



L'exploration minérale au XXI^e siècle

Georges Beaudoin

Chaire de Recherche Industrielle CRSNG-Agnico Eagle en Exploration Minérale
Département de géologie et de génie géologique



UNIVERSITÉ
LAVAL

Collège de France
Paris, 24 février 2015



UNIVERSITÉ LAVAL

Première université francophone en Amérique

Séminaire de Québec: 1663 (Mgr Montmorency-Laval)

Charte universitaire: 1852 (R. Victoria)

- +48 000 étudiants
- 1 500 professeurs
- tous les domaines du savoir
- vision de développement durable



Chaire de recherche industrielle CRSNG-Agnico Eagle en exploration minérale

Programme de partenariat industrie-université
Financement 50:50 avec contributions
Programme de recherche évalué par le CRSNG



AGNICO EAGLE



CRSNG
NSERC



UNIVERSITÉ
LAVAL

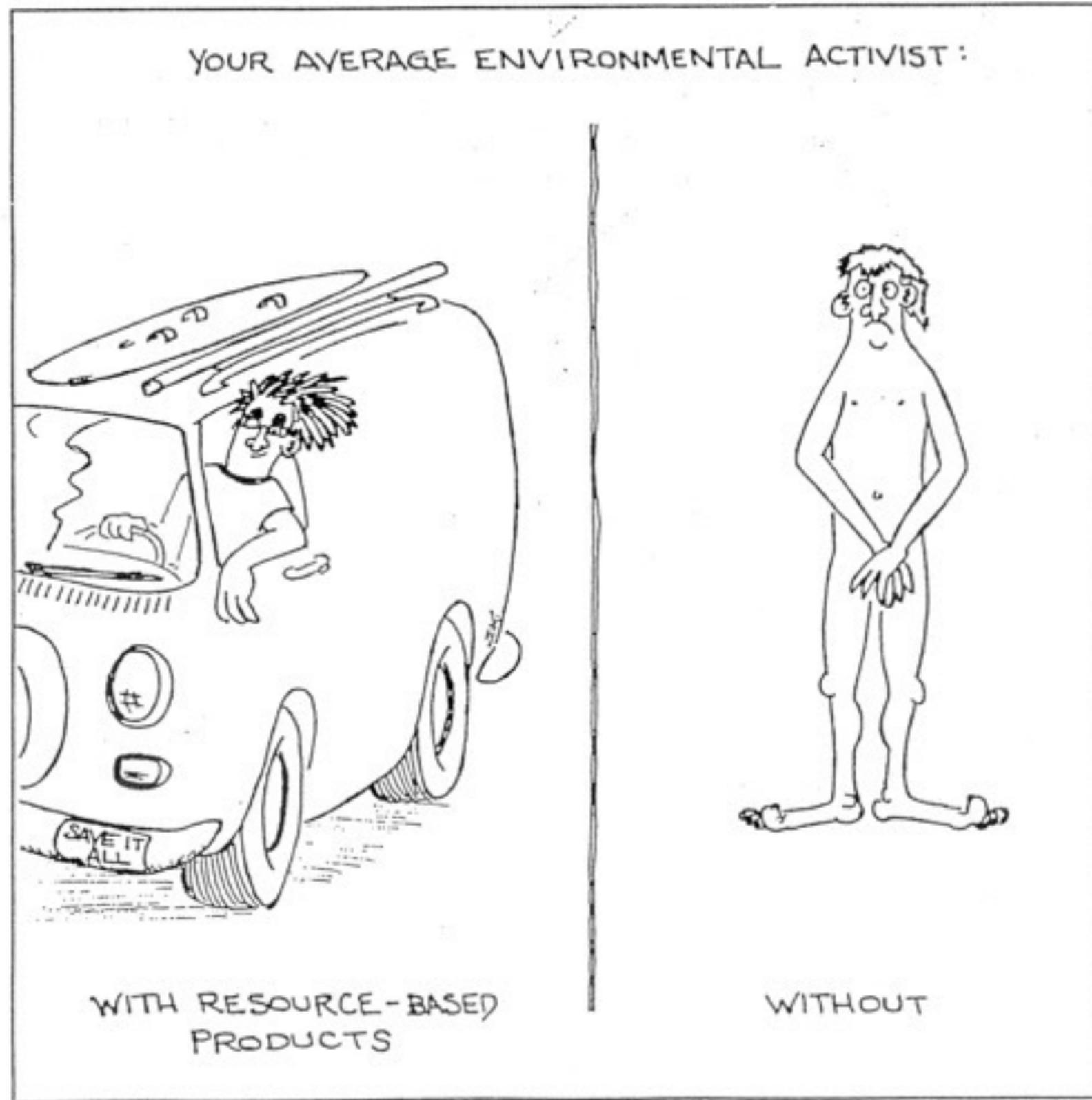
Énergie et Ressources
naturelles

Québec 

Quelle image de l'exploration minérale?



Ceci est une caricature...



Ressources minérales: substances ou minéraux industriels

																		1 (1c)											18																																	
																		IA											VIII A																																	
1	1												2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																	
	+1												+2		+3		+4		+5		+6		+7		+8		+9		+10		+11		+12		+13		+14		+15		+16		+17		+18																	
	1,008												9,01		22,99		24,31		44,96		47,87		50,94		54,94		55,85		58,93		58,69		63,55		65,41		69,72		72,64		74,92		78,96		79,90		83,80															
	Hydrogène												Lithium		Béryllium		Scandium		Titane		Vanadium		Chrome		Manganèse		Fer		Cobalt		Nickel		Cuivre		Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Sélénium		Brome		Krypton															
	2												3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18																			
	+1												+2		+3		+4		+5		+6		+7		+8		+9		+10		+11		+12		+13		+14		+15		+16		+17		+18																	
	6,94												24,31		44,96		47,87		50,94		54,94		55,85		58,93		58,69		63,55		65,41		69,72		72,64		74,92		78,96		79,90		83,80																			
	Lithium												Béryllium		Scandium		Titane		Vanadium		Chrome		Manganèse		Fer		Cobalt		Nickel		Cuivre		Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Sélénium		Brome		Krypton																	
	11												12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36	
	+1												+2		+3		+4		+5		+6		+7		+8		+9		+10		+11		+12		+13		+14		+15		+16		+17		+18																	
	22,99												24,31		44,96		47,87		50,94		54,94		55,85		58,93		58,69		63,55		65,41		69,72		72,64		74,92		78,96		79,90		83,80																			
	Sodium												Magnésium		Aluminium		Silicium		Phosphore		Soufre		Chlore		Argon		Potassium		Calcium		Scandium		Titane		Vanadium		Chrome		Manganèse		Fer		Cobalt		Nickel		Cuivre		Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Sélénium		Brome		Krypton	
	37												38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54																	
	+1												+2		+3		+4		+5		+6		+7		+8		+9		+10		+11		+12		+13		+14		+15		+16		+17		+18																	
	85,47												87,62		88,91		91,22		92,91		95,94		[98]		101,07		102,91		106,42		107,87		112,41		114,82		118,71		121,76		126,96		126,96		131,29																	
	Rubidium												Strontium		Yttrium		Zirconium		Niobium		Molybdène		Technétium		Ruthénium		Rhodium		Palladium		Argent		Cadmium		Indium		Etain		Antimoine		Tellure		Iode		Xénon																	
	55												56		57		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86																	
	+1												+2		+3		+4		+5		+6		+7		+8		+9		+10		+11		+12		+13		+14		+15		+16		+17		+18																	
	132,91												137,33		138,91		178,49		180,95		183,84		186,21		190,23		192,22		195,08		196,97		200,59		204,38		207,2		208,98		[209]		[210]		[222]																	
	Césium												Baryum		Lanthane		Hafnium		Tantale		Tungstène		Rhénium		Osmium		Iridium		Platine		Or		Mercure		Thallium		Plomb		Bismuth		Polonium		Astate		Radon																	
	87												88		89		104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114		115		116		117		118																	
	+1												+2		+3		+4		+5		+6		+7		+8		+9		+10		+11		+12		+13		+14		+15		+16		+17		+18																	
	[223]												[226]		[227]		[261]		[262]		[266]		[264]		[277]		[268]		[281]		[...]		[...]		[...]		[...]		[...]		[...]																					
	Francium												Radium		Actinium		Rutherfordium		Dubnium		Seaborgium		Bohrium		Hassium		Meitnerium		Darmstadtium		Roentgenium		[...]		[...]		[...]		[...]		[...]																					
	58												59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71		72		73		74		75																	
	+3												+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3		+3																			
	140,12												140,91		144,24		[145]		150,36		151,96		157,25		158,93		162,50		164,93		167,26		168,93		173,04		174,97		174,97		174,97		174,97																			
	Cérium												Praséodyme		Néodyme		Prométhium		Samarium		Europium		Gadolinium		Terbium		Dysprosium		Holmium		Erbium		Thulium		Ytterbium		Lutétium		Lutétium		Lutétium																					
	90												91		92		93		94		95		96		97		98		99		100		101		102		103		104		105		106																			
	+4												+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4		+4																			
	232,04												231,04		238,03		[237]		[244]		[243]		[247]		[247]		[251]		[252]		[257]		[258]		[259]		[262]		[262]		[262]																					
	Thorium												Protactinium		Uranium		Neptunium		Plutonium		Américium		Curium		Berkélium		Californium		Einsteinium		Fermium		Mendélévium		Nobélium		Lawrencium		Lawrencium																							

Métaux	Métaux de transition	Non métaux	Gaz rares et inertes
--------	----------------------	------------	----------------------

Éléments artificiels

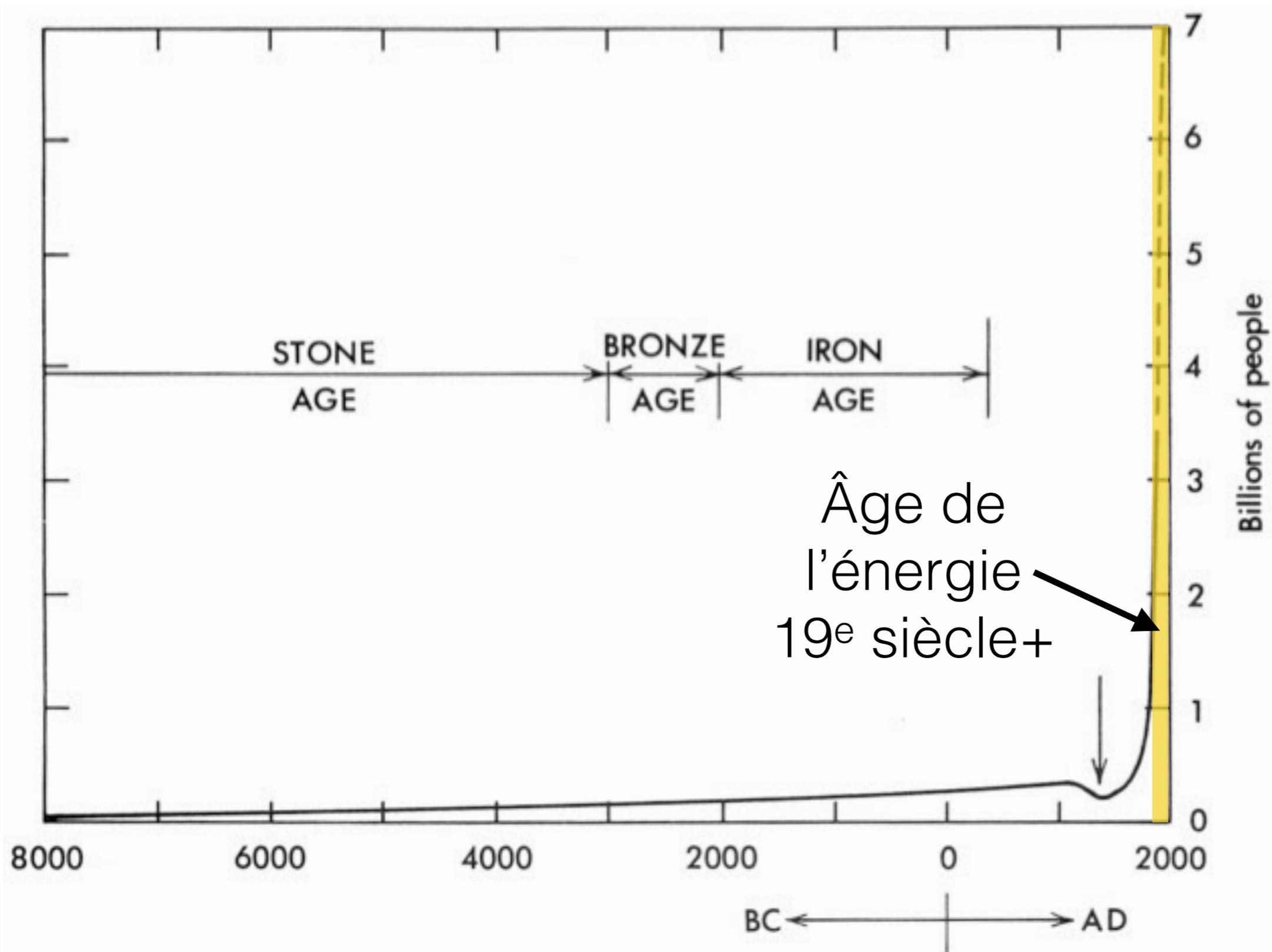
* Signifie élément radioactif (instable)

Une des plus vieilles activités

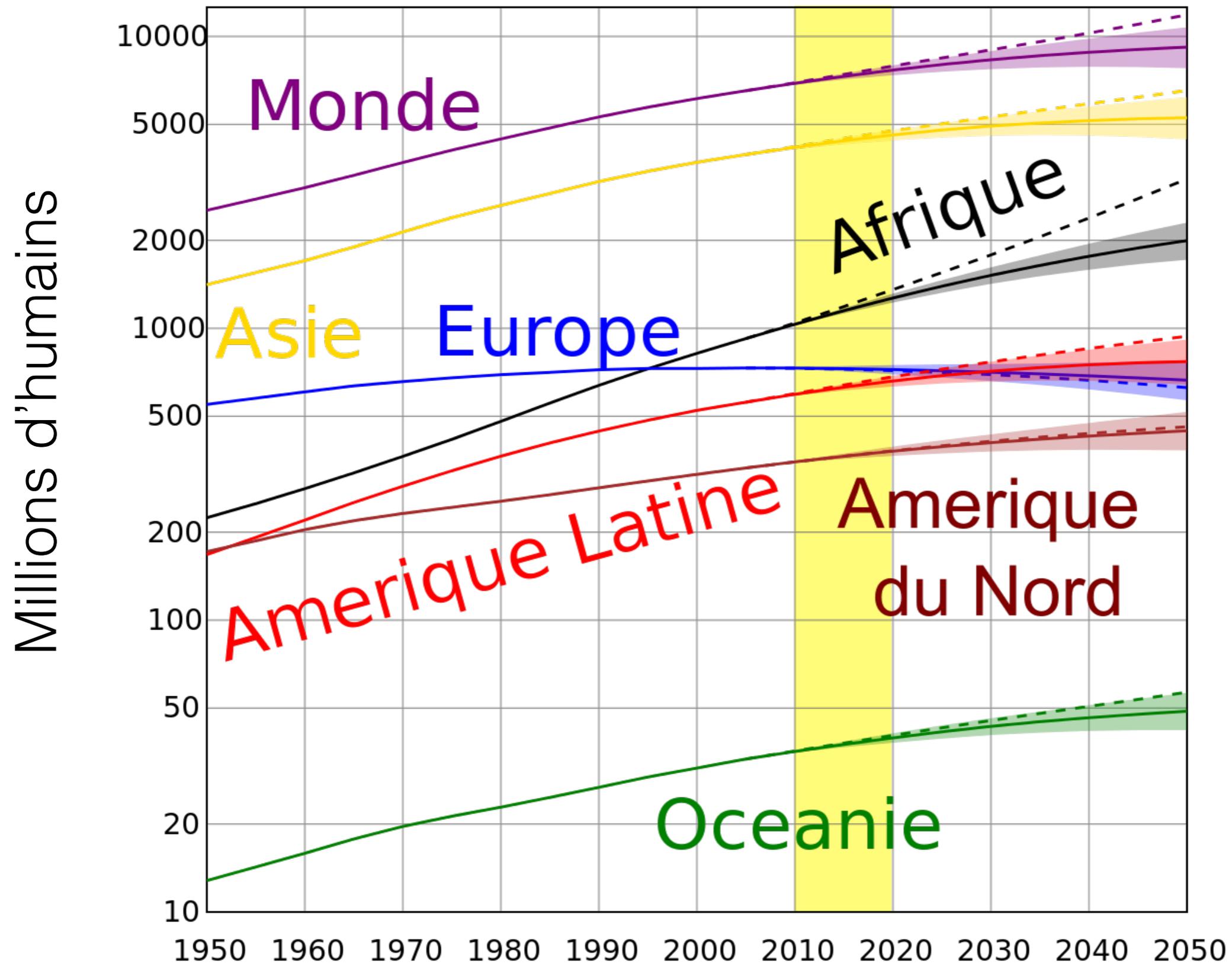
Âges préhistoriques		
Holocène	La Tène	Protohistoire
	Hallstatt	
	Âge du fer	
	Bronze final	
	Bronze moyen	
	Bronze ancien	
	Âge du bronze	
	Chalcolithique	
Pléistocène	Néolithique	Préhistoire
	Mésolithique / Épipaléolithique	
	Paléolithique supérieur	
	Paléolithique moyen	
	Paléolithique inférieur	
Paléolithique		
Âge de la pierre		



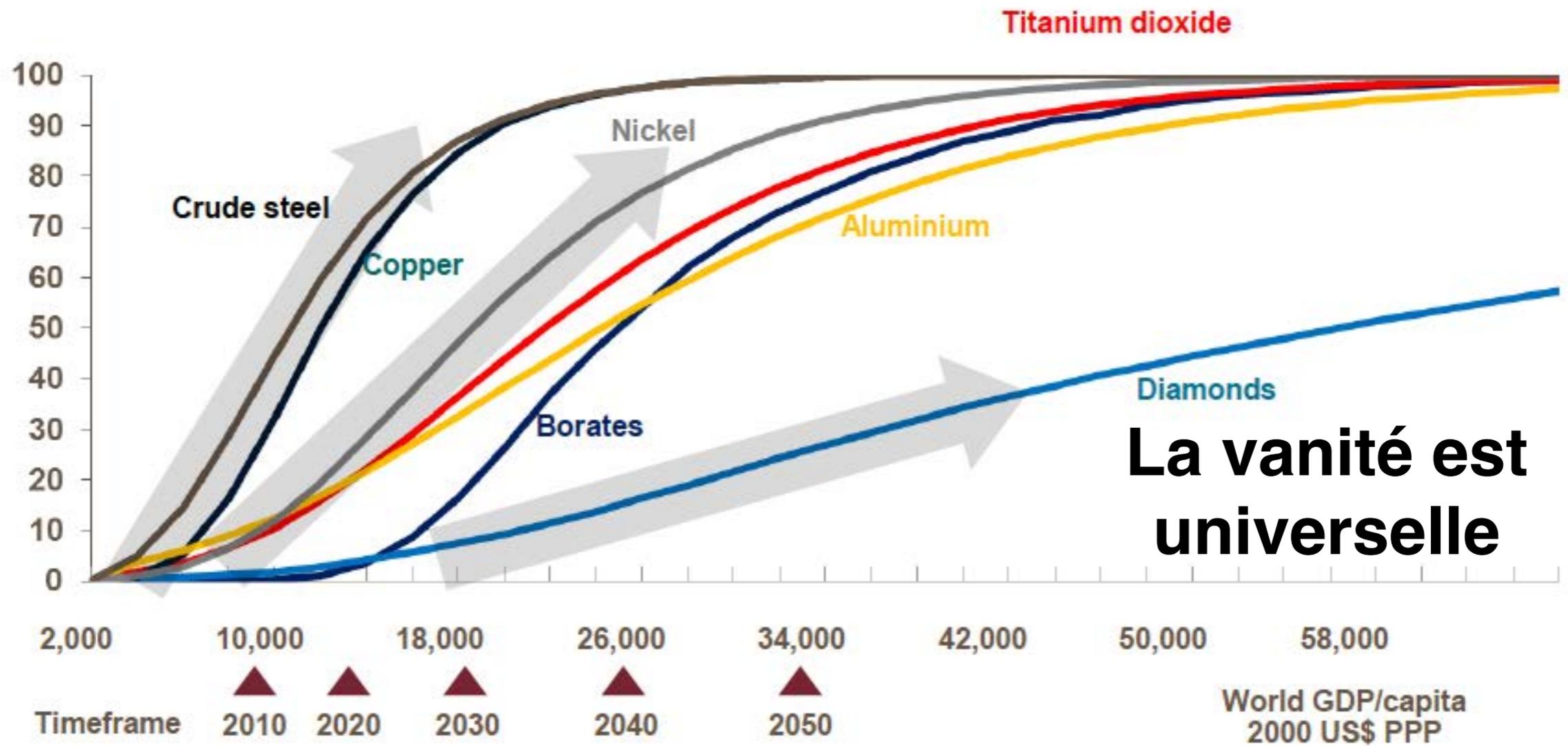
Population mondiale



Population mondiale

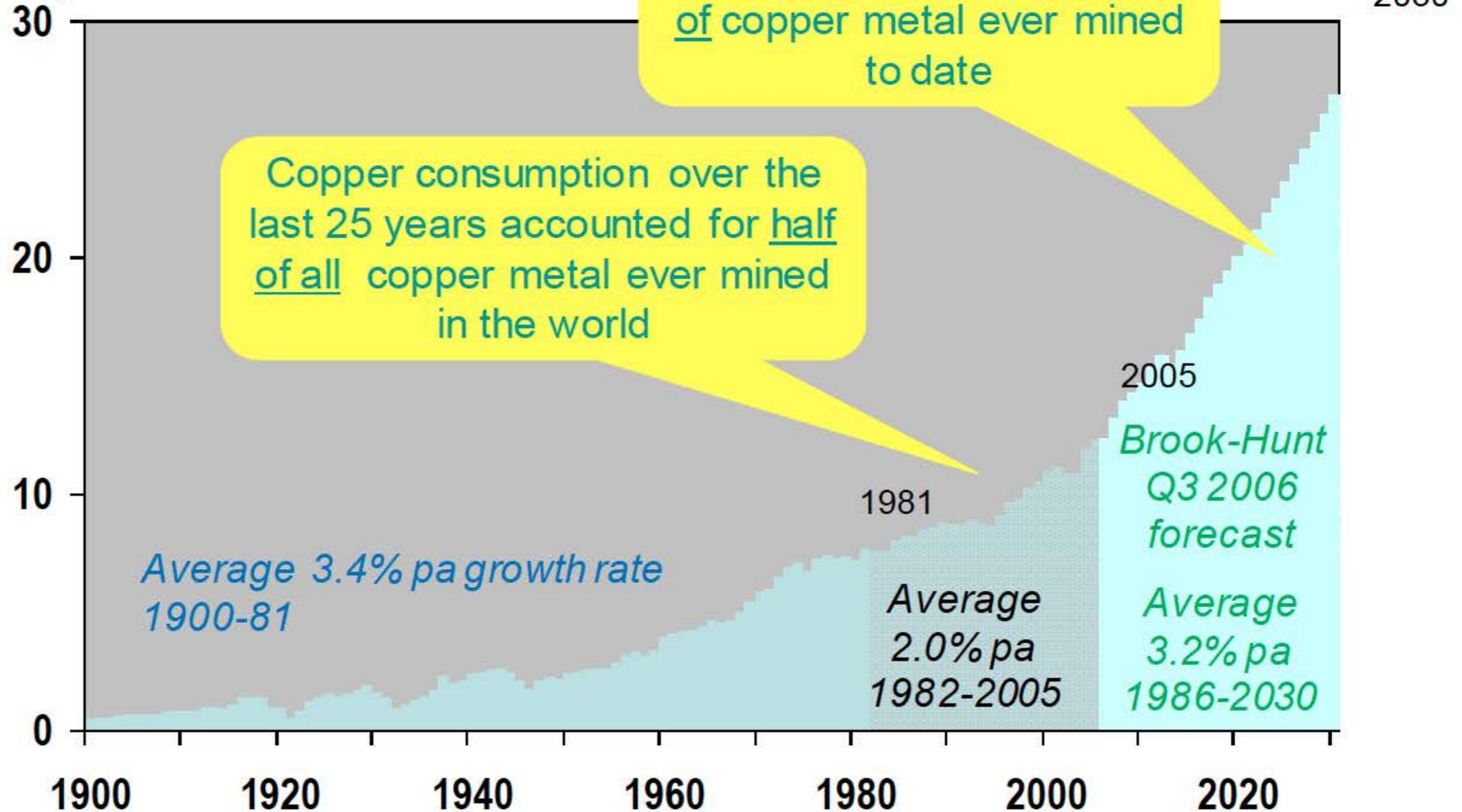


Consommation des ressources



Consumption des ressources

Mine Production (mtpa Cu metal)



Exploration minérale

3 questions:

Quoi?

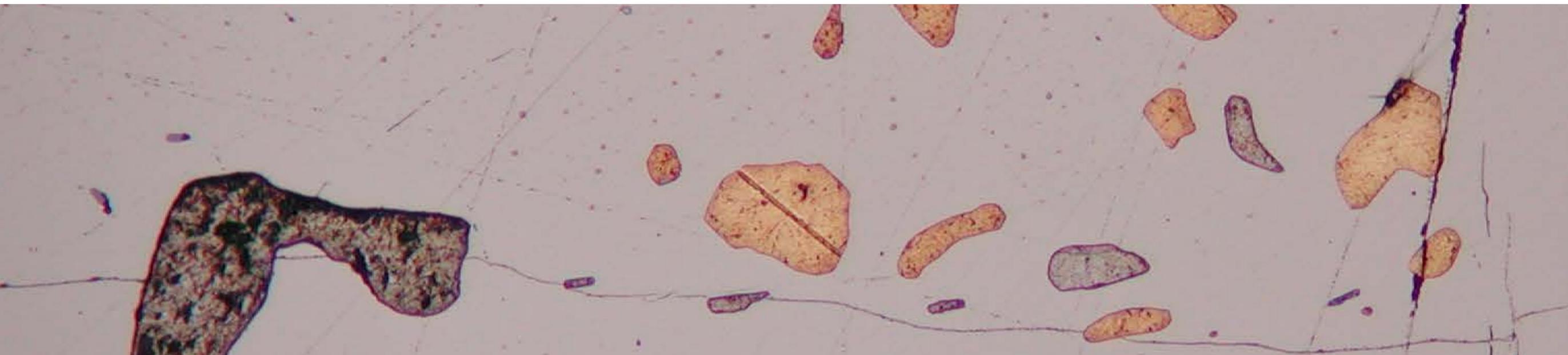
Où?

Comment?

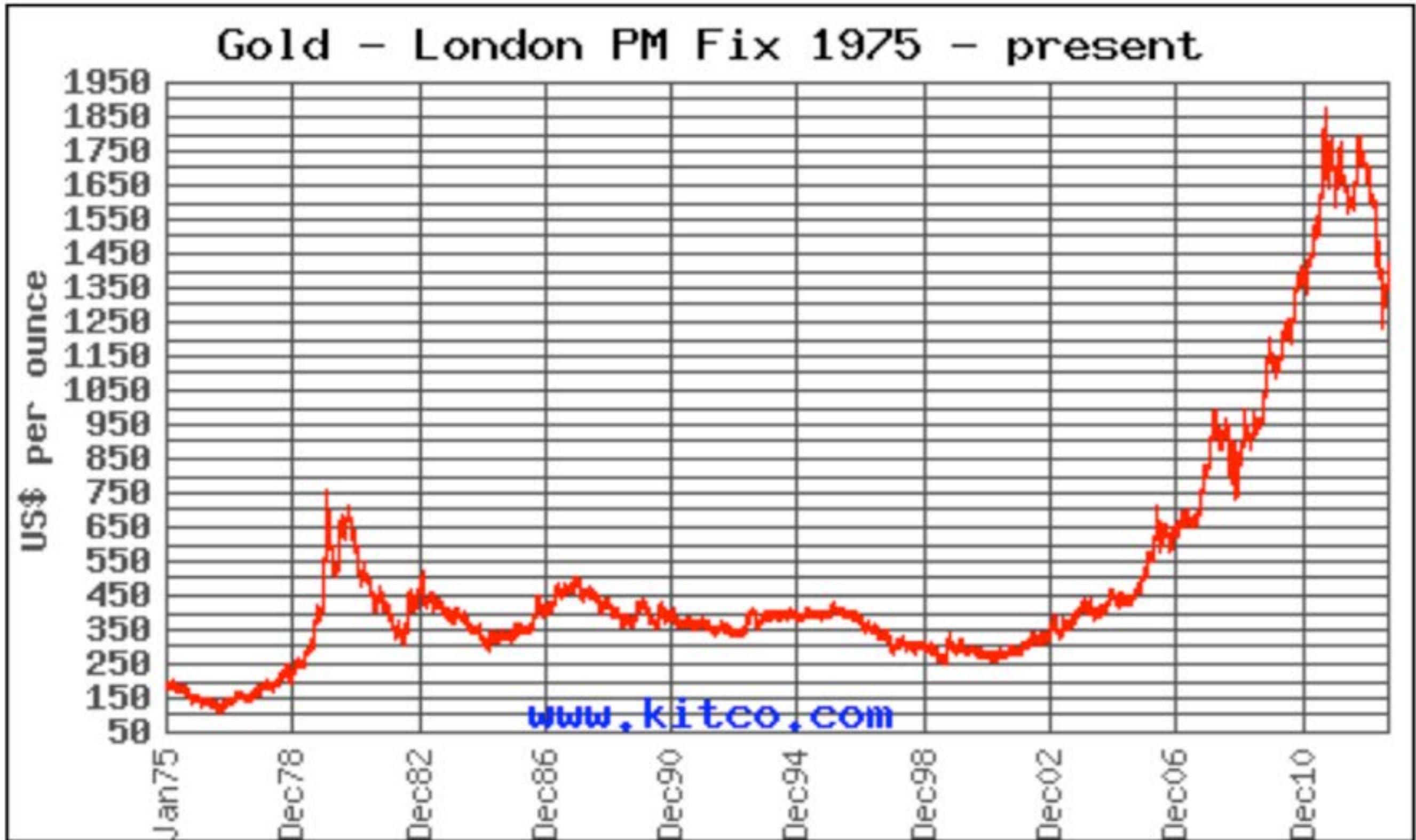


Quoi: un gisement

- **Tonnage, teneur**
- **Ingénierie minière**
- **Ingénierie métallurgique**
- **Ingénierie environnementale**
- **Valeur (prix)**
- **Contexte socio-politique**



Valeur: l'or



Dicton: « Grade is King »! (la teneur est Reine...)

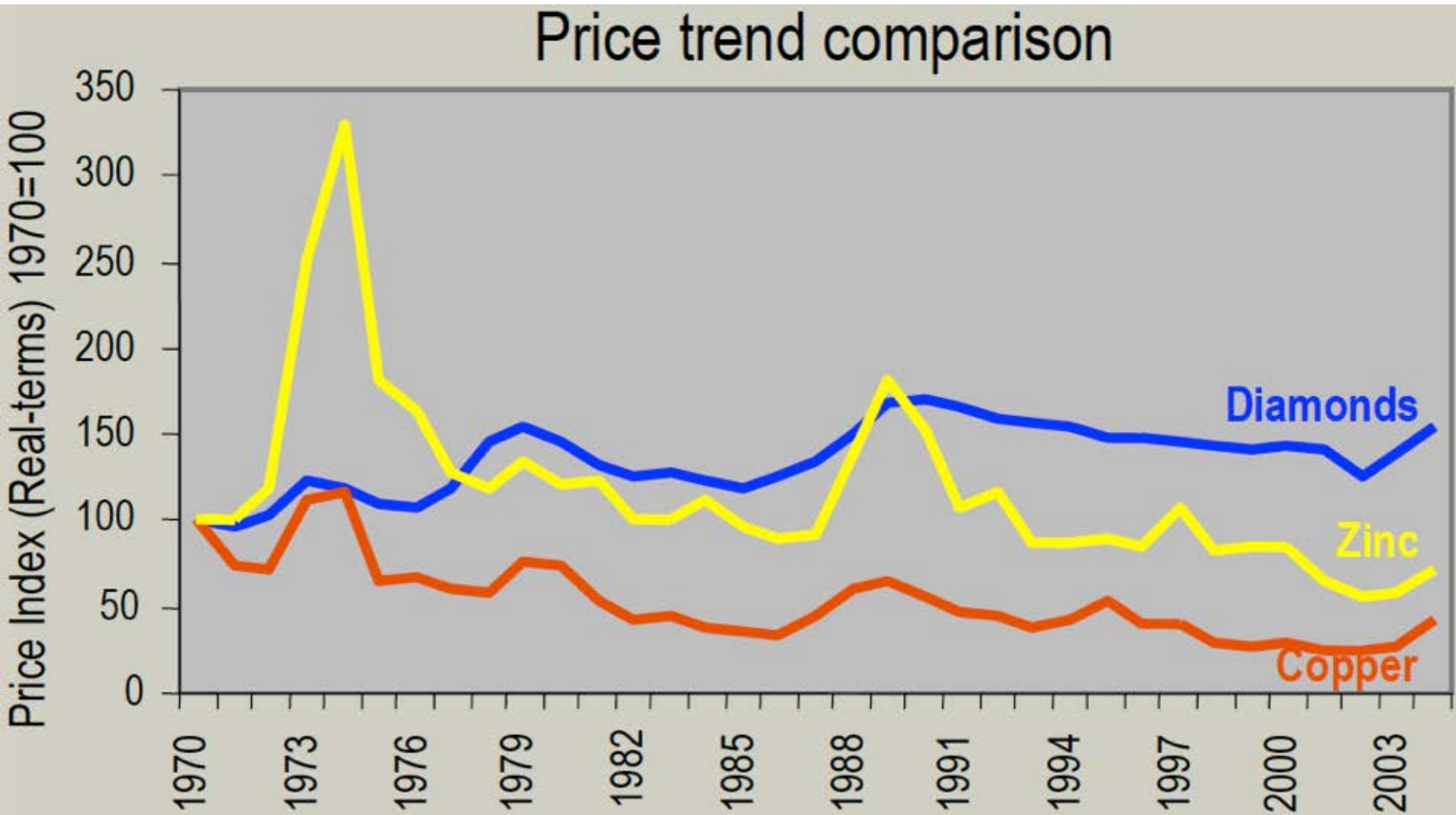
Écrémage vs basse teneur

Développement technologique:

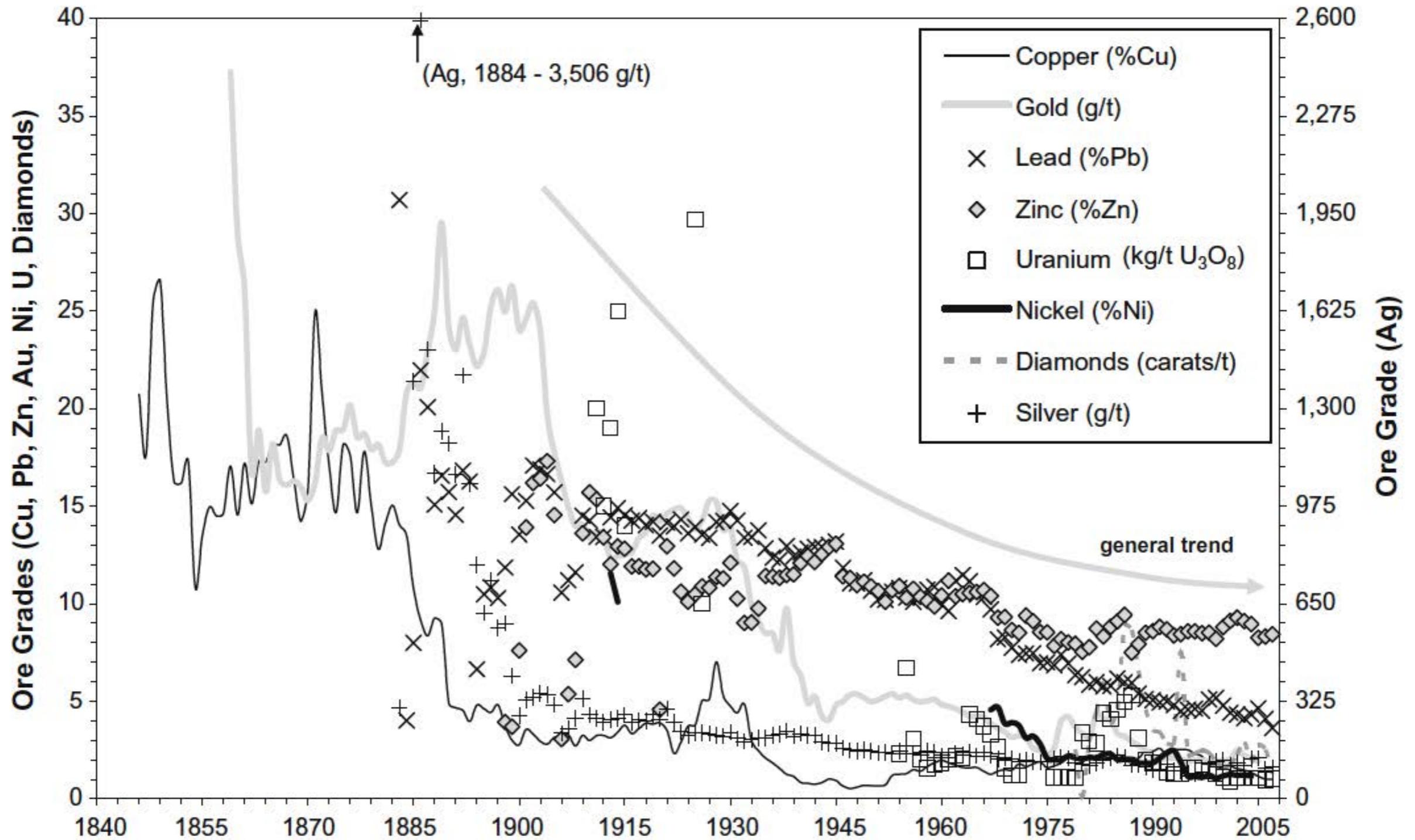
- mécanisation
- concentration/extraction



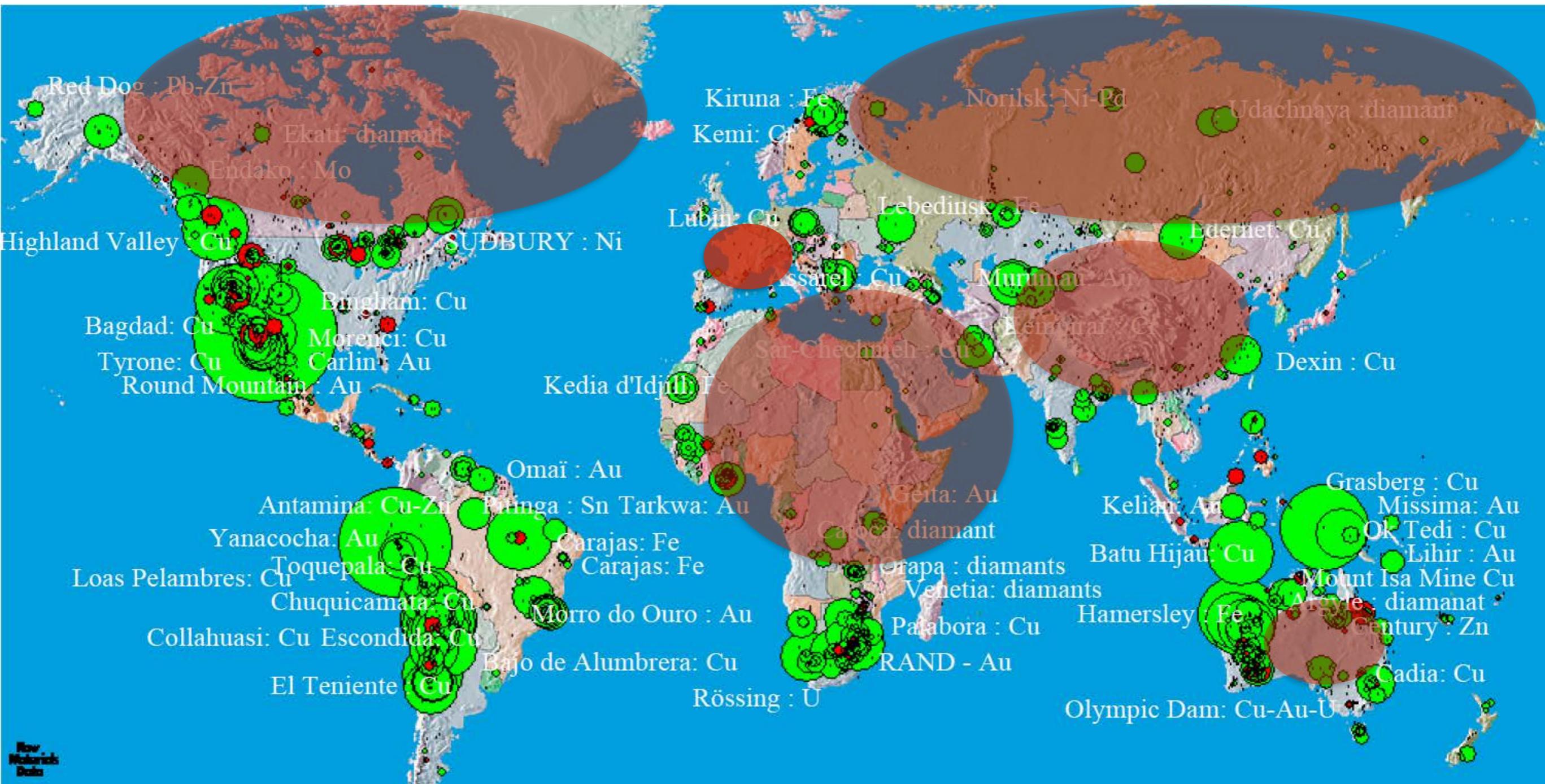
Déclin de la valeur indexée



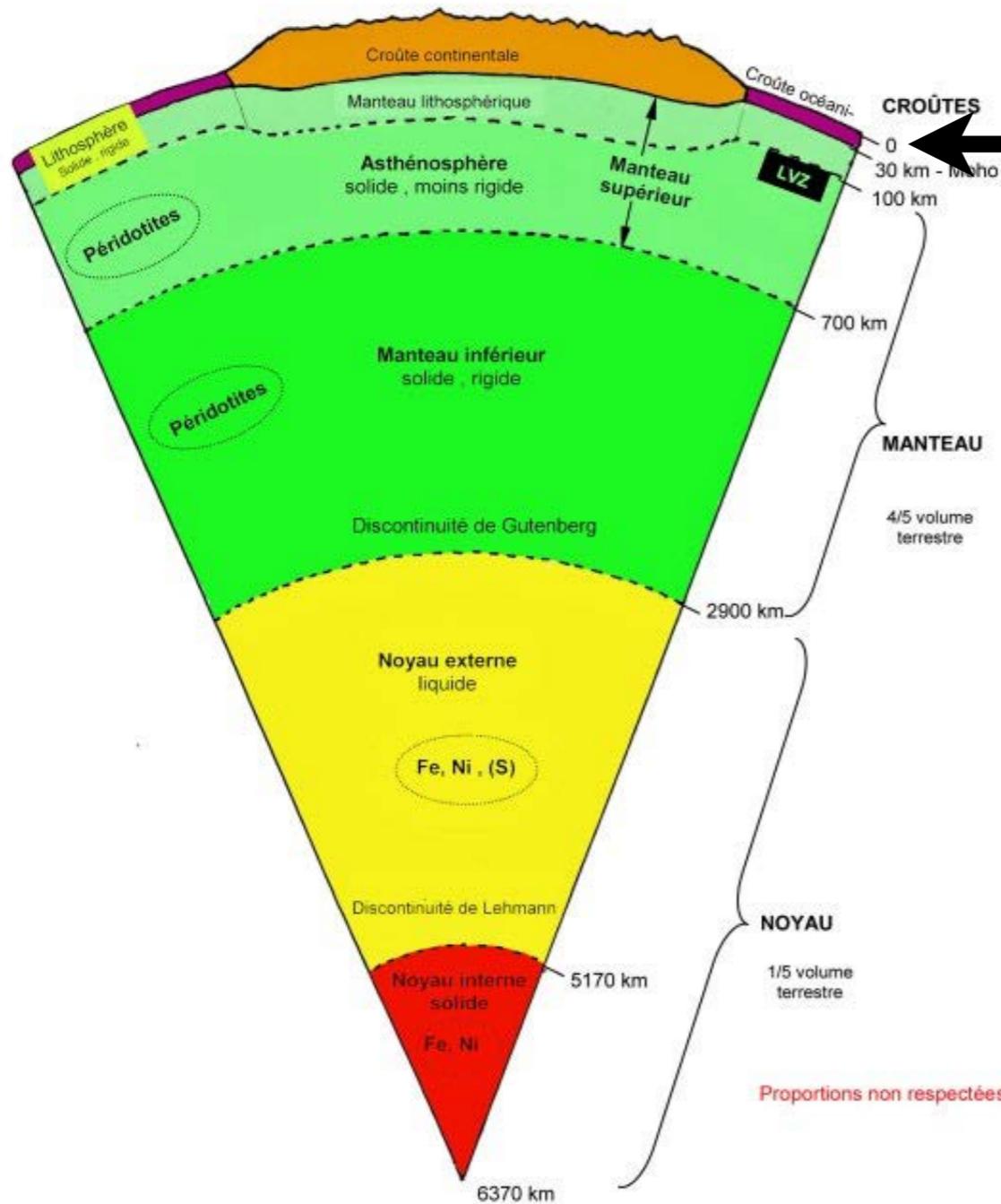
Déclin de la teneur



Où?



Où?: en profondeur



- Géophysique: ~200 m, <1 km
- Géochimie: ~x100 m
- Forage: <2 km
- Exploitation: ~4 km

Exemple: Resolution Copper (Az)

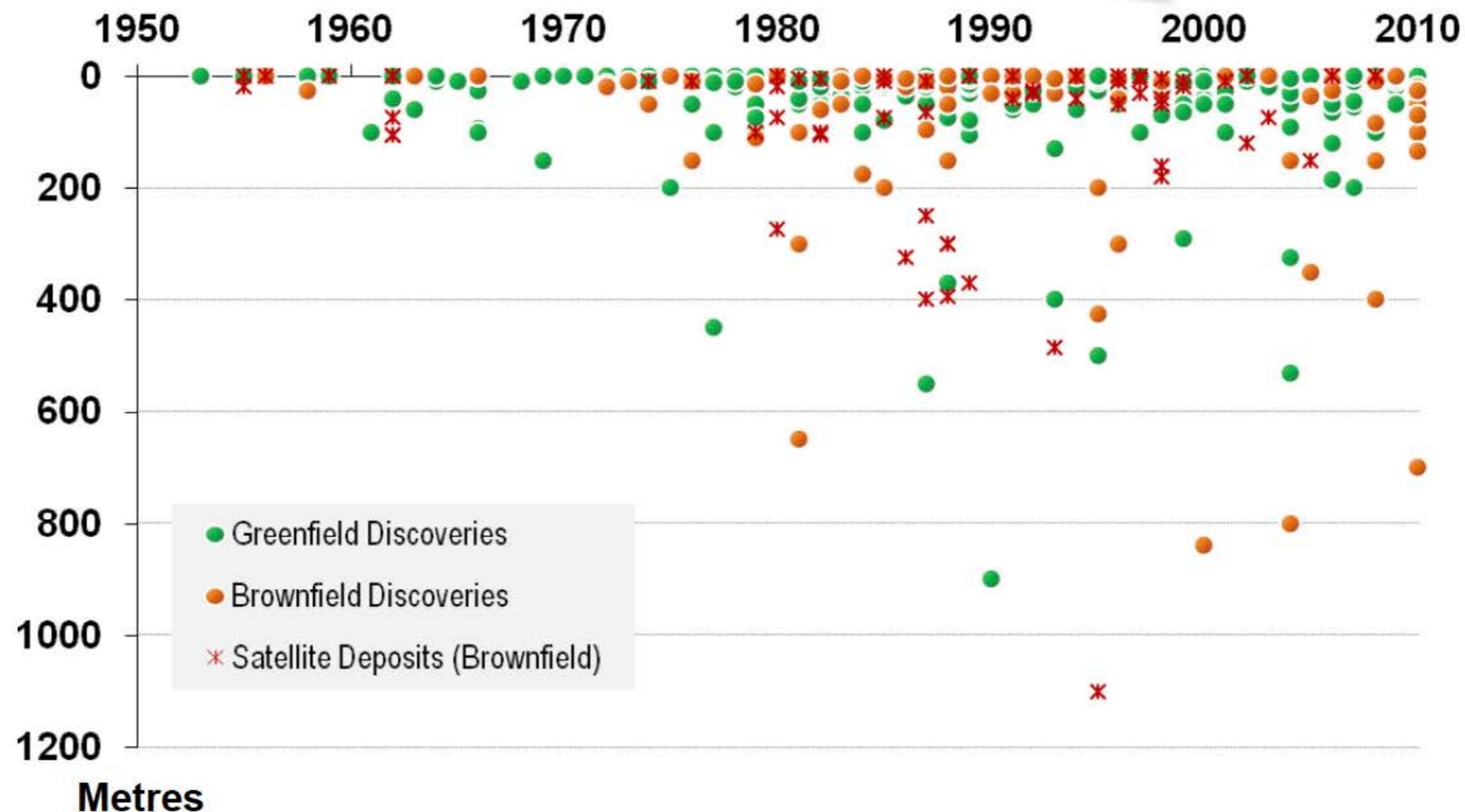
- Découverte: 1996
- Profondeur: 2,1 km
- Gisement: 1,7 GT @ 1,52% Cu
- Extension de Magma Copper

Où?: en profondeur

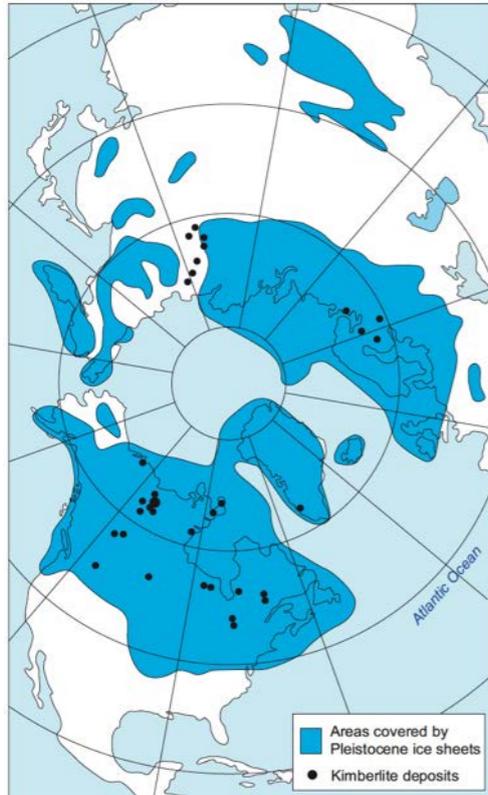
Depth of Cover on gold discoveries

Primary gold deposits >1 Moz found in World#: 1950-2010

We still continue to explore at shallow depths
– the concern is that are we depleting this search-space?

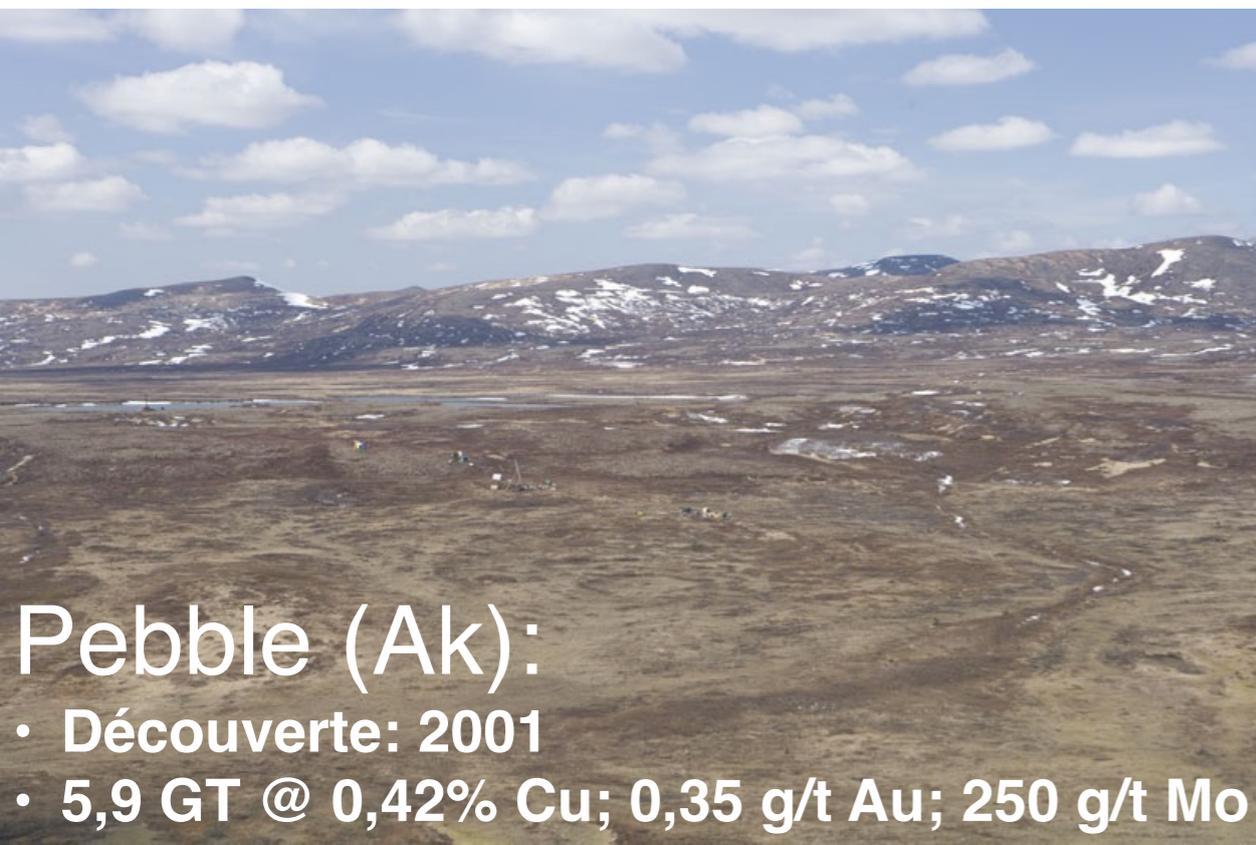


Où?: sous couverture



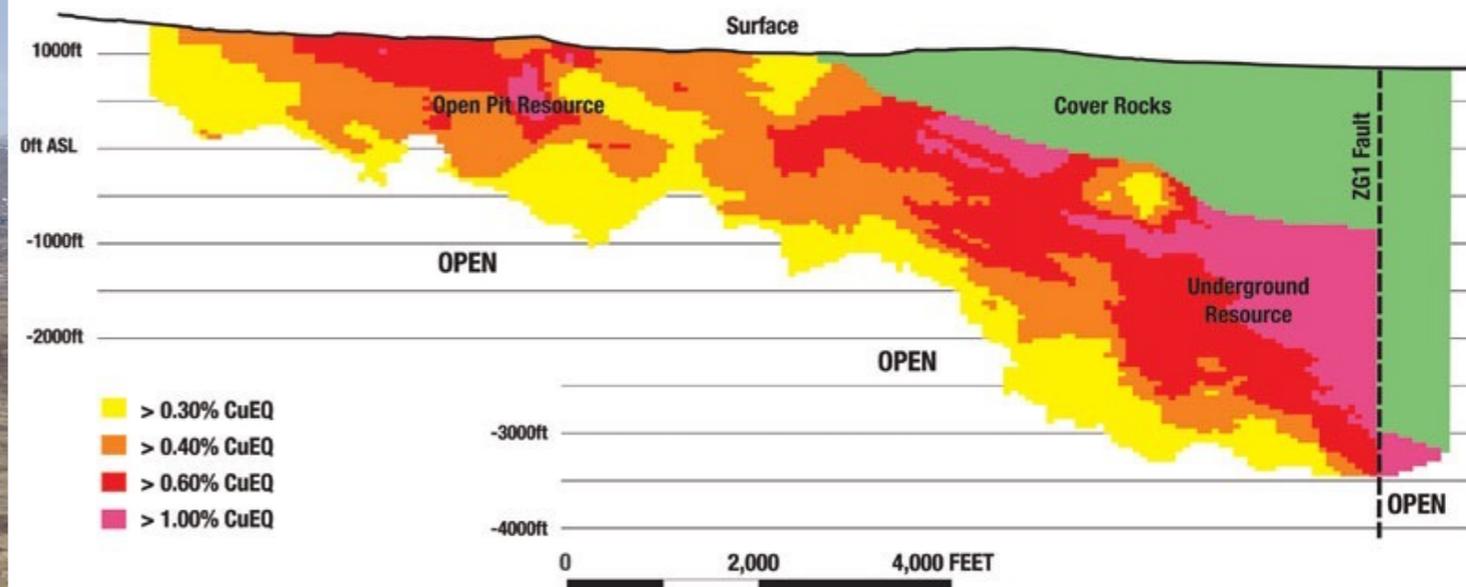
McClenaghan & Kjarsgaard (2007)

- Roches de couverture
- Sédiments superficiels
 - glaciaires
 - éoliens
 - fluviatiles

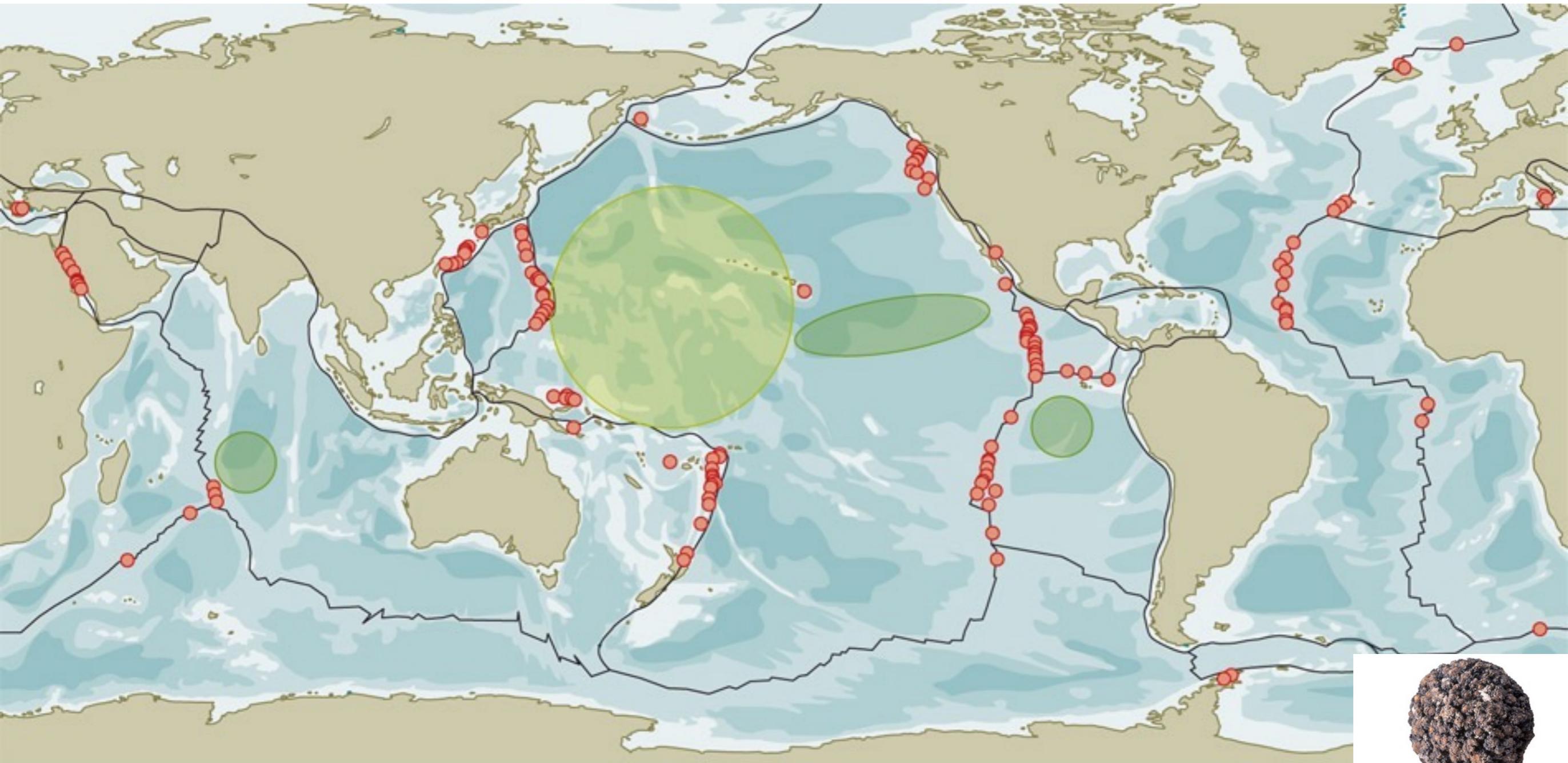


Pebble (Ak):

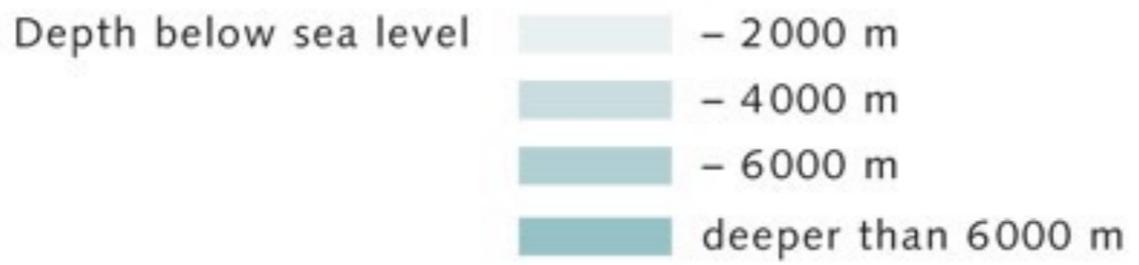
- Découverte: 2001
- 5,9 GT @ 0,42% Cu; 0,35 g/t Au; 250 g/t Mo



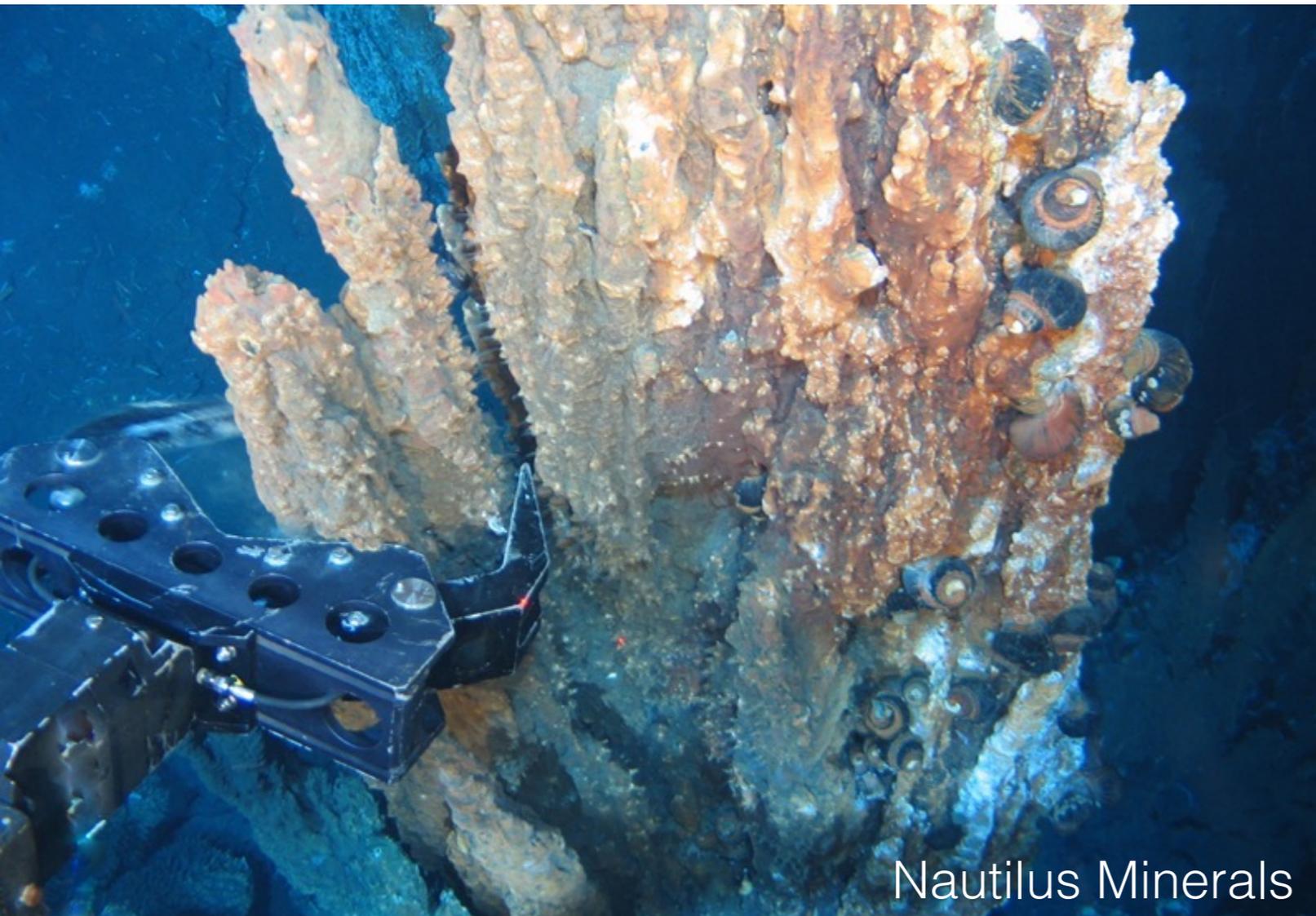
Où?: les océans



- Continental plate margins
- Distribution of cobalt crusts
- Occurrences of manganese nodules
- Occurrences of black smokers

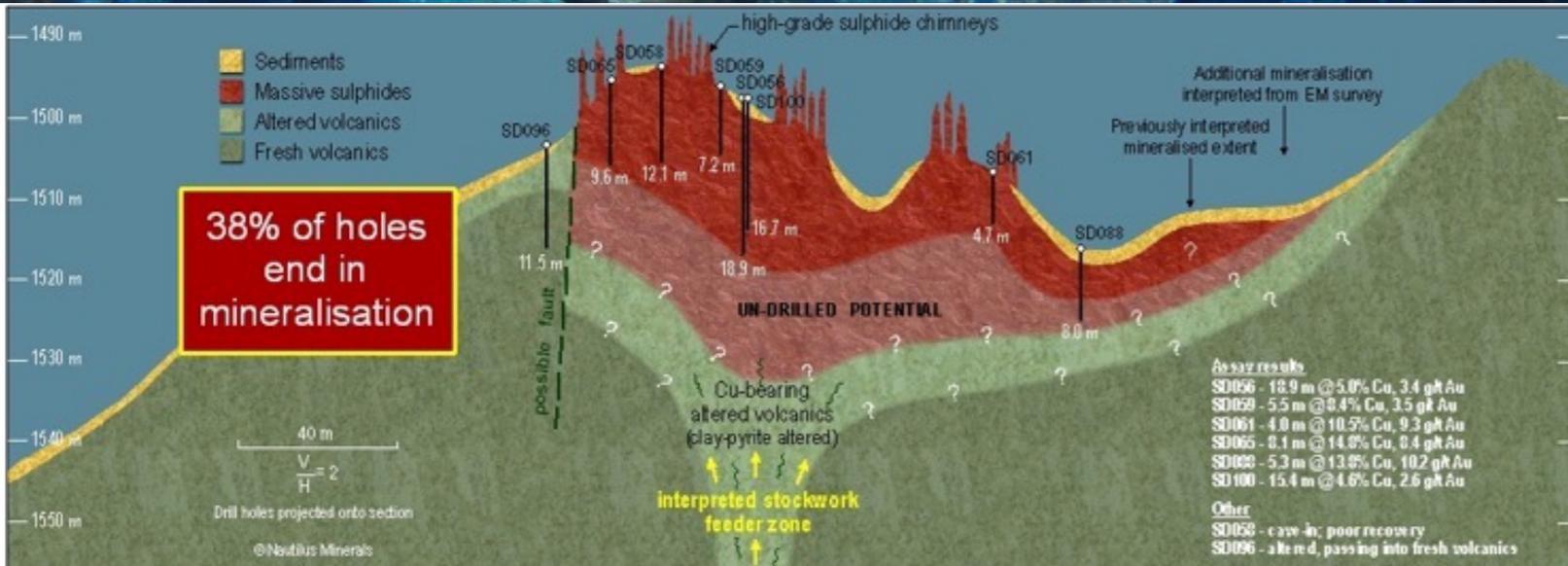
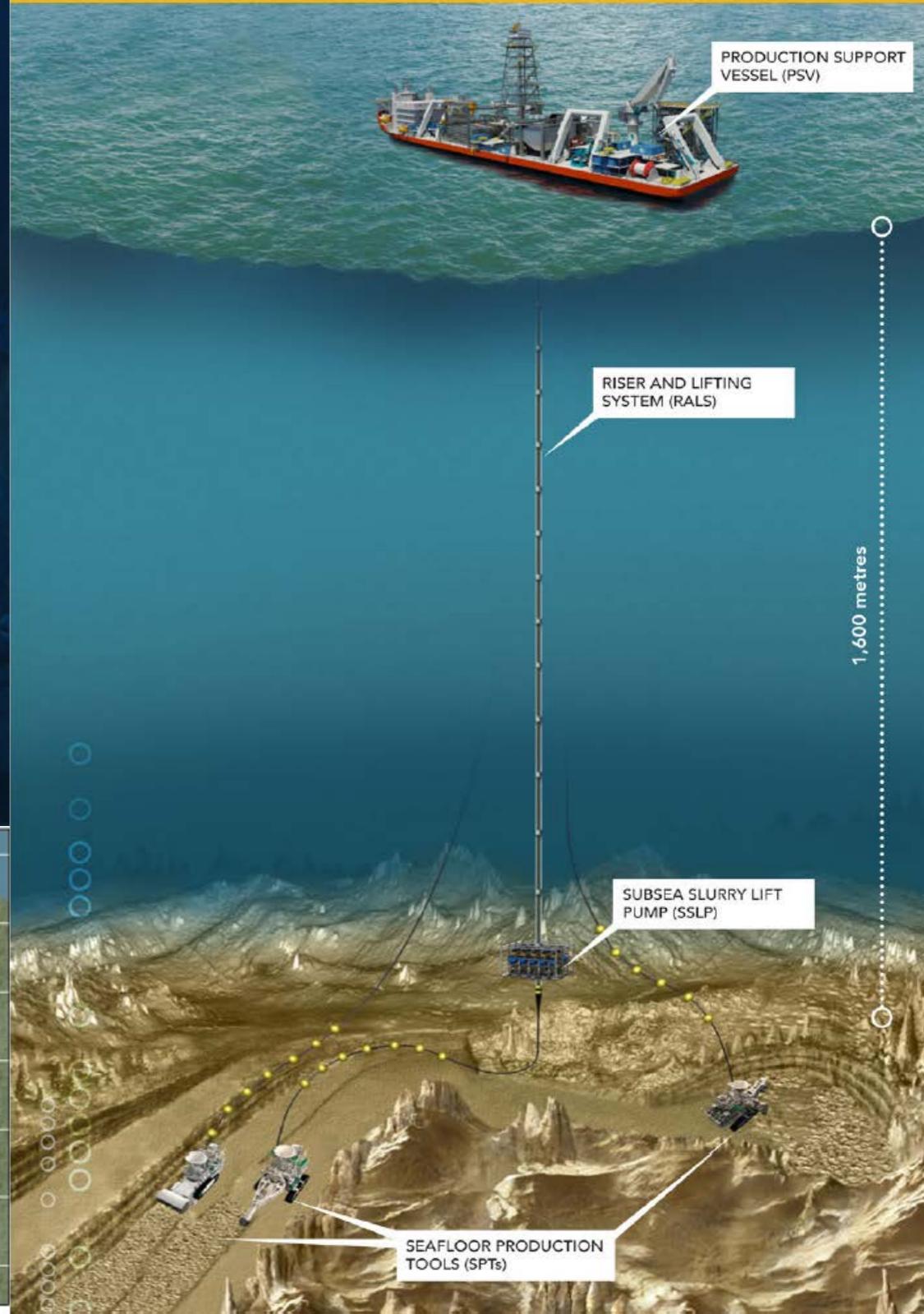


Où?: les océans



Nautilus Minerals

Seafloor Production System



Où?: les océans...
en solution dans l'eau de mer

... continuellement approvisionné par l'érosion
continentale

Phosphore: 90 GT => 26 siècles*

Lithium: 240 GT ... > 10^{10} voitures électriques

Uranium: 4,6 GT => ~100 siècles (surgénérateurs)

*taux actuel de consommation par 10^{10} humains

Cathles (2015)

Comment?

- **Modèles géologiques**
- **Méthodes géochimiques**
- **Méthodes géophysiques**
- **Intégration 3D, SIG**

Accès...



2000+



2010+



1950

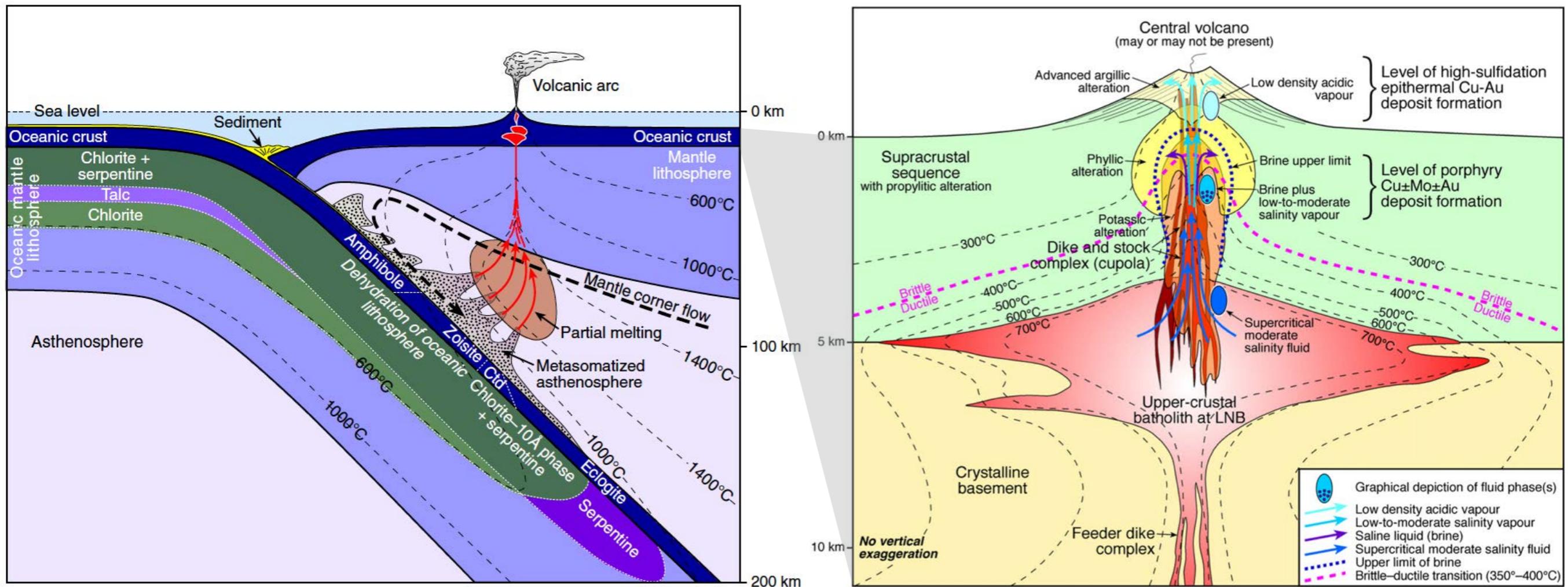


1980

Mais l'observation sur le terrain reste irremplaçable!



Modèles géotologiques



Richards (2011)

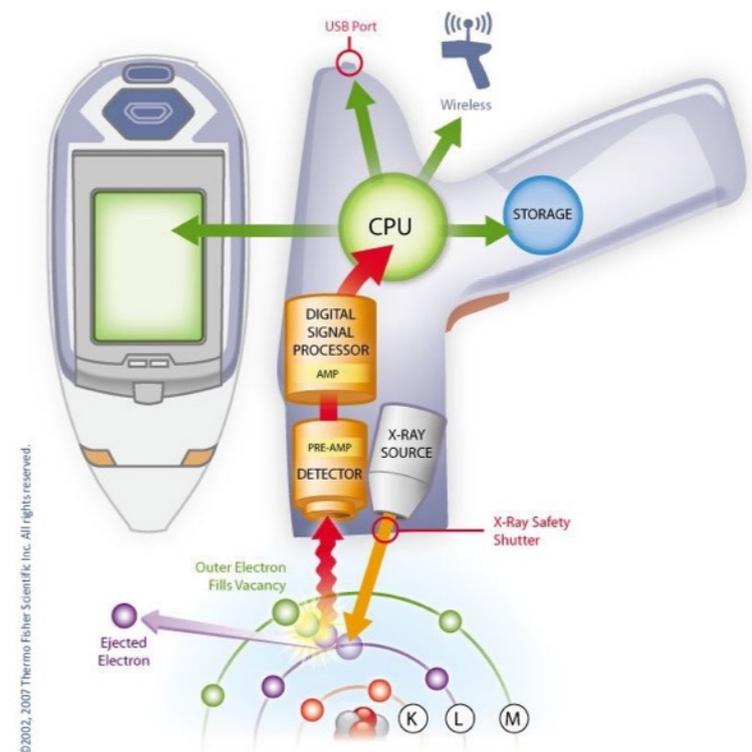
Fluorescence-X mobile



Olympus

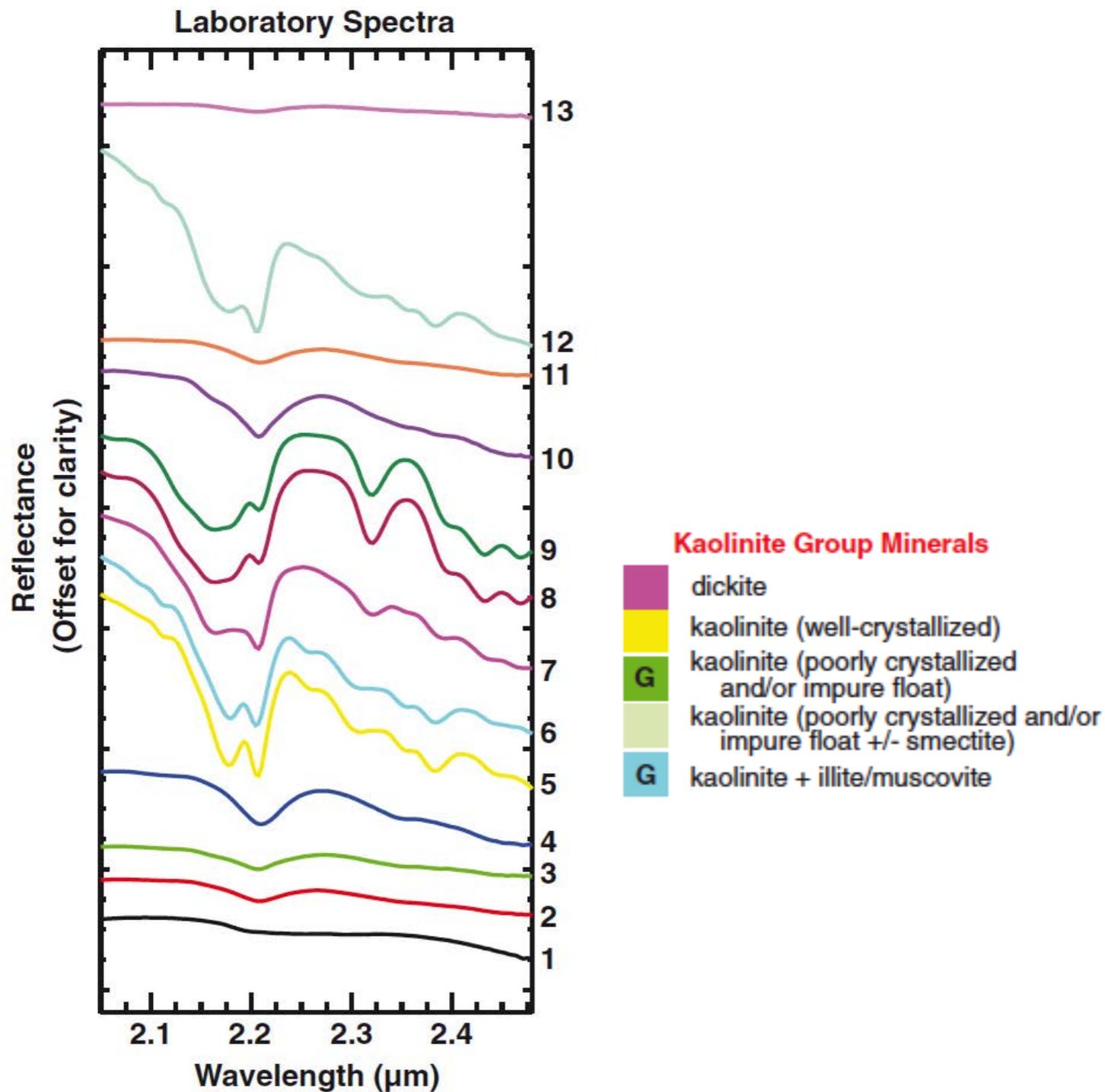


Bara Scientific



Niton

Minéralogie: mobile

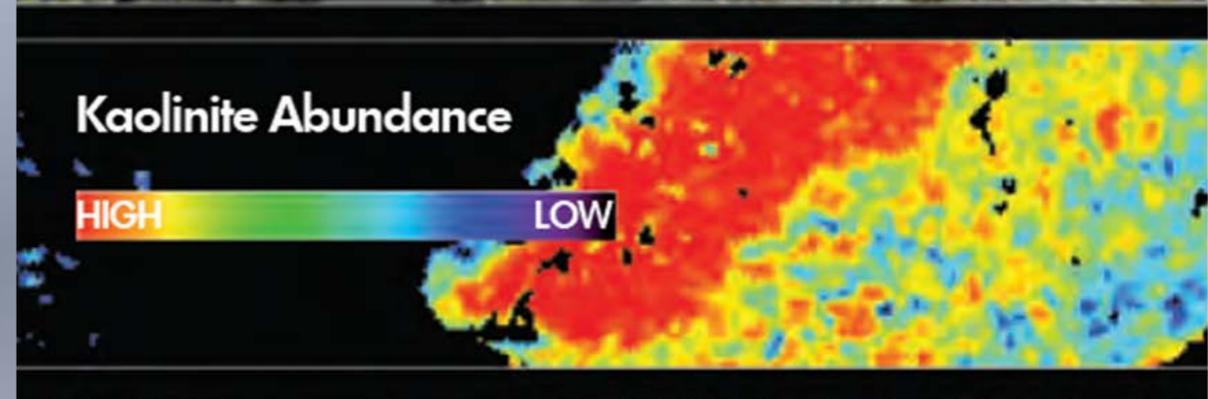
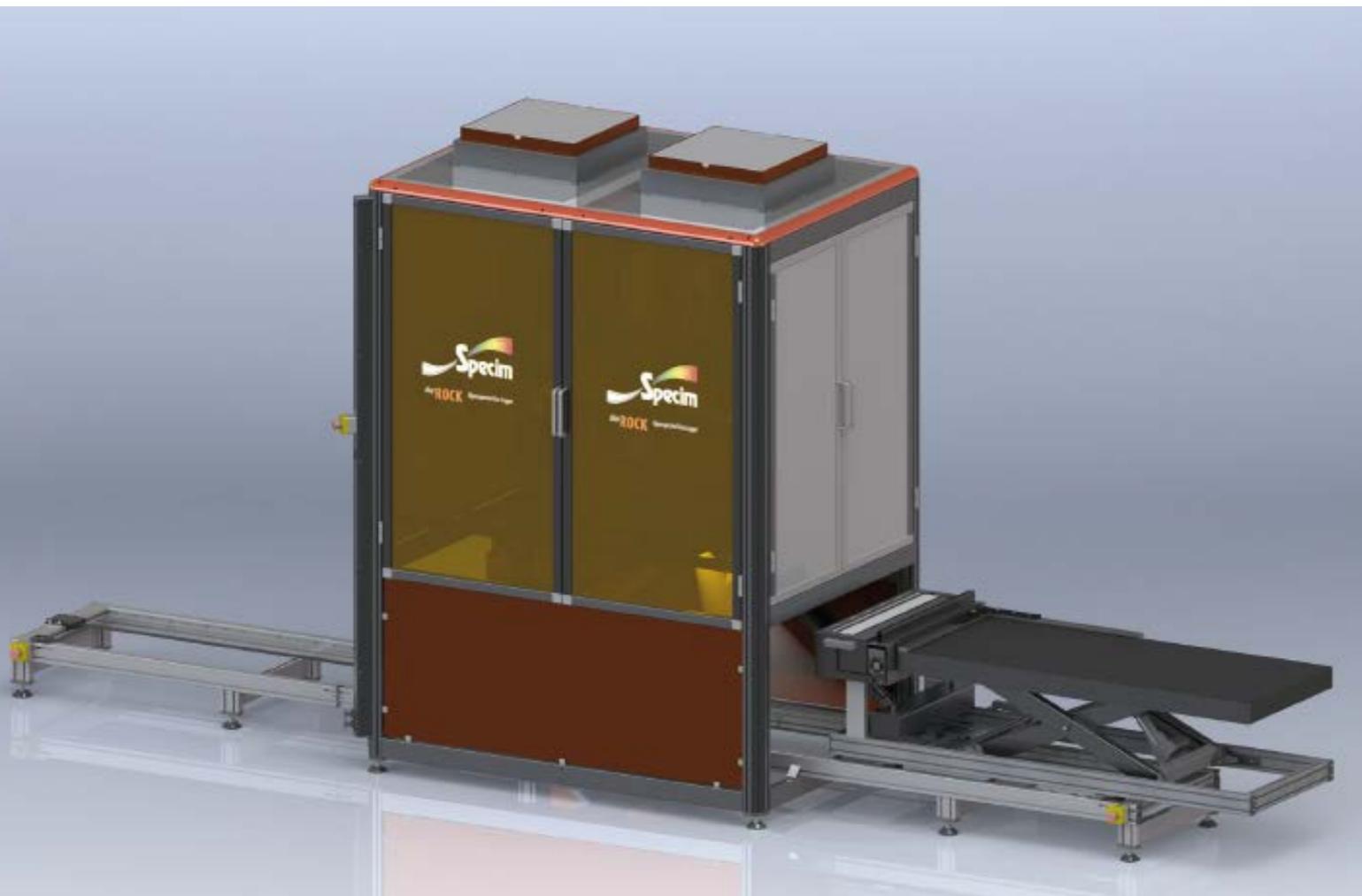


Rockwell et al. (2006)



TerraSpec

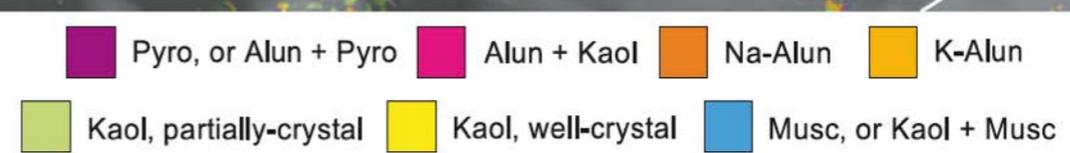
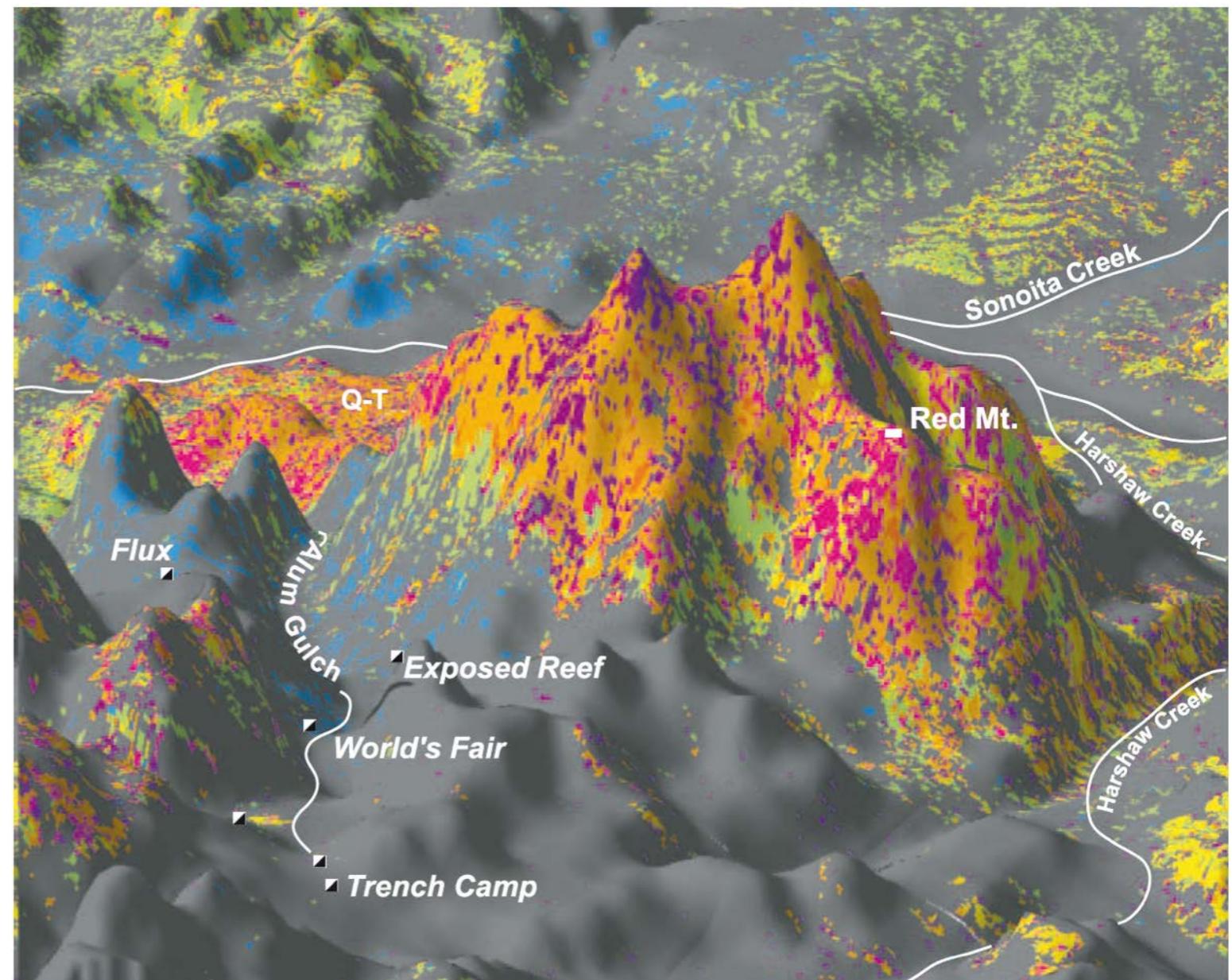
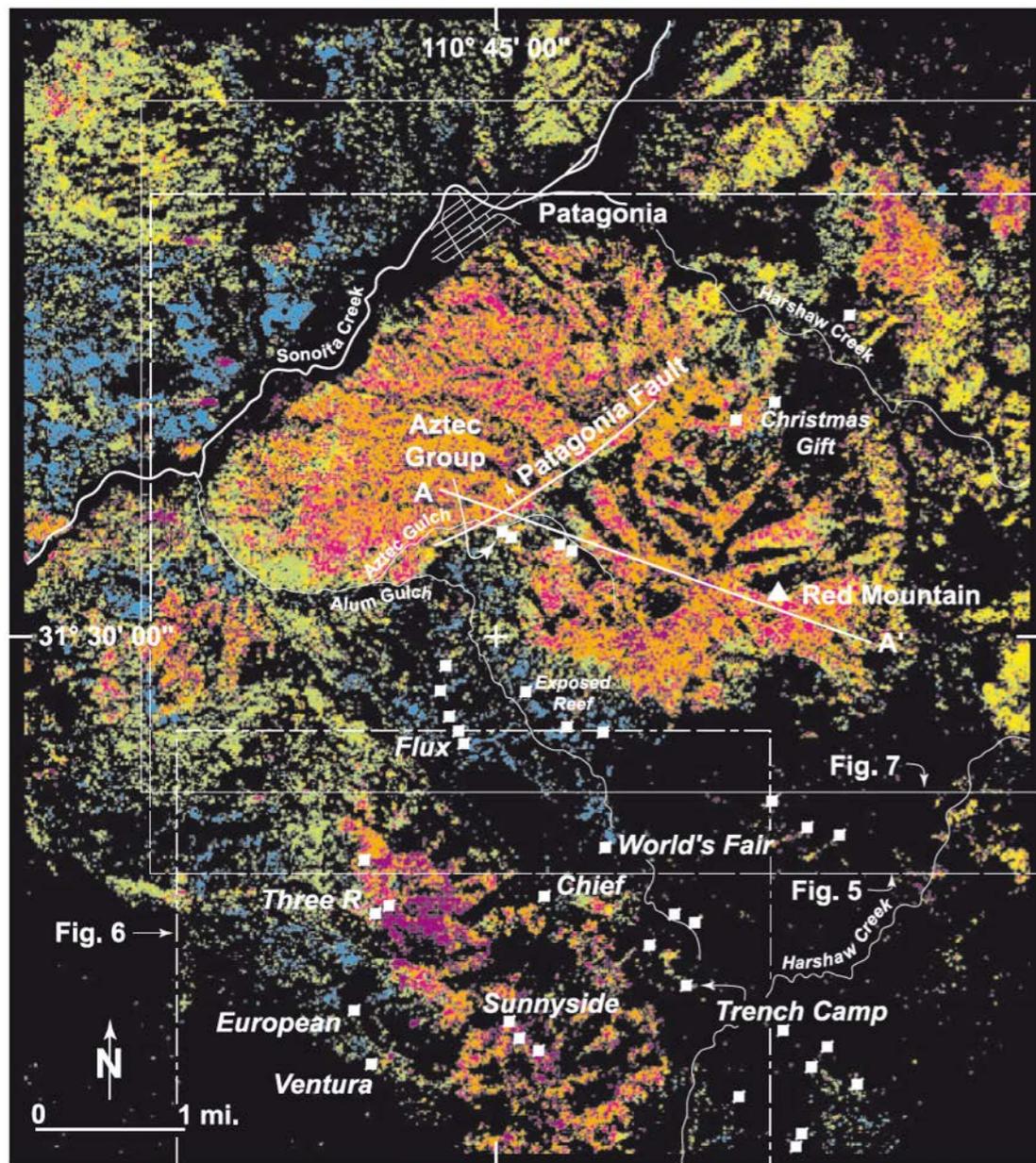
Minéralogie automatisée: forages



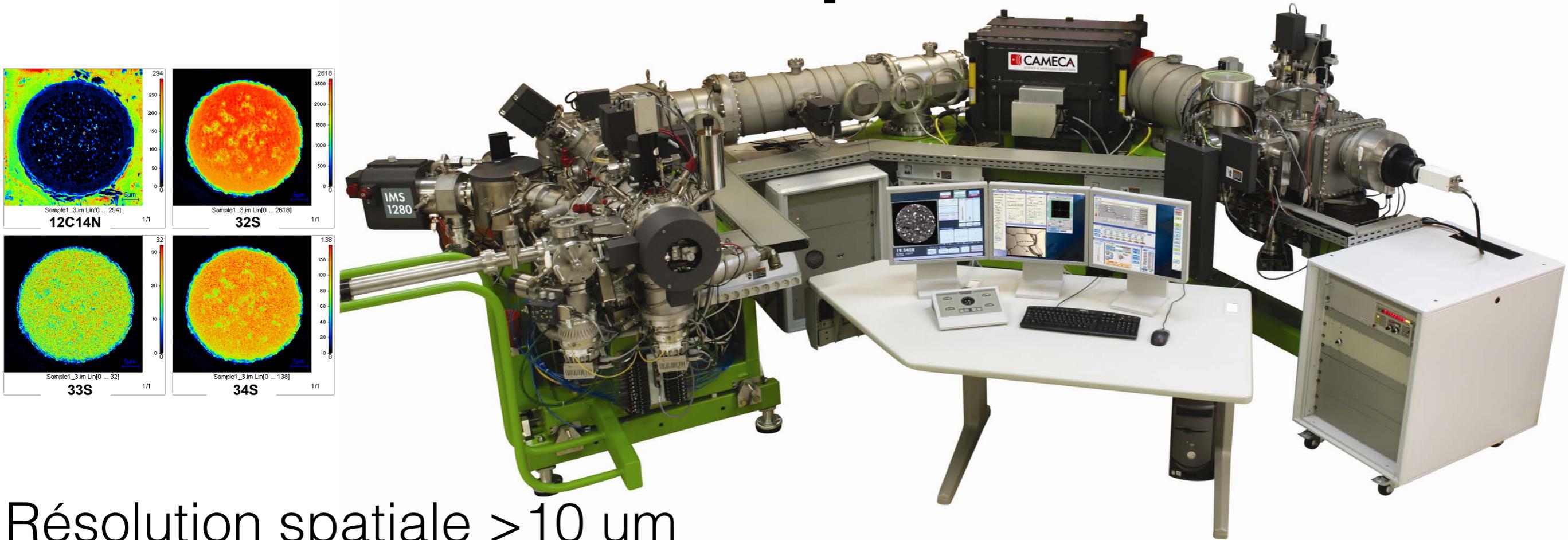
sisuRock

Corescan

Minéralogie aéroportée



SIMS: éléments traces et isotopes



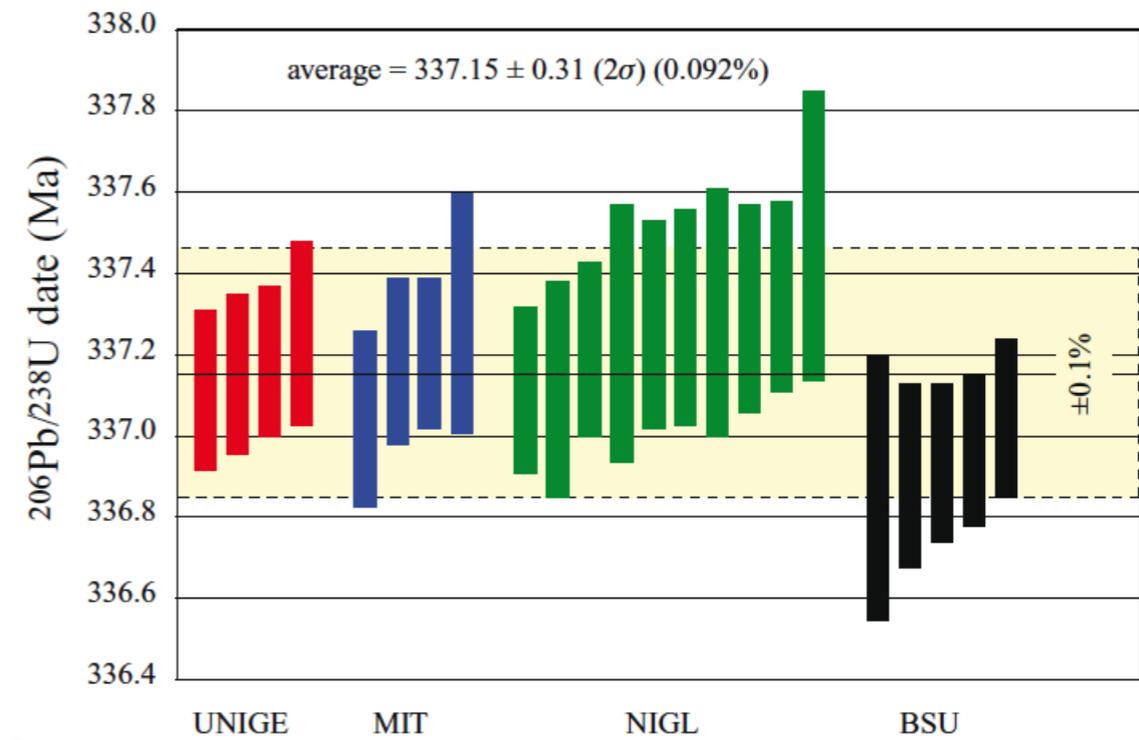
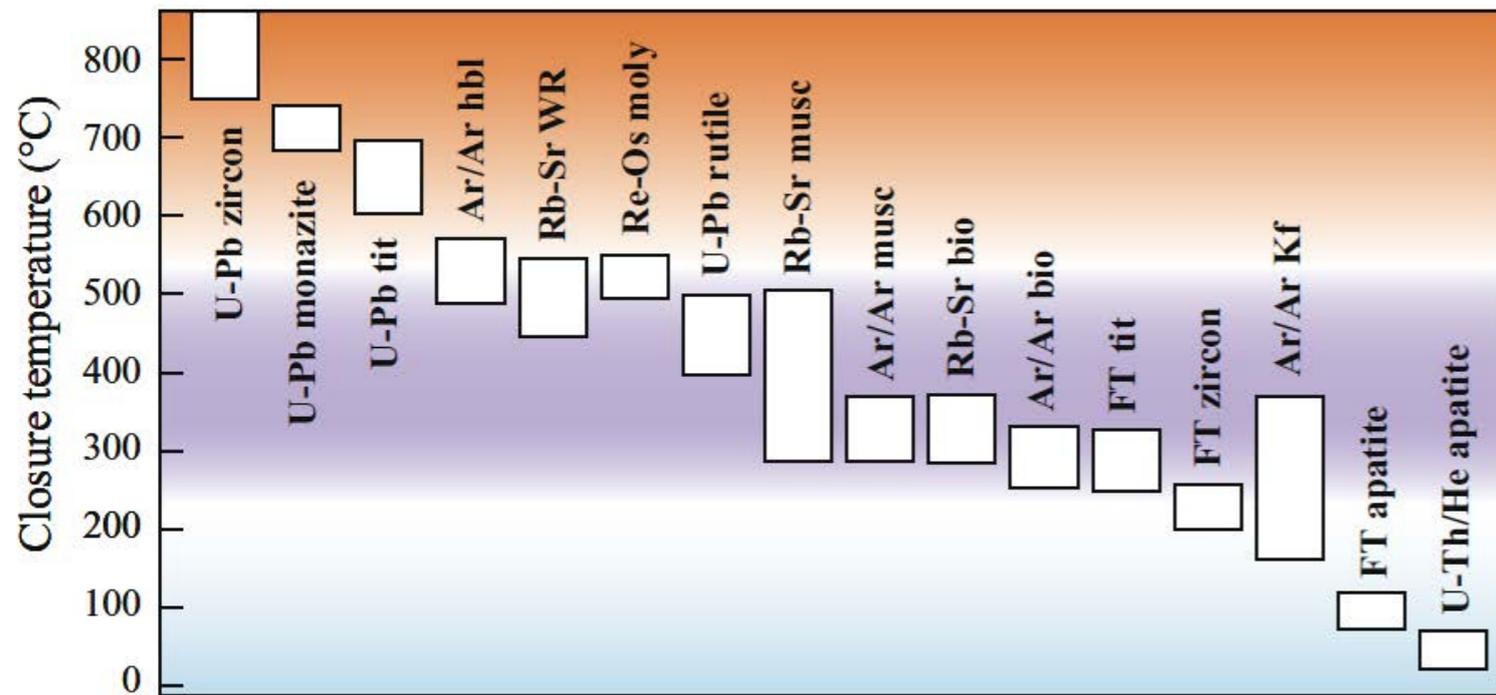
Résolution spatiale $> 10 \mu\text{m}$
Limite de détection $< \text{ppm}$



Datation précise



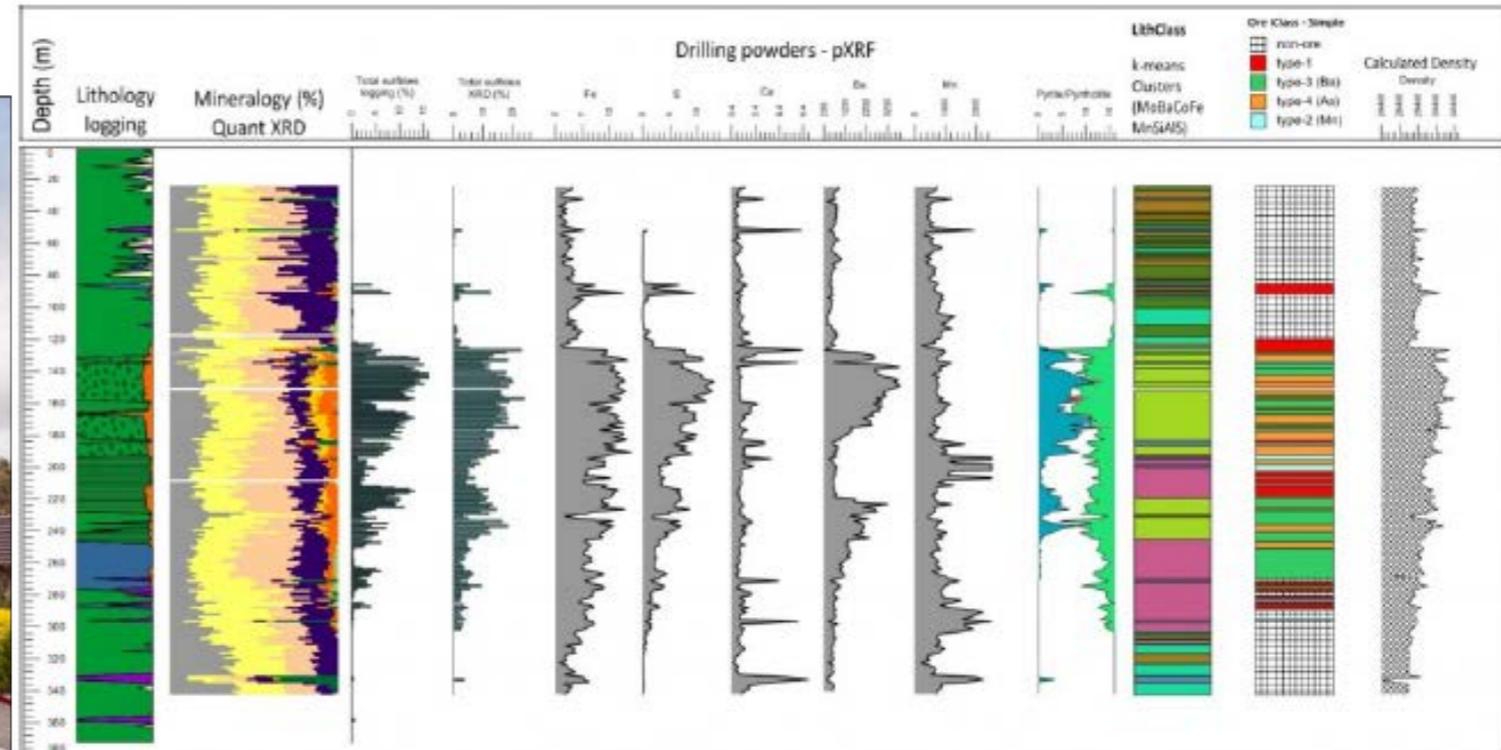
Thermo



Forage continu



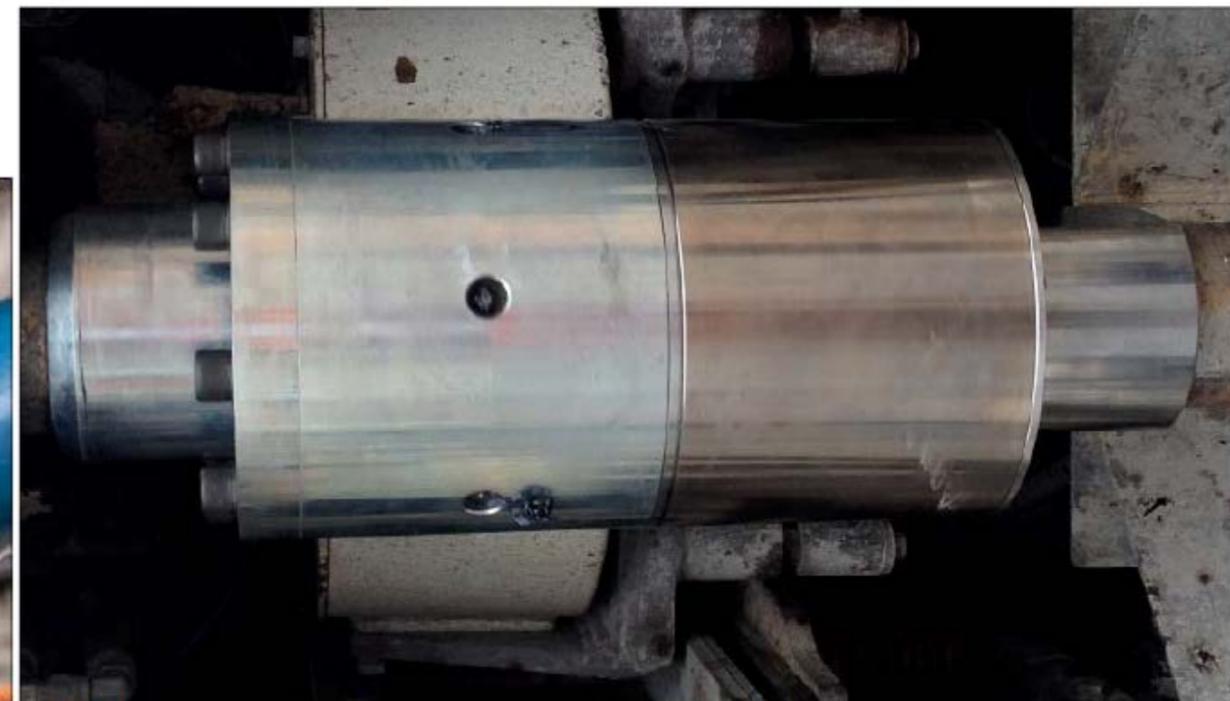
DET CRC's CT Rig.



Geological logging compared to Lab-at-Rig[®] quantitative mineralogy and geochemistry for DET Brukunga 2. The right hand panels display derived data identifying lithological subdivisions and ore sub-types and density calculated from the mineralogical data.

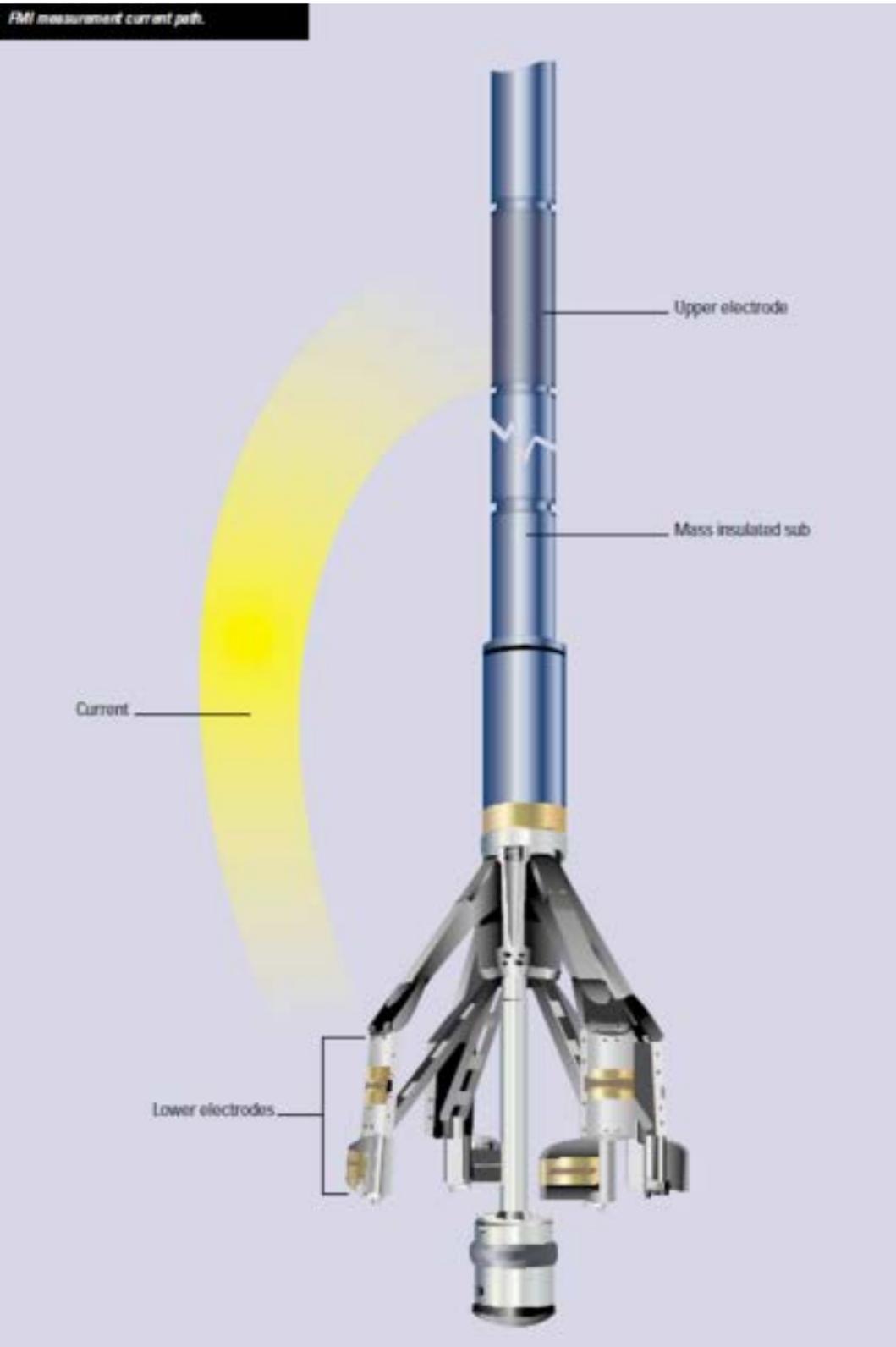


Carbon fibre composite drill rods with various wear coatings for evaluation.

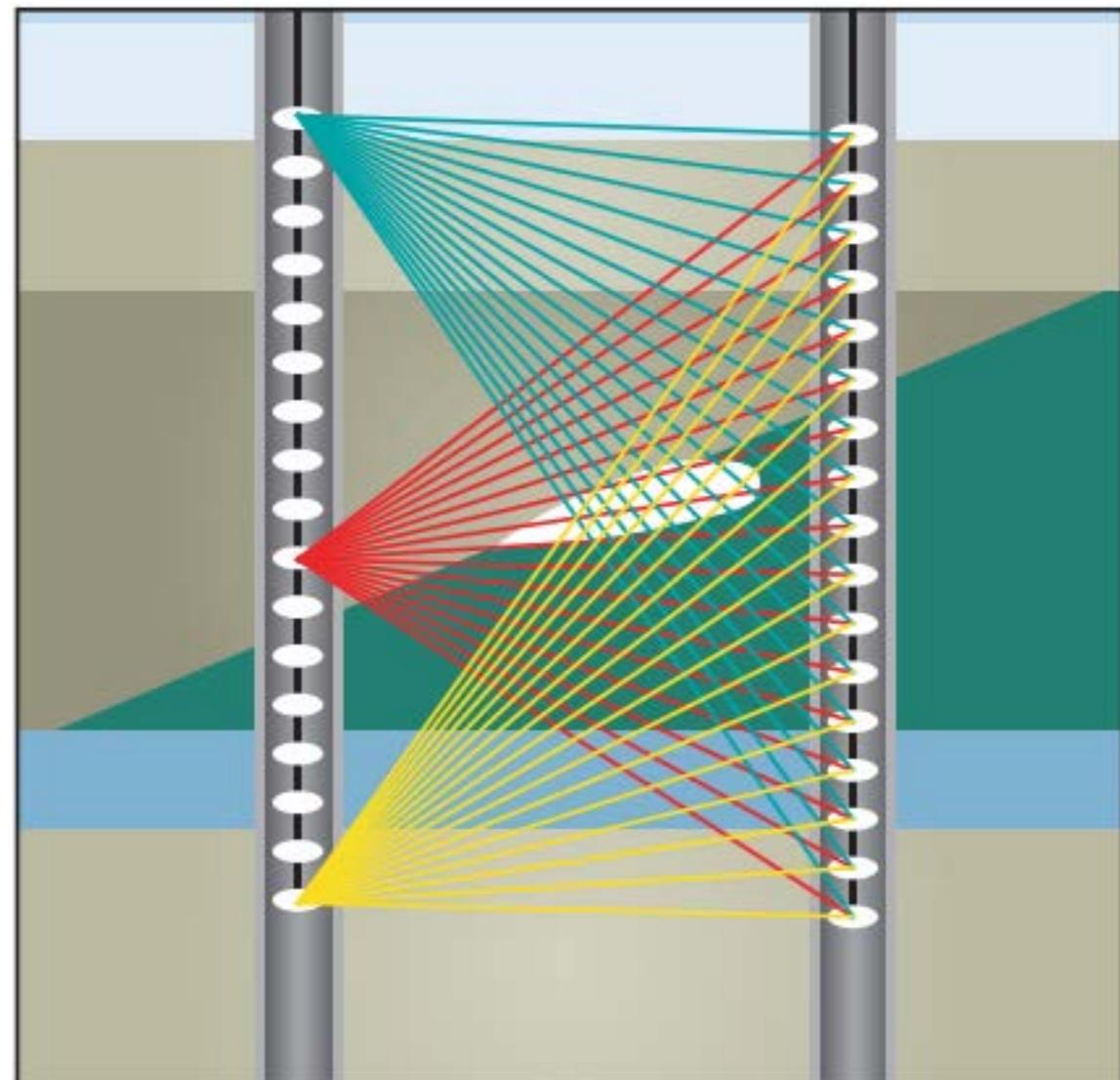


DET CRC Wireless Floating Sub intended to be offered for commercialisation in early 2015.

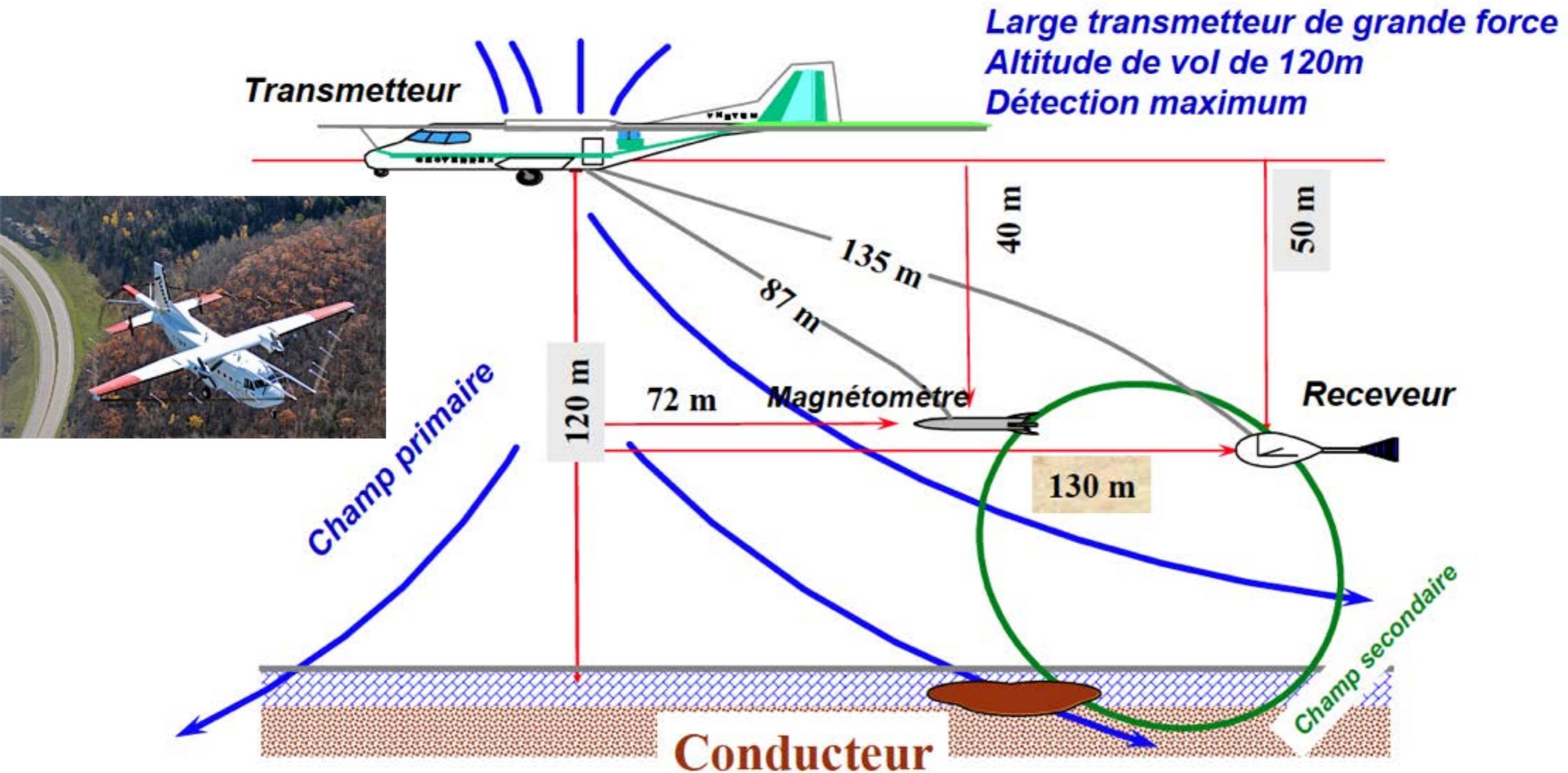
Géophysique en forage



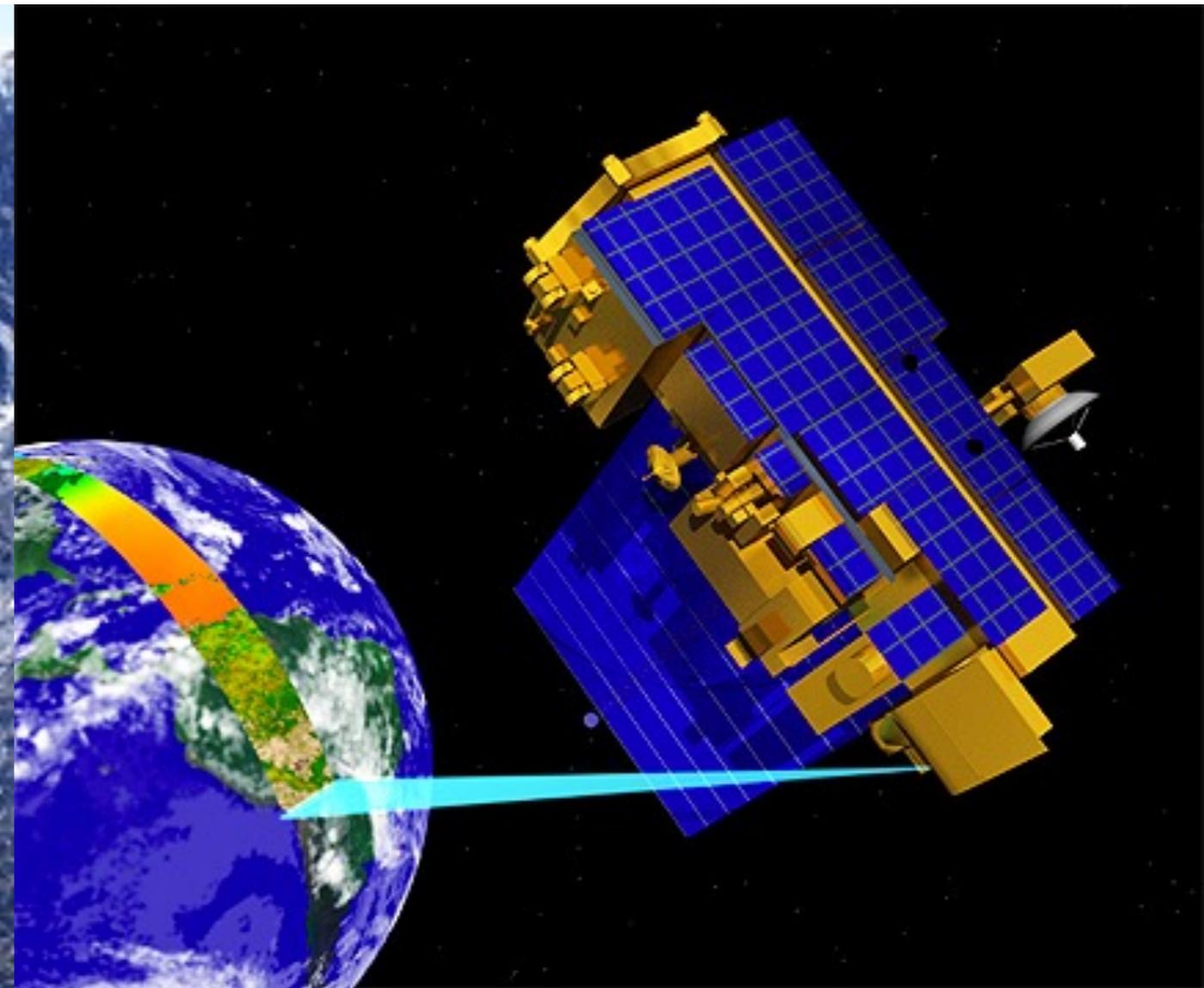
Exploration en
profondeur et entre les
forages



Géophysique aéroportée

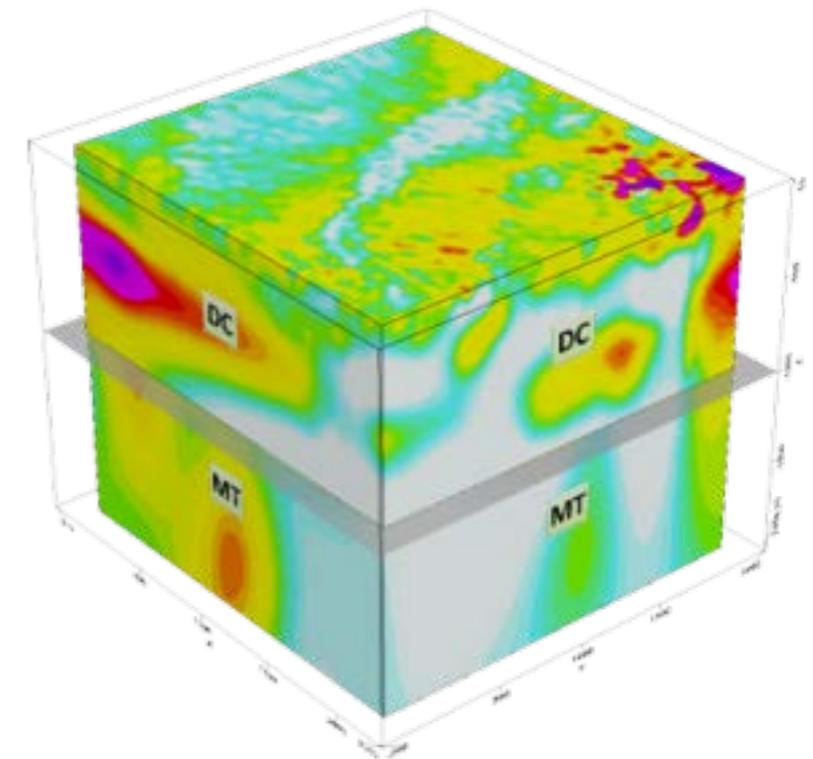
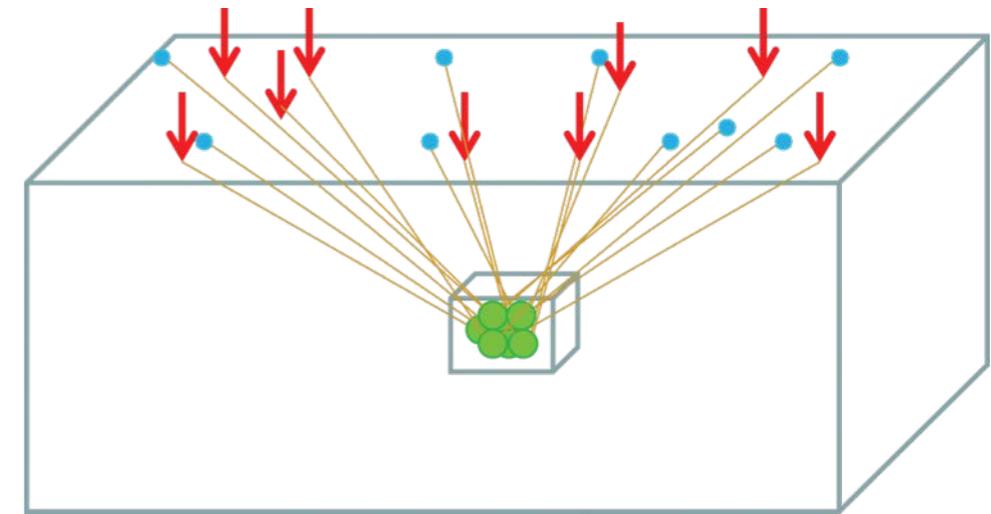
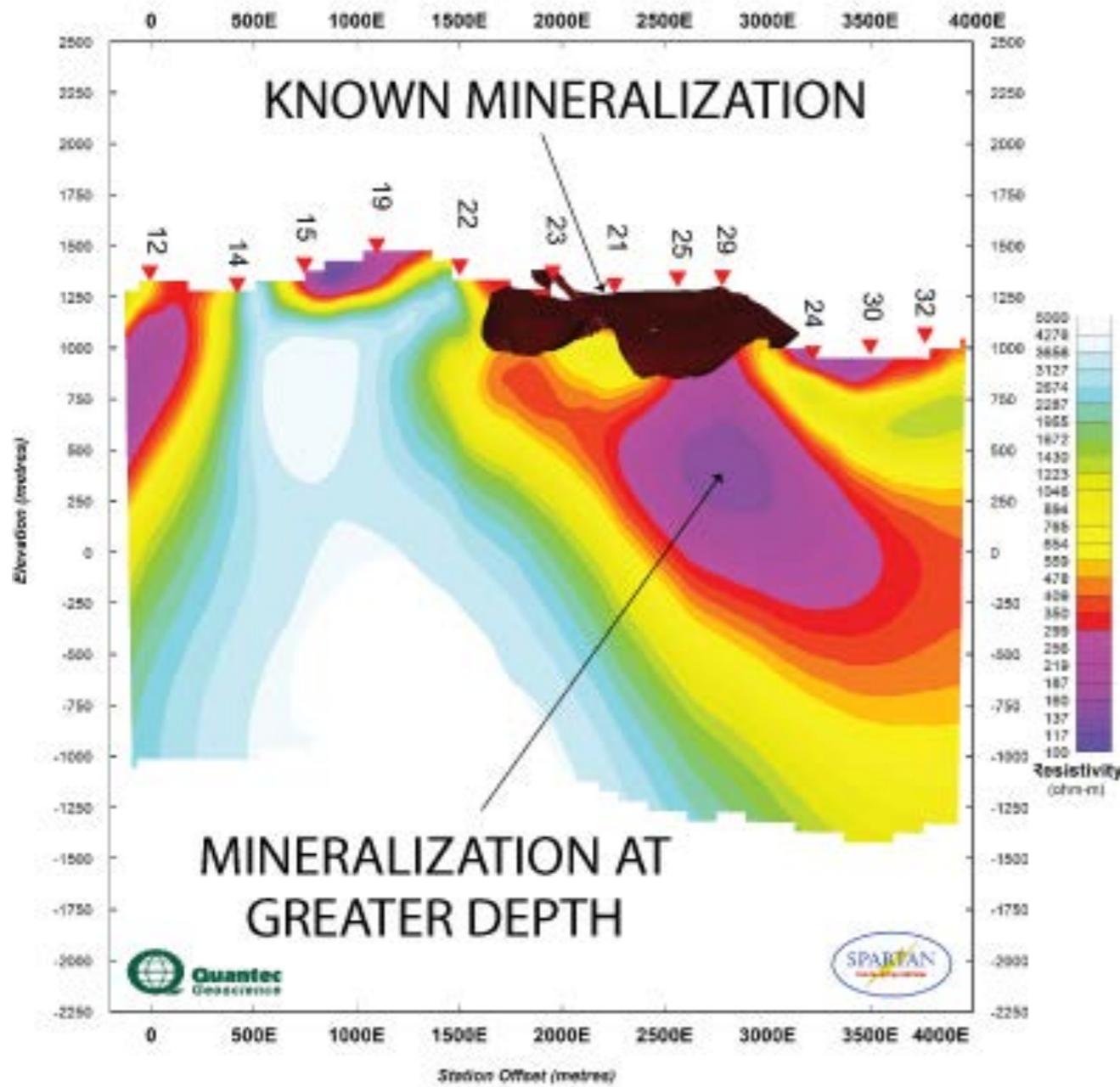


Aéroportée - Satellitaire



ASTER

Géophysique profonde, 3D



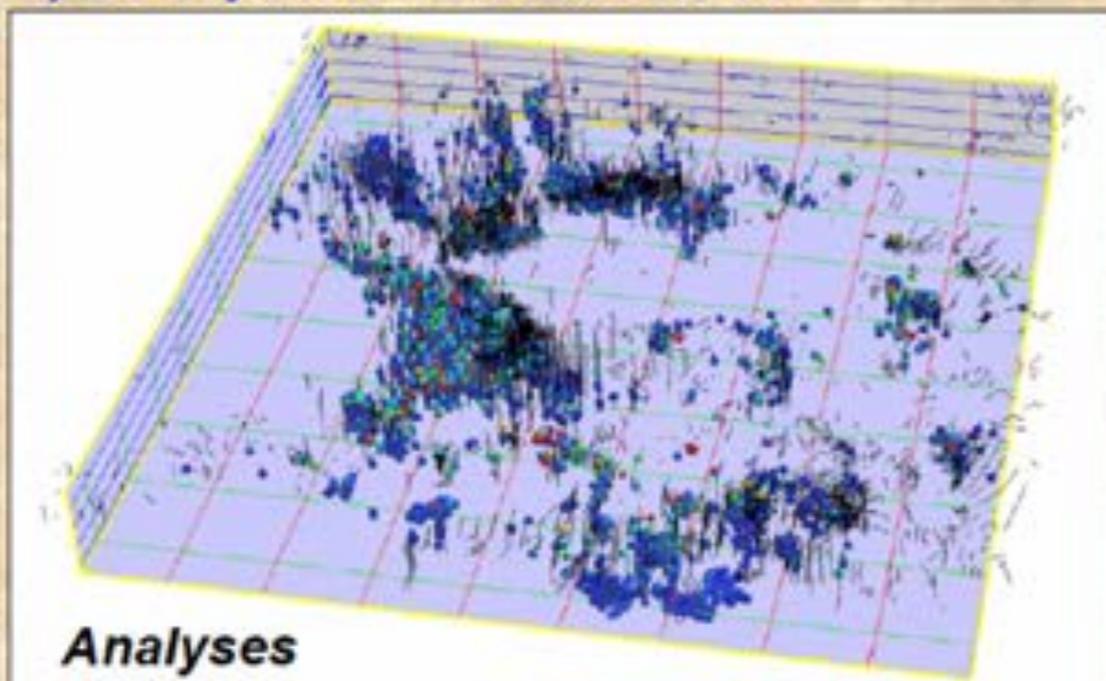


ALEXIS

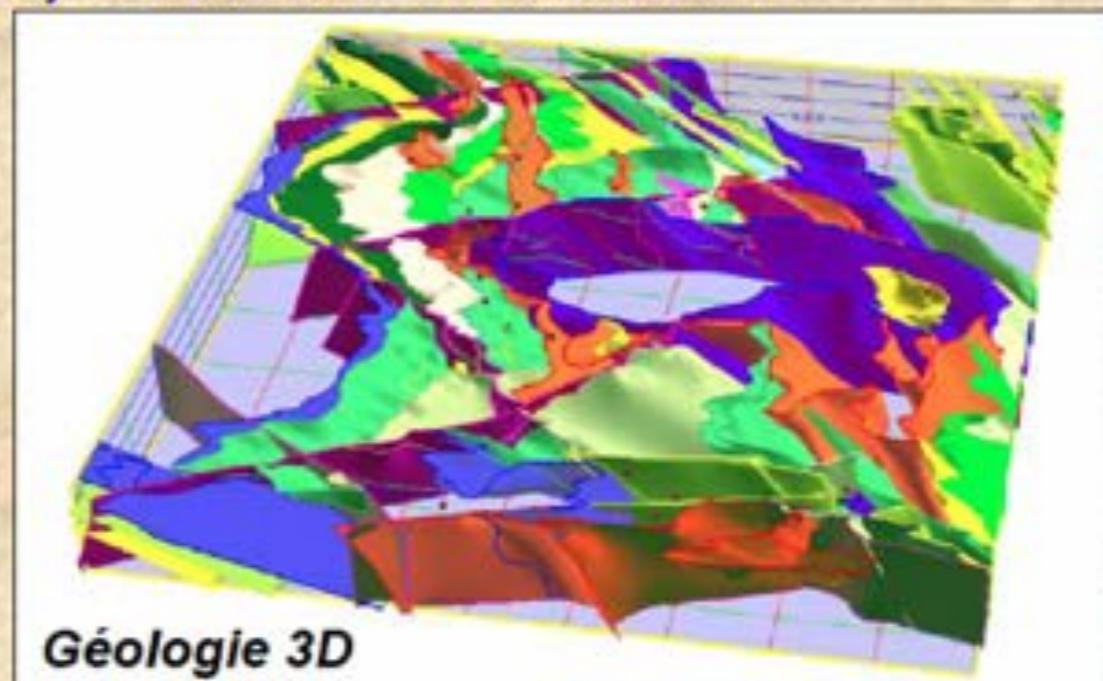
Gocad - La modélisation en 3D

Une nouvelle approche d'intégration

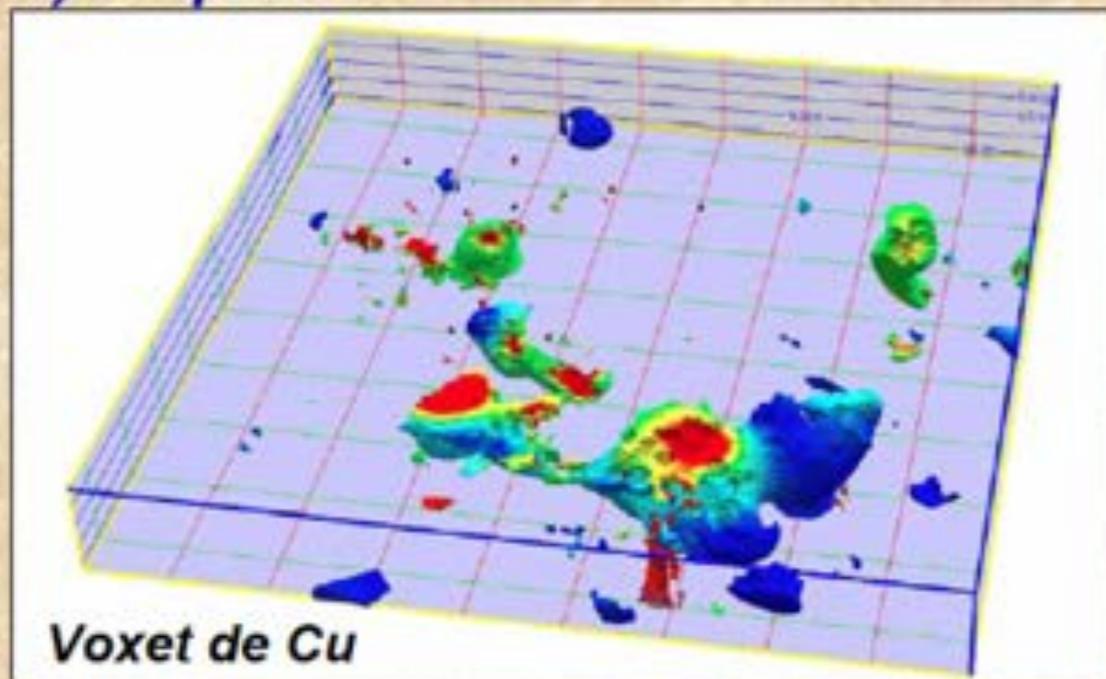
1) Compilation de données



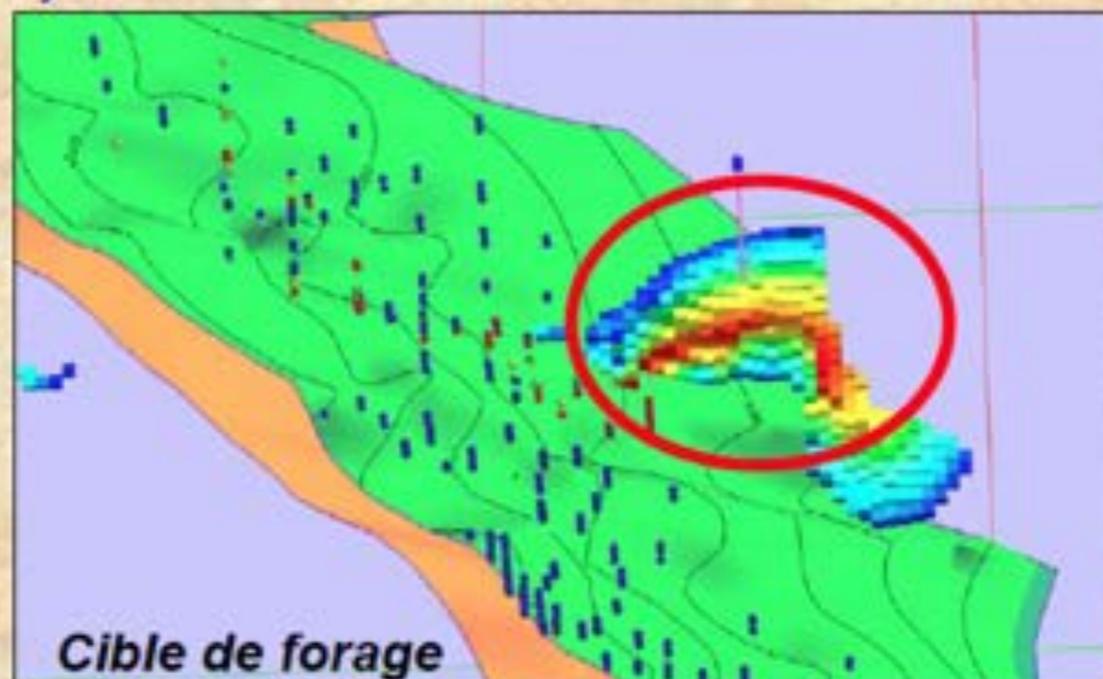
2) Construction du modèle



3) Requêtes



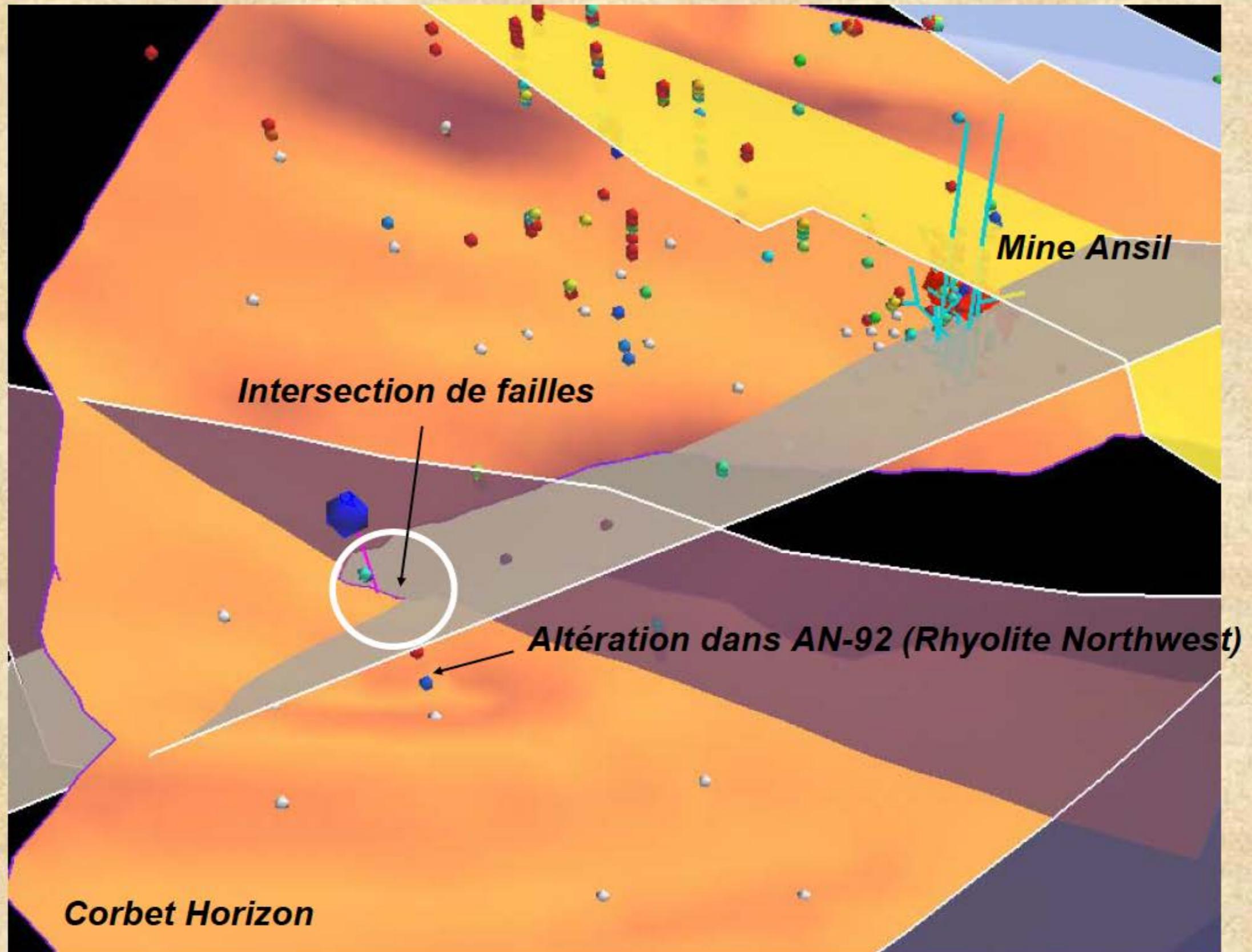
4) Génération de cible



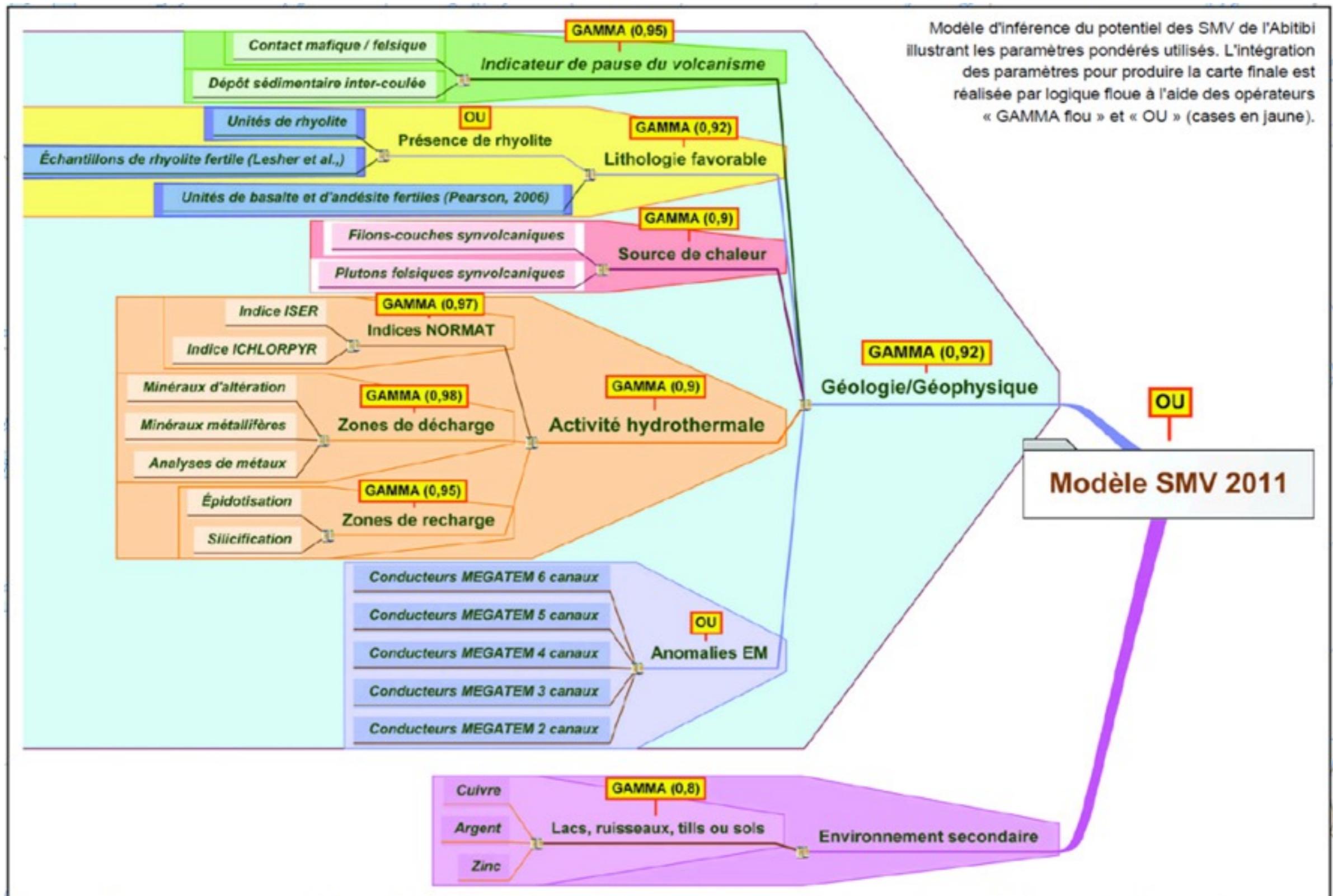


ALEXIS

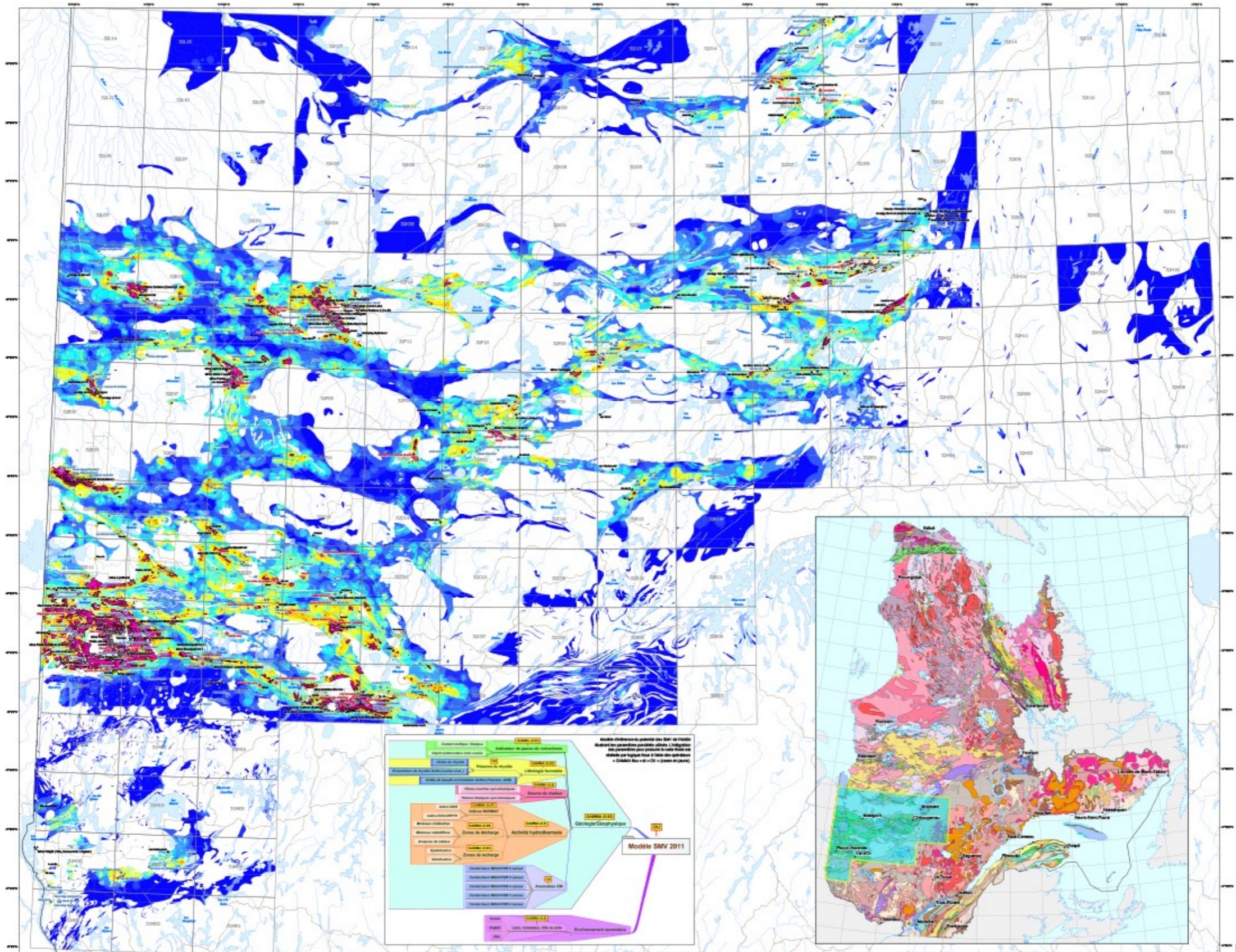
Cible Gocad P-30



Estimation du potentiel minéral



Estimation du potentiel minéral



Conclusions

- **Besoin croissant en ressources minérales**
- **Quoi: basse teneur, ressource plus grande, poly-substances**
- **Où: régions frontières, sous couverture, en profondeur, océans**
- **Comment:**
 - **Modèles géologiques raffinés**
 - **Méthodes analytiques (géochimie, géophysique) plus sensibles, précises**
 - **Intégration dans des modèles 3D et systèmes d'information géographique**



Remerciements

