

Le tungstène...



Éric Marcoux

Professeur à l'université d'Orléans

eric.marcoux@univ-orleans.fr

**Journée Mines en France, Paris,
7 juin 2018**

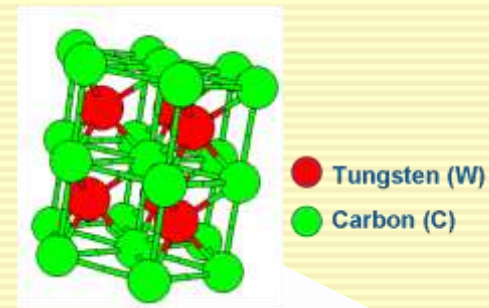
généralités

- **W : tungstène (ou wolfram) ($z = 74$)**
 - identifié en 1781 dans la wolframite
 - étymologie : suédois *tung sten* (pierre lourde)
 - $d : 19,25$ (identique à celle de l'or)
 - $D : 7,5$ sur échelle de Mohs (1 à 10)
 - fusion : $3\,410 - 3\,422\text{ °C}$
 - ❖ n° 1 des métaux (tantale : $3\,017\text{ °C}$)
 - ❖ n° 2 des éléments après le carbone ($3\,550\text{ °C}$)
 - conductibilités électrique et thermique élevées
 - plus faible coefficient de dilatation de tous les métaux
 - Clarke : **1,25 ppm** (étain : 2 ppm, plomb : 14 ppm, cuivre : 50 ppm)



• utilisations

- **carbures cémentés (50 %)**, WC et W_2C : dureté de 9 sur l'échelle de Mohs
 - ❖ outils de coupe et abrasifs
 - ❖ trépan de forage, tunneliers...
- **aciers au tungstène (25 %) et superalliages (2,5 %)**
 - ❖ turbines d'avion, de fusées et de centrales à gaz
 - ❖ pièces de fours métallurgiques...
- **tungstène métal (13 %)**
 - ❖ tubes de rayons X, lampes à filaments (~ 25 000 km/an de filaments)
 - ❖ soudure, résistances chauffantes...
 - ❖ alliages lourds (90 - 98 % W) : armements, boucliers antiradiations...
- **chimie (8 %)** : la plus ancienne
 - ❖ pigments, verres spéciaux



Matériaux de coupe



Mines et construction



Applications de haute température



Eclairage



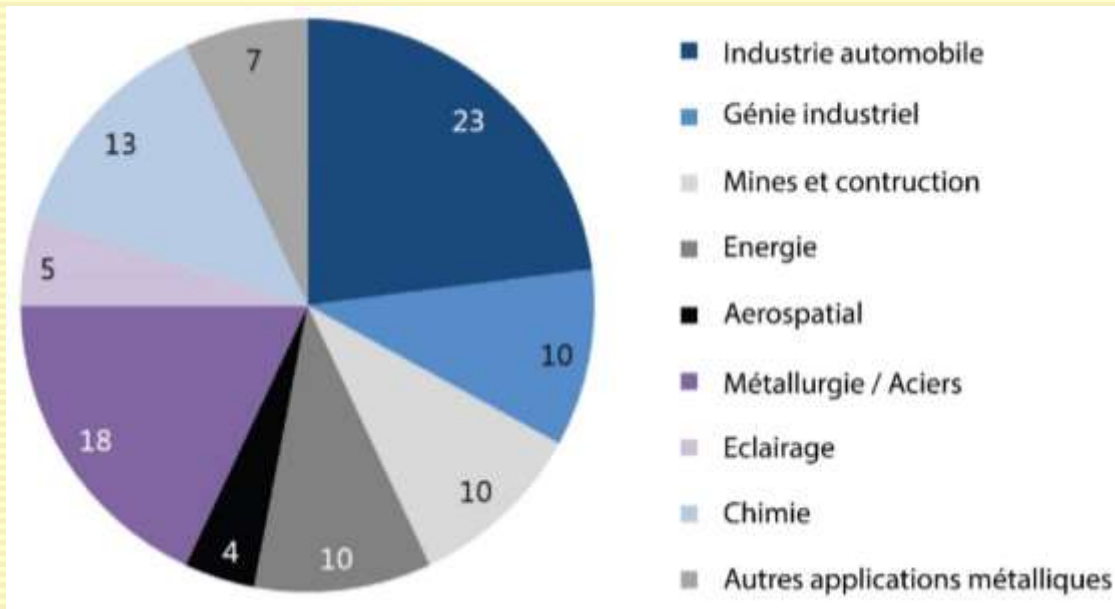
Turbines



Catalyse



ITIA



Consommation globale de tungstène par secteur en 2014 (ArgusMedia, 2015)



- **recyclage**
 - consommation : environ 25-30 % de tungstène secondaire
- **substitution**
 - en phase de R&D pour 80 % du marché
 - pour les **carbures de tungstène** : carbures cémentés de Mo, Ti, céramiques, céramiques-métal
 - ❖ performances moindres et coût bien plus élevé
 - pour le **tungstène métal** : uranium appauvri (poids et contrepoids, projectiles perçants)
 - ❖ très contestable car impact sur la santé et l'environnement

- **un usage original** : pièces et lingots d'or fourrés au tungstène !!!
 - densités identiques de l'or et du tungstène (19,25)
 - désinformation ? escroquerie marginale ?
 - pour détecter la fraude : examen par ultrasons (échographie) ou carottage...



©Gold-Analytix.de

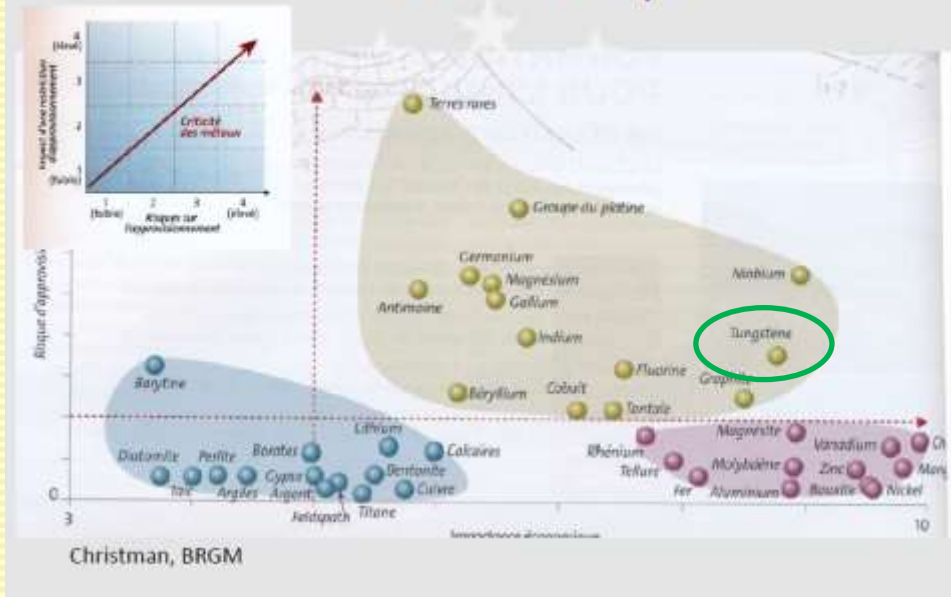


©Gold-Analytix.de



métal qualifié de « critique » par l'Union Européenne

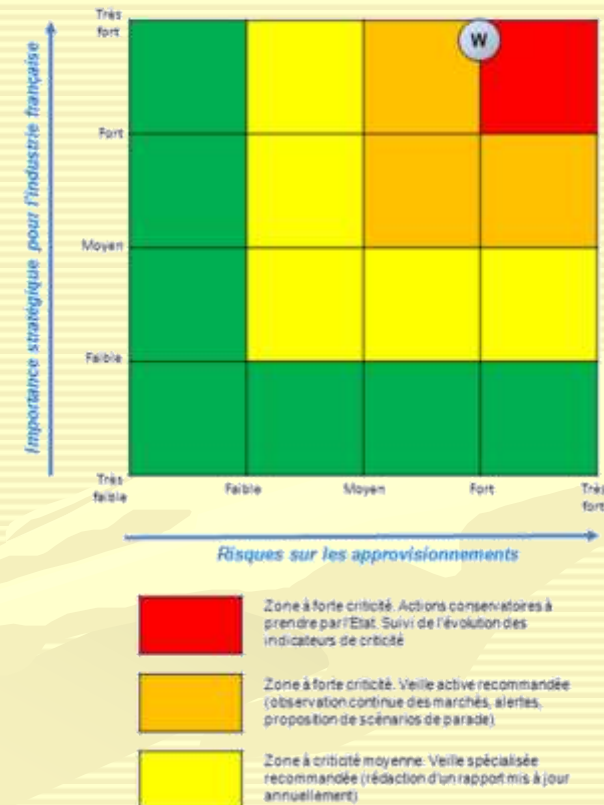
Des métaux critiques



Évolution de la production primaire et de la consommation mondiale de tungstène (USGS, Roskill)

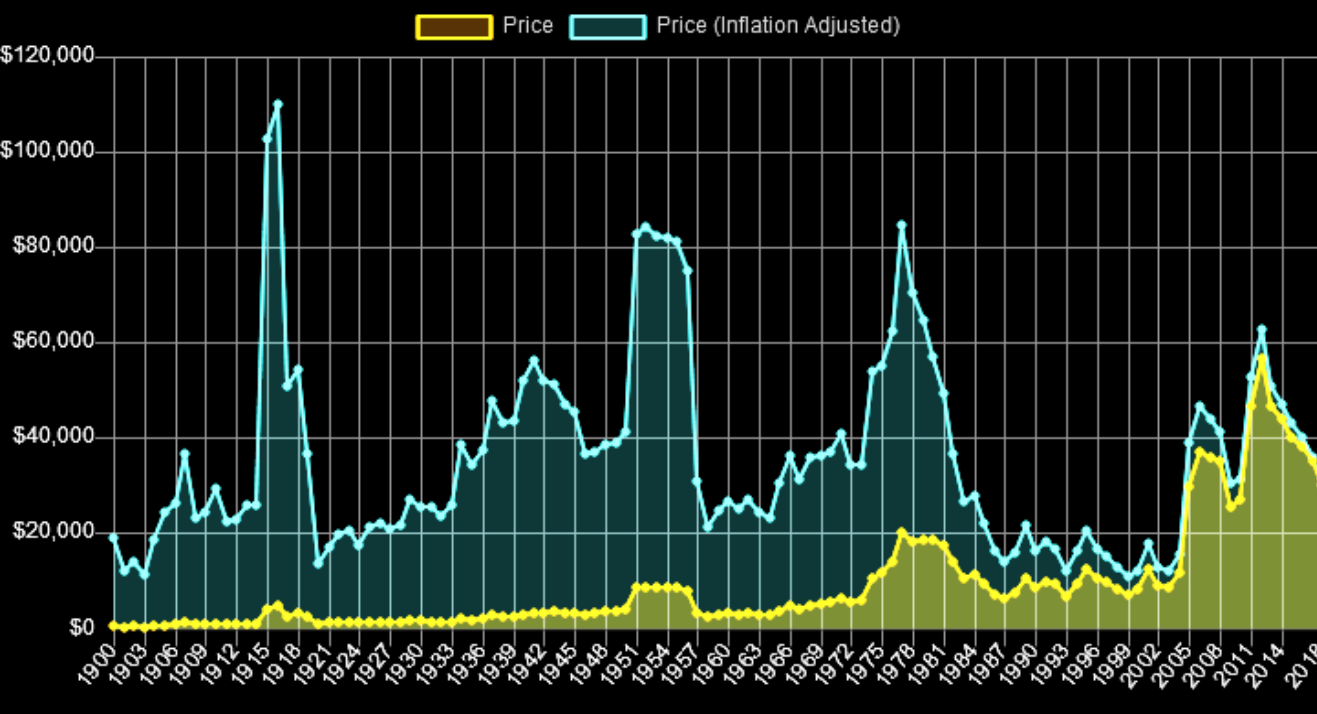
consommation France (2016) : 3 400 t de W (ArgusMedia)

EVALUATION DE LA CRITICITE DU TUNGSTENE (Synthèse)



Audion et Labbé, 2012

METALARY

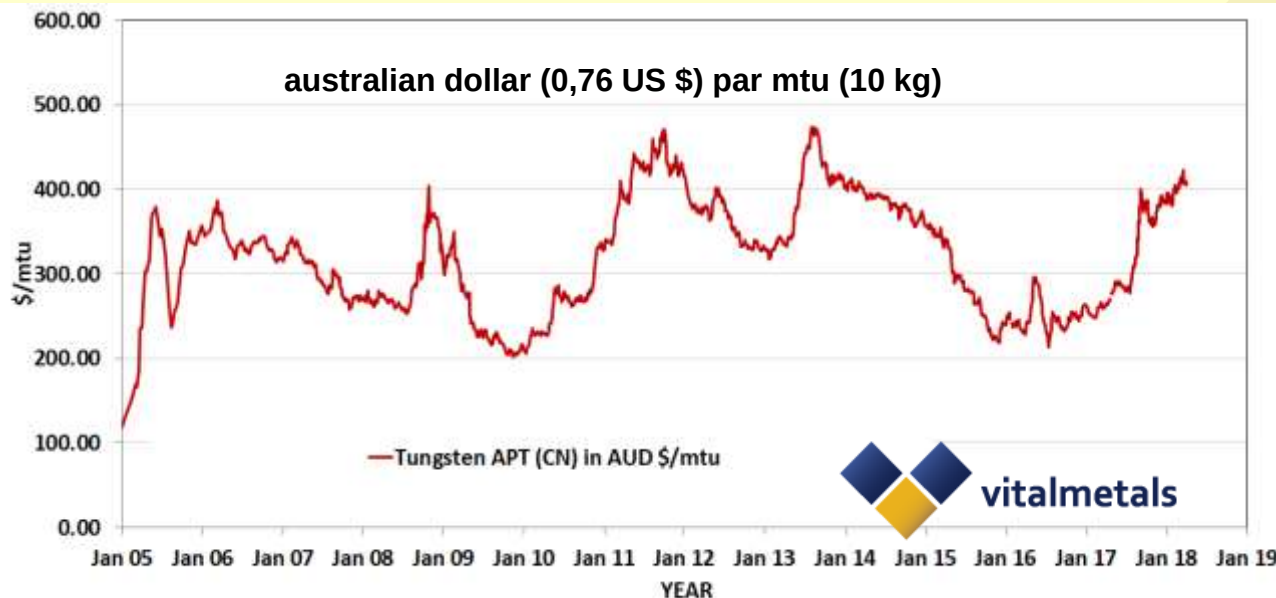


Prix W métal :

06/2002 : 7 US \$/kg
 06/2012 : 62 US \$/kg
 06/2014 : 40 US \$/kg
 10/2015 : 26 US \$/kg
 11/2016 : 36 US \$/kg

moyenne 2017 : 35,2 US \$/kg

australian dollar (0,76 US \$) par mtu (10 kg)



**Prévision 2018 : ~ 31 US \$/kg W
 mais équilibré avec un APT revu à
 la hausse (31 US \$/kg)**

cuivre : 6,82 US \$/kg (04/06/18)
 étain : 20,79 US \$/kg (04/06/18)
 molybdène : 24 US \$/kg (juin 18)



Production minière, consommation et réserves

(chiffres USGS, 2018, chiffres Roskill et BGS très légèrement différents)

- production mondiale 2016 : 88,1 kt W métal (estimation 2017 : 95 kt)

- écrasée par la **Chine** (72 kt/an soit 82 % de la production)

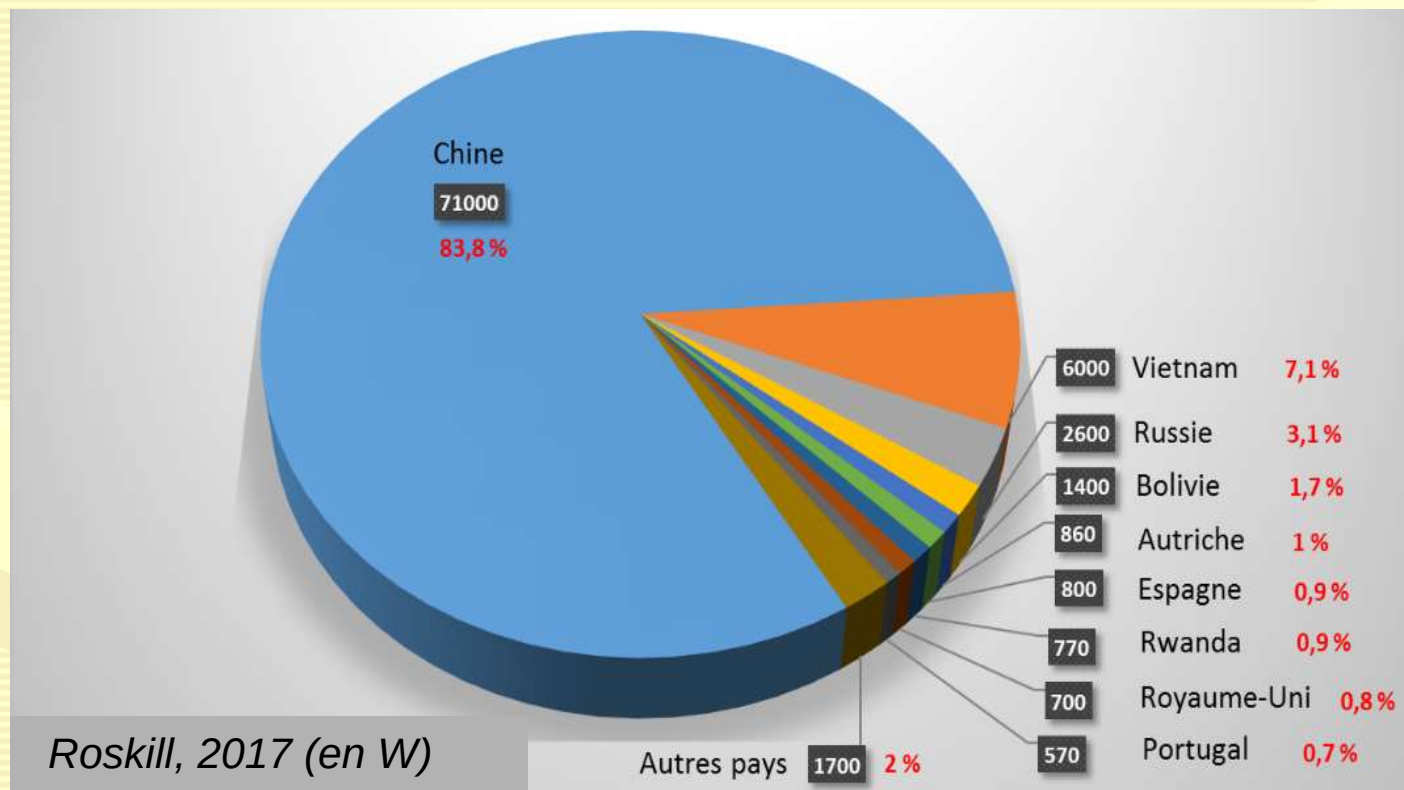
- ❖ n°2 : Vietnam (6,5 kt W), n°3 : Russie (3,1 kt W), n°4 : Bolivie (1,1 kt W)

- ❖ chiffres en W (métal) ou en WO_3 (conversion : $\times 1,26$)

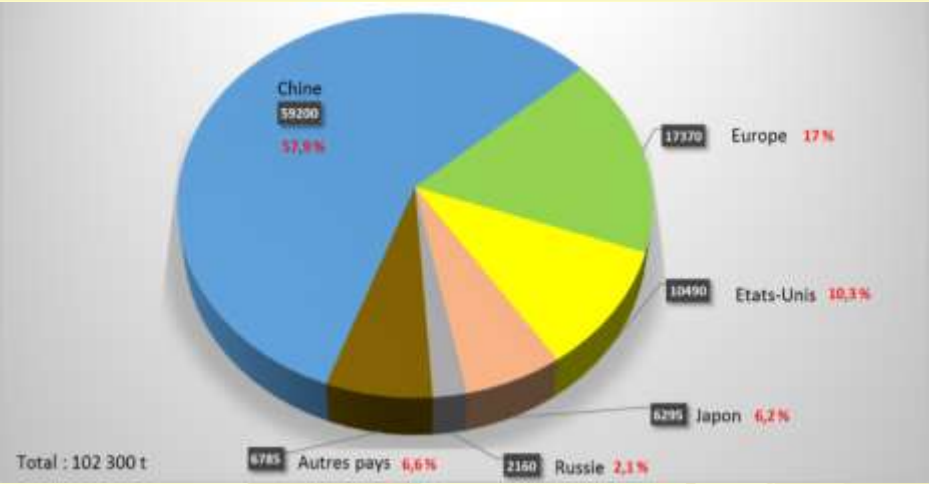
- ❖ USA : producteur mais chiffres non publiés (USGS)

- ❖ 4 mines en Europe

- Mittersill (Autriche), Hemerdon (Angleterre), Los Santos (Espagne), Panasqueira (Portugal)



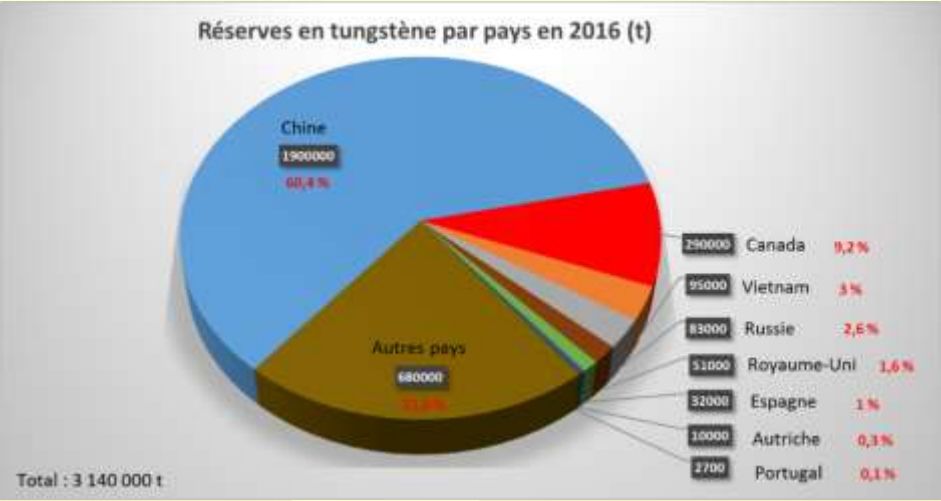
- **Consommation mondiale : 88 kt (2016)**
contre 71 kt (2010)
 - ❖ **Chine** : plus gros consommateur (55 % de la production en 2010) grâce au fort développement de la filière aval du W depuis 10 ans
 - ❖ réduction des livraisons à l'Étranger
 - ❖ risque de raréfaction du W sur les marchés mondiaux



Roskill, 2017 (en WO₃)

- **Réserves et ressources**
 - ❖ **Chine** : plus fortes réserves et ressources

Réserves mondiales USGS (W contenu) : 3,1 Mt



Ressources : 9,9 Mt (2016)



Minerais et gisements

- minerais : 2 tungstates

- scheelite** CaWO_4 (surtout skarns), fluorescente UV



- wolframite** $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ (surtout filons)

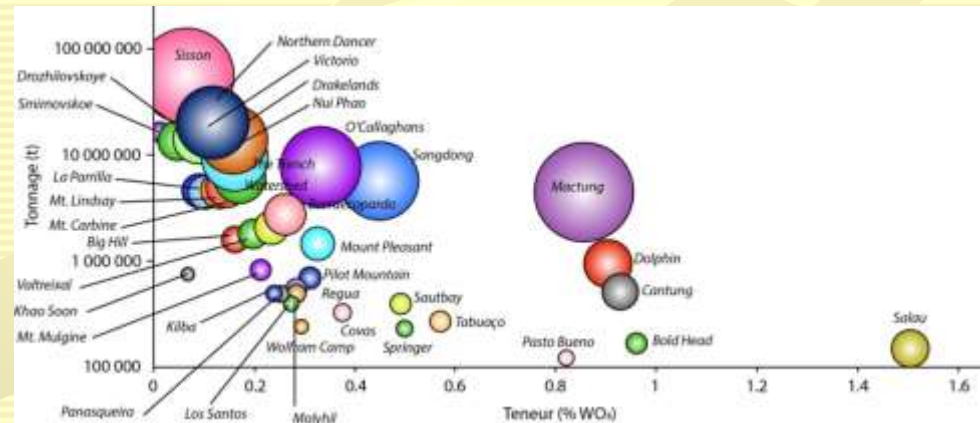
Fe : ferbérïte

Mn : hübnerïte (plus rare)



- gisements magmatiques - hydrothermaux

- métal magmatique**, lié spatialement et génétiquement aux **granites tardi-orogéniques**
 - filons et pipes périgranitiques**
 - skarns**
 - mise en place : 0,5 – 2 kbar, 300-500 °C
 - t_m : de 0,1 à 1 % WO_3 en général
 - souvent accompagné de Sn, Bi, Mo, Cu (et **Au**), possibles sous-produits
 - W parfois un sous-produit de gisements d'or ou de molybdène
 - taille souvent modeste (< 2 kt minerai/jour)
 - mines souterraines, plus rarement des *open pit*
 - très peu de gisements alluvionnaires



- produits commercialisés

- concentrés à 65-70 % WO_3 réalisés près du site minier
 - essentiel : paratungstate d'ammonium (APT)
 - oxyde de tungstène
 - tungstène métal



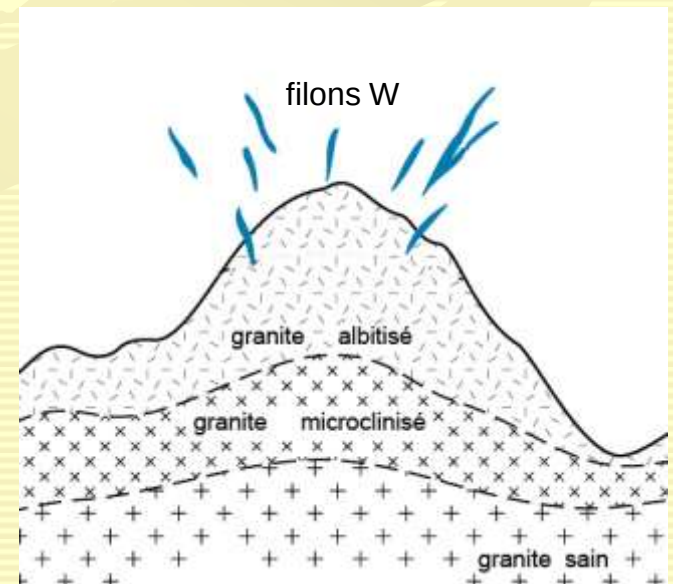
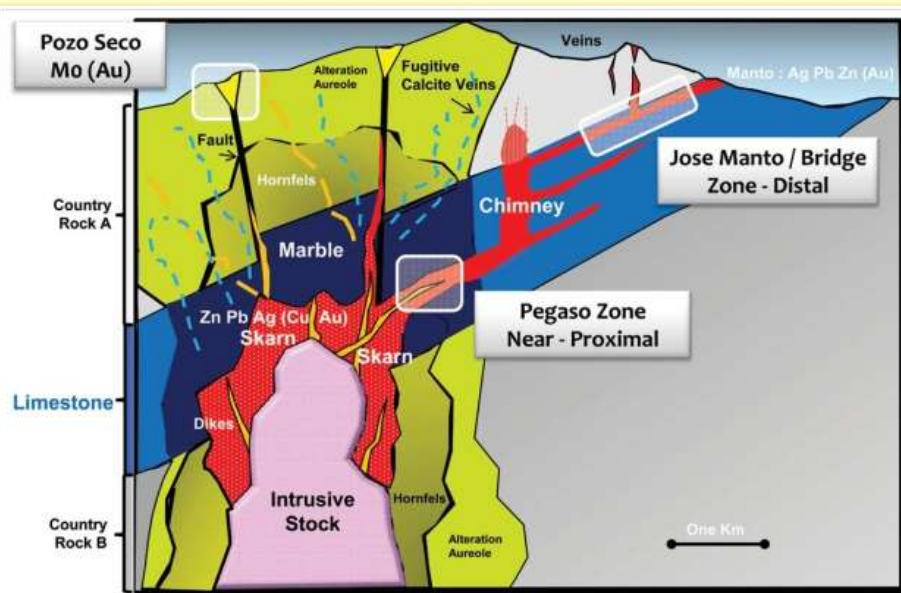
skarns

- réaction des fluides minéralisés du granite avec l'encaissant calcaire
- formation par métasomatose (remplacement)
- **minéral : scheelite CaWO_4**
- morphologie : irrégulière (amas, stratoïde...)
- manto : skarn distal (Zn-Pb-Ag)

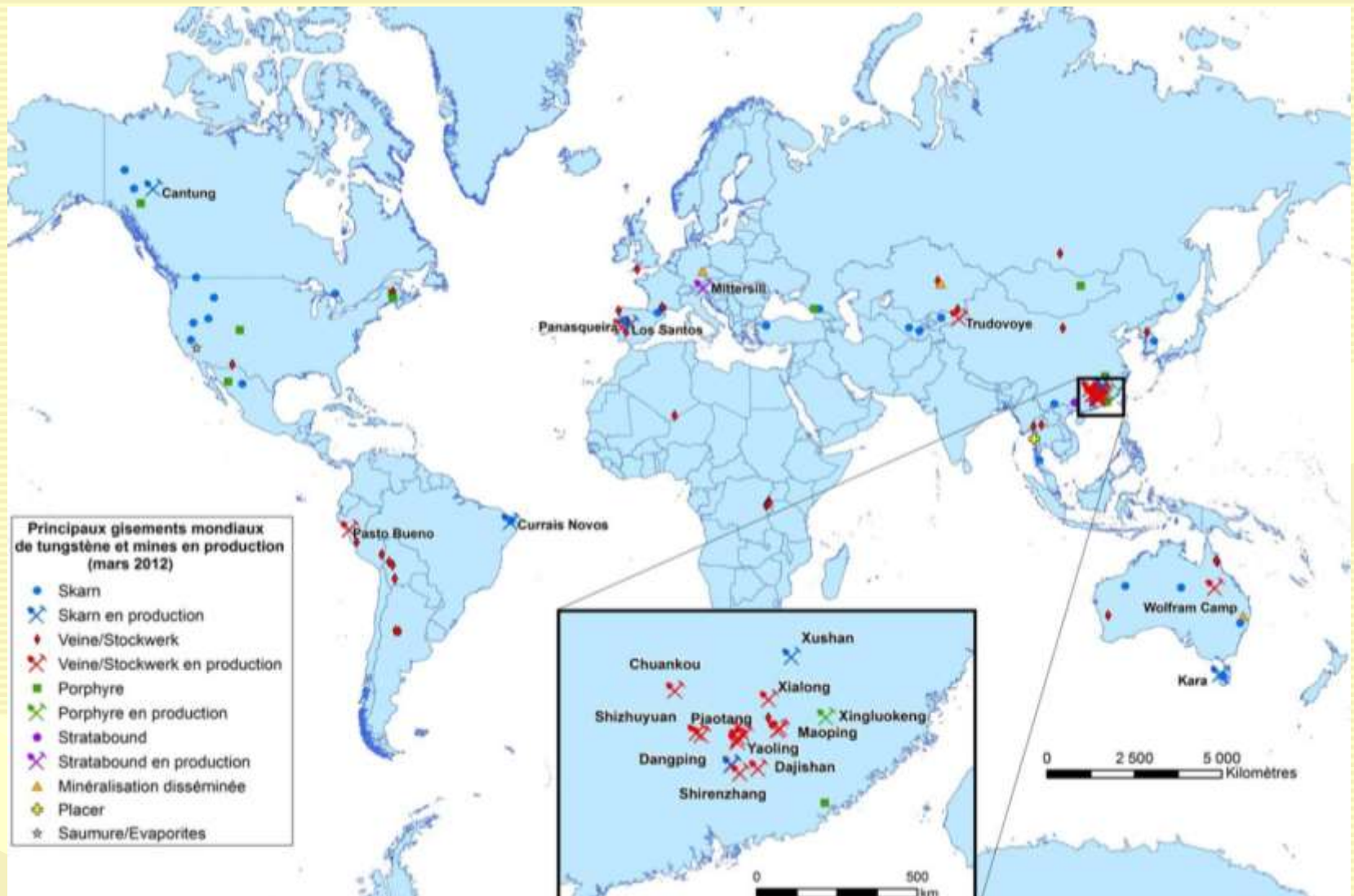


filons et *pipes* périgranitiques

- **minéral : surtout wolframite $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$**
- expulsion des fluides magmatiques résiduels enrichis en W (Sn, Mo, Au...)
- morphologie (*pipes*, filons, stockwerk...) dépend du rapport $P_{\text{fluide}}/P_{\text{lithostatique}}$



Mines de tungstène



Principaux gisements mondiaux de tungstène en mars 2012 (Audion & Labbé, 2012)

- Vietnam : producteur depuis 2014
- fermeture de Cantung (Canada) en 2015

Mines de tungstène de Chine

- **Chine du sud** : leader mondial pour la production de W, Sn, Mo etc.
- région de Nanchang, province du Jiangxi : 90 % du W de Chine
- très forte production et très importantes réserves
- 95 % de la production contrôlée par le groupe d'état CMC (*China Minmetals Corporation*)
- **gisements majeurs du Jurassique supérieur - Crétacé (158 – 118 Ma)**
 - gisements annexes de W-Sn-Nb-Ta liés aux granites peralumineux du Trias (230 - 210 Ma)
- **géologie** : marge nord du pluton de Jiangnan
- **métallogénie** : gisements nombreux dans la ceinture de Xihuashan-Zongshuk



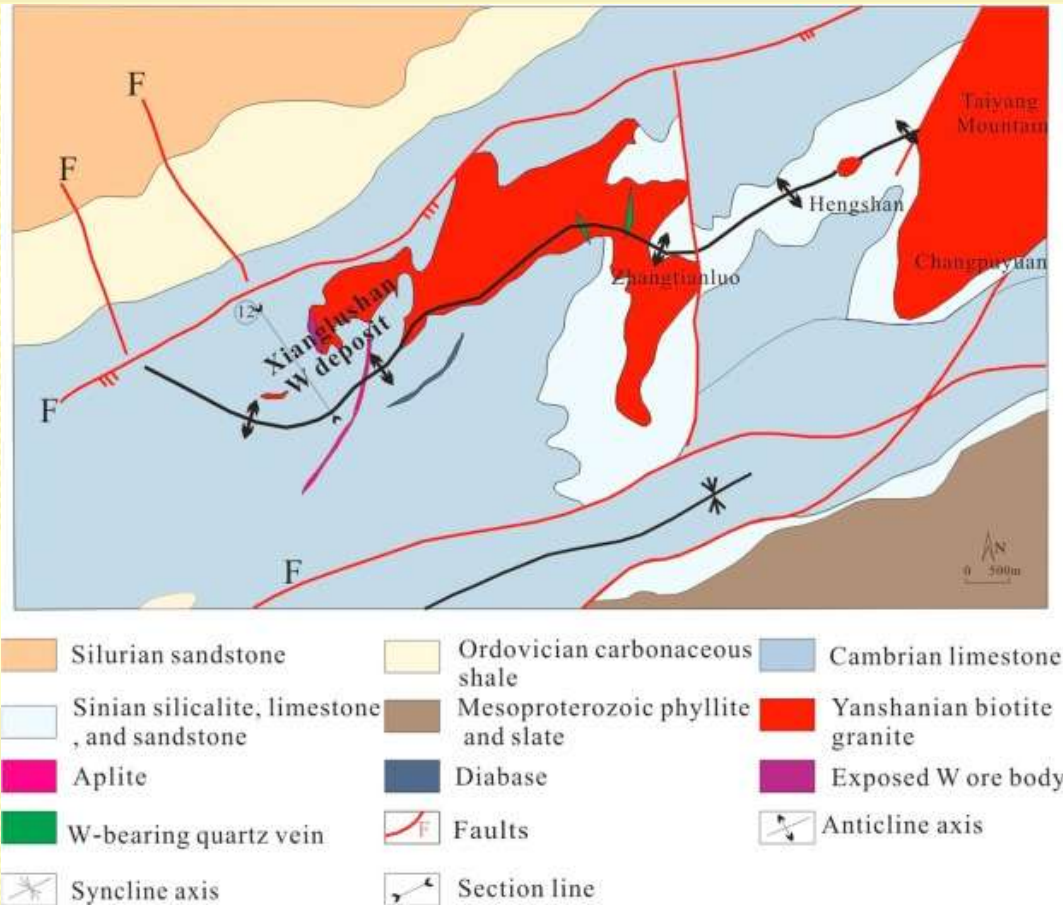
(MB Company database, 2017)



中国五矿集团公司
CHINA MINMETALS CORPORATION

Xianglushan : plus gros gisement mondial de tungstène

- **5 750 t W produits en 2016, plus de 217 000 t de réserves prouvées**
- exploitée par *Jiangxi Xianglushan Tungsten Co.* (filiale de *China Minmetals Corporation*)
- **skarn à scheelite** dans des calcaires du Cambrien moyen
- âge **crétacé** : $123,8 \pm 0,8$ Ma (granite) à $117,3 \pm 1,7$ Ma (dyke d'aplite)



Yaogangxian (4 500 t W/an)

- filons à **wolframite** et molybdénite
- terrains : Cambrien à Jurassique

Taoxikeng (2 500 t W/an)

- filons à **wolframite**
- formations du Néoprotérozoïque au Permien

Piaotang (1 500 t W/an)

- filons à **wolframite et cassitérite**

Xihuashan (1 350 t W/an)

- filons à **wolframite** dans l'auréole métamorphique
- filon : 0,6 -1 m de puissance, sur 500 m d'extension maximum
- teneur : 1,08 % WO_3

âge : 158 à 153 Ma (Jurassique supérieur)



Mines de tungstène en Europe

É. Marcoux, 2017

Europe : 4 mines actives

production de 3 035 t de W métal
(3,4 % monde) (chiffres USGS 2016)

- consommation Europe : > 17 kt/an

- Autriche**

Mittersill (skarn à scheelite) : 954 t W (1 202 t WO₃)

Wolfram GH (Sandvik, Suède)

- Angleterre**

Hemerdon (Drakelands) (filons périgranitiques à wolframite) : 736 t W (928 t WO₃)

Wolf Minerals (UK)

- Espagne**

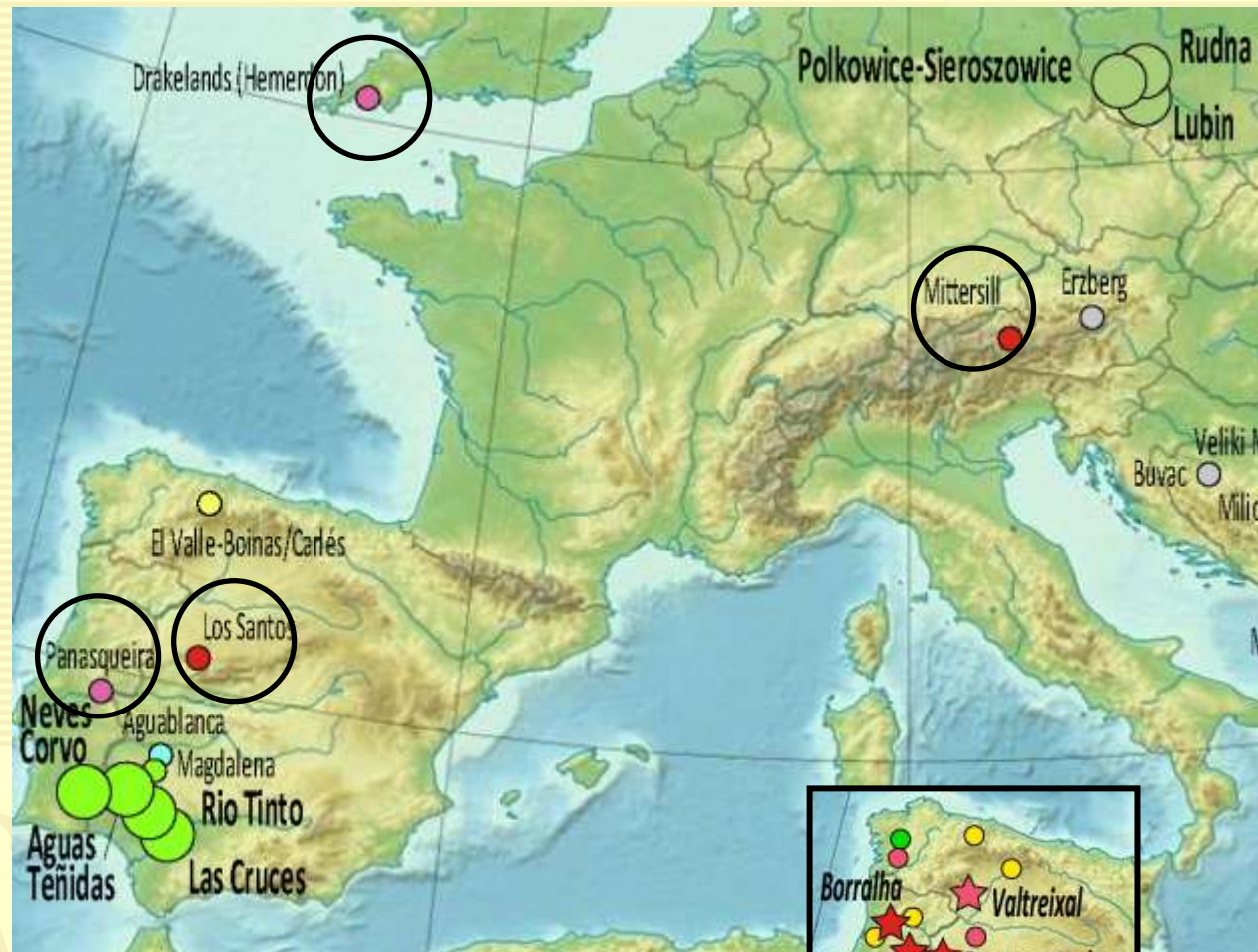
Los Santos (skarn à scheelite) : 650 t W (819 t WO₃)

Daytal Resources Spain (Almonty Industries, Canada)

- Portugal**

Panasqueira (filons périgranitiques à wolframite) : 549 t W (692 t WO₃)

SBTW (Almonty Industries, Canada)



3 projets tungstène avancés :

Barruecopardo , Espagne (*Ormonde Mining*),
Vale das Gatas et Borralha, Portugal (*Blackheath*)

plus 1 projet étain-tungstène : Valtreixal (*Almonty*)
et étain : Oropesa (*Eurotin*)

Mittersill ou Felbertal (Autriche) : 954 t (2016)

- gisement stratiforme complexe
 - scheelite** disséminée, en stockwerks et lentilles dans des hornblendites au sein d'une série volcanosédimentaire cambrienne mafique, très métamorphique
 - granite hercynien intrusif
- genèse très discutée
 - initialement considéré comme SEDEX (lien avec le volcanisme)
 - serait un gisement hercynien précoce (340 Ma), associé au granite intrusif et repris par métamorphisme hercynien, proche du type skarn
 - J.G. Raith & S. Schmidt, 2010
- mine souterraine : production (1975-2015) : 15 Mt de minerai @ 0,45 % WO_3 (= 67 500 t WO_3)
- actuel : 0,5 Mt @ < 0,3 % WO_3



© Wolfram GH



© Raith & Schmidt

© Wolfram GH



Mines en France, Paris 2018

© Wolfram GH



Hemerdon (Drakelands mine) (Devon, Angleterre) : 736 t W métal (2016)

- gisement connu depuis 1867
- sporadiquement exploité jusqu'en 1944
- travaux de réévaluation en 1980-1990
- filons quartzeux périgranitiques (stockwerks) à wolframite (et cassitérite rares) liés au granite d'Hemerdon, coupole tardive dans le massif de Dartmoor (278 - 285 Ma)**
- connus par sondages jusqu'à au moins 400 m de profondeur
- estimations JORC (Wolf Minerals Ltd)
 - ressources (2010) : 218 Mt @ 0,18 % WO_3 et 0,02 % Sn soit 392 kt W (dont 206 kt *inferred*) et 43 kt Sn (dont 29 *inferred*)
 - réserves (2015) : 35,7 Mt @ 0,18 % WO_3 et 0,03 % Sn = 64,2 kt WO_3 et 10,7 kt Sn**
- objectif** de l'usine de traitement : 5 000 t de concentrés de W et 1 000 t de concentrés d'étain par an



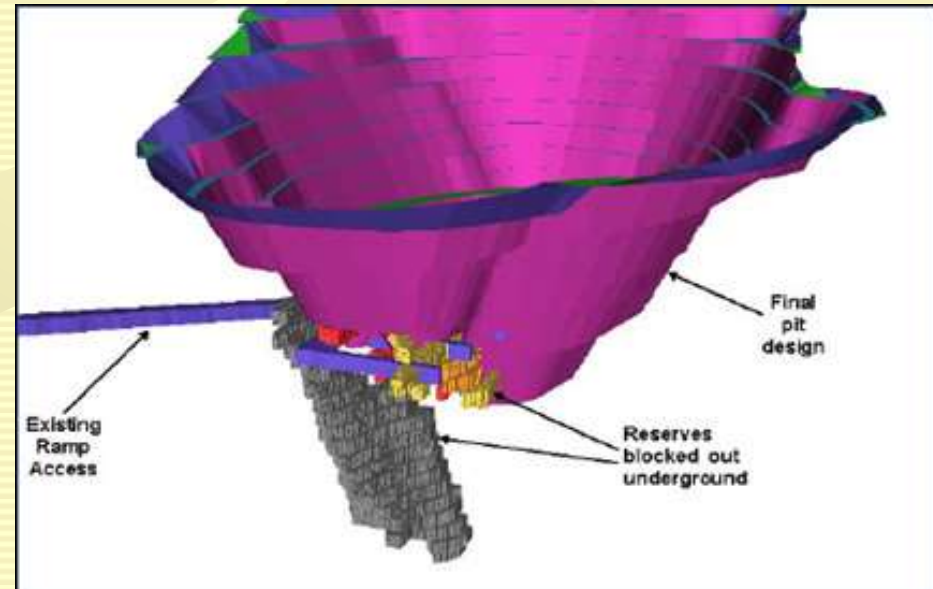
© J-M Négroni



© J-M Négroni

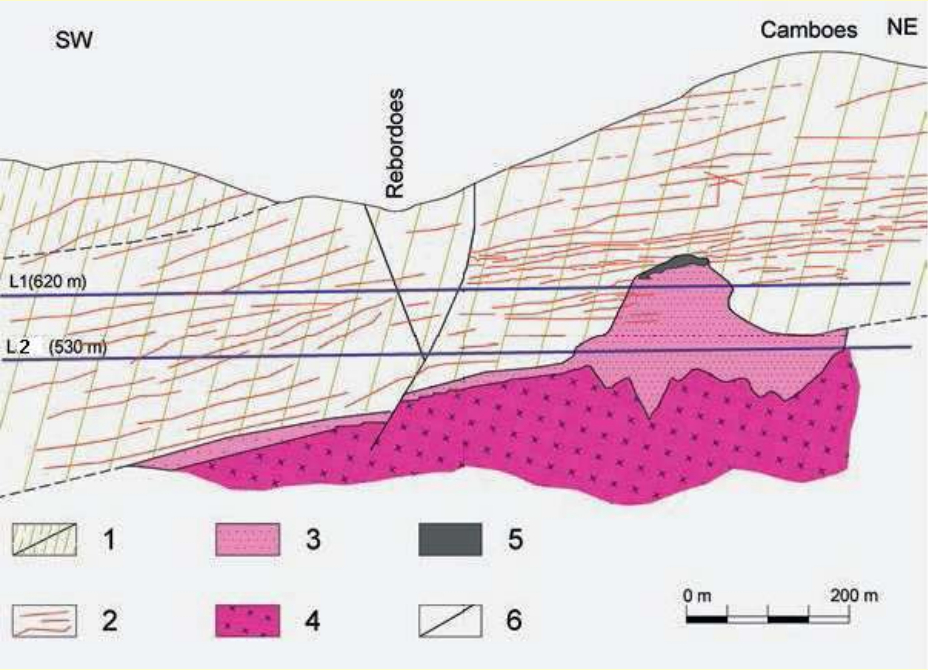
Los Santos (Salamanca, Espagne) : 650 t W (2016)

- ouverte en 2008, acquise par Almonty en septembre 2011
- **skarn à scheelite**
 - contact marbres du Cambrien inférieur avec une intrusion à monzogranite I ($280,5 \pm 6$ Ma) et II ($269,5 \pm 6$ Ma)
 - skarn prograde (monzogranite I)
 - ❖ **scheelite à Mo**
 - skarn retrograde (monzogranite II)
 - ❖ **scheelite pauvre en Mo**, sulfures (pyrrhotite et minéraux Bi-Te-Ag-S-Au)
- exploité en open pit
 - **réserves** (octobre 2015) : 3,582 Mt @ 0,23 % WO_3 (soit 8 239 t WO_3) (t_c : 0,07 %)
 - **ressources** (M+I) (octobre 2015) : 2,208 Mt @ 0,29 % WO_3 (soit 6 403 t WO_3) (t_c : 0,05 %)



Panasqueira (Portugal) : 549 t (2016)

- nombreux **filons sub-horizontaux périgranitiques** à **quartz-wolframite-sulfures** dans les schistes
- filons minces (< 1 m) : dilatation de joints plats sous la pression hydraulique des fluides à W-Sn
- liés à 1 ou plusieurs coupoles de granite greisenisé sous-jacentes
- zone minéralisée : grande étendue latérale mais extension verticale limitée (100 à 300 m) aux zones où $P_{\text{fluide}} > P_{\text{lithostatique}}$
- paragenèse à **wolframite**, **cassitérite**, arsénopyrite, **chalcopryrite** (W, Sn, Cu...)
- âge tardi-Hercynien : $296,3 \pm 0,8$ Ma à $291,6 \pm 0,8$ Ma (très proche de Salau)
- doctorat en cours à l'université d'Orléans (G. Launay, soutenance de thèse fin 2018)



© G. Launay

France : mines et gisements potentiels

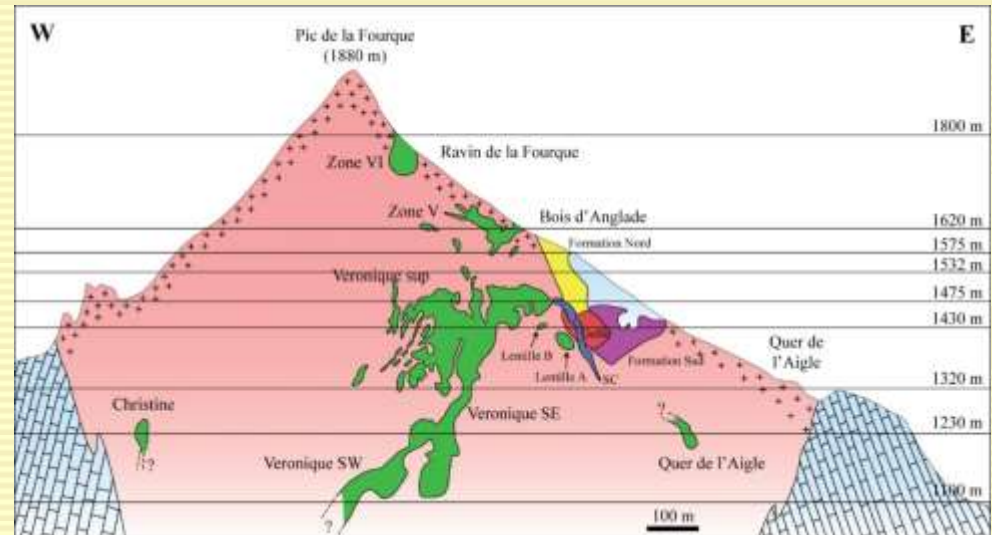
- ○ 8 mines exploitées au 20^{ème} siècle dont 1 majeure :
 - **Salau** (Ariège) : 13 950 t WO_3 (1971-1986) et **> 15 kt R**
 - **Puy-les-Vignes** (H^{te}-Vienne) 3 170 t W
 - Échassières – Les Montmins (Allier) : 3 100 t W
 - **Leucamp** (Cantal) 1 400 t W (R : 5,6 kt W)
 - Enguialès (Aveyron) 1 040 t W (R : 4,2 kt W)
 - **Montredon** (Tarn) : 860 t W avec R de 10,5 kt
 - La Favière (Var) 680 t W (R : 1 à 2 kt W)
 - **Montbelleux** (Ille-et-Vilaine) 350 t WO_3 (et 40 t Sn) (R : importantes)
- ○ 2 gîtes non exploités avec des ressources de plus de 12 kt WO_3
 - **Fumade** (Tarn) : skarn à > 16 kt WO_3
 - **Coat-an-Noz** (Côtes d'Armor) : skarn à > 14 kt WO_3
- et aussi Costabonne (Pyrénées), Neuf-Jours (Corrèze), Auxelles (Vosges) etc.



- **métallotectes** : granitoïdes tardi-hercyniens (325 à 310 Ma) et post-orogéniques (Salau : 289 ± 2 Ma) (*sauf Montbelleux : 520 Ma*)
- granites spécialisés riches en W, Sn (Nb-Ta, Li, Be, Mo, et Au) qui libèrent les fluides avec ces métaux incompatibles en fin de cristallisation

- **Salau** (Pyrénées) 1970-1986, « skarn » à scheelite permien (289 ± 2 Ma)

- ❖ production 13,95 kt WO_3 , teneur moyenne de 1,50 % WO_3
- ❖ teneur de coupure (t_c) en 1986 : 0,8 % WO_3 (en 2018 : $\sim$ 0,3 % WO_3)
- ❖ prolongement jusqu'en Espagne (Aurenère à 5 km)
- ❖ Thomas Poitrenaud (université d'Orléans – Mines du Salat), doctorat soutenu le 16 mai 2018



Fumade (Tarn)

- **skarn** à scheelite non affleurant dans les calcaires du Cambrien
- 92 sondages (BRGM et SNEAP) entre 1980 et 1985 = 19,7 km
- ressources de > 3 Mt @ 0,58 % WO_3 sur 3 sites voisins
- > 16 kt WO_3 avec une t_c de 0,3 % WO_3 (rapport BRGM)

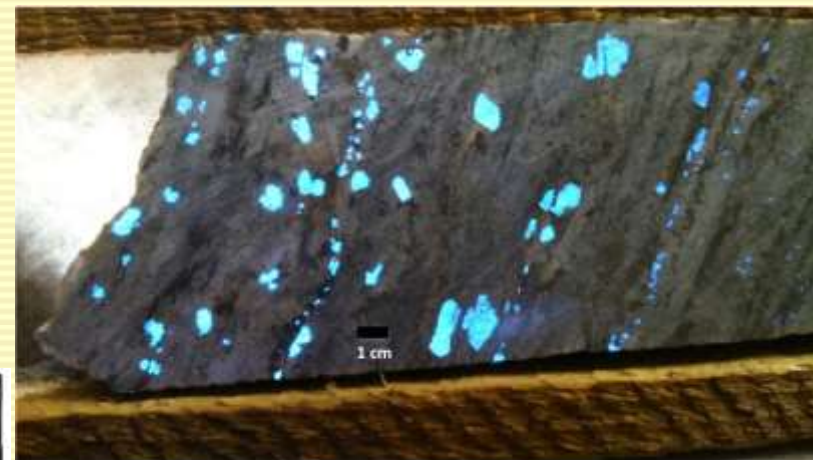
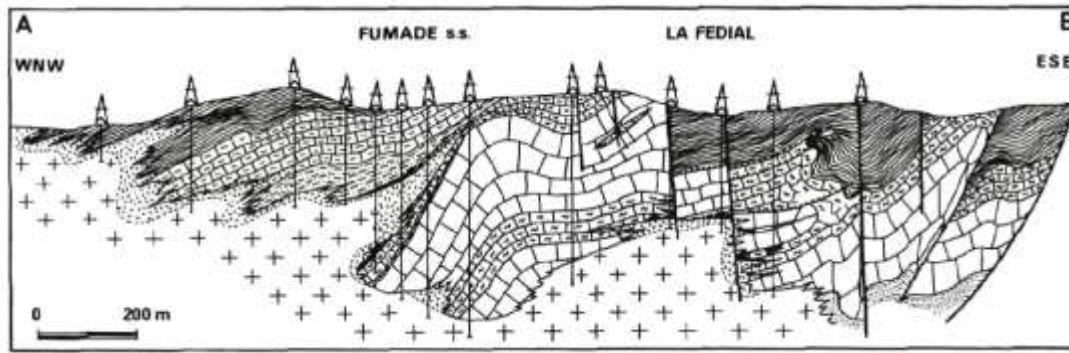
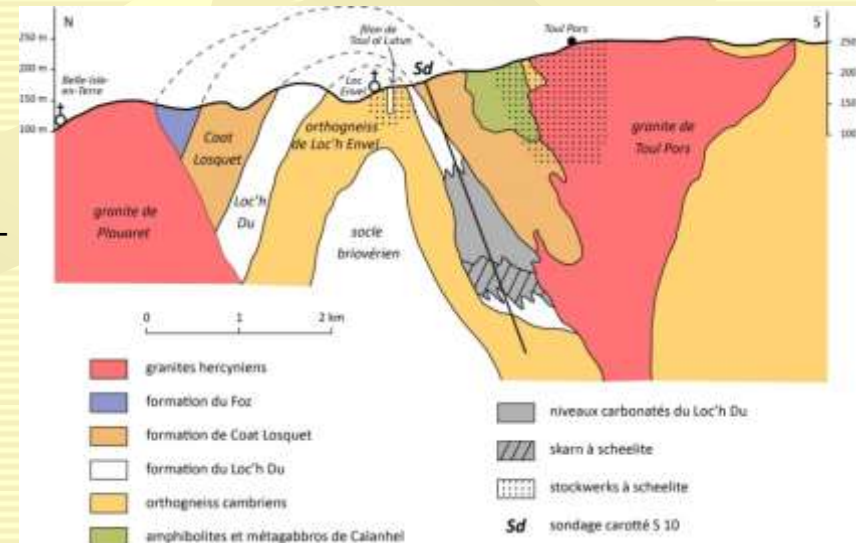


Photo 4 : Drifhole FUMADE : Crystals of scheelite (white) intercalated in alternations of black shales and limestone / UV 254nm



Coat an Noz (Côtes d'Armor)

- permis « Loc Envel » de Variscan mines
- **skarn** à scheelite dans des carbonates du Dévonien + importantes zones à stockwerks et filons
- travaux BRGM et SNEAP de ~1970 à 1983
- ressources de 1,1 Mt @ 1,3 % WO_3 et 0,3 % Cu (t_c de 0,6 % WO_3) soit 14,3 kt WO_3 (Mirabail et Terrée, 1986)

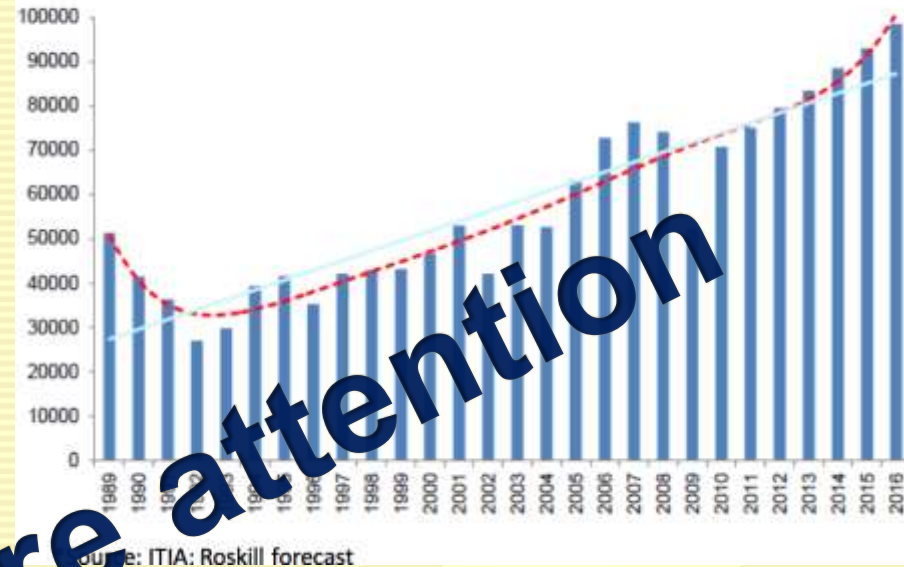


Conclusions

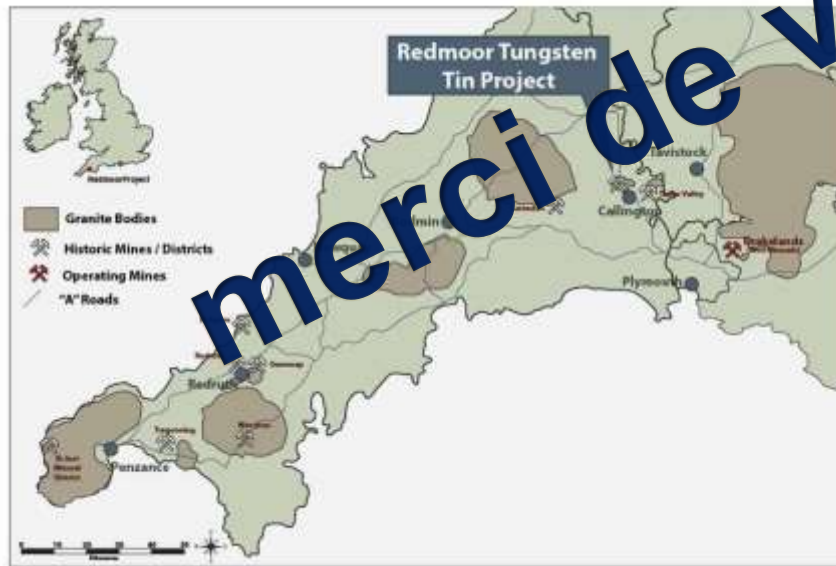
tungstène

- demande forte (88 kt en 2016), en croissance
- métal stratégique
- quasi-monopole chinois (82 % production)
- Europe : une réponse qui s'organise
 - une production pérenne mais limitée (3,4 %) avec 4 mines actives
 - 3 projets très avancés (Espagne et Portugal)
 - une géologie européenne très favorable : **gisements périgranitiques hercyniens et tardi-hercyniens avec des modèles métallogéniques novateurs**
 - une place réservée pour la France ?

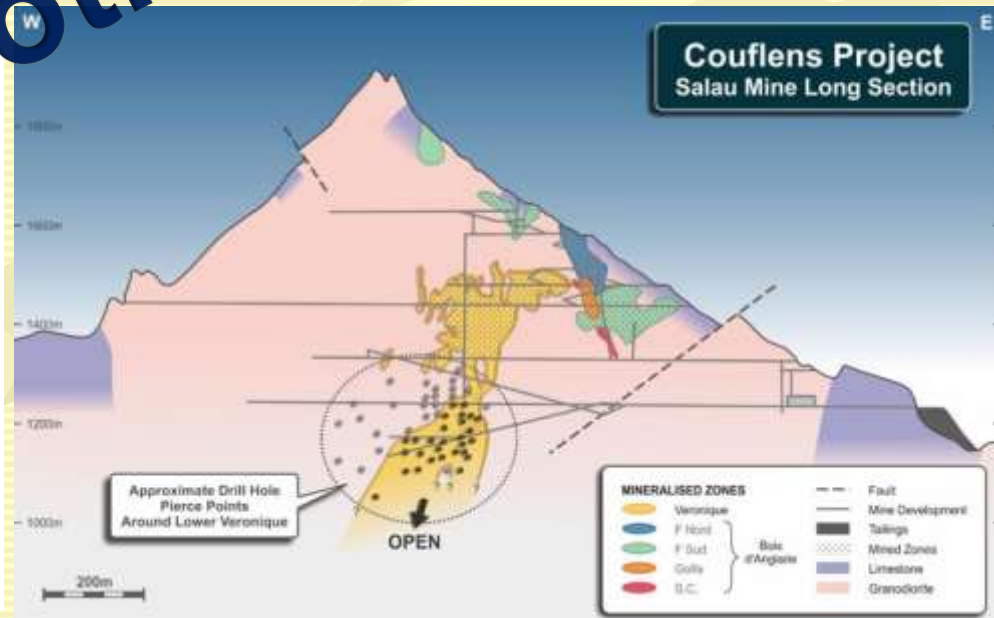
Forecast Tungsten demand (tonnes W)



merci de votre attention



Strategic Minerals PLC, mai 2016



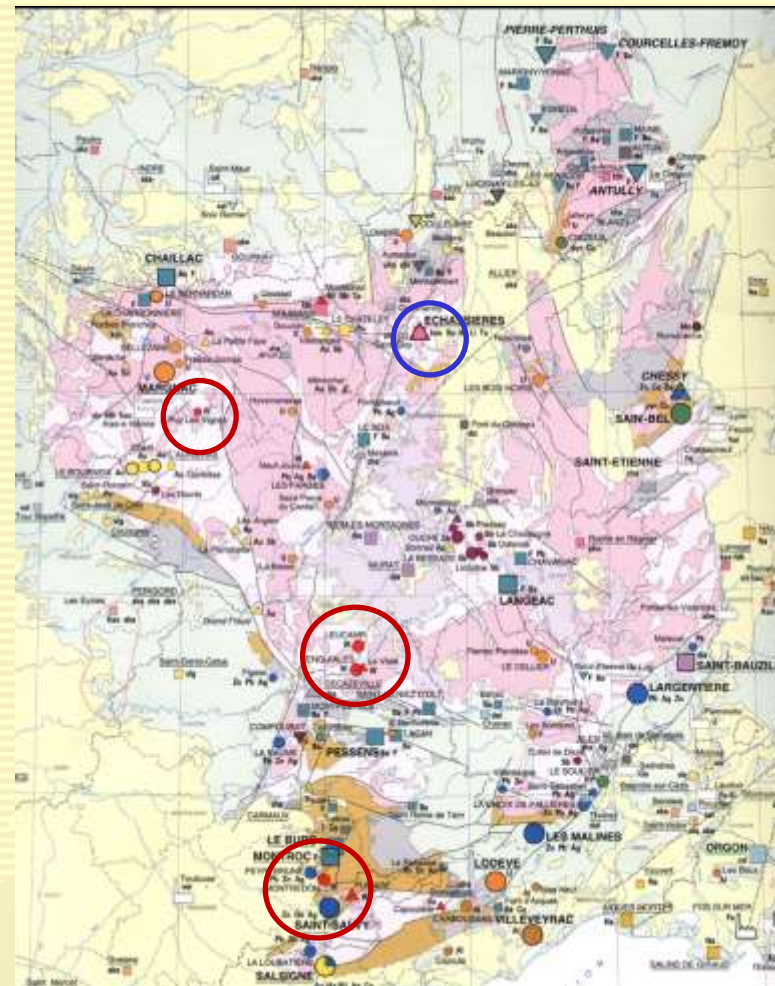
Apollo Minerals juin 2017

production minière 2016 : 88 100 t W (chiffres USGS, 2018)

- **Chine**
 - 3 sociétés majeures dont China Minmetals Corporation (8 mines) (72,1 kt W soit 82 %)
- **Vietnam**
 - VYTI Co, mine de Nui Phao Mining Co (6,5 kt W – 6,0 kt pour Tungsten Investing news, 6,35 pour BGS)
- **Russie**
 - 5 compagnies dont JSC Primorsky GOK (3,1 kt W – 2,6 kt selon Tungsten Investing news et BGS)
- **Bolivie**
 - Kennametal (1,1 kt W – 1,4 kt selon Tungsten Investing news, 0,848 pour BGS)
- **Rwanda**
 - Tinco Investments, mine de Nyakabingo : 820 t W (770 t selon Tungsten Investing news, 1 kt pour BGS)
- **4 mines actives en Europe :**
- **Autriche**
 - WGH (Sandvik), mine de Mittersill (Felbertal) : 954 t W (850 t selon Tungsten Investing news)
- **Angleterre**
 - Wolf Minerals, mine de Drakelands : 736 t W (700 t selon Tungsten Investing news, 923 t pour BGS)
- **Espagne**
 - Daytal Resources Spain (Almonty Industries, Canada), mine de Los Santos : 650 t W (800 t selon Tungsten Investing news)
- **Portugal**
 - SBTW, mine de Panasqueira : 549 t W (570 t selon Tungsten Investing news)
- **Mongolie, Zimbabwe et autres : 1 400 t W**
- **Canada** : arrêt de la production en 2015 (juin – octobre : fermeture usine et mine de Cantung NWT)
- **USA** : producteur (d'après BGS) mais chiffres non publiés

- **Massif central : anciennes mines et potentialités fortes en tungstène**
 - **Leucamp – Engualès**
 - ❖ filons à wolframite datés par concordia à $273,7 \pm 6,5$ (Engualès) et $276,0 \pm 2,9$ Ma (Leucamp)
 - **Montredon-Labessonié**
 - ❖ filons à wolframite : $315,9 \pm 2,3$ Ma (discordia)
 - **Puy-les-Vignes**
 - ❖ *breccia-pipe* à wolframite
 - ❖ 3,17 kt de W produites et 5 kt WO_3 (ressources)
 - ❖ quartz et wolframite $320 \pm 2,7$ Ma, ou $317,7 \pm 0,7$ Ma
 - **Les Montmins (Échassières)**
 - ❖ 3 100 t W produites) et Sn (avec Nb, Ta et Li)
 - ❖ $334,4 \pm 1,7$ Ma (concordia)
 - **Fumade**
 - ❖ **skarn non exploité** dans calcaires cambriens
 - ❖ 3,11 Mt @ 0,88 WO_3 (soit 26 115 t WO_3) sur 3 sites (BRGM 2013)

(datations U/Pb sur wolframite, Harlaux, 2016)



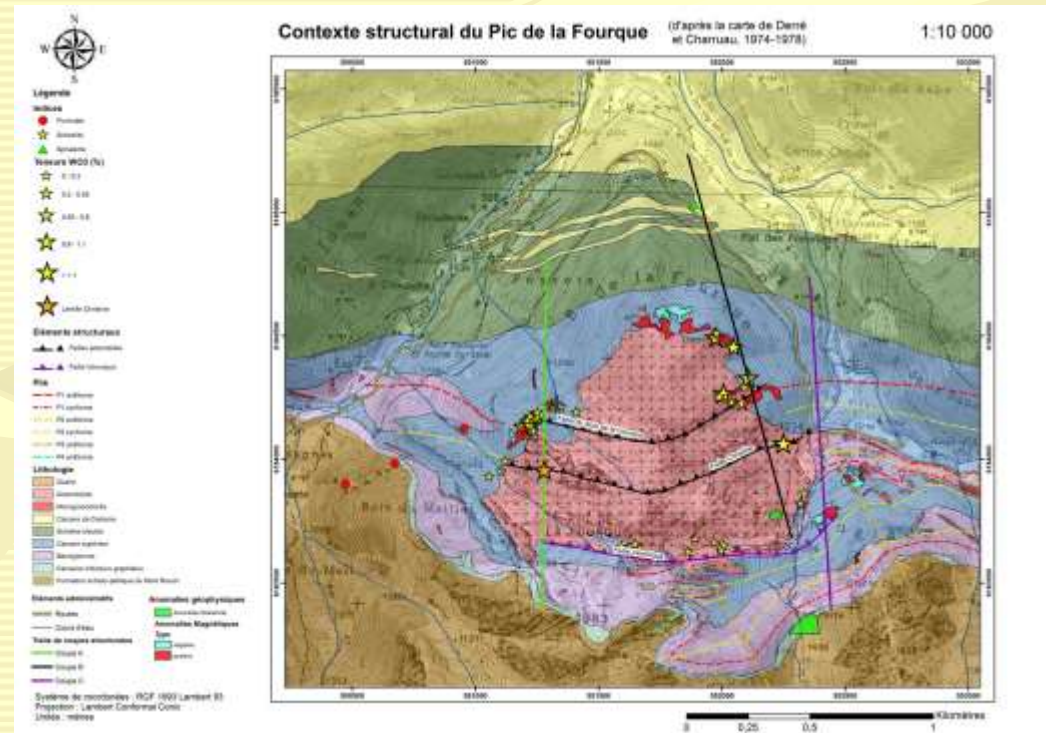
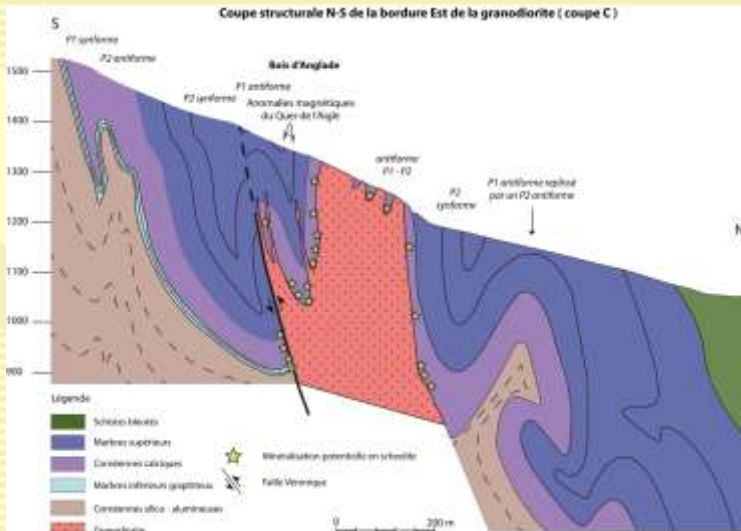
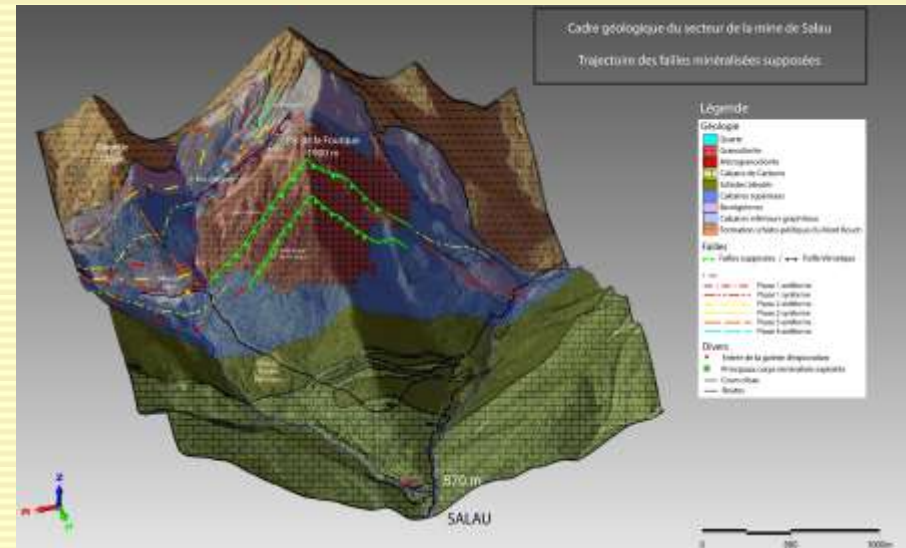
gisements de tungstène du Massif central :

334 à 315 Ma avec magmatismes à métaux rares
295 à 273 : extension post-orogénique

gisement de Salau (Thomas Poitrenaud,
doctorat soutenu le 16 mai 2018)

2 étapes minéralisées :

- skarn « vrai » sub-stérile (295 ± 2 Ma)
développé aux dépens des « Barrégiennes » et
des « calcaires inférieurs graphiteux »
(Ordovicien à dévonien)
- brèche filonienne plus tardive à pyrrhotite,
scheelite et or (289 ± 2 Ma) occupant des zones
de cisaillement : essentiel du minerai
- un modèle proche de R-IRG plus probable



Hemerdon (Drakelands mine) (Devon, Angleterre) : 736 t W métal en 2016

- gisement connu depuis 1867, sporadiquement exploité jusqu'en 1944
- travaux sérieux de réévaluation en 1980-1990
- filons périgranitiques à wolframite (+ cassitérite)** liés au granite d'Hemerdon, coupole tardive dans le massif de Dartmoor (278 -285 Ma)
- encaissant : schistes du Dévonien supérieur

