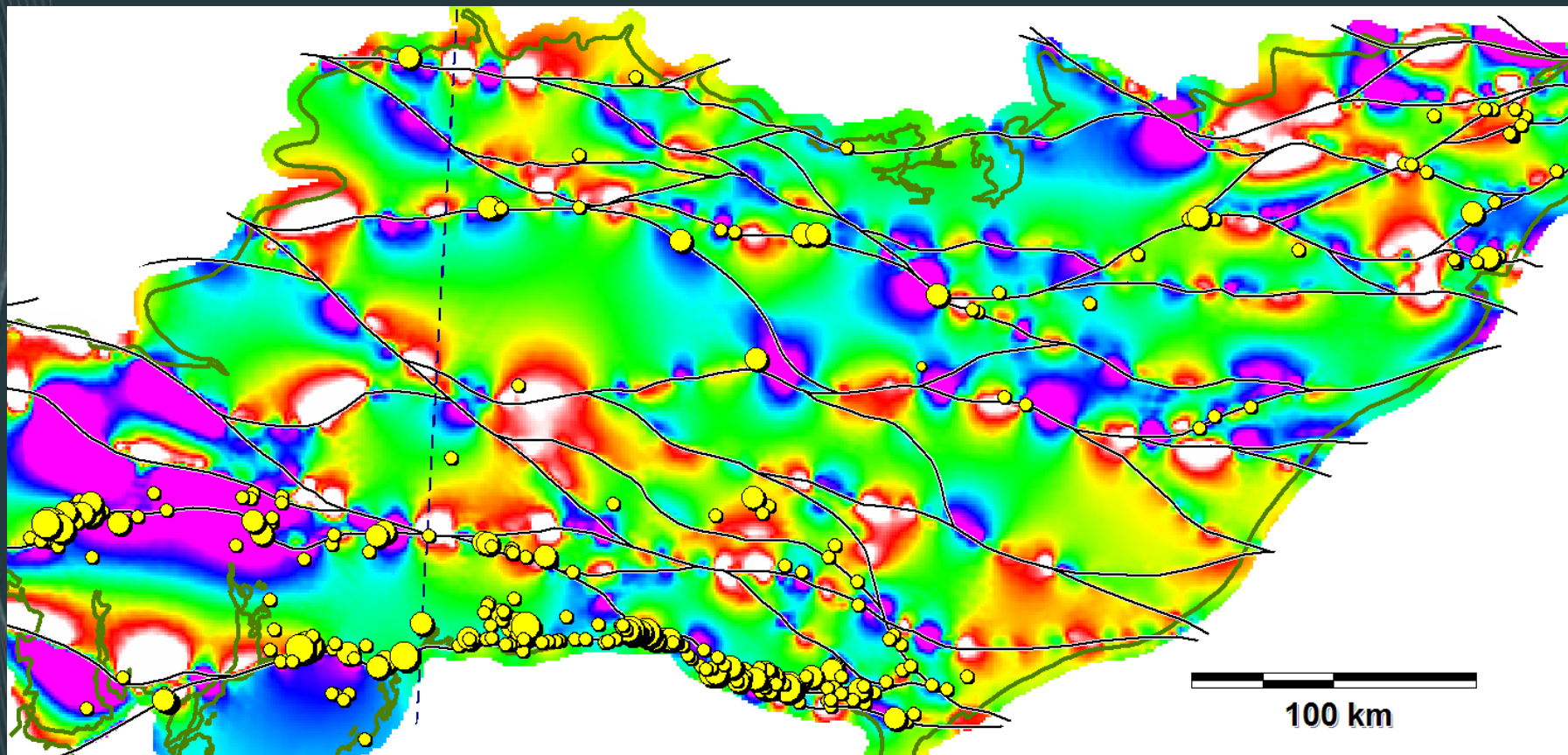
Travaux du CONSOREM

1-Paléopressions en section au sommet de la Mine Sigma



Travaux du CONSOREM

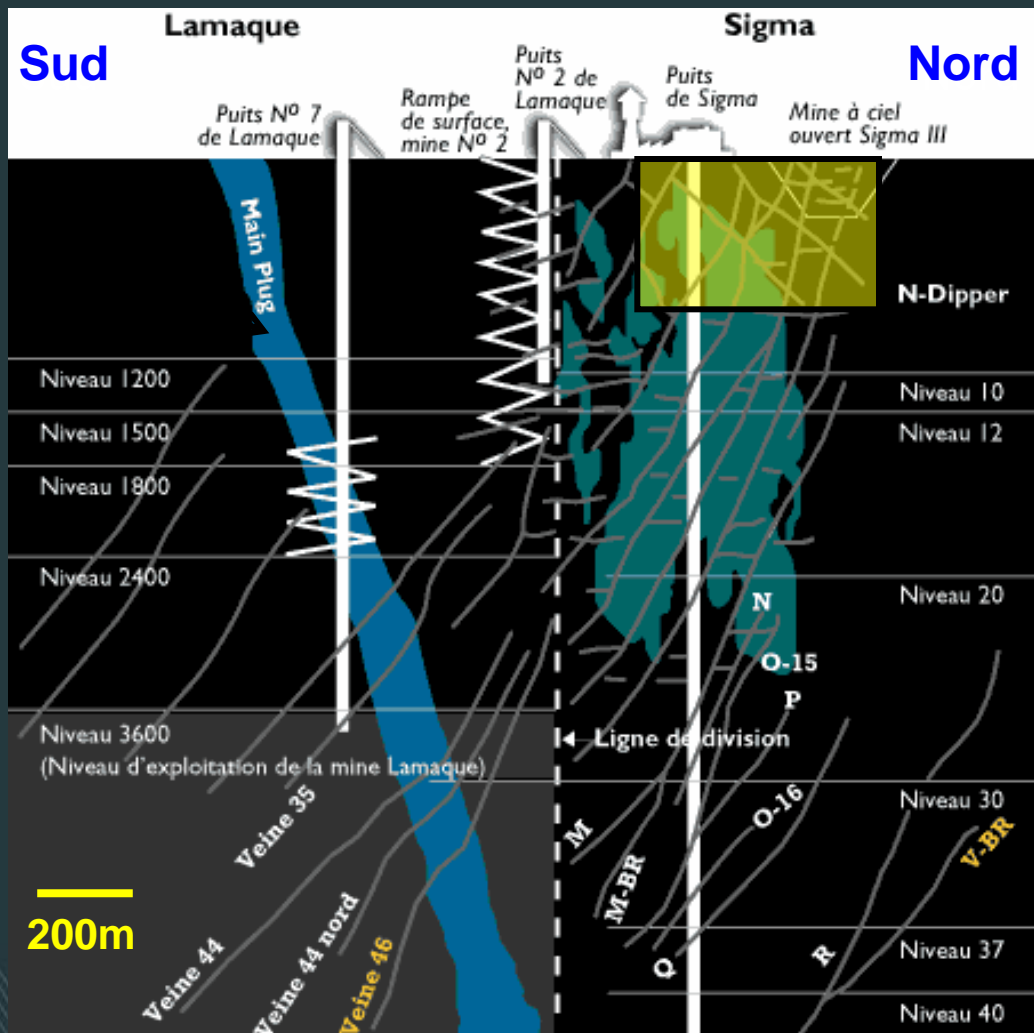
4- Modélisation à l'échelle de l'Abitibi



Section Sigma – Lamaque

Mines Sigma - Lamaque

Section



Sigma – Lamaque

Production 273 t Au depuis 1927

Gisement type veines Qz-Cb-TL-Au

Veines pas à peu déformées
Postérieures à schistosité

Age: 2680 Ma

Veines de cisaillement verticales
Veines d'extension sub-horizontales
Recoupement mutuel = synchrone

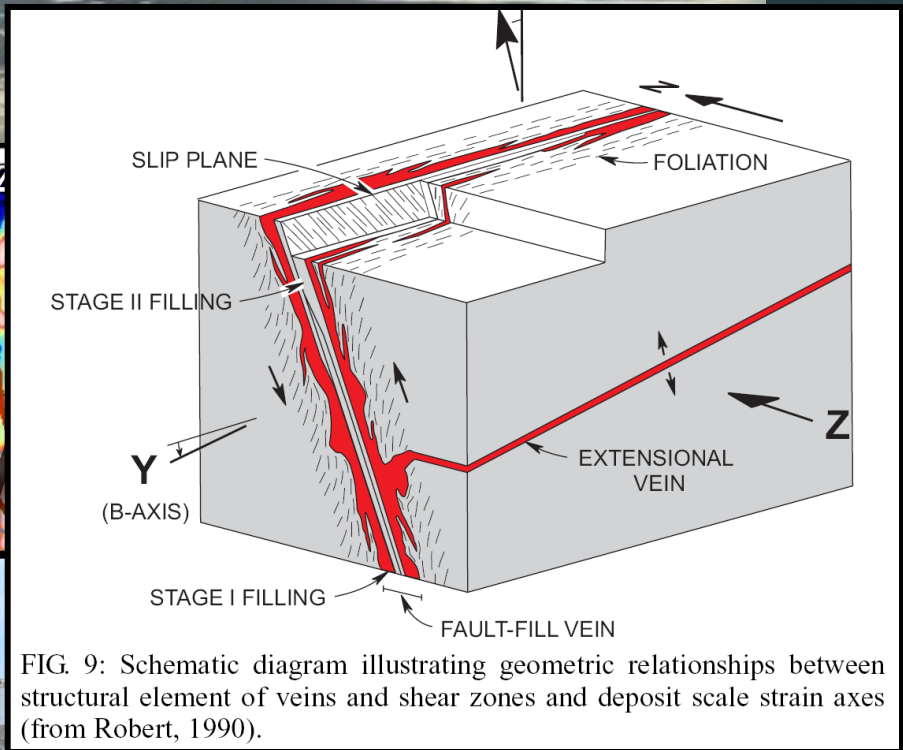
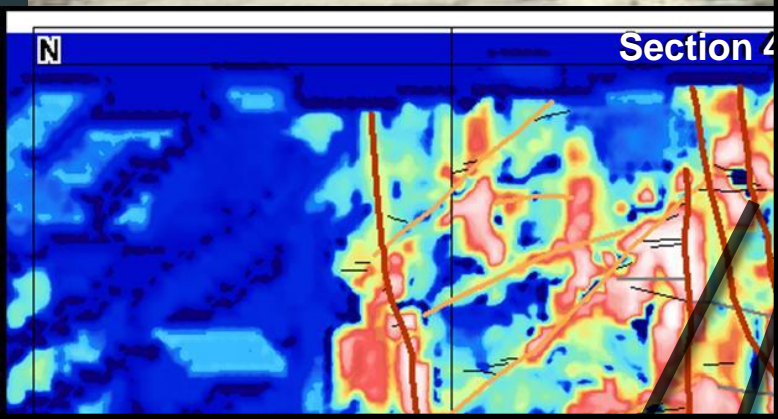
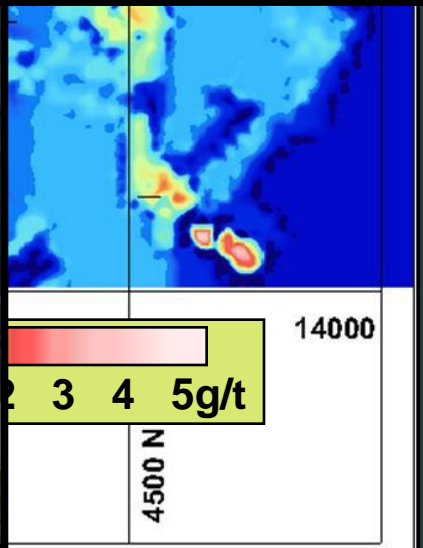
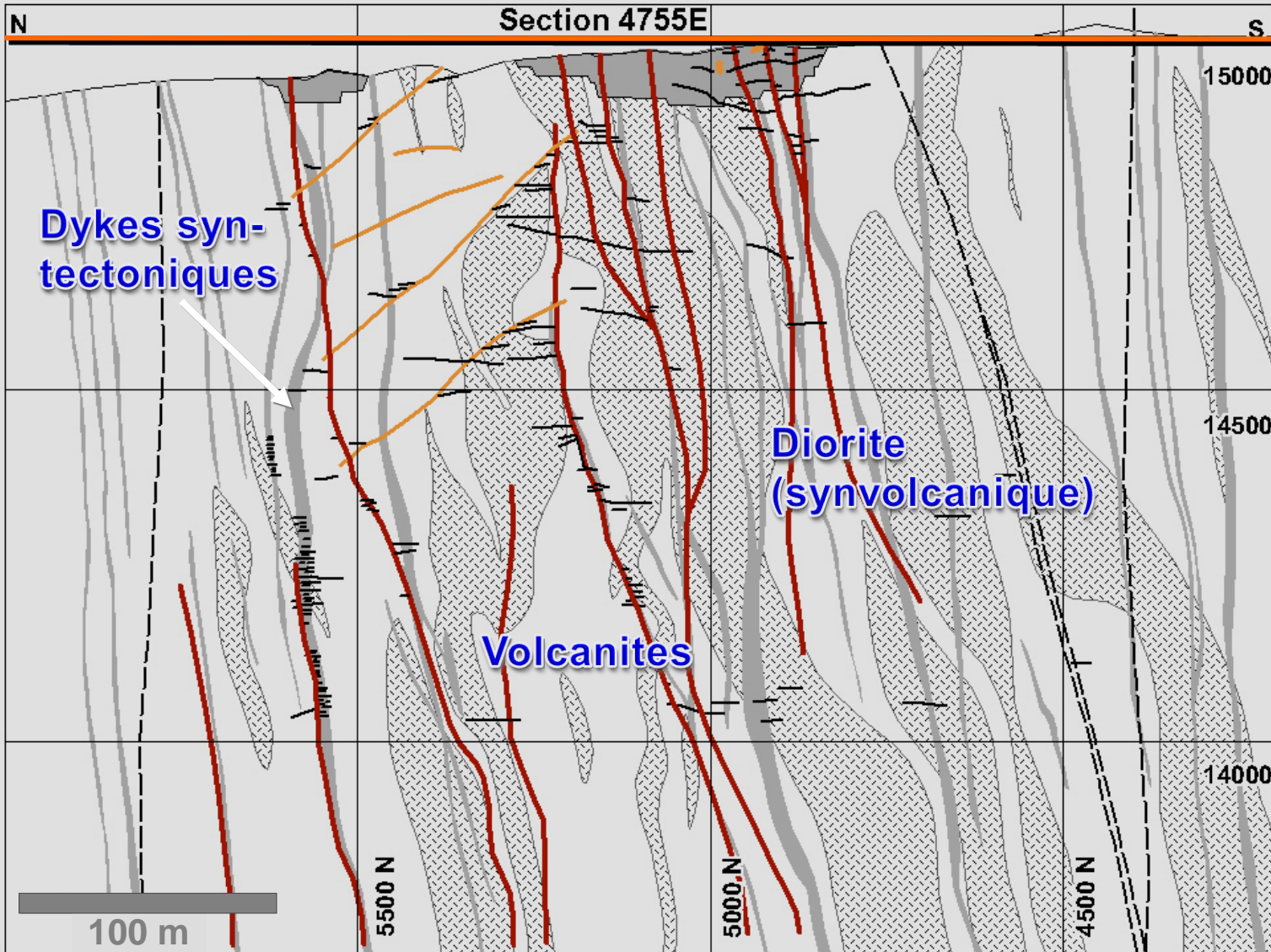


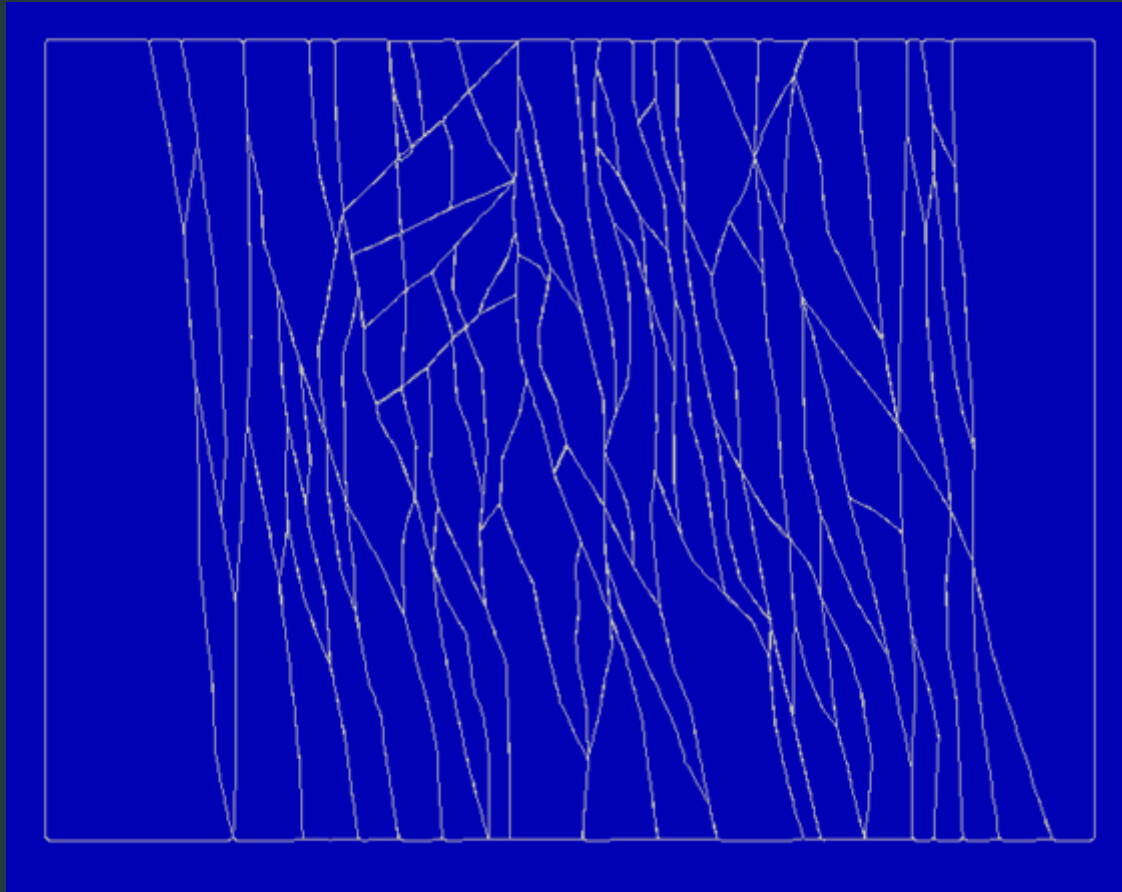
FIG. 9: Schematic diagram illustrating geometric relationships between structural element of veins and shear zones and deposit scale strain axes (from Robert, 1990).



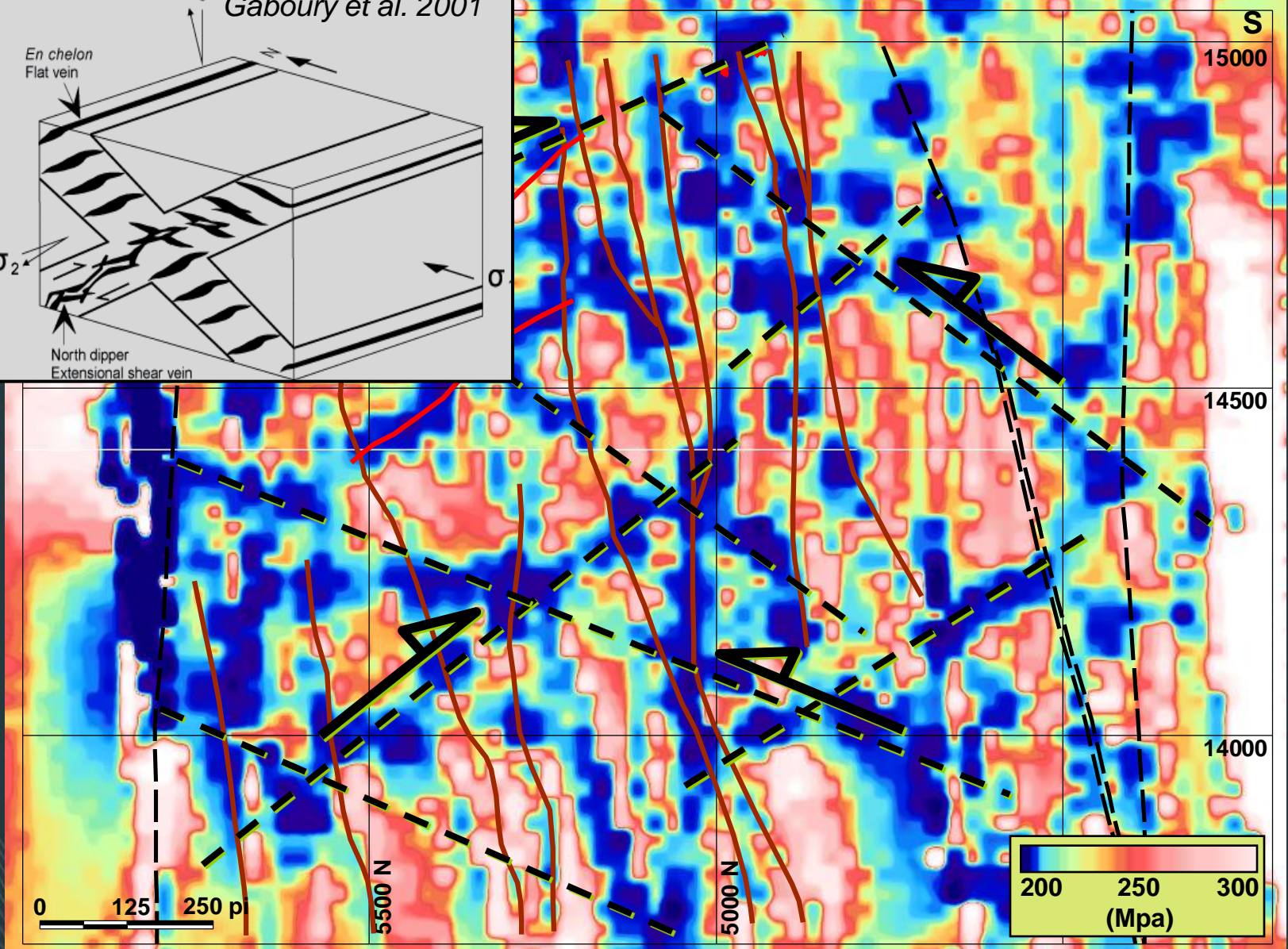
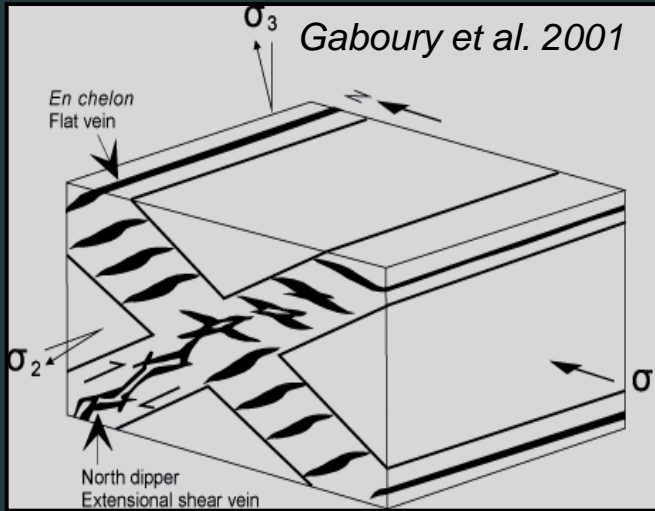


Modélisation Sigma

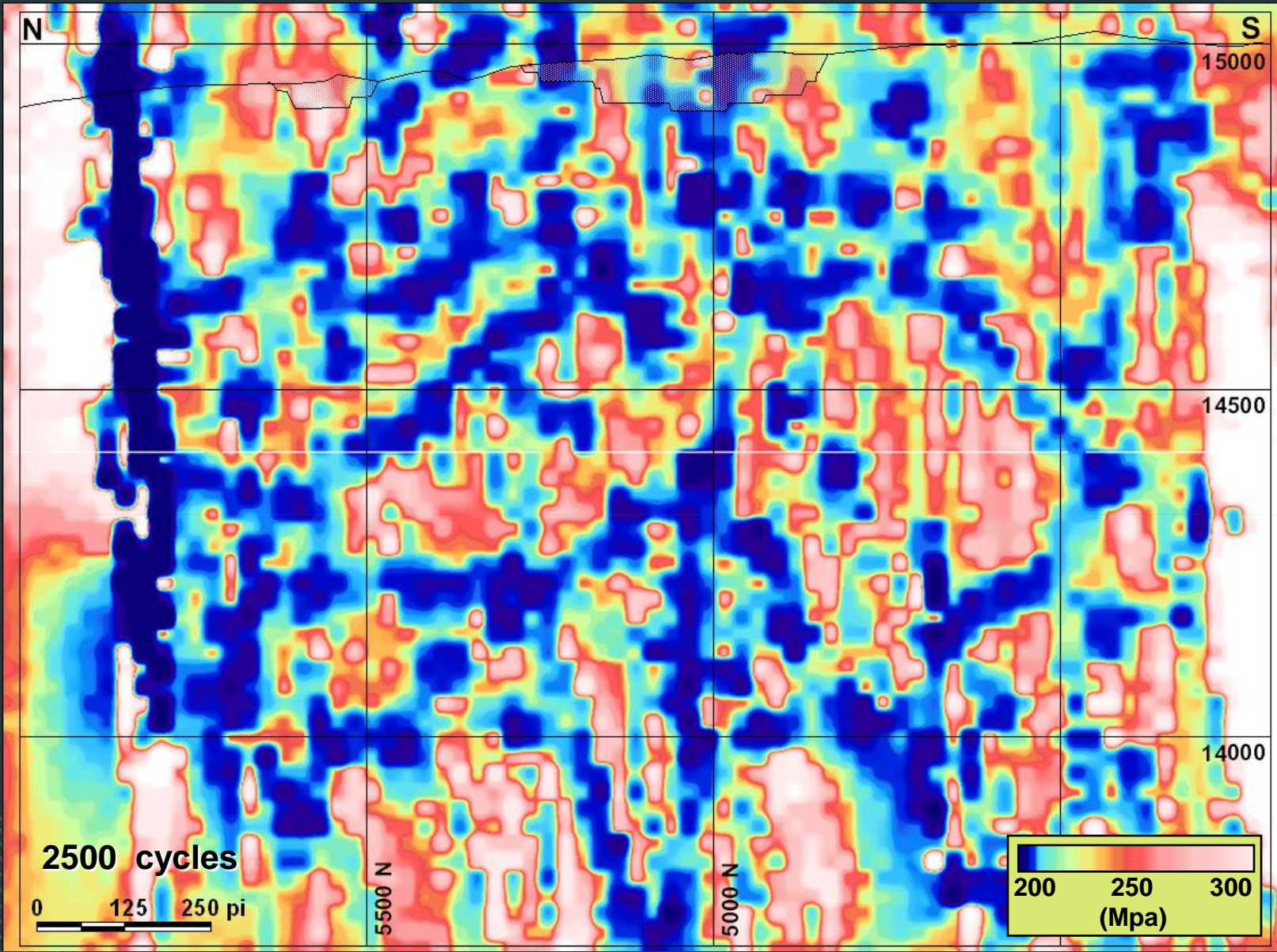
Amplification 6x



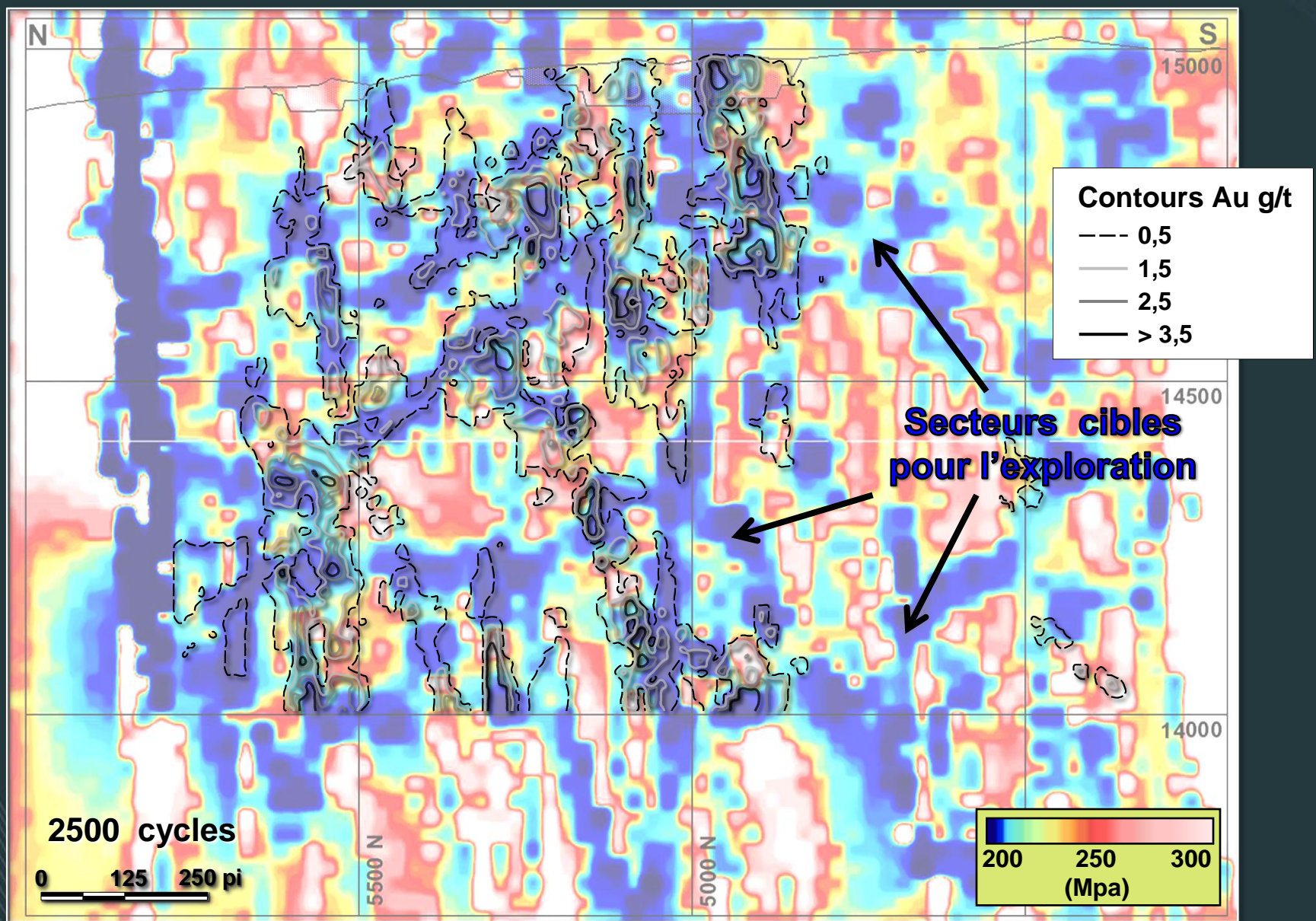
Pressions contrôlées par structures conjuguées



Correspondance entre pressions et teneurs en or



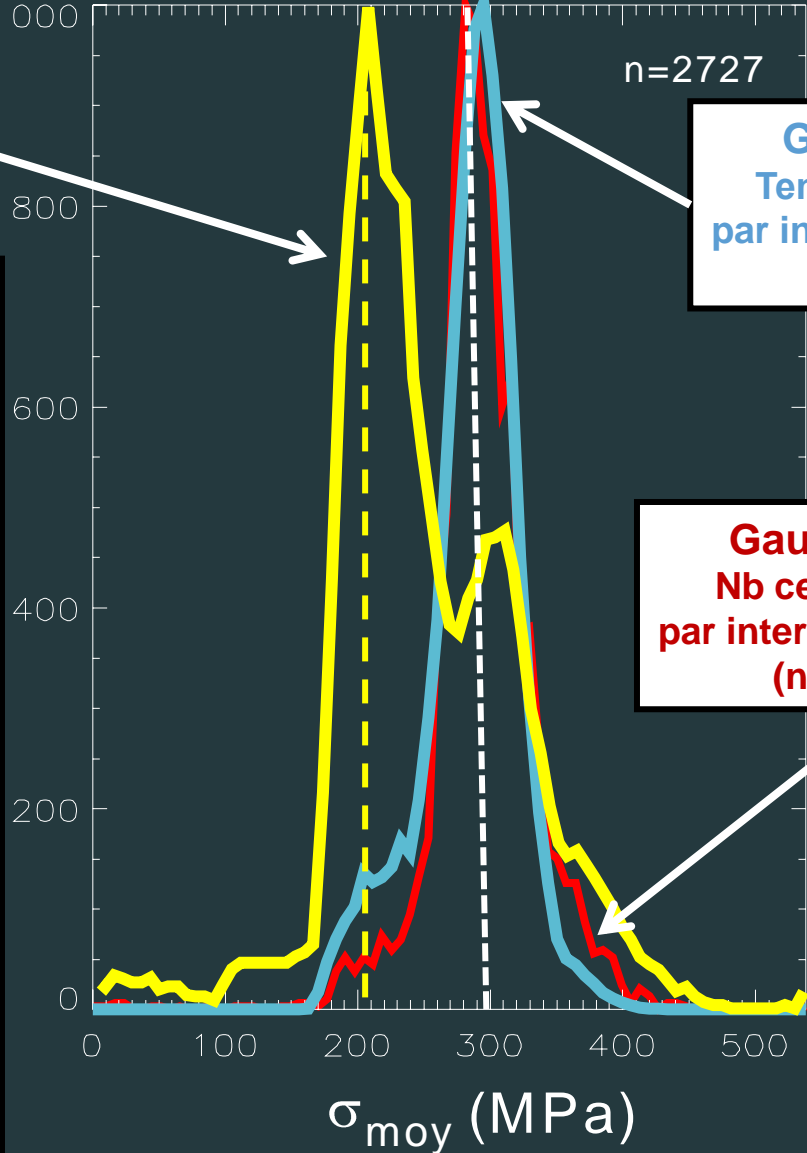
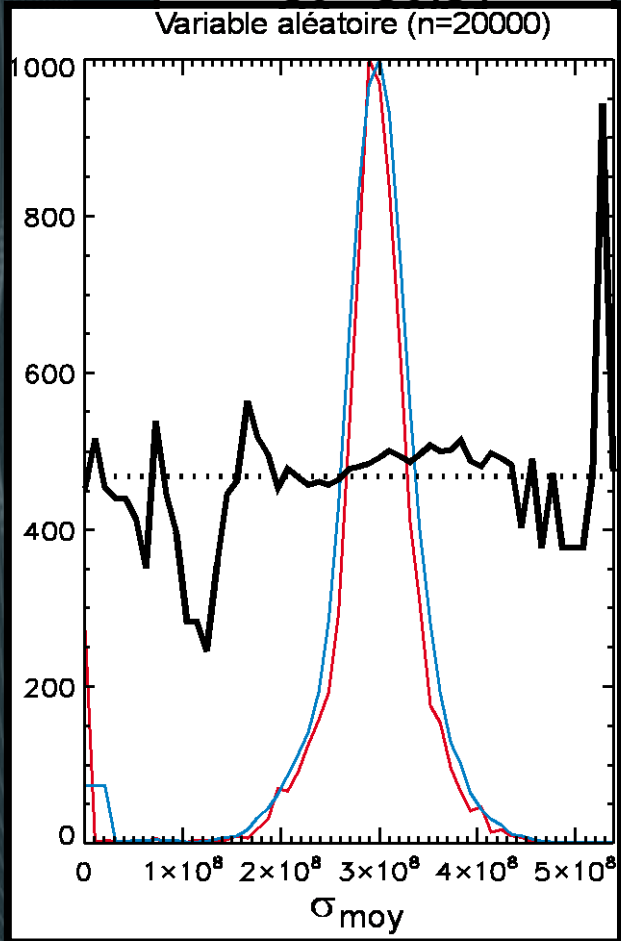
Correspondance entre pressions et teneurs en or



Test statistique de corrélation - Pressions vs Au

Gaussienne G3 :
Isolement du signal

Teneurs moyennes par intervalle de pression

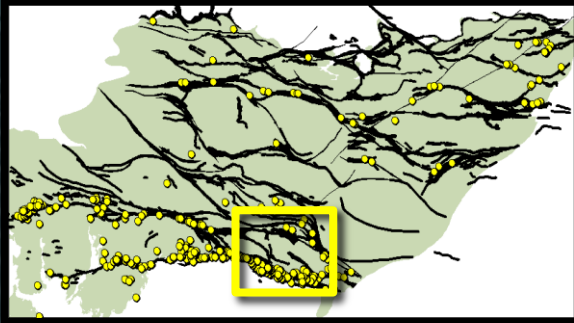


Gaussienne G2
Teneur d'or cumulée
par intervalle de pression
(norm. 1000)

Gaussienne G1
Nb cellules section
par intervalle de pression
(norm. 1000)

Camp minier de Val-d'Or - Malartic

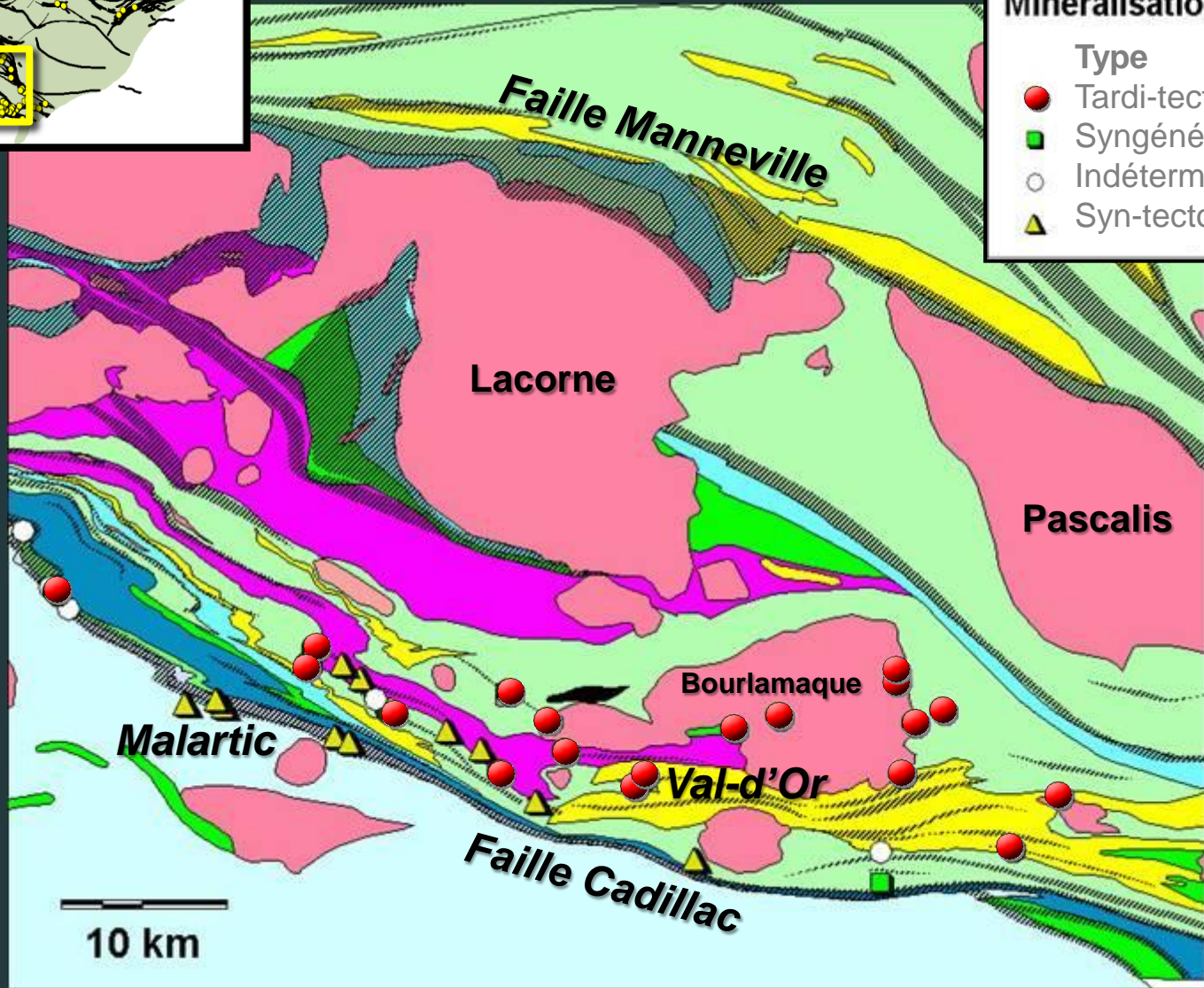
Camp Val-d'Or Malartic



Minéralisation Au

Type

- Tardi-tectonique
- Syngénétique
- Indéterminé
- ▲ Syn-tectonique



Déformation amplifiée 6X

(e+6)

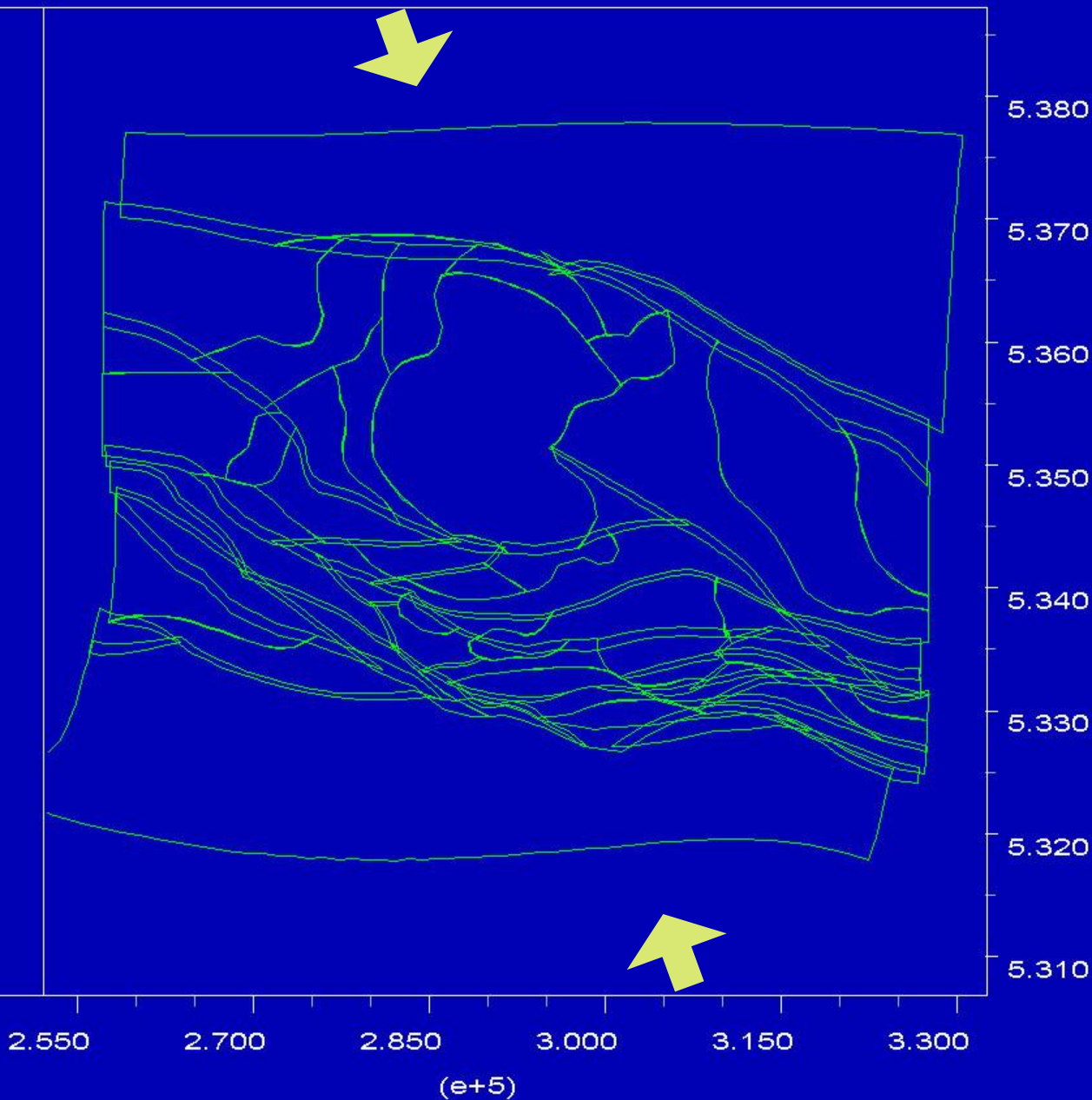
UDEC 3.10

Cycle 750

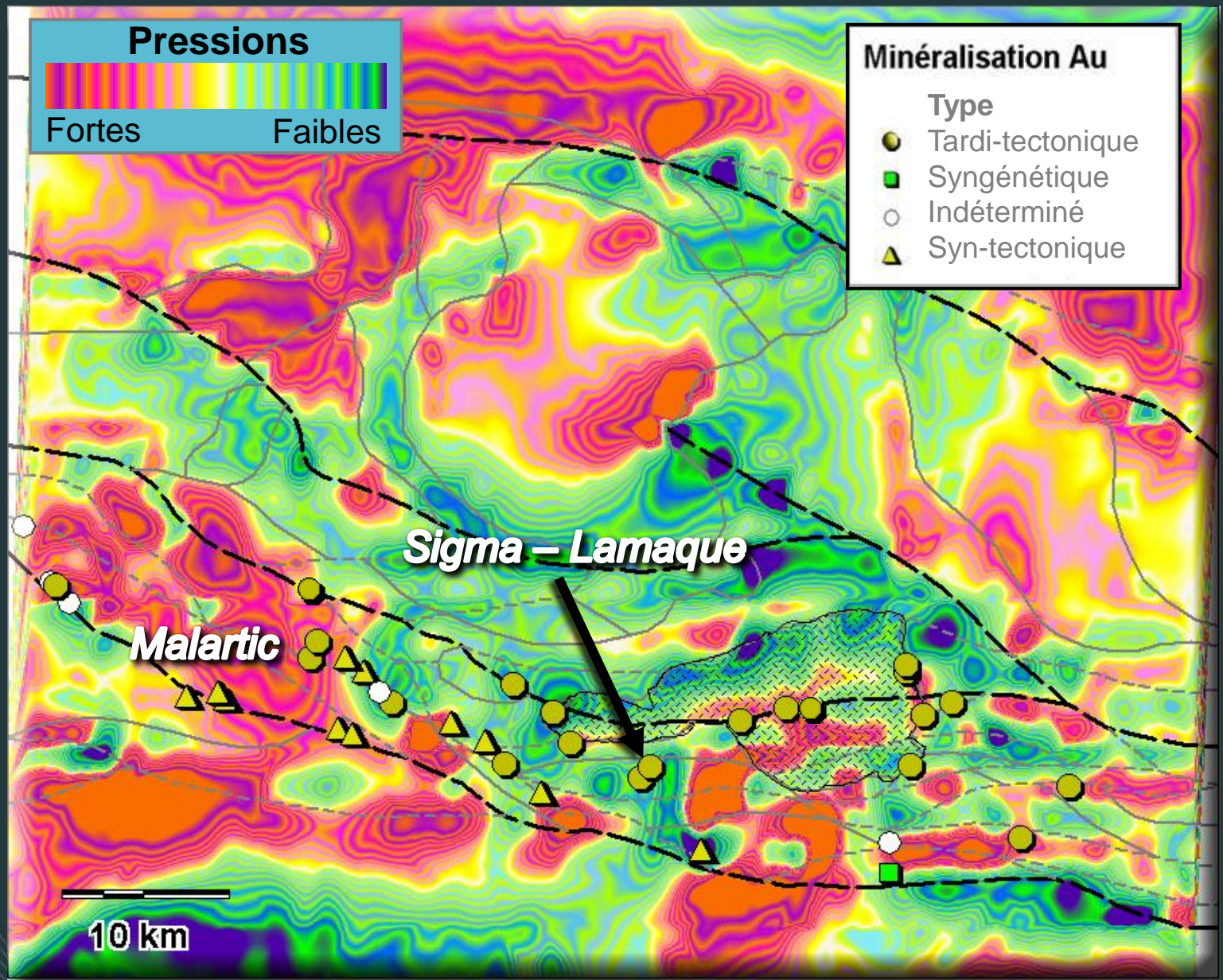
Time 3.968E+01 sec

magnified block deformation

magnification = 6.000E+00

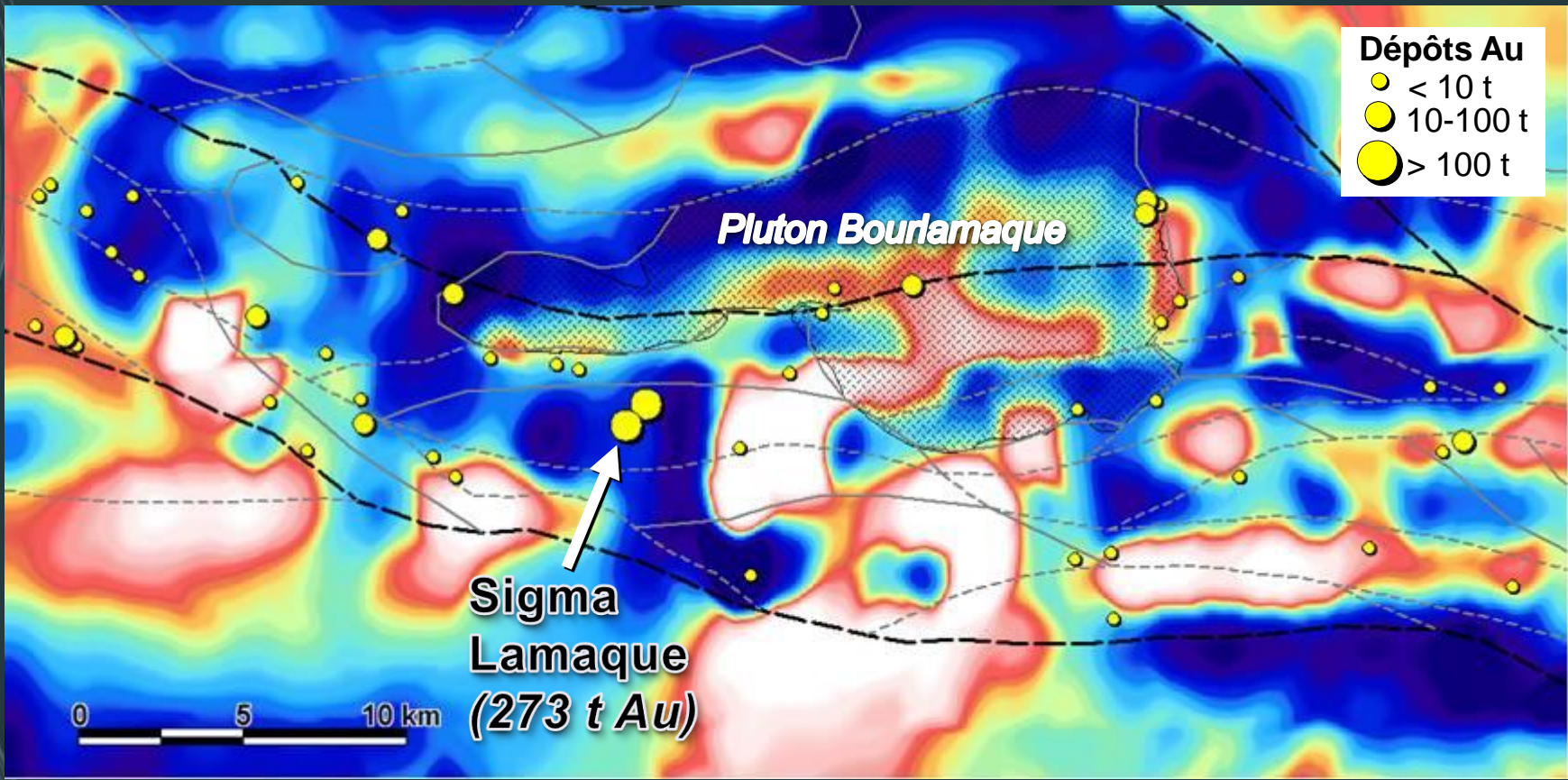


Camp Val-d'Or et Malartic



Camp minier de Val-d'Or

Pressions et gisements d'or orogénique, Val-d'Or



Dépôts Au
 ● < 10 t
 ● 10-100 t
 ● > 100 t

Pluton Bourlamaque

Sigma Lamaque
(273 t Au)

0 5 10 km

Pressions (MPa)



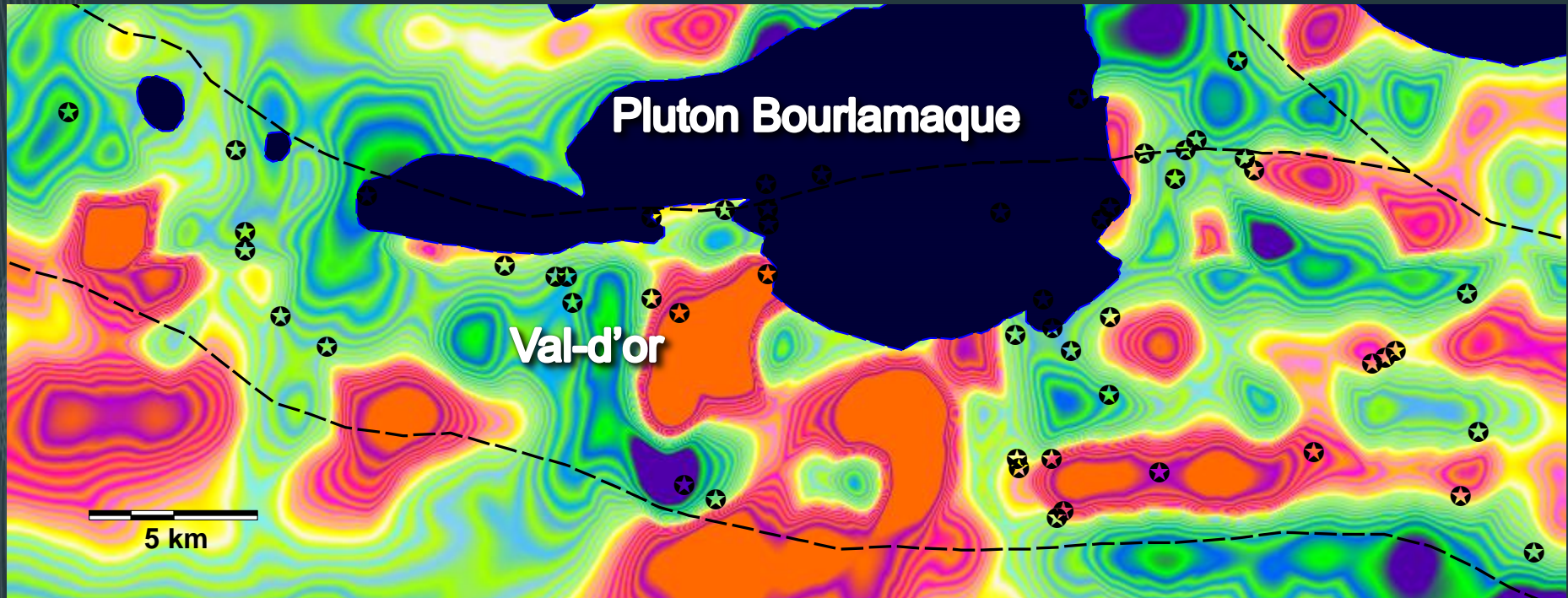
-400 -300 -200 -100

Gisements localisés près de failles et contacts, en bordure de zones de fortes pressions et forts gradients + gros gisements dans zones de faibles pressions

Camp Val-d'Or Malartic

Pressions tectoniques et le champ de veines de QZ-CB-TL

Les veines suivent les courbes isobariques



Données de Pitre 2000 et SIGEOM 2004

Comparaison Val-d'or et Timmins (Ont.)

Zone de faibles pressions
Val-d'Or

Altération hydrothermale
Timmins

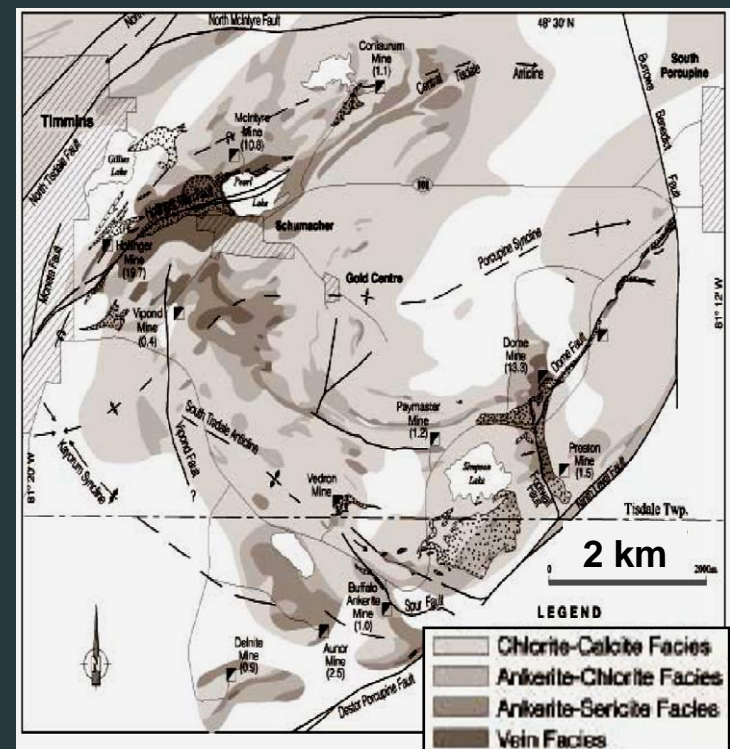
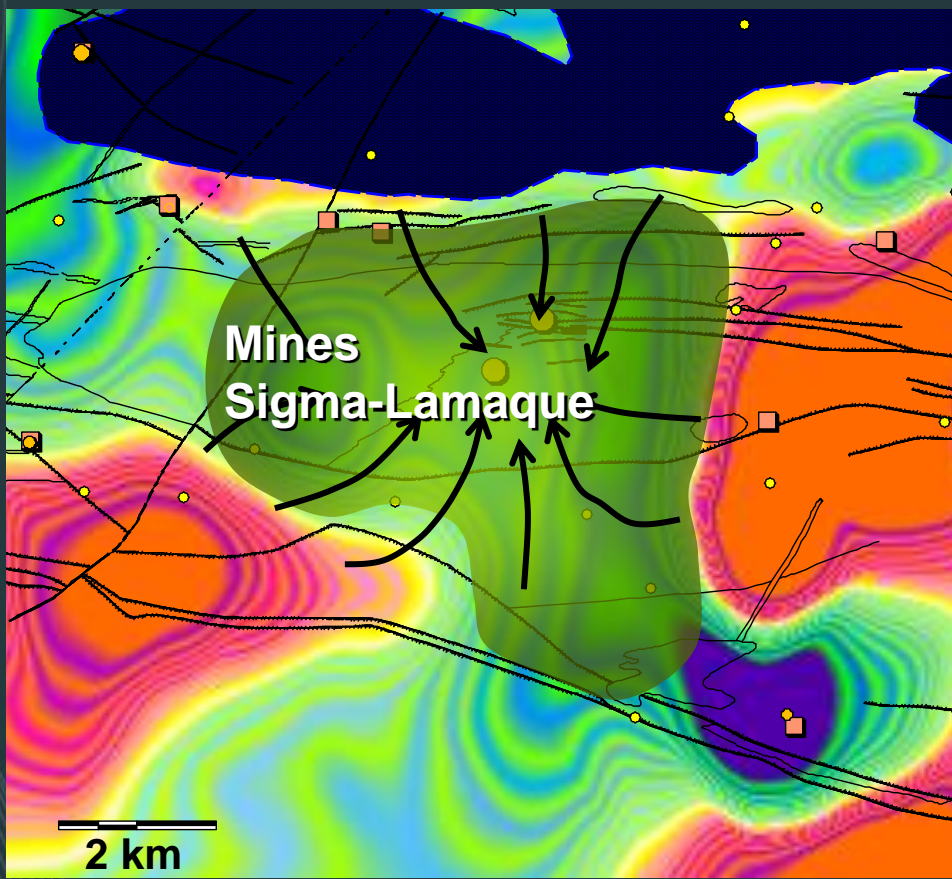
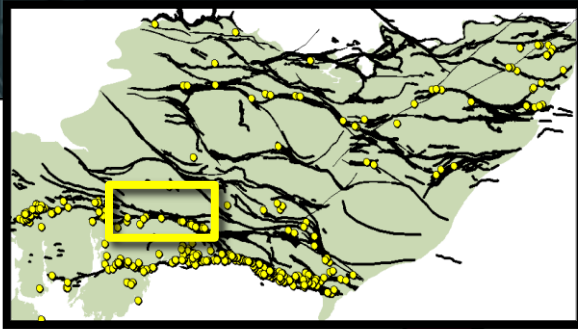


FIGURE 4. Plan showing distribution of hydrothermal alteration assemblages mapped in outcrop relative to mines, porphyry intrusions, and major structures in the western portion of the Porcupine Gold Camp. Vein facies alteration includes ankerite and sericite, but also one or more of pyrite, quartz veinlets, and hydrothermal quartz and albite.

Brisbin, 2000

Modélisation des paléopressions
le long de la faille transcrustale de
Porcupine - Destor

Éléments géologiques importants



**Bassin sédimentaire
de Duparquet bordé par
des failles subsidiaires**
(sédimentation terminée $\approx 2679 \text{ Ma}^{(1)}$)

Faille Porcupine

Pluton syénite
($2682 \text{ Ma}^{(2)}$)

**Porphyres
calco-alcalins**
($2689\text{-}2685 \text{ Ma}^{(3)}$)



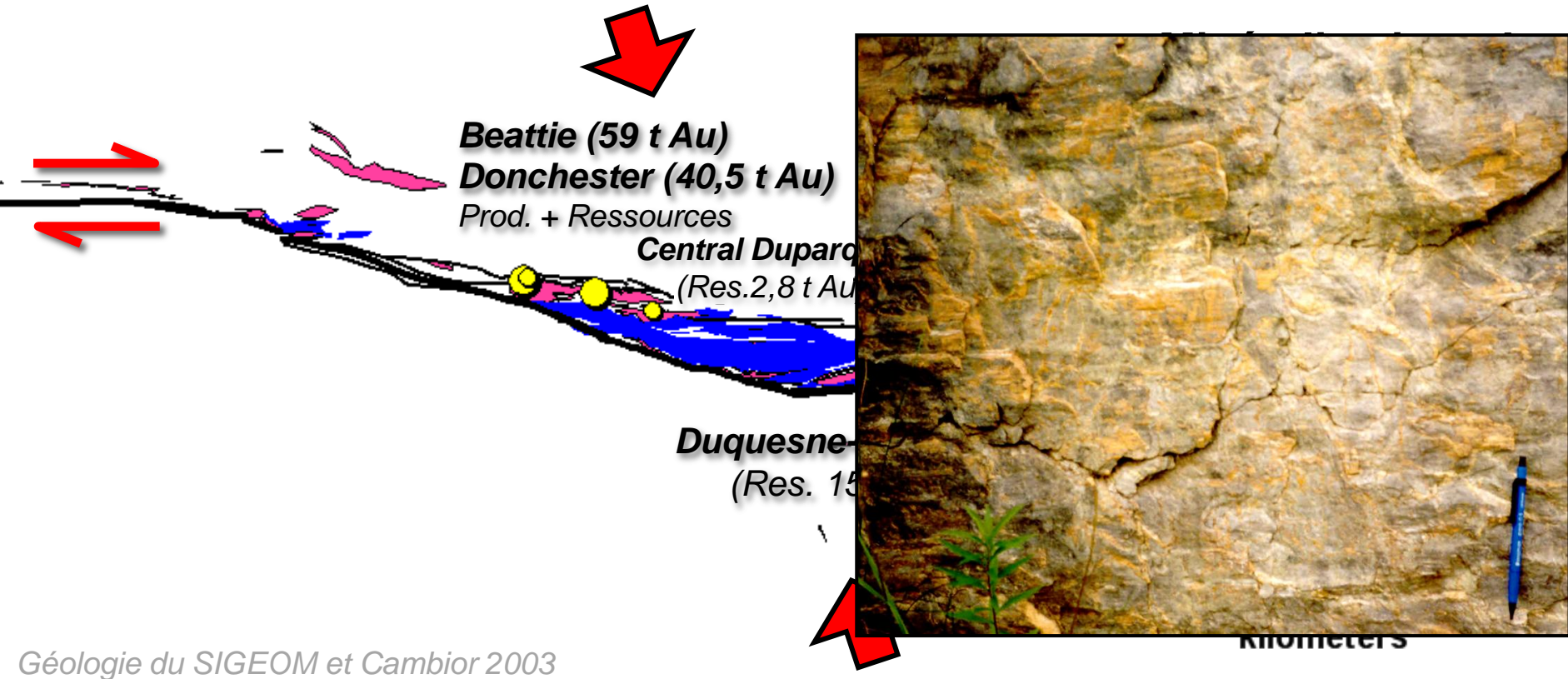
Géologie du SIGEOM et Cambior 2003

¹David et al. 2006

²Mueller et al. 1996; David et al. 2007

³Mueller et al. 1996; Davis 2003 inédit

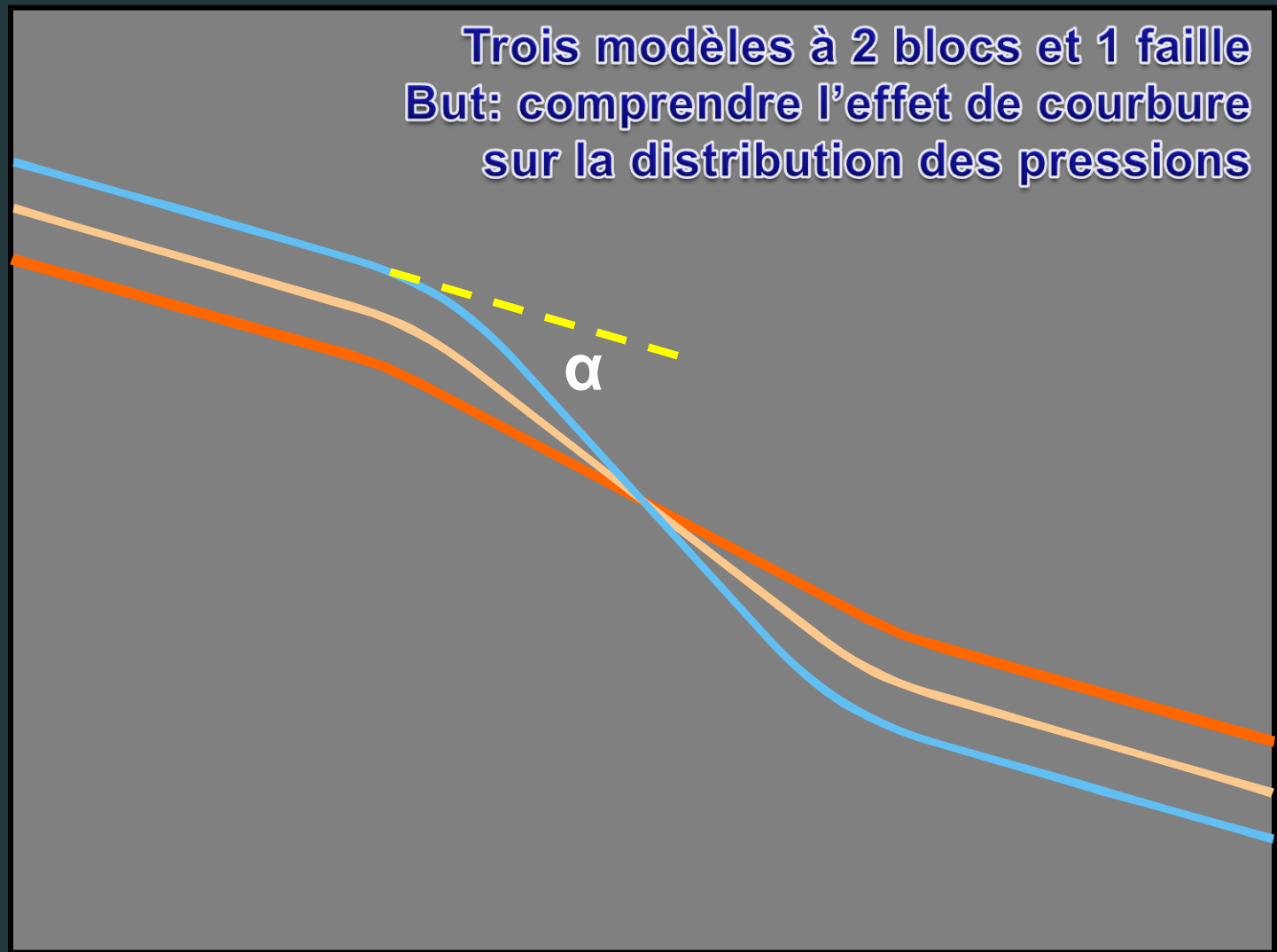
Éléments géologiques importants



Géologie du SIGEOM et Cambior 2003

Minéralisations orogéniques synchrones aux bassins sédimentaires de Duparquet (pull-apart), à des syénites et porphyres, et à système tectonique en transpression dextre

Modélisation théorique



Modélisation théorique

Modèle à 10

Job Title : virgation 10
From File : virga10.txt

σ_2

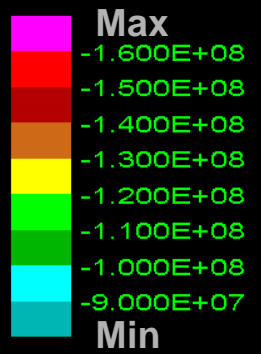
σ_1

Surfaces

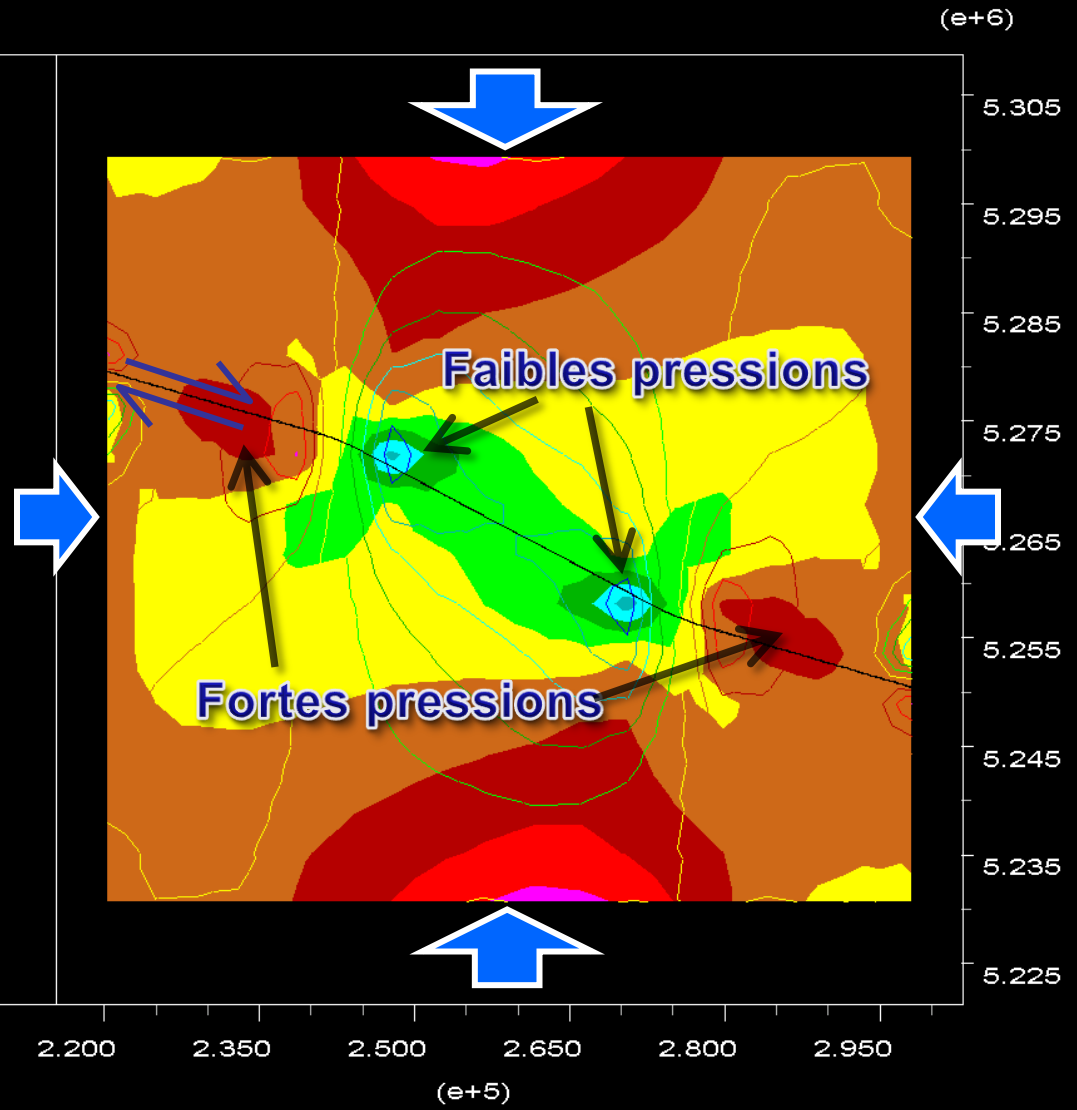
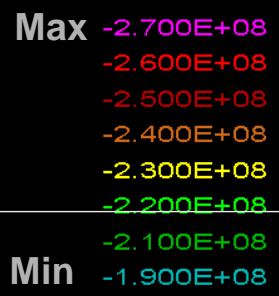
Contours

UDEC 3.10

Cycle 1800
Time 7.044E+01 sec
minor principal stress cont
contour interval= 1.000E+07
-1.600E+08 to -9.000E+07



major principal stress cont
contour interval= 1.000E+07
-2.700E+08 to -1.800E+08



Modélisation théorique

-1.700E+08 -1.800E+08
Job Title : virgation 20
From File : virga20.txt

Modèle à 20

σ_2

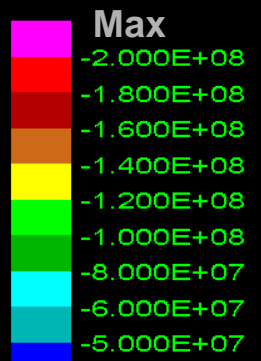
Surfaces

σ_1

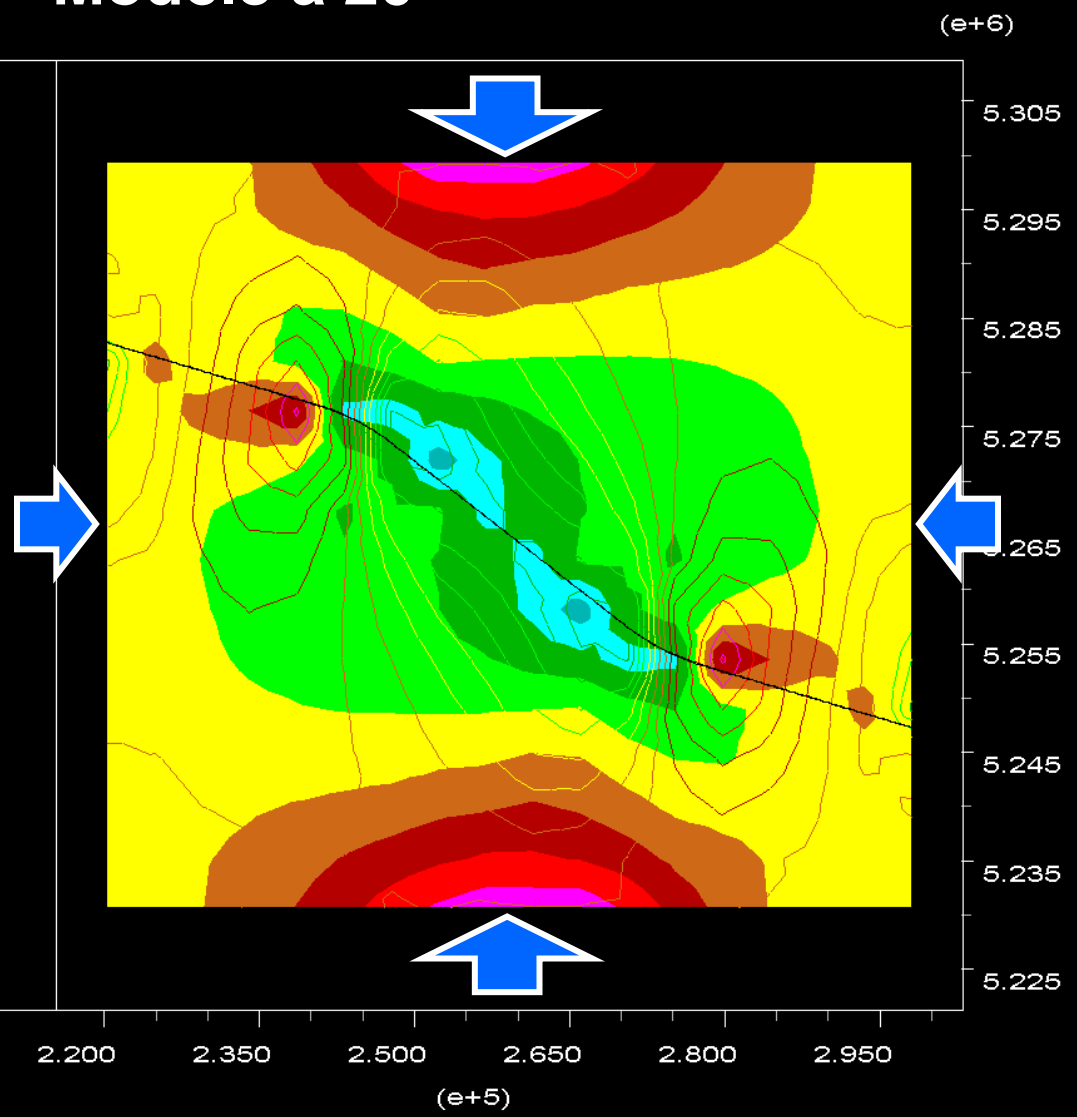
Contours

UDEC 3.10

Cycle 1800
Time 6.100E+01 sec
minor principal stress cont
contour interval= 1.000E+07
number of contour/color= 2
-2.100E+08 to -5.000E+07



major principal stress cont
contour interval= 1.000E+07
number of contour/color= 2
-2.900E+08 to -1.600E+08
Max -2.900E+08 -2.800E+08
-2.700E+08 -2.600E+08
Min -2.500E+08 -2.400E+08



Modélisation théorique

Modèle à 30

Job Title : virgation 30
From File : virga30.txt

σ_2

σ_1

Surfaces

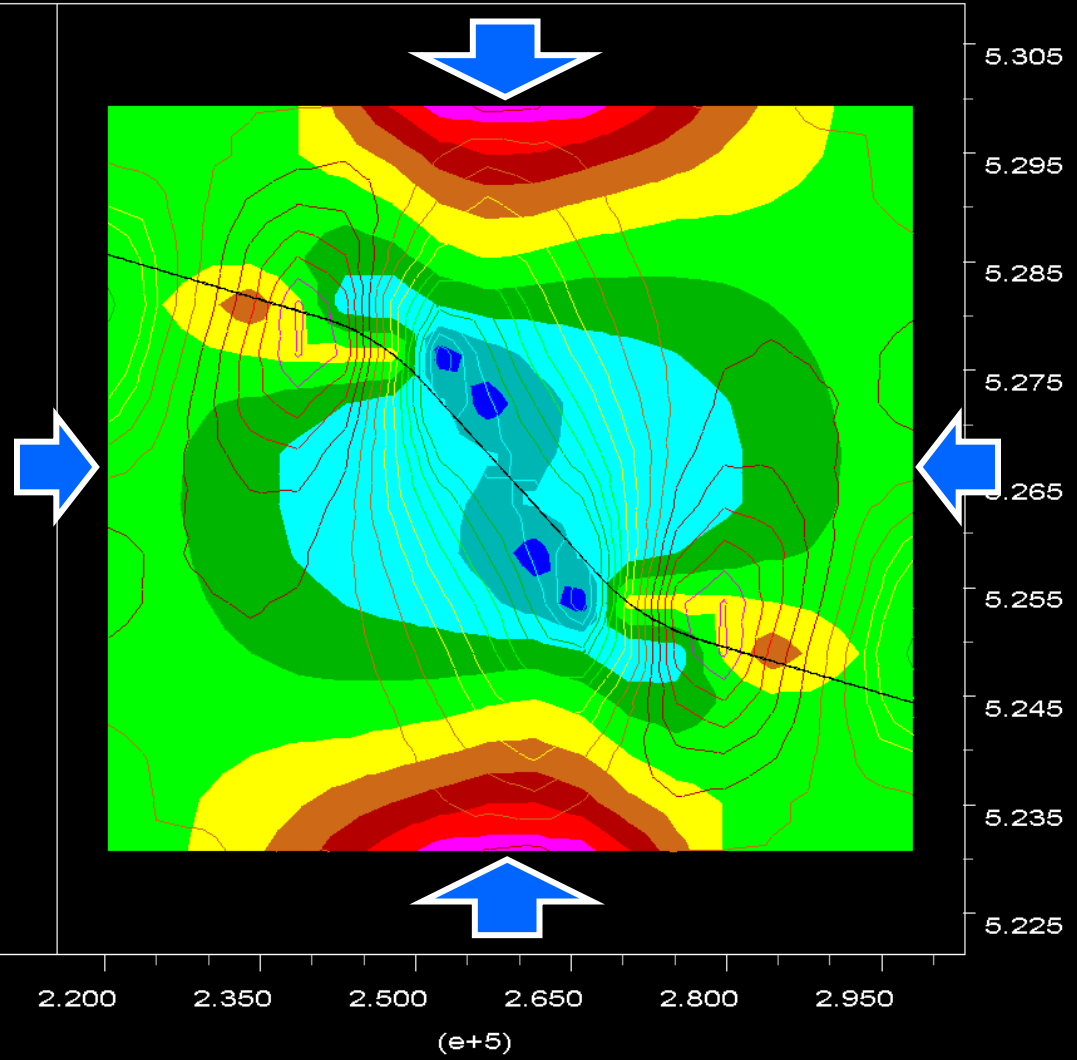
Contours

UDEC 3.10

Cycle 1800
Time 5.819E+01 sec
minor principal stress cont
contour interval= 1.000E+07
number of contour/color= 2
-2.300E+08 to -6.000E+07

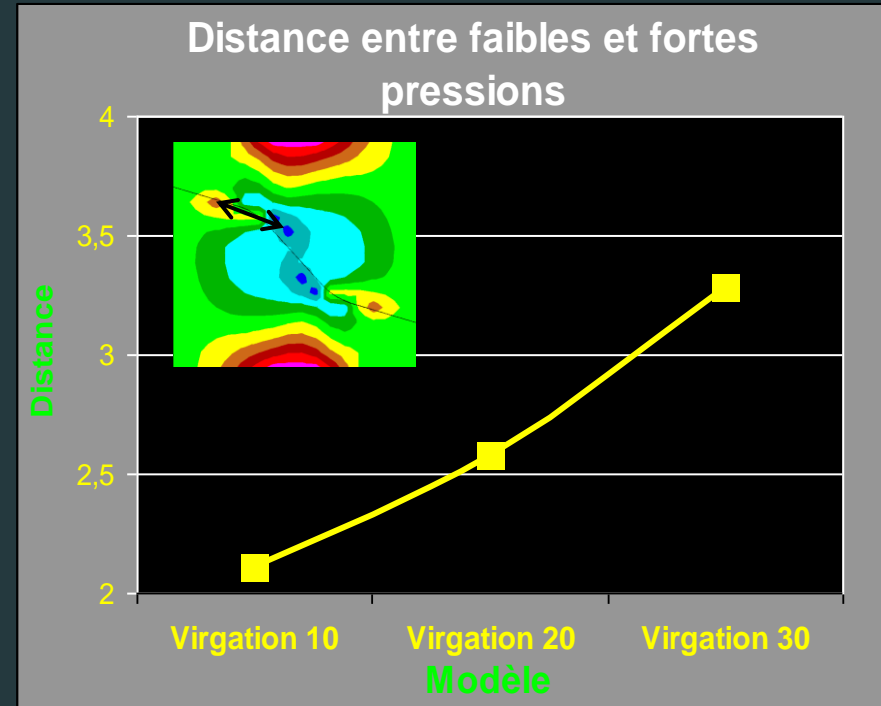
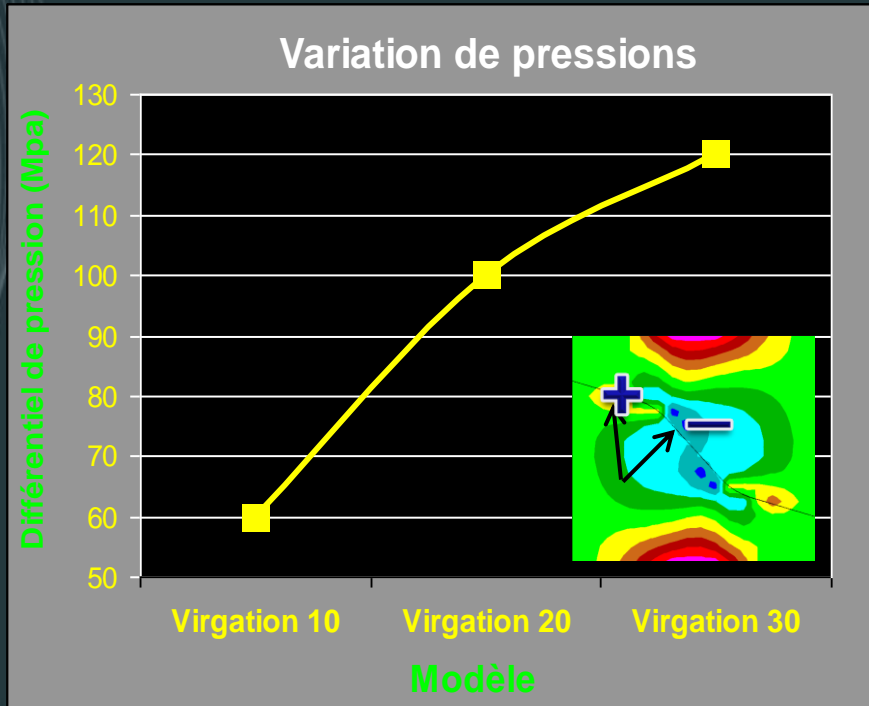


major principal stress cont
contour interval= 1.000E+07
number of contour/color= 2
-2.900E+08 to -1.300E+08
Max
-2.900E+08 -2.800E+08
-2.700E+08 -2.600E+08
-2.500E+08 -2.400E+08
-2.300E+08 -2.200E+08
-1.900E+08 -1.800E+08
Min



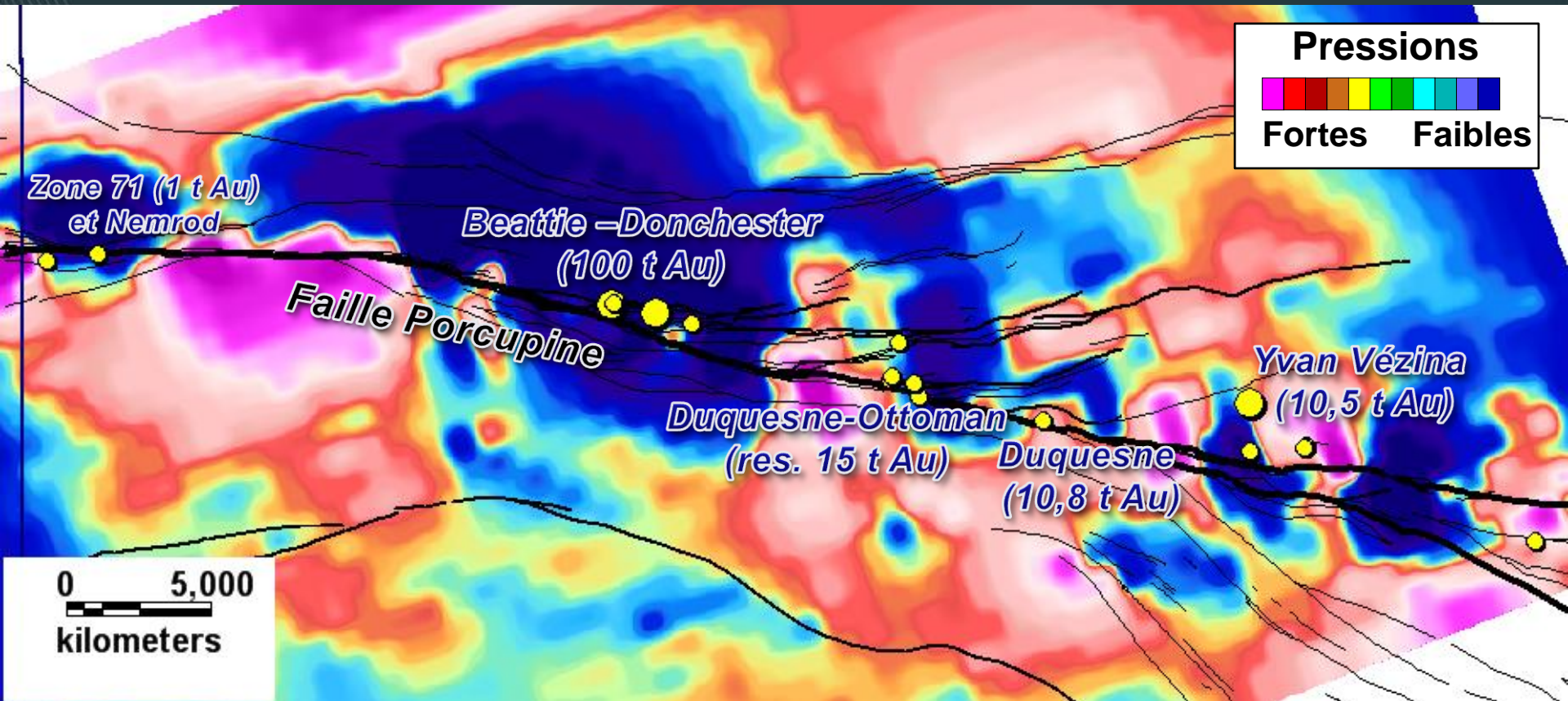
Modélisation théorique

Implication pour l'exploration



Plus la courbure d'un segment de faille est forte plus on doit s'éloigner du point d'inflexion

Modélisation des pressions

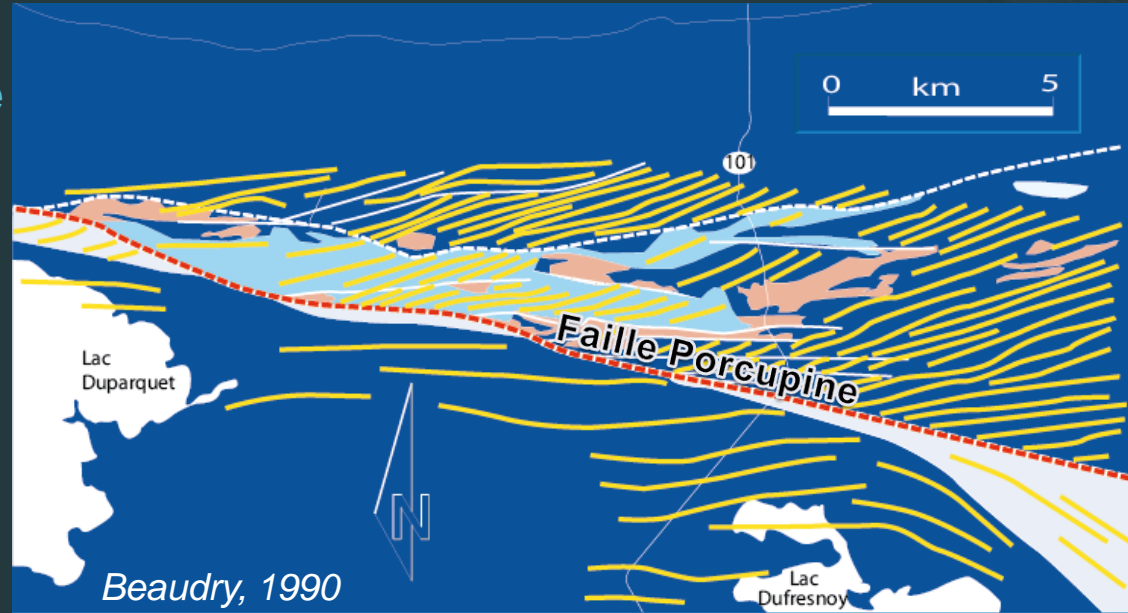


Gros gisements au centre de vastes zones de basses pressions

Dépôts plus modestes en bordure de zones de faibles pressions et de forts gradients de pression

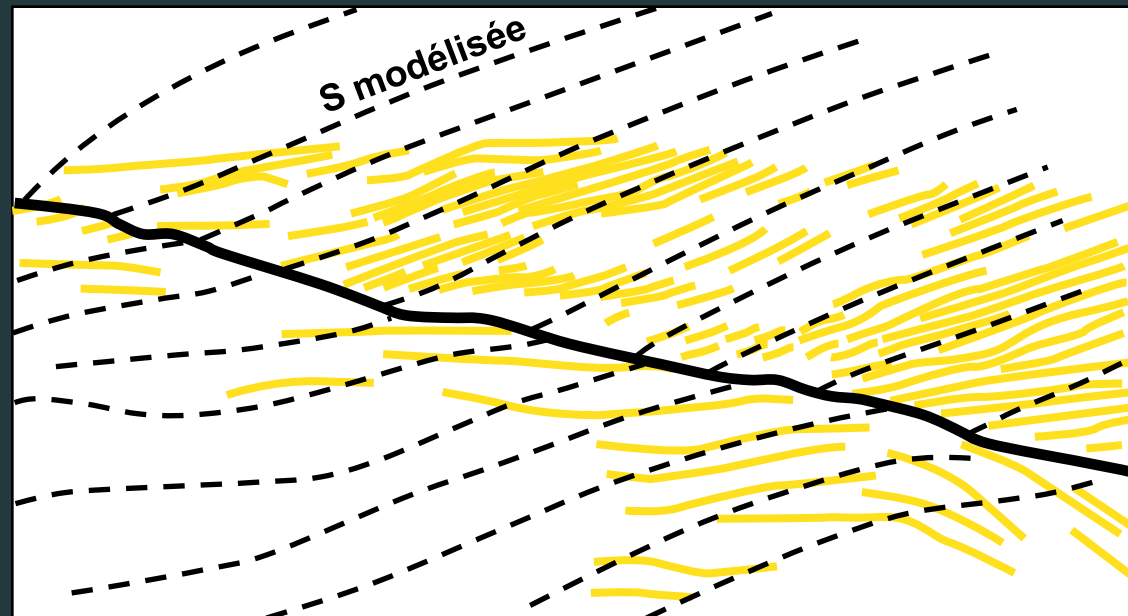
Comparaison - schistosités

Trajectoire de la schistosité
MESURÉE

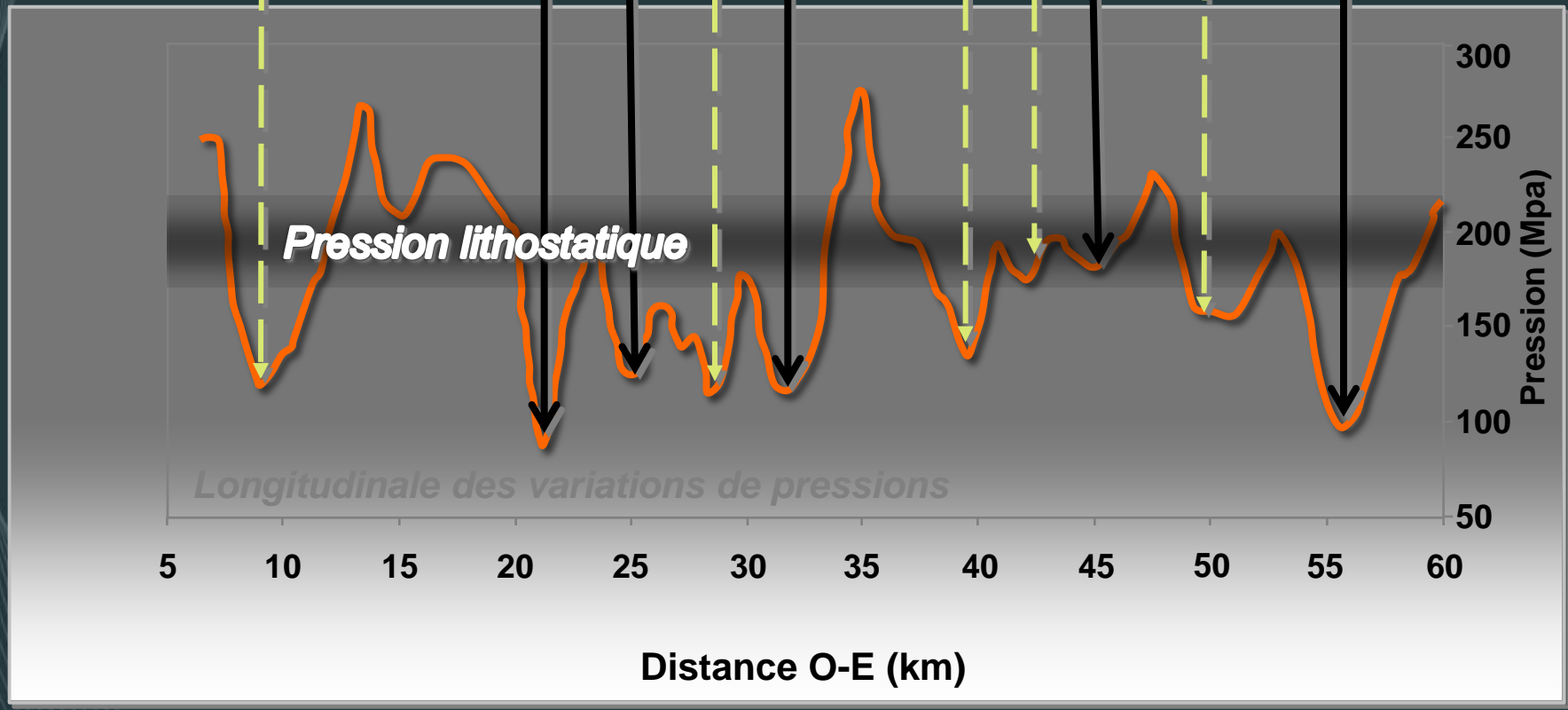
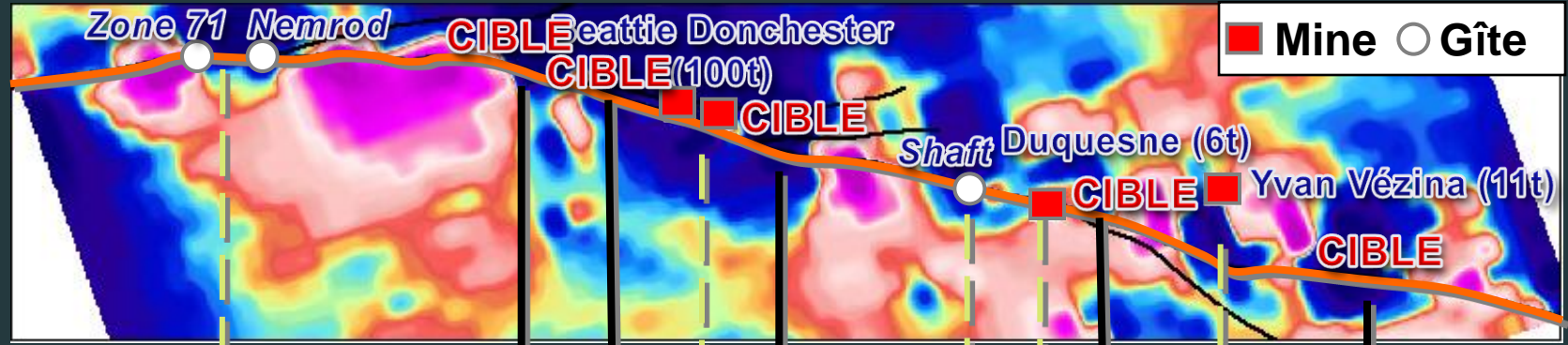


Comparaison entre les
schistosités **MESURÉE**
et **MODÉLISÉE** avec UDEC

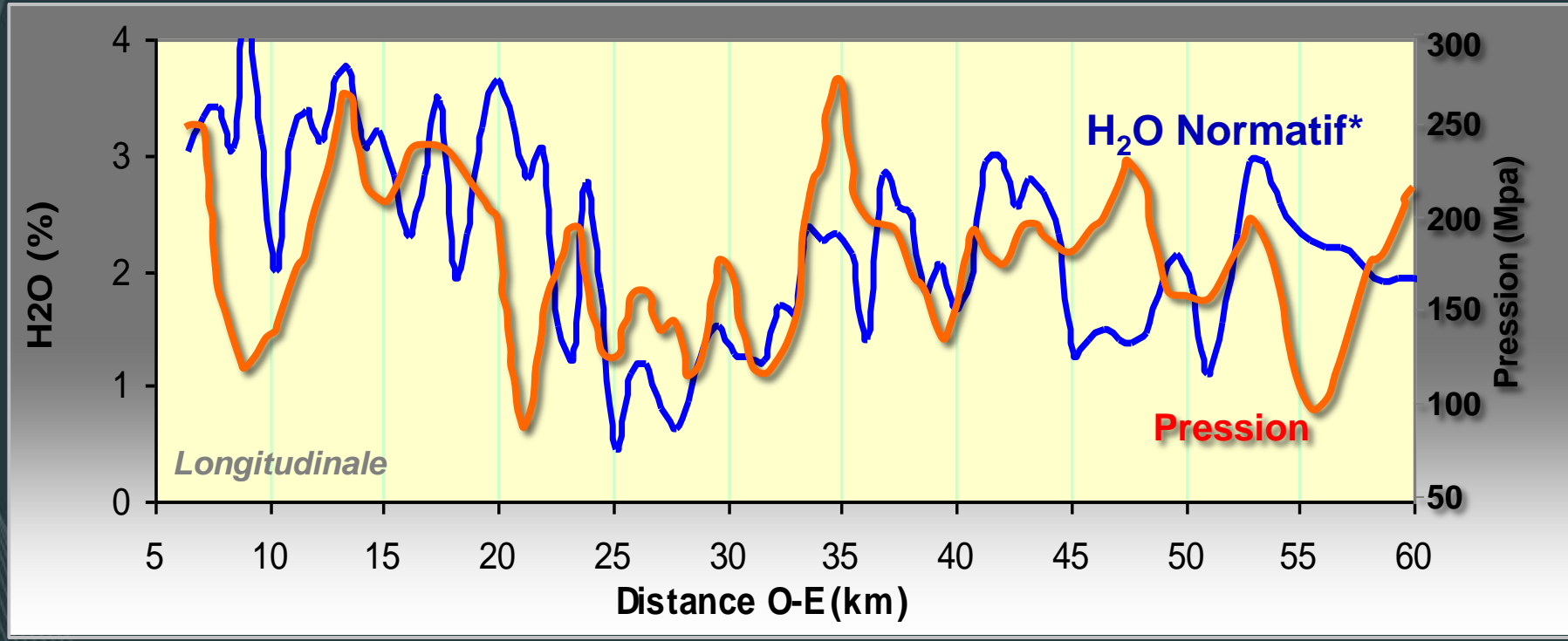
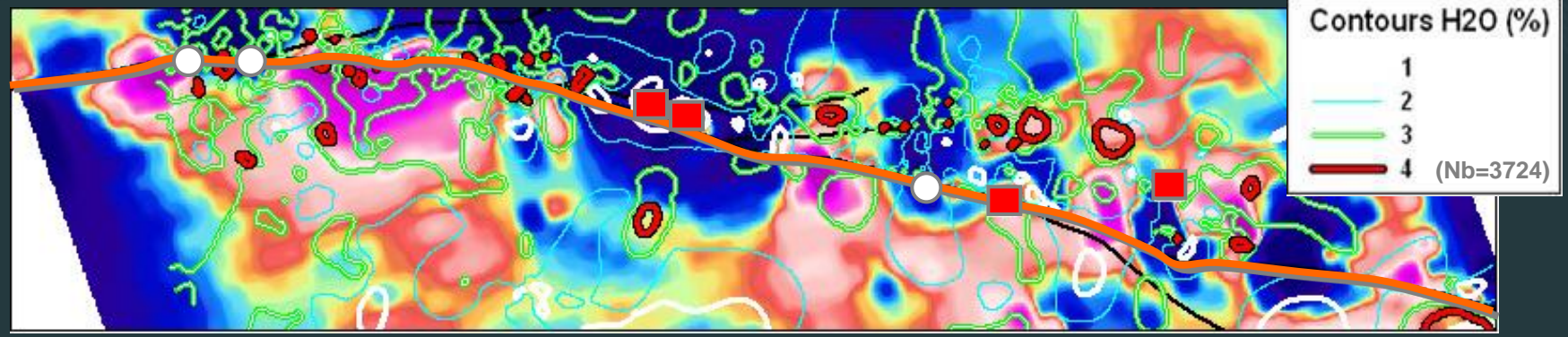
**Conclusion: le modèle
numérique explique
certains mécanismes de la
déformation régionale**



Pressions et minéralisations

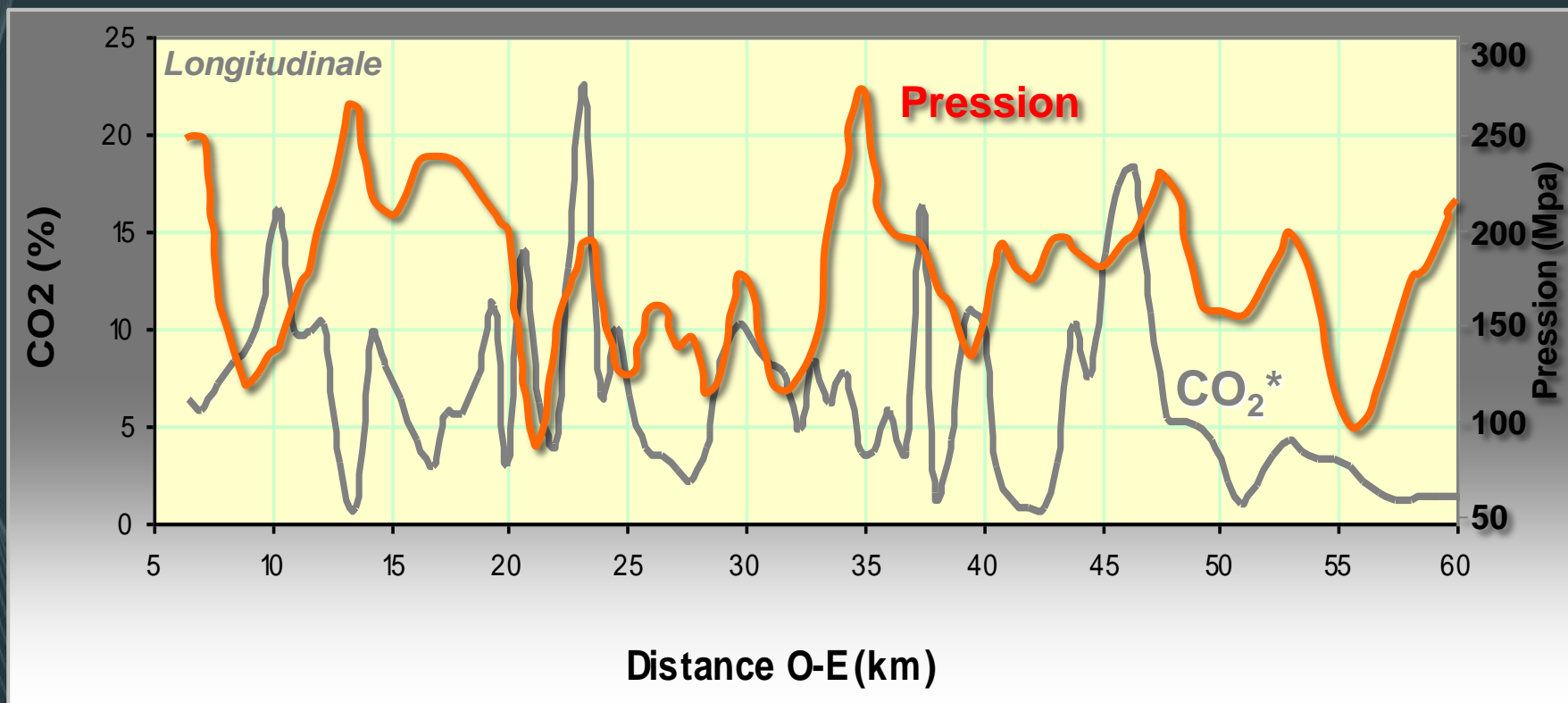
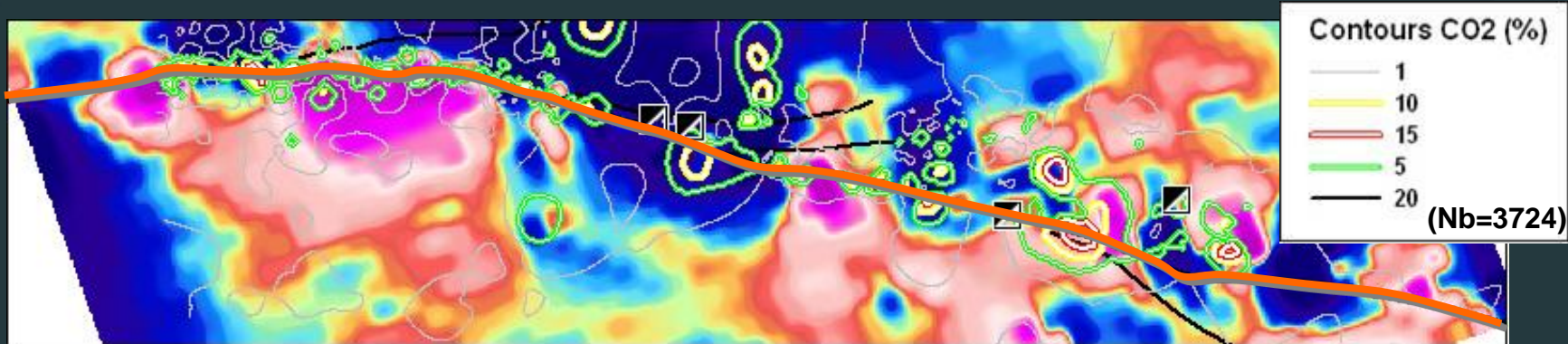


Pressions et H₂O normatif



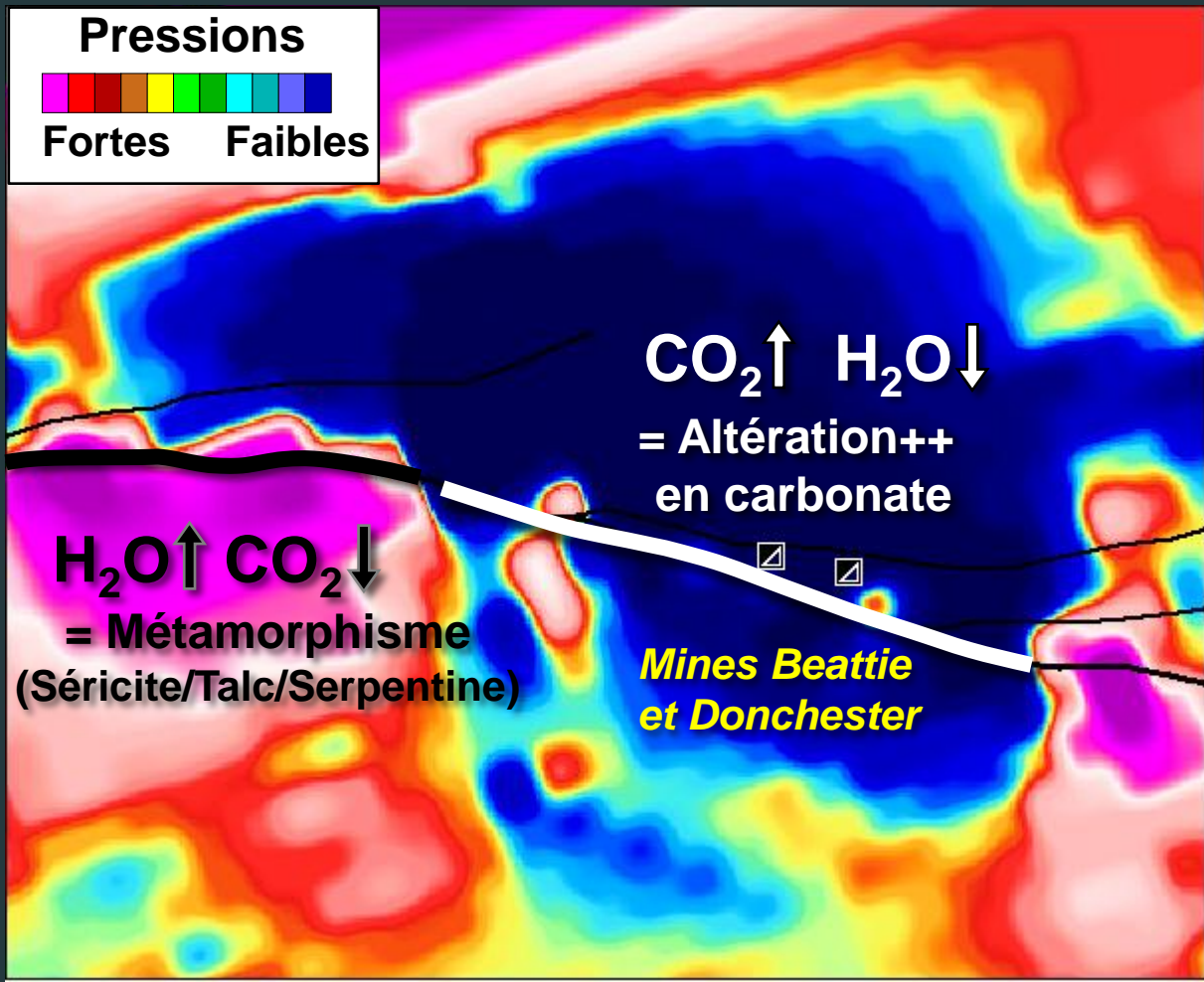
*NORMAT (Piché et Jébrak 2004), données de Cambior 2003

Pressions et CO₂ normatif

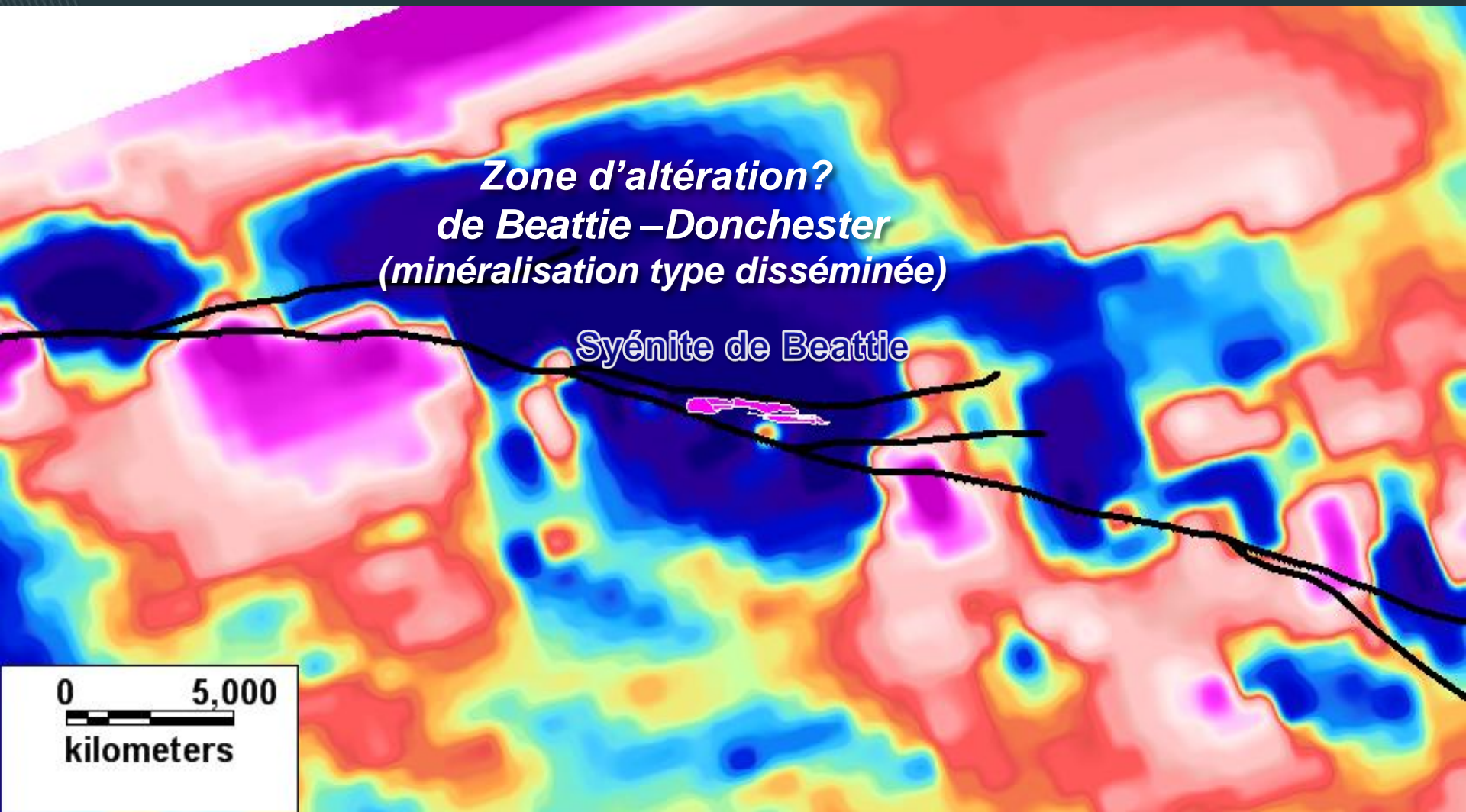


*NORMAT (Piché et Jébrak 2004), données de Cambior 2003

Interprétation



Pressions et altération régionale



Pressions et altération régionale

Altérations à Timmins,
(minéralisation type veine)

CO2*
contours 2, 3 et 5%

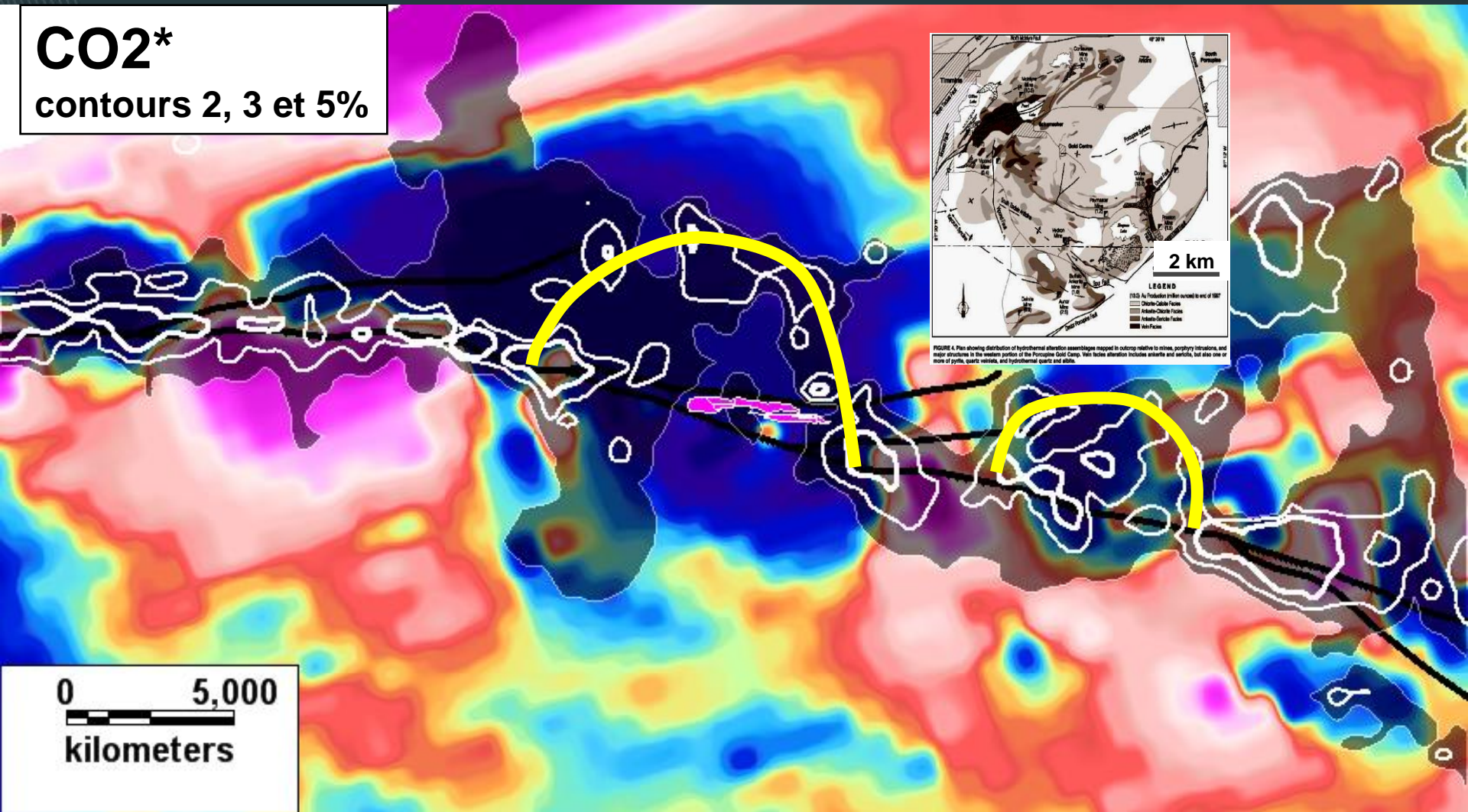
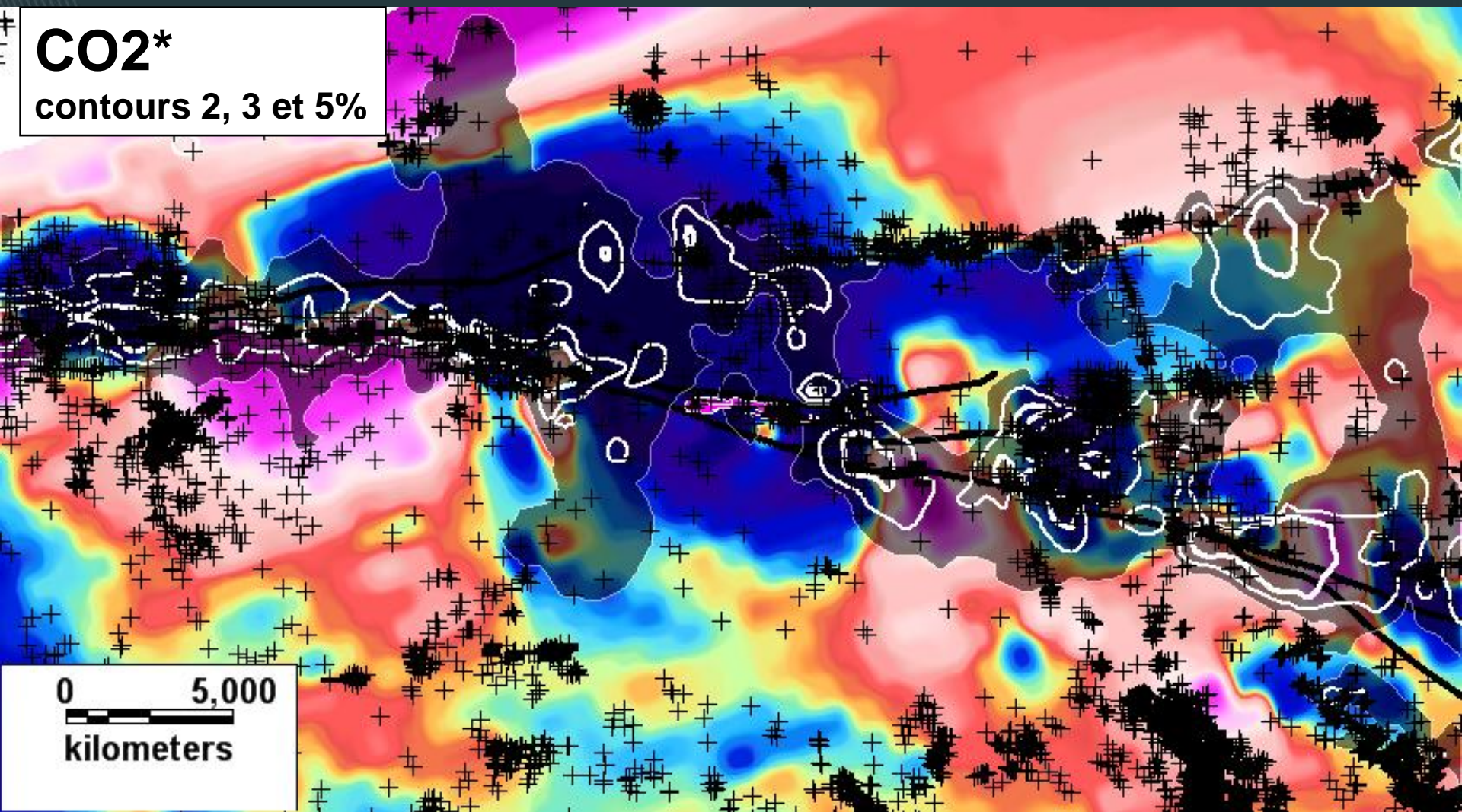


FIGURE 4. Plan showing distribution of hydrothermal alteration assemblages mapped in outcrop relative to mines, porphyry intrusions, and major structures in the western portion of the Porcupine Gold Camp. Vein facies alteration includes sericite and sericite, but also one or more of pyrite, quartz veins, and hydrothermal quartz and albite.

Pressions et altération régionale

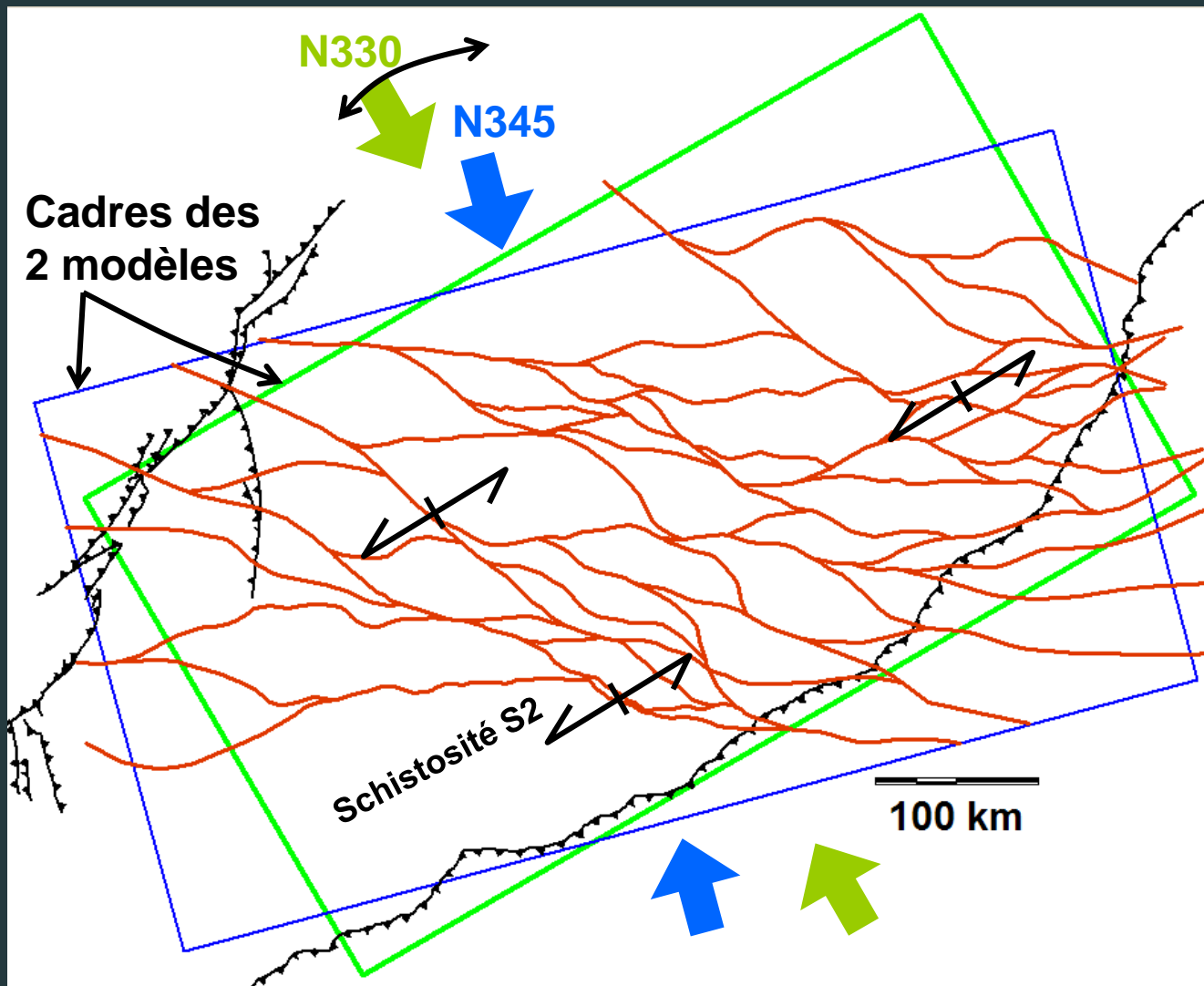
CO₂*
contours 2, 3 et 5%



Modélisation des paléopressions à l'échelle de la ceinture de l'**Abitibi**

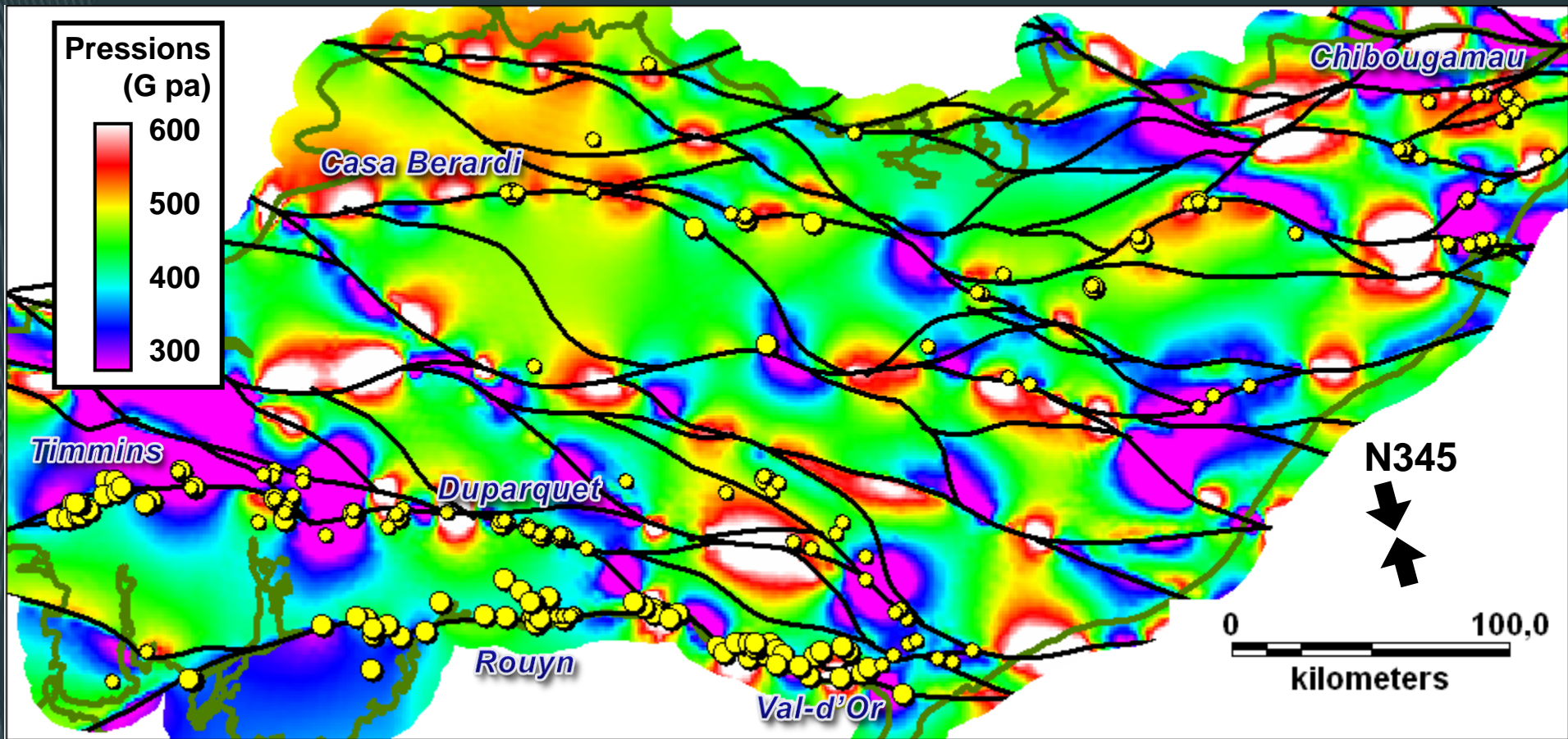
Failles modélisées

Deux modélisations différentes avec le même réseau de failles
Compression à N345 et compression à N330



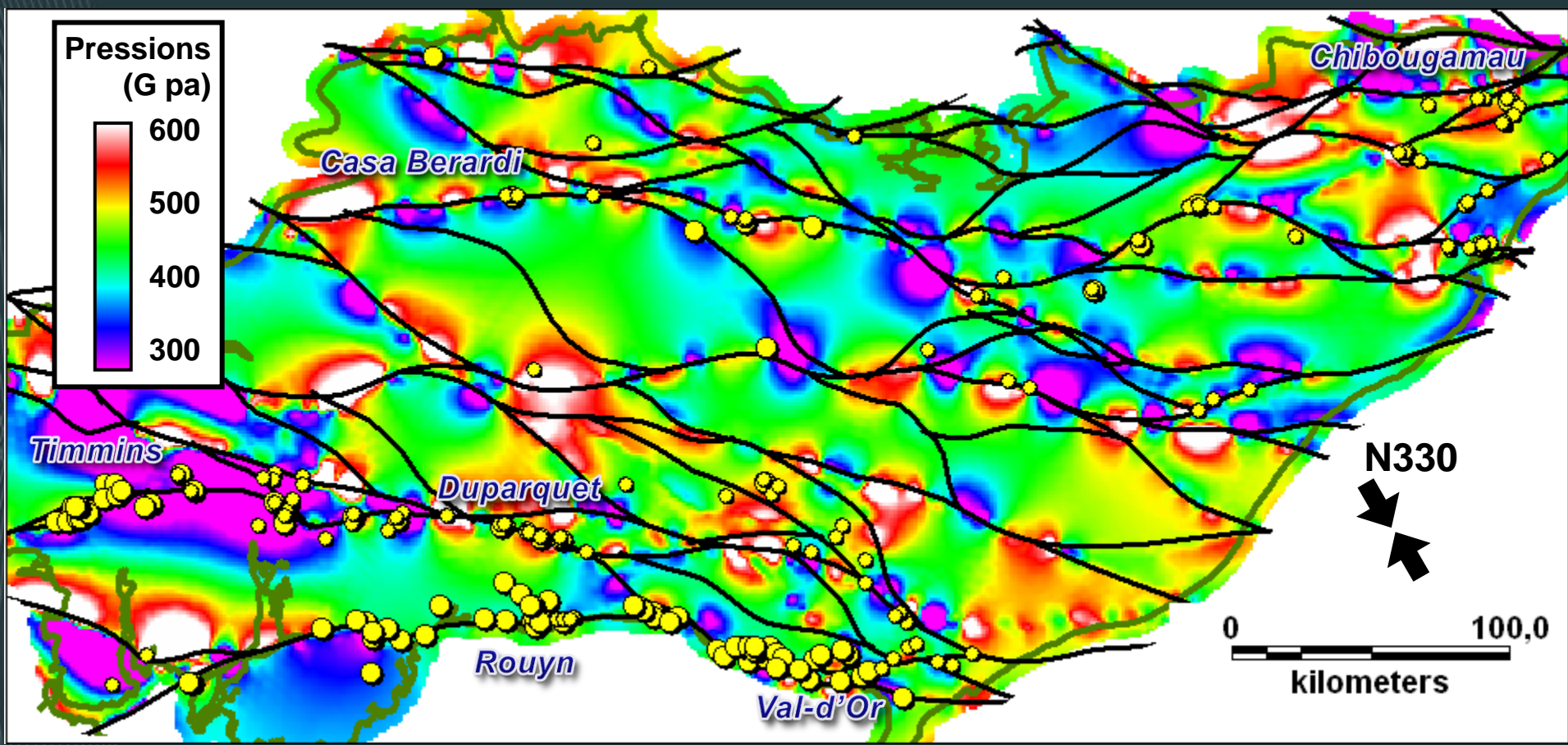
Déformation de l'Abitibi avec UDEC

Résultats des paléopressions moyennes pour le modèle avec une contrainte orientée N345



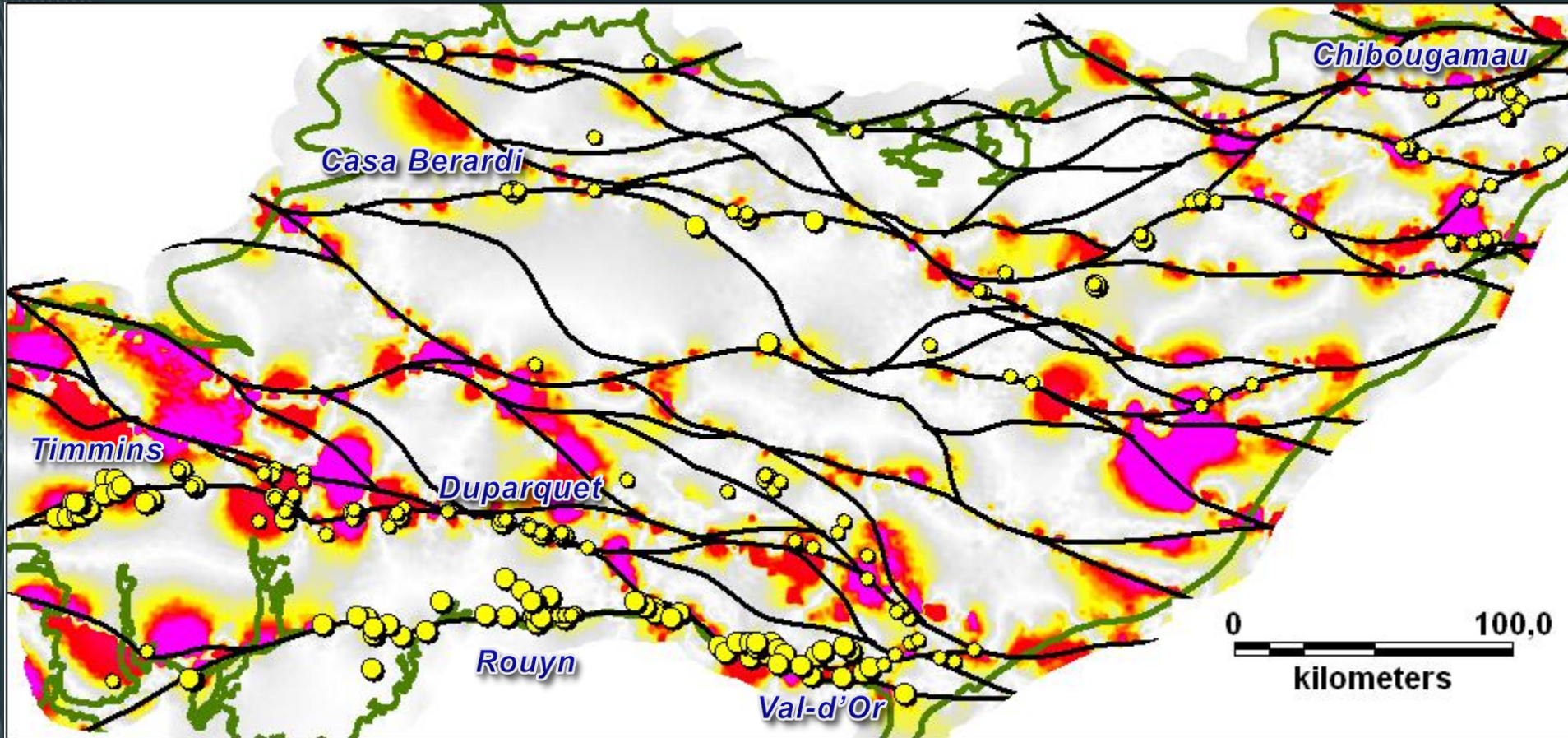
Déformation de l'Abitibi avec UDEC

Résultats des paléopressions moyennes pour le modèle avec une contrainte orientée N330



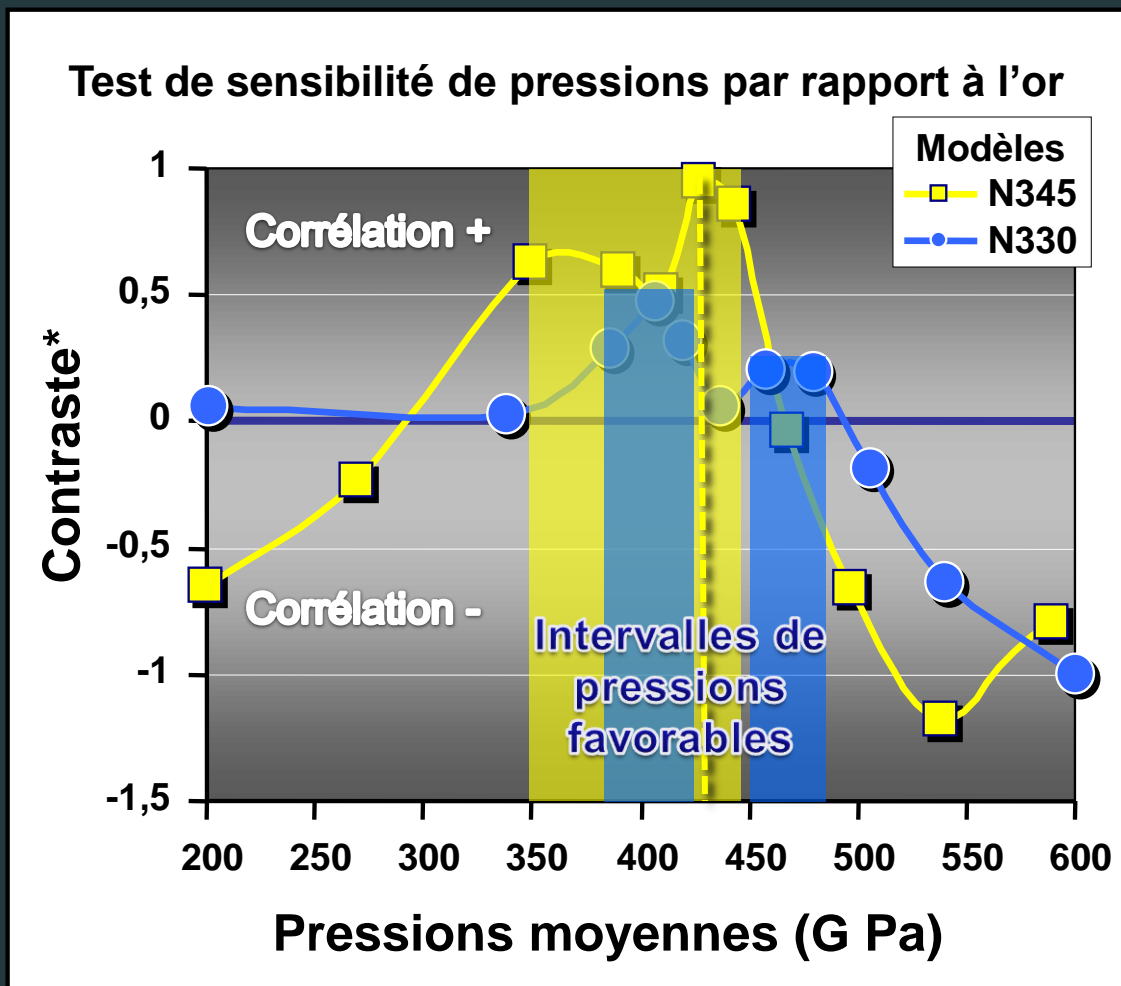
Déformation de l'Abitibi avec UDEC

Les différences entre les deux modèles



Les régions en rouge-violet indiquent les plus grands écarts de pression

Déformation de l'Abitibi avec UDEC



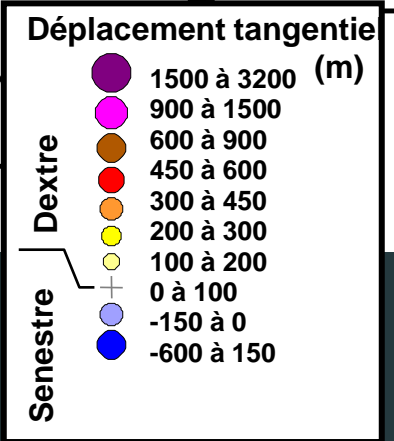
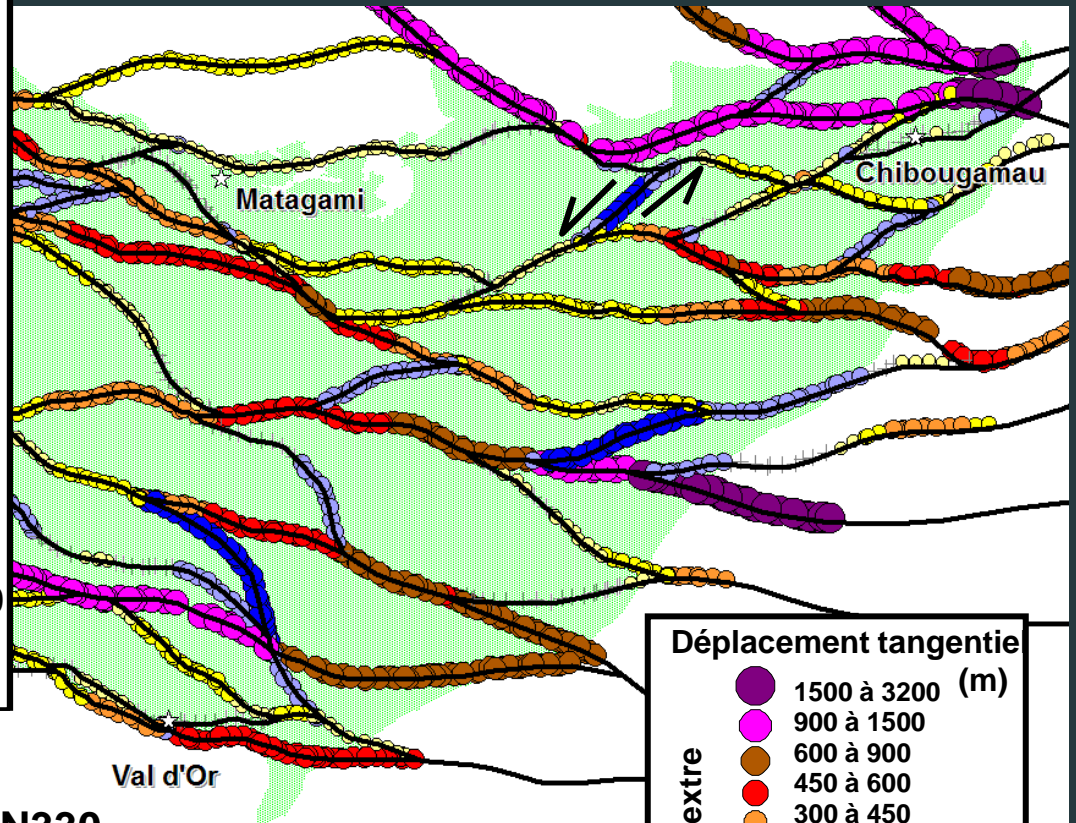
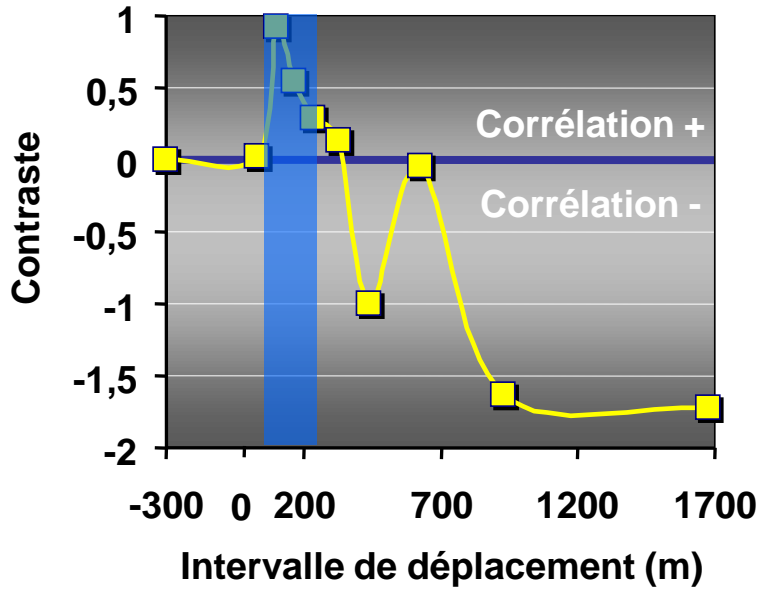
Le modèle N345 est globalement jugé meilleur que le N330 pour certains intervalles de pressions, mais localement le modèle N345 explique mieux la présence de certaines minéralisations

*log n (cote d'un indicateur près de la minéralisation / cote d'un indicateur loin de la minéralisation)
 Cote étant = probabilité / (1-probabilité)

Autres paramètres géomécaniques

Quantité de déplacement tangentiel (décrochement) le long des failles

Sensibilité du déplacement tangentiel par rapport aux minéralisations Au



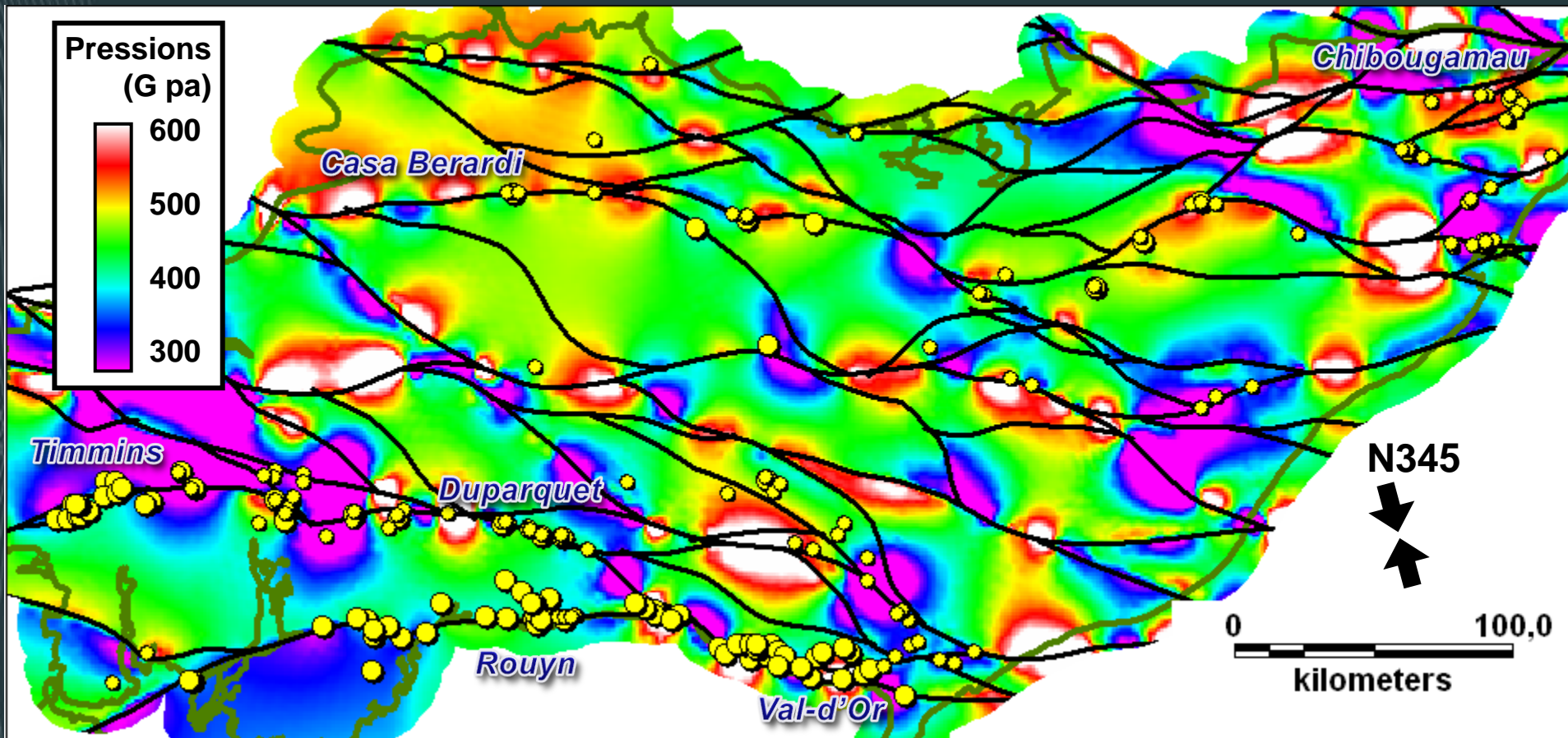
Modèle avec contraintes orientées N330

Conclusion: faibles déplacements dextres (50 à 200m) sont plus propices à la formation de minéralisations Au

Cibles d'exploration régionales par réseaux neuronaux (RN)

Déformation de l'Abitibi avec UDEC

Résultats des paléopressions moyennes pour le modèle avec une contrainte orientée N345



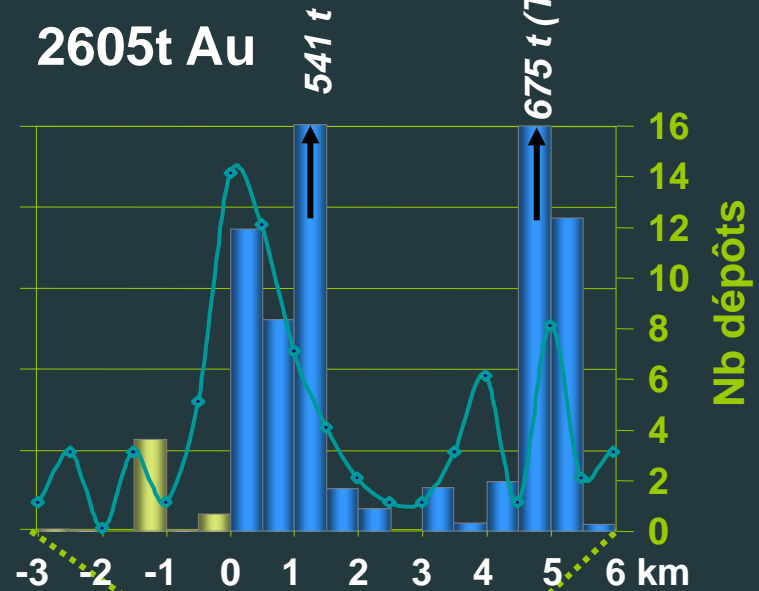
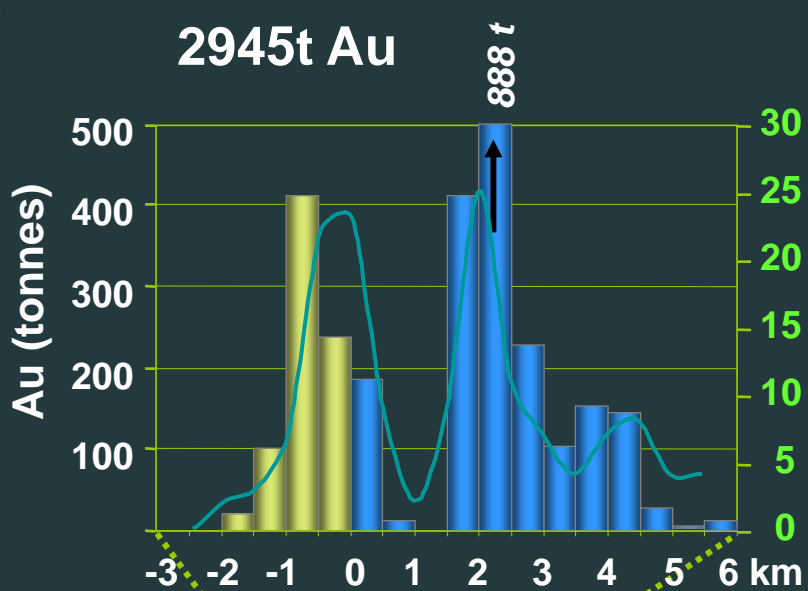
Comment valoriser les données de paléopressions à cette échelle?

Distribution de l'or en Abitibi

Distribution de l'or (toutes catégories) perpendiculaire aux failles dans la Zone Volcanique Sud

Faille Cadillac

Faille Porcupine

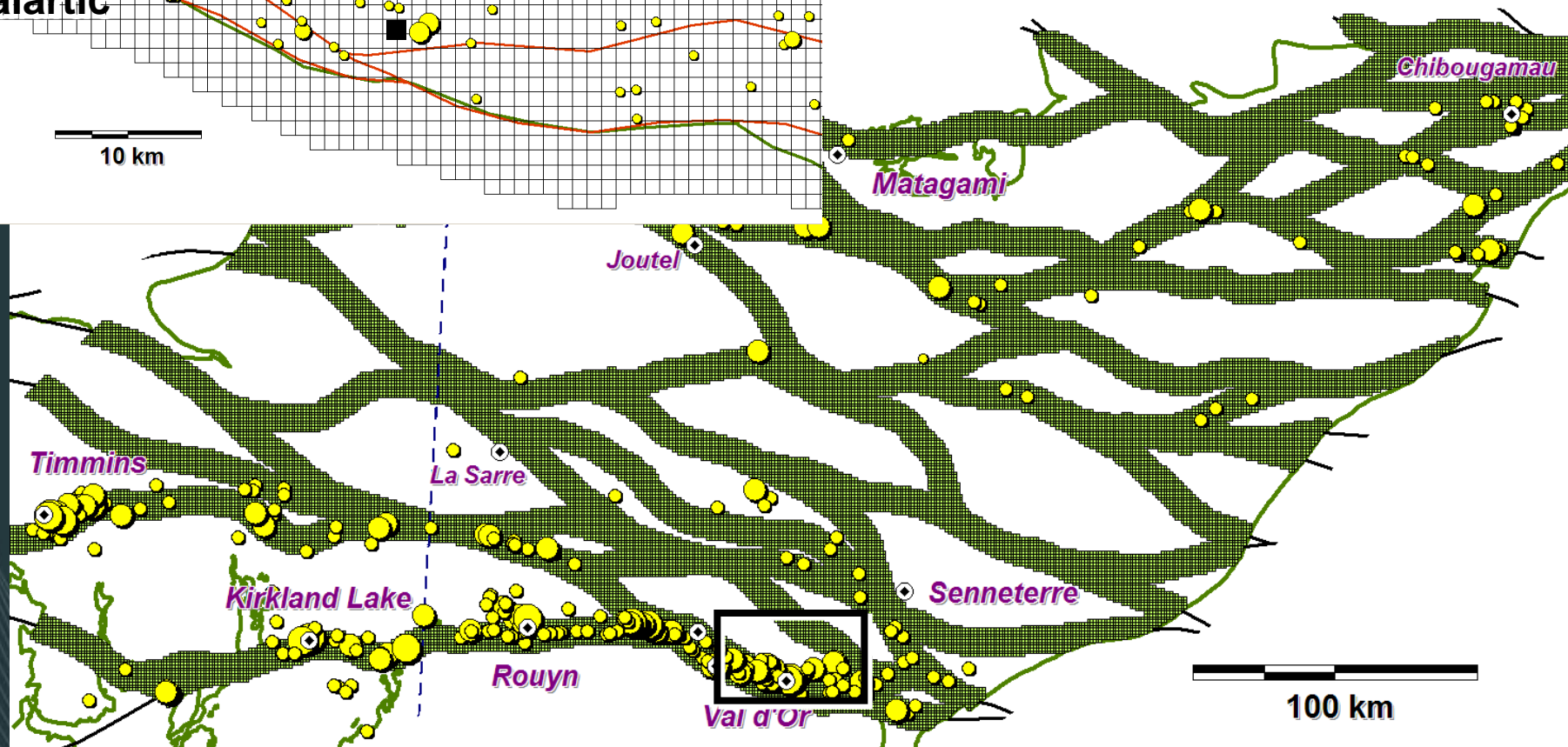
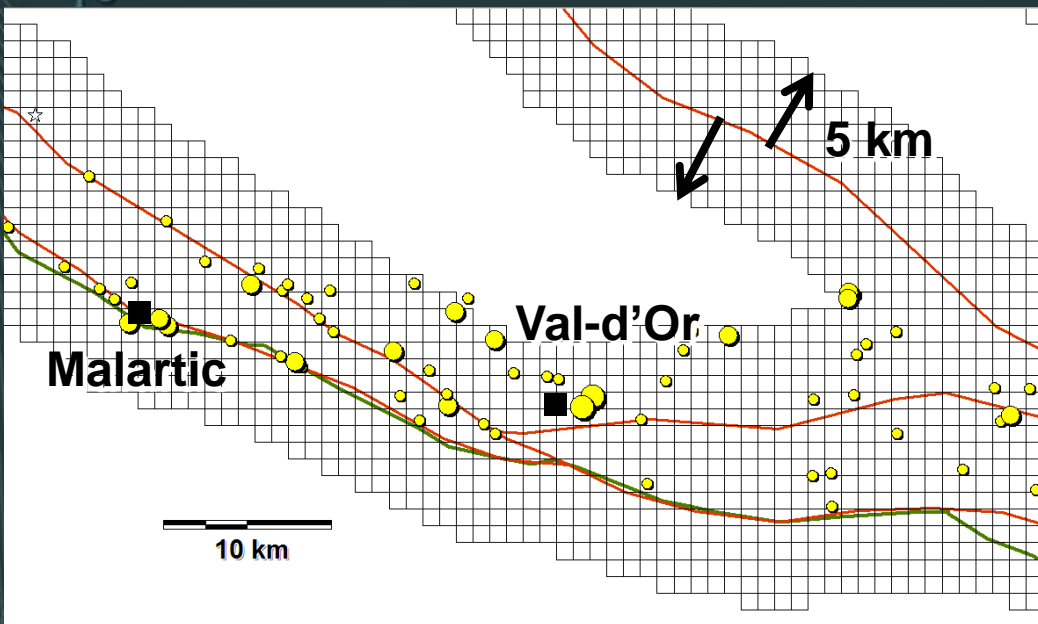


Base de données de Gosselin et Dubé 2005

Base de données - Réseaux Neuronaux (RN)

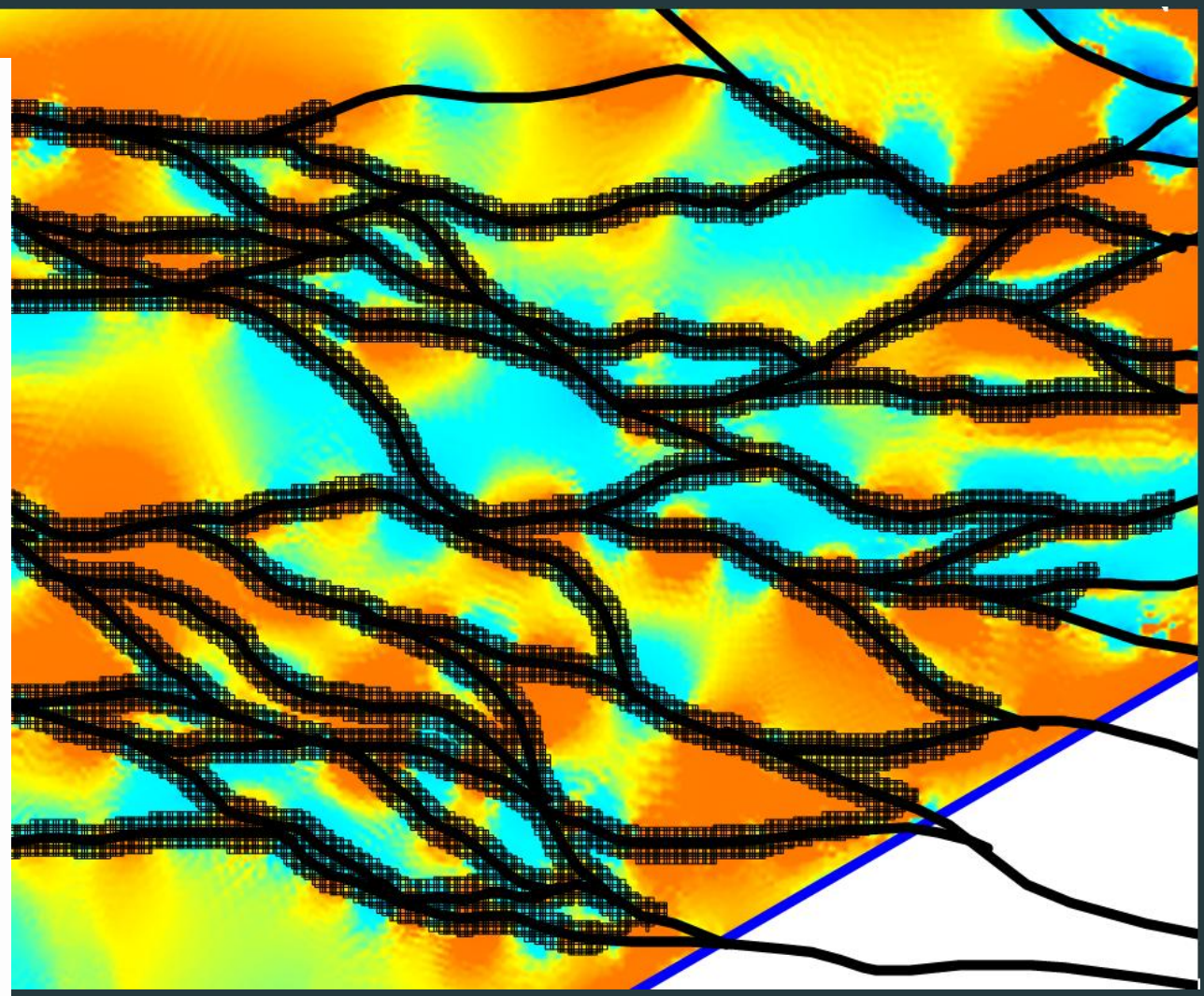
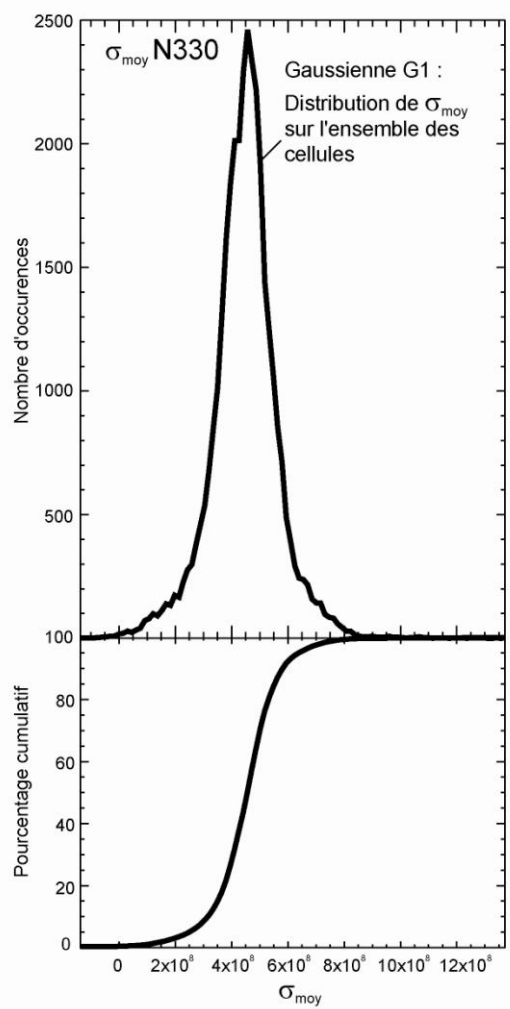
Carrés de 1km² le long des couloirs de déformation

68,3% (304/445) des mines et gîtes à moins de 5 km des failles régionales

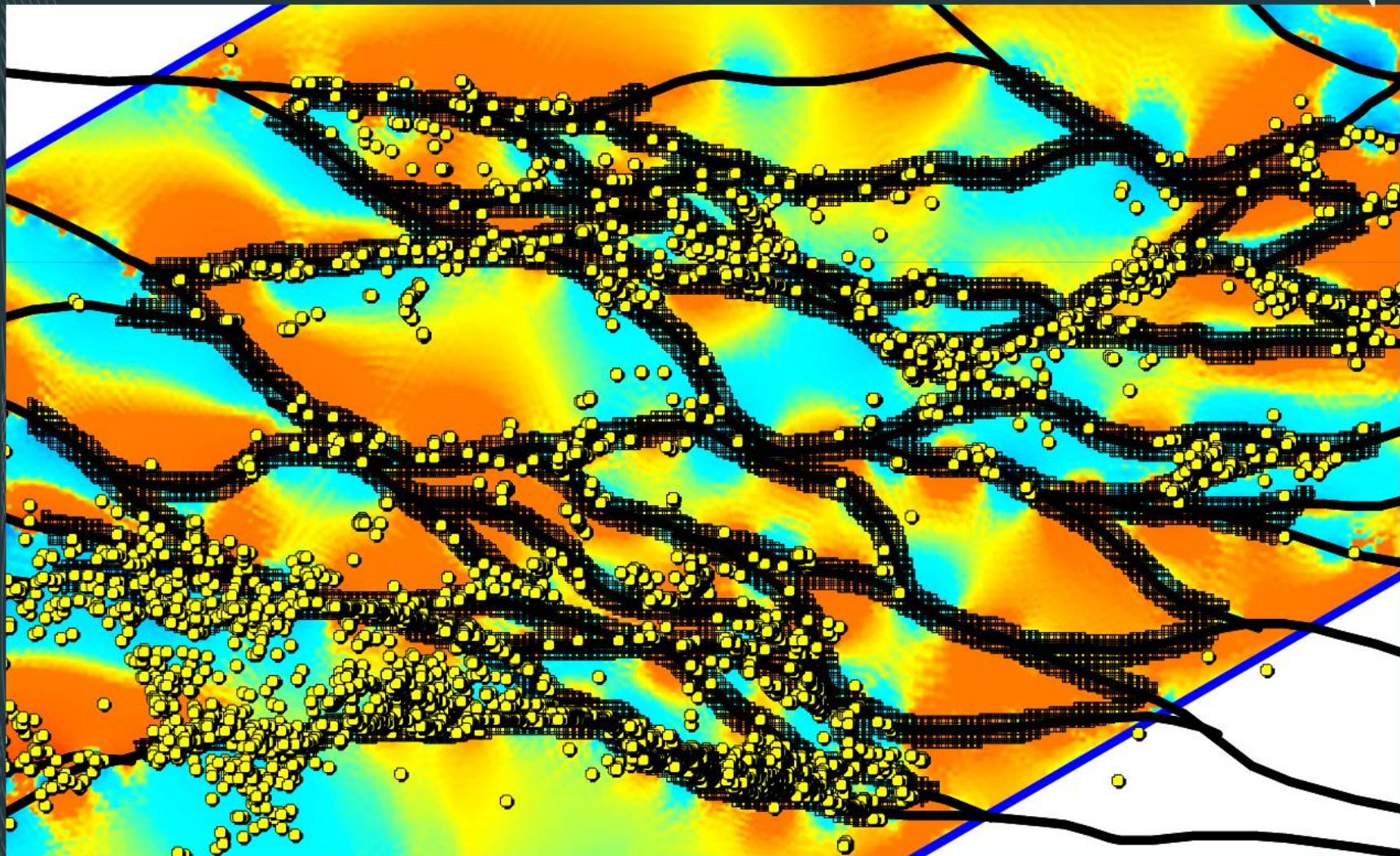


ANALYSE STATISTIQUE DES CORRÉLATIONS

Variable simulée (σ_{moy}) / variable mesurée (indices Au)



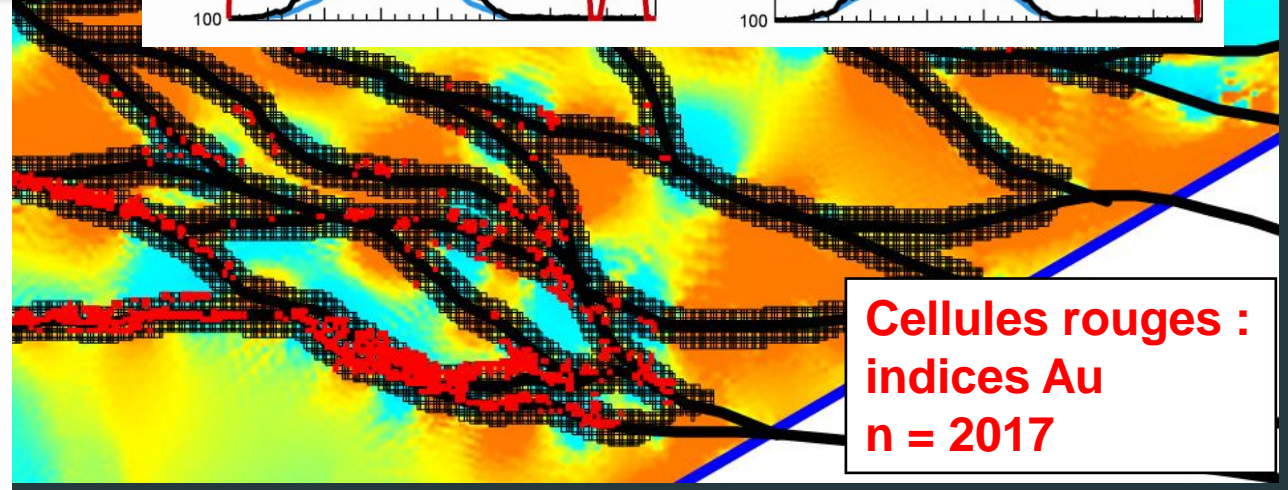
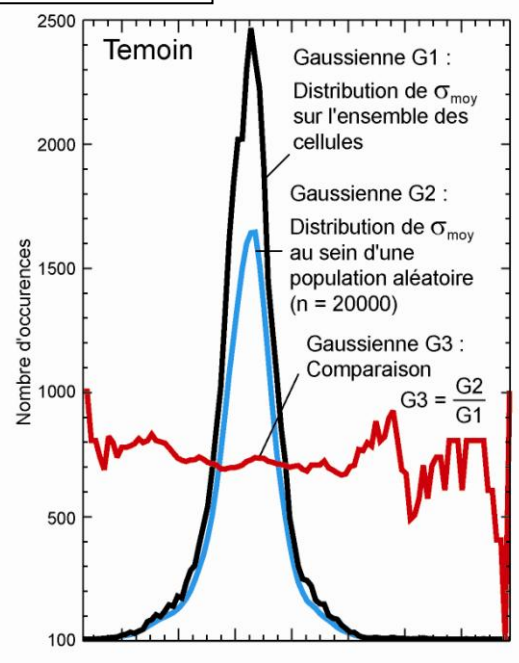
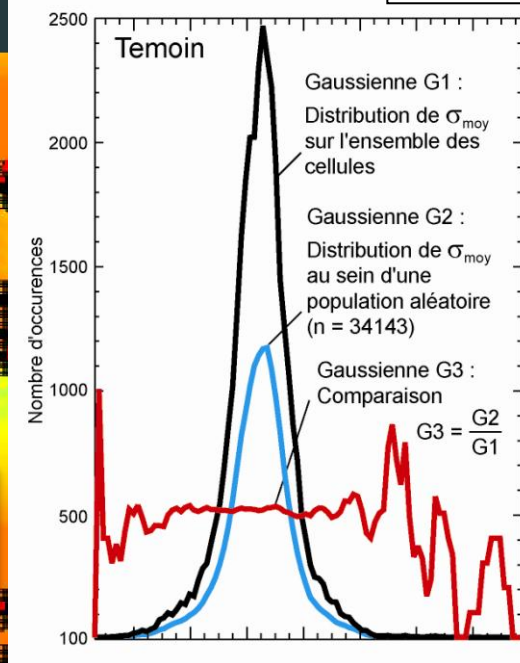
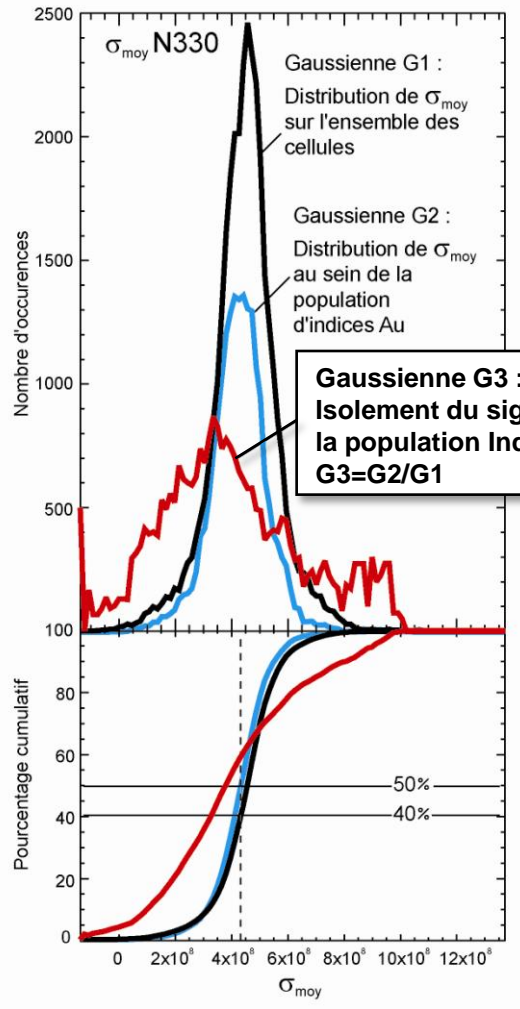
19724 gîtes et indices Au



ANALYSE STATISTIQUE DES CORRÉLATIONS

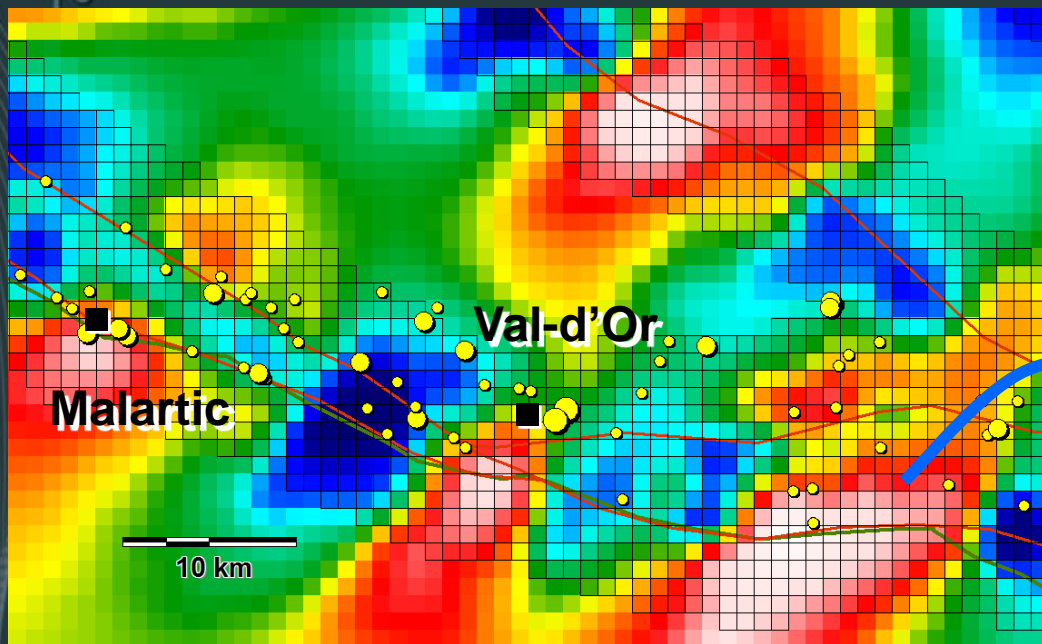
Variable simulée (σ_{moy}) / variable mesurée (indices Au)

Populations aléatoires



**Cellules rouges :
indices Au
n = 2017**

Base de données - Réseaux Neuronaux (RN)



Information pour chaque carré
(à 5 km des failles)



Paramètres géomécaniques UDEC

Smoy_330	Smax1_330	Smin3_330	Smoy_Pente330	S1_moins_S3	Direct_Sigma1	Coef_Rupture_330	S	S	S	S	Smoy330_moins_34
164 311 936	565 309 504	163 314 336	281,162	201 995 184	68,909	0,294067	4	0	8	2	17 401 792
149 694 400	542 021 312	157 367 456	284,296	184 653 888	58,2135	0,293283	8	0	2	4	19 399 872
135 235 360	520 640 320	149 830 368	346,333	170 809 936	60,5716	0,293687	6	4	0	4	44 679 904
140 735 904	526 856 736	154 615 072	50,2241	172 241 648	62,7978	0,291789	4	4	2	8	90 866 240

Minéralisations

Nb_Au_sup1gt	Nb_gites_Au	Nb_Cu_sup1pt	Nb_gites_MB	Tonne_Au	Volcanogène	Dist_Faille
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Les minéralisations aurifères volcanogènes ne sont pas considérées (LaRonde, Horne)

Couches utilisées pour les RN

Modèle UDEC avec une contrainte régionale N330

- 1-Pressions maximales (S1)
- 2-Pressions minimales (S3)
- 3-Différentiel de pression (S1-S3)
- 4-Pressions moyennes ($(S1+S3)/2$)
- 5-Pente des pressions moyennes (Dérivée horizontale)
- 6-Direction des contraintes maximales (Sigma1)
- 7-Déplacement tangentiel (décrochement)
- 8-Déplacement normal (chevauchement)
- 9-Coefficient de rupture

Modèle UDEC avec une contrainte régionale N345°

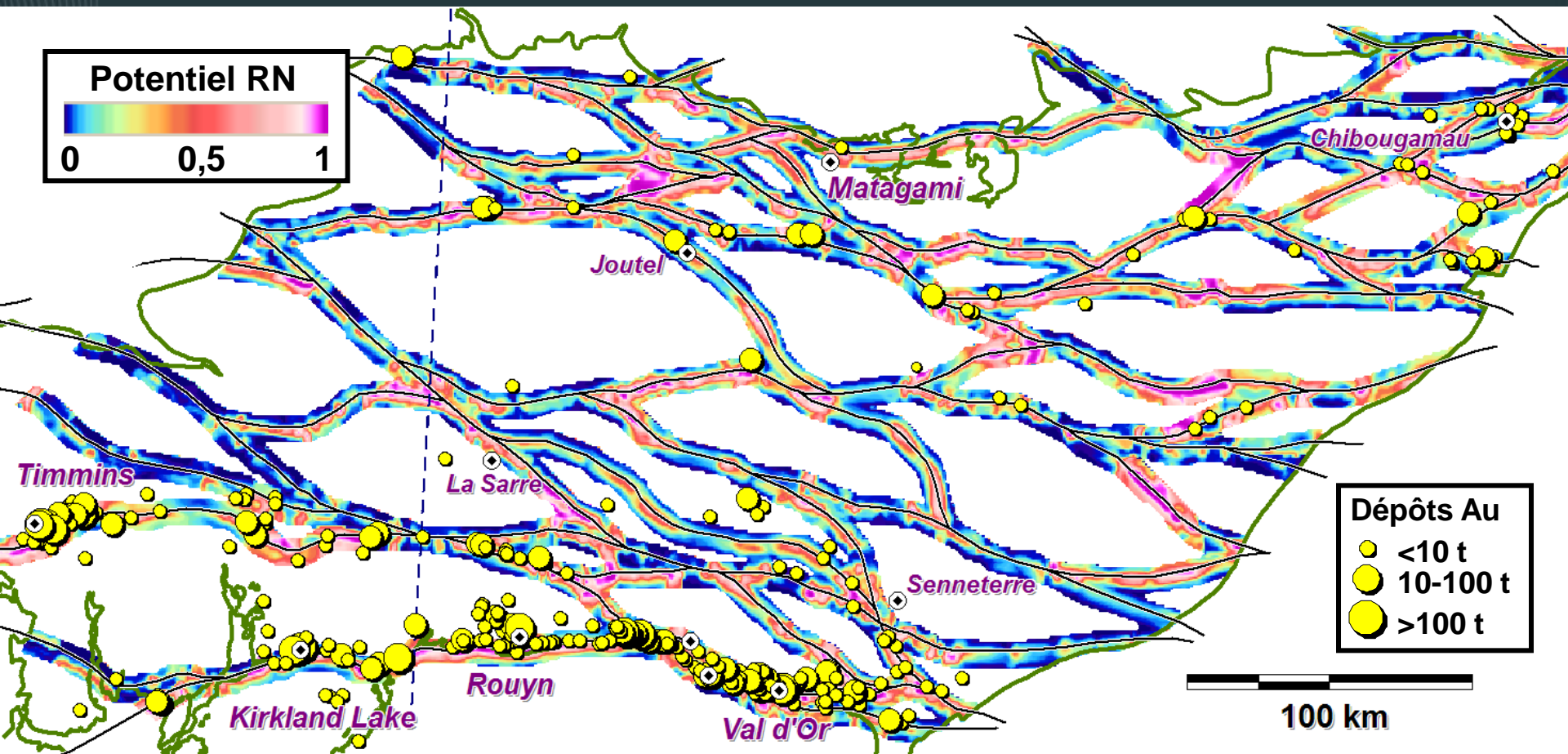
- 10-Pressions maximales (S1)
- 11-Pressions minimales (S3)
- 12-Différentiel de pression (S1-S3)
- 13-Pressions moyennes ($(S1+S3)/2$)
- 14-Pente des pressions moyennes (Dérivée horizontale)

Autres paramètres

- 15-Différence des pressions moyennes entre les deux modèles
- 16-Orientation de la faille
- 17-Distance de la faille

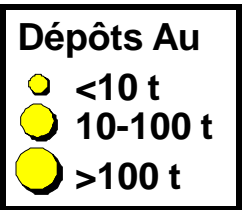
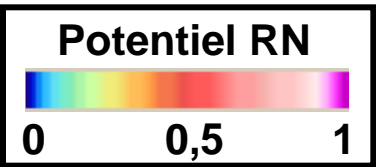
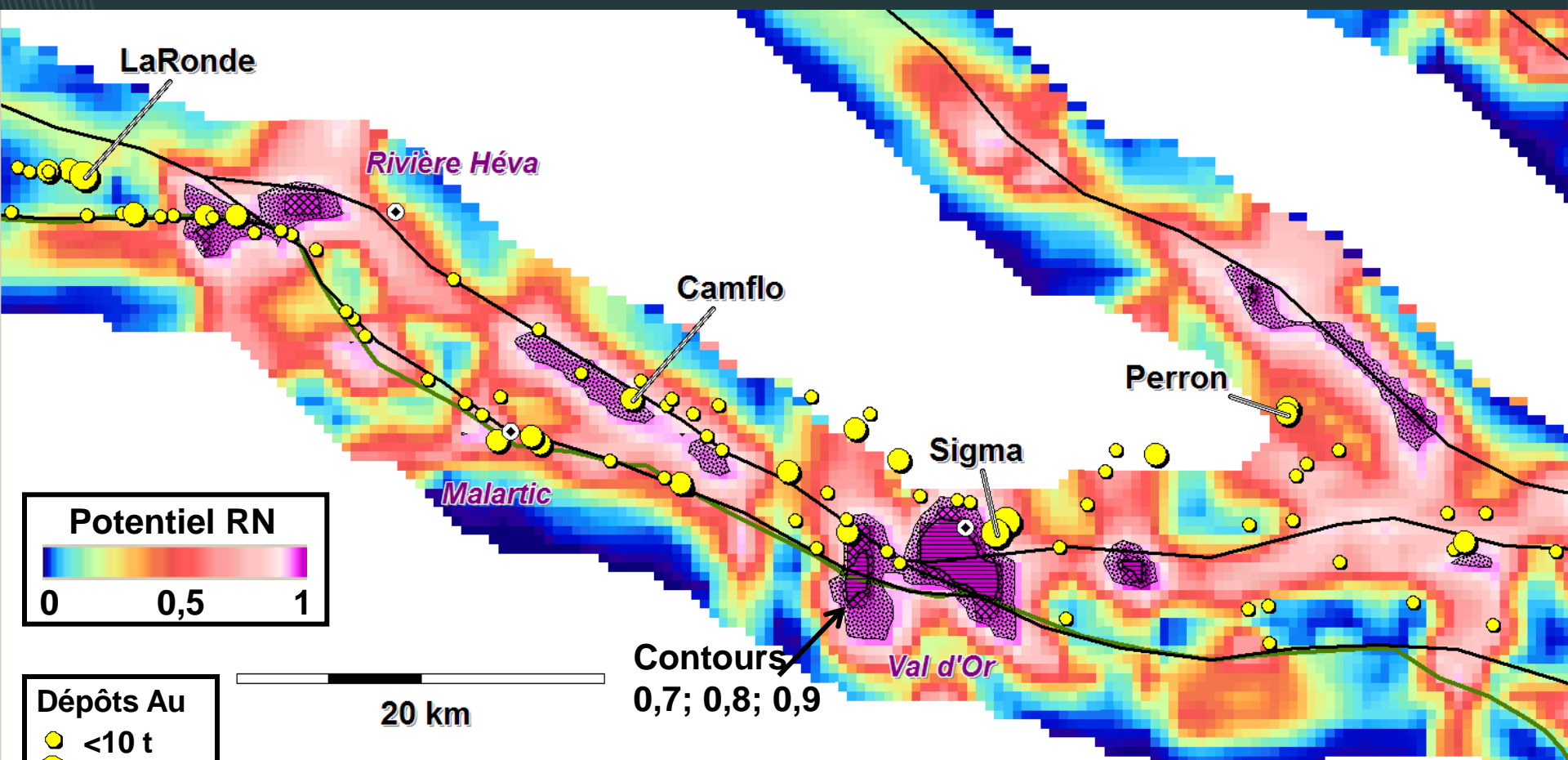
Carte de potentiel minéral des RN

Potentiel de retrouver des minéralisations aurifères le long des corridors de déformation de l'Abitibi selon les paramètres géomécaniques et critères de minéralisations choisis



Carte de potentiel minéral des RN

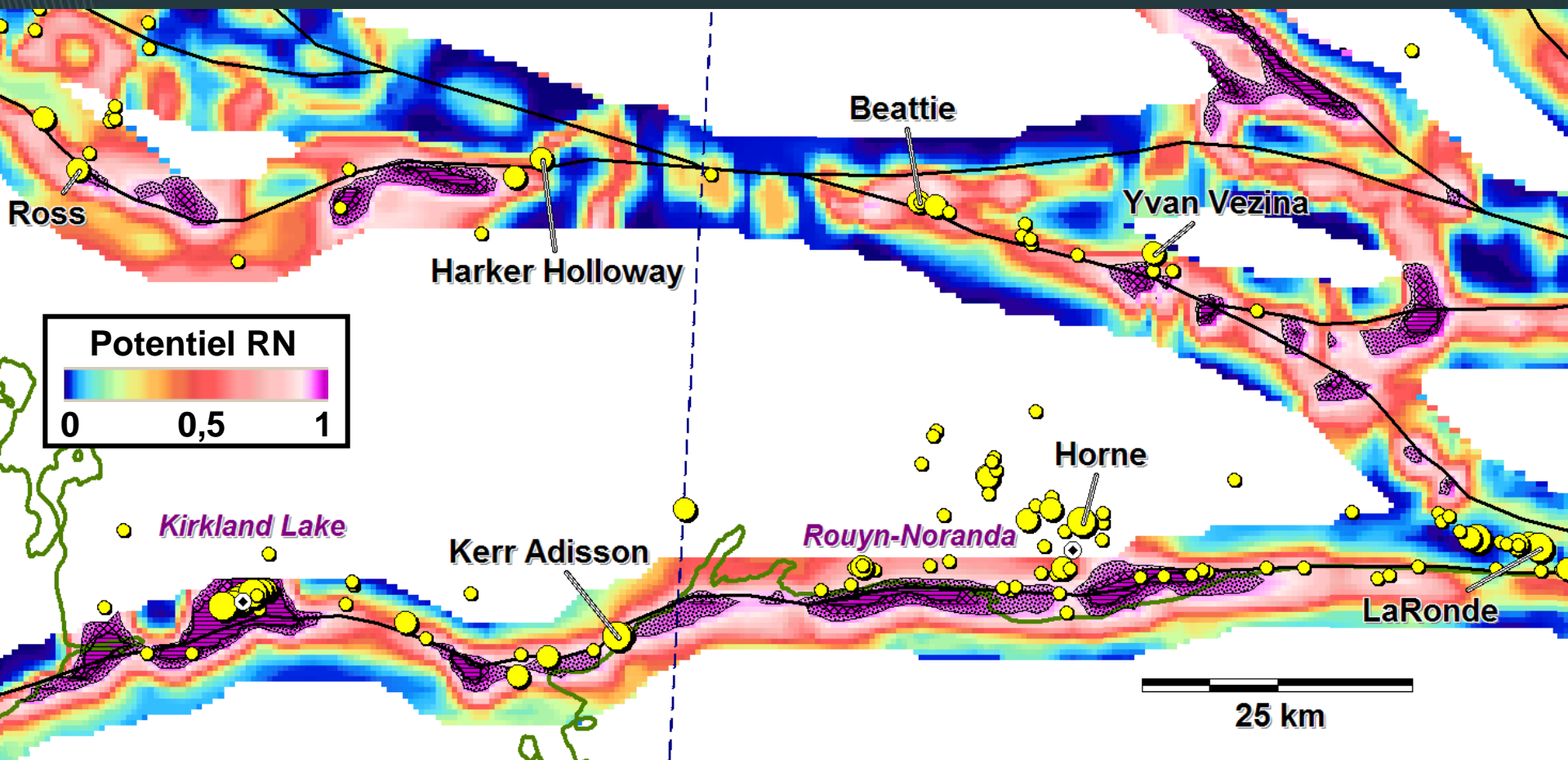
Régions de Malartic et Val-d'Or



Contours
0,7; 0,8; 0,9

Carte de potentiel minéral des RN

Région de Rouyn



Conclusion

Modélisation numérique permet de mieux documenter :

L'empreinte des systèmes hydrothermaux fossiles

La perméabilité relative dans la croûte moyenne

La dynamique des systèmes faillés complexes

Minéralisations et altérations sont localisées:

En bordure de zones de fortes pressions et forts gradients

Gros gisements au cœur de zones de faibles pressions

Présence d'or le long des failles influencée par différents facteurs structuraux et rhéologiques :

Pressions (moyennes, maximales, ou minimales), quantité de déplacement tangential, coefficient de rupture, orientation faille

Applications

Nouvelles cibles d'exploration dans une région ressource

Couche d'information géologique supplémentaire pour les SIG

Remerciements

Réal Daigneault (UQAC)

Marie-France Bugnon et Yushi Lei (Cambior)

Rapports et présentations sur : www.consorem.ca