RÉPARTITION DE L'OR DANS LES USINES DE TRAITMENT:

UN GRAIN À LA FOIS

Réjean Girard

IOS Services Géoscientifiques Inc

L'innovation comme motivation

IOS Services Géoscientifiques inc

Mettons les choses en perspective!

AGNICO EAGLE

AGNICO EAGLE

IOS

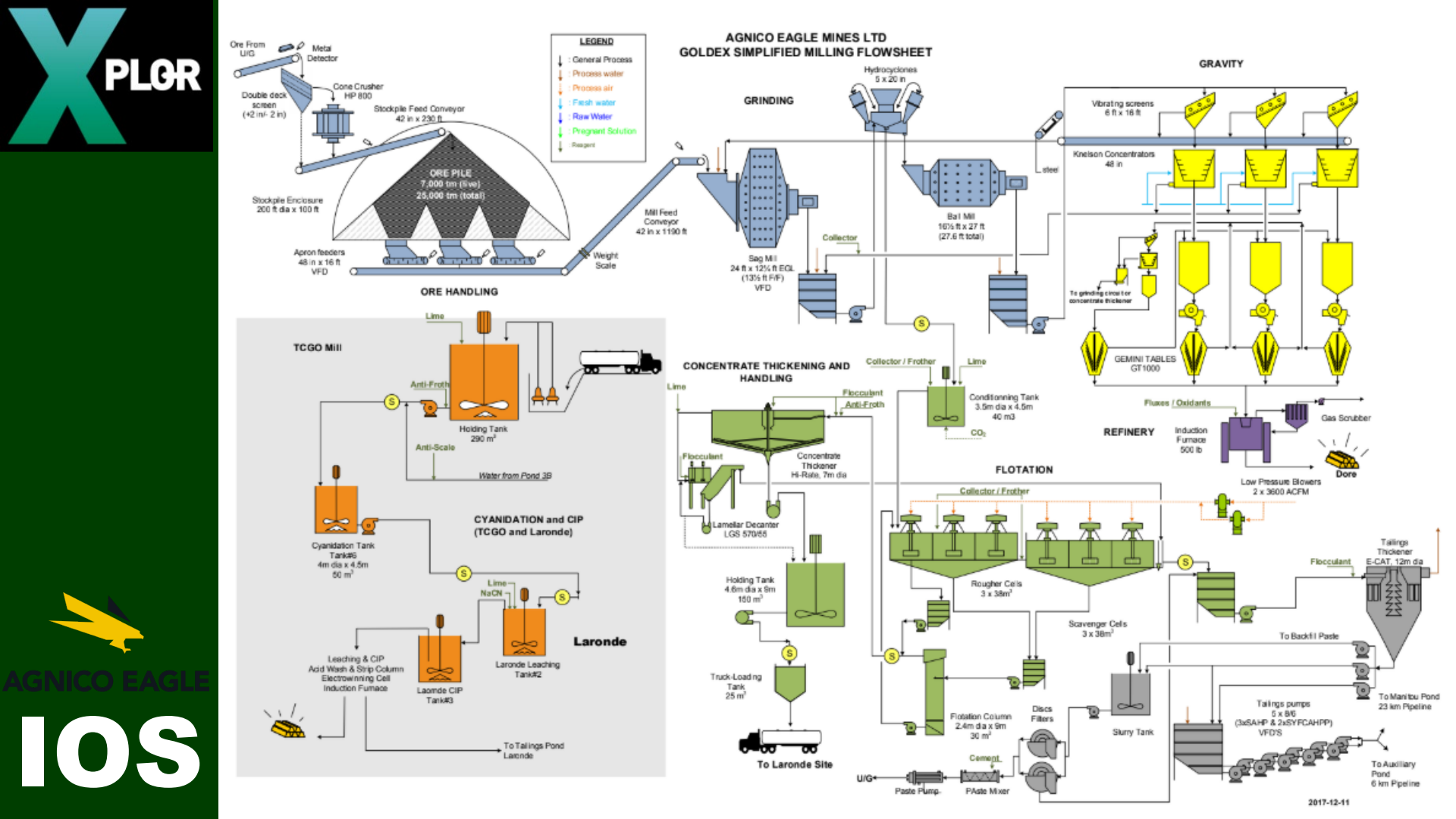
Mine Goldex : 126 000 oz., 1.6 g/t en 2018-2019

Mettons les choses en perspective!

Résidus de la mine Goldex :

(Parc à résidus Manitou du MERN)

5 400 oz./ year, 0.07 g/t: 10.8 m$


AGNICO EAGLE MINES LTD
GOLDEX SIMPLIFIED MILLING FLOWSHEET
LEGEND
General Process
Process water
Process air
Fresh water
Raw Water
Pregnant Solution
Reagent
Ore From U/G
Metal Detector
Double deck screen (+2 in/- 2 in)
Cone Crusher HP 800
Stockpile Feed Conveyor 42 in x 230 ft
ORE PILE
7,000 tm (live)
25,000 tm (total)
Stockpile Enclosure 200 ft dia x 100 ft
Apron feeders 48 in x 16 ft VFD
Weight Scale
Mill Feed Conveyor 42 in x 1190 ft
ORE HANDLING
GRINDING
Hydrocyclones 5 x 20 in
Sag Mill 24 ft x 12½ ft EGL (13½ ft F/F) VFD
Ball Mill 16½ ft x 27 ft (27.6 ft total)
Collector
GRAVITY
Vibrating screens 6 ft x 16 ft
Knelson Concentrators 48 in
To grinding circuit or concentrate thickener
GEMINI TABLES GT1000
TCGO Mill
Lime
Anti-Froth
Holding Tank 290 m³
Anti-Scale
Water from Pond 3B
CYANIDATION and CIP (TCGO and Laronde)
Cyanidation Tank Tank#6 4m dia x 4.5m 50 m³
Lime
NaCN
Laronde Leaching Tank#2
Laronde CIP Tank#3
Laronde
Leaching & CIP Acid Wash & Strip Column Electrowinning Cell Induction Furnace
To Tailings Pond Laronde
CONCENTRATE THICKENING AND HANDLING
Collector / Frother
Lime
Flocculant
Anti-Froth
Conditionning Tank 3.5m dia x 4.5m 40 m3
CO₂
Concentrate Thickener Hi-Rate, 7m dia
Lamellar Decanter LGS 570/65
Holding Tank 4.6m dia x 9m 150 m³
Truck-Loading Tank 25 m³
To Laronde Site
REFINERY
Fluxes / Oxidants
Induction Furnace 500 lb
Gas Scrubber
Dore
Low Pressure Blowers 2 x 3600 ACFM
FLOTATION
Collector / Frother
Rougher Cells 3 x 38m³
Scavenger Cells 3 x 38m³
Flotation Column 2.4m dia x 9m 30 m³
Discs Filters
Slurry Tank
Cement
U/G
Paste Pump
PAste Mixer
Tailings Thickener E-CAT, 12m dia
Flocculant
To Backfill Paste
To Manitou Pond 23 km Pipeline
Tailings pumps 5 x 8/6 (3xSAHP & 2xSYFCAHPP) VFD'S
To Auxiliary Pond 6 km Pipeline
2017-12-11

Simplifions un peu!

Centrifuge

Table à secousse

Doré

Flot. sulfures.

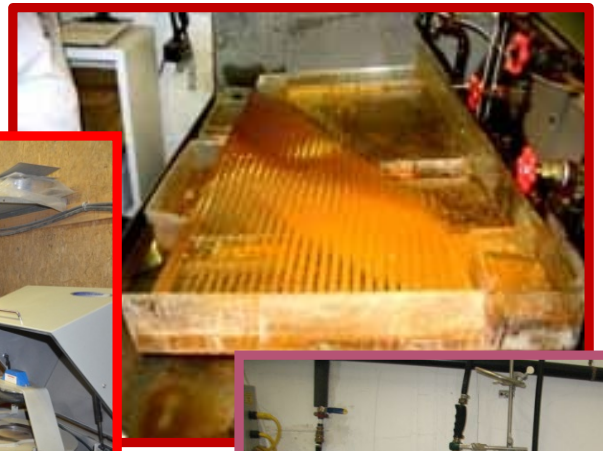
Lessivage CIP (Laronde)

Où l’or est-il perdu?

XPLOR

Les essais métallurgiques disent combien d'or vous perdez!

Les études de partition disent où!!



IOS

Comment mesure-t-on la partition (deportment) ?

QEMSCAN ou MLA ?

Non! L'or n'est pas assez abondant!

Fonctionne à peine sur la souche!

Ne fonctionne pas sur les résidus!

Nécessite une préconcentration.

Si l'essai de laboratoire réplique le procédé du moulin,

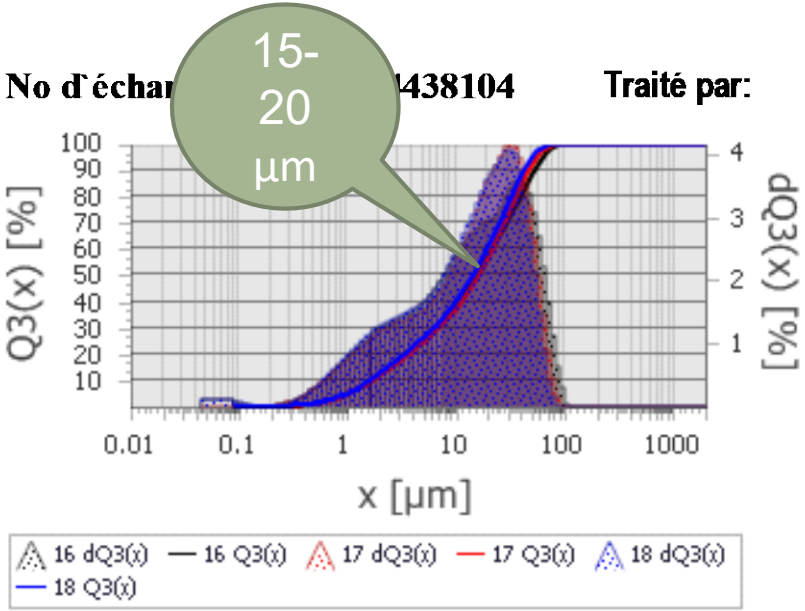
Il repliquera les problèmes du concentrateur!....

Il faut être meilleur que le concentrateur!

Résidu de Goldex: 0.07 g/t!, $\bar{\mu}$ = 15-20 µm

Espérance de 0.2 grains / pastille!!! ➔ 50 pastille / essais!

(ie: 1 semaine sur un QEMSCAN!)



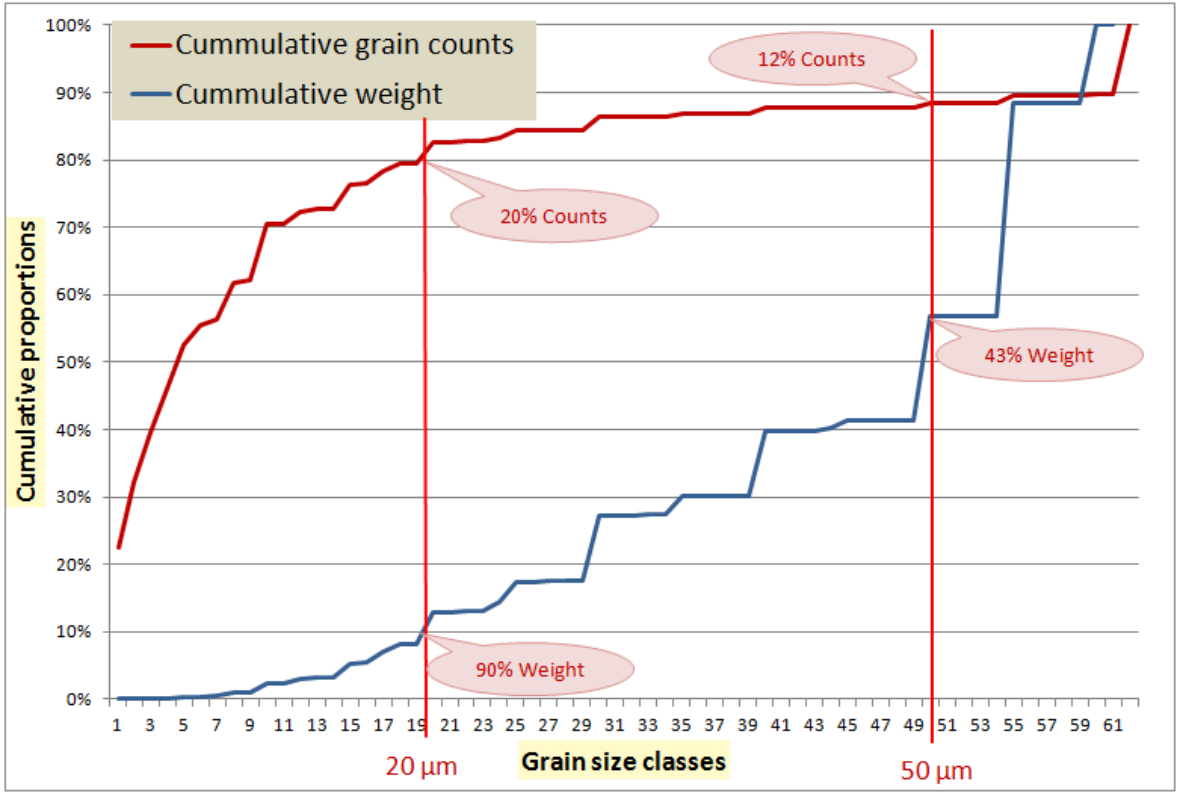
Karen (1) Date: 01-févr-17

x[µm]	Q3(x)[%]	CV[%]	M16	M17	M18
2	12	3.4	12	11.5	12.6
4	21.5	3.1	21.5	20.6	22.3
38	81.6	3.7	77.9	81.7	85.3
45	87.8	3.4	84	88.1	91.2
63	96.7	1.9	94.3	97.2	98.6
75	98.9	0.9	97.7	99.2	99.8
125	100	0	100	100	100
150	100	0	100	100	100
250	100	0	100	100	100
500	100	0	100	100	100
1000	100	0	100	100	100

Distribution granulométrique des résidus de Goldex

Le poids d'un grain est une fonction cubique de son diamètre!

Le taux de récupération est dicté par l'abondance de gros grains !

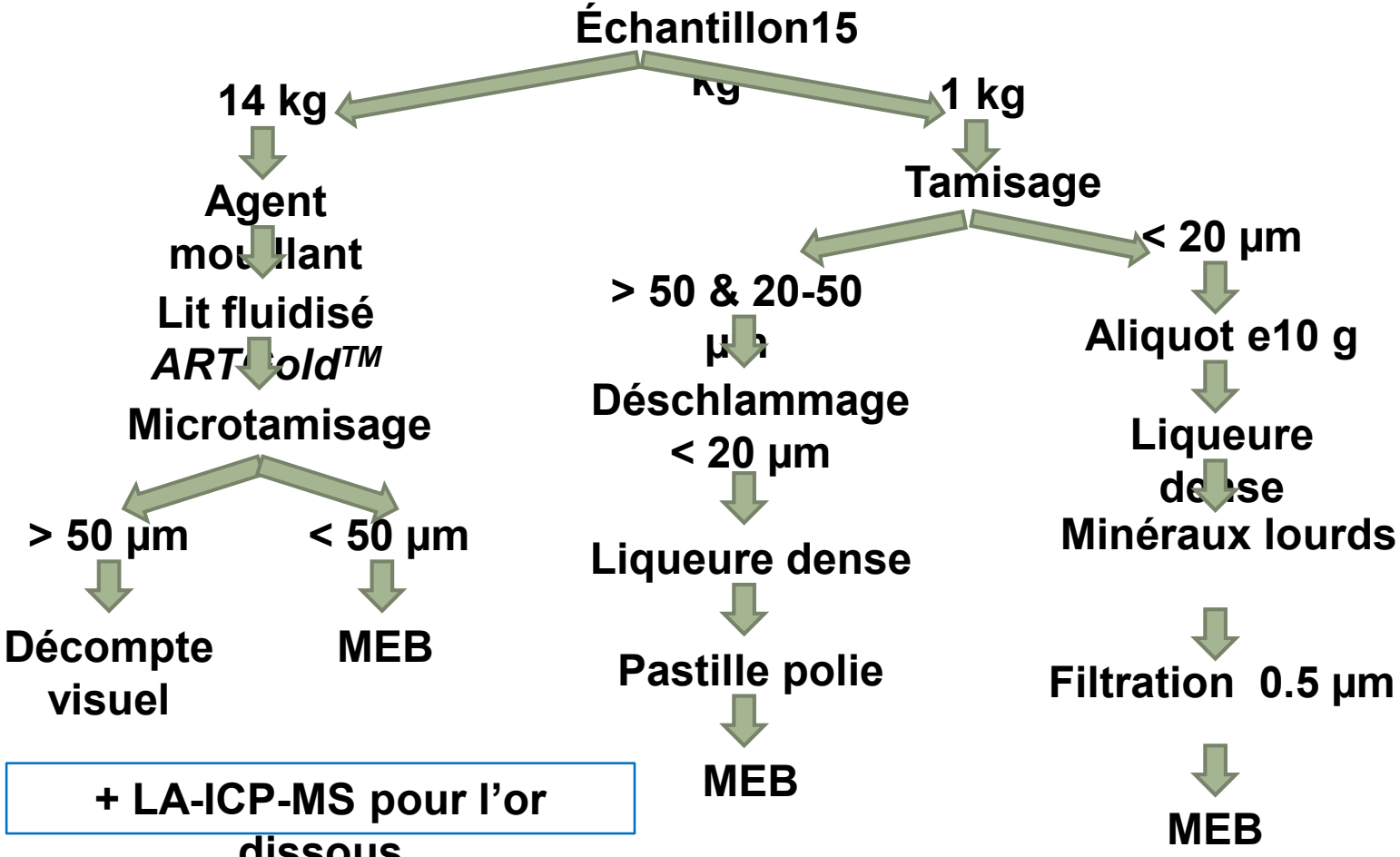


Distribution de la taille des grains selon les études pétrographiques (4316 gr

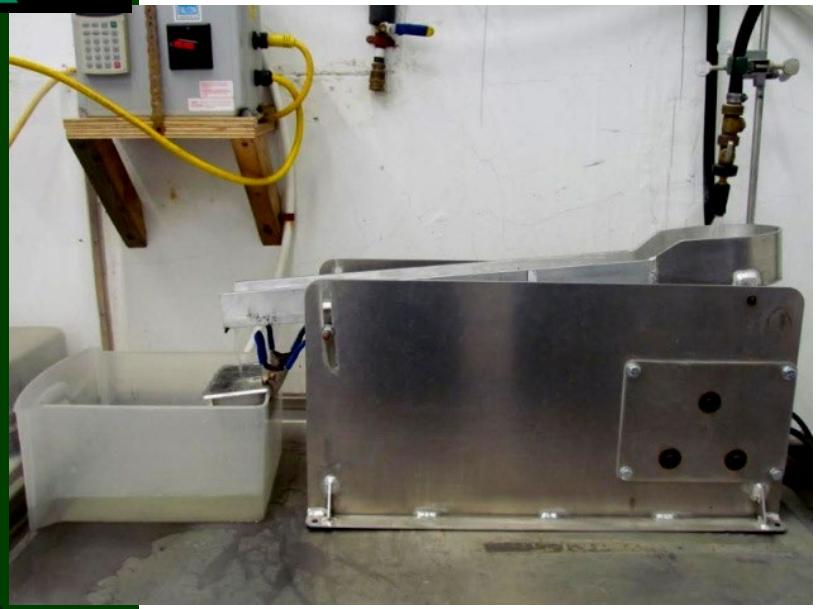
Où l'or se partitionne-t-il?

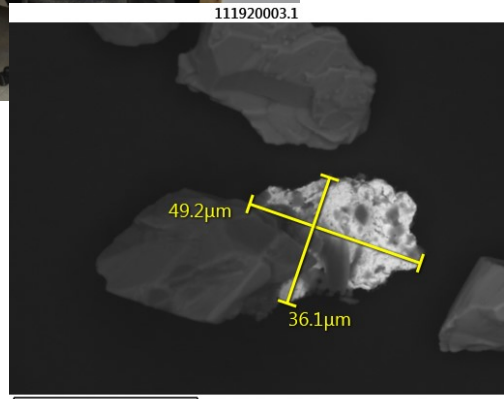
- Or grossier>20 µ ← Gravité
- Or micronisé1-20 µ ← CIP
- Minéraux et alliage ← ?
- Grains attachés ← CIP
- Grains encapsulés ← Perdu?
- Or dissous dans les sulfures ← Rôtissage
- Or dissous dans les silicates ← perdu?
- Résidus de cyanuration ← Perdu?

NOTRE APPROCHE: 100% COMPTE DE PARTICULE



Solution #1: ARTGold^{md}





AGNICO EAGLE

IOS

Développé pour le traitement des sédiments glacaires

ARTGold^{md}!

- Concentration gravimétrique à l'aide d'un lit fluidisé!
  - 80 milligrammes à partir d'un échantillon de 5-20 kg!
  - 90 % de récupération à > 70µ
  - 50% de récupération à > 20µ !
  - 10x la récupération d'une table à secousse à <20 µm

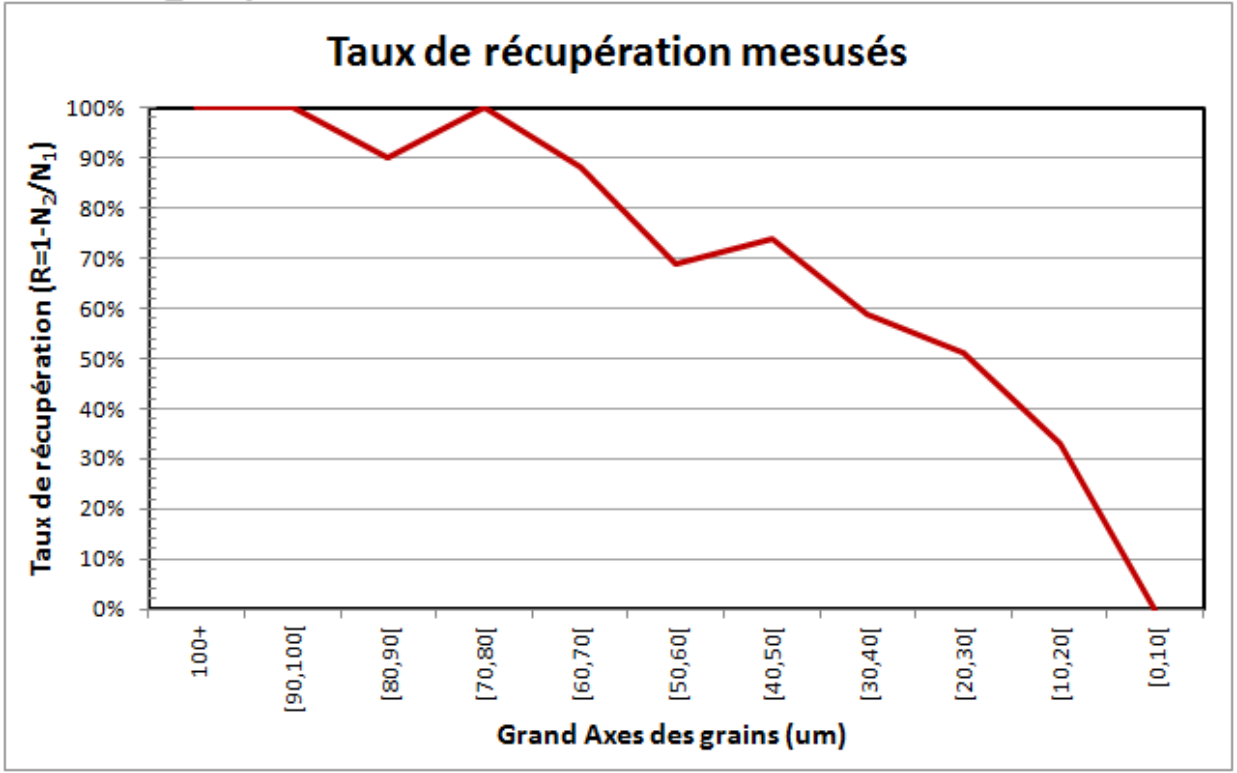
L'innovation comme motivation

Récupération sur un lit fluidisé

➔Dépendante de la granulométrie

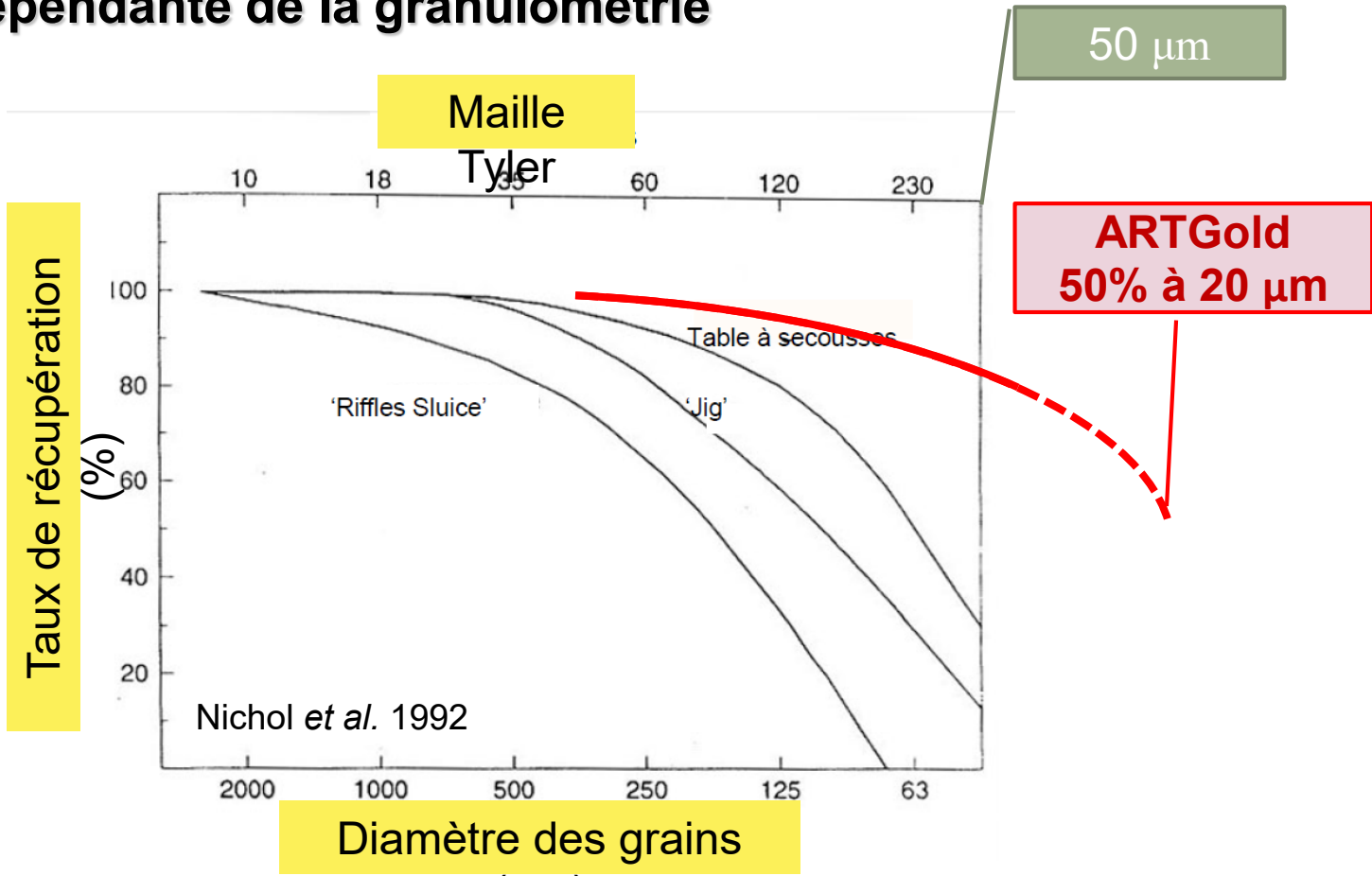
$R = 1 - N_2/N_1$

N_1^{total} = 1210 grains
N_2^{total} = 737 grains



Récupération sur un lit fluidisé

➔Dépendante de la granulométrie



Physique derrière le lit fluidisé:

$$\frac{d^2\sigma(E_i,\omega,\Theta_i)}{d\omega d\Omega_i} = \sum_{j=1}^{6} I_j$$

avec

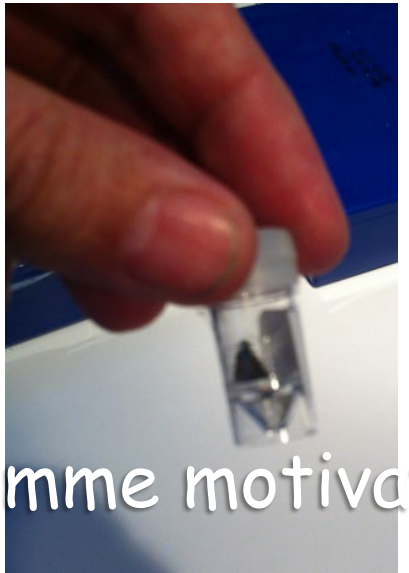
$$I_1 = \frac{2\pi A}{\sqrt{\Delta_2^2 + 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}} \ln\left(\frac{\Delta_2^2 + 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i - \sqrt{\Delta_2^2 + 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}(\Delta_1+\Delta_2) + \Delta_1\Delta_2}{-\Delta_2^2 - 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i - \sqrt{\Delta_2^2 + 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}(\Delta_1-\Delta_2) + \Delta_1\Delta_2}\right)$$
$$\times\left[1 + \frac{c\Delta_2}{p_f(E_i - cp_i\cos\Theta_i)} - \frac{p_i^2c^2\sin^2\Theta_i}{(E_i - cp_i\cos\Theta_i)^2} - \frac{2\hbar^2\omega^2p_f\Delta_2}{c(E_i - cp_i\cos\Theta_i)(\Delta_2^2 + 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i)}\right],$$

$$I_2 = -\frac{2\pi Ac}{p_f(E_i - cp_i\cos\Theta_i)} \ln\left(\frac{E_f + p_fc}{E_f - p_fc}\right),$$

$$I_3 = \frac{2\pi A}{\sqrt{(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 + 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}}$$
$$\times \ln\left(\left((E_f + p_fc)(4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i(E_f - p_fc) + (\Delta_1+\Delta_2)((\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)\right.\right.$$
$$\left.\left. - \sqrt{(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 + 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}))\right)\left((E_f - p_fc)(4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i(-E_f - p_fc)\right.$$
$$\left. + (\Delta_1-\Delta_2)((\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc) - \sqrt{(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 + 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}))\right)^{-1}\Bigg)$$
$$\times\left[-\frac{(\Delta_2^2 + 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i)(E_f^3 + E_fp_f^2c^2) + p_fc(2(\Delta_1^2 - 4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i)E_fp_fc + \Delta_1\Delta_2(3E_f^2 + p_f^2c^2))}{(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 + 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i}\right.$$
$$- \frac{c(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)}{p_f(E_i - cp_i\cos\Theta_i)}$$
$$- \frac{4E_i^2p_f^2(2(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 - 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i)(\Delta_1E_f + \Delta_2p_fc)}{((\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 + 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i)^2}$$
$$\left. + \frac{8p_i^2p_f^2m^2c^4\sin^2\Theta_i(E_i^2 + E_f^2) - 2\hbar^2\omega^2p_i^2\sin^2\Theta_ip_fc(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc) + 2\hbar^2\omega^2p_fm^2c^3(\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)}{(E_i - cp_i\cos\Theta_i)((\Delta_2E_f + \Delta_1p_fc)^2 + 4m^2c^4p_i^2p_f^2\sin^2\Theta_i)}\right],$$

Comptage de grains

- > 50 µm : Examen optique
  - Stéréomicroscope apochromatique validé au MEB
- < 50 µm : MEB automatisé



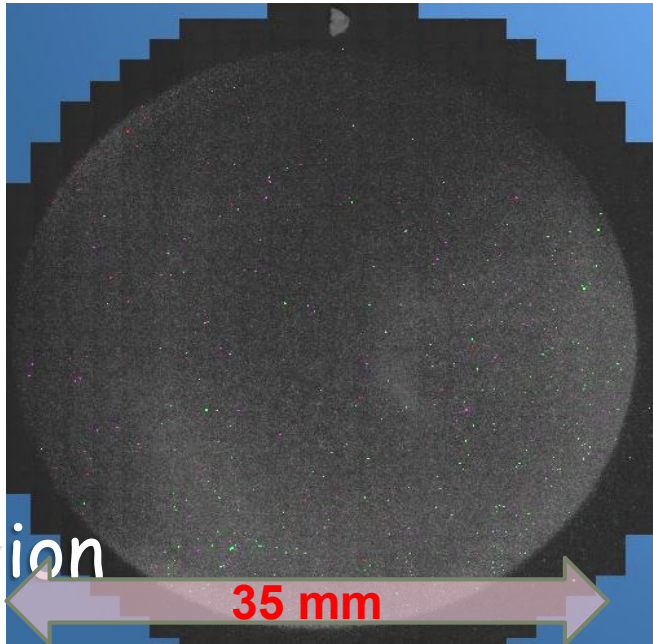
L'innovation comme motivat

AGNICO EAGLE

IOS

Reconnaissance de phase automatisée

- **<50 µm**
  - **Mosaïque d'image en rétrodiffusion**
  - **Détection des phases lourdes >5 g/cc**
  - **Analyse qualitative EDS-SDD et classification**
  - **Image BSE haute résolution**
  - **Analyse EDS Semi-quantitative**
  - **Classification de forme (IA)**
  - **1 heure/échantillon**
  - **2-10,000,000 grains/échantillons**
  - **Taux de détection >95%**



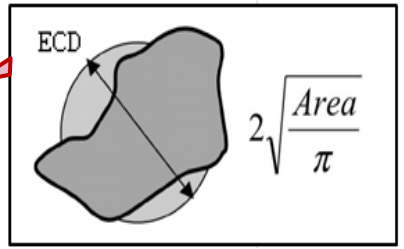
AGNICO EAGLE

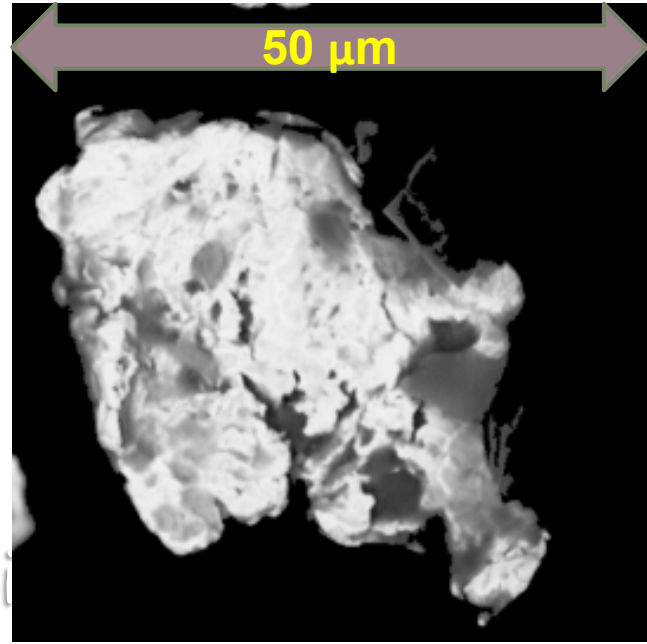
IOS

L'innovation comme motivation

Mesures acquises pour chaque grain

- Compte de grains
- Taille (D1 et D2: µm)
- ECD
- Superficie: nombre de pixels ➔ µm
- Image rétrodiffusion
  - Morphologie
  - Facteur de Corey
- Analyse chimique
  - Au, Ag, Cu, Pt, Pd, Ir, Os, Pb, Bi, etc
  - Finesse





AGNICO EAGLE

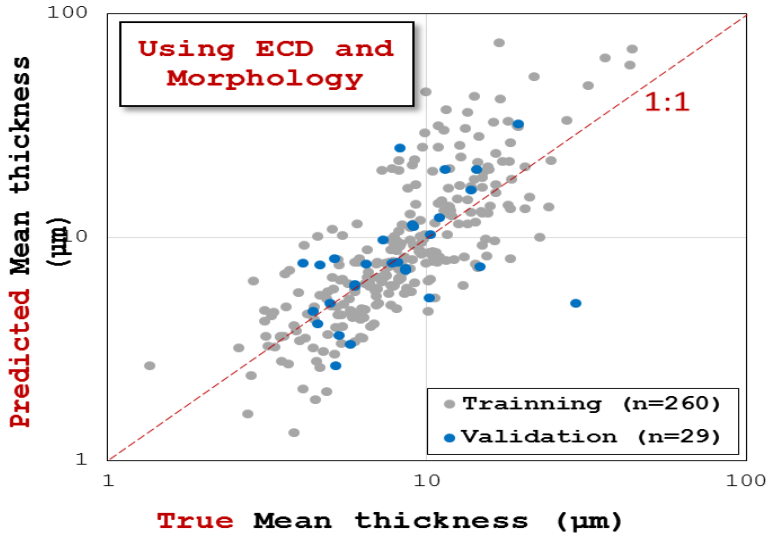
IOS

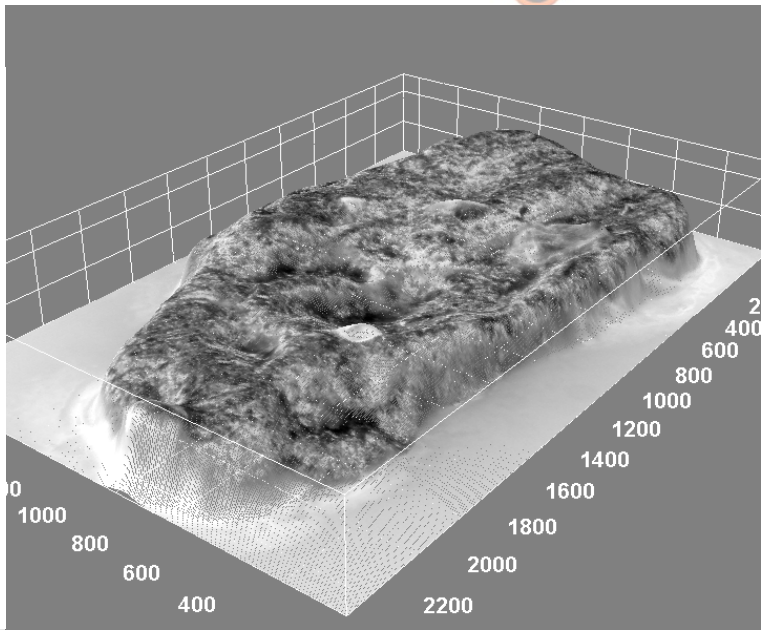
L'innovation comme motivati

Facteur de Corey

- Actuellement: Le facteur de Corey factor est arbitraire selon la forme
- Une approche en intelligence artificielle est en cours de développement
  - Milliers de reconstruction 3-D images par photogrammétrie sur le MEB et mesures optiques par empilement d'images au foyer.

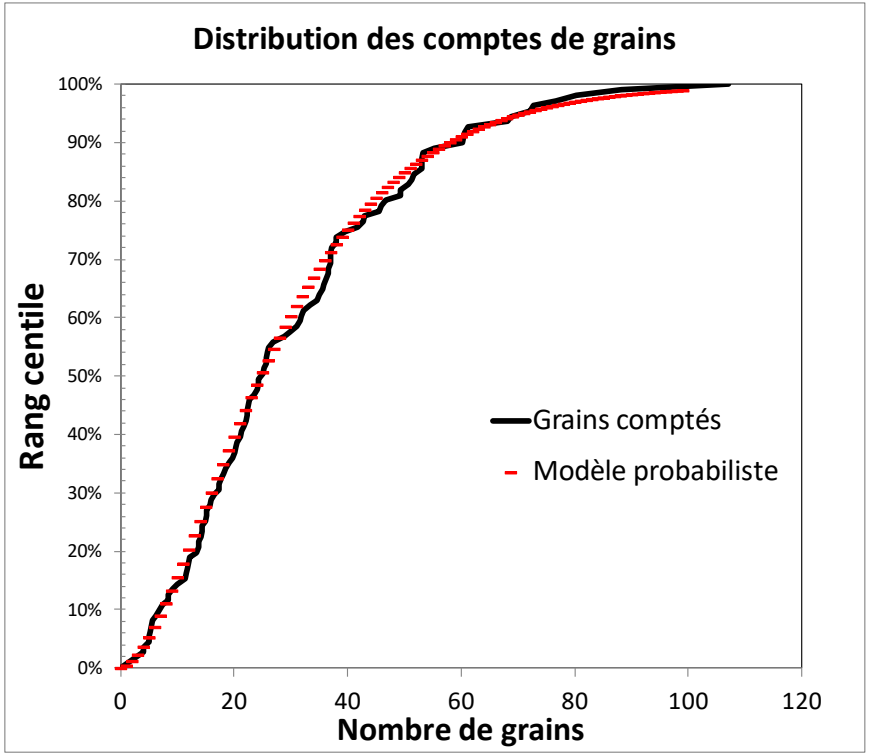
- $C_{factor} = f(D_1, D_2, \text{texture}, \ldots)$

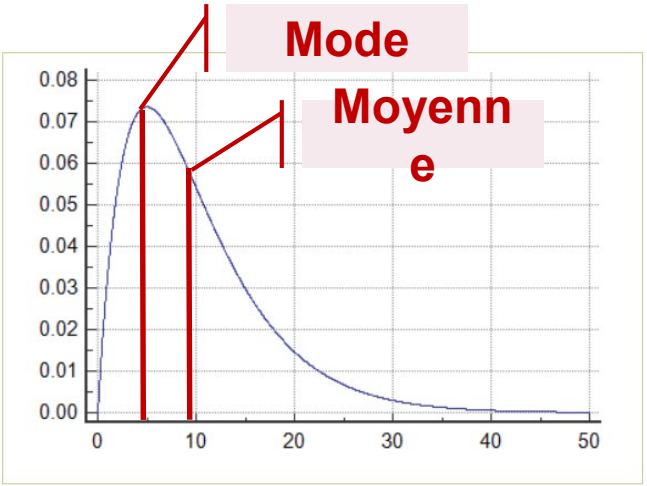




Facteur probabiliste

- Si on compte les grains sur une série d'aliquotes de pulpe, le nombre de grains obtenus suivra une distribution d'Erlang similaire à celle-ci.





Facteur probabiliste

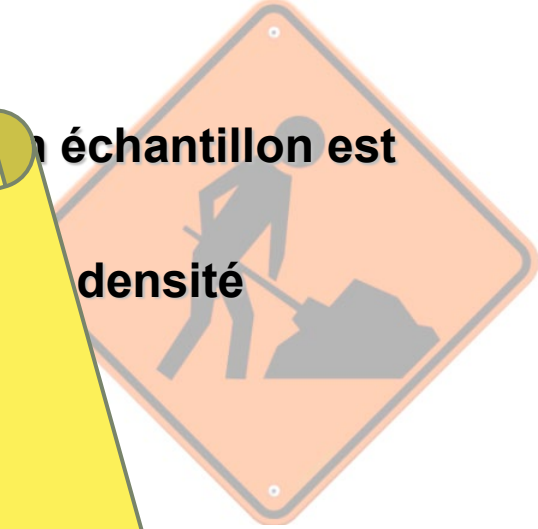
- La probabilité de récolter le grains #1 dans un échantillon est égale à la probabilité de récolter le grain #2.
- Ceci répond rigoureusement à une fonction de densité probabiliste de **Erlang**!

$$f(x;k,\lambda) = \frac{\lambda^k x^{k-1} e^{-\lambda x}}{(k-1)!} \quad \text{for } x, \lambda \geq 0,$$

- Moyenne $\mu = K/\lambda$ Mode $\pi = (K-1)/\lambda$
- Mode/moyenne = (K-1)/ K K = Degré de liberté (entier positif)
  - Mode / Moyenne = 0, 0.5, **0.66**, 0.75, etc
- Le nombre de grains observé est assumé comme le mode de la distribution et non sa moyenne, donc un facteur de correction est requis, lequel dépend du degré de liberté du système, lequel est une constante.

Facteur probabiliste

- La probabilité de récolter le grains #1 dans [illegible] échantillon est égale à la probabilité de récolter le grain #[illegible]
- Ceci répond rigoureusement à [illegible] densité probabiliste de Erlang
- M[illegible]
- Mo[illegible] de liberté (entier positif)
  - [illegible], 0.5, 0.66, 0.75, etc
- Le no[illegible] grains observé est assumé comme le mode de la dis[illegible]ution et non sa moyenne, donc un facteur de correction est requis, lequel dépend du degré de liberté du système, lequel est une constante.



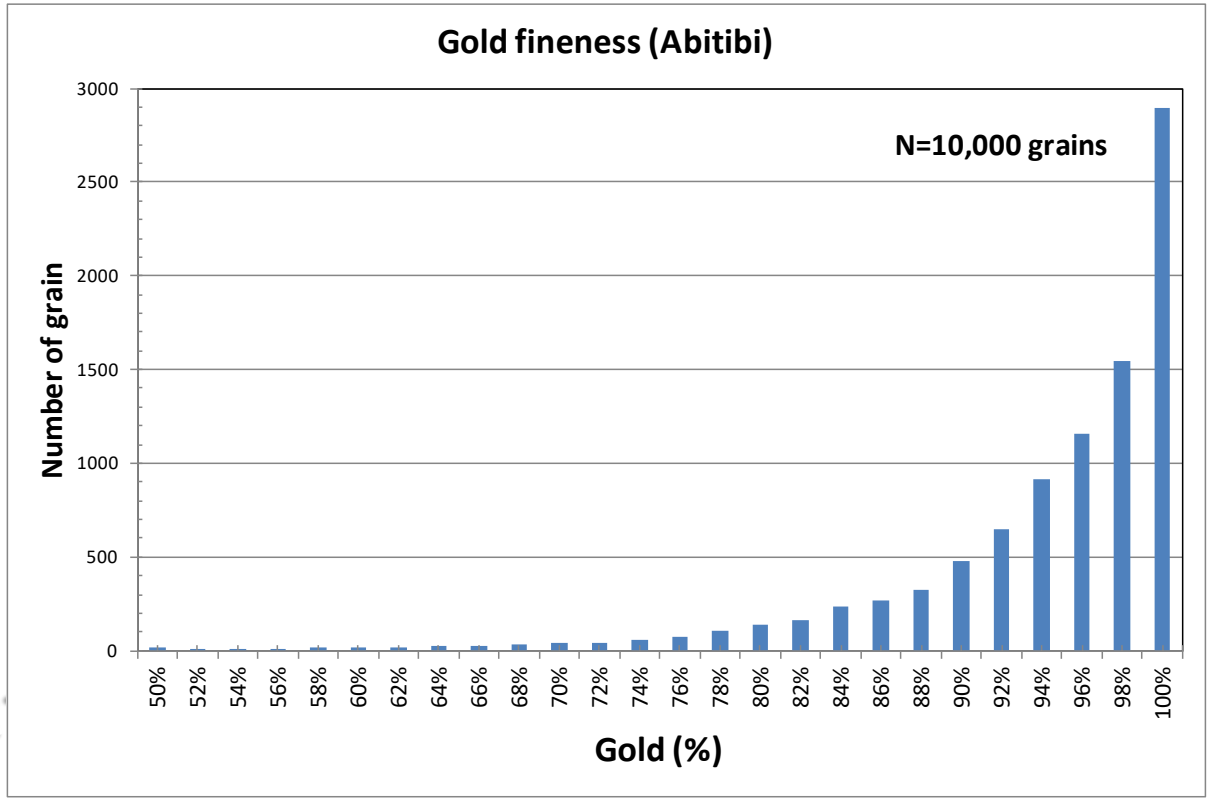
L'approche probabiliste en géochimie Québec-Mines

AGNICO EAGLE

IOS

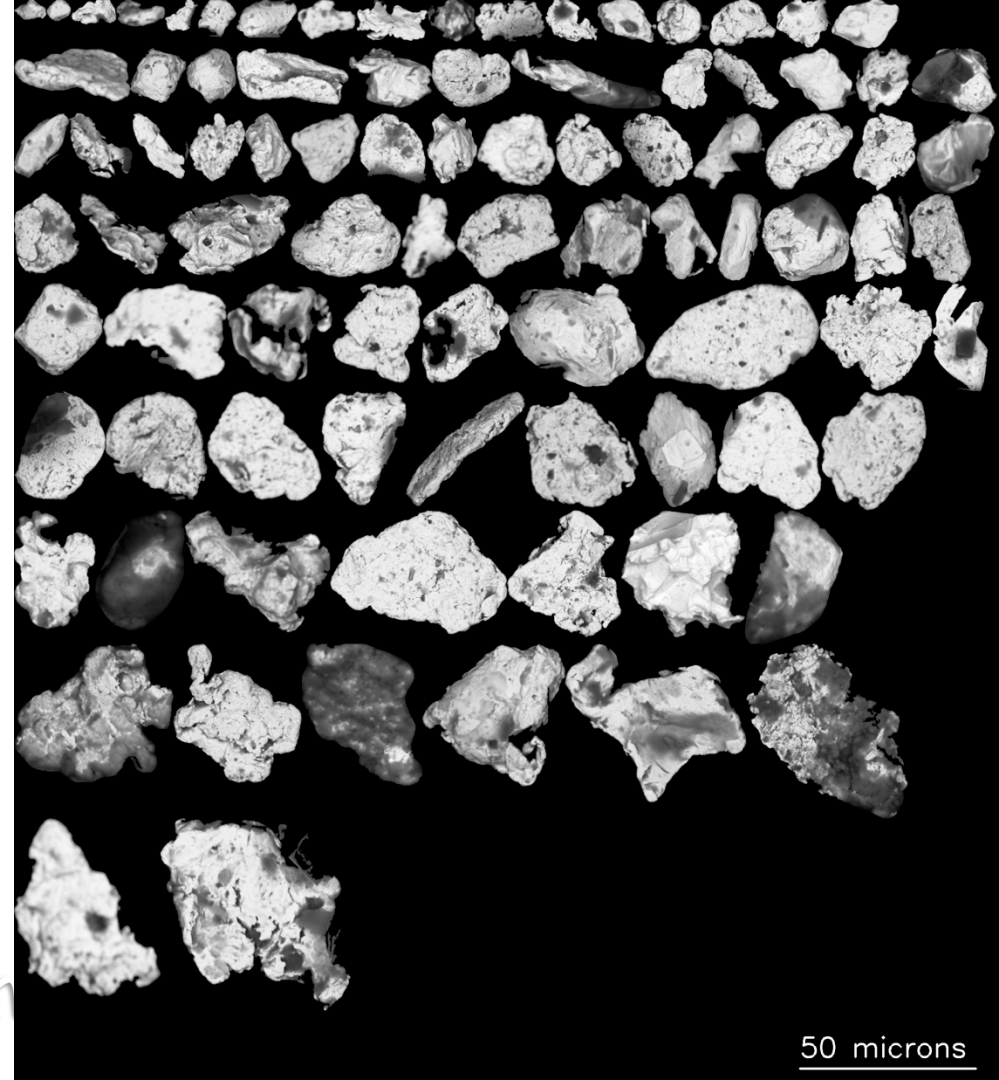
Distribution de la Finesse (‰ Au, 1-‰ Ag,Cu,etc)

- Mesurée sur chaque grains et utilisée pour le bilan massique.
- Correction de la densité selon la composition



Résidus de Goldex

- 2.5 kilograms
- 70 ppb
- 89 grains récupérés
- Résolution 1.6 µ
- Teneur calculée: 3.5-4.0 ppb
- Répartition:
  - Brute: 8%
  - Corrigée: 15%
- Taille: 6-58 µ

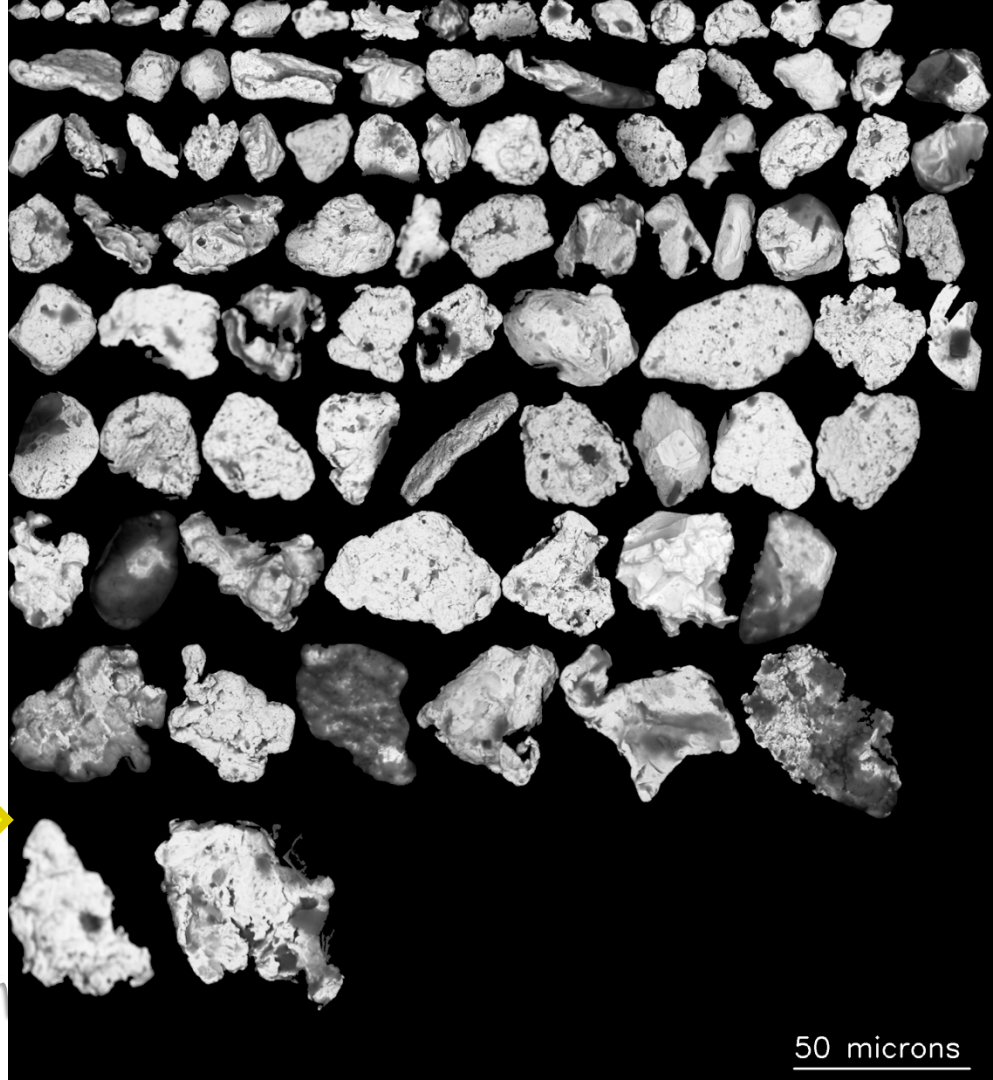


XPLOR
AGNICO EAGLE
IOS
L'innovation comm

Résidus de Goldex

- 2.5 kilograms
- 70 ppb
- 89 grains récupérés
- Résolution 1.6 µ
- Teneur calculée: 3.5-4.0 ppb
- Répartition:

Ces grains auraient dû être récupérés par gravité ou flotation!

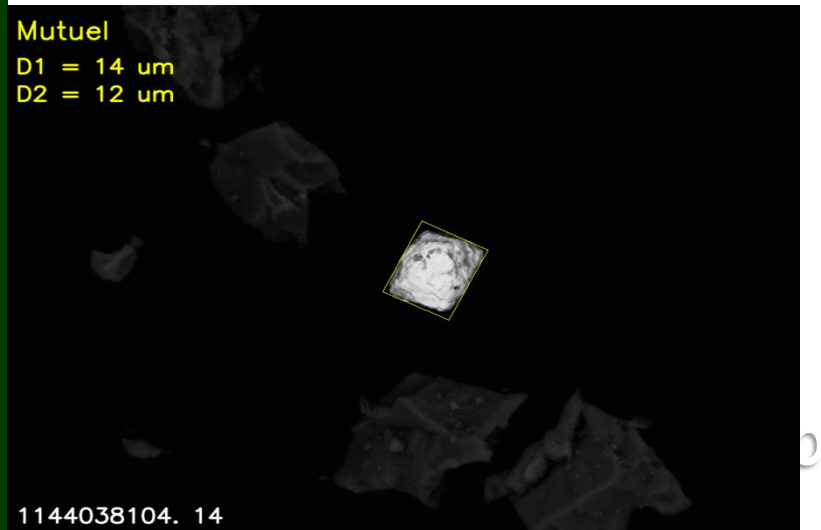


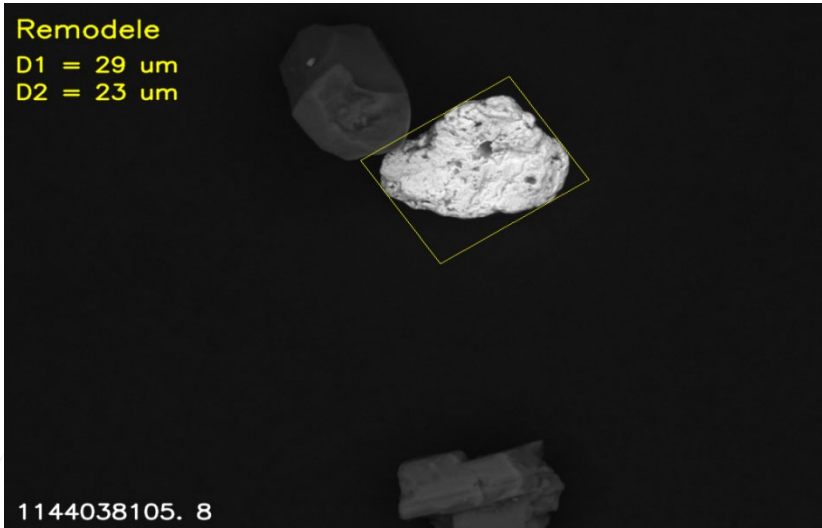
XPLOR
AGNICO EAGLE
IOS
L'innovation comm

Teneur et bilan massique: Somme des poids des grains

Poids = Σ(Surface x Épaisseur x Finesse x Densité/Récupération)

- **Surface:** $\pi\ (\sqrt{(D_1^2 x D_2^2)}/2)^2$ **ou** $\pi ECD^2/4$ ECD: Diamètre équivalent
- **Épaisseur:** $\sqrt{(D_1^2 x D_2^2)}$ **x** C_f **or** **ECD x** C_f C_f: Facteur de Corey
- **Finesse: Analyse EDS normalisée de 300,000 comptes**
- **Récupération: Calculée selon la granulométrie**
- **Densité: Corrigée pour la finesse**





Teneur, récupération et Répartition:

Teneur = Σ Masses de grains / Masse échantillon

Récupération: 1- (Teneur résidus/ Teneur souche)

Répartition = Teneur due au grain / Teneur résidus

Masse: 10^{-9} grammes

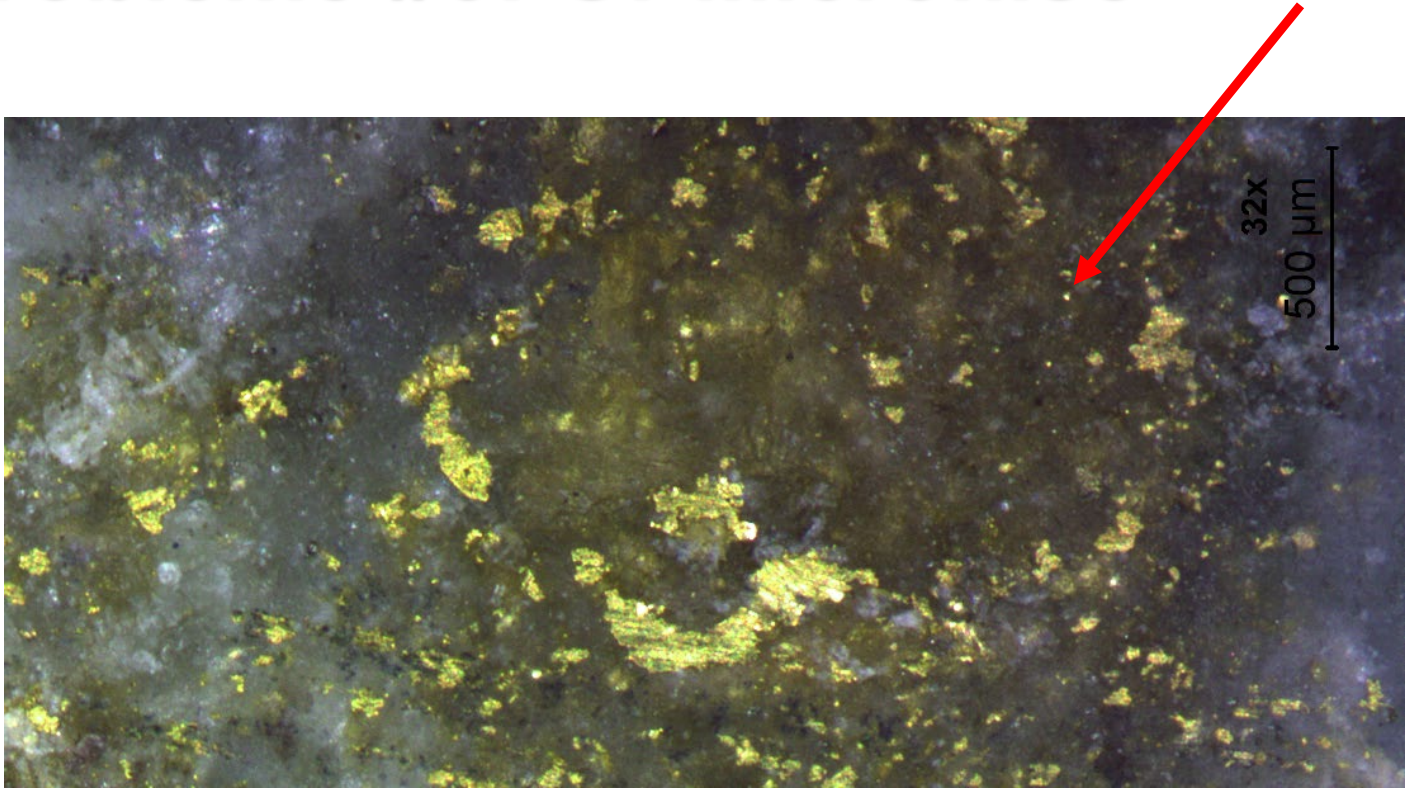
Numéro de grain	Fraction	Longueur (L)	Largeur (B)	Aire (µm2)	Morphologie	Intact	*Corey shape factor* (S_f)	Épaisseur estimée (T)	Volume estimé avec l'aire (µm3)	Volume estimé avec L x B (µm3)	Densité moyenne de l'or (g/cm3)	Masse estimée à partir de l'aire (g)	Masse estimée à partir de L x B (g)
1144038104.1	0-50 µm	19,35	16,73	245,257	Modified		0,7	12,60	3089,05	4077,703	17,64	5,44909E-08	7,19307E-08
1144038104.2	0-50 µm	23,77	14,25	204,147	Pristine	Intergranular	0,4	7,36	1502,70	2492,683	17,64	2,65076E-08	4,39709E-08
1144038104.3	0-50 µm	36,19	26,62	703,584	Modified		0,7	21,73	15287,06	20932,815	17,64	2,69664E-07	3,69255E-07
1144038104.4	0-50 µm	33,21	30,32	723,547	Modified		0,7	22,21	16069,82	22358,213	17,64	2,83472E-07	3,94399E-07
1144038104.5	0-50 µm	29,27	19,89	465,826	Modified		0,7	16,89	7868,25	9834,833	17,64	1,38796E-07	1,73486E-07
1144038104.6	0-50 µm	36,20	22,15	623,327	Indetermine		0,7	19,82	12355,12	15892,670	17,64	2,17944E-07	2,80347E-07
1144038104.7	0-50 µm	25,55	15,89	297,751	Modified		0,7	14,11	4200,58	5730,222	17,64	7,40982E-08	1,01081E-07
1144038104.8	0-50 µm	23,12	14,79	240,471	Pristine	Intergranular	0,4	7,40	1778,91	2530,182	17,64	3,13799E-08	4,46324E-08
1144038104.9	0-50 µm	23,33	21,38	416,337	Pristine	Crystaline	0,7	15,63	6508,14	7795,415	17,64	1,14804E-07	1,37511E-07
1144038104.10	0-50 µm	20,63	18,87	300,248	Modified		0,7	13,81	4146,93	5377,031	17,64	7,31518E-08	9,48508E-08
1144038104.11	0-50 µm	38,87	36,91	947,675	Pristine	Intergranular	0,4	15,11	14321,64	21571,503	17,64	2,52634E-07	3,80521E-07
1144038104.12	0-50 µm	45,44	37,47	1161,85	Pristine	Remobilized	0,1	4,13	4793,78	7023,978	17,64	8,45622E-08	1,23903E-07
1144038104.13	0-50 µm	40,84	27,68	792,878	Pristine	Intergranular	0,4	13,45	10663,53	15204,227	17,64	1,88105E-07	2,68203E-07
1144038104.14	0-50 µm	14,95	12,45	156,758	Pristine	Mutual	0,4	5,46	855,57	1016,140	17,64	1,50922E-08	1,79247E-08
1144038104.15	0-50 µm	43,37	9,65	323,502	Pristine	Remobilized	0,1	2,05	661,67	855,653	17,64	1,16719E-08	1,50937E-08
1144038104.16	0-50 µm	56,98	32,75	1306,46	Pristine	Remobilized	0,1	4,32	5642,44	8055,886	17,64	9,95327E-08	1,42106E-07
1144038104.17	0-50 µm	11,13	8,71	73,3732	Pristine	Mutual	0,4	3,94	289,08	382,233	17,64	5,09939E-09	6,74258E-09
1144038104.18	0-50 µm	13,07	12,20	106,881	Pristine	Mutual	0,4	5,05	539,81	805,189	17,64	9,52222E-09	1,42035E-08
1144038104.19	0-50 µm	24,30	15,02	228,637	Pristine	Intergranular	0,4	7,64	1747,36	2789,917	17,64	3,08235E-08	4,92141E-08
1144038104.20	0-50 µm	30,89	15,15	299,384	Pristine	Intergranular	0,4	8,65	2590,85	4050,618	17,64	4,57026E-08	7,14529E-08
1144038104.21	0-50 µm	19,02	14,59	190,767	Pristine	Intergranular	0,4	6,66	1271,07	1848,739	17,64	2,24216E-08	3,26118E-08
1144038104.22	0-50 µm	55,17	33,86	1170,64	Pristine	Remobilized	0,1	4,32	5059,98	8075,649	17,64	8,92581E-08	1,42454E-07
1144038104.23	0-50 µm	6,41	5,67	29,4391	Pristine	Crystaline	0,7	4,22	124,26	153,463	17,64	2,19191E-09	2,70709E-09
1144038104.24	0-50 µm	36,47	24,47	632,69	Pristine	Remobilized	0,1	2,99	1889,80	2664,846	17,64	3,33360E-08	4,70079E-08
1144038104.25	0-50 µm	15,69	15,40	181,04	Pristine	Mutual	0,4	6,22	1125,86	1503,157	17,64	1,98601E-08	2,65157E-08

Problème #2: Alliage et minéraux

- Au_2Bi: Maldonite, 15 g/cc
- $AuTe_2$: Calaverite, 9 g/cc
- $AuSb_2$: Aurostibine, 10 g/cc
- Ag_3AuSe_2: Fishesserite, 9 g/cc
- Cu_3Au: Auricuprite, 11 g/cc
- PGM-Au: Or blanc, 10-17 g/cc

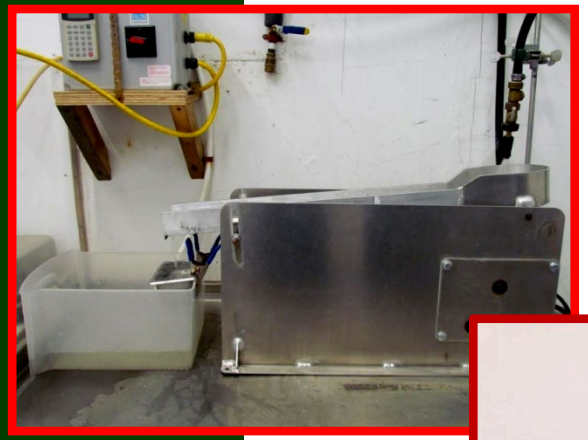
- Récupérés et classifiés avec ARTgold^{md}

Problème #3: Or Micronisé



Récupérable par cyanuration

Solution #3: Super-ARTGold^{md}

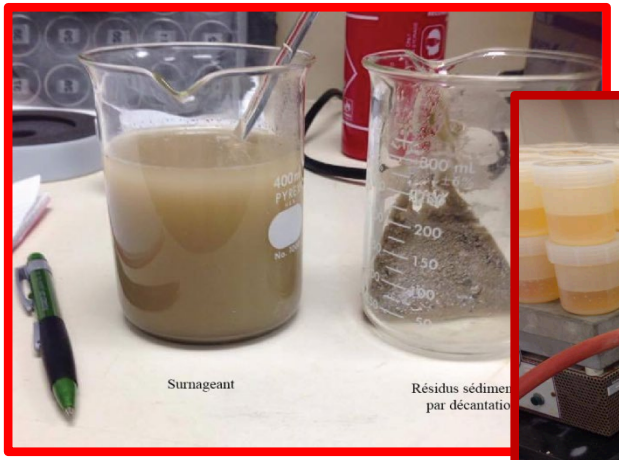


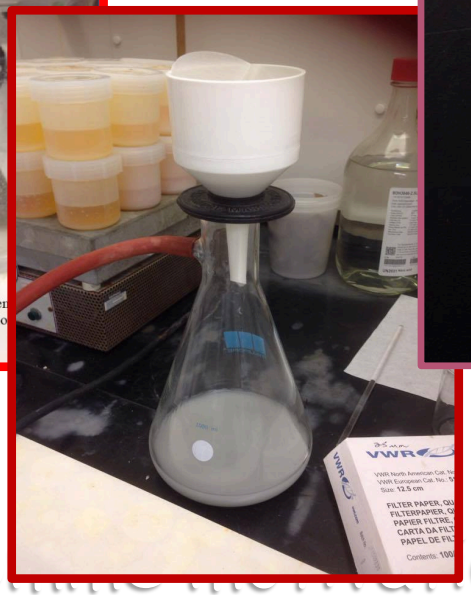
AGNICO EAGLE

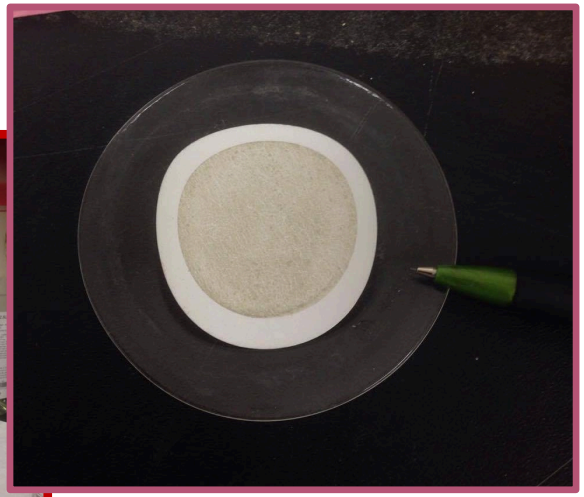
IOS

Récupération de l'or micronisé

- 0-20 µ, nécessite 10 grammes
- Séparation au CsWO4





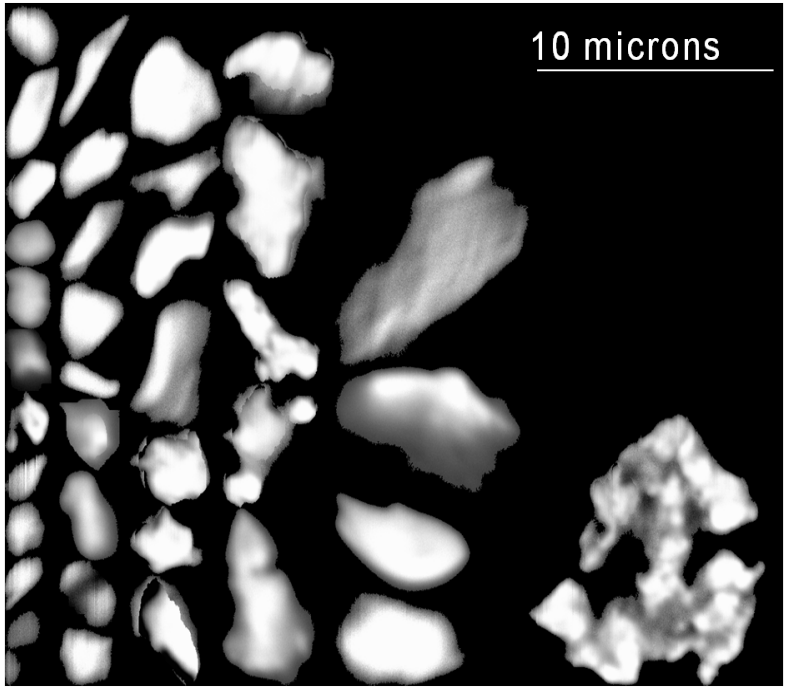


L'innovation comme tradition

Exemple:

Grains d'or micronisé récupéré des résidus de la mine Goldex

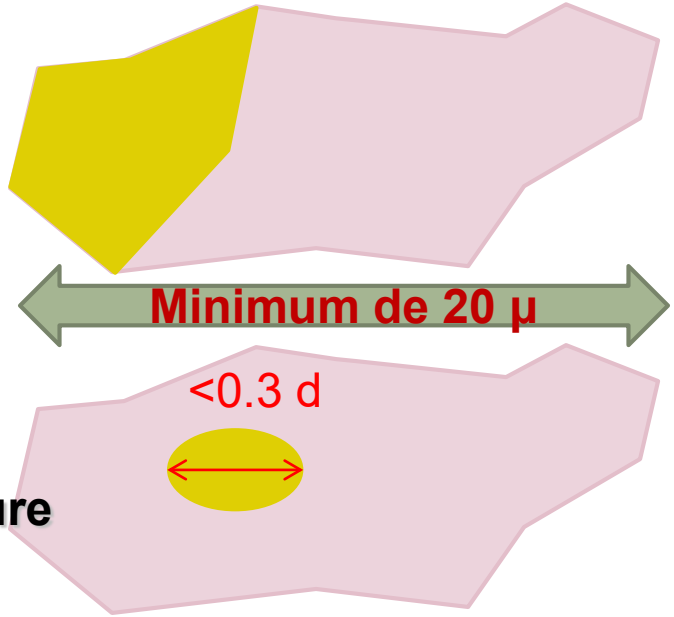
- **<20 µ**
- **Quelques grammes**
- **0.05 grammes de concentrés**
- **Résolution 0.5 µ**
- **Teneur calculé: 10 ppb**
- **Distribution: 10-40%**
- **Limite de détection: 40 ppt**



Test #1: Résidus Goldex
2.24 grammes
38 Grains d'or
1-10 microns

Problème #4: Or non libéré

- **Attaché**
  - Accessible au cyanure
  - Peut être flotté
  - Sensible au PSSA



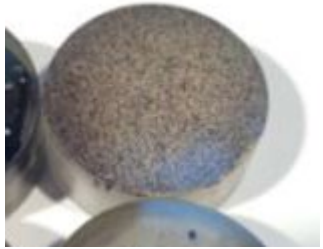
- **Encapsulé**
  - Non accessible au cyanure
  - Ne peut être flotté
  - Sensible à la granulométrie

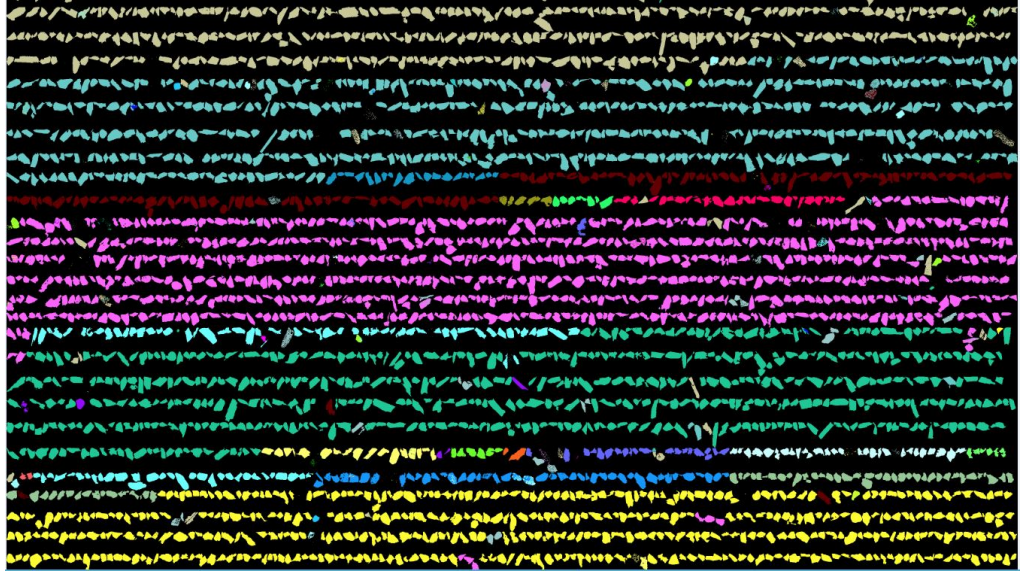
AGNICO EAGLE

IOS

L'innovation comme motivation

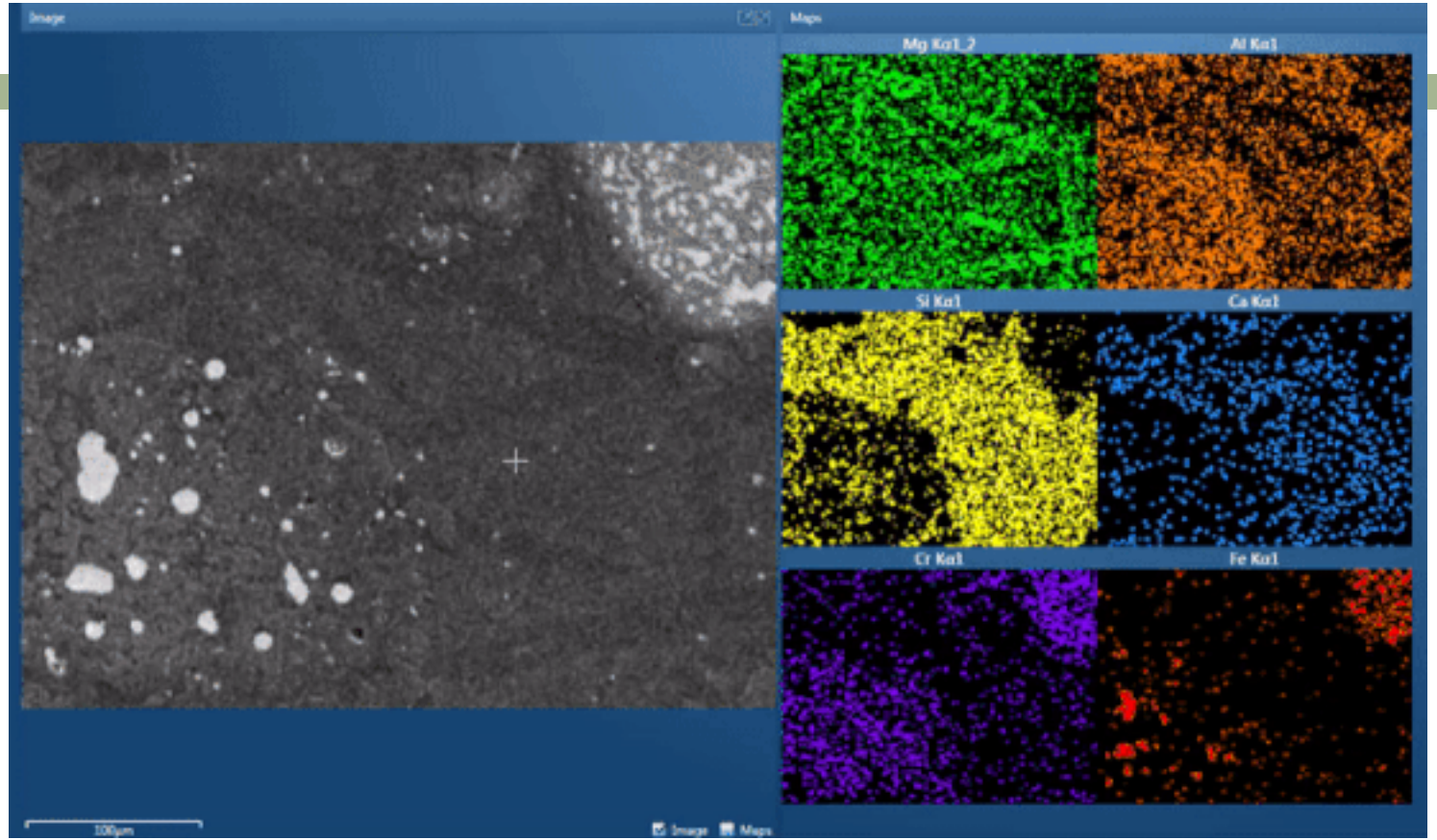
ARTMine



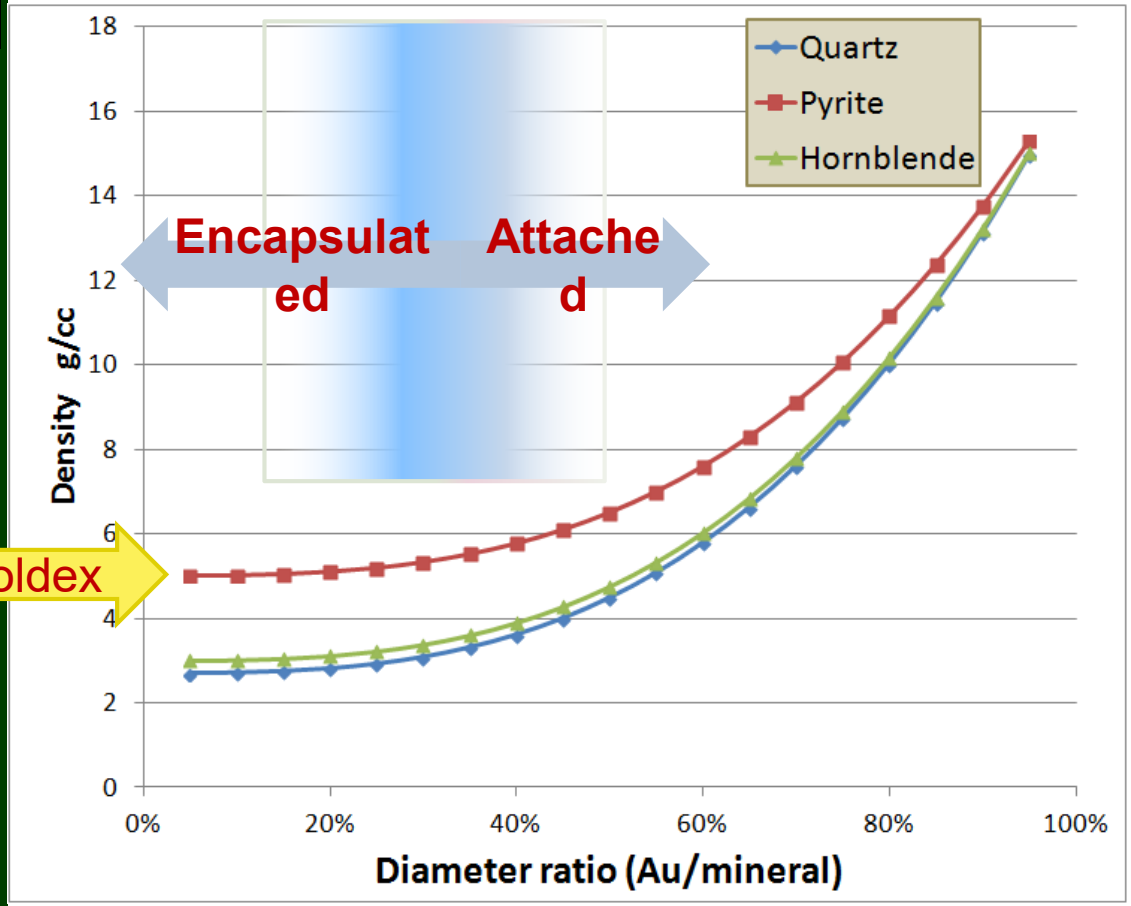


- Similaire au MLA
- Pastille d'époxy polies
- Plateforme Aztec
- Analyse chimique complète de chaque particule
- Classification sur la distance euclidienne minimale
- Librairie universelle de 3900 minéraux!

Ultim-Max 170 et Aztec-Live d'Oxford-Instrument
(5x to 10x plus rapide que le QEMSCAN)

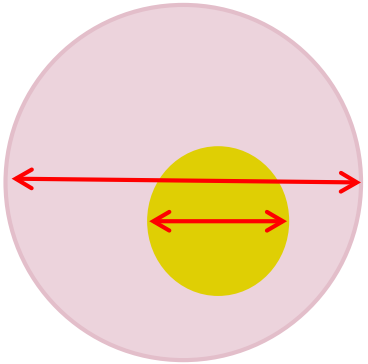


Effet de l'attachement sur la densité de la particule



Goldex

Ratio des diamètres

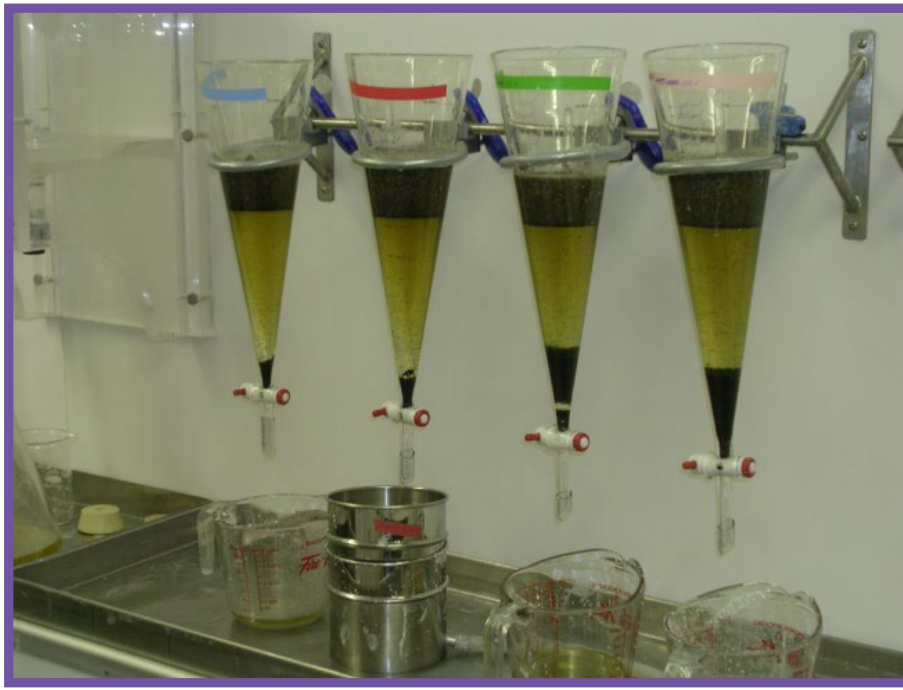


AGNICO EAGLE

IOS

Séparation au LST ou CsWO4

- Ajustable entre 2.7 et 4 g/cc
- 1 kg de matérial
- 2 étapes:
  - 2.85-3 g/cc
  - 3-4 g/cc



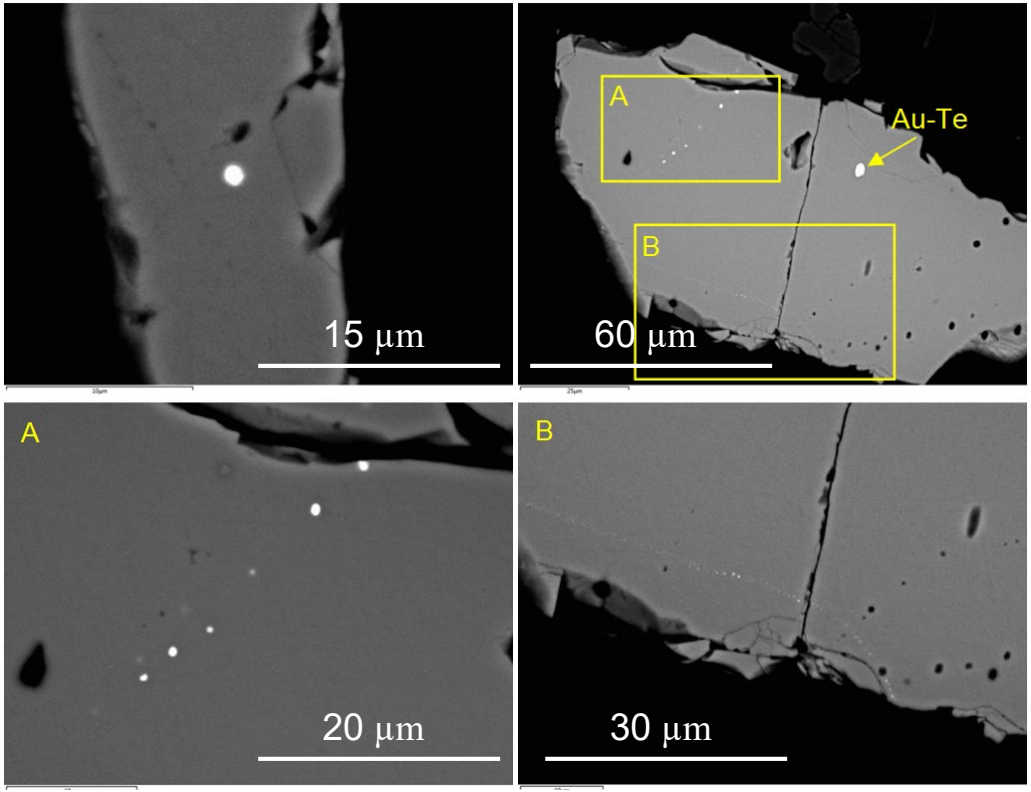
AGNICO EAGLE

IOS

L'innovation comme motivation

Grains encapsulatés: Mine Goldex

- Dans les sulfures: Abondance mesurable
- Dans les silicate: Rares, proportion négligeable



Minéraux lourds:
Concentré de pyrite

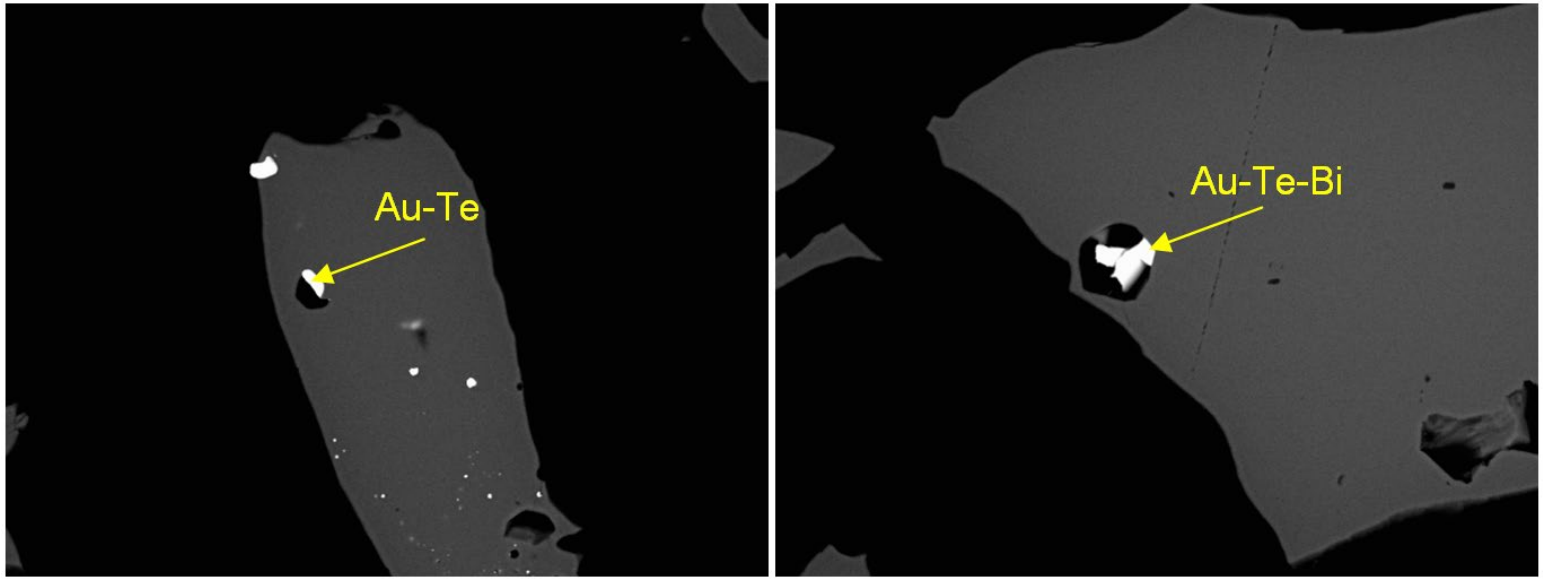
57 Grains de pyrites contenant de l'or dans 3 sous-échantillons contenant plus de 150 000 grains de pyrites

> 400 gouttelettes d'or

Gouttelettes nanométriques

SULFOSELS D'OR ENCAPSULÉS

- Dans les sulfures: récupéré par la flottation, mais pas cyanurable
- Dans les silicates: Perdus dans les résidus



Tellurures et bismuthure: Réfractaires à la cyanuration
Peu enclins à causer la fracturation du sulfure: Non libérés

Goldex: L'Or encapsulé dans la pyrite

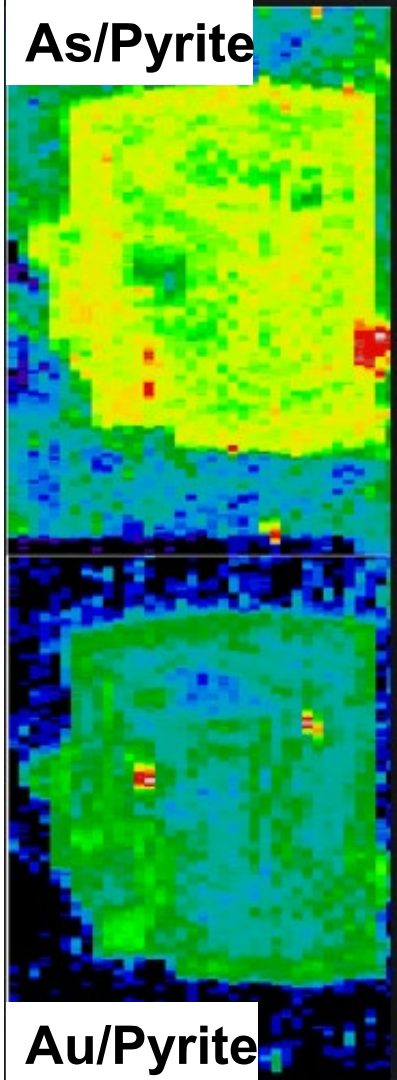
- 418 gouttelettes d'or sub-micrométriques
- 155,000 grains de pyrite
- Équivaut à 18.5 – 20.2 ppm Au dans la pyrite
- 0.2% Pyrite dans les résidus
- 5-6 ppb dans le résidu: 6% de l'or perdu!

Problème #5: Or dissous

Solution #5: ARTMin + LA-ICP-MS

Pyrite de Goldex

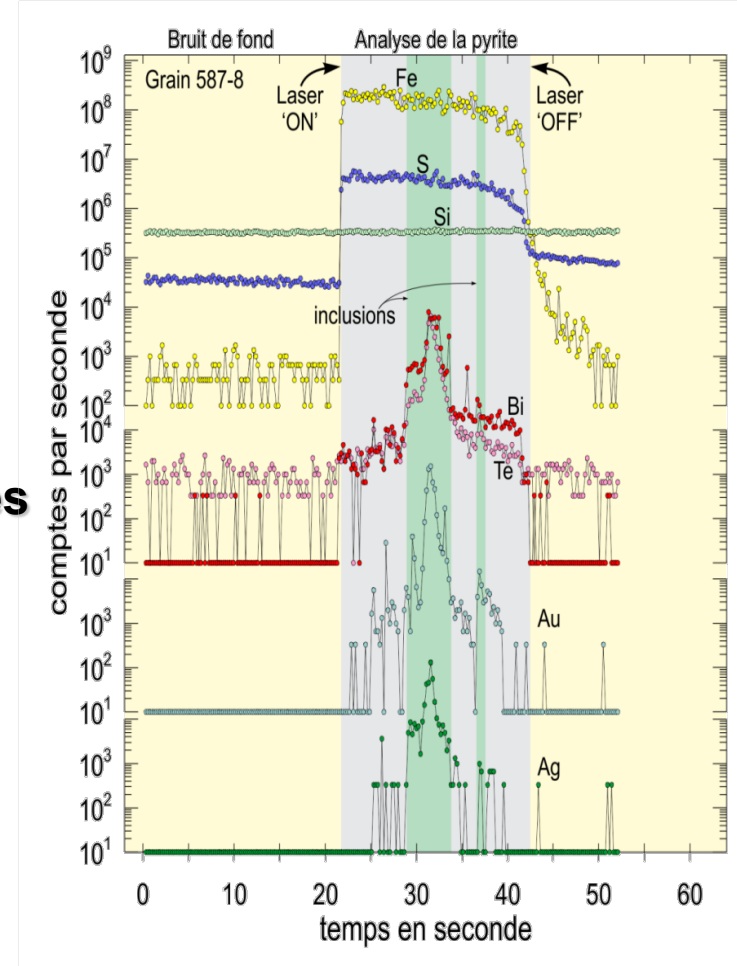
- Or en solution dans la pyrite
- 1.15 ppm en moyenne (LA-ICP-MS)
- 0-32 g/t selon les grains
- 0.2% Pyrite dans les résidus (ARTMine)
- 2.3 ppb d'or dans le résidu de pyrite
- 3-4% de l'or non-récupéré



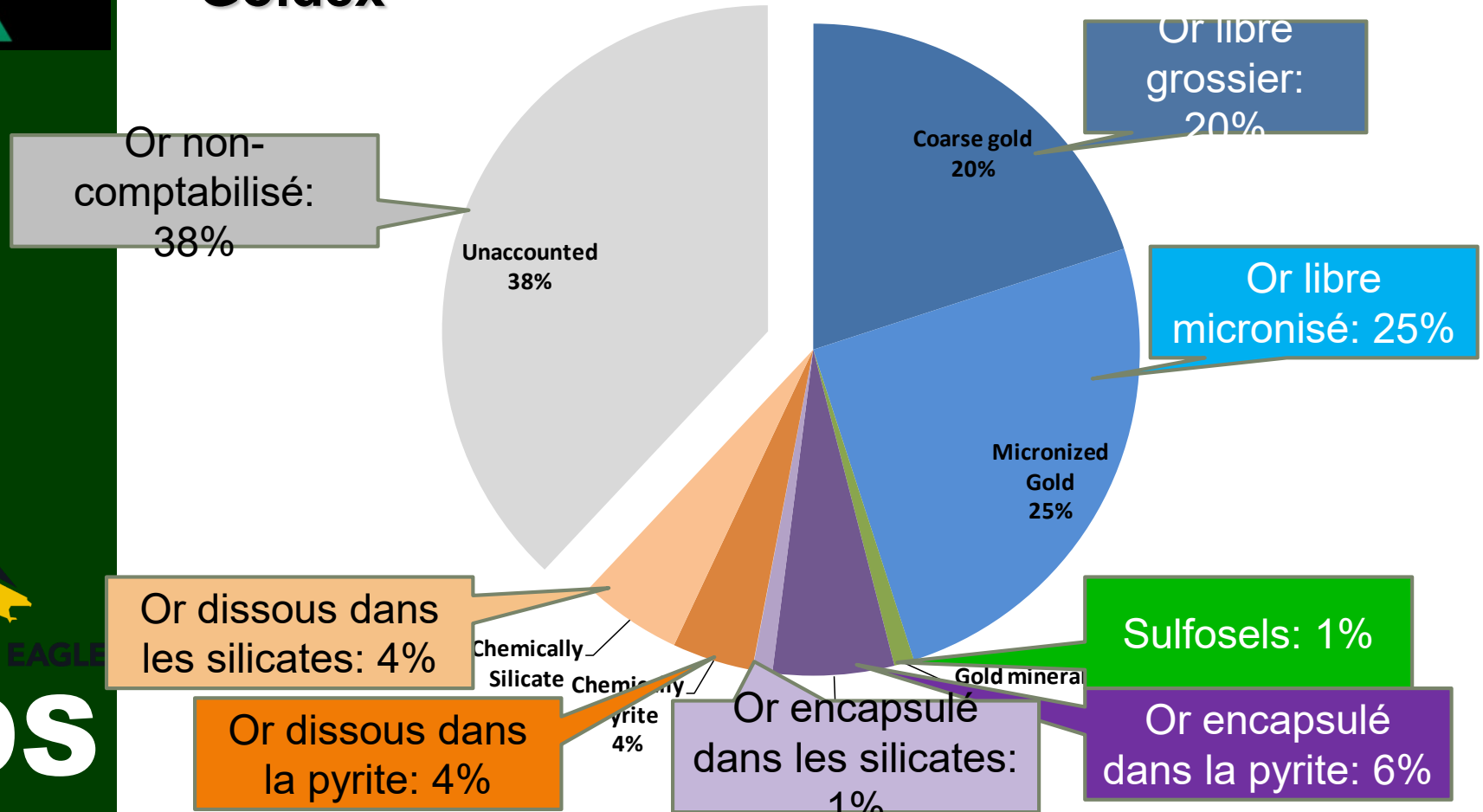
Or dissout dans les silicates!

- Très peu documenté!
- PPB ou PPT, selon les espèces
- Probablement 10x à 100x dans les minéraux des épontes comparativement aux minéraux des roches stériles!
- Chaque PPB se réflètera sur la récupération!
  - Si 10 ppb dans la chlorite...

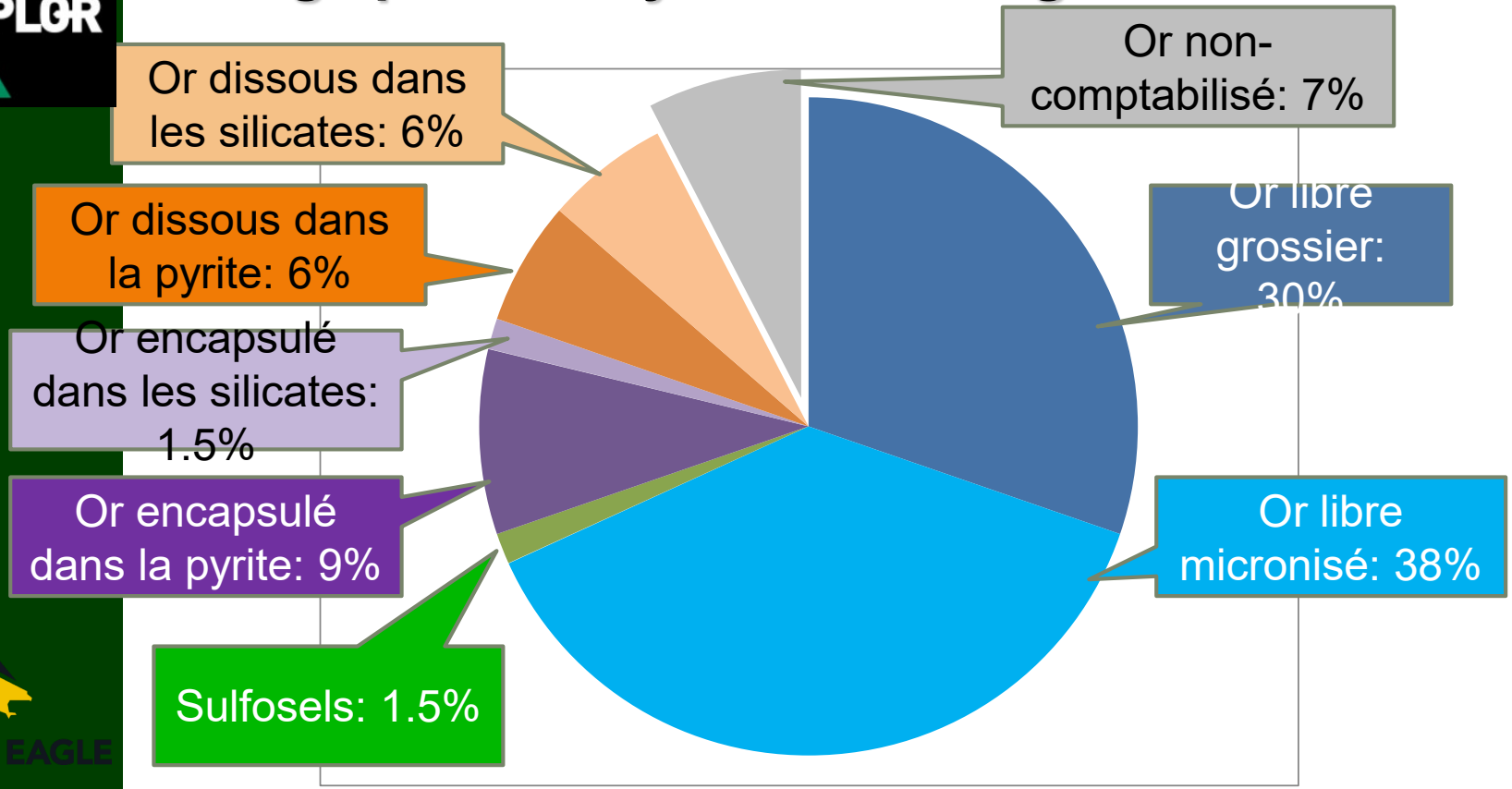
celà représente 5% de l'or non-récupéré!



Distribution globale de l'or dans les résidus de Goldex



Corrigé pour un système à 3 degrés de liberté



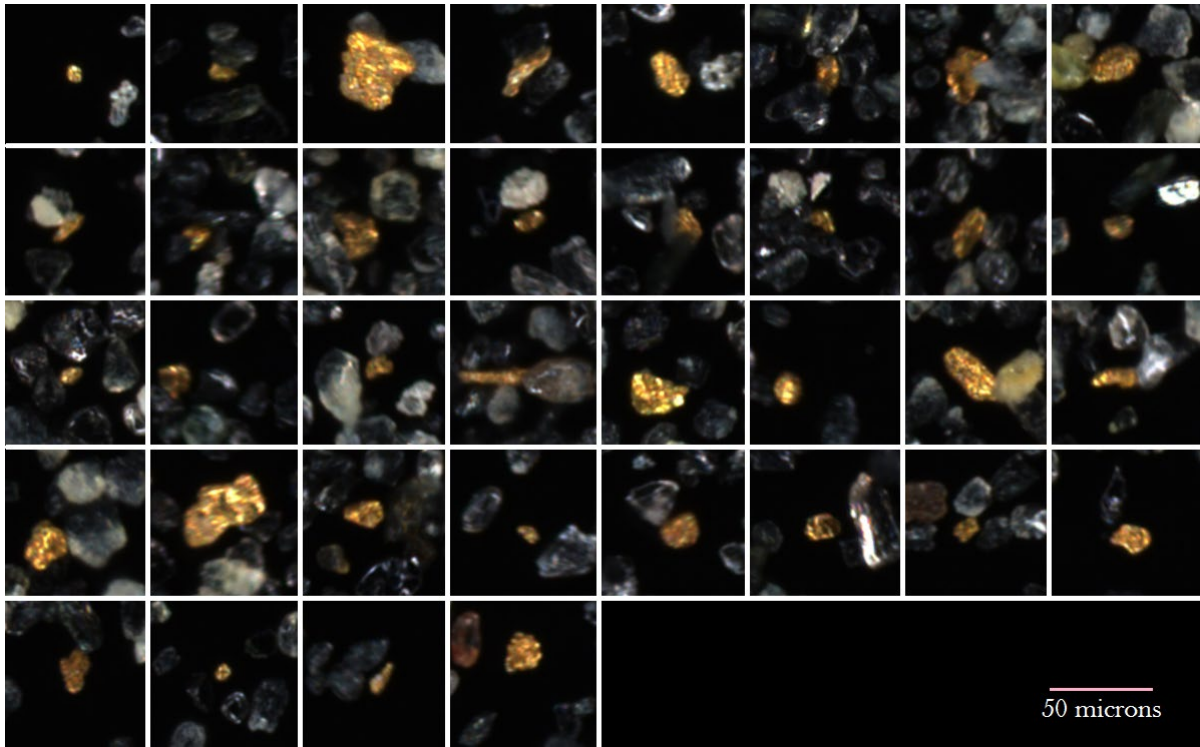
Réponse rapide?

Implantation sur le site: ARTPhot!

Comptage de grains automatisé par voie optique

0.5 um

5 minutes



Réponse rapide?

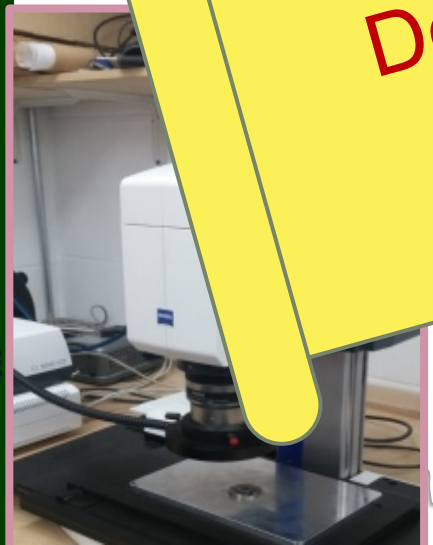
Implantation sur le site: A TPhot!

Comptage de grains aut oie optique

0.5 um

5 m

Démonstations au kiosque # 314



AGNICO EAGLE

IOS

Un gros merci:

- à l'équipe d'Agnico-Eagle

  Raphaël Mermillod-Blondin

  Yanick Bergeron

  Bernard Dallaire

- À l'équipe R&D d'IOS

  Alex, Jon, Nat et tous les autres cracks!

L'innovation comme motivation