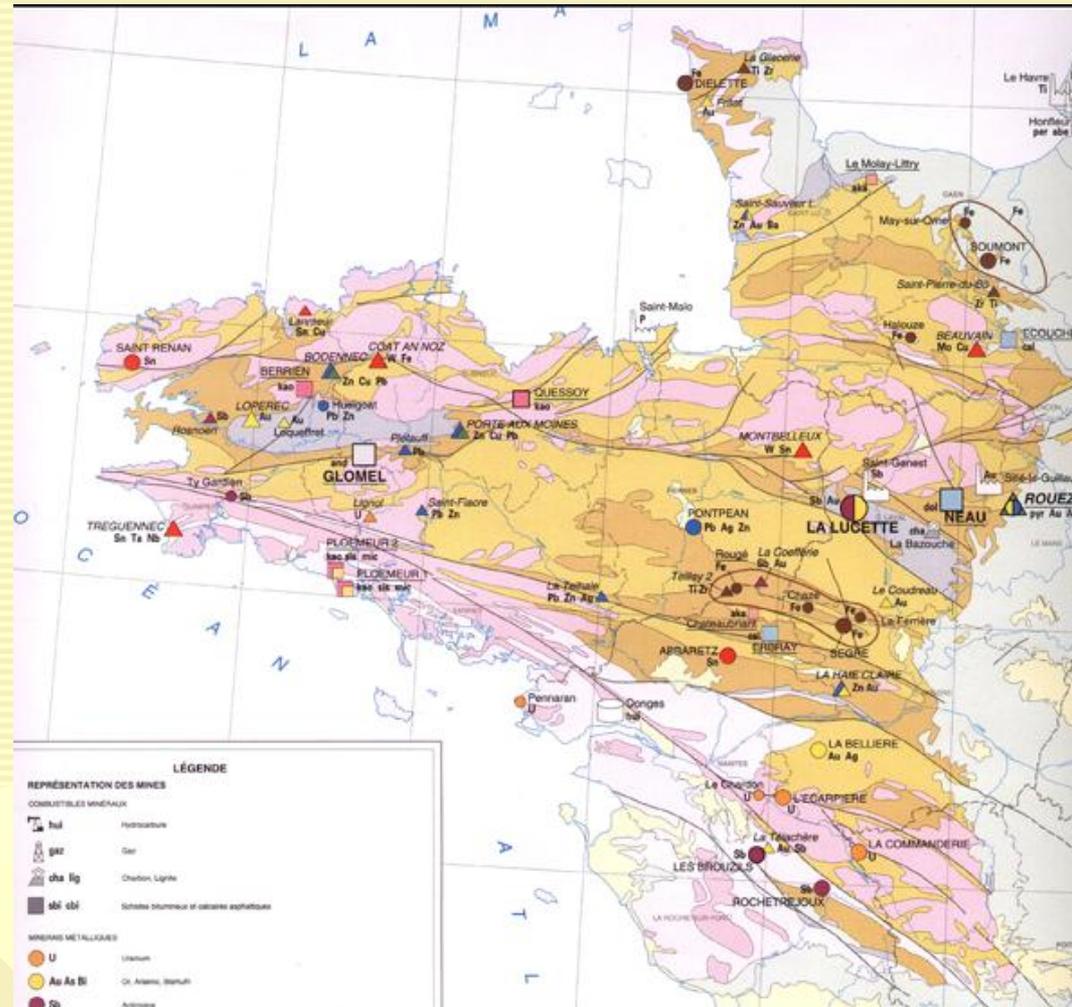


Le Massif armoricain : une future province minière ?



Extrait de la carte minière de la France métropolitaine (BRGM, 1994)

Eric Marcoux

Professeur

Université d'Orléans

eric.marcoux@univ-orleans.fr

consommation nationale en 2012

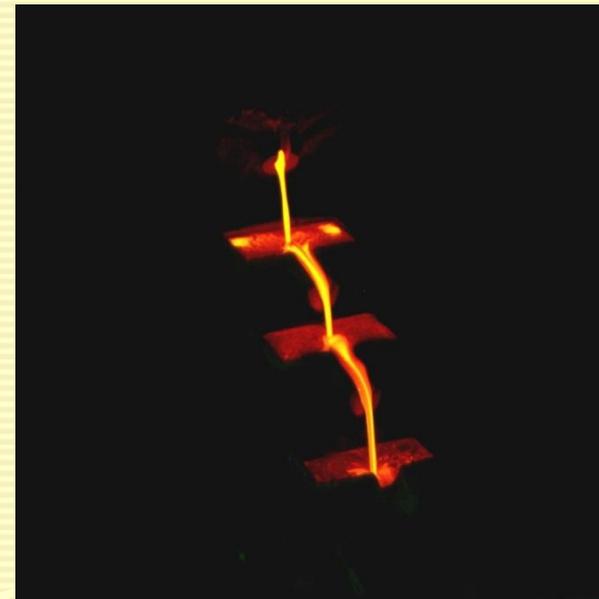
- ❖ Fe : 12,8 Mt acier
- ❖ Al : 650 kt (130 kg/véhicule)
- ❖ U : 11 kt (83 % de l'électricité nationale)
- ❖ Cu : 350 kt (20 kg/véhicule, 45 kg/v. hybride)
- ❖ Pb : 320 kt (dont 218 kt par recyclage)
- ❖ Au : 38 t

production nationale de métaux (hors recyclage)

- ❖ Ni de Nouvelle-Calédonie : 145 kt Ni (2013) et 20 % des réserves mondiales
- ❖ or de Guyane : 3 – 15 t/an ??
- ❖ production minière en métropole : # 0

potentialités nationales et armoricaines

- un riche passé
- nombreuses découvertes de l'inventaire minier national (1968-1992) : mines et projets potentiels
- **cibles minières déjà connues**, parfois cubées
- **inventaire non exhaustif**
- exploration minière à mener en parallèle



Le Massif armoricain : une future province minière ?

- **1 - Riche passé minier d'Armorique**
- **2 - Contexte géologique : Cadomien à actuel**
- **3 - Cadomien**
 - amas sulfurés à Zn-Cu-Pb-Ag-(Au)
 - W-Sn périgranitiques
- **4 - Paléozoïque inférieur : Calédonien**
 - amas sulfurés à Zn-Cu-Pb-Ag-(Au)
 - fer ordovicien et dévonien
 - grès à rutile et zircon
- **5 - Hercynien et post-Hercynien**
 - granites hercyniens : Sn, W, (Nb-Ta), Li
 - filons aurifères tardi-hercyniens
 - filons permien : Zn-Pb-Ag, Sb, U et « petits » métaux
- **6 - Perspectives : des raisons d'espérer**

1 - Riche passé minier d'Armorique

– Antiquité

❖ étain

- Saint-Renan (-1369 à -1229) : ~ 1 500 t Sn
- Abbaretz (-1200 à -350) : 1 200 à 2 000 t Sn

❖ or

- 500 t d'or produites en Gaule de -1200 à -500 (soit 43 kg/an)
- nombreuses aurières surtout dans l'est-armoricain (Beslé, Craon, Château-Gontier, St-Pierre-Montlimart...)

❖ fer

- dès le 5^{ème} siècle avant JC

– Moyen Age

❖ fer

❖ plomb-argent à Plélauff (?)

– 17^{ème} au 19^{ème} siècle

❖ Pb-Ag

- Huelgoat - Poullaouen (1729 -1866) : 65 kt Pb et 100 t Ag
- Pontpéan (1730 -1932) : 180 kt Pb et 230 t Ag, 20 kt Zn
- fin 18^{ème} : 2/3 de la production nationale de Pb provient de Bretagne

❖ Fe de Normandie et d'Anjou : exploité jusqu'en 2003



● 20^{ème} siècle et bilan

– antimoine

- ❖ France : 1^{er} producteur mondial au début du 20^{ème}
- ❖ la Lucette (1899 – 1934) : 42 000 t Sb et 8,7 t d'or
- ❖ Rochetréjoux (1907–1925) : 16 500 t Sb

– or

- ❖ la Bellière (1907-1938) : 11,7 t d'or (jusqu'à – 140 m)
- ❖ la Lucette (1899 – 1934) : 8,7 t d'or
- ❖ Rouez : 2,07 t d'or et 7,2 t d'argent (1989-1992)

– fer

- ❖ fer oolithique ordovicien et fer sidérolithique (Rougé) : 115 Mt de minerai (45 – 60 % Fe)

– uranium

- ❖ gisements de Vendée, Pontivy et de Guérande
- ❖ 3^{ème} région française avec 16 kt d'U produits (1953 – 1991)

– étain : 2 mines françaises les plus importantes

- ❖ Saint-Renan (4 070 t Sn de 1960 à 1975) (placer fluvatile épuisé)
- ❖ Abbaretz (2 700 t Sn de 1951 à 1957)

– andalousite

- ❖ seconde exploitation mondiale à Glomel (70 kt/an)

– kaolin

- ❖ plus gros gisements français : Ploemeur, Berrien, Quessoy
- ❖ 2013 : 120 kt/an



mine d'U du Bonot (1960)

2 - Contexte géologique

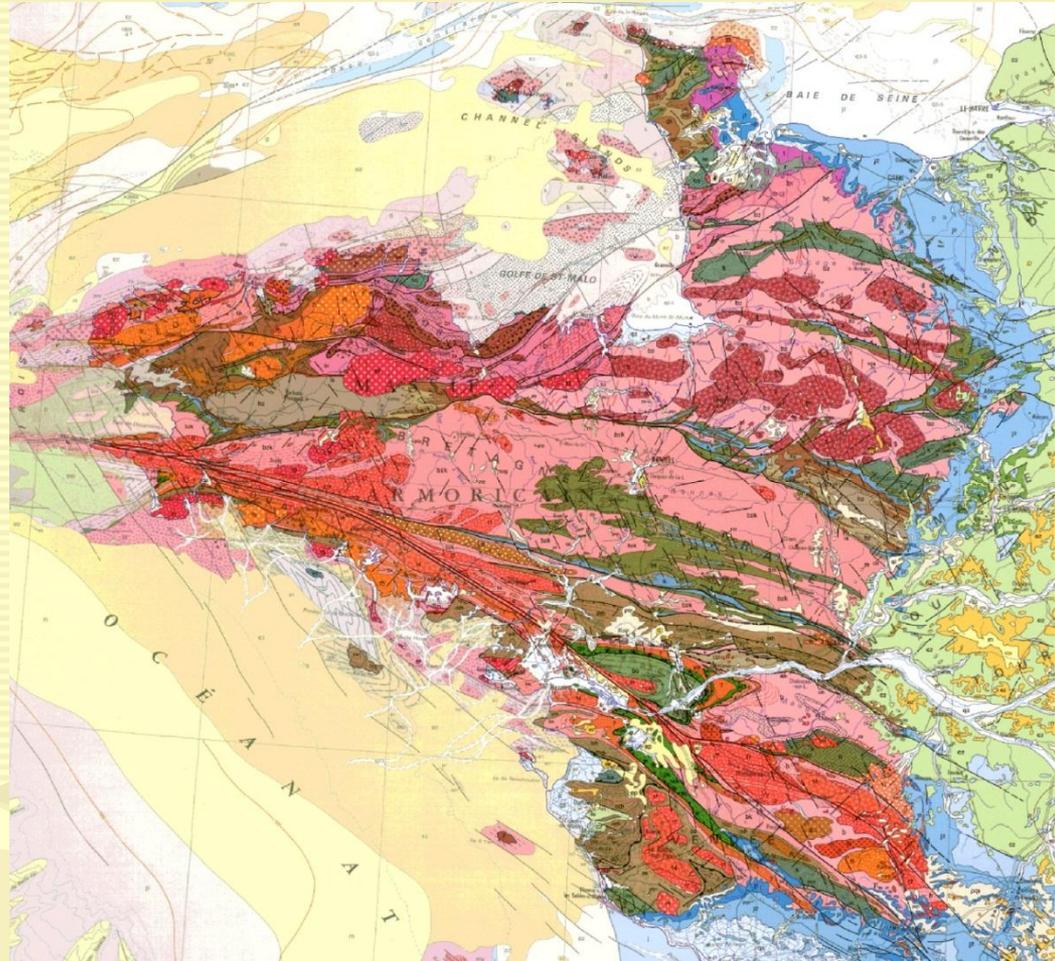
- géologie très variée : Cadomien (670 – 540 Ma) à Actuel

- Briovérien (Ediacarien) épimétamorphique le plus développé de France
- Paléozoïque très puissant

- succession d'orogénèses, de vastes bassins

- accompagnés de concentrations minérales (Chauris et Marcoux, 1994) :

- métallogénèse cadomienne à actuelle
- époque majeure : **Hercynien**



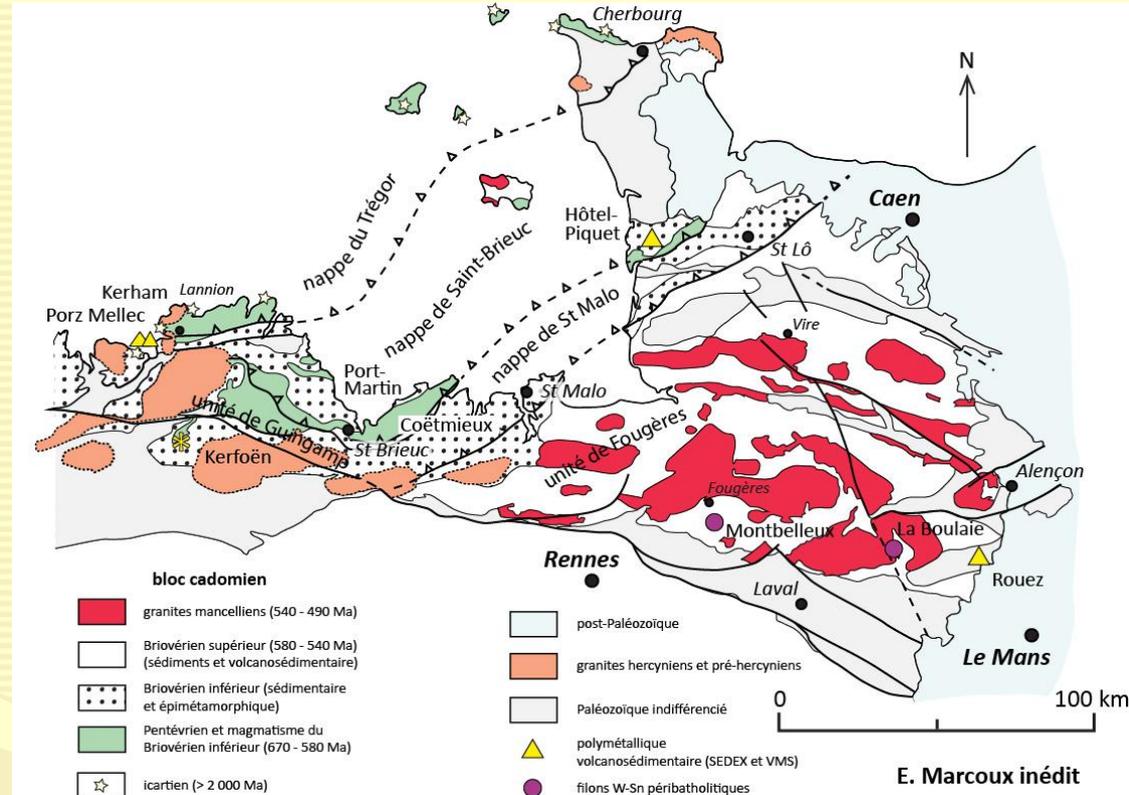
3 - Cadomien

• bloc cadomien

- édifice complexe de nappes juxtaposées à vergence sud-est sur un socle précambrien (~750 Ma)

• orogène cadomien à 2 phases (Ballèvre, 2008)

- 670 – 615 Ma : raccourcissement d'un rift intra-arc avec subduction : arc volcanique calco-alkalin
- 615 - 540 Ma : surrection de la chaîne cadomienne, comblement de bassins par des flyschs
 - ❖ 540 Ma (-> 490 Ma ?) : batholite mancellien



4 – Paléozoïque inférieur : Calédonien

● Cambrien - Silurien

- épaisses séries sédimentaires
- intercalations magmatiques brèves : *rifting* fragmentant la marge nord-Gondwana (~520 Ma, ~ 490 Ma)

● Dévonien

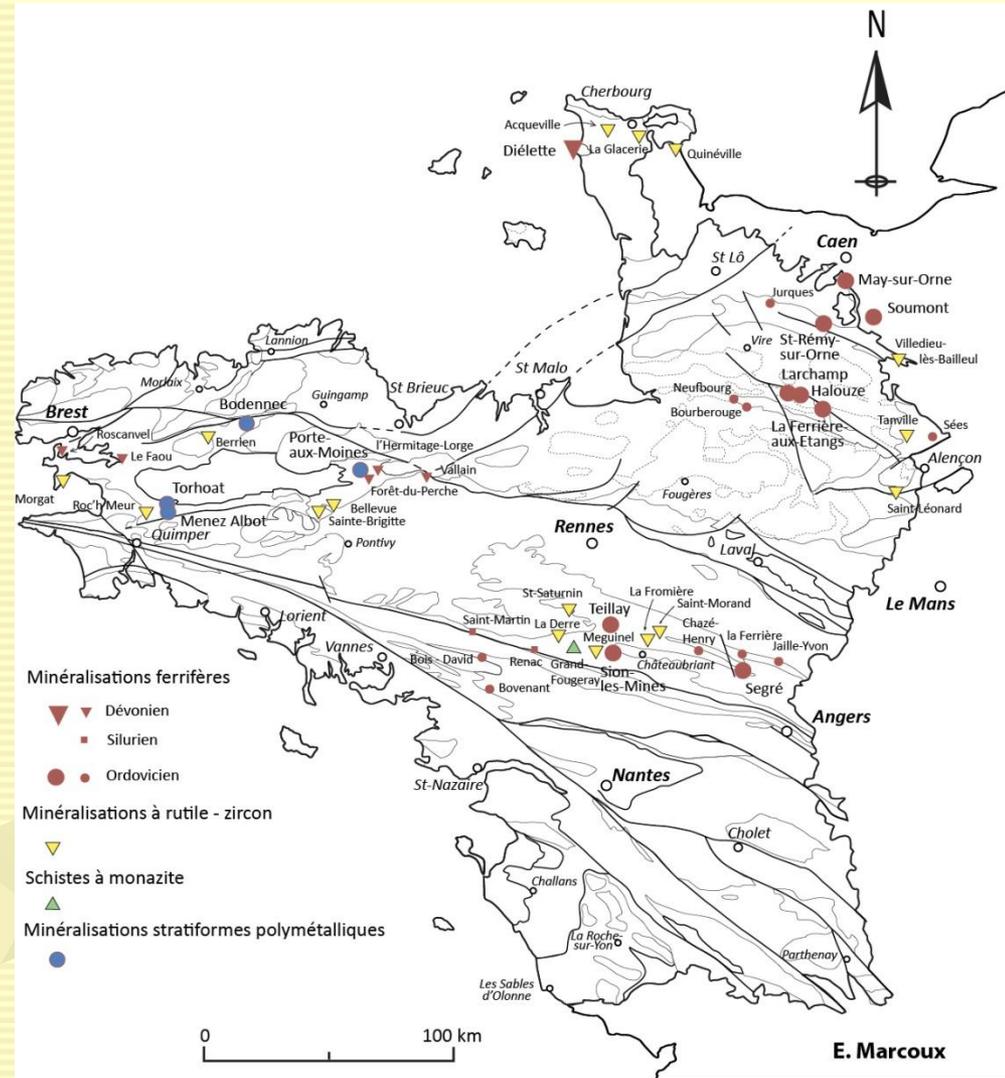
- sédimentation marine de plate-forme
- épisode de distension à volcanisme bimodal (centre-Bretagne)

● Minéralisations exogènes

- fer oolithique (Ordovicien à Dévonien)
- grès à Zr-Ti (Ordovicien)
- schistes à terres rares

● Minéralisations endogènes

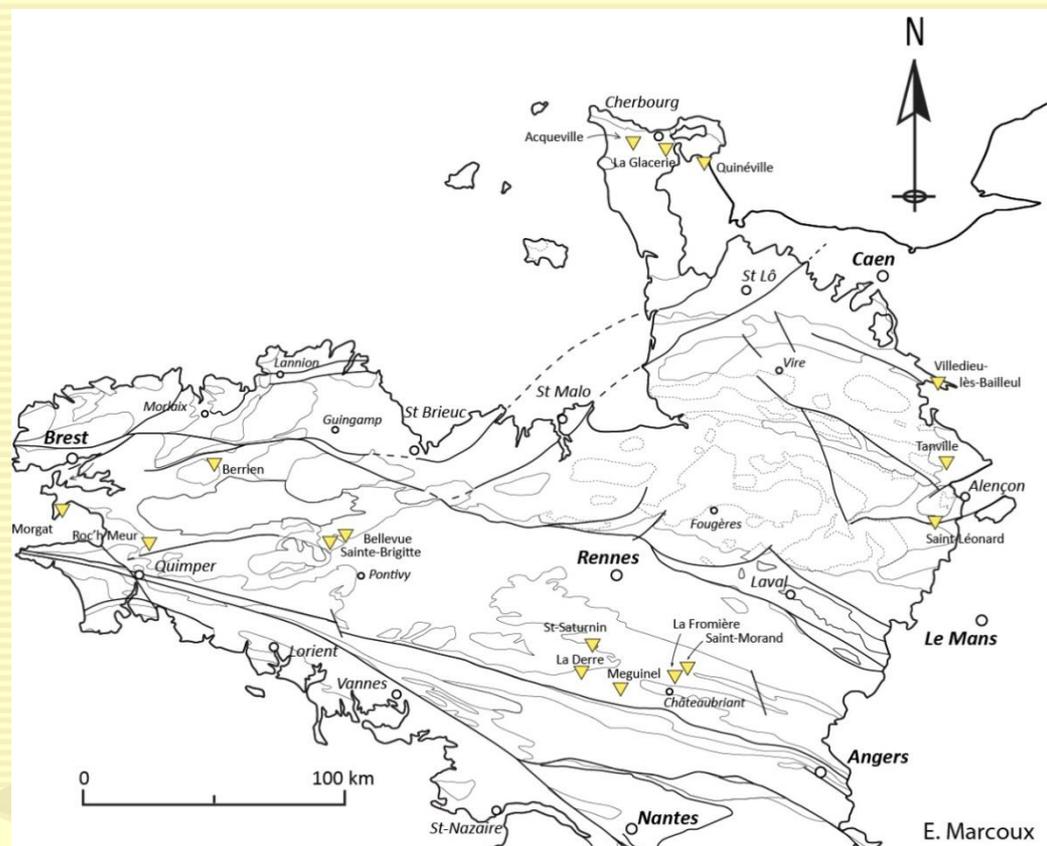
- amas sulfurés (Dévonien)



Paléoplacers Zr-Ti

grès à rutile-zircon

- sommet des grès armoricains : Arenig (472 Ma) à Caradoc (462 Ma) = haut des plages Ordovicien inférieur à moyen
- **paléoplacers** nombreux d'extension régionale (Crozon à Cotentin)
- puissance des bancs : jusqu'à 10 m, T_m en minéraux lourds : fortes, jusqu'à 15 %
- rutile, anatase, zircon
- âge zircons : 1985 ± 150 Ma (Bailleul) et 1890 ± 30 Ma (La Glacerie) (U/Pb, Vidal *et al.*, 1980) : pas de Cadomien !
- intérêt économique très limité



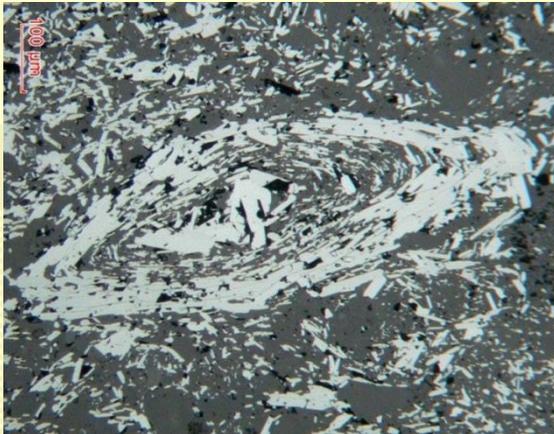
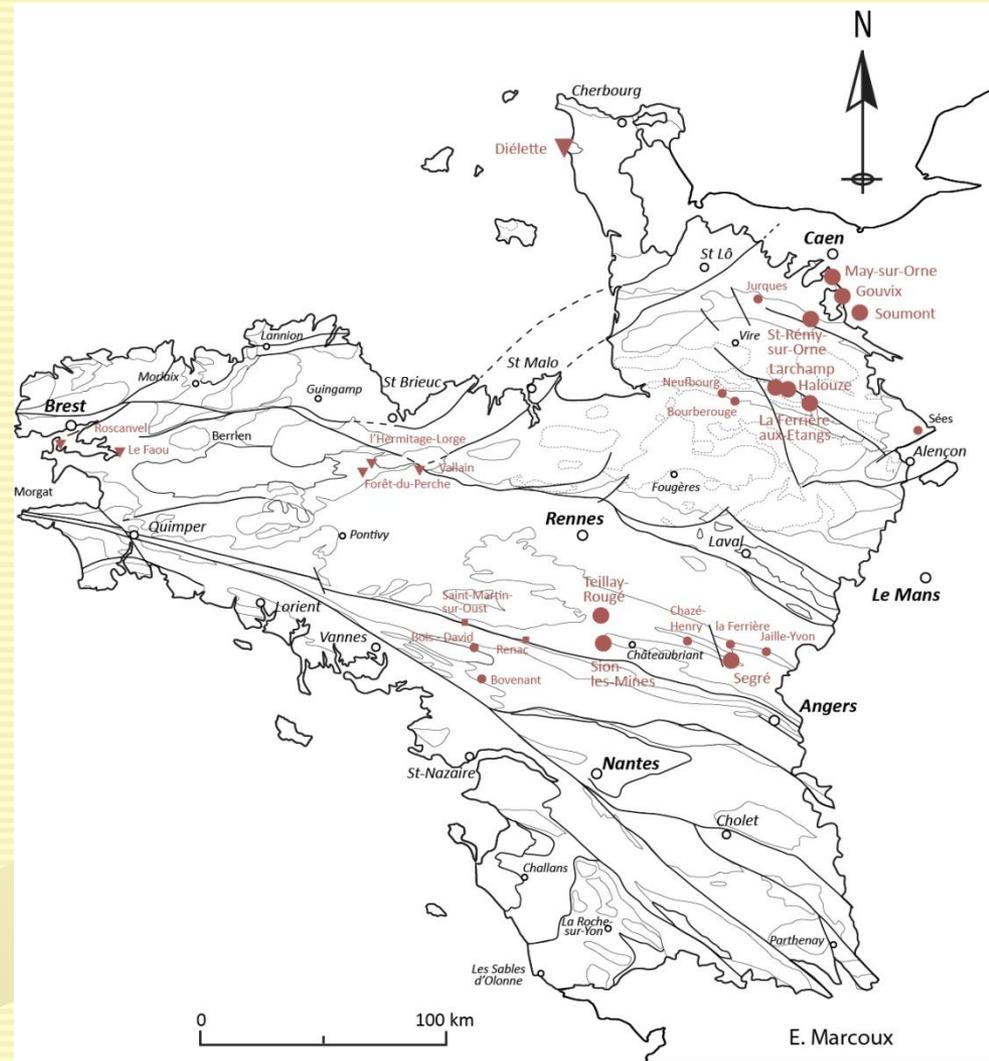
fer oolithique

• surtout ordovicien

- tous de nature oolithique, pas de BIF
- production totale de 115 Mt (3 Gt en Lorraine)
- mines importantes à l'époque
 - ❖ Normandie : Soumont (32 Mt), , May-sur-Orne (21 Mt) etc.
 - ❖ en Anjou : Segré (15 Mt)
 - ❖ en Bretagne : Sion, Teillay
- Dévonien : mineur (Diélette)

• réserves mal connues

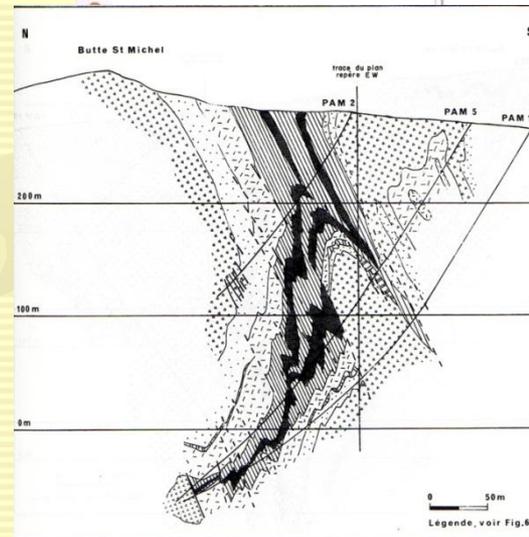
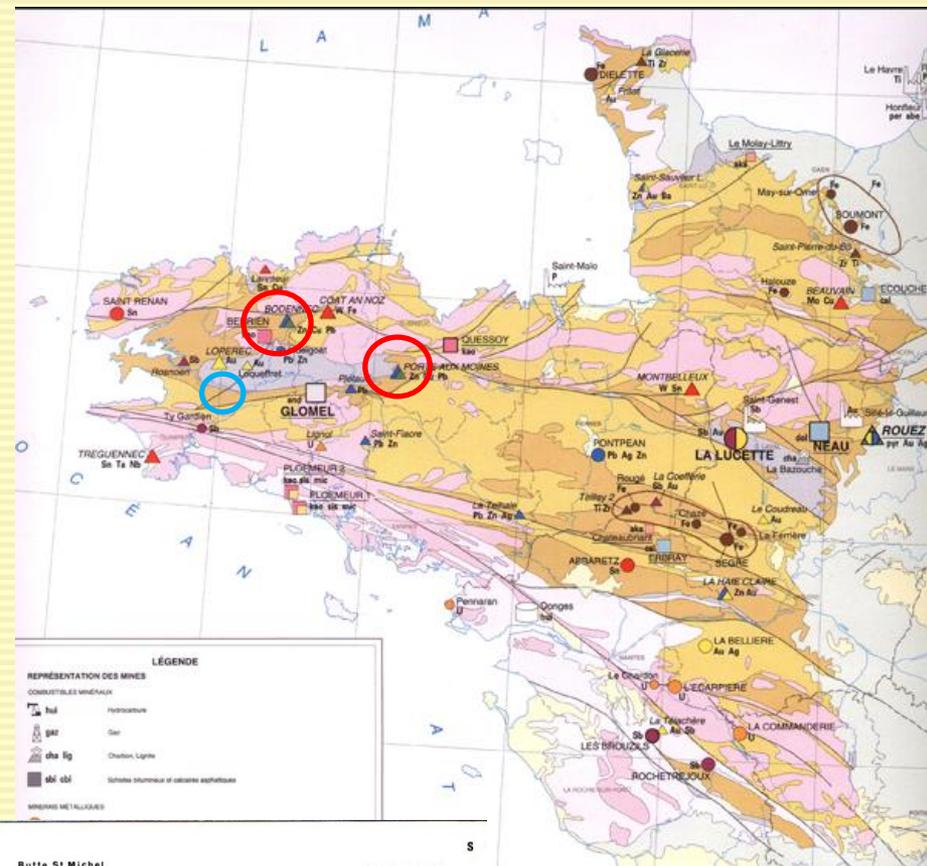
- 1, 8 – 2,3 Gt (? estimations de 1920) pour Normandie – Anjou - Est-Bretagne
- pas économiques en 2014



oolite à magnétite de Diélette

amas sulfurés type VMS à Zn-Cu-Pb-Ag

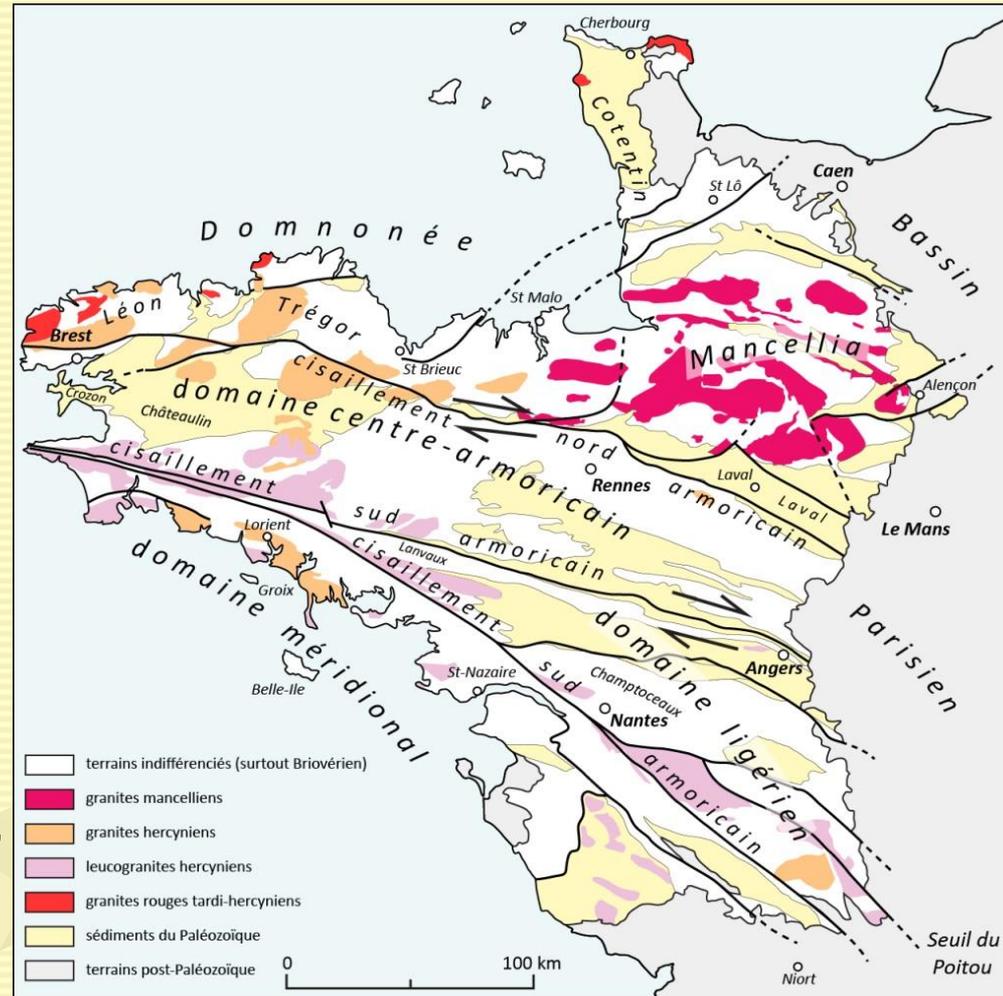
- volcanisme bimodal du Dévonien inférieur (415 – 400 Ma) ???
- **2 amas reconnus par travaux miniers (Aye, 1983):**
 - Bodennec (7 Mt à 1,5 % Zn, 0,9 % Pb et 0,6 % Cu)
 - Porte-aux-Moines (2,6 Mt à 9,5 % Zn, 2,1 % Pb et 0,7 % Cu)
- 3^{ème} connu : Menez Albot
- **modestes mais ressources potentielles importantes**
 - anomalies et indices non travaillés
 - pas de géophysique aéroportée (VTEM)



Coupe du gisement de Porte-aux-Moines

5 - Hercynien et post-Hercynien

- **Hercynien : maître d'œuvre du massif armoricain**
 - histoire complexe :
 - empilement de nappes et métamorphisme (~ 359 – 330 Ma)
 - formation de bassins sédimentaires (Tournaisien à Stéphaniens)
 - granitisations majeures de ~ 335 à 290 Ma
 - ❖ fusion crustale résultant de l'épaississement de la croûte
 - ❖ 3 ceintures
 - cisaillements majeurs
 - **métallogénie**
 - ❖ leucogranites spécialisés : Sn-W (Be, Nb-Ta, Li)
 - ❖ cisaillements type *shear zone* = drains crustaux à Au-Sb



granites hercyniens : Sn, W, (Nb-Ta), Li

gisements potentiels : Sn et W péribatholitiques

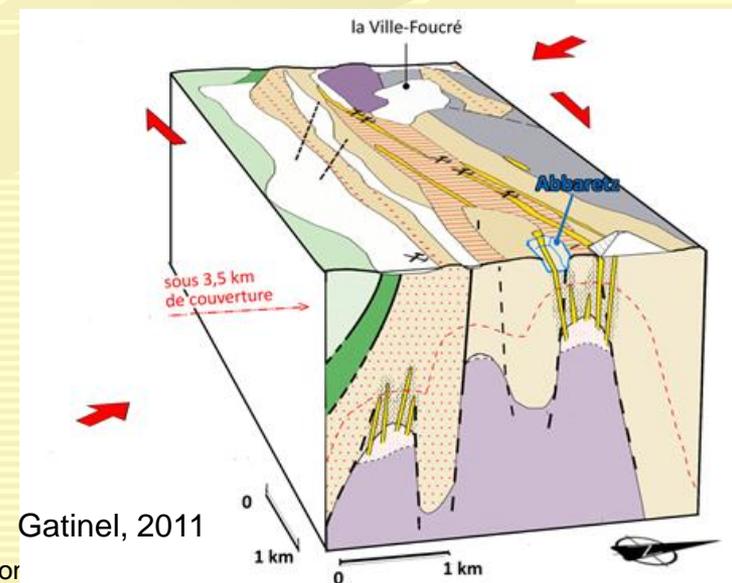
- granites spécialisés
- leucogranites et monzogranites

Coat-an-Noz (Loc Envel) : skarn W-Cu

- lié au granite de Toul Porz (329 ± 5 Ma)
- skarn : séries carbonatées du dévonien
- réserves (1986) : 1,1 Mt @ 1,3 % WO_3 + 0,3 % Cu (cut off : 0,6 % WO_3)

Abbaretz (Nozay) : filons Sn apicaux

- coupole sub-affleurante de leucogranite, extension de Questembert (318 ± 4 Ma)
- extraction de 4 kt SnO_2 (1951-1957)
- réserves (1957) :
 - ❖ 8 700 t de cassitérite (Beaulieu)
 - ❖ réserves (non cubées), au Bé, la Ribaudais...
- idem Echassières (Allier)
 - ❖ 60 t/an Sn + Nb/Ta (6 t/an) : sous-produit du kaolin
 - ❖ lépidolite (0,7 % Li_2O)





***open pit* d'Abbaretz (Nozay) réhabilité en plan d'eau, centre d'entraînement de ski nautique**

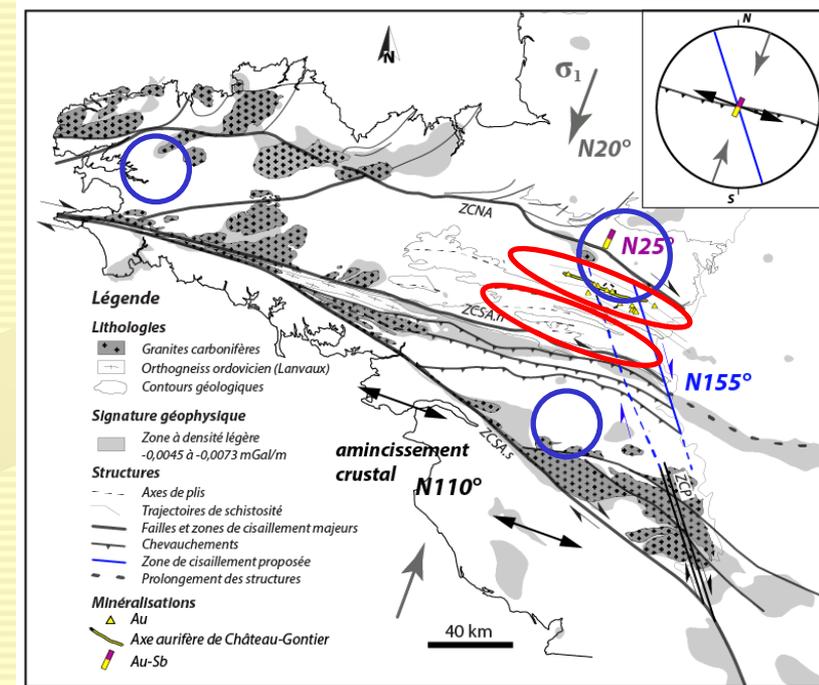
or de l'Hercynien : « or 300 » (Limousin)

- filons aurifères à 300 ± 5 Ma = failles de cisaillement majeures (parfois > 100 km), les *shear zones*, minéralisées sur une grande profondeur (> 2 900 m en Abitibi, Canada)
- Limousin : *shear zones* tardi-hercyniennes N 70-80 °E



or 300 en Armorique ???

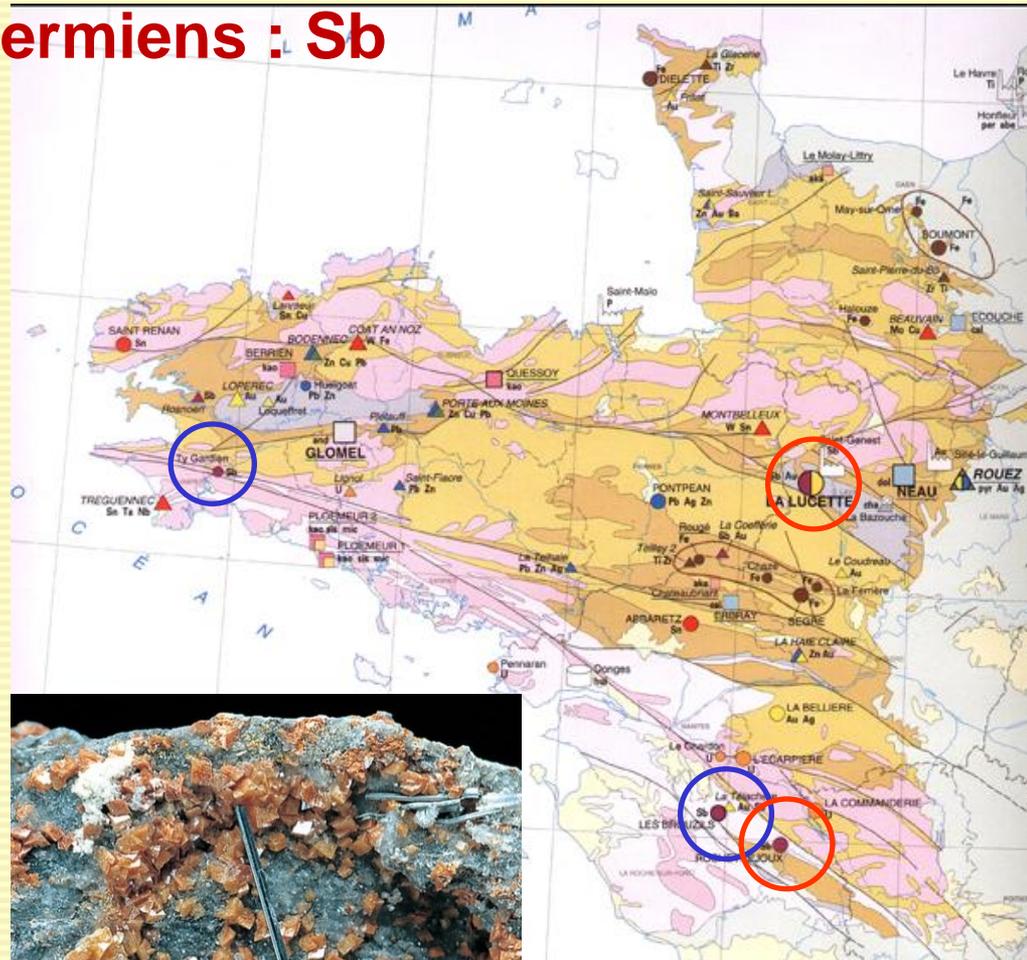
- *shear zone* très probable : Vieuville, Beslé
- La Bellière ??
 - ❖ N 60 et N 80 °E à pendage sud
 - ❖ lien avec le jeu de la branche sud du CSA ?
- Lopérec : fente de tension N 80 °E ?
- La Lucette : fente de tension N 25° ?



filons permienens : Sb

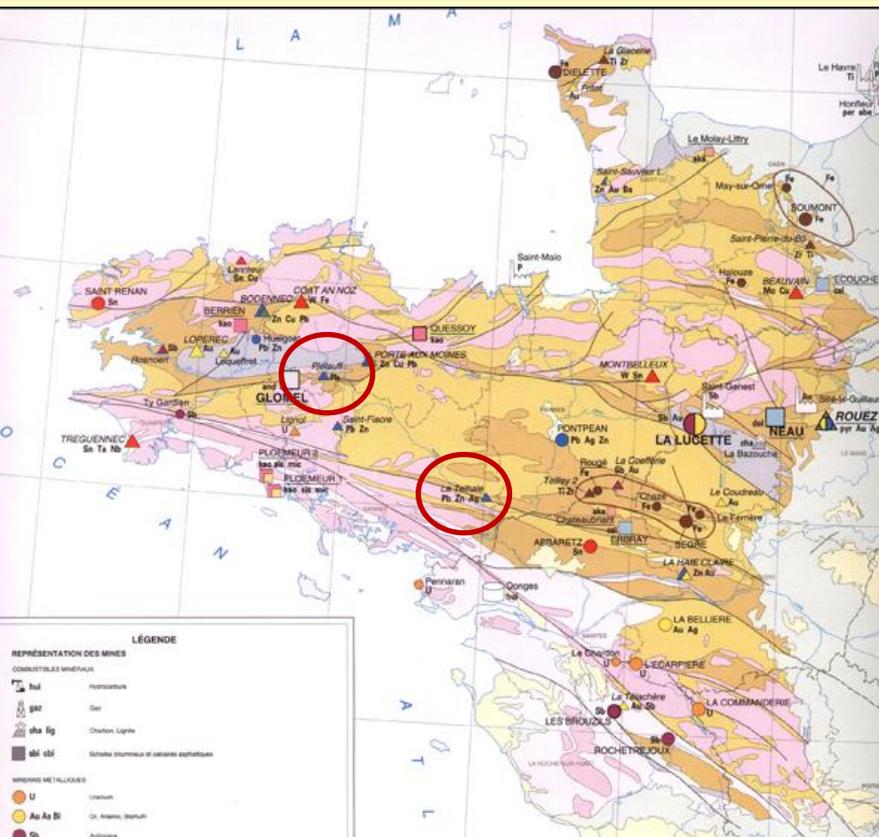
filons d'antimoine

- mines majeures
- lien fréquent avec or
 - ❖ **Rochetréjou** (1907–1925)
16 500 t Sb
 - ❖ **La Lucette** (1899-1934)
42 000 t Sb (et 8,7 t Au)
- **découvertes de l'inventaire**
 - ❖ les **Brouzils** : ressources de 160 kt @ 6,8 % Sb (11 kt Sb), réserves prouvées (1988) de 4,8 kt Sb
 - ❖ district de Vendée : Sb + Au
 - ❖ **Ty Gardien**
- métallotecte de l'antimoine
 - ❖ distal/granites ?
 - ❖ épithermal profond ?



filons permien : Pb-Zn-Ag et « petits » métaux

- Contexte d'extension post-orogénique dès le Permien (299 – 251 Ma)
 - fissuration généralisée N 130 – 170 °E
 - circulations de fluides hydrothermaux BT : filons exploités dans toute l'Europe pour Pb-Zn, Ag et U
 - Armorique : filons Pb-Zn-Ag (Pontpéan 0,25 Mt Pb+Zn)



- potentialités en Pb-Zn-(Ag, Ge, In...)**

- Plélauff (Côtes d'Armor)**

- ❖ structure suivie sur 8 km
- ❖ puissance de la caisse 1 – 10 m
- ❖ ressources importantes non évaluées
- ❖ sphalérite @ 750 g/t Ge, 50 g/t Ga, 800 g/t Ag et 2,5 kg/t Cd

- La Telhaie (Morbihan)**

production mondiale Ge : 150 t (2013)
production mondiale In : 770 t (2013)
production mondiale Cd : 22 t (2013)

filons permiens : U

- gisements de Vendée, Pontivy et de Guérande

- 3^{ème} région française avec 16 kt d'U produits (1953 – 1991) dont 14,4 en Vendée

- ❖ L'Ecarpière : 4112 t
- ❖ La Commanderie : 3978 t
- ❖ Le Chardon 3570 t

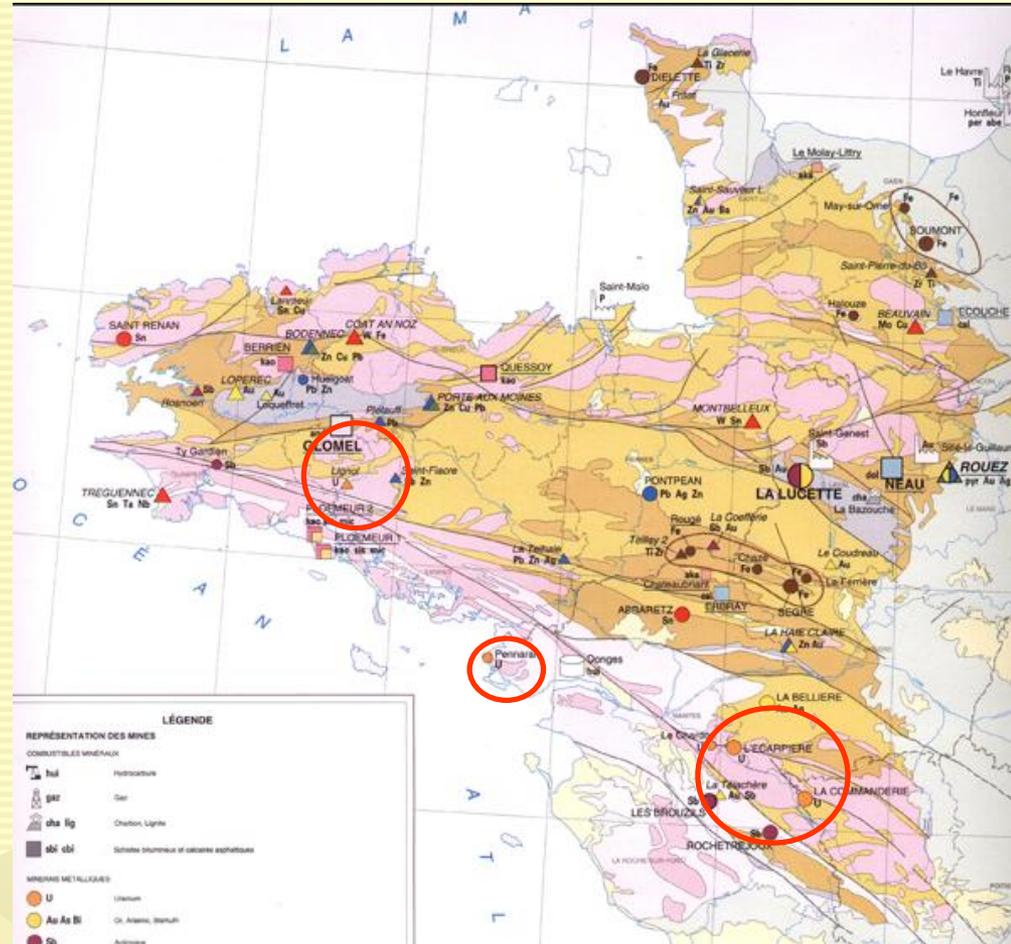
- filons bien datés en Vendée

- 285 à 270 Ma

- ❖ U/Pb sur pechblende (Holliger et Cathelineau, 1986, Cathelineau et al., 1990)

- genèse

- source : uraninite des leucogranites
- U mobilisé avec reconcentrations tardives dans des failles bordières



6 – Perspectives : des raisons d'espérer

– Peu d'espoir dans le Massif armoricain :

- ❖ Fe (gigantesques gisements en Australie, Brésil...)
- ❖ Zr-Ti (coût opératoire trop élevé, ressources mondiales importantes)
- ❖ placers Sn et terres rares : trop petits
- ❖ U : filons « petits » pour le 21^{ème} siècle

– Potentialités fortes

- ❖ métaux de base (amas sulfurés)
- ❖ métaux de base et petits métaux (filons Zn-Pb)
- ❖ or (filon)
- ❖ antimoine (filon)
- ❖ étain et tungstène (péri-batholites)

– cibles minières identifiées, parfois cubées

– découvertes majeures probables

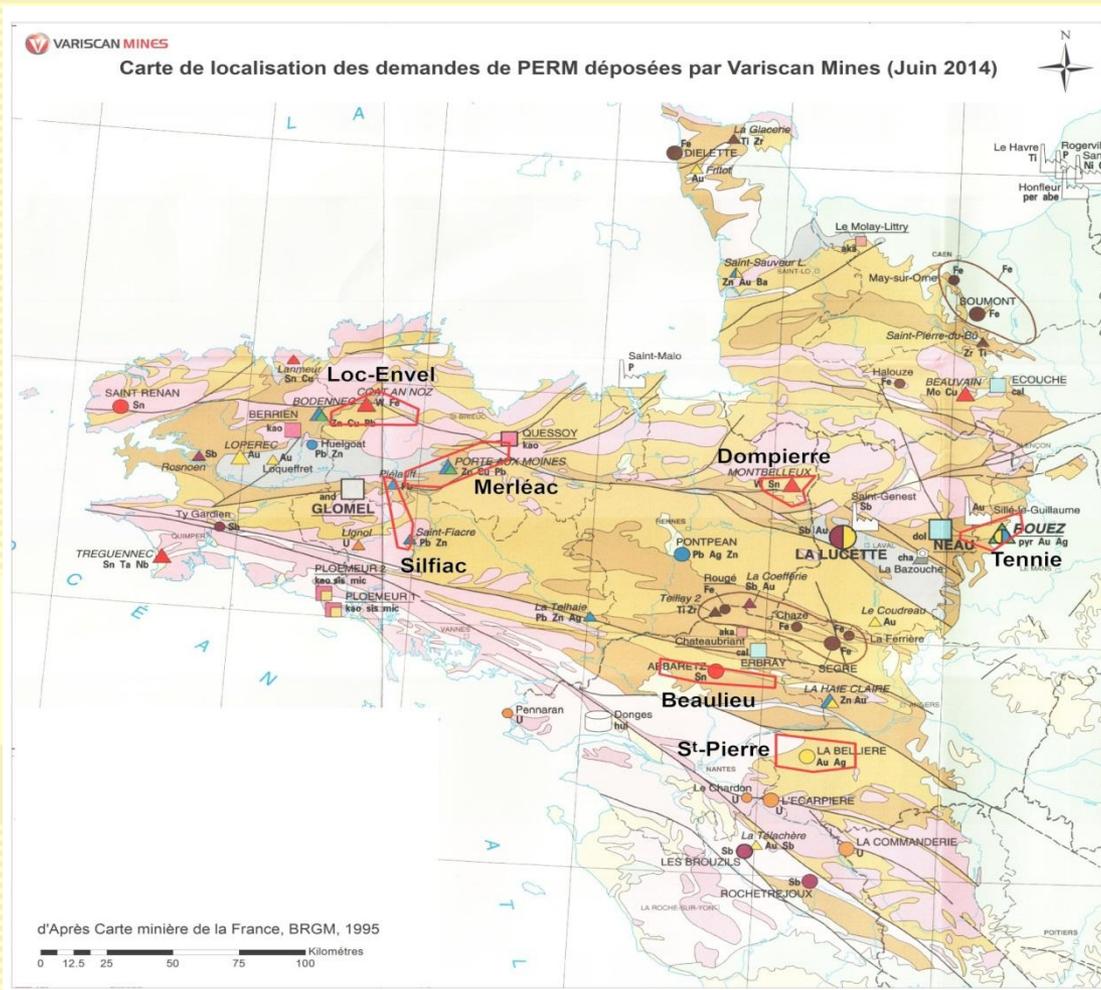
- ❖ pas de géophysique d'exploration à grande échelle
- ❖ des outils modernes : géophysique aéroportée : VTEM et MégaTEM : « voit » les sulfures massifs jusqu'à 500 m de profondeur
- ❖ réponses partielles aux besoins industriels



retour des compagnies minières

– 7 PERM demandés par **Variscan Mines** dans le Massif armoricain :

- ❖ 2 accordés (juin 2014),
- ❖ 2 en phase de finalisation
- ❖ 3 en cours d'examen



mine de cuivre de Las Cruces (Espagne), ouverture en juin 2009



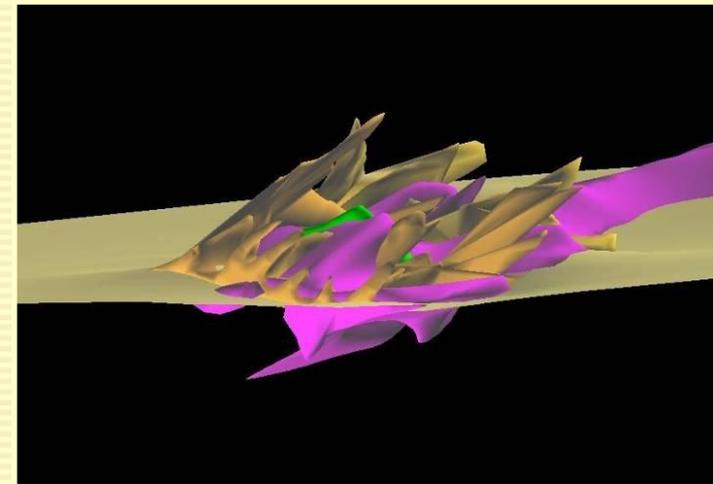
Rennes _ 8-11 septembre 2014 - Ressources minérales : la vision du géologue

• rôle des universités

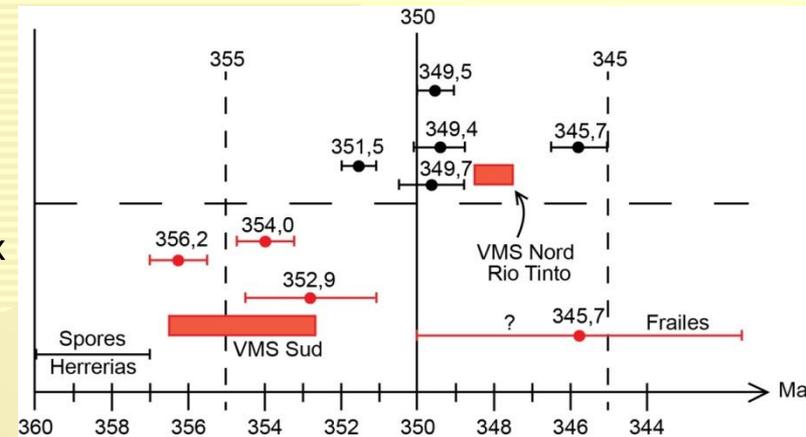
- bonne compréhension des phénomènes géologiques minéralisateurs = exploration minière optimisée
 - ❖ méthode d'exploration adaptées et plus performantes quand on sait ce qu'on cherche : affinement des métallogènes
 - ❖ symbiose académique « fondamental » et minier « appliqué »

• thèmes possibles

- métallogénèse cadomienne
 - ❖ W-Sn péritholitique
 - ❖ Zn-Cu-Pb-Au amas sulfurés aurifères d'extension importante (Trégor aux Mauges)
- VMS: volcanisme sous-marin
 - ❖ géodynamique : recherche des sites favorables aux minéralisations (arcs volcaniques, bassin d'arrière-arc ?)
 - ❖ âge du volcanisme et des VMS du bassin de Châteaulin
 - ❖ dévonien inférieur (415 – 410 Ma) ? ou plus récent ?
 - ❖ sud-Ibérie : VMS géants Dévono-dinantien (356 – 349 Ma)
 - ❖ apport à la géodynamique
- affinement des districts et ceintures métallogéniques d'Armorique

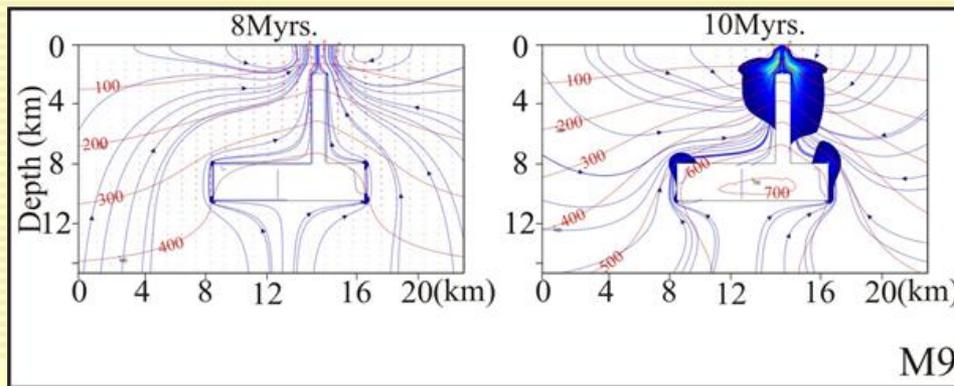


modélisation 3 D VMS d'Eléonore (Québec)

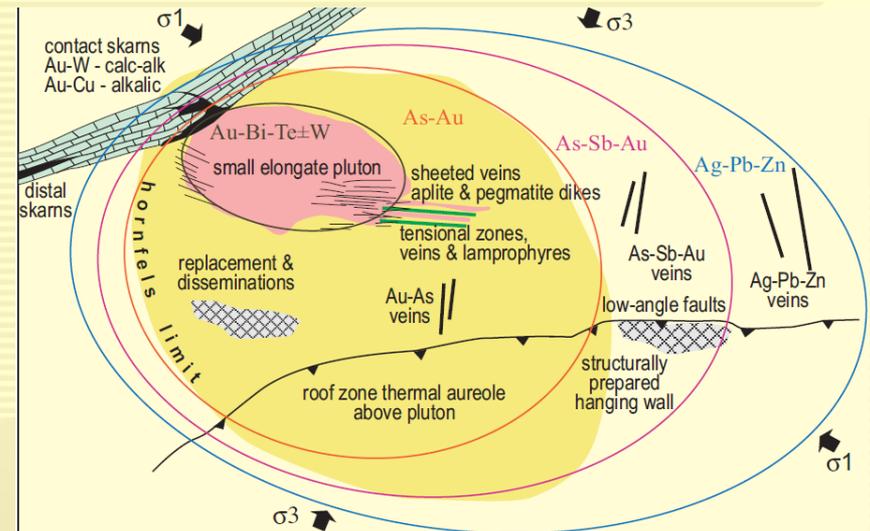


datation des VMS de Sud-Ibérie

- Métallogénèse pér batholite (Montbelleux, Abbaretz...) : des R-IRG ?
 - ❖ affinement des modèles de gisements
 - ❖ timing intrusif / altération hydrothermale / minéralisations
 - ❖ origine fluides et métaux...
 - ❖ des R-IRG (*Reduced-intrusion related gold deposits*) en Armorique ?
 - ❖ thermicité pér batholitique : aide à la localisation de gisements
 - ❖ gravimétrie : recherche des apex cachés à Sn et W (Mo, Nb, Ta) & modélisation 3 D



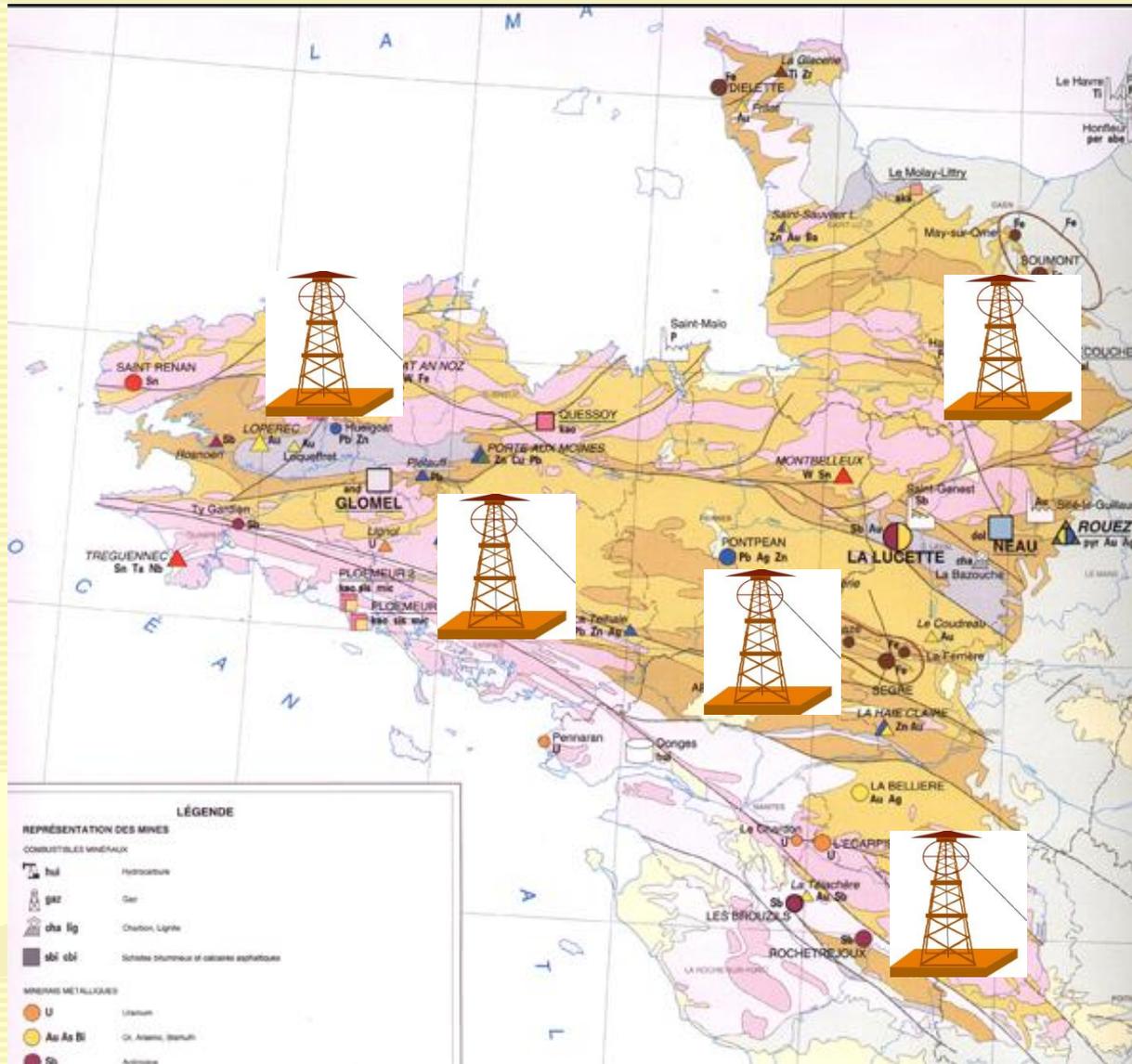
Eldursi et al, 2009



RIRG de Hart, 2007

- Métallogénèse tardi-hercynienne
 - ❖ cadre structural et âge des filons Pb-Zn, des filons Sb, des filons Au ?
 - ❖ gisements Au : *shear zones* et or 300 ou fentes de tensions ? (Lopérec, La Lucette)
- etc. etc.

• *Merci pour votre attention*



● références

- Aye F., (1983) – Contrôles géologiques des gîtes stratiformes à Pb, Zn, Cu, Ag de la bordure du bassin de Châteaulin, Massif Armoricain, France. Mémoire BRGM n°120, 264 p.
- Ballèvre M. (2008) – Structure et évolution du Massif armoricain in La chaîne varisque, Géochronique n° 105 BRGM et SGF éditions, p. 29-31
- Cathelineau M., Boiron M-C., Holliger P., Poty B. (1990) - Metallogensis of the French part of the Variscan orogen. Part II: Time-space relationships between U, Au and Sn-W ore deposition and geodynamic events - mineralogical and U-Pb data. Tectonophysics, 177, 1-3, 59-79
- Chauris L., Marcoux É. (1994) - Metallogeny of the Armorican Massif. In: "Pre-Mesozoic geology in France and related areas". J. D. Keppie (Ed.), part.II.C Metallogeny. Springer Verlag, pp. 243-264
- Eldursi, K., Branquet, Y., Guillou-Frottier, L. and Marcoux, E., (2009) - Numerical investigation of transient hydrothermal processes around intrusions: Heat-transfer and fluid-circulation controlled mineralization patterns: Earth and Planetary Science Letters, v. 288, p. 70-83.
- Hart, C.J.R. (2005) - Classifying, distinguishing and exploring for intrusion-related gold systems: The Gangue, v. 87, p. 1, 4-9.
- Holliger, P., Cathelineau M. (1986) - Le chronomètre U-Pb en milieu uranifère : application aux gisements hydrothermaux d'uranium liés spatialement au batho-lite de Mortagne (Vendée, France). Chronique de la Recherche Minière, 485, 33-43
- Pochon A. (2014) – Apports d'une étude pluridisciplinaire sur les contrôles géologiques des minéralisations à or et antimoine en Bretagne centrale, Master OSUC, Orléans
- Vidal P., Peucat J.J., Lasnier B. (1980) - Dating of Granulites Involved in the Hercynian Fold-Belt of Europe: An Example Taken From the Granulite-Facies Orthogneisses at La Picherais, Southern Armorican Massif, France. Contributions to Mineralogy and Petrology, 72, 283-289