



Tirer les leçons du passé pour préparer l'avenir des activités minières

**Pierre TOULHOAT, Directeur Scientifique de l'INERIS, membre de
l'Académie des Technologies**

**Conférence dans le cadre de la Chaire « Développement Durable,
Energie, Environnement et Société », Collège de France, 10/2/2015**

Le contexte

- Coût et pénurie des ressources minérales
- Point focal sur les métaux stratégiques
- Souci de limiter la dépendance nationale et européenne en matière d'approvisionnement
- L'Europe et la France ont mis en priorité ces thématiques ces dernières années
 - Création du COMES (2011), Politique du renouveau minier
 - Rapport du Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective (2013)
 - Mise en place d'un Comité Stratégique de Filière (2014)
 - Priorités européennes KIC MatTERS de l'EIT, émanant de la plateforme technologie SMR « Sustainable Mineral Resources » créé en 2014
 - Economie Circulaire, loi sur la transition énergétique
- Mais on ne peut plus rester sur les approches passées
 - Exigences environnementales et sanitaires
 - Exigences sociétales : concertation, développement économique

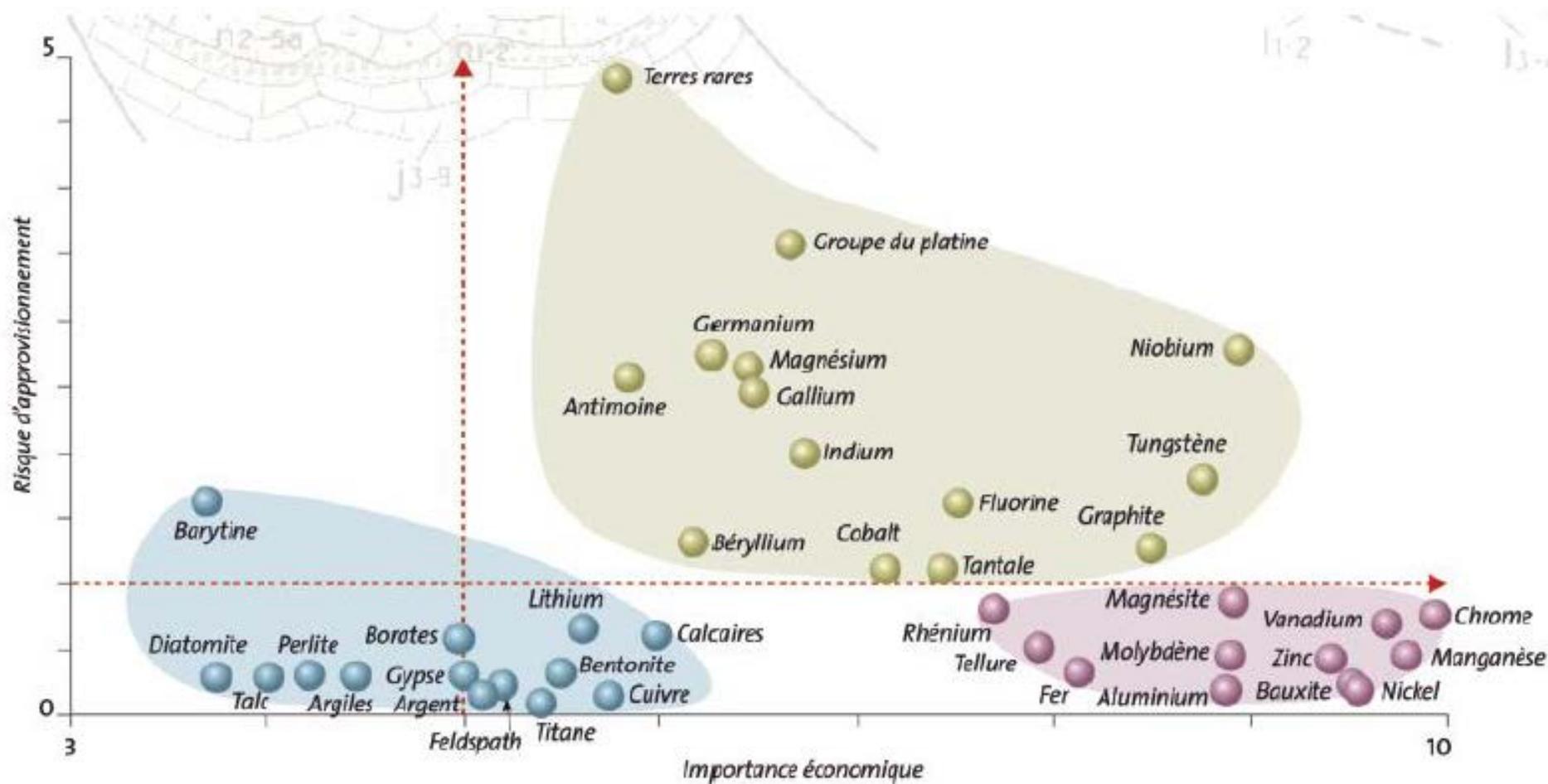


Source: World Economic Forum

Les voies possibles

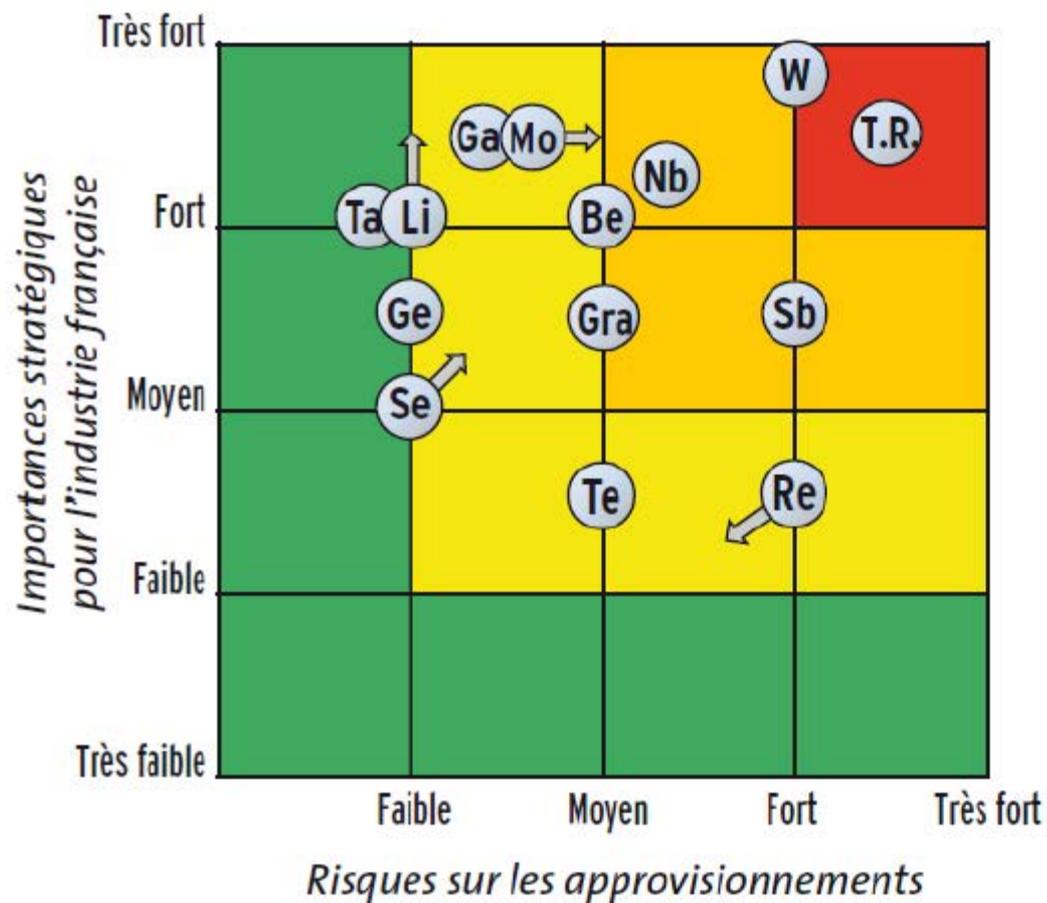
- Le recyclage dans le cadre d'une économie circulaire, et la valorisation des déchets (réemploi)
- La relance de l'exploration et de l'exploitation minière,
 - à partir de nouvelles ressources, notamment profondes
 - en valorisant des stériles/haldes
- Tout ceci implique
 - De nouvelles approches (gestion, réglementation...)
 - Des technologies très innovantes à développer
 - Des défis scientifiques à relever...

Panorama général pour les métaux et matières premières minérales

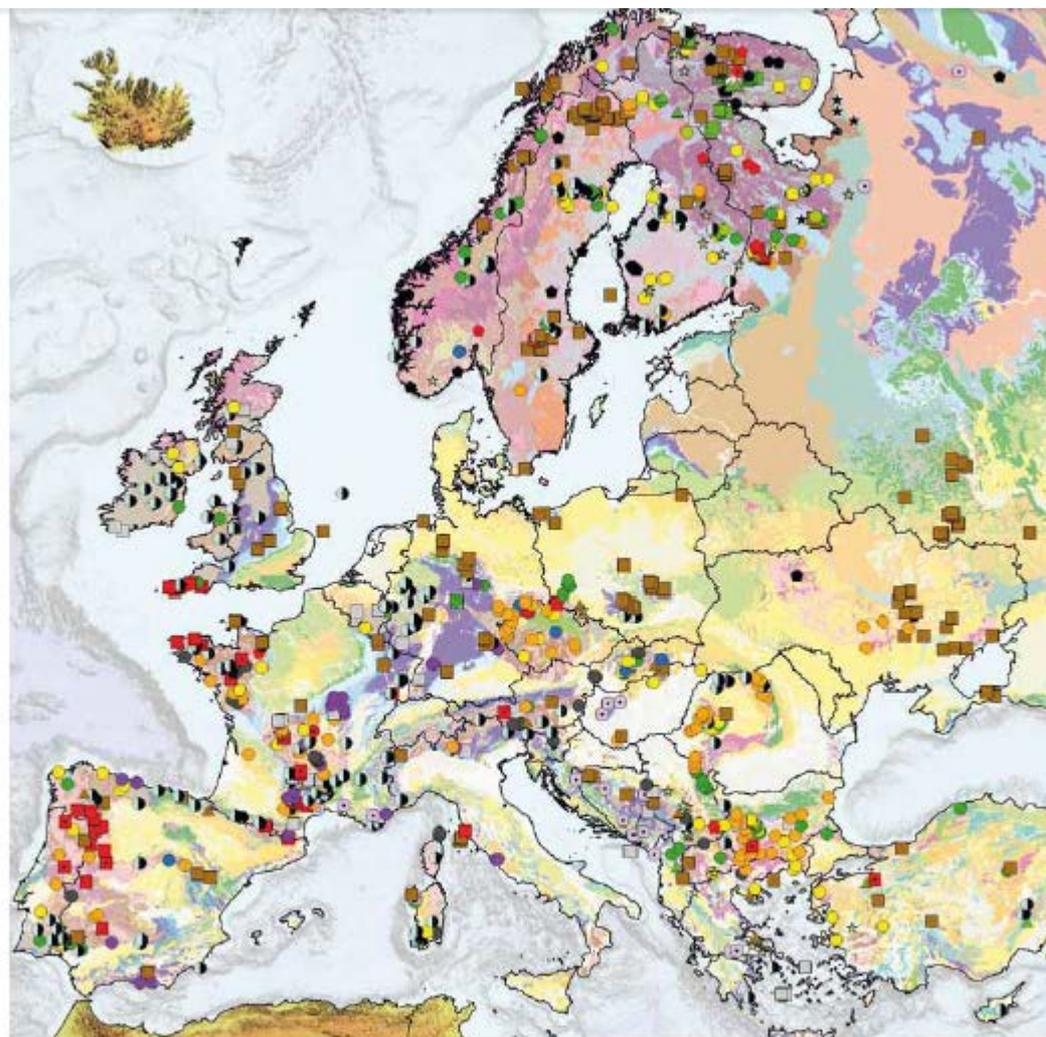


Braux et Christmann, 2012

Métaux critiques : les priorités :



- Zone à forte criticité.**
Actions conservatoires à prendre par l'État. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité
- Zone à forte criticité.**
Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, proposition de scénarios de parade)
- Zone à criticité moyenne.**
Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement)

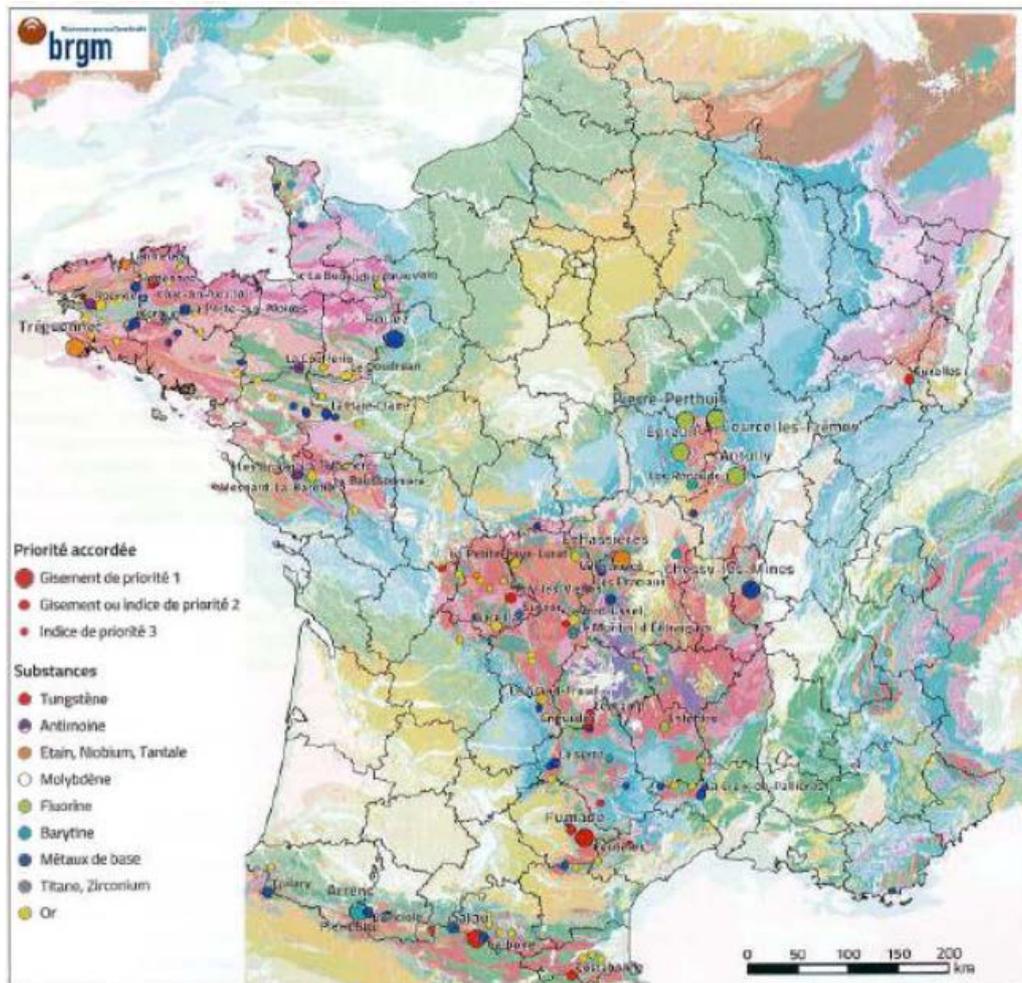


Principaux gisements européens (BRGM, 2012)

Une exploitation active en Europe du N (Suède, Finlande)
 En Europe de l'Est (Pologne)
 Et du Sud Est

En France, plus de mine exploitée

En France, des ressources imparfaitement connues



169 cibles minières priorisées
par le BRGM

Mais encore beaucoup
d'inconnues

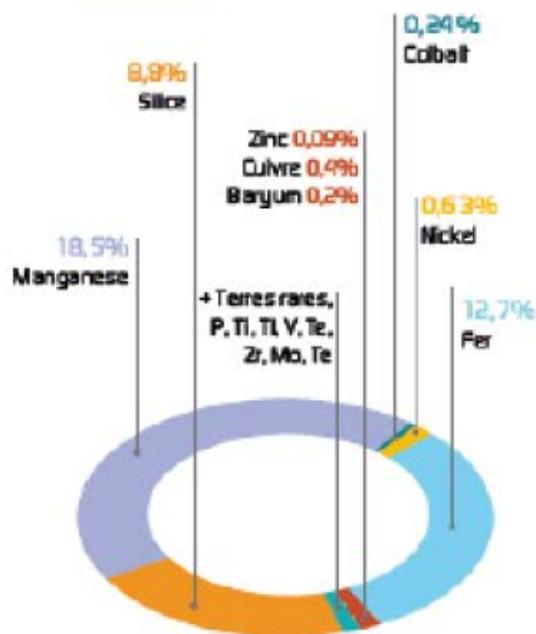
Certains métaux ont été peu
considérés (Ga, In, Nb, Ta)

**Les ressources « profondes »
sont encore très mal connues**

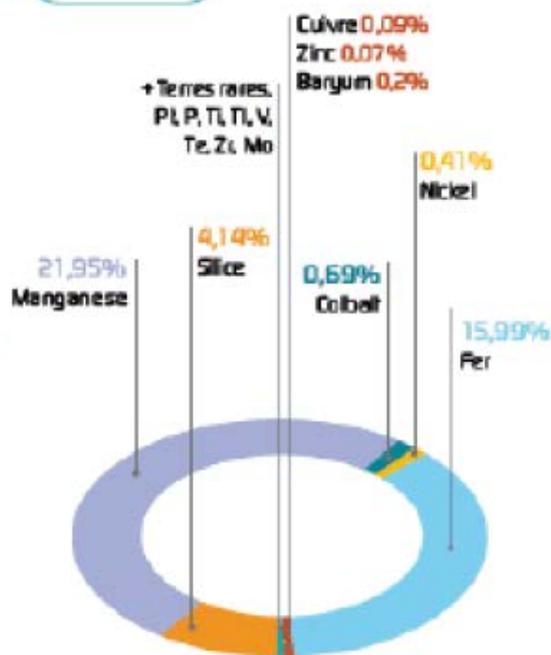
Les ressources off-shore : les plus prometteuses?



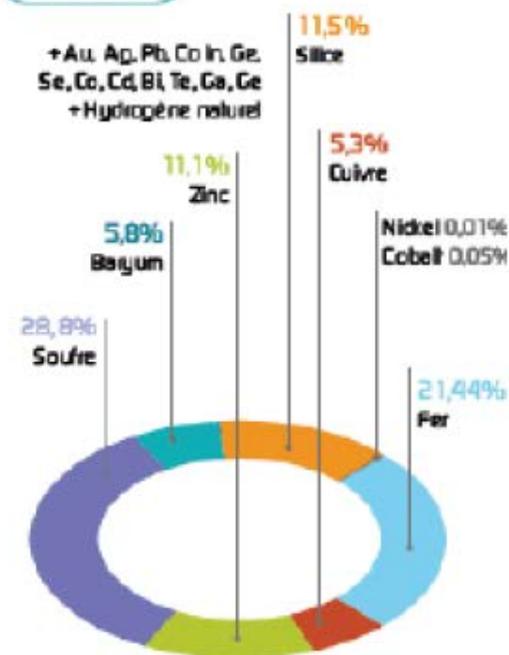
Nodules



Encroûtements



Sulfures hydrothermaux



Concentrations (% en poids) en éléments majeurs dans les minéralisations des grands fonds océaniques (source Ifremer).

Source IFREMER

Héritage des activités minières :

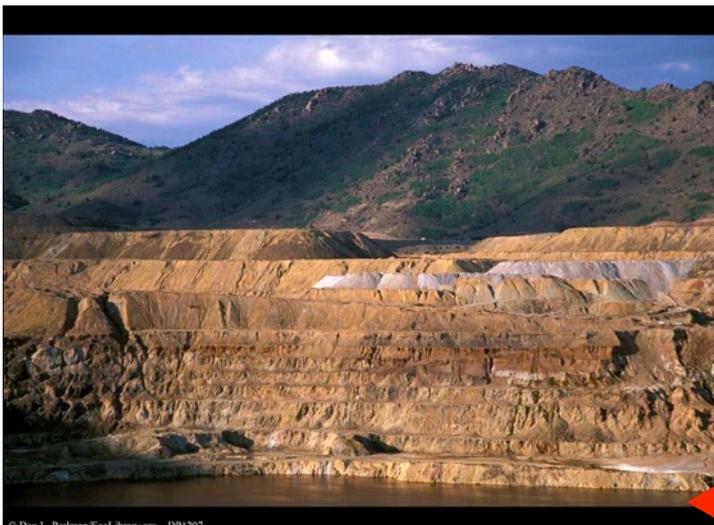
Mines à ciel ouvert, stériles miniers

- Impacts pendant la phase d'exploitation
- Perturbations durables du paysage, des écosystèmes
- Contaminations chimiques persistantes, difficiles à traiter
- Carrières et mines abandonnées, obligation de prise en charge publique
- Exploitations sauvages à fort impact...

Mines souterraines, Après Mine

- Outre les risques spécifiques en exploitation
- Subsidence, effondrements
- Perturbations hydrogéologiques et géochimiques
- Emission de gaz (CO₂, CH₄, H₂S...)

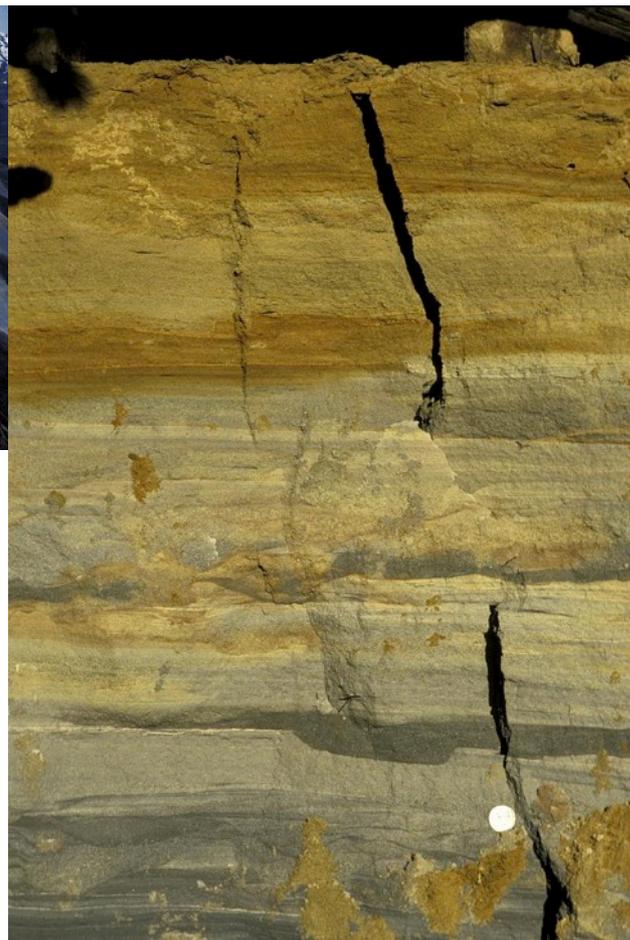
Héritages des activités minières : mines à ciel ouvert, résidus stockés en surface, installation de traitement



Bingham porphyry, Utah, USA
Berkeley Pit, Montana, USA



Salsigne (France)

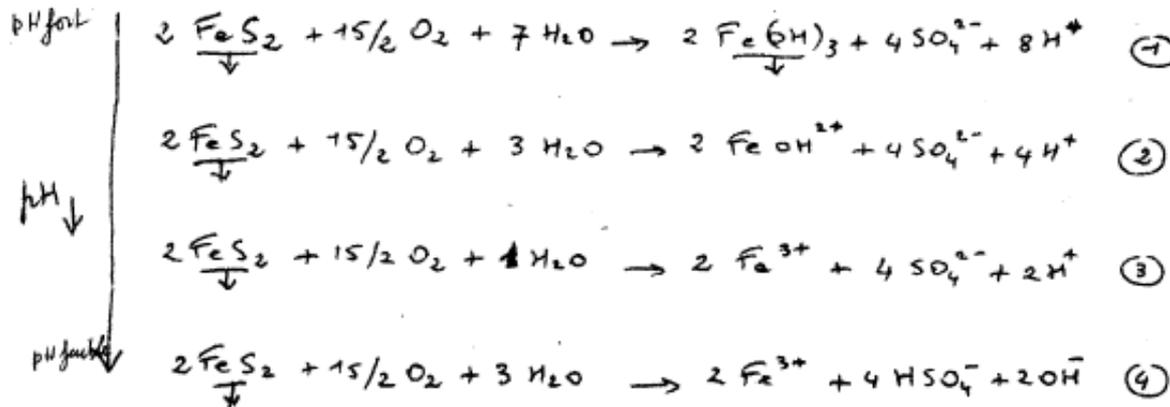


Altération de résidus miniers pyriteux

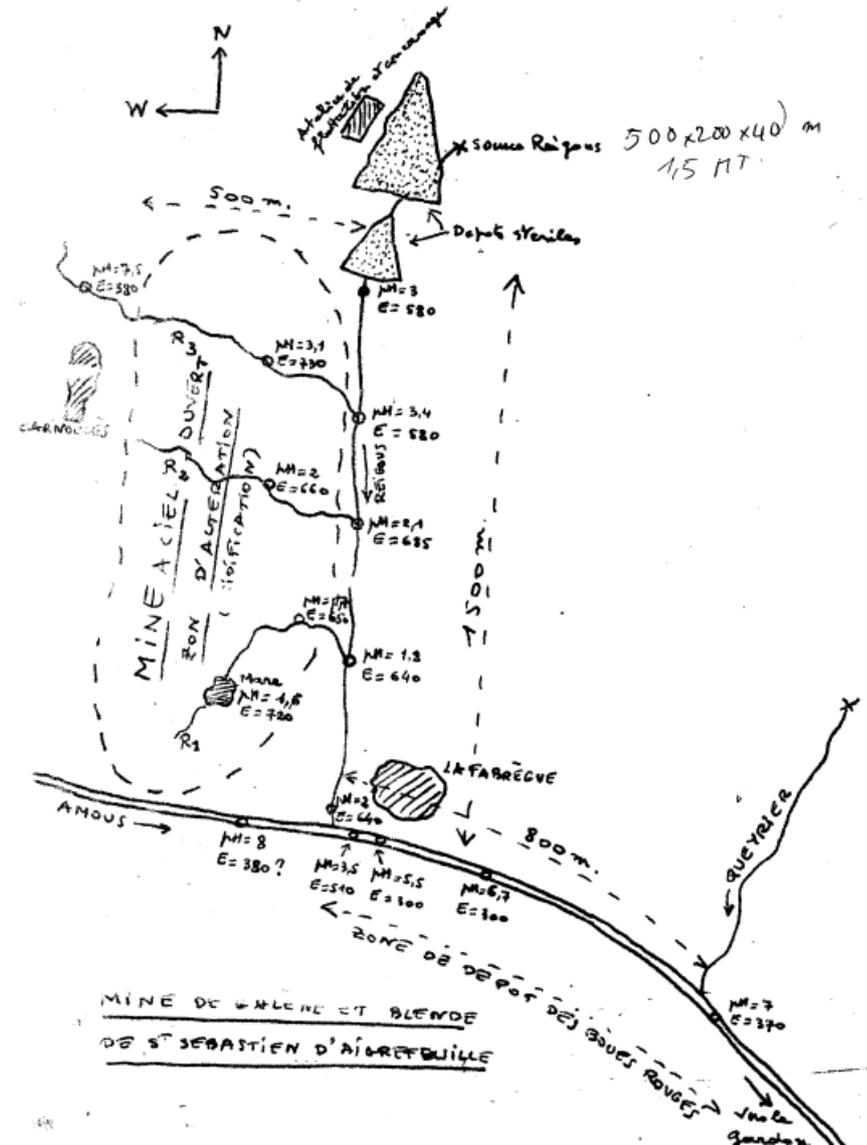
Altération d'une mine à ciel ouvert à **St-Sébastien d'Aigrefeuille**

Contexte géographique

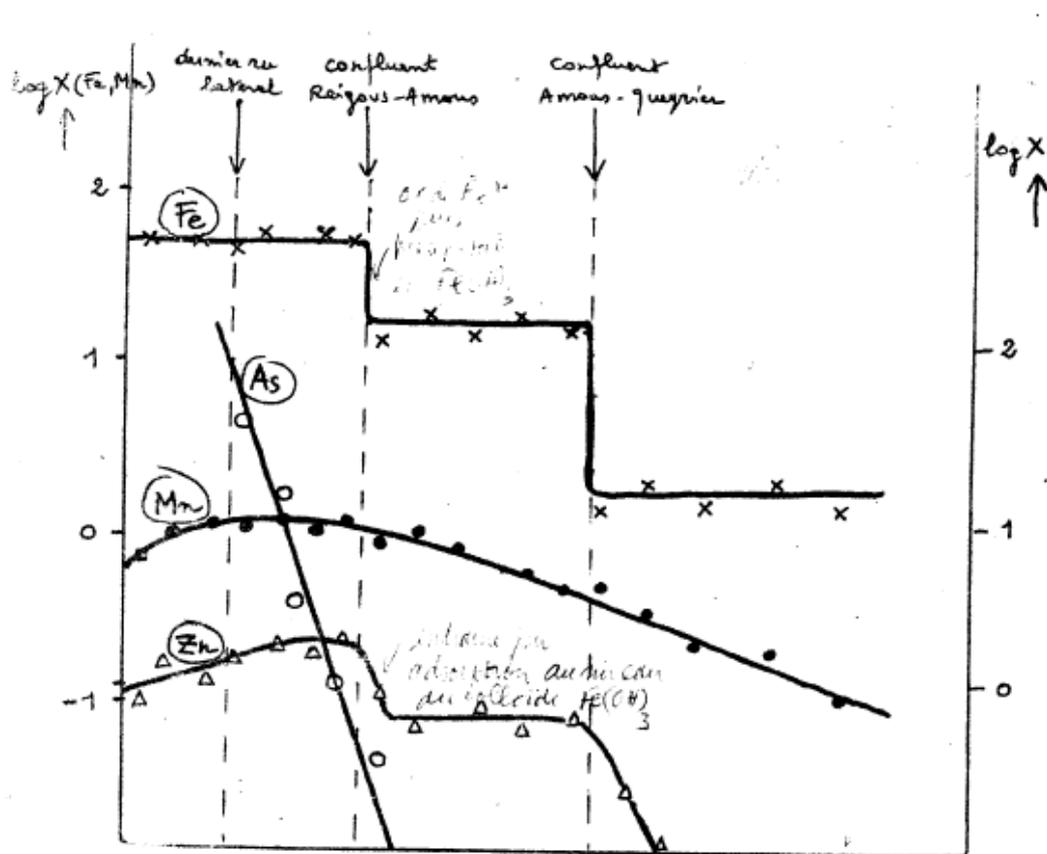
Cevennes, bassin sédimentaire
abandonné depuis 10 ans Pb-S-Zn



Dans les ruisseaux descendant de la mine
Des pH qui descendent à 1,8 = acide sulfurique
Des boues rouges précipitent en aval quand le pH remonte



Comportement des métaux



Précipitation des éléments métalliques -

Les métaux très concentrés en solution en amont diminuent vers l'aval au fur et à mesure que le pH augmente



Saint Sébastien d'Aigrefeuille, photo Geoderis

Presque 40 ans après, on ne peut pas dire que le problème soit encore complètement résolu....

Mines à ciel Ouvert : des efforts de réhabilitation, des résultats inégaux...



MCO revégétalisée (USA)



Terrain de golf (Anaconda, Montana, USA)



Remontées acides sur des stériles revégétalisés



Reprise inégale de la végétation sur zones réhabilitées

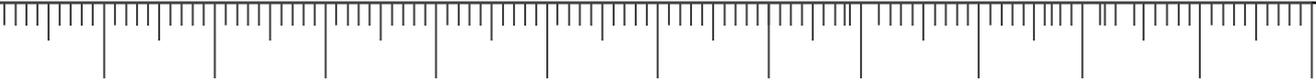
Mais on peut en tirer des infos : « phyto-mining », revient d'actualité ou phytoremédiation/ phytostabilisation



Alyssum Cypriacum, plante hyperaccumulatrice de Nickel
R. D. Schuiling / Natural Science 5 (2013) 445–448

Table 4: Translocation factor ($TF [Metal]_{Shoot}/[Metal]_{Root}$) in plant species grown on Cu-tailings pond of Rakha mines.

Plant species	TF			
	Cu	Ni	Mn	Zn
<i>Ammania baccifera</i>	0.06	0.37	1.70	0.20
<i>Fimbristylis dichotoma</i>	0.20	0.36	1.45	1.0
<i>Pycreus flavidus</i>	0.09	0.09	2.71	2.46
<i>Typha latifolia</i>	0.02	0.04	2.71	0.16
<i>Echinocola cholona</i>	0.12	0.46	1.30	0.96



Risques principaux en contexte “Après Mine”

Impacts qualitatifs et quantitatifs sur l'eau

- **Inondations** en surface, **pollution** des aquifères

Risques d'instabilité en surface

- Subsidence, collapsus,
- Glissements, chutes de blocs...

Risques reliés à l'émission de gaz

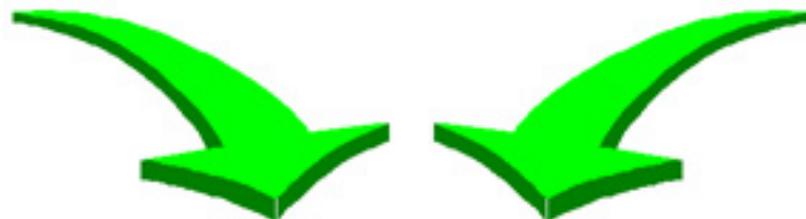
- Asphyxie (manque d' O₂),
- Intoxication (CO₂, CO, H₂S),
- Explosion (CH₄)
- Irradiation (radon)

Risques liés aux structures de surface

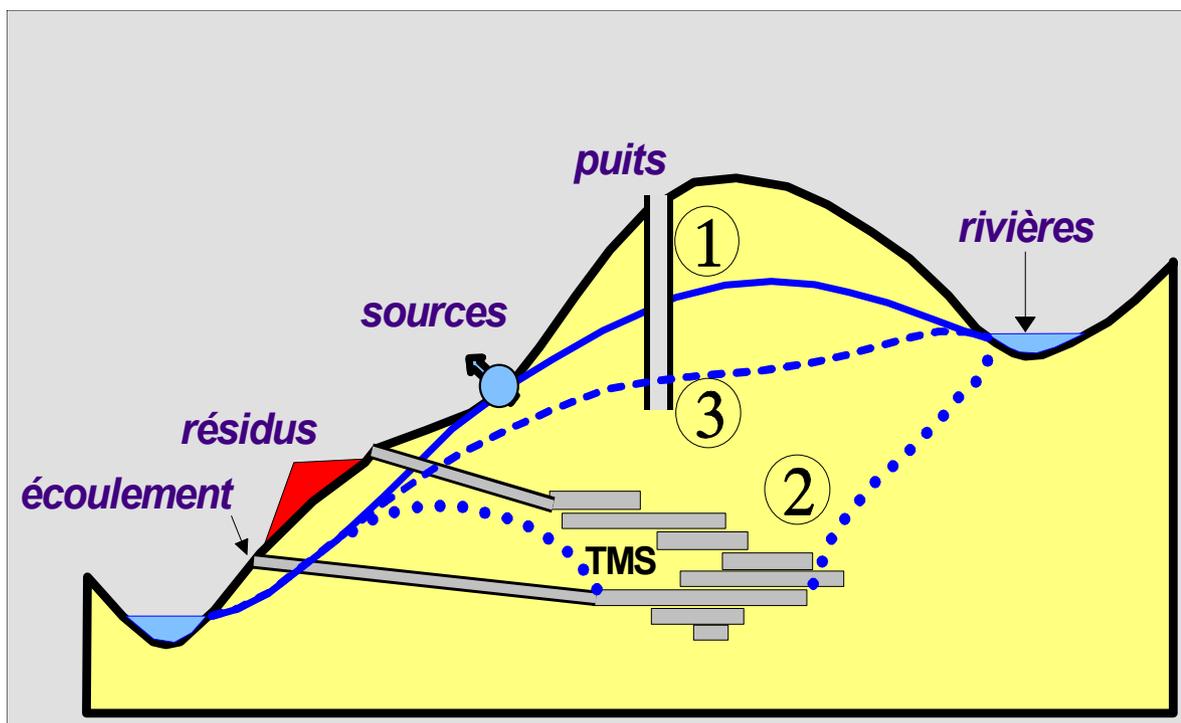
Risques d'inondation en surface

Fin de l'extraction

Arrêt du pompage



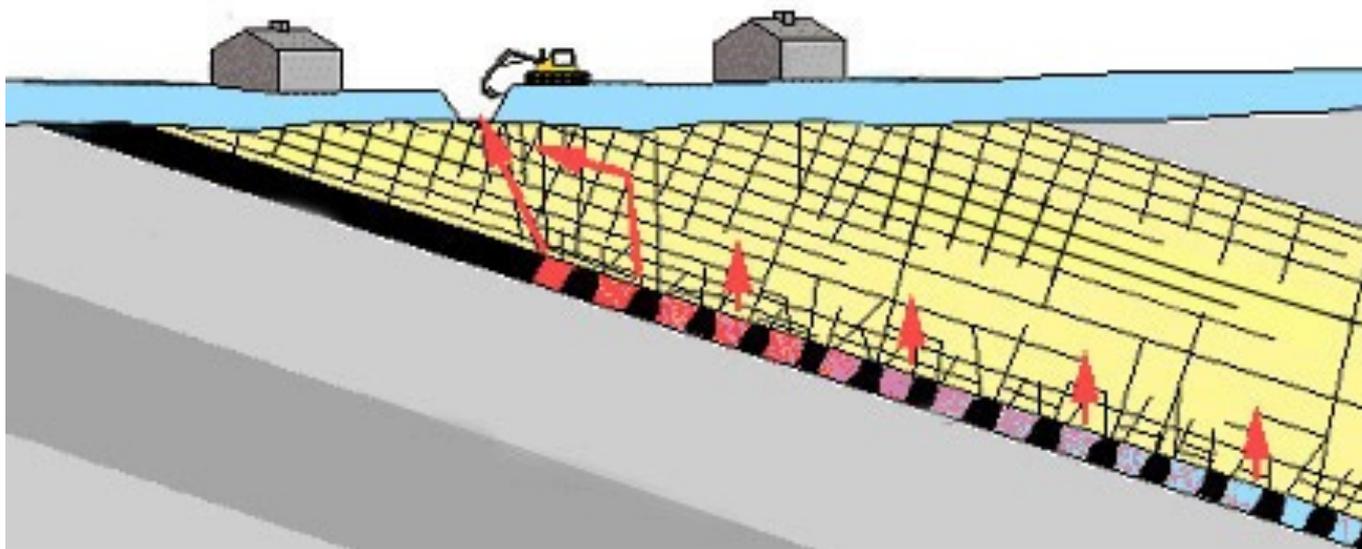
Ennoyage progressif



Risques d'émission de gaz de mines en surface

Risques divers liés aux gaz

- asphyxie (Anoxie)
- **intoxication** (CO, CO₂, H₂S...)
- **explosion** (methane...)
- **irradiation** (radon)



Pollution des eaux et sols

Des risques de pollution en cas de combinaison de:

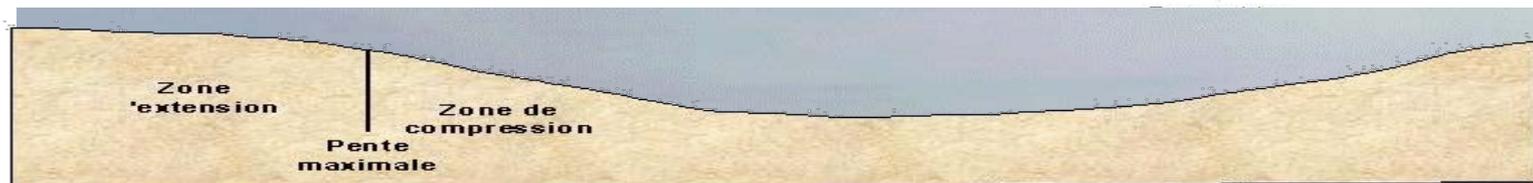
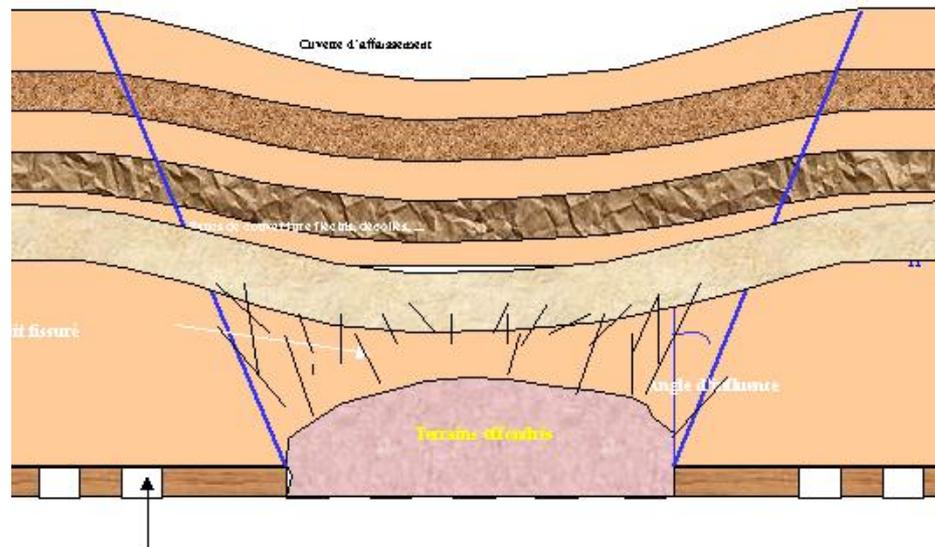
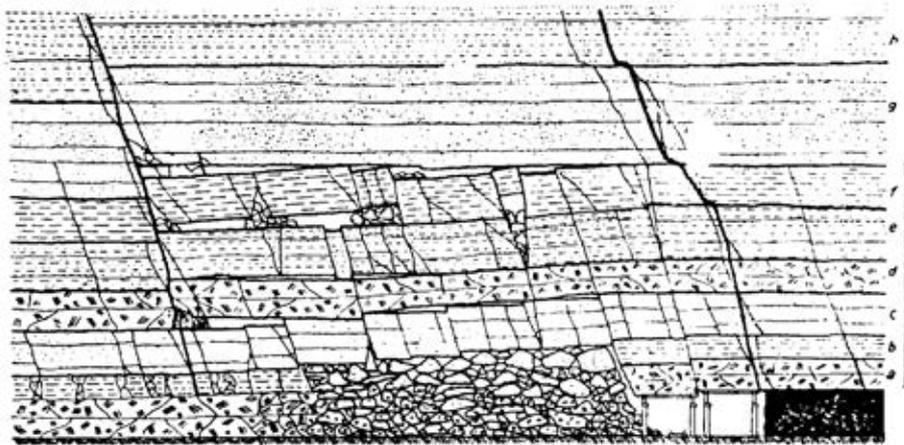
- **sources** de pollution (metaux, hydrocarbures...)
- **vecteurs** de transfert (air, eau, sol...)
- cibles **sensibles** (personnes, animaux...)

Principaux risques environnementaux

- pollution d'eaux de surface et subsurface
- pollution de sols et **sédiments**



Subsidence continue induite par les cavités minières



Impacts sur des constructions dans le bassin ferrifère lorrain

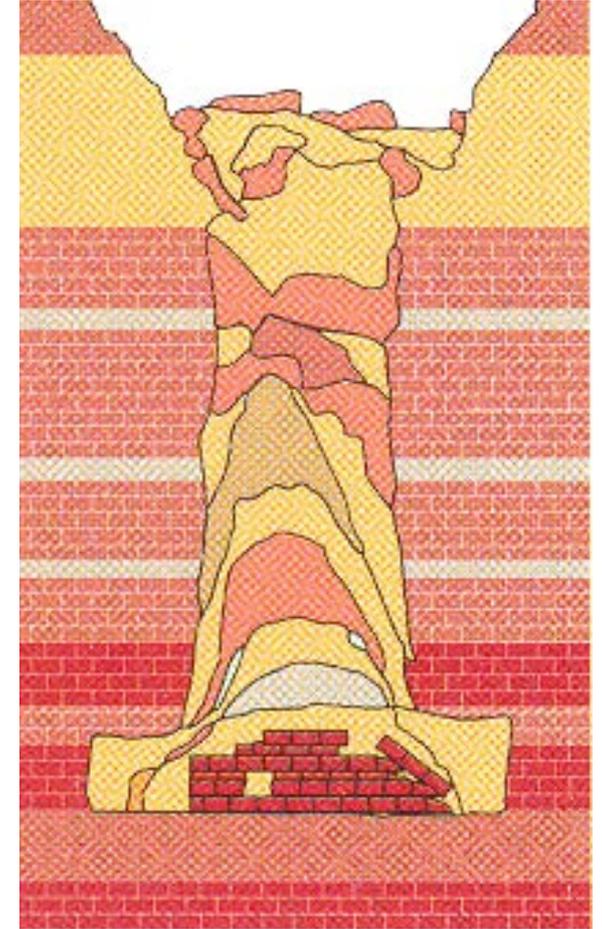




Subsidence discontinue

INERIS

mécanisme de développement de fontis



Développement de fontis en surface



(Mines de fer, France)

Effets de fontis sur des structures (1 décès)



(craie,
France)

Fontis particuliers: puits de mine

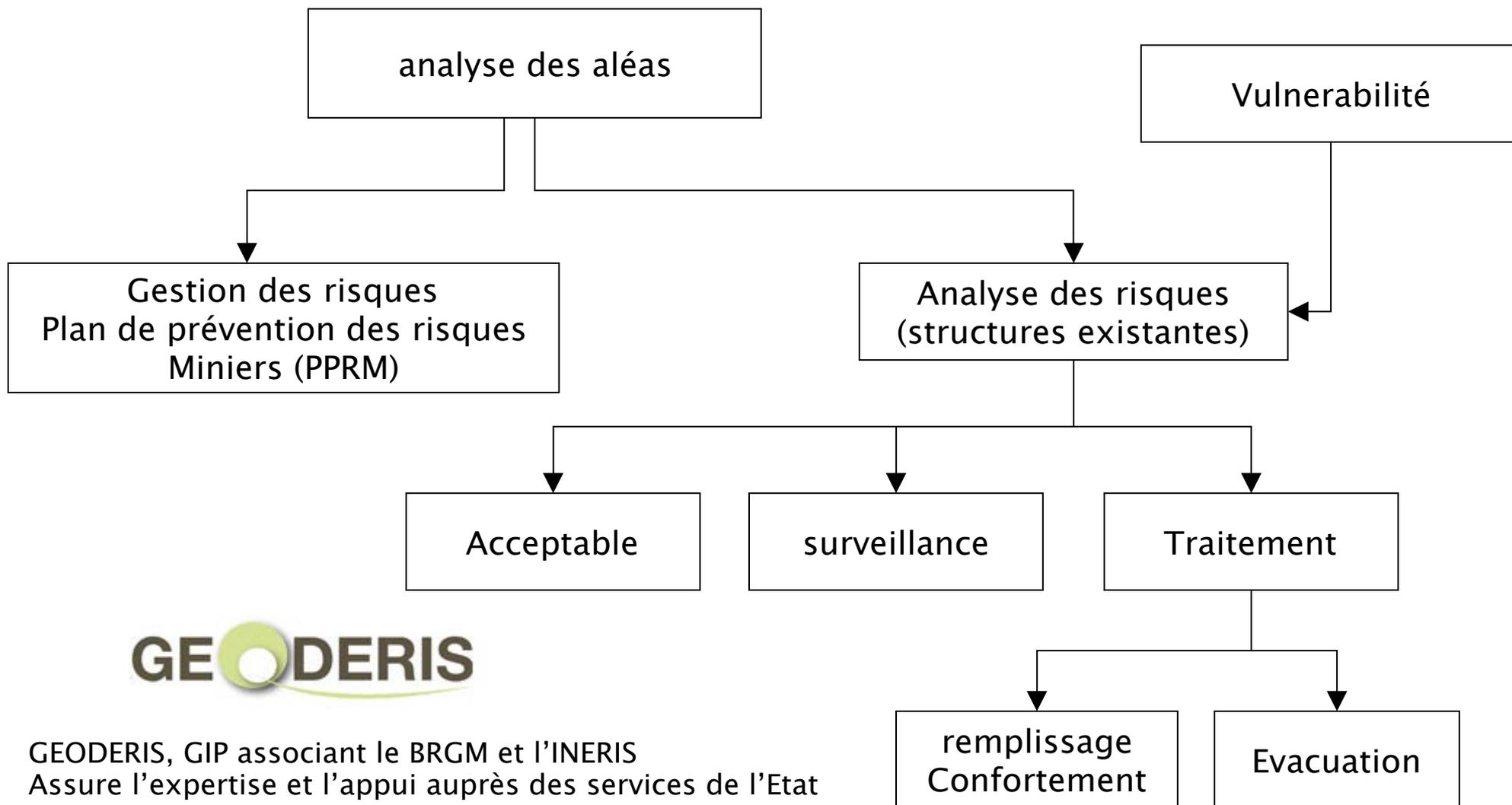




**Effondrement massif - carrières de craie
(Clamart, 21 morts, 45 blessés 1961)**

INERIS

Gestion de l'après mine: procédure générale

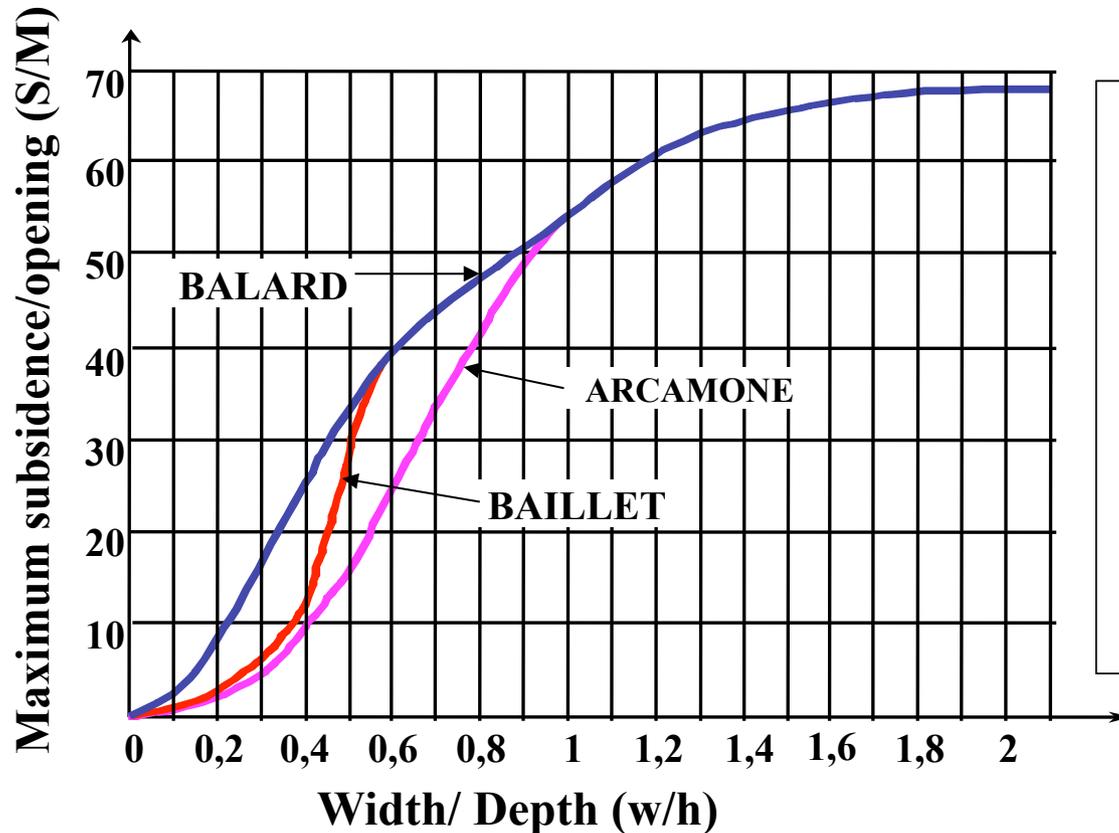


GEODERIS

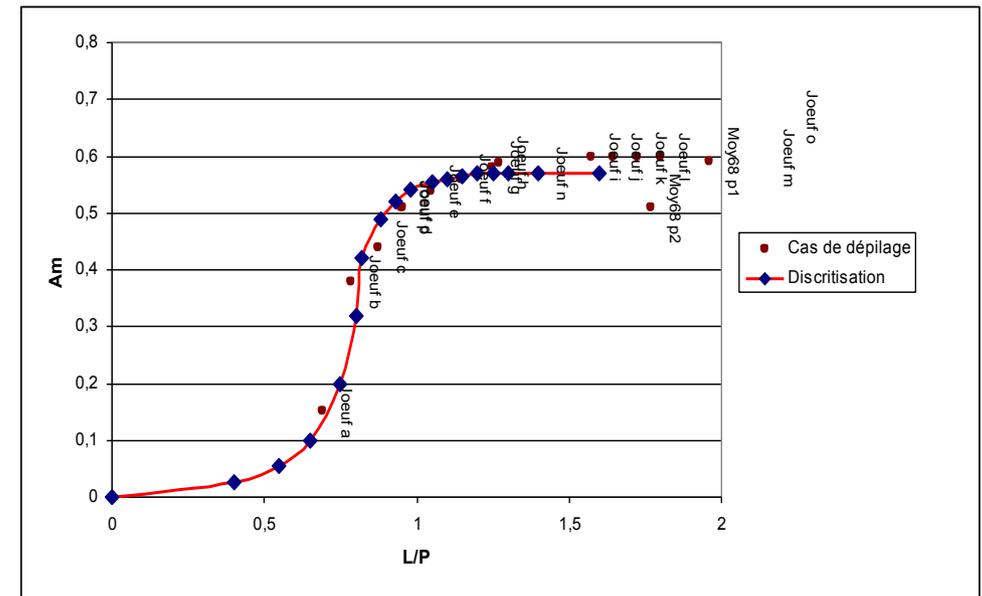
GEODERIS, GIP associant le BRGM et l'INERIS
Assure l'expertise et l'appui auprès des services de l'Etat

INERIS
maîtriser le risque |
pour un développement durable

Prévision de la subsidence, expérience de l'Ineris

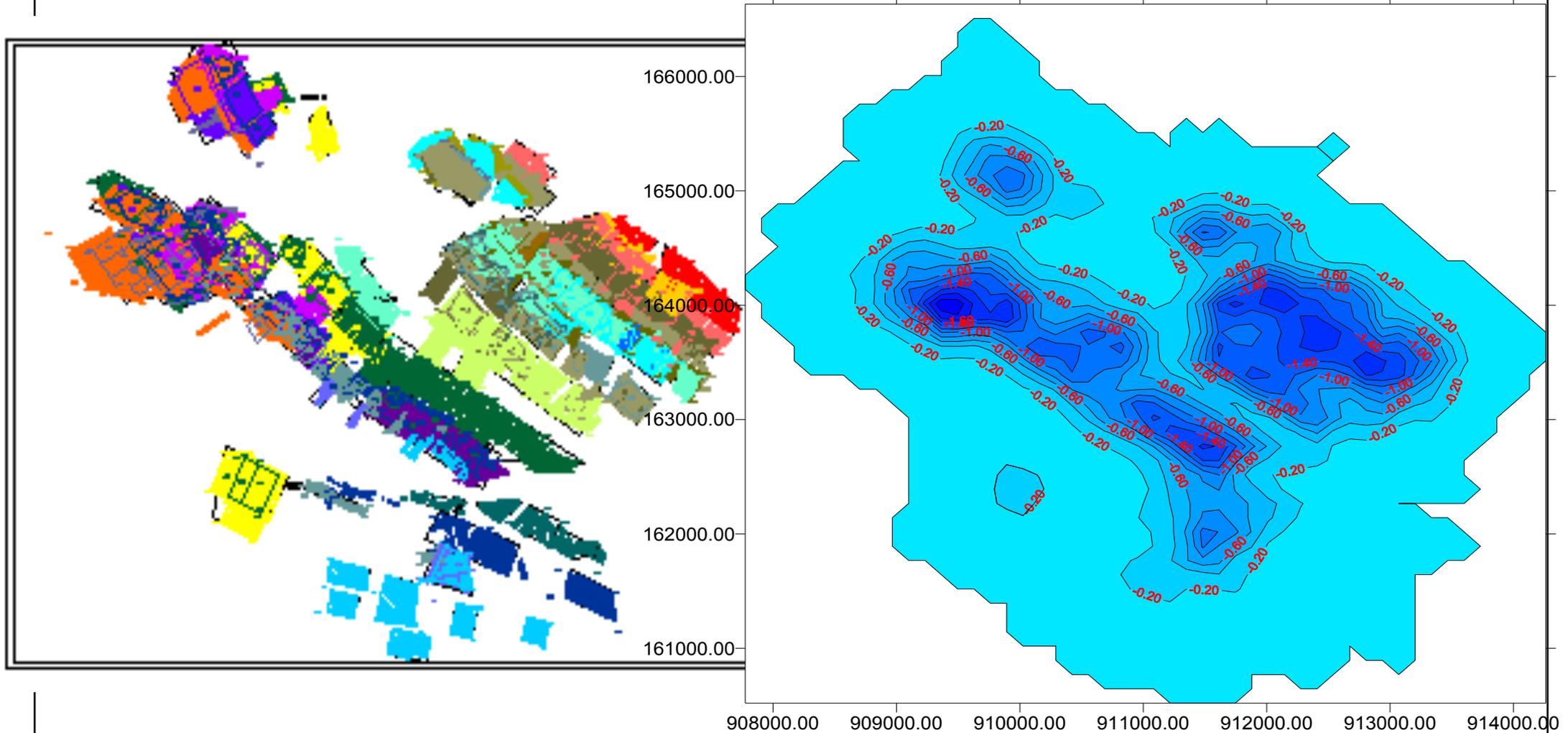


Mines de charbon : longues tailles



Mines de Fer:
Chambres et Piliers

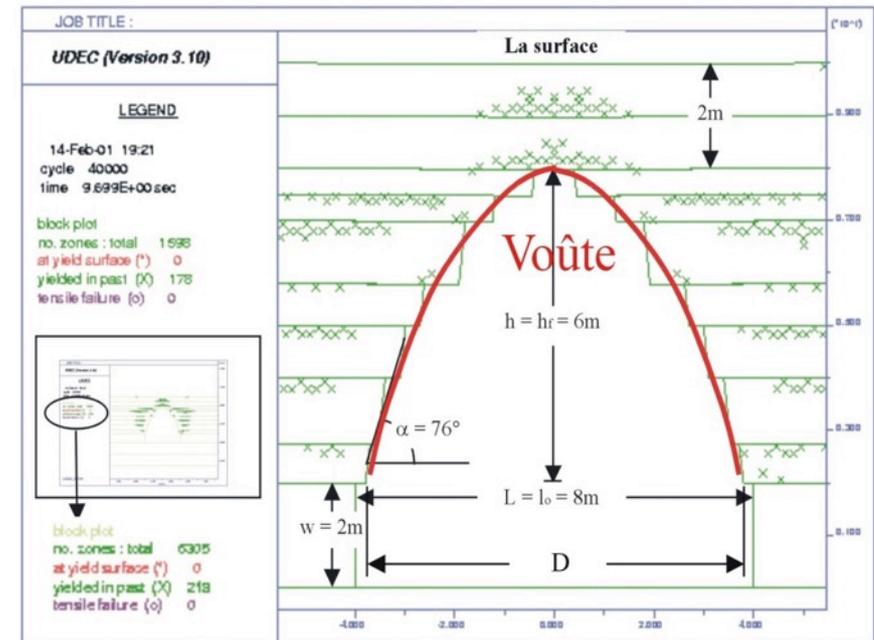
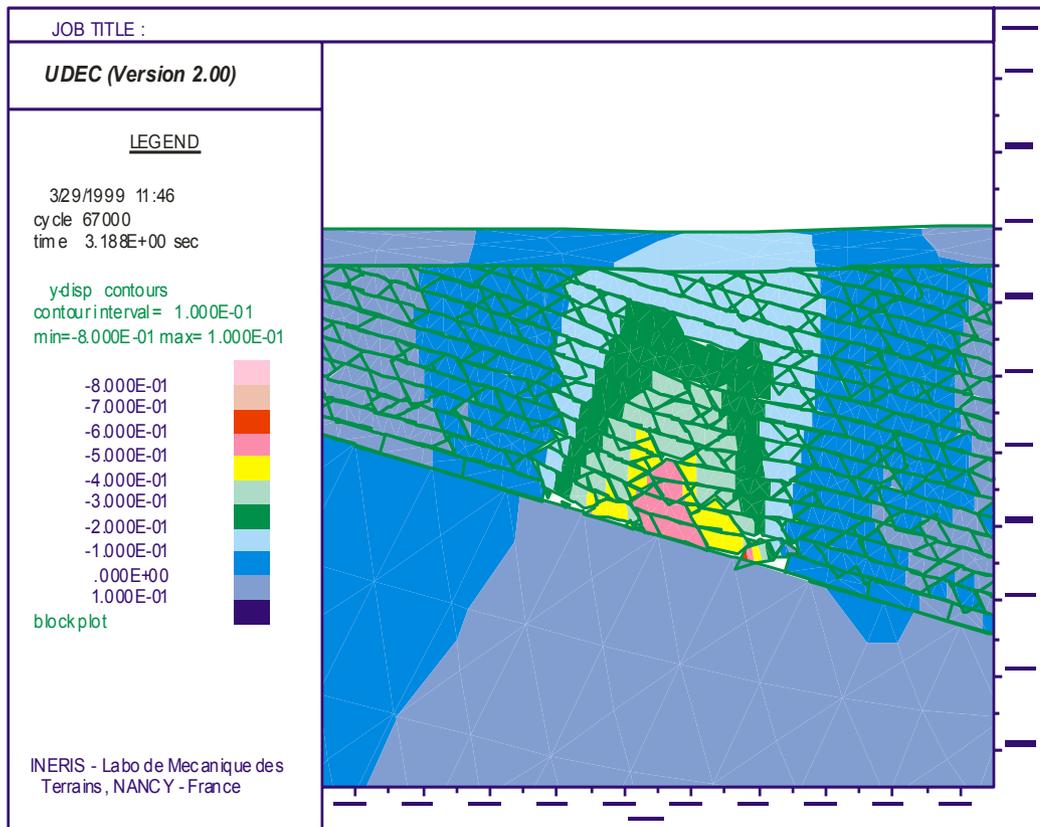
Prévision de subsidence d'une cuvette après fermeture : code SUBSID



FAULQUEMONT Coal mine (many seams) – Lorraine (1937-1974)

Modèle numérique pour la prévision de l'évolution de fontis

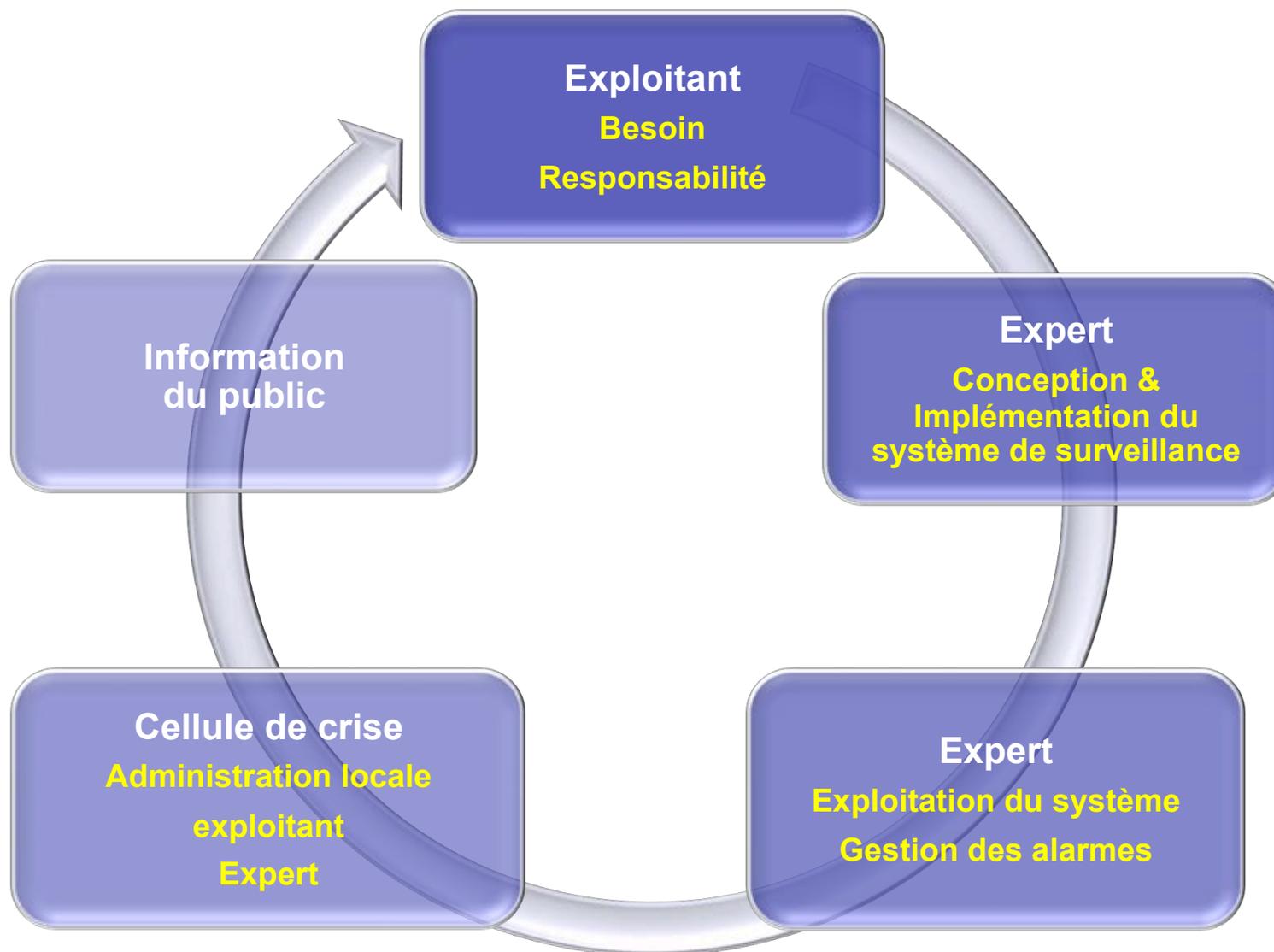
2D and 3D distinct elements method
UDEC, 3DEC, PFC2D, PFC3D.



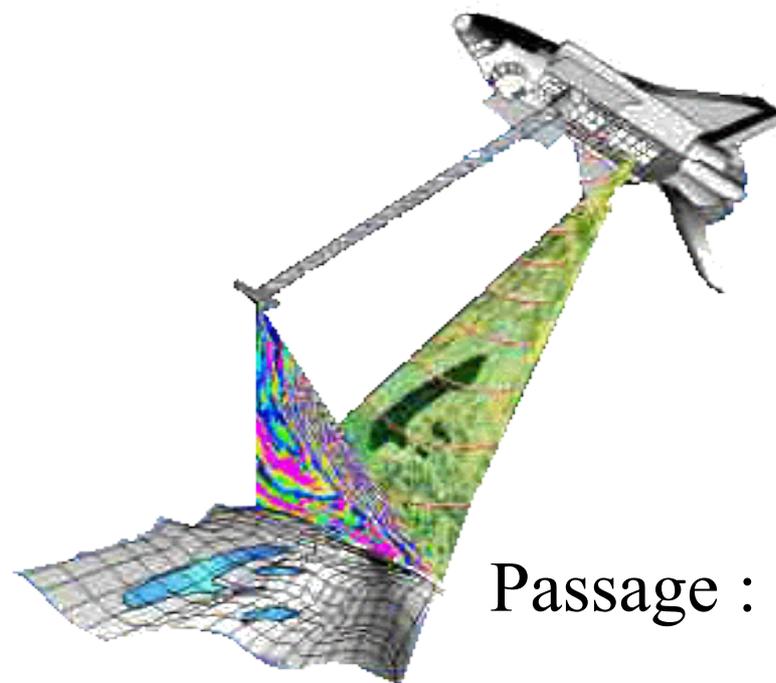
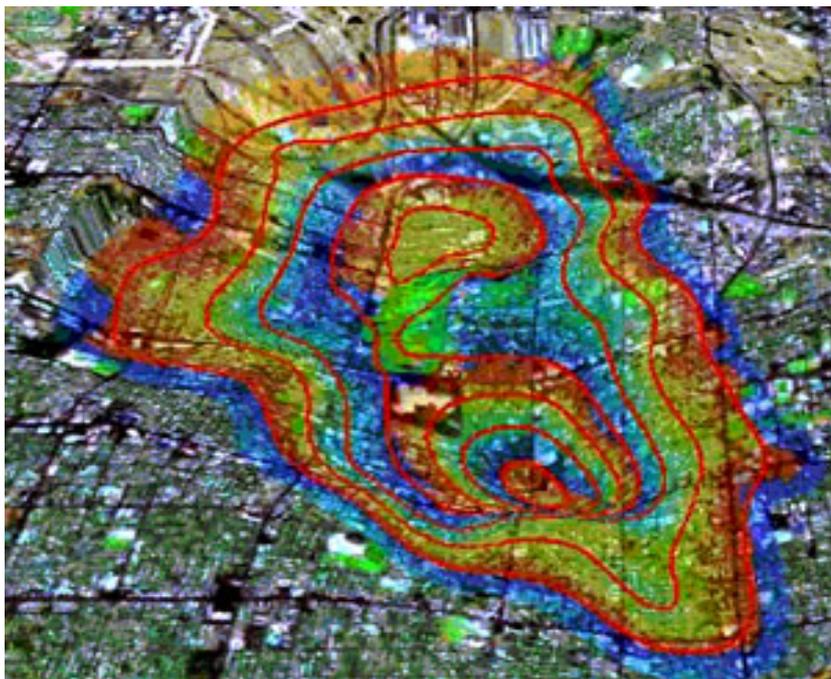
Cartographie des aléas



Principes d'un système de surveillance



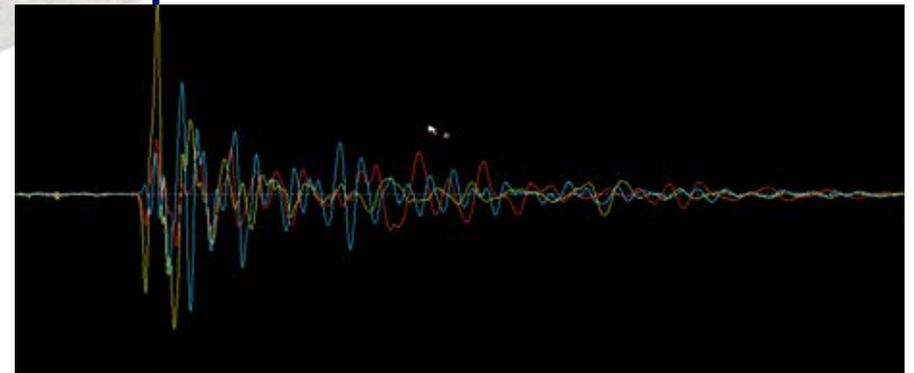
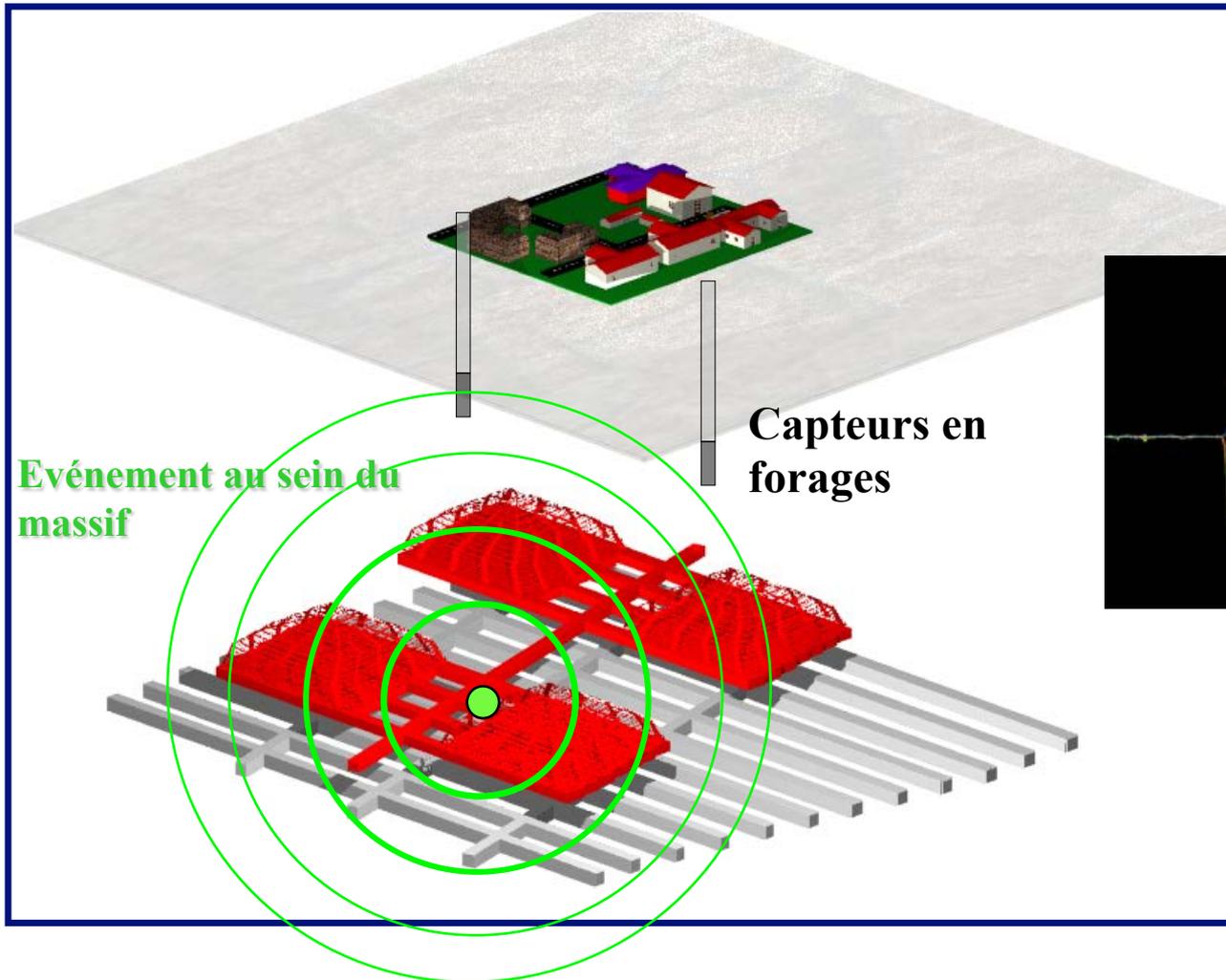
interférométrie radar satellitaire



Passage : 35 jours

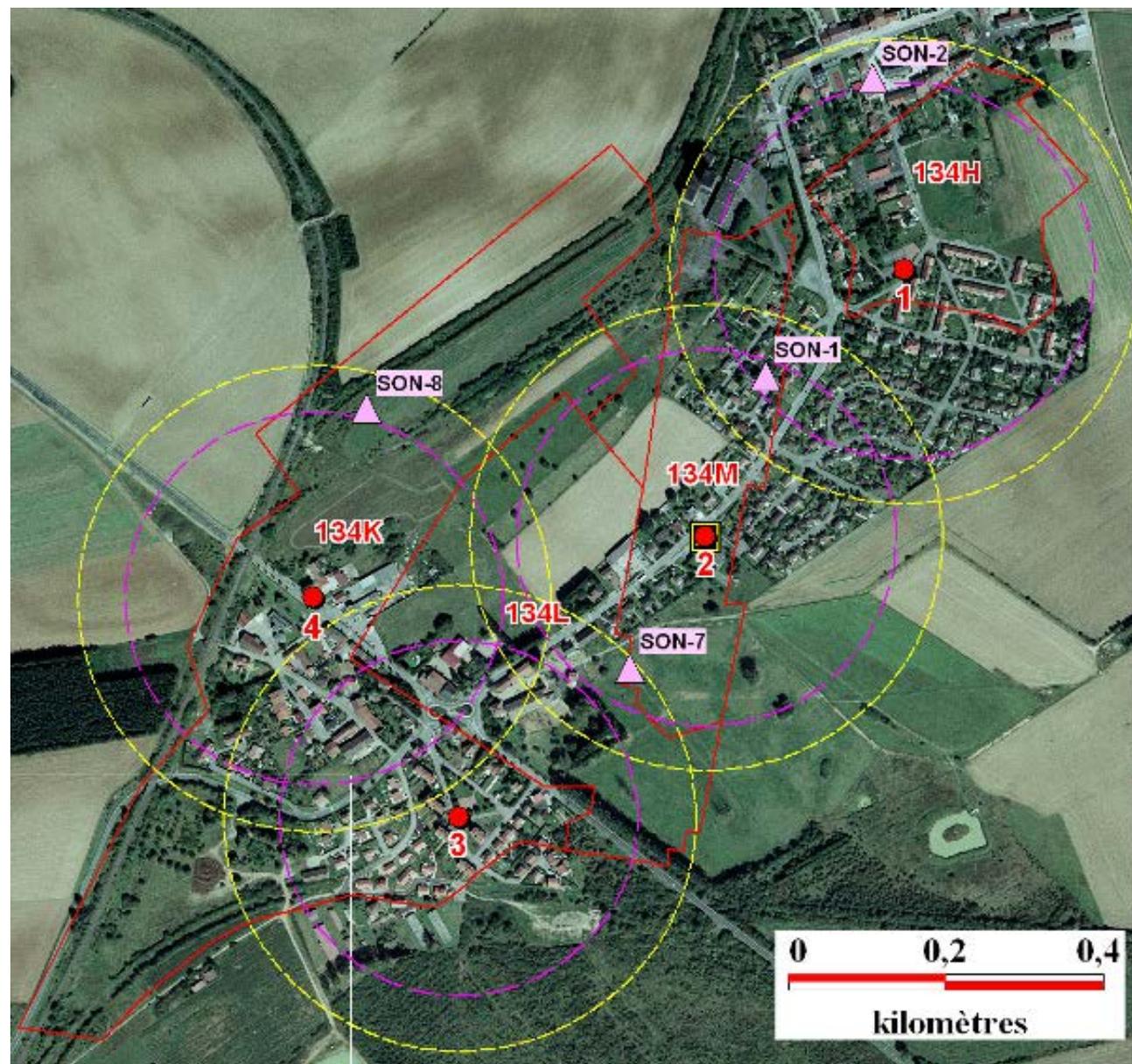
Outil très puissant pour la surveillance de la subsidence à grande échelle.

Surveillance micro-sismique



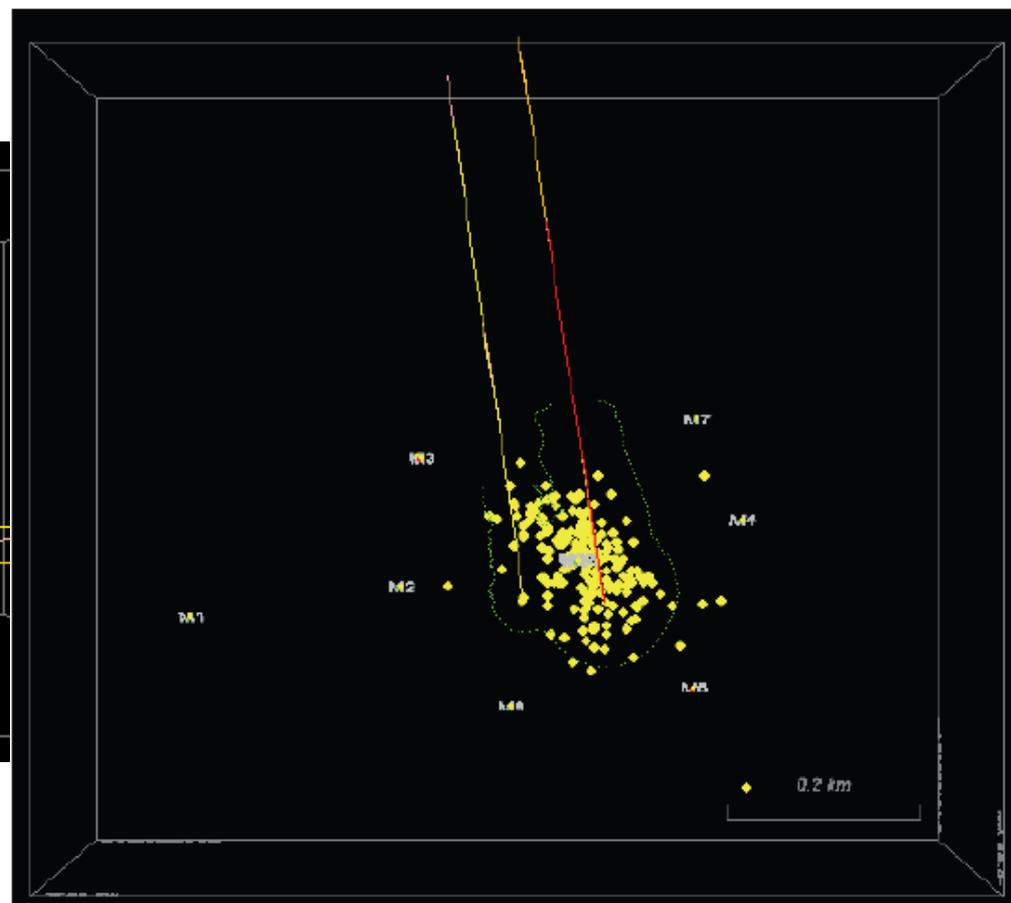
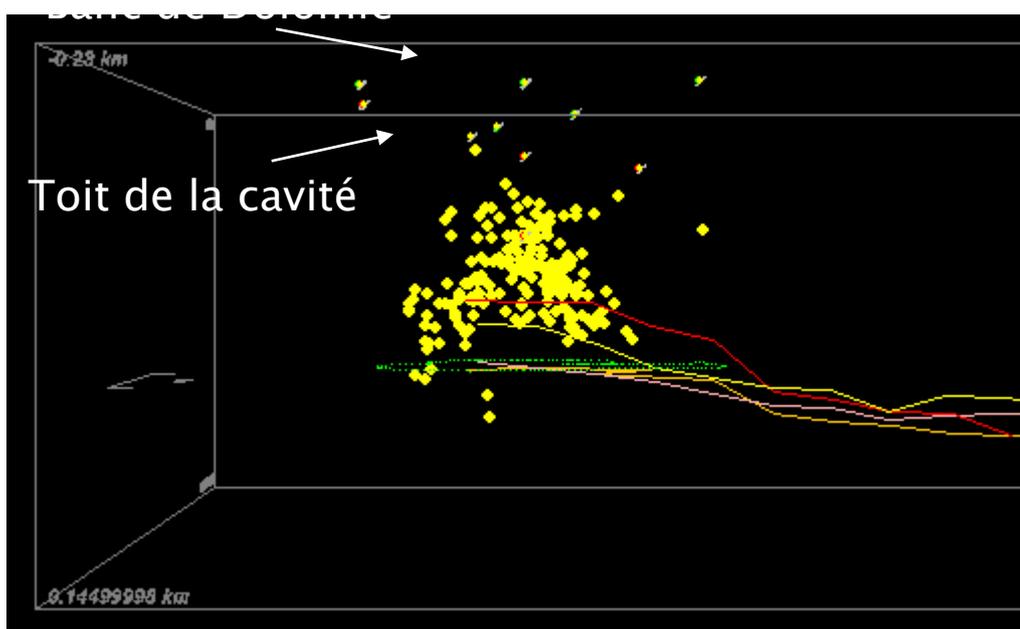
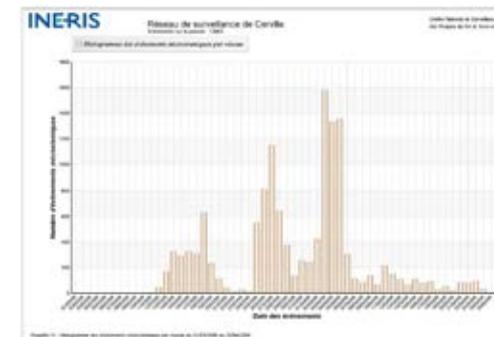
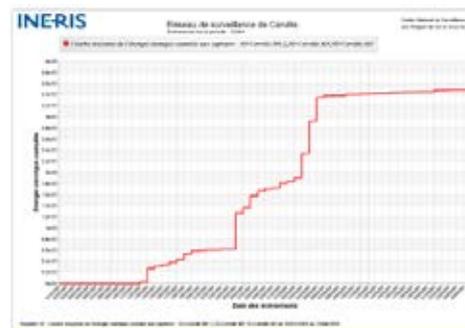
Événement sismique détecté par une sonde en forage

Principe d'un réseau de surveillance microsismique



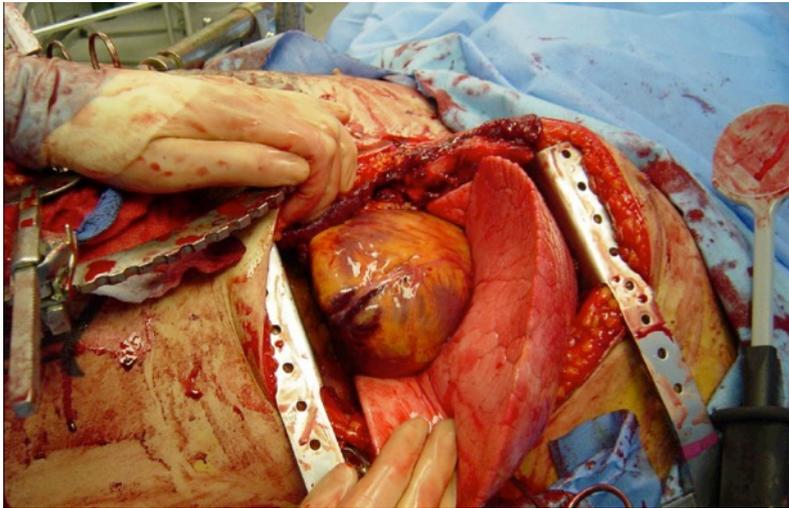
La surveillance en grand

Suveillance microsismique



La mine du futur?

- Une mine en profondeur doit être génératrice d'impacts plus faibles
- On ne doit extraire que ce qui est valorisable et laisser au fond ce qui ne l'est pas
- La stabilité à long terme des ouvrages souterrains est essentielle
- Les perturbations induites (géochimiques, mécaniques), hydrogéologiques doivent être minimales
- Certains ont parlé de « Surgical Mining » (John Kay, 1^o ministre de Nouvelle Zélande en 2010)
- Qu'en est il?
 - Quelques tendances (Borehole mining, ISR...)
 - Des projets ambitieux sur la mine profonde, et des défis scientifiques et technologiques



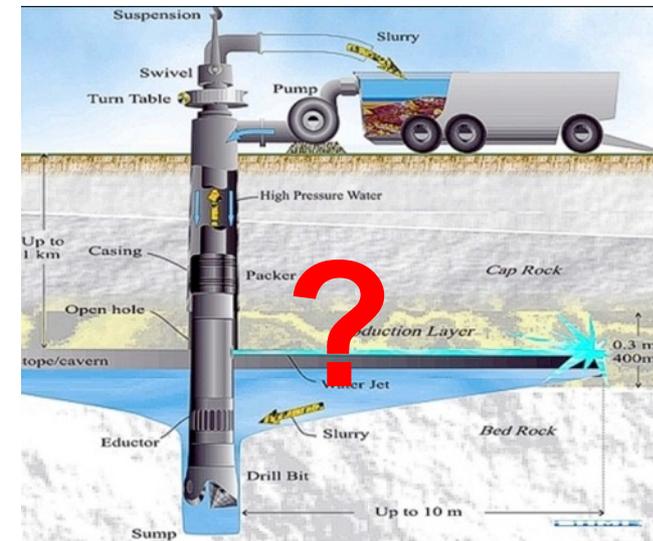
Chirurgie « classique »



Chirurgie non invasive assistée par imagerie

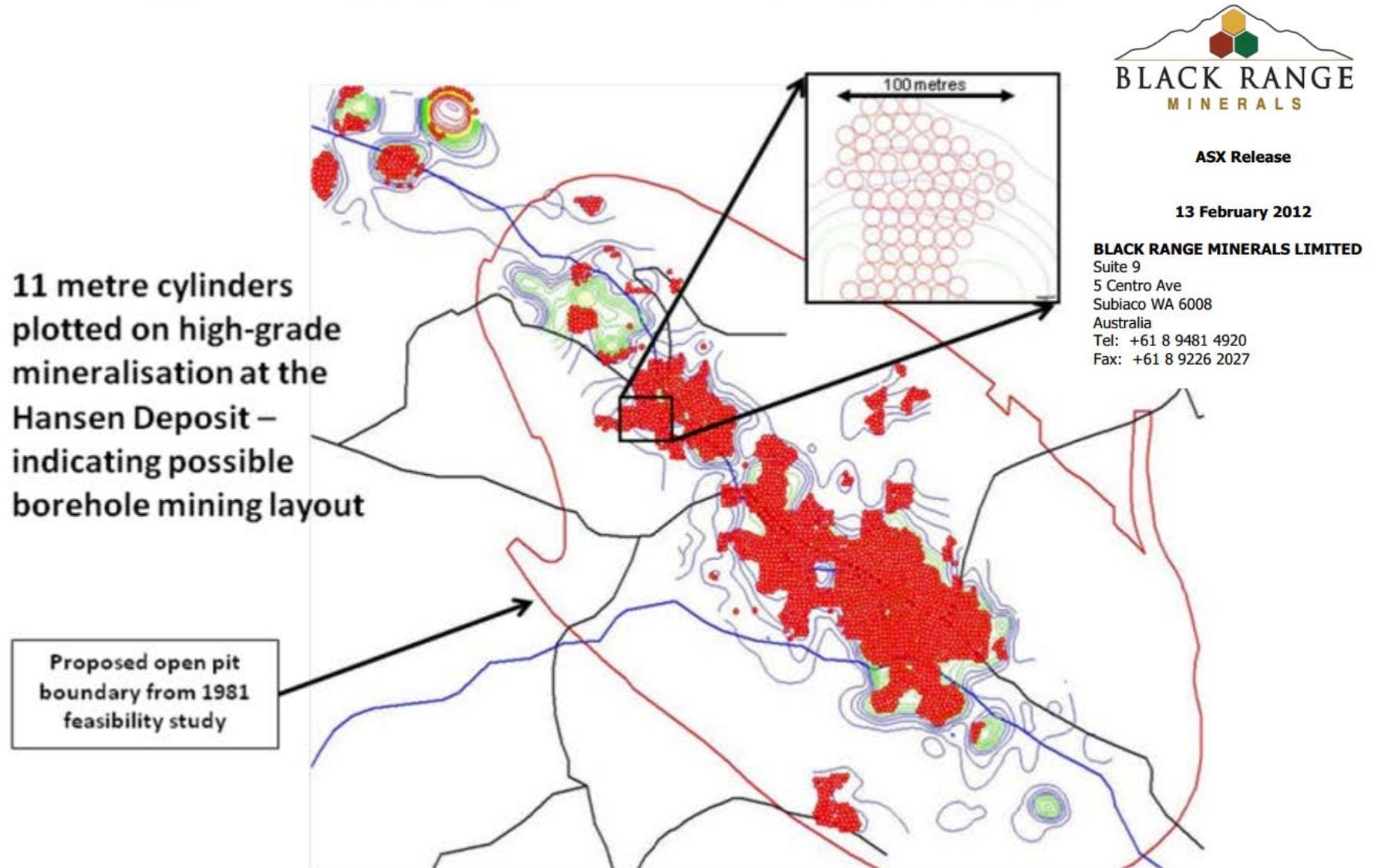


Mine à ciel ouvert



Bore-hole mining concept

Figure 1. Possible Borehole Mining Layout at the Hansen Uranium Deposit – selectively targeting thicker and higher grade portions of the Deposit.



Des techniques voisines existent...



Bulk Freezing + Jet Boring

Exploitation automatisée du gisement canadien à très haute teneur de Cigar Lake (SASK, Canada) par Cameco

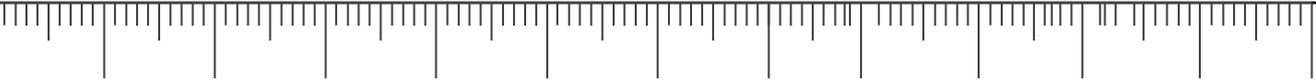
Congélation, puis fragmentation puis évacuation du minerai par jet haute pression

ISR, In situ recovery

Injection d'eau + H₂SO₄ dans un réseau de forage
Récupération du fluide enrichi, extraction de l'U puis réinjection

Opérationnel au Kazakhstan et en test en Mongolie (AREVA)





Ces méthodes utilisent l'injection de fluides aqueux,

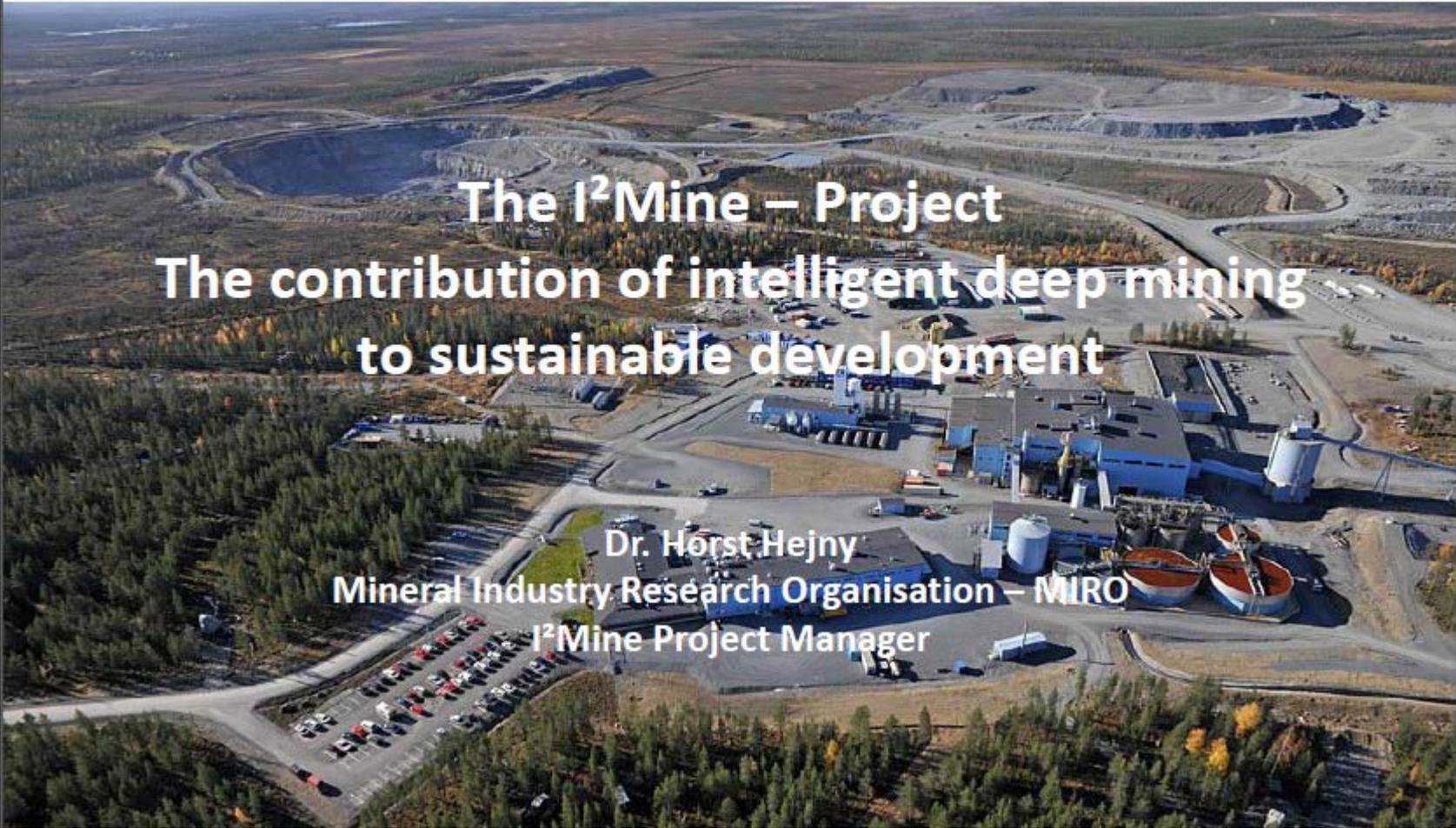
La maîtrise des risques et la protection des opérateurs sont grandement améliorées, en particulier pour les gisements d'uranium à forte teneur comme Cigar Lake

L'impact environnemental à court terme, mais aussi à long terme reste un **point sensible**, compte tenu de l'injection de fluides et des perturbations potentielles de la géochimie

Leur viabilité économique n'est assurée que pour certains types de gisements, superficiels ou à faible profondeur

Peut on envisager à terme de développer une **extraction in situ à sec???**, ou avec des procédés dont les impacts potentiels seraient encore plus faibles?

C'est un axe de développement pour la R&D....



The I²Mine – Project
The contribution of intelligent deep mining
to sustainable development

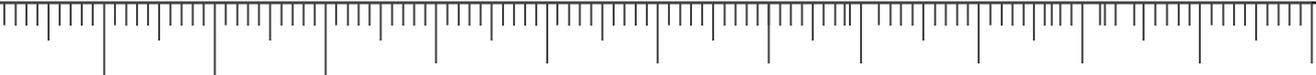
Dr. Horst Hejny
Mineral Industry Research Organisation – MIRO
I²Mine Project Manager

I²Mine

Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future

The I²Mine consortium





I²Mine

Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future

10 nationalités pour une teinture scandinave

Les forces vives de l'industrie minière européenne

- LKAB (fer), Boliden (Pb, Zn, Ag), Agnico-Eagle (or),
- KGHM (Cu), KWSA (charbon),
- K+S (potasse)...

Des partenaires scientifiques de référence

- University of Lulea, University of Aalto
- University of Aachen
- Cuprum, GIG
- DMT, Franhauser

Des équipementiers qui font autorité

- Sandvik, Commodasultrasort,
- ABB...

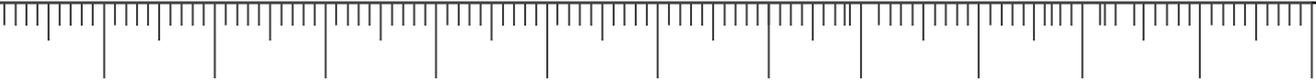
The I²Mine Vision

Low/Zero Impact
Mine



Invisible Mine

Future Intelligent
Deep Mine



Objectives

Development of innovative methods, technologies, machines and equipment for mining in greater depths

Autonomous, highly selective mineral extraction processes and machinery

New sensor technologies

Needs for a completely different mine layout

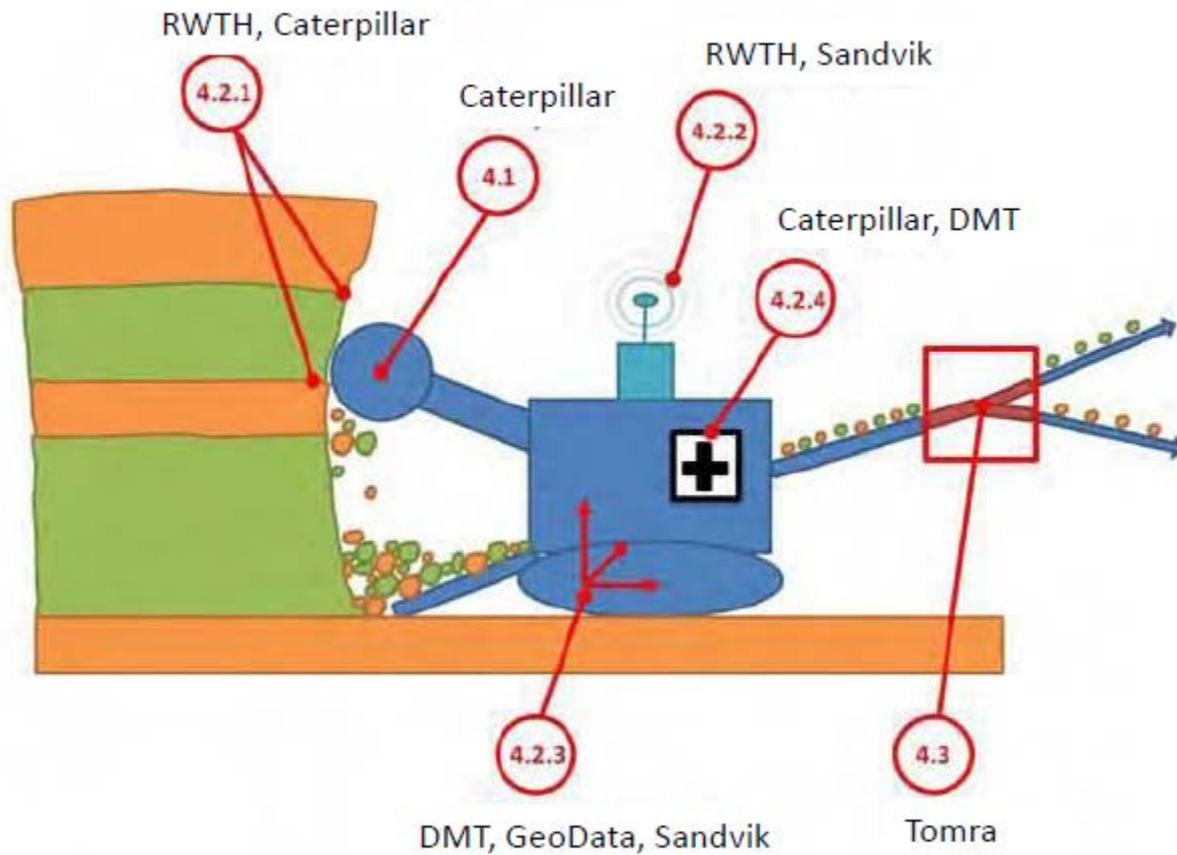
Innovative concepts for mass flow management and transportation

Improved rock mechanics and ground control

New near-to-face processing methods including backfill

Health and safety issues and work environment

Innovative machinery for deep underground mine



Un enjeu important : la surveillance et la prévention des
« coups de terrain »

A grand profondeur, en roche dure, la relaxation soudaine
des contraintes peut provoquer des événements très
violents : « Rockburst »

Événements sismiques, de magnitude 4 à 5...



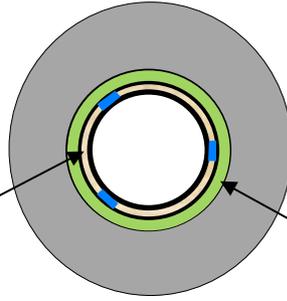
Aftermath of a rockburst in a deep-level tunnel showing complete tunnel closure. The energy released by this event is **equivalent to magnitude $M = 3.4$ earthquake**.

London Mining Network
Mark Muller, 2009

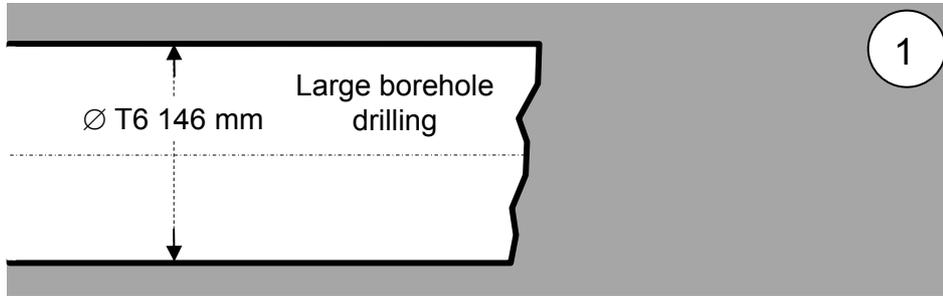
Mesures de contraintes et déformation in situ (surcarottage)



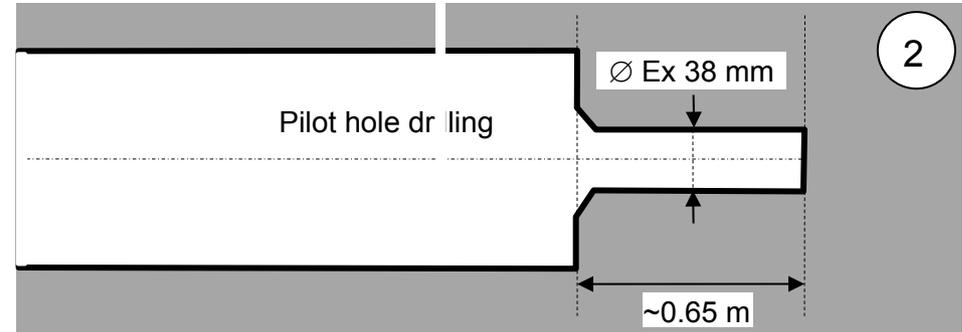
12 strain gauges



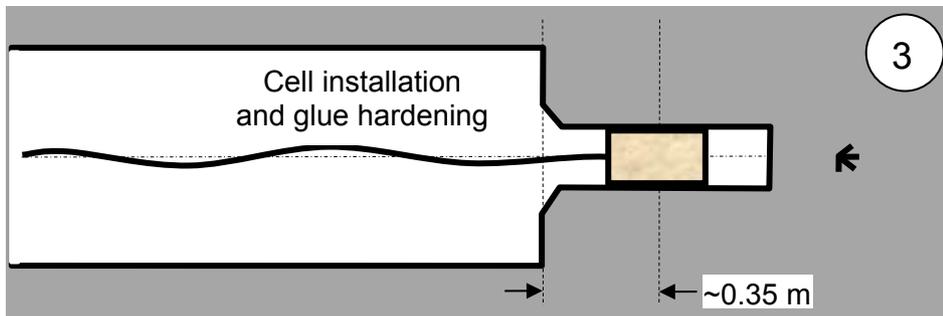
Epoxy glue



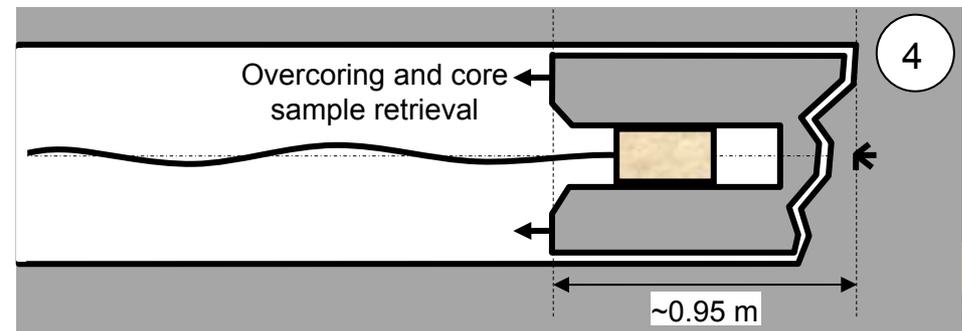
1



2

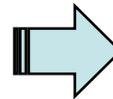
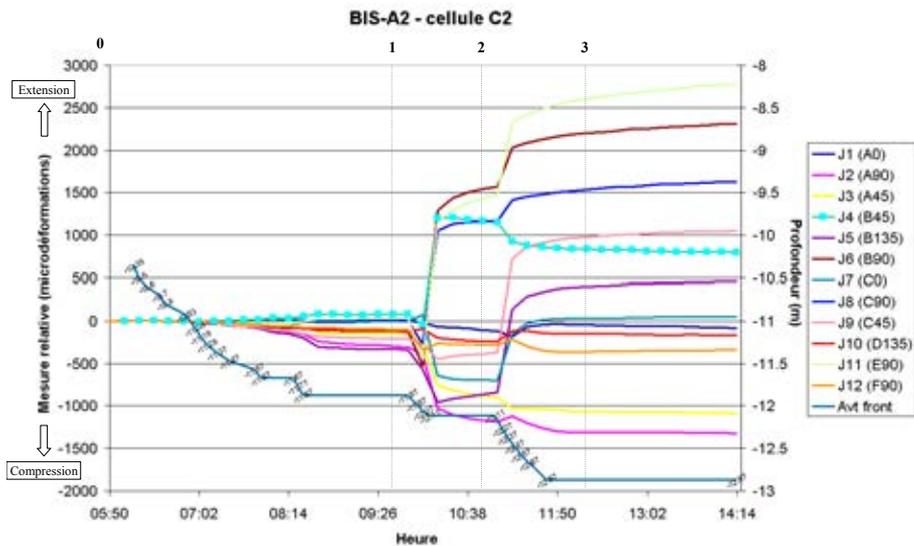
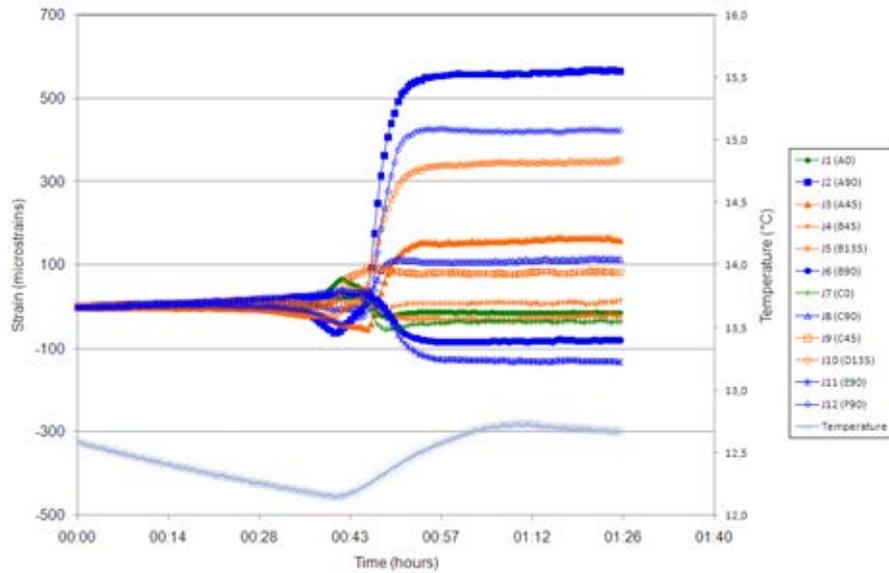


3

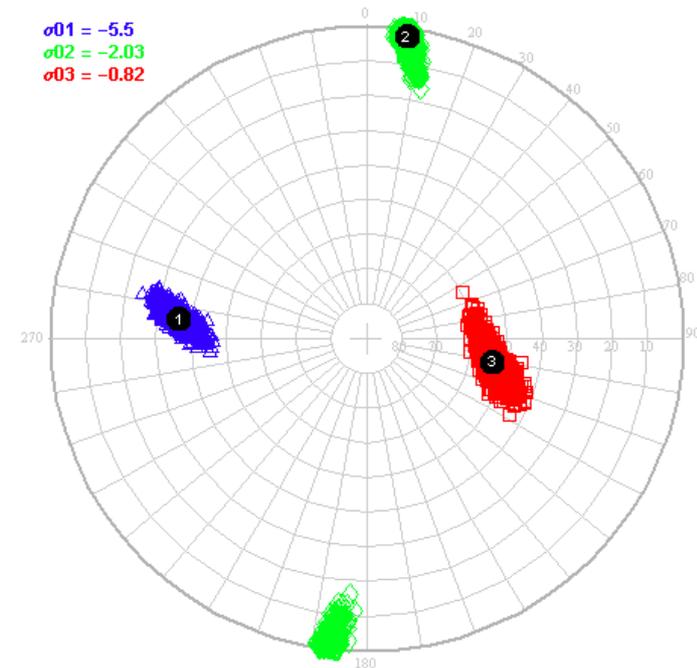


4

Résultats : évolution des contraintes et de la déformation en temps quasi réel.



$\sigma_1 = -5.5$
 $\sigma_2 = -2.03$
 $\sigma_3 = -0.82$



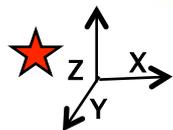
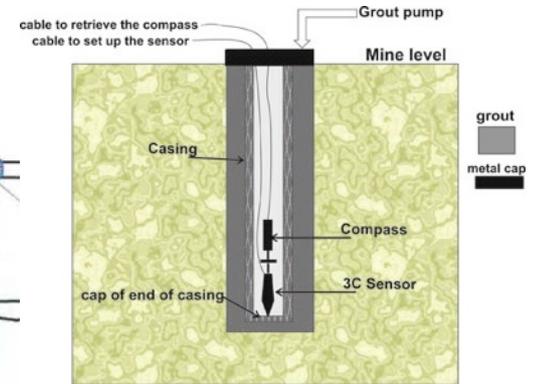
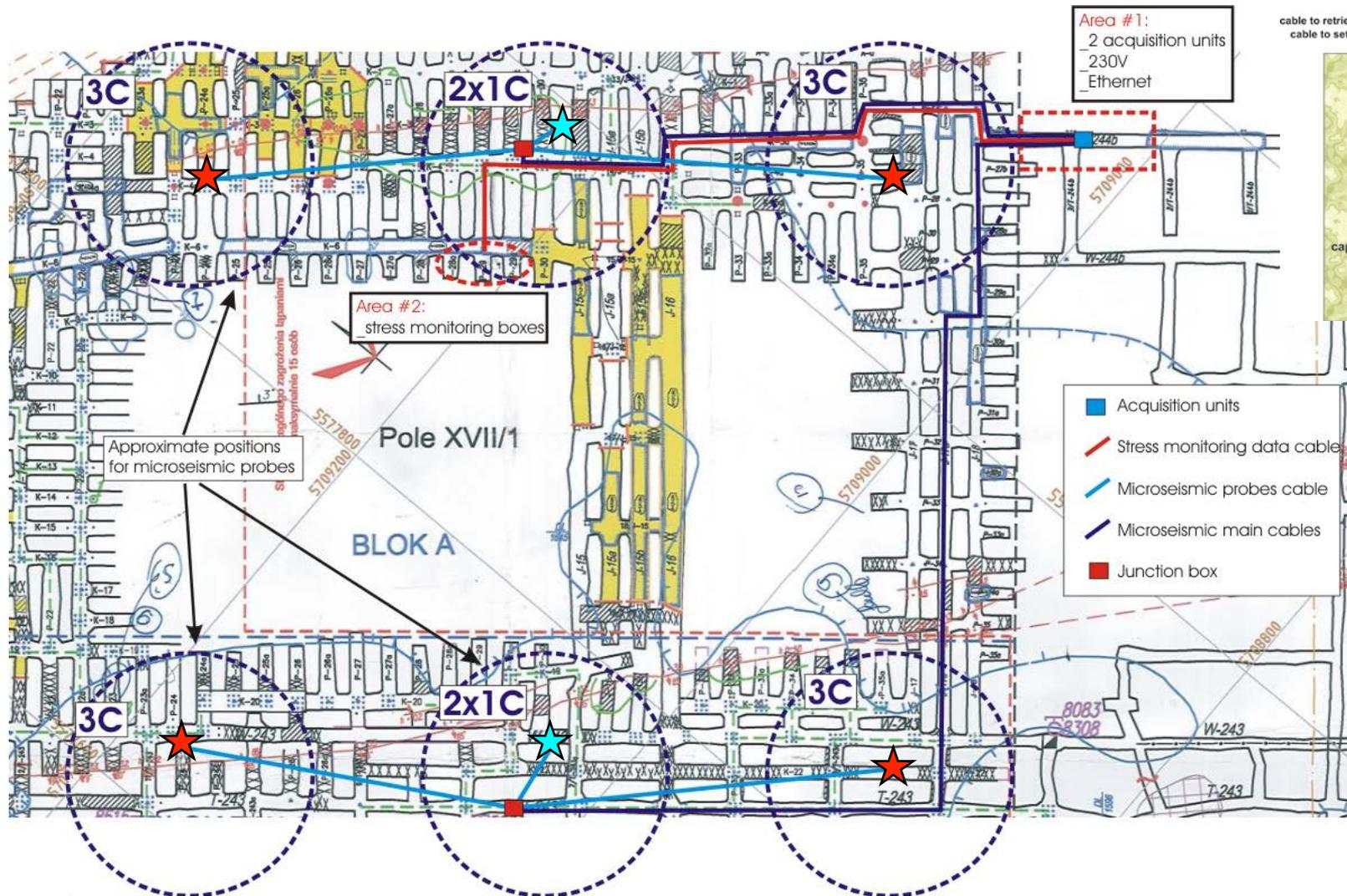
Values and orientations of main stresses.

	σ_1	σ_2	σ_3
Value (MPa)	-5,50	-2,03	-0,82
Azimut (°)	276	8	100
Dip (°)	37	2	53

Stress tensor in the geographical referential.

	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{yz}	τ_{xz}	τ_{xy}
Value (MPa)	-2,04	-2,48	-3,81	2,22	0,15	-0,28

Implantation d'un réseau de surveillance microsismique en mine

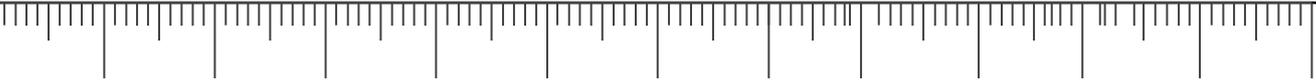


3C Tri-axis Orthogonal Geophone Sensors



1C single-axis Geophone Sensors





Merci pour votre attention!

Cet exposé a été préparé avec de nombreuses contributions de mes collègues de la Direction des Risques Sols et Sous Sol de l'INERIS

Christophe DIDIER

Mehdi GHOREYCHI

Pascal BIGARRE

& al...