



# Disponibilité des matières premières pour l'énergie

Colloque 2011  
Programme Interdisciplinaire Energie 2010-2013  
CNRS  
28 mars 2011

Patrice Christmann  
Adjoint au Directeur de la Stratégie du BRGM  
[p.christmann@brgm.fr](mailto:p.christmann@brgm.fr)

# Matières premières pour l'énergie

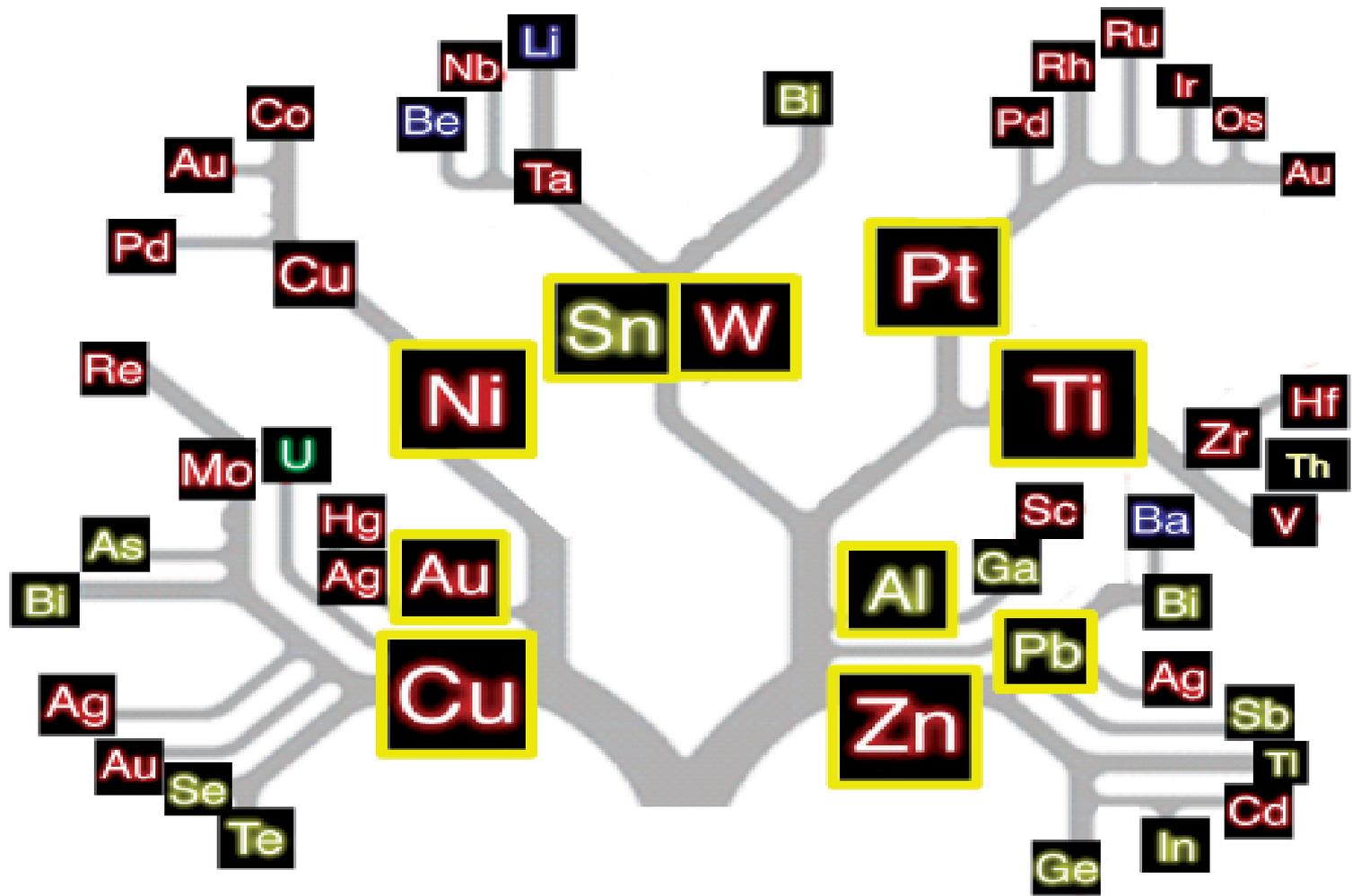
- > **Il s'agit de substances minérales très diverses, aux domaines d'applications variés...**

# Matières premières pour l'énergie

1 H																	2 He						
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	57 Lu	58 Hf	59 Ta	60 W	61 Re	62 Os	63 Ir	64 Pt	65 Au	66 Hg	67 Tl	68 Pb	69 Bi	70 Po	71 At	72 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Lr	90 Rf	91 Db	92 Sg	93 Bh	94 Hs	95 Mt	96 Ds	97 Rg	98 Uub	99 Uut	100 Uuq	101 Uup	102 Uuh	103 Uuo							

Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
Terres Rares'														
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No

	<b>Stockage de l'énergie</b>		<b>Production et transport de l'électricité</b>		<b>Eclairage</b>
	<b>Connectique</b>		<b>Industrie électrique nucléaire</b>		
	<b>Economies d'énergie</b>		<b>Photovoltaïque</b>		
	<b>Catalyse (automobile, piles à combustible)</b>		<b>Aimants permanents (véhicules électriques, éoliennes, TGV...)</b>		



Beaucoup des métaux nécessaires aux applications de haute technologie sont des sous-produits de métaux principaux



# Matières premières pour l'énergie

## Etat du recyclage des déchets secondaires

### dans les pays développés

Sources des données: ADEME, 2010; USGS, 2011; Angerer et al. 2007, 2010;

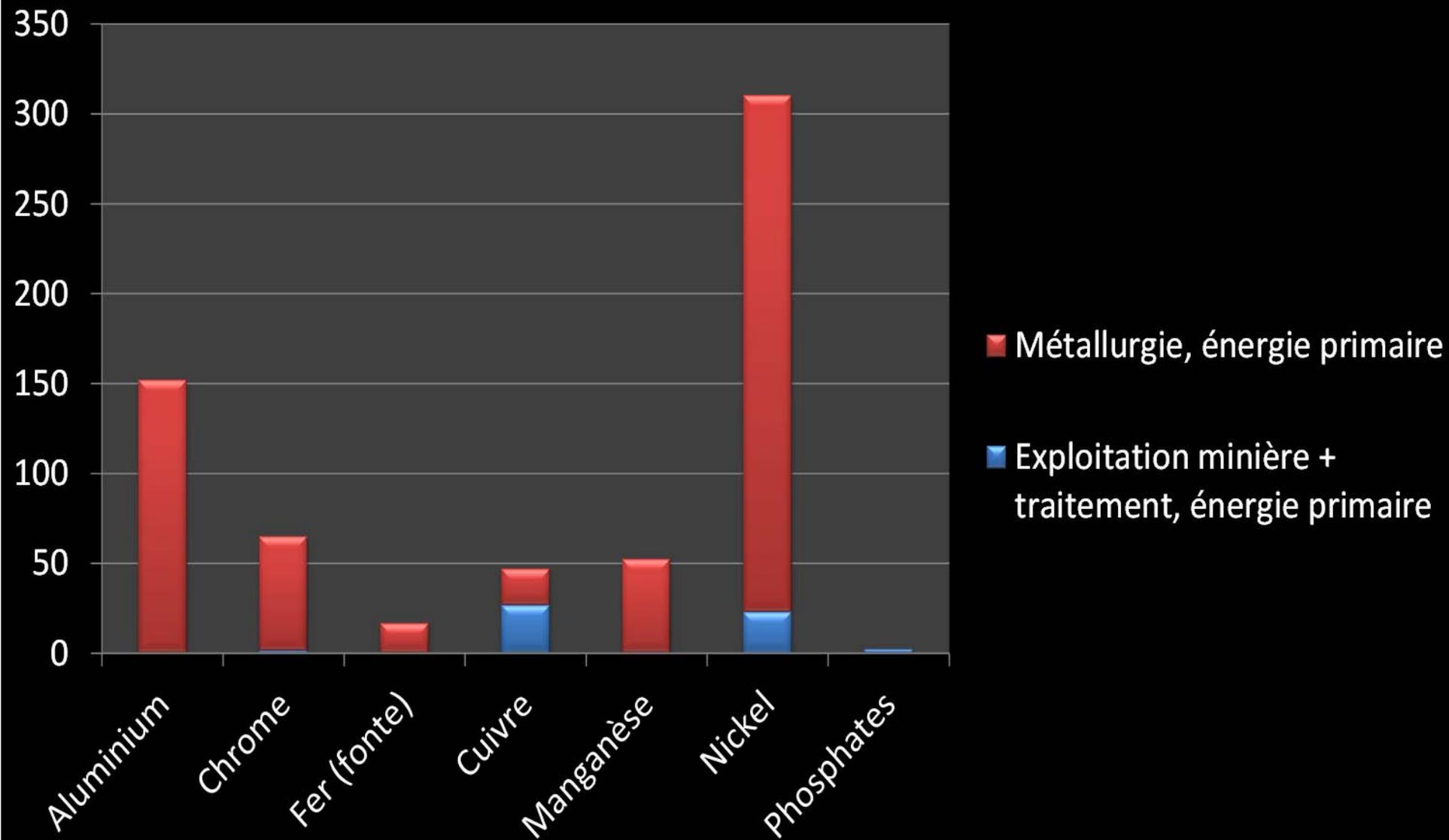
1	±1																	2	0																
H																		He																	
3	+1	4	+2																	5	+3	6	+4	7	-3	8	-2	9	-1	10	0				
Li		Be																		B		C		N		O		F		Ne					
POTENTIEL																		DISPERSIF																	
11	+1	12	+2																	13	+3	14	+4	15	-3	16	-2	17	-1	18	0				
Na		Mg																		Al		Si		P		S		Cl		Ar					
???																																			
19	+1	20	+2	21	+3	22	+4,3,2	23	+5,2,3,4	24	+3,2,6	25	+2,3,4,6,7	26	+3,2	27	+2,3	28	+2,3	29	+2,1	30	+2	31	+3	32	+4,2	33	±3,±5	34	+4,-2,+6	35	±1,±5	36	0
K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr	
																													POTENTIEL						
37	+1	38	+2	39	+3	40	+4	41	+5,3	42	+6,3,5	43	+7,4,6	44	+4,3,6,8	45	+3,4,6	46	+2,4	47	+1	48	+2	49	+3	50	+4,2	51	+3,5	52	+4,6,-2	53	-1,±5,7	54	0
Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe	
																						???		POTENTIEL					POTENTIEL						
55	+1	56	+2	71	+3	72	+4	73	+5	74	+6,4	75	+7,4,6	76	+4,6,8	77	+4,3,6	78	+4,2	79	+3,1	80	+2,1	81	+1,3	82	+2,4	83	+3,5	84	+4,2	85		86	0
Cs		Ba		Lu		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn	
												POTENTIEL																							
87	+1	88	+2	103	+3	104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114		115		116				118	
Fr		Ra		Lr		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Uub		Uut		Uuq		Uup		Uuh				Uuo	

Lanthanides	57	+3	58	+3,4	59	+3,4	60	+3	61	+3	62	+3,2	63	+3,2	64	+3	65	+3,4	66	+3	67	+5	68	+3	69	+3,2	80	+3,2
Terres Rares'	La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Hm		Er		Tm		Yb	
	POTENTIEL		POTENTIEL		POTENTIEL		POTENTIEL				POTENTIEL		POTENTIEL		POTENTIEL		POTENTIEL		POTENTIEL				POTENTIEL					
Actinides	89	+3	90	+4	91	+5,4	92	+6,3,4,5	93	+5,3,4,6	94	+4,3,5,6	95	+3,4,5,6	96	+3	97	+3,4	98	+3	99		100	+3	101	+3,2	102	+2,3
	Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No	
			???				???																					



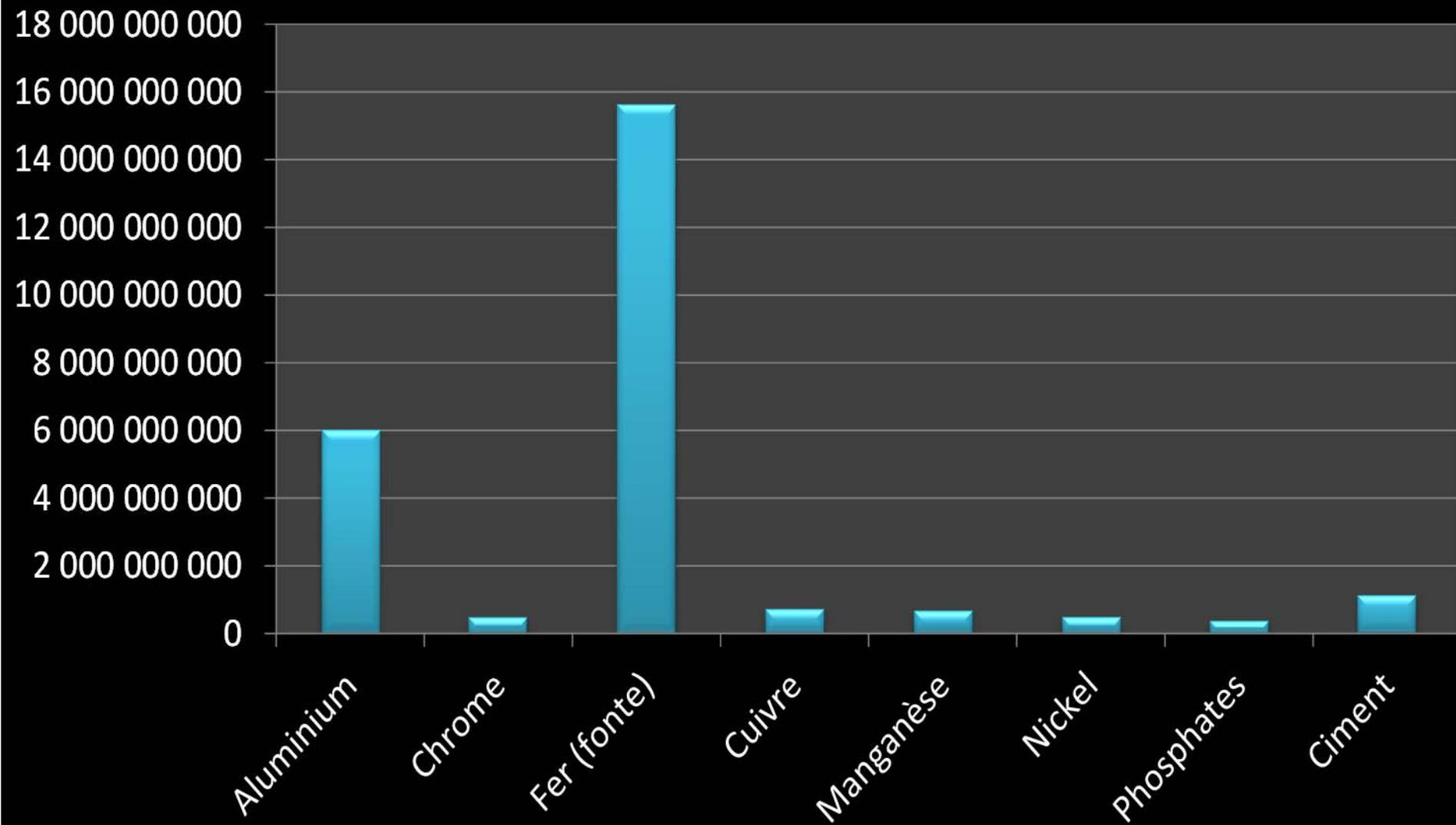
# **Energie, minerais et métaux: des domaines étroitement liés**

# Consommation énergétique totale en GJ par tonne de matière première produite- Source des données: Kippenberger, 2001- BGR, Allemagne)



# Energie primaire utilisée pour la production mondiale d'une sélection de ressources minérales et de métaux en 2008 (estimation, GJ)-

Source des données: Kippenberger (2001), USGS (tonnages produits), WBCSD (données ciment)

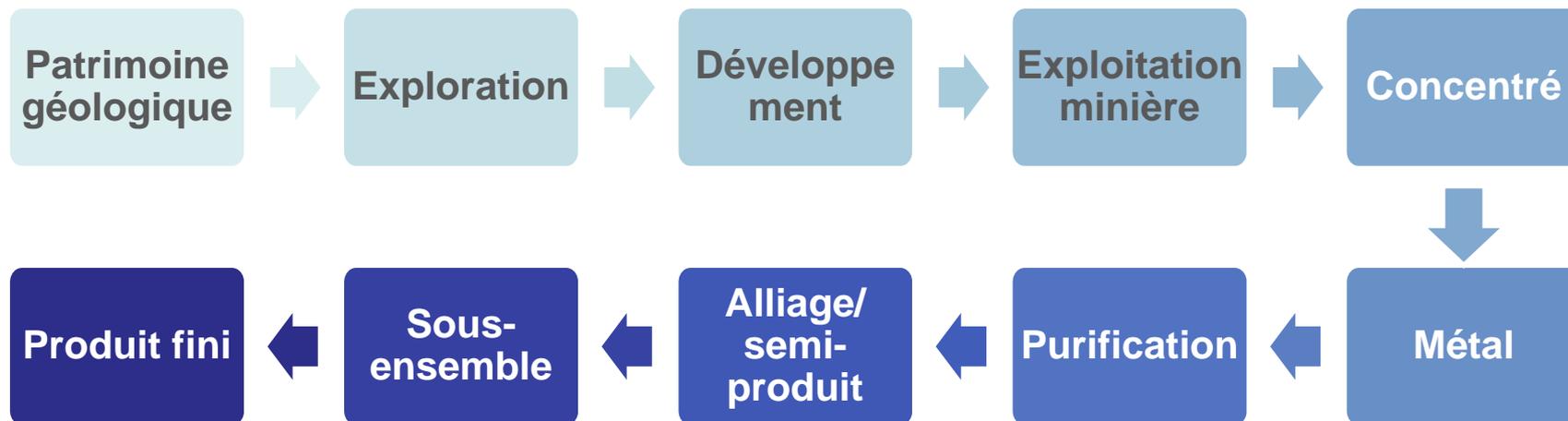


# **Quelques exemples d'utilisations des matières premières non-énergétiques (cas des terres rares)**

Cérium (Ce)	Dysprosium	Erbium	Europium	Gadolinium	Holmium
Céramiques, catalyse (exemple: filtres anti-particules de l'automobile), polissage du verre (optique), fabrication de verres absorbant les UV	Aimants permanents au néodyme-fer-bore: son addition permet d'augmenter la température d'application des aimants au néodyme, entre dans la composition de certains lasers	Lasers pour applications médicales, utilisé comme pigment rose pour les verres et céramiques	Luminophores pour écrans plats (couleur rouge) et ampoules à basse consommation d'énergie, protection des billets de banque	agent de contraste en imagerie médicale, réfrigération magnétique	Composants d'aimants à très haute intensité magnétique
Lanthane	Lutétiem	Néodyme	Praséodyme	Samarium	Terbium
Batteries NiMH (automobiles hybrides), catalyse du craquage des pétroles lourds	Peu d'applications: génération de rayons X, catalyse. La plus rare des terres rares naturelles (le prométhium n'existe que sous forme d'isotope instable), ce qui en limite l'usage	Aimants permanents (alliage néodyme-fer-cobalt pour fonctionnement à températures plutôt basses - Point de Curie: 310° C, indispensables à l'automobile électrique et hybride, aux éoliennes de haute performance )	Optique (avec Nd), colorant jaune du verre et des céramiques	Aimants permanents (alliage samarium-cobalt pour fonctionnement à hautes températures, par exemple dans les TGV de dernière génération - Point de Curie: 700 à 800° C)	Luminophores pour écrans plats (couleur verte) et ampoules à basse consommation d'énergie; aimants permanents
Thulium	Ytterbium	Scandium	Yttrium		
Aimants ferritiques pour fours à micro-ondes	Fibre optique (amplification du signal), cellules photovoltaïques, sources de rayons X pour analyseurs portables	Lampes à halogènes, alliage Al-Sc utilisé par l'aéronautique de défense russe, piles à combustible à oxydes solides	Eclairage fluorescent, luminophores pour écrans plats, céramiques, supraconducteurs à haute température, lasers, aciers inoxydables résistant aux hautes températures, piles à combustible à oxydes solides		

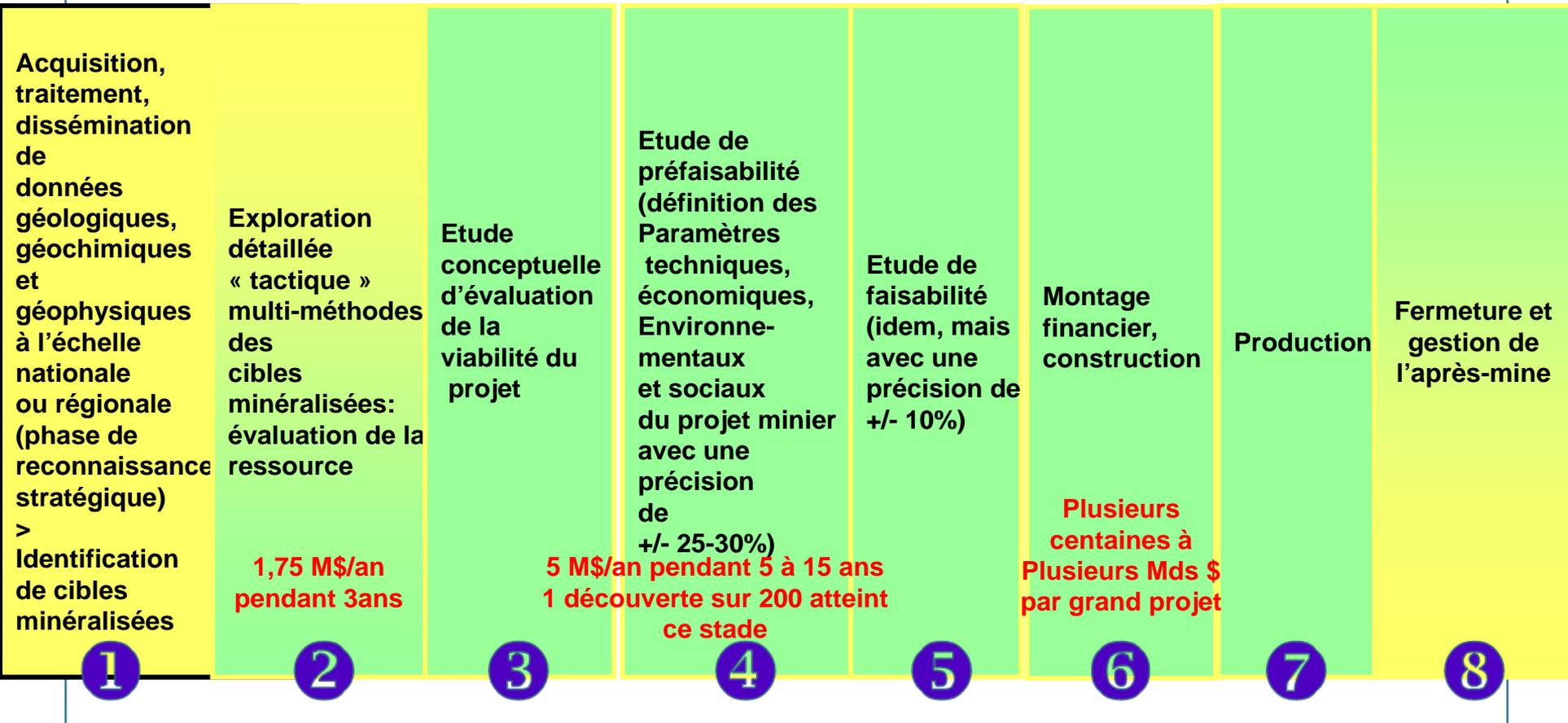
**Ces matières premières alimentent des chaînes  
d'approvisionnement complexes, mal documentées  
aux multiples acteurs...**

# Chaîne d'approvisionnement théorique



Selon le minéral ou le métal considéré et le type de produit fini la complexité de cette chaîne d'approvisionnement est variable. Sa description pour une filière déterminée est une tâche complexe nécessitant un travail d'intelligence économique souvent confronté à la rareté des informations structurées, la diversité et la fragmentation des sources d'information, à l'opacité de certaines filières, à la confidentialité de nombreuses données et informations.

## Principales phases du projet minier



Role de l'Etat et de son administration

Role des investisseurs privés

(sociétés juniors pour l'exploration détaillée, les majors apparaissant dans les phases ultérieures)

Les données en rouge sont relatives aux Territoires du Nord-Ouest, au Canada (2008)

# Facteurs de criticité

- > Epuisement des ressources**
- > Risques géopolitiques (nationalisme des ressources, mauvaise gouvernance, guerres civiles ...)**
- > Mauvaise acceptabilité sociale**
- > Mauvais cadre réglementaire (instabilité, mauvaise mise en œuvre, mauvaise capacité de négociation de la part de l'Etat, faiblesse de la capacité administrative, délais d'instruction ...)**
- > Manque de ressources humaines (pour administrer, développer la connaissance géologique, explorer, produire, transformer...)**

# Facteurs de criticité

- > **Accès à l'énergie, à l'eau**
- > **Impacts environnementaux et sociaux**
- > **Sous-investissement**
- > **Sous-financement de la recherche**
- > **Oligopoles, monopoles (surtout s'ils se combinent aux nationalismes des ressources)**
- > **Opacité de certaines filières (métaux rares)**
- > **Culture du court-terme, du « just-in-time »**
- > **Problèmes statistiques**

**Quelle est la dépendance française  
par rapport aux importations?**

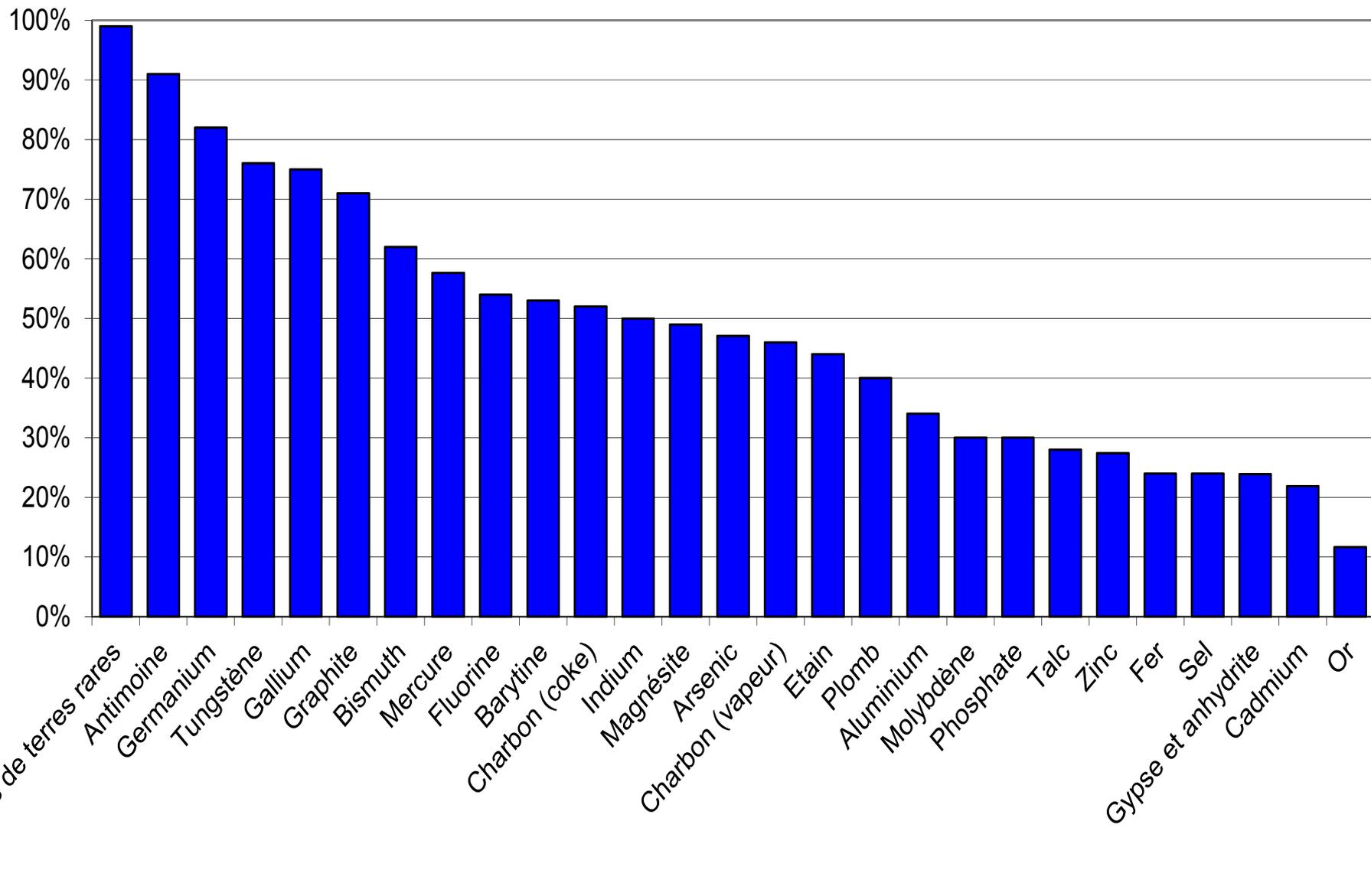
# Des minerais rares et convoités ...

- > **La France n'a plus aucune production minière métallique et l'Europe est très fortement déficitaire en minerais métalliques (en moyenne quelques pourcents de la production mondiale contre 20 à 30 % de la consommation)**
  
- > **La demande mondiale pour les ressources minérales est en croissance continue (x 20 en un siècle, en moyenne), en forte accélération (près de 7%/an en rythme annuel moyen au cours des dix dernières années) suite à l'émergence économique rapide de la Chine (qui sera suivie par l'Inde, le Brésil, etc.)**
  
- > **Facteurs stimulant la croissance de la consommation:**
  - La croissance démographique mondiale: + 40 % de population d'ici 2050, pour atteindre 9 Mds,
  - L'évolution rapide du taux d'urbanisation : 29% en 1950, 50% en 2010, 69% en 2050 (soit environ 6 milliards d'humains !)
  - Les mutations des types de consommation
  - Les technologies vertes ...

# Des minerais rares et convoités ...

- > **L'industrie minière mondiale subit une concentration de plus en plus forte au fur et à mesure qu'augmentent coûts et risques**
- > **L'influence des pays occidentaux sur les marchés mondiaux va se réduire de plus en plus au fur et à mesure de la montée en puissance de géants industriels issus des pays émergents, au premier rang desquels la Chine**
- > **Elle est également remise en cause par le développement rapide, depuis 2005, d'instruments spéculatifs (ETC – Exchange Traded Commodities) sur les métaux**

Part de la Chine dans la production minière mondiale 2008, pour les ressources minérales dont elle est le premier producteur mondial - Source des données: Weber et al. - World mining data 2010



# Prises de participations chinoises dans l'industrie minière mondiale

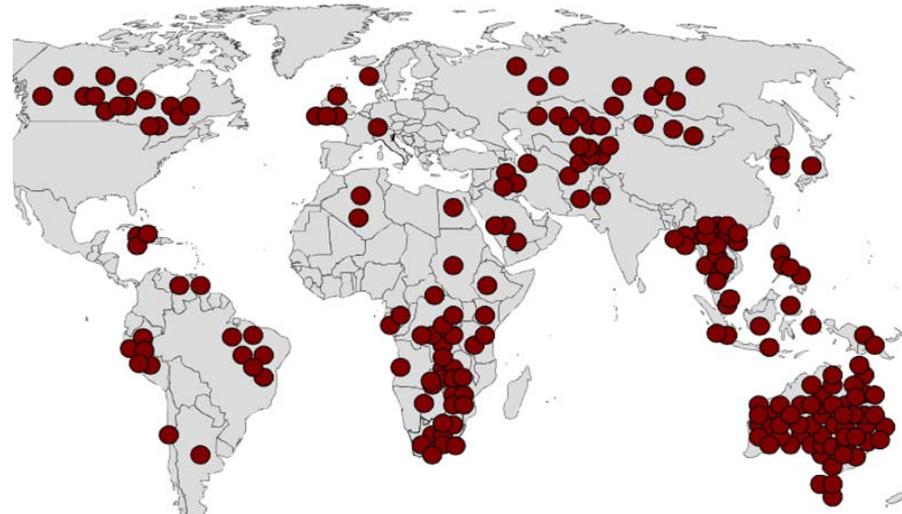
(D'après Van der Wath, Bateman Beijing Axis, « China and Africa: A Global Natural Resources Alliance?»



Situation en 2004



Situation en début 2009



Situation en début 2010



**Une priorité:  
(re) développer la recherche,  
pour répondre aux défis  
liés aux matières premières**

# Priorités pour la recherche (1)

- 1. Affiner les critères de criticité et les documenter pour chaque substance**
- 2. Développer, au niveau européen, une base de donnée publique d'analyse du cycle de vie des minerais et métaux**
- 3. Développer une cartographie de la compétition pour l'accès au sol**
- 4. Développement d'une capacité d'intelligence minérale européenne**
- 5. Sensibilisation du grand public et développement de l'acceptabilité sociale de l'industrie minérale**

## Priorités pour la recherche (2)

- 6. Amélioration des outils et méthodes de l'exploration minière**
- 7. Métallogénie des métaux rares**
- 8. Estimation de la finitude des ressources disponibles**
- 9. Développement de l'infrastructure de connaissance et de visualisation 3D/ 4D du sous-sol semi-profond (0-3 km)**
- 10. Développement de la représentation de la croûte terrestre profonde**
- 11. Développement de l'exploration marine profonde, notamment pour les amas sulfurés**
- 12. Développement de moyens et méthodes pour la connaissance et le suivi de l'environnement marin profond**

## Priorités pour la recherche (3)

- 13.** Développement des technologies d'exploitation et de traitement des minerais pour l'exploitation des gisements marins sulfurés
- 14.** Développement d'inventaires faunistiques et floristiques, de points zéro géochimiques (sols, eaux, sédiments des cours d'eau) dans les zones à fort potentiel minéralisé. Restitution sous forme de SIG interopérables.
- 15.** Développement de l'infrastructure de connaissance et de visualisation 3D/ 4D du sous-sol semi-profond (0-3 km)
- 16.** Développement d'une mine-pilote de démonstration des bonnes pratiques

## Priorités pour la recherche (5)

- 17.** Techniques d'observation de la stabilité des anciens travaux miniers et des impacts des montées d'eau et/ou de gaz
- 18.** Réduction des impacts des effluents et déchets miniers
- 19.** Techniques d'exploitation, de traitement et de métallurgie visant à un meilleur usage de la ressource, à la réduction de la consommation d'intrants et de la génération de déchets et d'effluents
- 20.** Eco-conception des produits en vue de leur recyclage, développement des technologies de recyclage, valorisation/ recyclage des déchets et effluents miniers

## Priorités pour la recherche (5)

- 21.** Réduction de l'utilisation des ressources rares par le développement de substitutions et de matériaux innovants, moins consommateurs de ressources (nanotechnologies, biomimétisme ...); réduction des consommations d'eau et d'énergie
- 22.** Développement d'actions de recherche en partenariat avec les pays en développement, accès à la formation et à la recherche française et européenne
- 23.** Développement de synergies entre la recherche française et européenne (ERA-MIN, ETP-Sustainable Mineral Resources, Partenariat pour l'Innovation)
- 24.** Développement de la formation et de la mobilité des chercheurs

# Le BRGM, source d'informations publiques et gratuites sur les ressources minérales

- > **MineralInfo**, portail d'informations publiques sur l'industrie minérale française: [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org)
- > **EcoMine**, mensuel (11 n<sup>os</sup>/an) d'actualités sur l'industrie mondiale (cours des métaux, vie des sociétés, actualités par substances et par pays, EcoNotes proposant un zoom sur un sujet particulier)
- > **Annuaire Statistique Mondial des Minerais et Métaux**: statistiques annuelles de la production et du commerce mondial de 18 substances minérales majeures
- > **SigMines France**: le portail d'information géographique sur le patrimoine minéral métropolitain: [www.sigminesfrance.brgm.fr](http://www.sigminesfrance.brgm.fr)

**Merci pour votre attention**

# Initiatives françaises (1)

- > **2008 : Document interministériel d'orientation stratégique « Ressources Minérales et Développement en Afrique », MAEE**
- > **2009 - 2010 : à l'initiative du MEEDDM, concertation des parties prenantes (administrations, fédérations industrielles, BRGM, ADEME...)**
- > **Mission confiée par le MEEDDM au CGIET sur la constitution éventuelle de stocks stratégiques. Rapport confidentiel remis en 2010**
- > **Mission confiée par le MEEDDM au BRGM pour la réalisation de neuf panoramas confidentiels sur les marchés mondiaux et les facteurs de criticité : béryllium, gallium, germanium, molybdène, niobium, rhénium, sélénium, tellure et terres rares**
- > **Mission confiée par le MEEDDM à l'ADEME sur l'étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares**
- > **Mission confiée par le MAEE au BRGM pour la rédaction du rapport « Ressources minérales et développement en Afrique, opportunités pour neuf substances » (en cours de diffusion par le MAEE), relatif à l'économie et aux opportunités pour les pays en développement des secteurs de l'aluminium, du cobalt, du cuivre, du diamant, du fer et de l'acier, du manganèse, de l'or, du tantale et de l'uranium.**

## Initiatives françaises (2)

- > **27/04/10 Communication en Conseil des ministres du ministre d'Etat, J.L. Borloo, relative aux métaux stratégiques. Un plan d'action retient les pistes suivantes :**
  - L'amélioration de notre connaissance des métaux stratégiques (BRGM)
  - L'extension de notre connaissance géologique, par des campagnes d'exploration ciblées en France (BRGM) et en domaine marin (Wallis et Futuna, IFREMER)
  - Le développement de nouveaux outils d'exploration facilitant l'extraction et la transformation des métaux stratégiques (BRGM et IFREMER)
  - Le recyclage des métaux stratégiques (ADEME).
- > **24/01/11: Décret créant le comité des métaux stratégiques (COMES). Le BRGM en est membre.**

# Initiatives européennes...et africaines

- > **Allemagne : « Eléments d'une stratégie des matières premières » en 03/2007, déclaration finale du G8 d'Heiligendamm en 06/2007**
- > **Commission européenne: « Initiative Matières Premières » 11/ 2008 [COM(2008)699] avec trois piliers :**
  - La dimension externe à l'UE (accès aux ressources hors UE)
  - La dimension interne à l'UE (accès aux ressources internes de l'UE)
  - Le recyclage et la meilleure utilisation des ressources
- > **Deux rapports publiés en 06/2010 :**
  - Les matières critiques pour l'Union européenne
  - Améliorer le cadre pour l'exploitation des matières premières dans l'Union européenne
- > **Consultation publique sur les recommandations incluses dans ces rapports au cours de l'été 2010. Plus de 160 réponses**
- > **La géologie et les ressources minérales font partie des priorités du Plan d'action décidé fin 11/2010 lors du 3° Sommet Afrique-UE**
- > **13 au 15/12/10: Première conférence des ministres des mines du Groupe des Etats ACP, à Bruxelles**
- > **02/02/11: COM(2011) 025: « Relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières »**

# Les priorités, vues par le BRGM

- > Relancer une coopération française et surtout européenne (FED) en Afrique dans le domaine des ressources minérales : acquisition et dissémination de connaissances relatives au potentiel minéral, renforcement des capacités institutionnelles, formation des cadres, appui à l'ITIE et au processus de Kimberley
- > Développer la connaissance du patrimoine national (y compris Guyane et Nouvelle-Calédonie) en minerais stratégiques
- > Développer la connaissance du sous-sol profond européen dans les zones « fertiles », pour attirer des investissements futurs
- > Développer une capacité d'intelligence minérale européenne construite sur un fonctionnement en réseau de capacités nationales
- > Développer les bases de connaissances nécessaires aux analyses des cycles de vie des matières premières minérales (approche d'une « économie circulaire »)
- > Développer les substitutions
- > Développer les procédés nécessaires au recyclage et à la réutilisation des matières premières (en commençant par les plus critiques), ainsi qu'à la réduction des consommations d'eau et d'énergie des industries extractives