



Les ressources minérales marines profondes : apports de l'outil S.I.G.

*Ewan Pelleter, Anne-Sophie Alix, Martin Guillou, Yves
Fouquet, Catherine Satra - Le Bris, Sylvain Bermell Fleury,
Hélène Ondréas*



Plan

- 1 - Pourquoi les ressources minérales ?*
- 2 - Quelles ressources minérales ?*
- 3 - Un SIG Ressources Minérales, quel(s) objectif(s) ? à quelles échelles ?*
- 4 - Quelles données à intégrer ?*
- 5 - Exemples de travaux en cours*



Pourquoi les ressources minérales ?

Pourquoi les ressources minérales ?

Augmentation de la demande en métaux (pays émergents)

Diversification de la demande vers des métaux utilisés dans les technologies « vertes » et « High-tech » - REE, Ga, Ge, In, Re,...



Peu de campagnes d'exploration entre 1980 et 2000

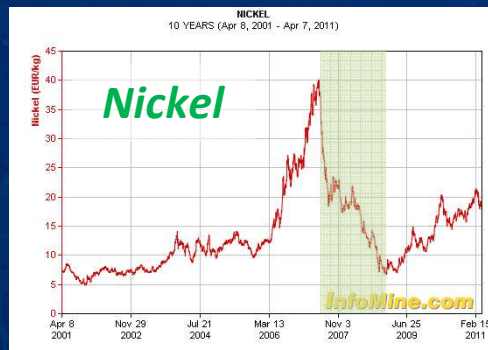
Des gisements en exploitation qui s'épuisent

Un monopole de certains pays sur plusieurs métaux



Pourquoi les ressources minérales ?

Augmentation du prix des métaux



De nombreux pays (ex. Europe) prennent conscience de leur dépendance et veulent assurer leur approvisionnement en matières premières

Intérêt pour les ressources minérales marines :

Océans sont des zones encore sous-explorées
Minéralisations potentiellement intéressantes
France à la 2^{ème} ZEE au monde

Quelles ressources minérales ?

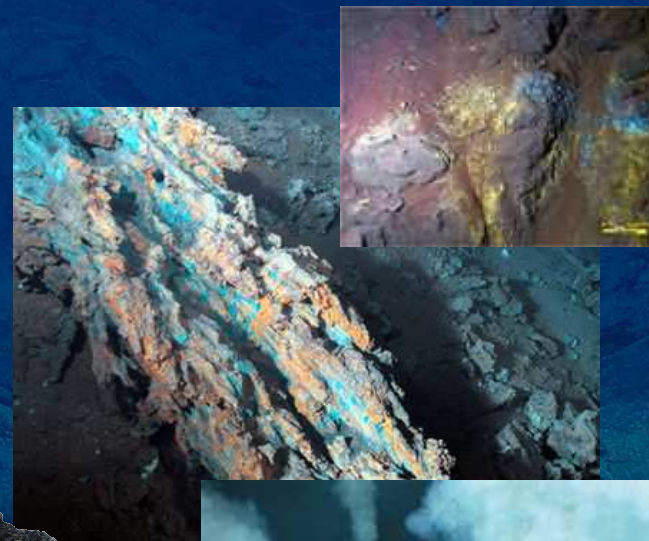
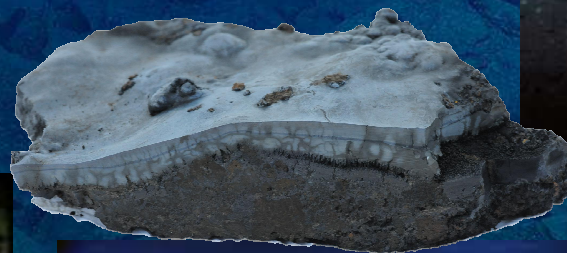
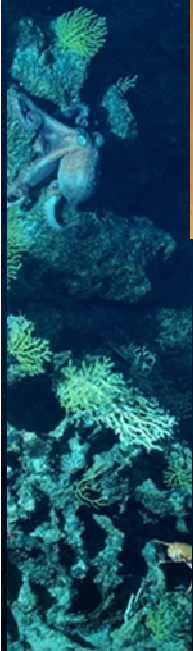
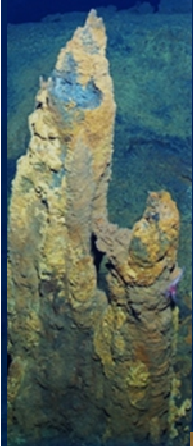
Quelles ressources minérales ?

Ressources minérales marines profondes (> 400 m)

1 - Nodules polymétalliques

2 - Croûte de manganèse

3 - Sulfures hydrothermaux



Quelles ressources minérales ?

Les nodules polymétalliques

Environnement sédimentaire (> 4000 m)
(argiles rouges, boue siliceuses ou carbonatées)

Surface de plusieurs millions de km²
(Pacifique : 9 millions km² – 15% des fonds situés
entre 4000 - 5000 m)

Teneurs en métaux variables d'une zone à l'autre
MAIS parfois très riches
(Pacifique : 0.42 % Cu, 0.63 % Ni et 0.24 % Co)

34 Milliards de tonnes de minerai

Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Cobalt (Co)

Quelles ressources minérales ?

Croûte de manganèse

Entre 400 – 4000 m, sur des monts sous-marins isolés, alignements volcaniques, anciens atolls...

Surface de 6.35 millions de km²
(1.7 % de la surface des océans)

Teneurs élevées en cobalt (0.6 % Pacifique; 0.8 % Polynésie). Des sous-produits intéressants (Pt, Te, Tl, Ce)

Plusieurs Milliards de tonnes de Minerai

Cobalt (Co) ± Platine (Pt), Tellure (Te), Thallium (Tl), Terres Rares (Ce)

Quelles ressources minérales ?

Sulfures hydrothermaux

Dorsales, rifts, volcans sous-marins hors axe....

Plus de 150 sites découverts en trente ans

Teneurs variables en fonction du contexte géologique MAIS ces gisements peuvent être très riches en Cu (4-8%), Zn (10 %), Pb (jusqu'à 1.4%) avec de nombreux sous produits Au (2-3 g/t), Ag, Co, Ga, Ge, In.

Certains sites ont des ressources de plusieurs millions de tonnes (= mines terrestres)
De nombreux sites à découvrir

Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Plomb (Pb) ± Or (Au), Argent (Ag), Cobalt (Co), Gallium (Ga), Germanium (Ge), Indium (In)



*Un SIG Ressources Minérales,
quel(s) objectif(s) ?
À quelles échelles ?*



Quel(s) objectif(s) ? à quelles échelles ?

1- Etablir un « cadre normalisé » pour rassembler l'ensemble des données acquises par le laboratoire géochimie et métallogénie

2- Mieux appréhender la répartition géographique des différents types de minéralisations en fonction des contextes géodynamiques

3- Mieux comprendre les paramètres géologiques qui contrôlent la présence des minéralisations

Trouver de nouvelles ressources minérales potentielles
Prédictivité

Approche à l'échelle mondiale : définir des provinces métallogéniques

Approche à l'échelle des provinces : définir des sites minéralisés



Quel(s) objectif(s) ? à quelles échelles ?

4 – Mieux évaluer le potentiel métallogénique des sites connus

Estimer les ressources minérales d'un gisement (2D / 3D)

Approche à l'échelle site : Evaluation préliminaire des ressources

Objectifs :

Consultation (SIG)

Réalisation de documents de synthèse (SIG)

Améliorer les modèles de gisements (SIG + interprétation du géologue)

Identification de nouvelles zones d'intérêt (SIG + connaissance + geostat.)

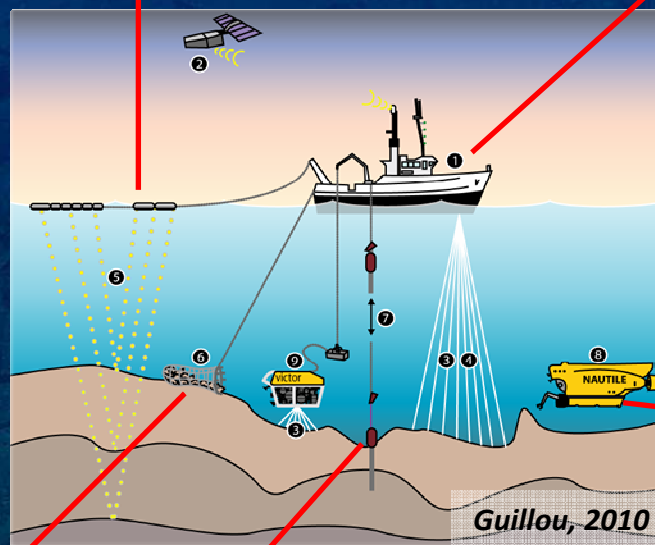
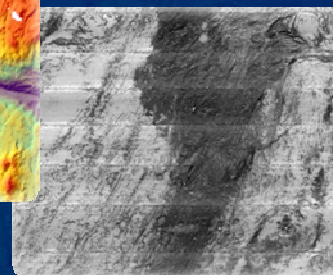
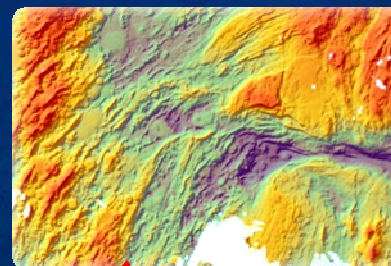
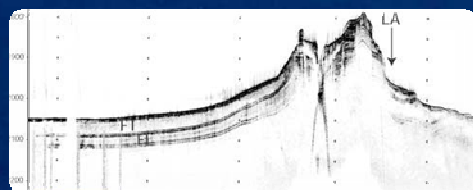
Evaluation préliminaire de ressources (SIG + connaissance + geostat.)



Quelles données intégrer ?

Quelles données intégrer ?

Les données acquises lors de campagnes



- Légende :
- 1 Navire océanographique
 - 2 Positionnement par satellite (GPS)
 - 3 Sondeur multifaisceau
 - 4 Sonar à balayage latéral
 - 5 Sismique réflexion
 - 6 Drague
 - 7 Carottage
 - 8 Nautilie
 - 9 Victor (ROV)



Quelles données intégrer ?

Les données acquises en laboratoire et les interprétations géologiques

Données géochimiques

Sample	Mission	Prelevement	Description	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3 (%)	MnO (%)	CaO (%)	MgO (%)	K2O (%)	Na2O (%)	TiO2 (%)	P2O5 (%)	SO4 (%)	LOI(%)
XX-DR01-05	XXX_2010	XX-DR01	Basalt	45.87	16.09	9.26	2.74	11.39	7.45	0.83	2.81	1.58	0.23	0	1.85
XX-DR02-01	XXX_2010	XX-DR01	Basalt	47.15	16.28	10.81	0.31	12.22	8.35	0.34	2.47	1.25	0.13	0.08	0.65
XX-DR02-02	XXX_2010	XX-DR02	Basalt	47.89	16.44	10.85	0.21	11.43	8.21	0.36	2.55	1.25	0.12	0.12	-0.12
XX-DR02-03	XXX_2010	XX-DR02	Basalt	47.88	16.53	10.93	0.15	11.42	8.19	0.38	2.56	1.26	0.13	0.12	0.10

Données minéralogiques

Localisation	Site Y									
	XX-DR01-01	XX-DR01-02	XX-DR01-03	XX-DR01-04	XX-DR01-05	XX-DR01-06	XX-DR01-07	XX-DR01-08	XX-DR01-09	XX-DR01-10
Echantillon	XX-DR01-01	XX-DR01-02	XX-DR01-03	XX-DR01-04	XX-DR01-05	XX-DR01-06	XX-DR01-07	XX-DR01-08	XX-DR01-09	XX-DR01-10
Description	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.	Ox. lité	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.	Ox. ± bas.
Birnessite	75	71	28	40	69	64	69	3	85	39
Todorokite	25	30	56	2	31	33	31	48	14	4
Nontronite		4	4	58						
Clinocllore										



Echantillon: FU-PL-01-07a
Campagne: Futaba 2010
Prélevement: FU-PL-01-07

Description microscopique
Plaque basale d'une cheminée active associée à un flux hydrothermal HT (d'un mètre), il s'agit de la roche chimisée qui occupe de l'échantillon FU-PL-01-07. La section polie est réalisée sur une zone localisée au cœur de la cheminée.



Microscopie optique

Phase Minérale	Abondance
Pyrrhotite	70-75%
Sphalérite	12-15%
Isocrocoite	5-12%
Pyrite	5-7%

Tableau 1. Proportions relatives des minéraux. La pyrrhotite correspond au sulfure dominant et elle est répartie de manière homogène sur l'ensemble de la section. Elle se présente sous la forme de cristaux automorphes en lamelles ou en hexagones dont la taille peut varier de manière importante (de 2 à 600 µm selon l'axe et au sein de l'échantillon (Figure 1A)). Par exemple, certaines zones minérales sont uniquement formées de pyrrhotite (cristaux de pyrrhotite (300-700 µm) et indiquent localement des conditions stables. Dans d'autres secteurs de la section, la pyrrhotite se fait remplacer par de la pyrite (Figure 1B) soulignant des variations des conditions de fO₂ au cours du temps. Elles peuvent présenter des inclusions de sphalérite + isocrocoite disséminées en zones concentriques (Figure 1C) et qui pourraient représenter des reliques de ces minéraux.

La sphalérite s'observe de manière dispersée sur l'ensemble de la section. Elle apparaît régulièrement en microcristaux sur les pyrrhotites et parfois sous forme d'amas + sphalérites isolés dont l'extension varie de la dizaine à la centaine de microns (Figure 1D). Nombreux de sphalérites sont partiellement remplacés par de l'isocrocoite. La dissolution peut aussi intervenir au fil le long des fractures ou selon la surface des sphalérites (Figure 1E). Localement, elles peuvent également être remplacées par de la pyrite. La sphalérite s'observe aussi en inclusions dans la pyrrhotite qui représentent des reliques de cristaux de sphalérite (microscopie T), précoces.

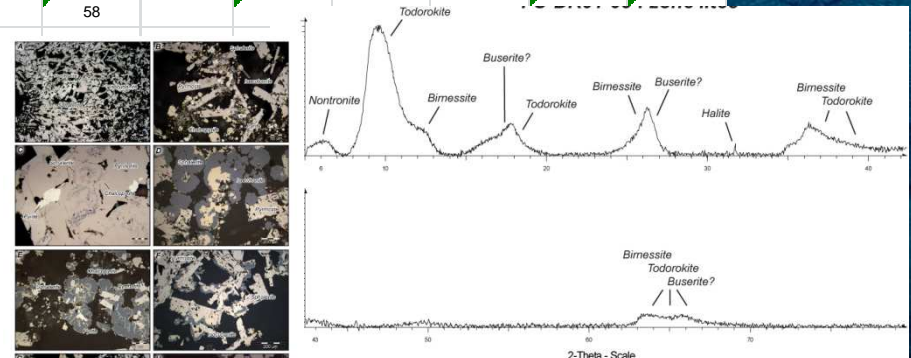
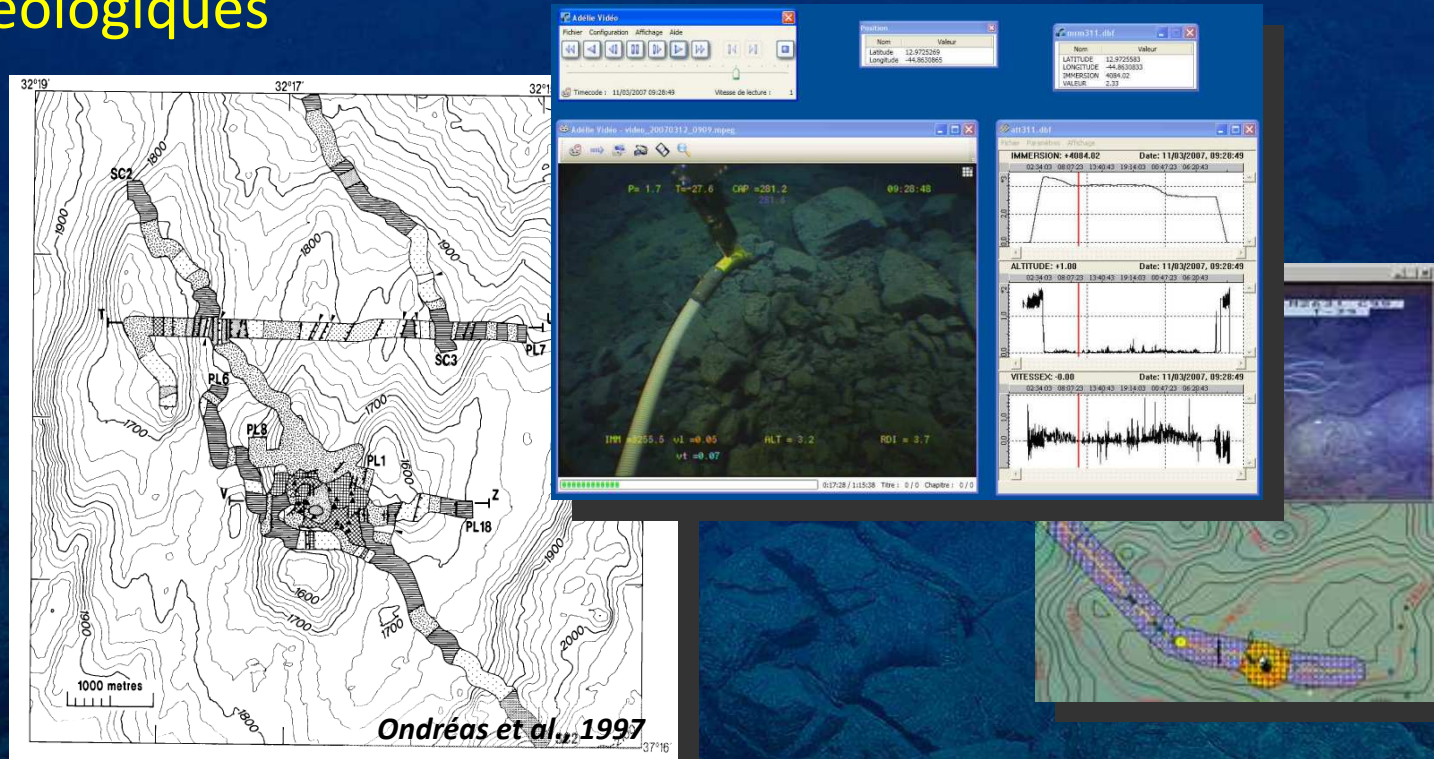


Figure 1. Photographie optique présentant les différents minéraux minéralogiques observés au sein de la section polie FU-PL-01-07a. Les photomicrographes ont été prises au microscope optique en lumière réfléchie.

Quelles données intégrer ?

Les données acquises en laboratoire et les interprétations géologiques



Toutes ces données géologiques et géochimiques ont besoin d'être « normées » pour être intégrées dans un SIG

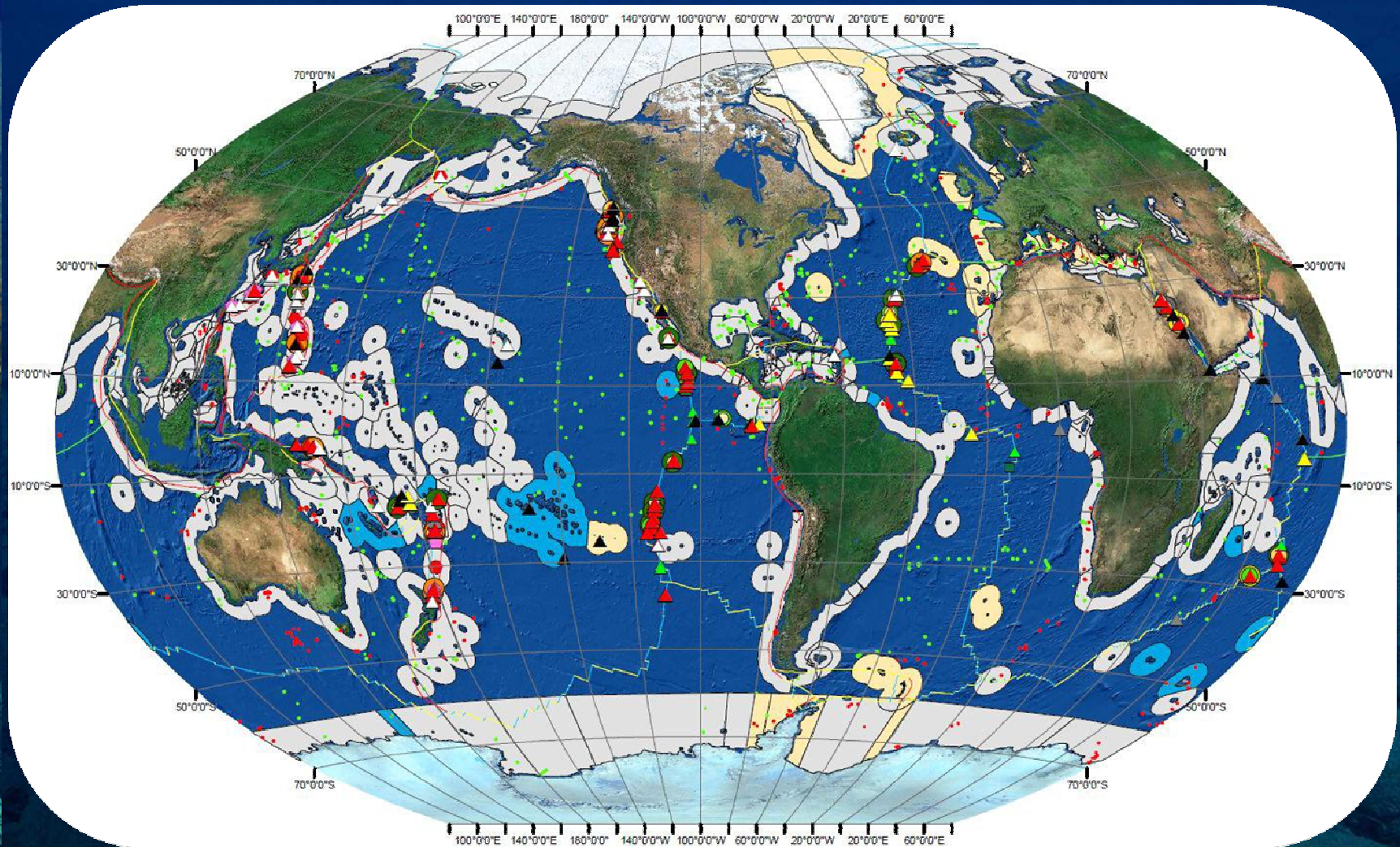
+ Intégration de données biologiques



Exemples de travaux en cours

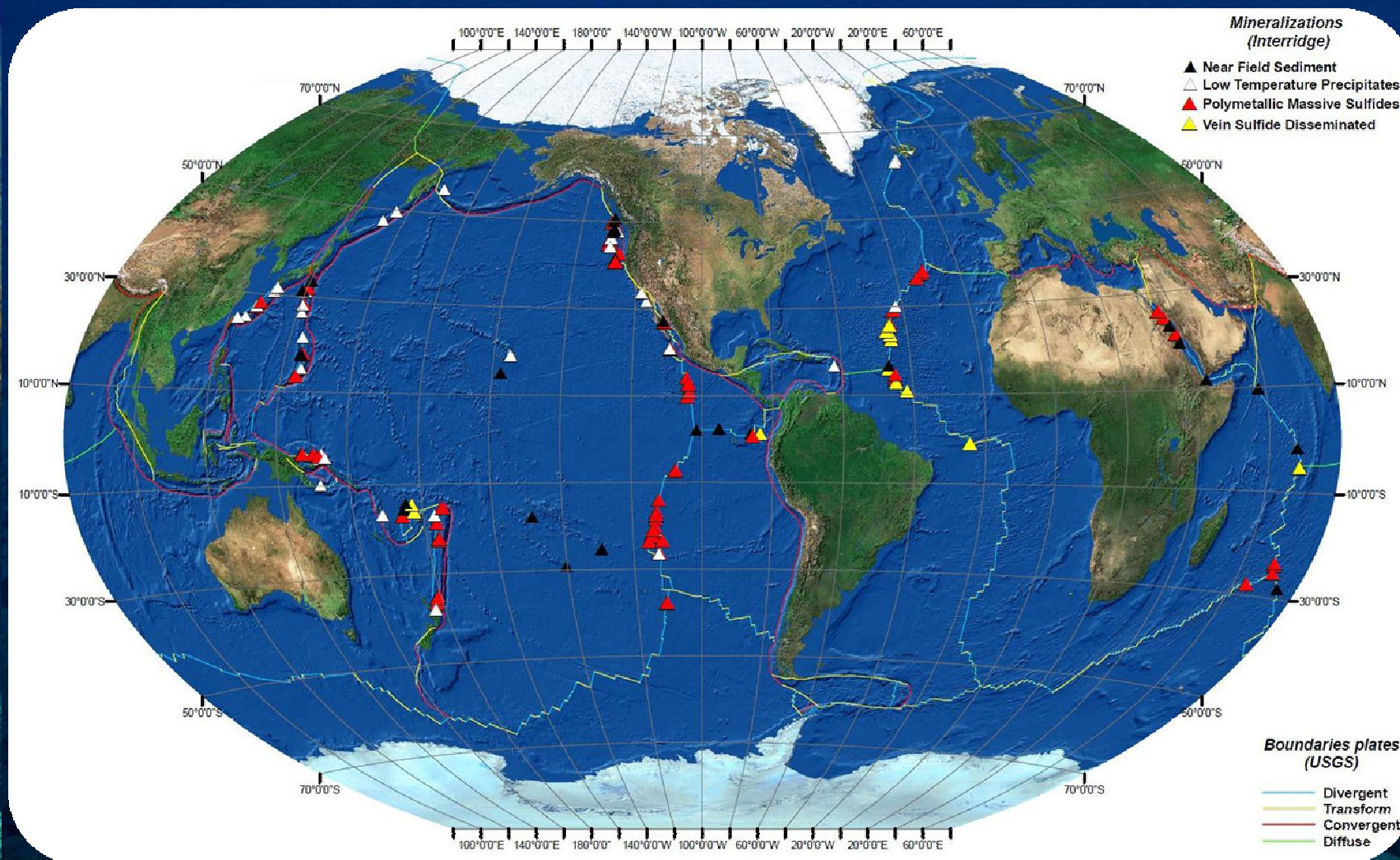
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle mondiale



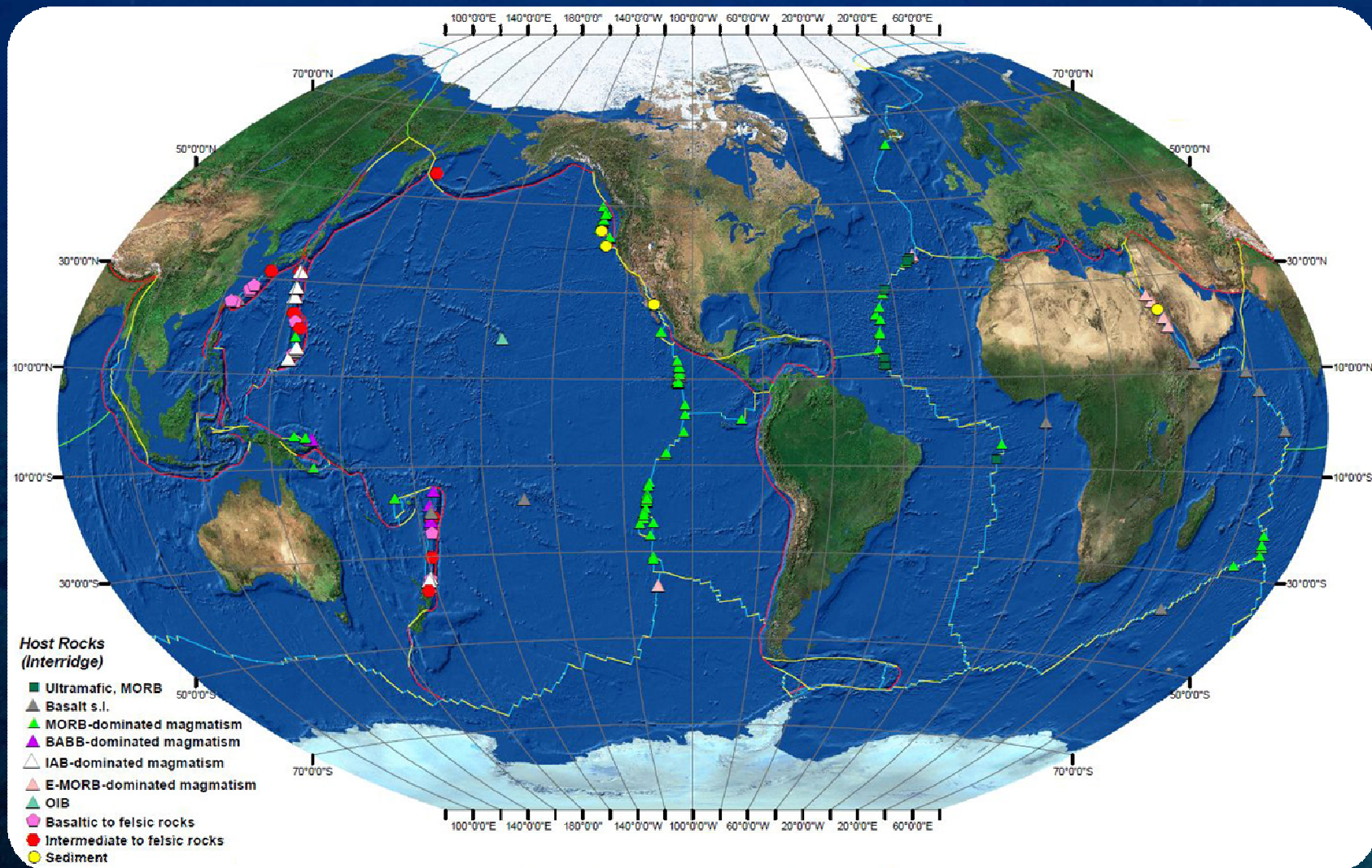
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle mondiale



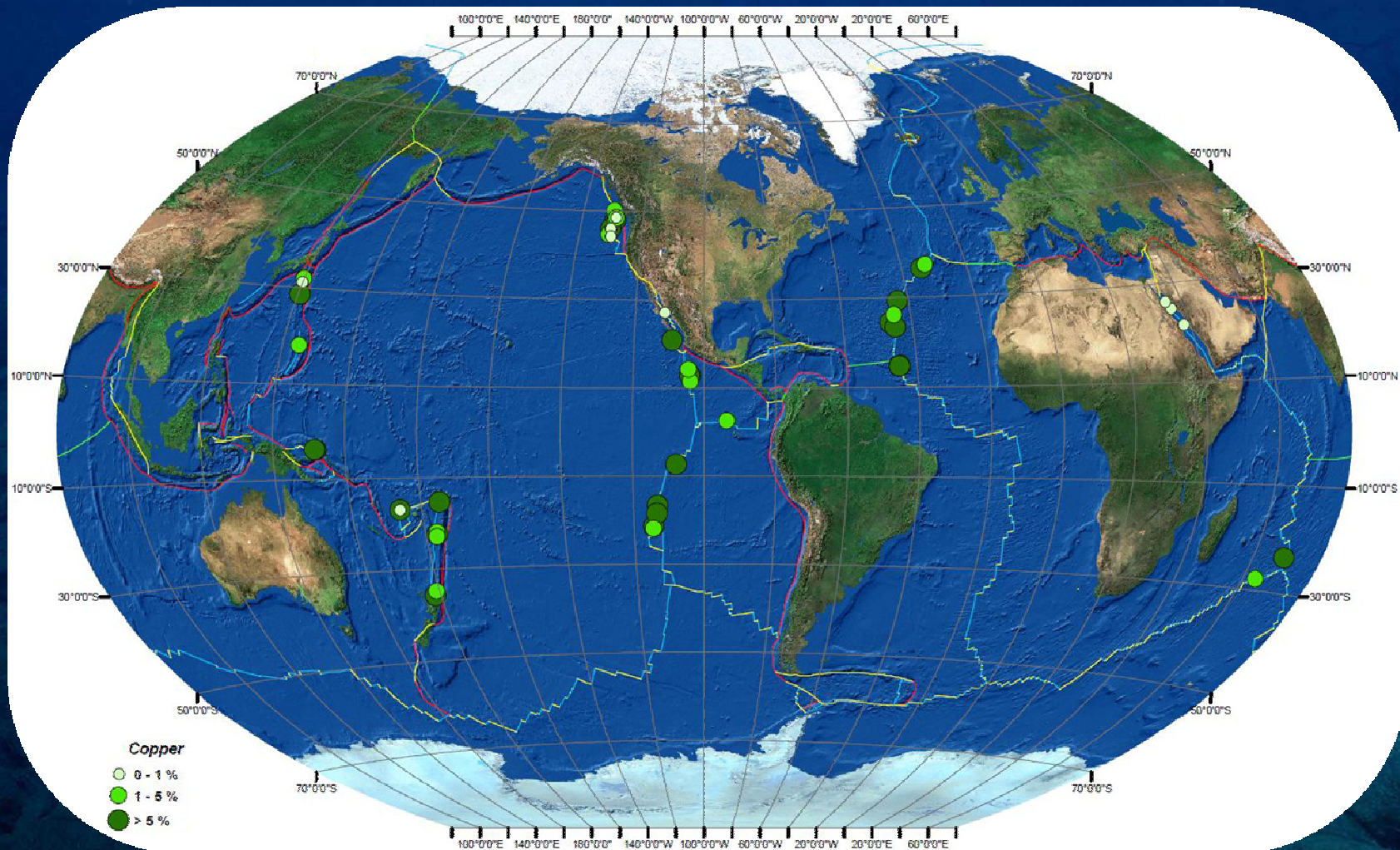
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle mondiale



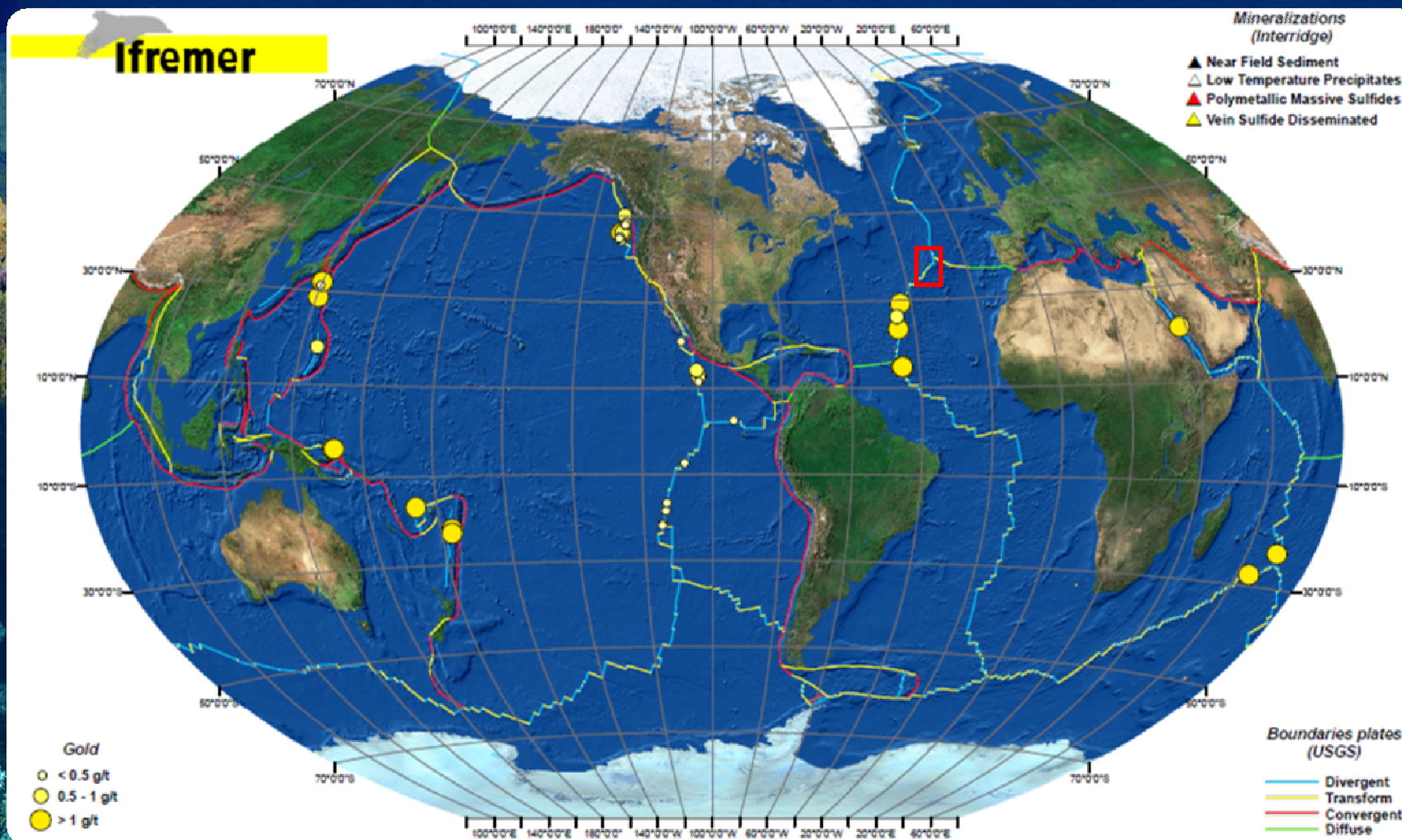
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle mondiale



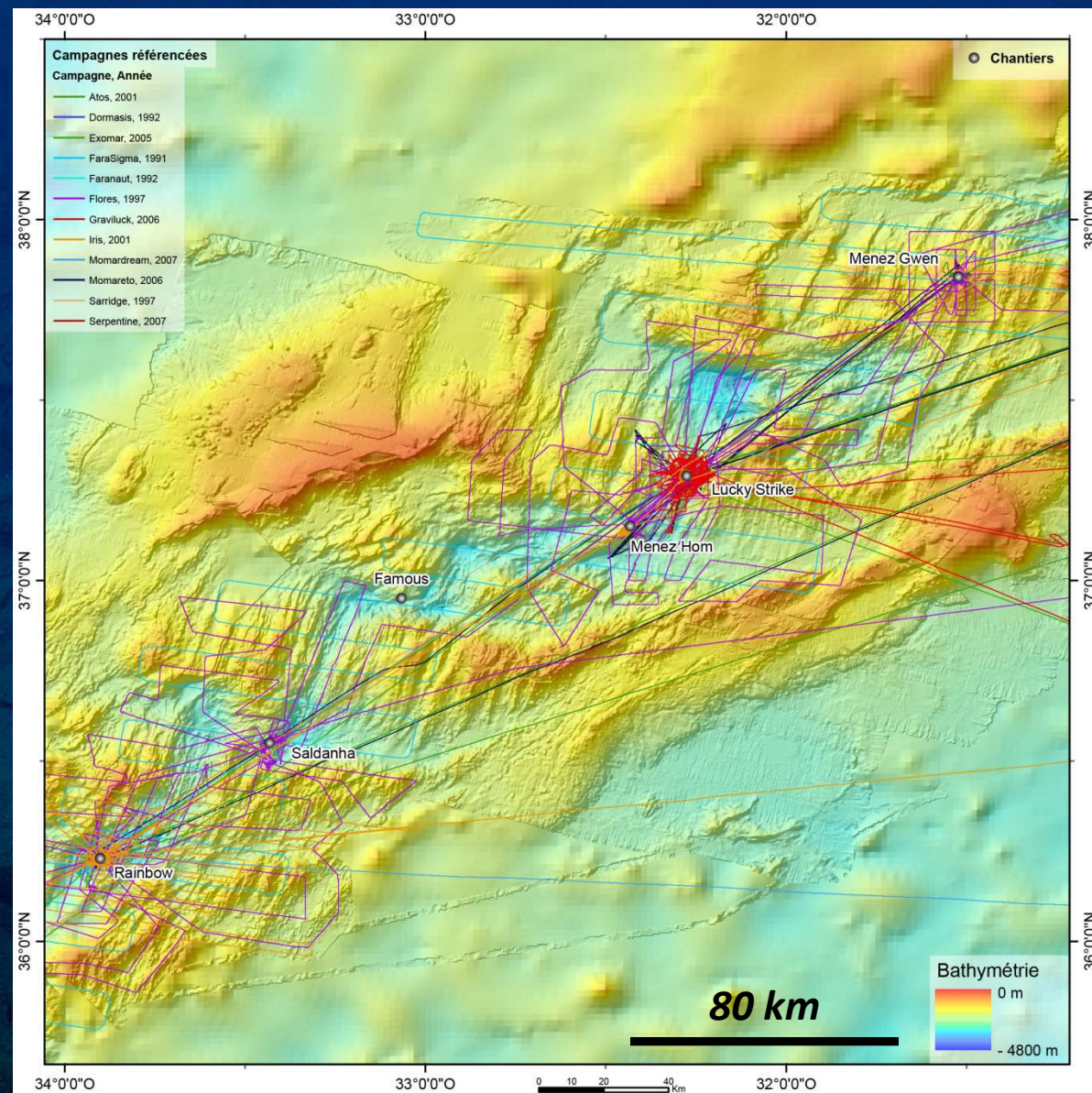
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle mondiale



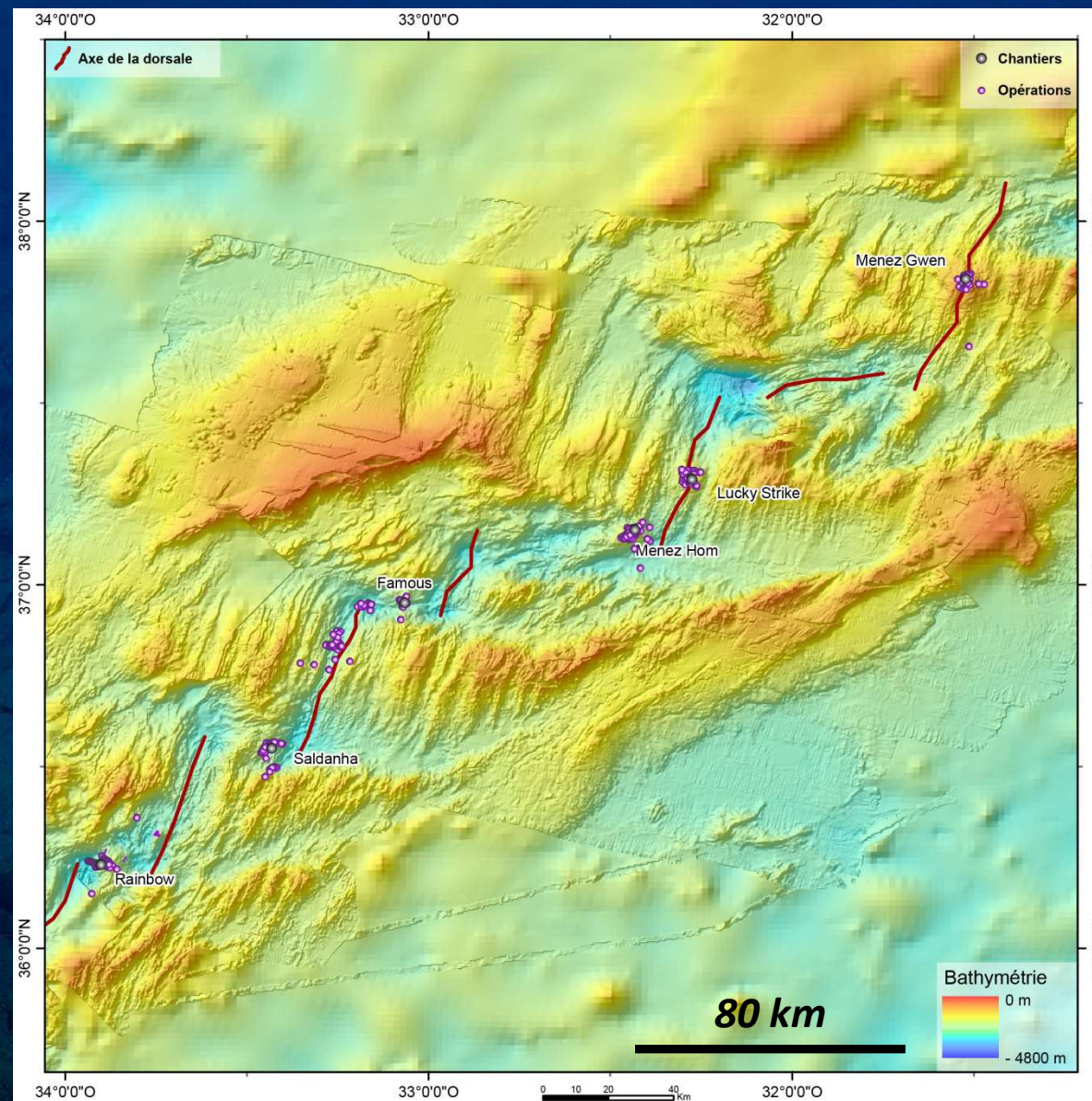
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle de la province



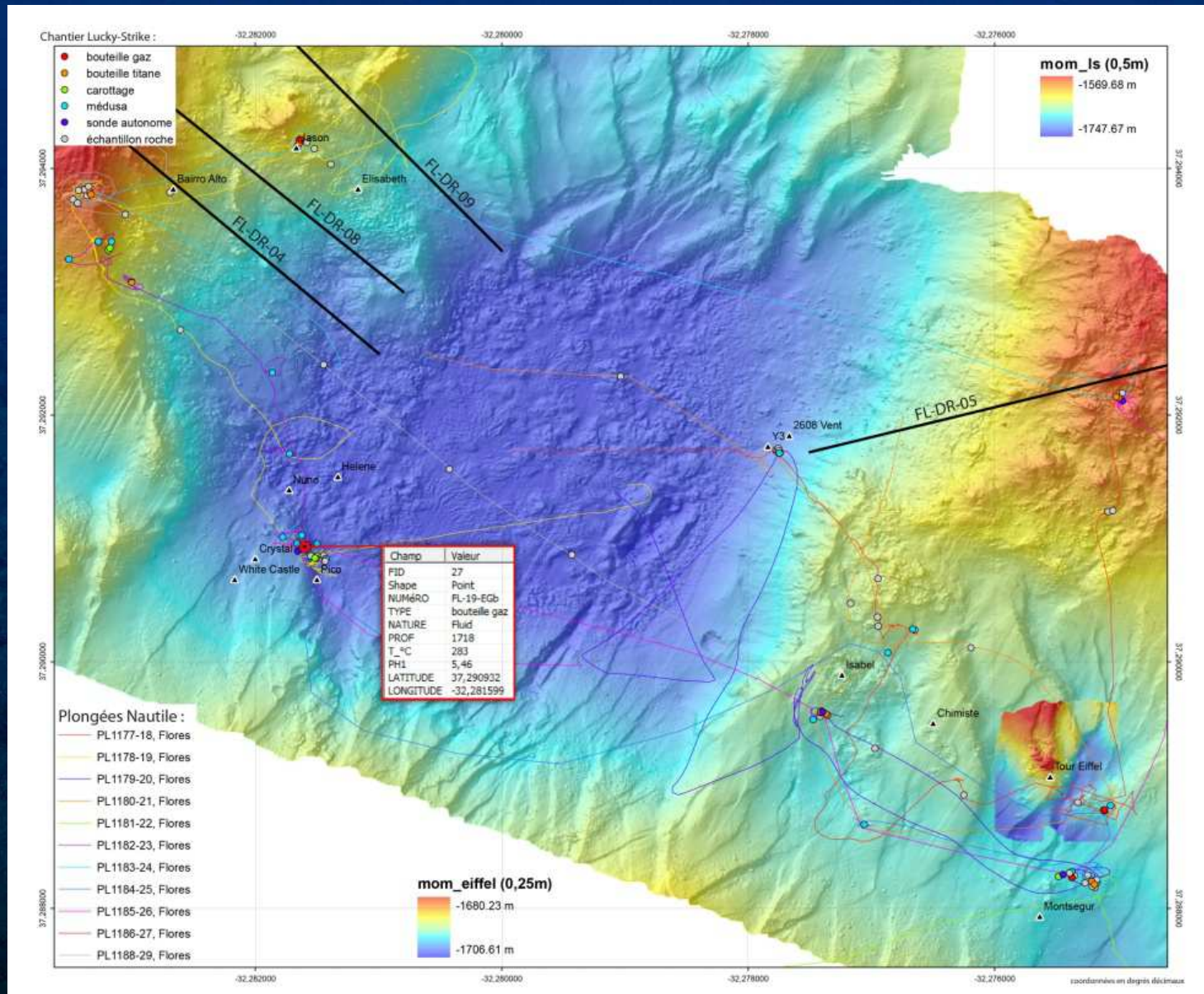
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle de la province



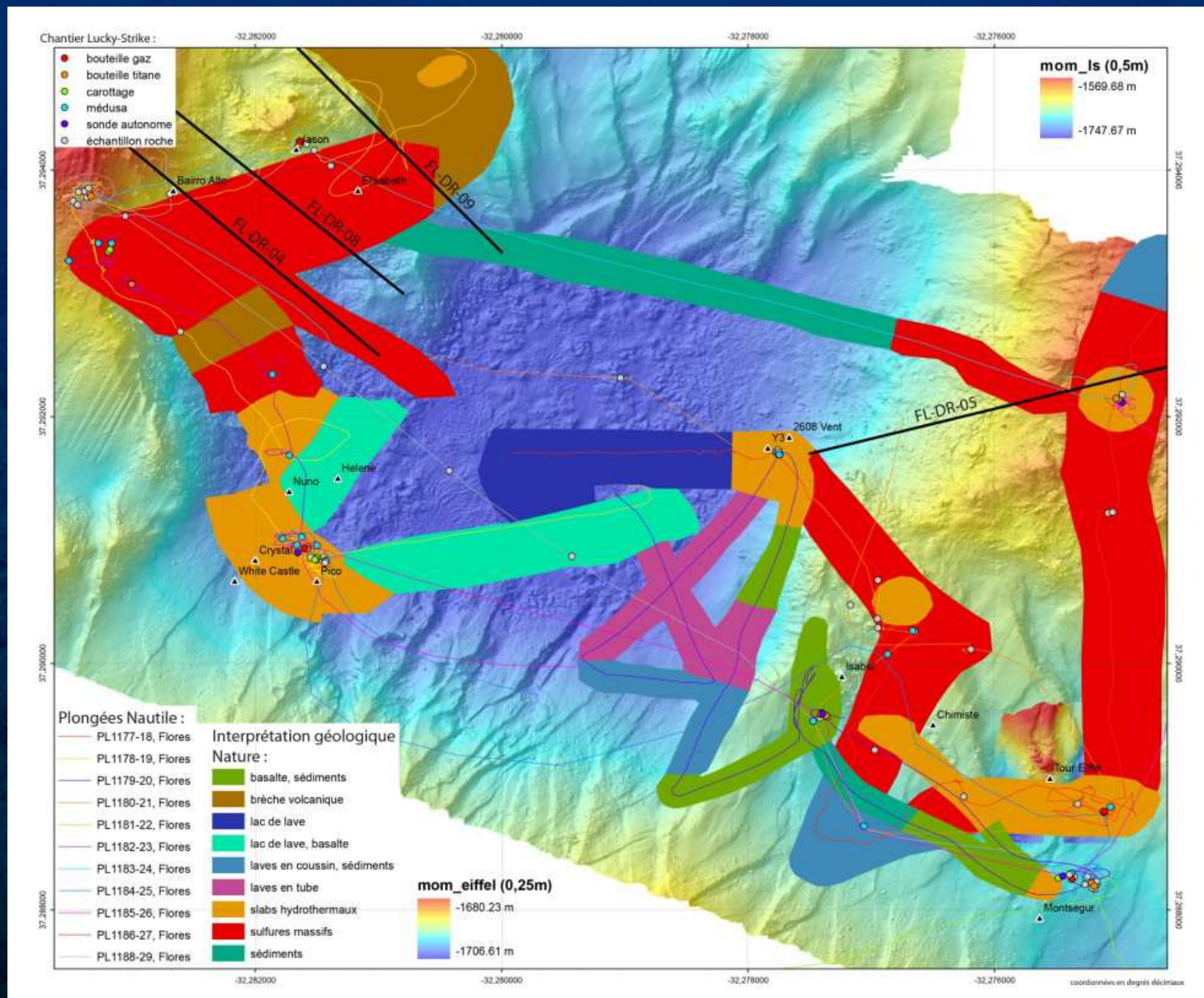
Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle du site : Lucky Strike



Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle du site : Lucky Strike




Exemples de travaux en cours...

Approche à l'échelle du site : Futuna

Echantillon FU-PL-01-07a
Cronologie: Février 2010
Prélevement: FU-PL-01-07

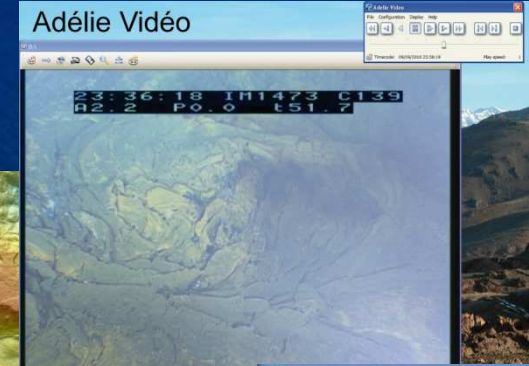
Description macroscopique
Partie basale d'une cheminée active associée à un fluide hydrothermal HT (fumeur rose), il s'agit de la partie orientale qui est de l'orientation FU-PL-01-06. La section peut être réalisée sur une zone oxydée au bord de la cheminée.



Microscopie optique
La section polie est principalement composée de pyrrhotite et ne présente pas de zonalité microscopique particulière. La pyrrhotite représente environ 10% de l'échantillon. La pyrrhotite correspond au sulfure dominant et elle est répartie de manière homogène sur l'ensemble de la section. Elle se présente sous la forme de cristaux submicroscopiques en lamelles ou en flocons dont la taille peut varier de manière importante (jusqu'à 2-3000 µm selon l'axe) au sein de l'échantillon (Figure 4A). Par exemple, certaines zones minérales sont uniquement formées de grands cristaux (à orientation) de pyrrhotite (100-200 µm) et indiquent localement des conditions stables. Dans d'autres secteurs de la section, la pyrrhotite se fait remarquer par de la pyrrhotite (Figure 4B) indiquant des variations des conditions de O₂ au cours du temps. Elles peuvent présenter des inclusions de sphalérite à structure déformée en cercles concentriques (Figure 4C) et qui pourraient représenter des reliques de ces minéraux.

La sphalérite s'observe de manière dispersée sur l'ensemble de la section. Elle apparaît également en association avec les pyrrhotites et parfois sous forme d'anneaux sphériques isolés dont l'extension varie de la microns à la centaine de microns (Figure 4D). Nombres de sphalérites sont particulièrement impressionnants de dimensions. La sphalérite sur cette dernière a fait le long des fractures ou selon la surface des sphalérites (Figure 4E). Localement, elles peuvent également être remplacées par de la pyrrhotite. La sphalérite s'observe aussi en inclusions dans la pyrrhotite qui représentent des reliques de cristaux de sphalérite (polymorphes ?) précoces.

Figure 1: Planche photographique présentant les différents minéraux minéraux observés au sein de la section polie FU-PL-01-07a. Les photographies ont été prises au microscope optique en lumière réfléchie.



Fenêtre de visualisation des ...

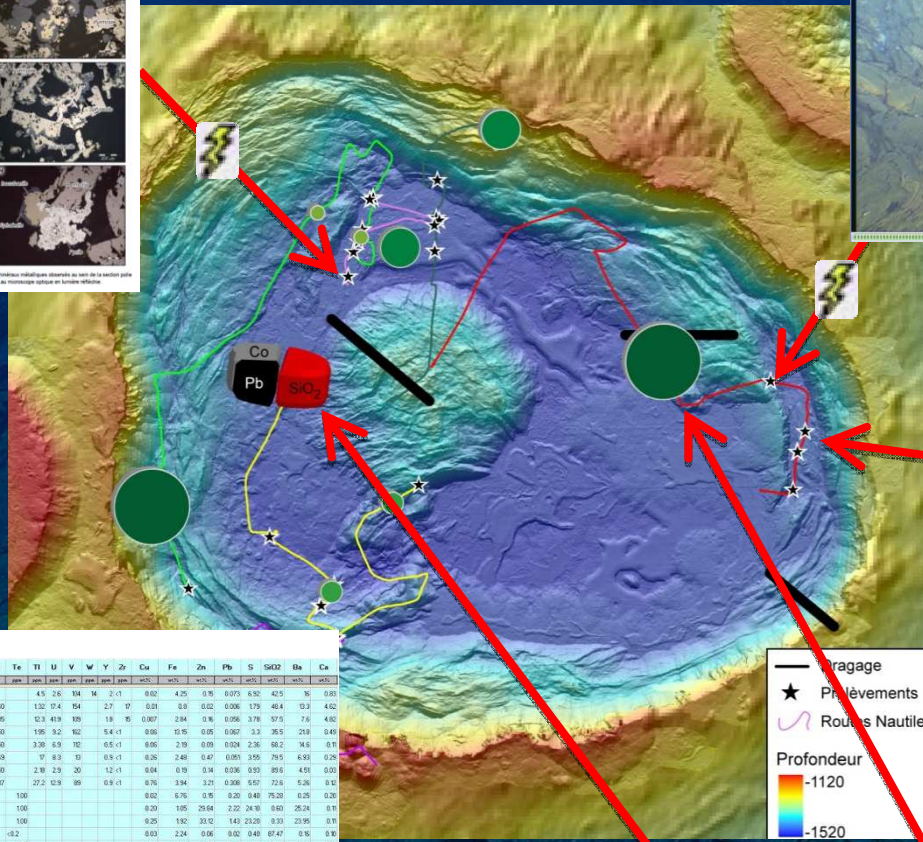


Previous Next

Display all pictures

FID : 71
DATE : 16/09/2010
HEURE : 22:50:58
LATITUDE : -13.82588
LONGITUDE : -178.7840317

Comment :



Analyses géochimiques

Au	Ag	As	Al	Ar	Br	Ca	Cl	Co	Cr	Cu	Ga	Gd	Hg	In	Mn	Mo	Ni	Pb	Pd	Sr	Se	Si	Sm	Sr	Ta	Tb	Ti	U	V	W	Y	Zn	Zr						
95	17.6	84	1.05	6.4	30	140	10.30	0.05	0.5	1.00	44	41	6	13	16	1	2	1	0.02	4.25	0.95	0.073	1.92	42.5	36	0.88	1.52	17.4	84	2.7	17	0.31	0.0	0.02	0.006	1.79	48.4	13.3	4.62
53	9.8	94	0.07	0.4	16	170	14.3	0.123	0.05	1.00	85	95	5	5	1	1	1	1	0.007	2.84	0.36	0.056	1.79	37.5	7.6	4.02	1.05	1.2	1.02	1.4	0.05	0.15	0.057	3.3	35.5	20.8	9.88		
140	6.3	39	0.006	0.2	11	20	18.9	0.185	0.05	1.00	30	41	8	6	2	1	1	1	0.050	1.05	0.2	0.02	1.84	1.8	1.1	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	



Teneur en Cu (%)

A vertical strip on the left side of the slide contains three distinct images of deep-sea hydrothermal vents. The top image shows a cluster of white, feathery hydrothermal vent structures. The middle image shows a tall, jagged rock formation with a blue mineral deposit at its peak. The bottom image shows a dark, rocky seafloor with green and blue mineral structures.

Encore beaucoup de travail....

- 1 - Normaliser les données géologiques s.l.*
- 2 - Rassembler et incorporer les données (géologiques, géochimiques, biologiques,...)*
- 3 - Ajouter et valider la donnée interprétative*
- 4 - Et dans le futur des traitements statistiques des données*



Nantes
13 avril
2011

