

Expertise scientifiques collective sur les terres rares

cnrs

Vers une utilisation responsable des terres
rares tout au long de leur cycle de vie.

Présentation des principaux résultats

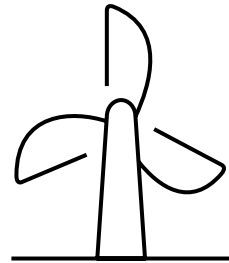
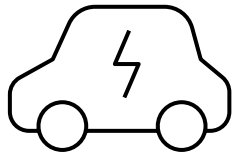
Clément Levard, géochimiste, DR CNRS au CEREGE, pilote scientifique de l'expertise
& Romain Garcier, géographe, MCf ENS, Lyon, pilote scientifique de l'expertise

Présentation PEPR Sous-Sol 29/01/2026



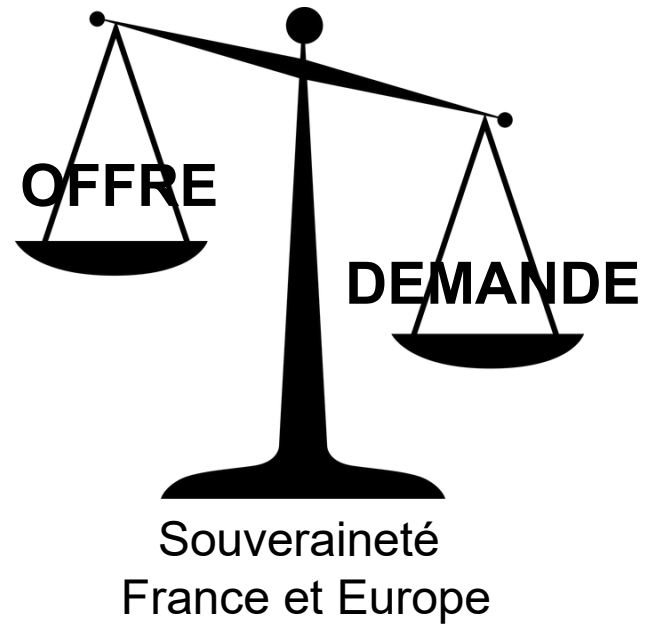
Contexte et positionnement de l'expertise

- **Depuis 2015**, croissance annuelle moyenne de la production mondiale de terres rares : **+13%** pour des **besoins stratégiques**.



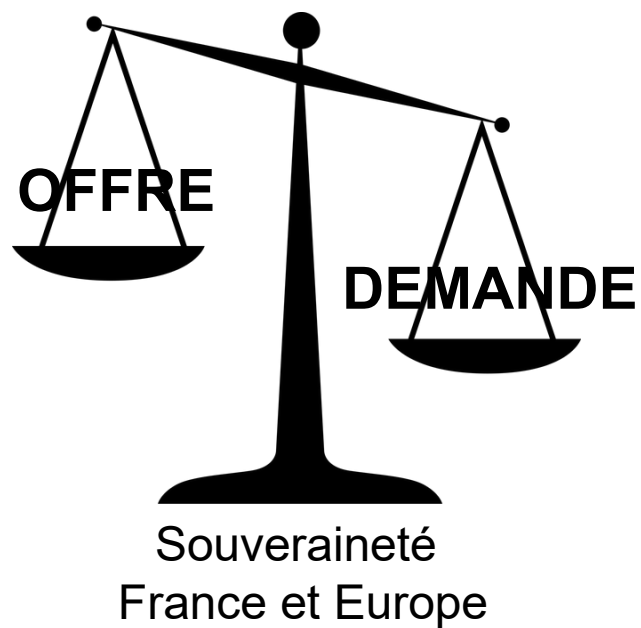
- Potentiel géologique en France faible. Monopole Chinois de la production.

Contexte et positionnement de l'expertise



Contexte et positionnement de l'expertise

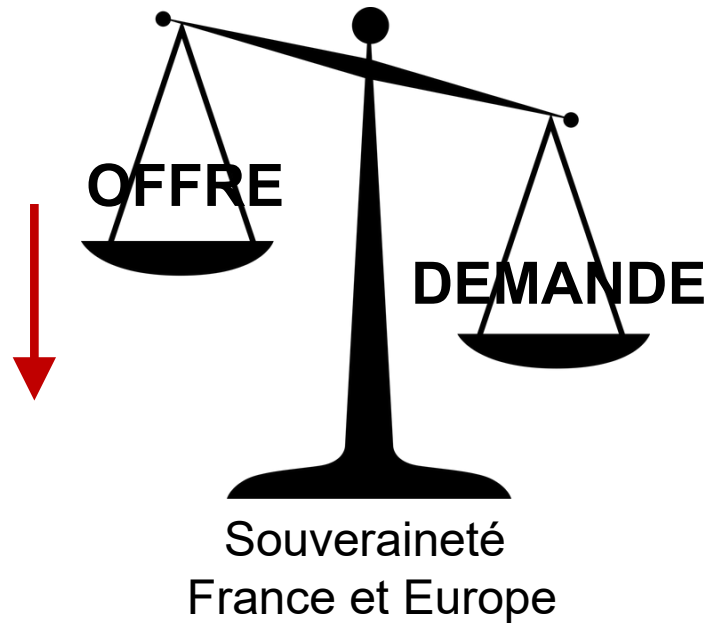
Comment renforcer la souveraineté sur les approvisionnements en terres rares?



Contexte et positionnement de l'expertise

Comment renforcer la souveraineté sur les approvisionnements en terres rares?

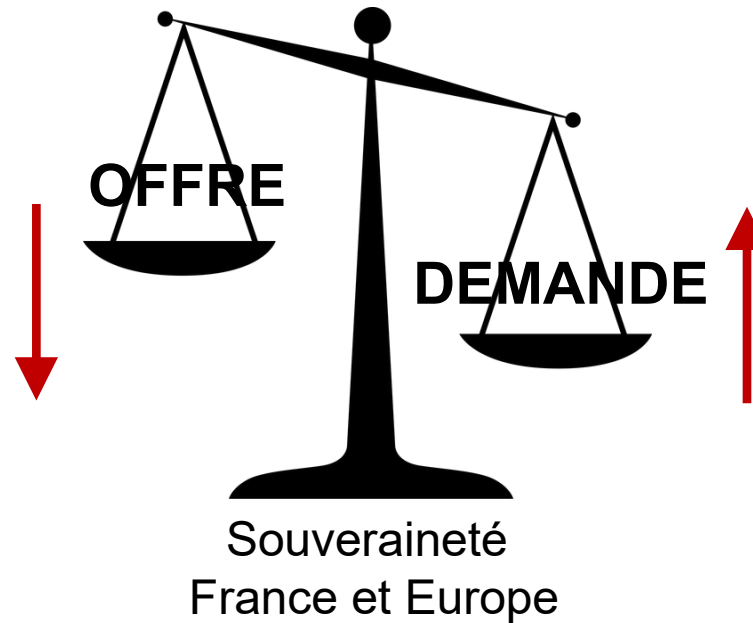
Production +++
Diversification des approvisionnements



Contexte et positionnement de l'expertise

Comment renforcer la souveraineté sur les approvisionnements en terres rares?

Production +++
Diversification des approvisionnements

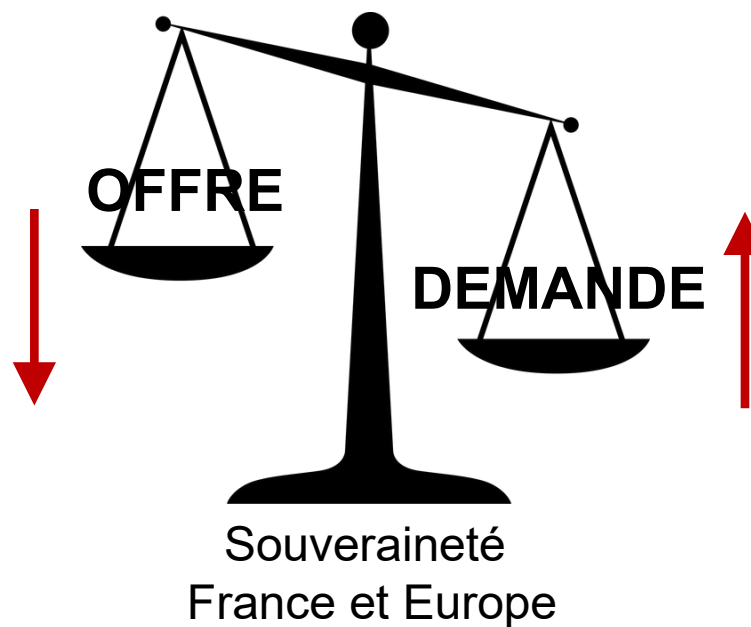


Usage plus sobres et responsables
des terres rares

Contexte et positionnement de l'expertise

Comment renforcer la souveraineté sur les approvisionnements en terres rares?

Production +++
Diversification des approvisionnements



Usage plus sobres et responsables
des terres rares

Réduire, Recycler et Extraire autrement

Les terres rares de quoi parle t-on?

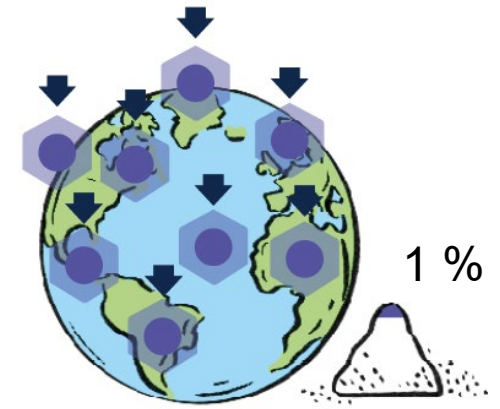
Tableau périodique des éléments

																												18 VIII A 8 A					
1 IA 1A																	2 IIA 2A											2	18 VIII A 8 A				
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003																
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012																	5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180										
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 III B 3 B	4 IV B 4 B	5 V B 5 B	6 VI B 6 B	7 VII B 7 B	8 VIII 8		9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1 B	12 IIB 2 B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948															
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798																
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294																
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018																
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]																
Lanthanide Series		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.243	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967																	
Actinide Series		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]																	

Les terres rares de quoi parle t-on?

Tableau périodique des éléments

1 IA 1A																	18 VIII 8A	
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180	
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 III 3B	4 IV 4B	5 V 5B	6 VI 6B	7 VII 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948	
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294	
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018	
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]	
Lanthanide Series		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.243	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967		
Actinide Series		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]		

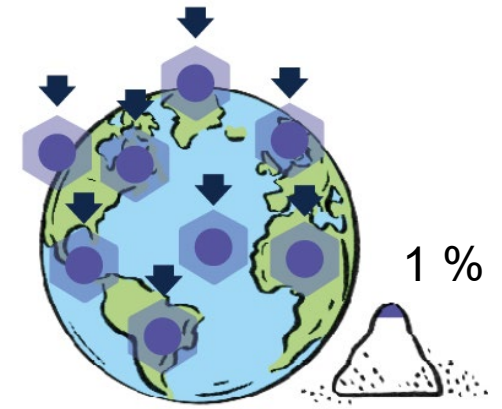


Les terres rares ne sont pas rares

Les terres rares de quoi parle t-on?

Tableau périodique des éléments

1 IA 1A																	18 VIII A 8A	
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180	
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 III B 3B	4 IV B 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VII B 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminium 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948	
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294	
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018	
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]	
Lanthanide Series		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.243	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967		
Actinide Series		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]		



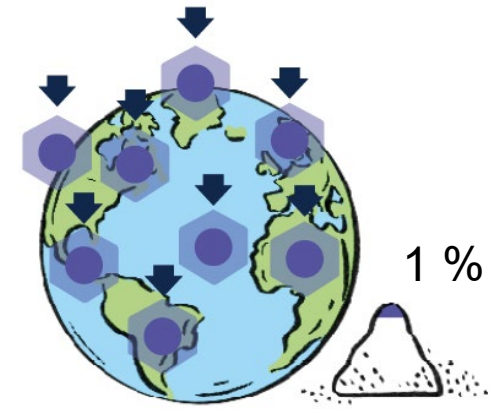
Les terres rares ne sont pas rares

Propriétés uniques variables d'une terre rare à l'autre (Optiques, magnétiques, catalytiques, etc.)

Les terres rares de quoi parle t-on?

Tableau périodique des éléments

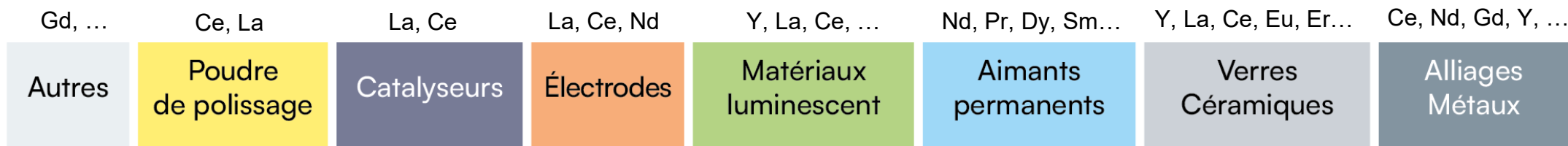
1 IA 1A																	18 VIII A 8A
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 III B 3B	4 IV B 4B	5 V B 5B	6 VI B 6B	7 VII B 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminium 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennesse [294]	118 Og Oganesson [294]
Lanthanide Series		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.243	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967	
Actinide Series		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]	



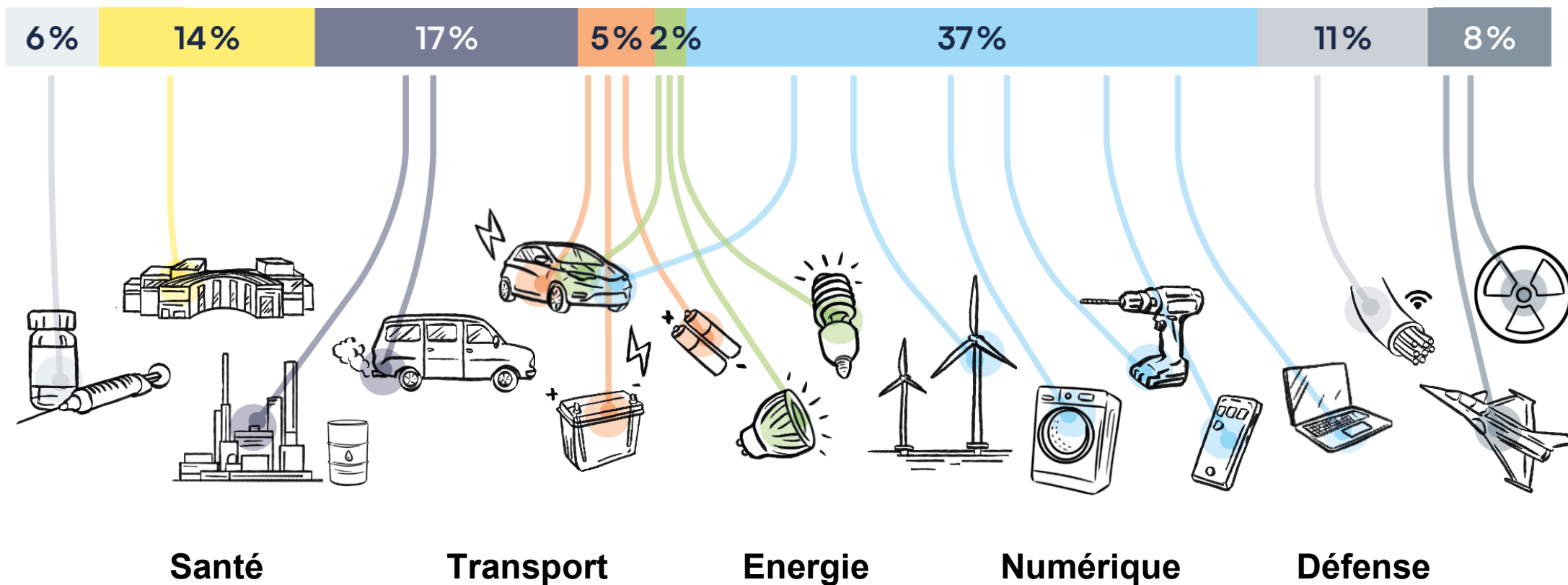
Les terres rares ne sont pas rares

Propriétés uniques variables d'une terre rare à l'autre (Optiques, **magnétiques**, catalytiques, etc.)

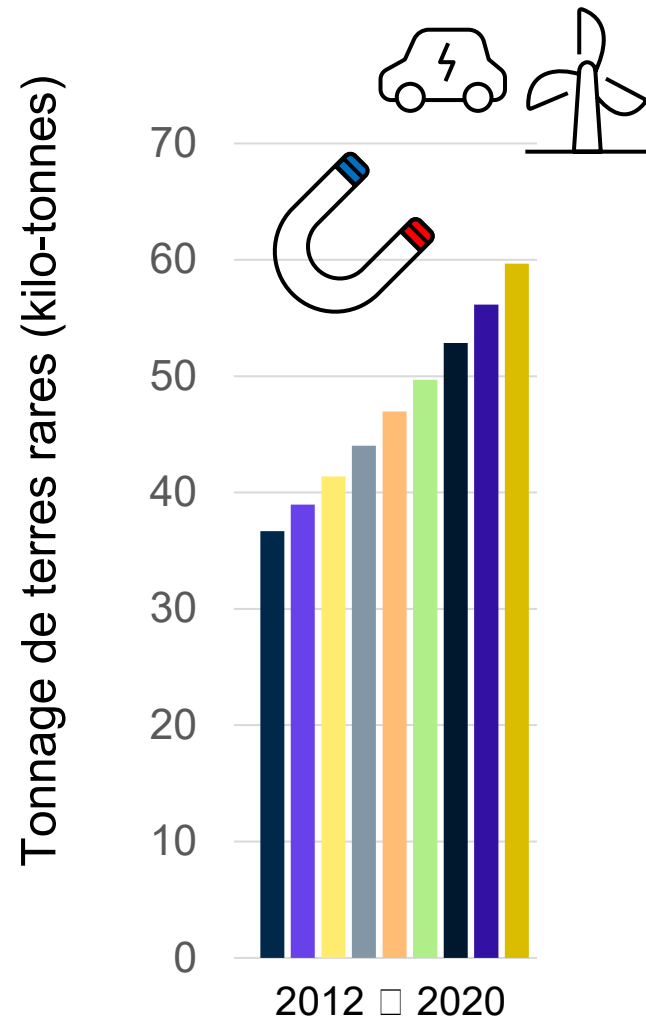
Les terres rares, des éléments indispensables à notre économie



Distribution des terres rares consommées dans les matériaux produits en 2020

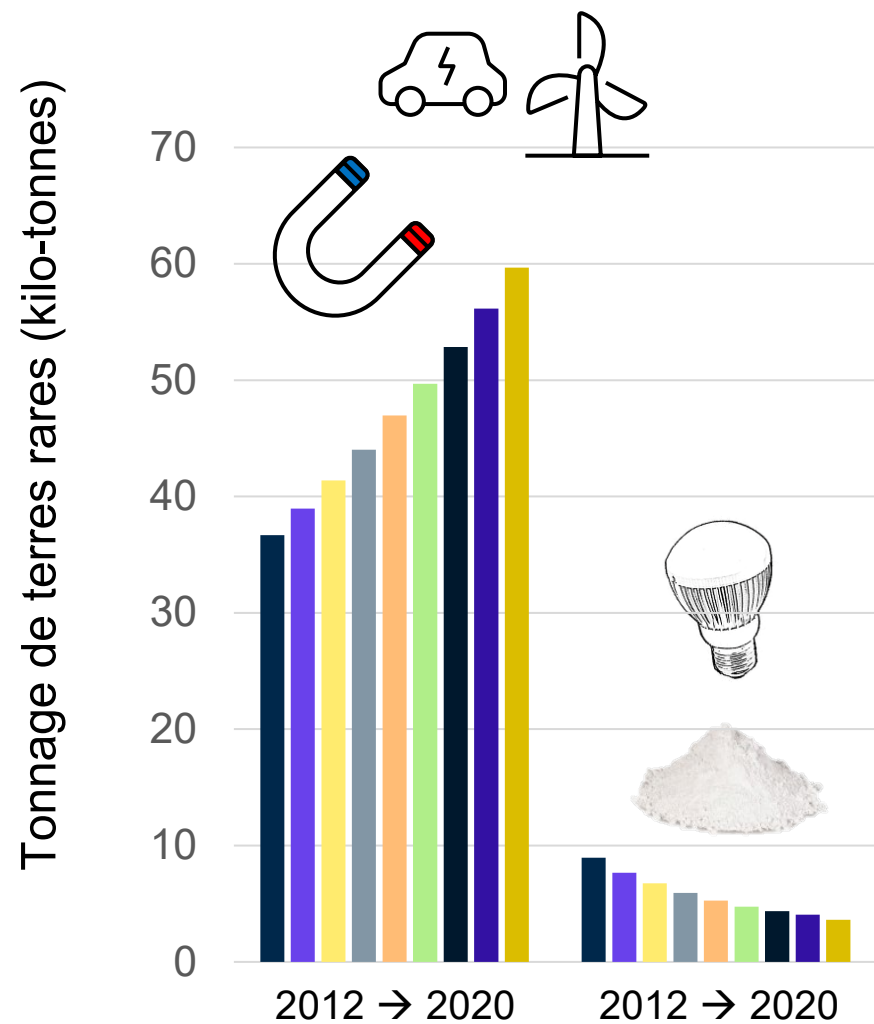


Dynamiques temporelle et spatiale des terres rares



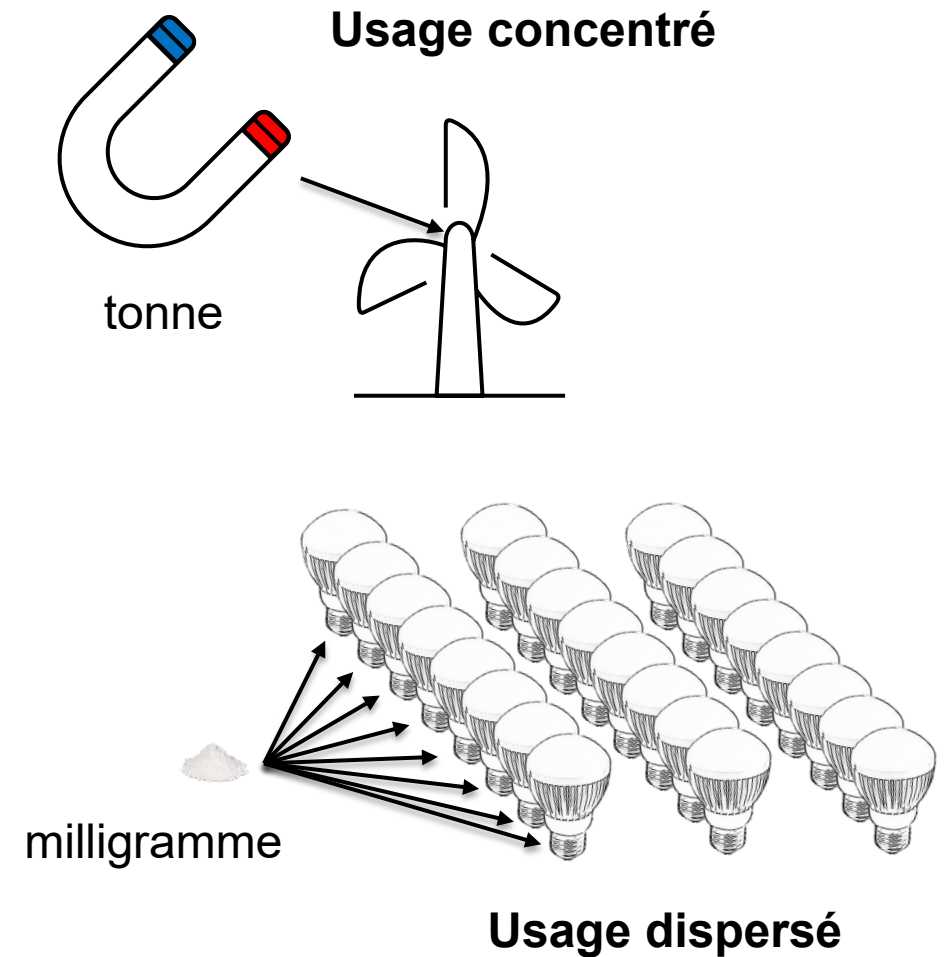
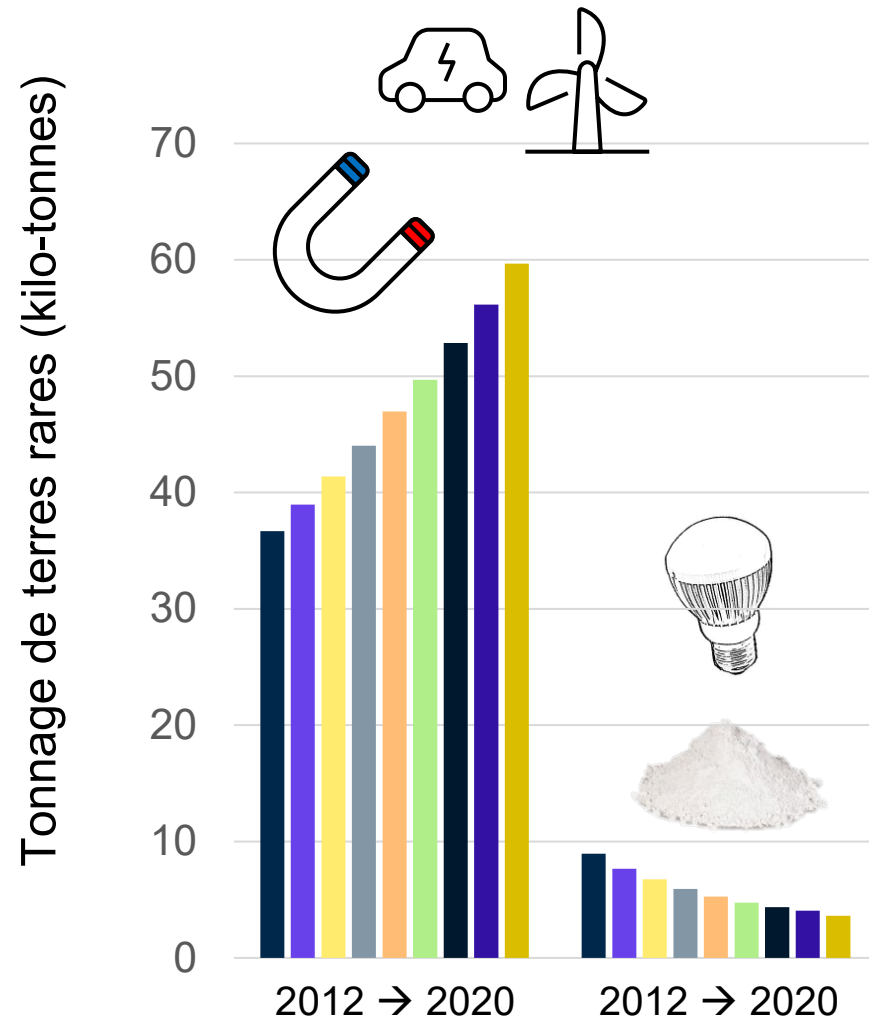
D'après Vaughan et al. 2023

Dynamiques temporelle et spatiale des terres rares



D'après Vaughan et al. 2023

Dynamiques temporelle et spatiale des terres rares



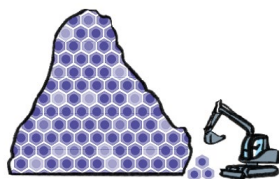
D'après Vaughan et al. 2023

Ressources, réserves, extraction et raffinage des terres rares, une maîtrise chinoise de la chaîne de valeur

Ressources mondiales: 478Mt

Réserves mondiales: 100Mt

Production mondiale 2024: 0,39Mt

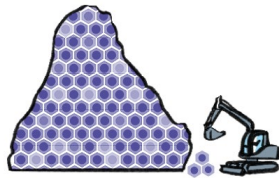


Les réserves
mondiales sont
conséquentes

(Zhou et al., 2017; USGS 2024)

Ressources, réserves, extraction et raffinage des terres rares, une maîtrise chinoise de la chaîne de valeur

	Chine	Europe
Ressources mondiales: 478Mt	35%	6%
Réserves mondiales: 100Mt	44%	-
Production mondiale 2024: 0,39Mt	68%	-
	90%	-



Les réserves mondiales sont conséquentes

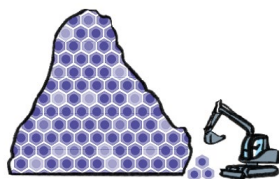
(Zhou et al., 2017; USGS 2024)

Ressources, réserves, extraction et raffinage des terres rares, une maîtrise chinoise de la chaîne de valeur

Ressources mondiales: 478Mt

Réserves mondiales: 100Mt

Production mondiale 2024: 0,39Mt



Les réserves mondiales sont conséquentes

	Chine	Europe
Ressources	35%	6%
Réserves	44%	-
Extraction	68%	-
Raffinage	90%	-

risque approvisionnement
+
importance économique
=

Les terres rares sont critiques

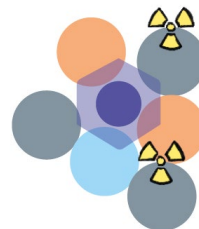
(Zhou et al., 2017; USGS 2024)

Une extraction à forts impacts sociaux et environnementaux

Impacts environnementaux de la production plus élevés que les métaux de base

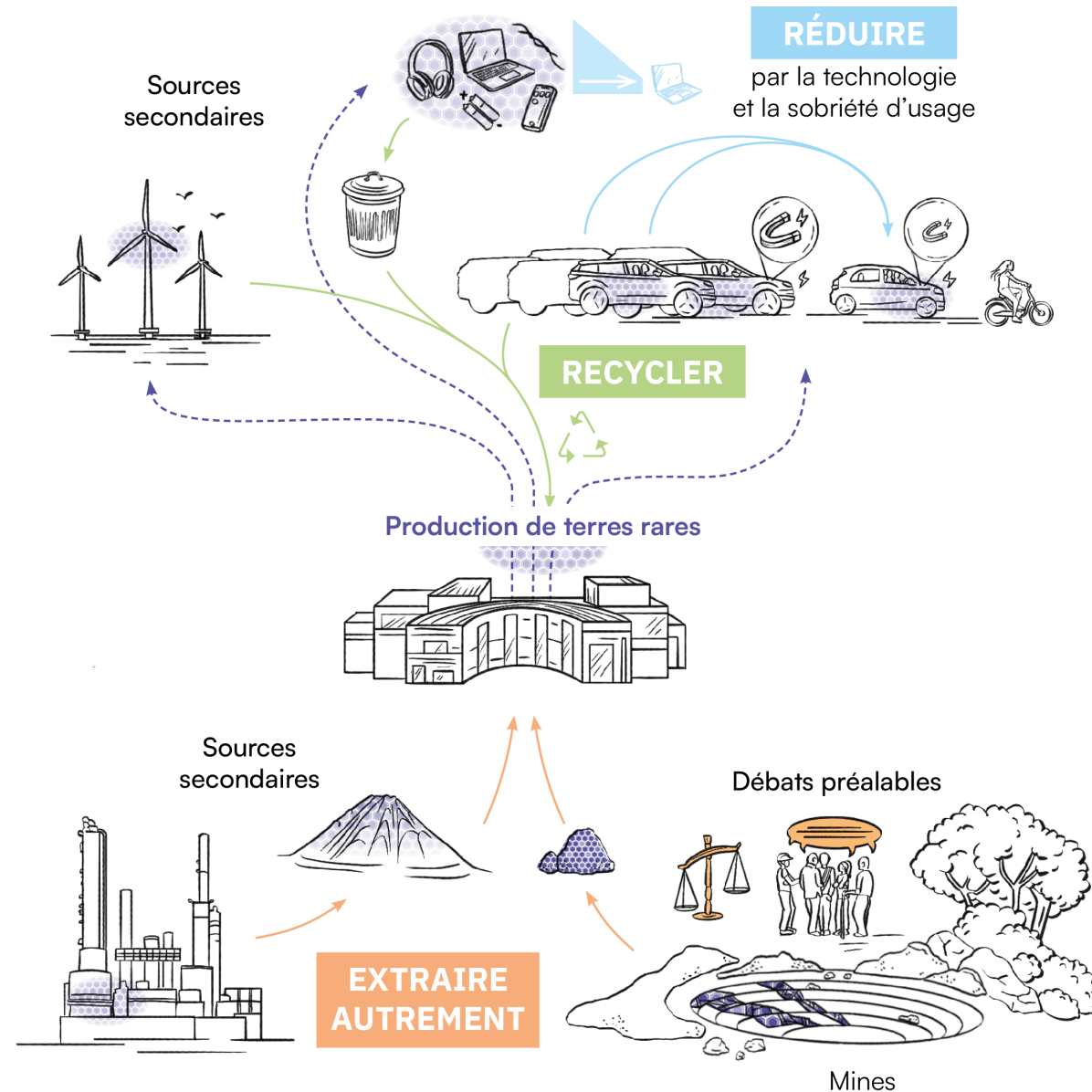


Naturellement associées à des éléments radioactifs



Exposition des travailleurs et des populations locales (dommage cellulaires, troubles pulmonaires et rénaux, etc.)

Comment renforcer la souveraineté Française et Européenne ?



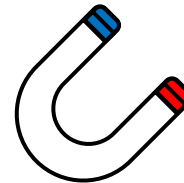
Principaux résultats - RÉDUIRE

Les terres rares dans les aimants

Dans le cas des aimants permanents, certaines terres rares sont substituables mais souvent au détriment de la performance magnétique

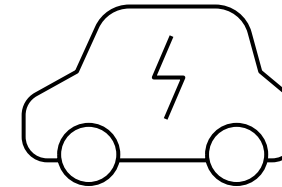
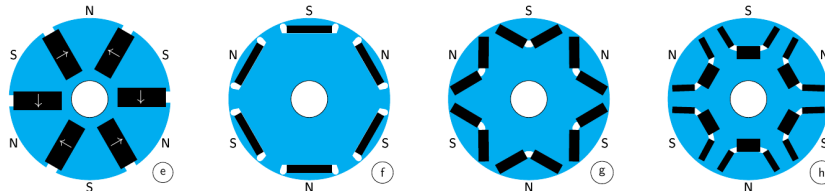
A l'échelle du constituant et du matériaux (NdFeB):

- Substitution partielle du Nd par Pr/Ce



A l'échelle du dispositif (ex. moteur pour véhicule électrique):

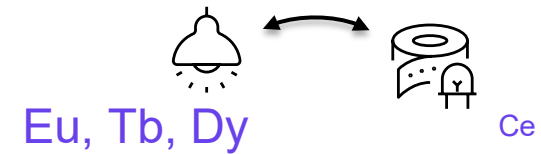
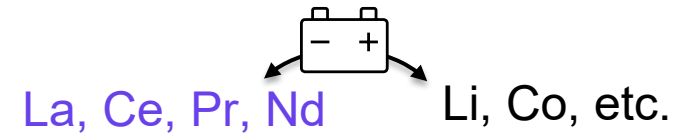
- Changement dans la disposition des aimants et le design du rotor



Il n'y a pas d'obstacle technique pour éliminer les terres rares du moteur des voitures électriques

L'innovation technologique permet de créer des dispositifs performants avec moins ou pas de terres rares.

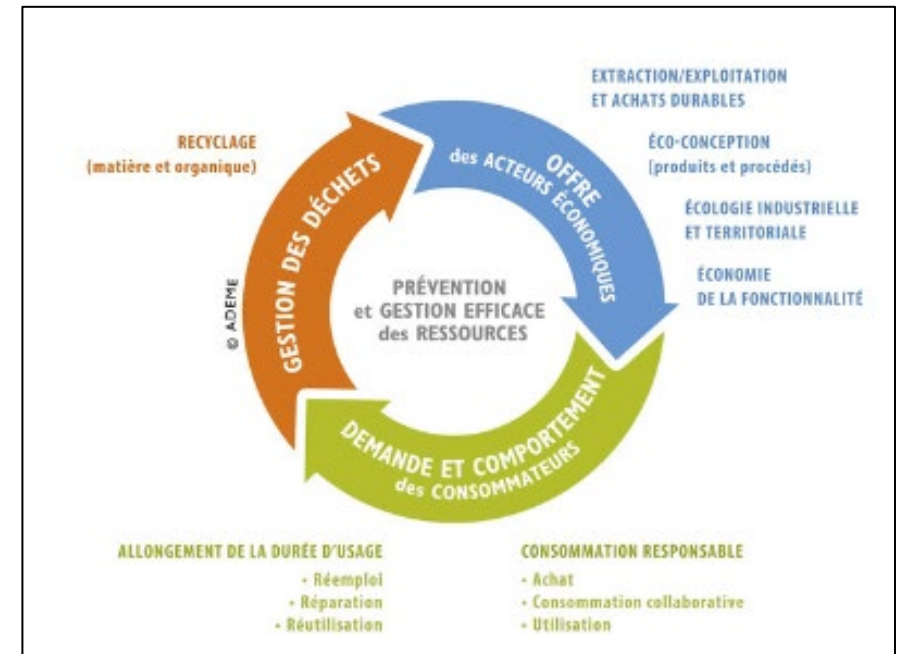
- Matériaux d'électrode (NiMH → Li-ion)
- Matériaux luminescents (Phosphores → LED)



Quels apports de l'économie circulaire?

Les stratégies d'économie circulaire peuvent jouer un rôle dans la modulation de la demande

1. L'éco-conception permet de réduire ou d'optimiser le contenu en terres rares, mais ...
2. doit composer avec les préférences exprimées par les consommateurs.
3. L'économie de la fonctionnalité (=usage>propriété – par exemple : autopartage) reste sous-explorée.

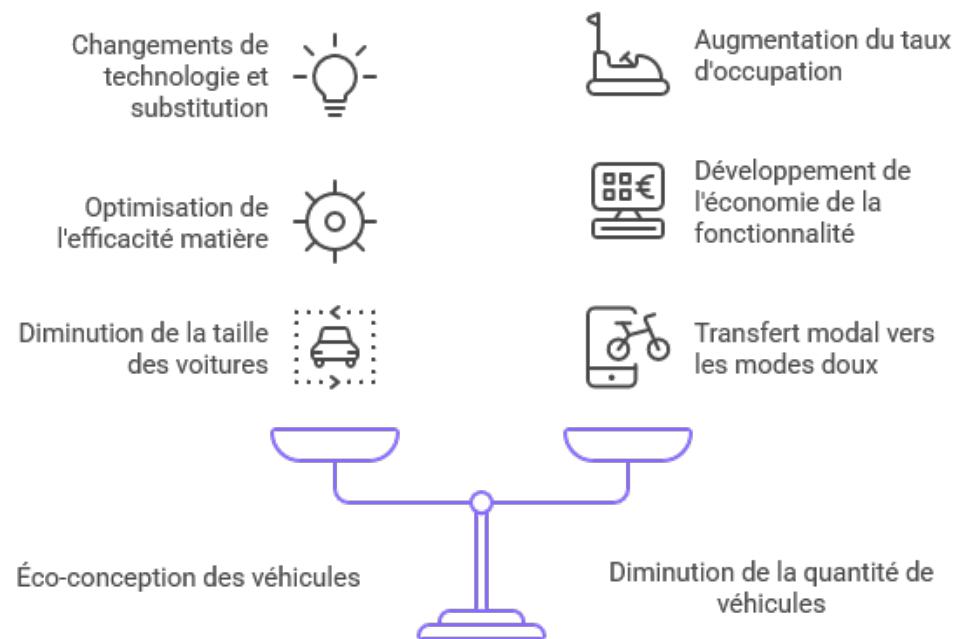


Source : ADEME

Quels apports de l'économie circulaire?

Les stratégies d'économie circulaire peuvent jouer un rôle dans la modulation de la demande

Comment réduire l'utilisation d'ETR dans le secteur de la mobilité ?



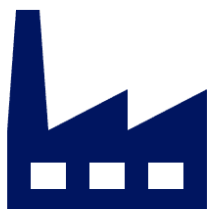
Règlement européen pour les matières premières critiques (*Critical Raw Material Act*, 2024)

Le droit européen cherche à concilier sécurisation des approvisionnements et sobriété des usages



Extraction:
10% of the EU's annual SRM consumption must be mined domestically by 2030

Pillar 1



Processing:
40% of the EU's annual SRM consumption must be processed domestically by 2030

Pillar 2



Recycling:
25% of annual SRM processing waste and EOL scrap must be recycled domestically by 2030 (exclusions apply)

Pillar 3

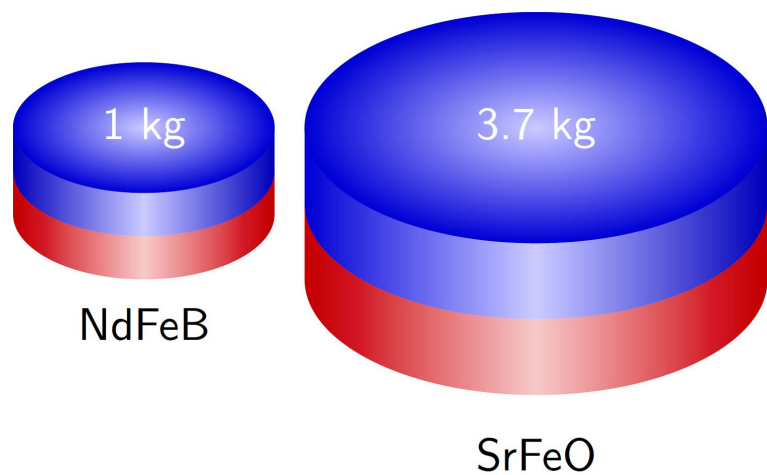


Supply Diversification:
The EU may not source over 65% of any SRM from a single nation by 2030

Pillar 4

Réfléchir à une hiérarchie des usages?

La sobriété technologique amène à réfléchir sur l'opportunité d'utiliser des terres rares en fonction des usages



Aimants à performance équivalente

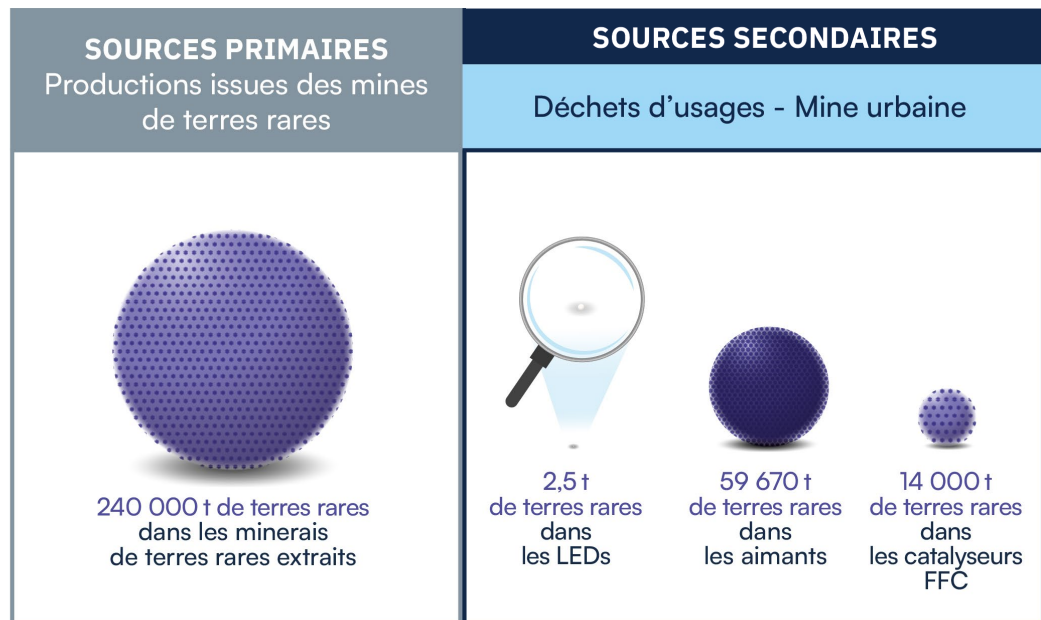


Principaux résultats - RECYCLER

Le recyclage apparaît comme alternative de production plus responsable des terres rares

POTENTIELLES SOURCES DE TERRES RARES :

QUANTITÉS DE TERRES RARES DANS LES OBJETS GÉNÉRÉS EN 2020 DANS LE MONDE



Concentration en terres rares dans les objets (%)

0% 0,025% 0,1% 1% 10% 30%



La « mine urbaine » est riche en ressources métalliques, dont le recyclage fait l'objet de nombreuses recherches.

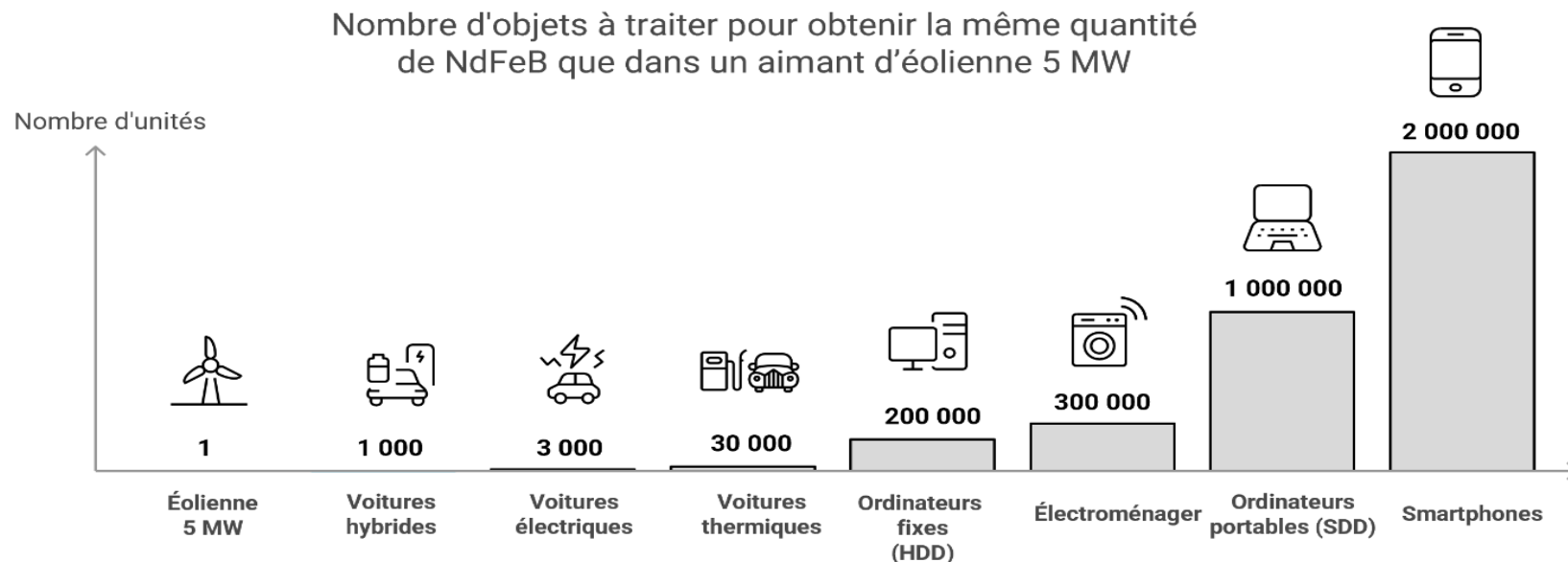
Son exploitation permet de réduire significativement l'impact environnemental par rapport à l'extraction primaire.

Il demeure certains défis techniques : adapter les procédés et améliorer la collecte et le pré-traitement (tri).

Cela n'explique pas pourquoi seuls 1% des terres rares sont recyclés au niveau mondial.

Trois grands types de freins limitent le recyclage des terres rares en pratique

- 1) **La collecte et la constitution de stocks est difficile** : dispersion des terres rares, durée de vie très variable des dispositifs.
- 2) **La rentabilité des opérations est faible** : dépendance à la demande et au prix de la matière vierge, coût du démantèlement des objets



Trois grands types de freins limitent le recyclage des terres rares en pratique

3) Le cadre juridique et les incitations politiques ne sont pas adaptés.

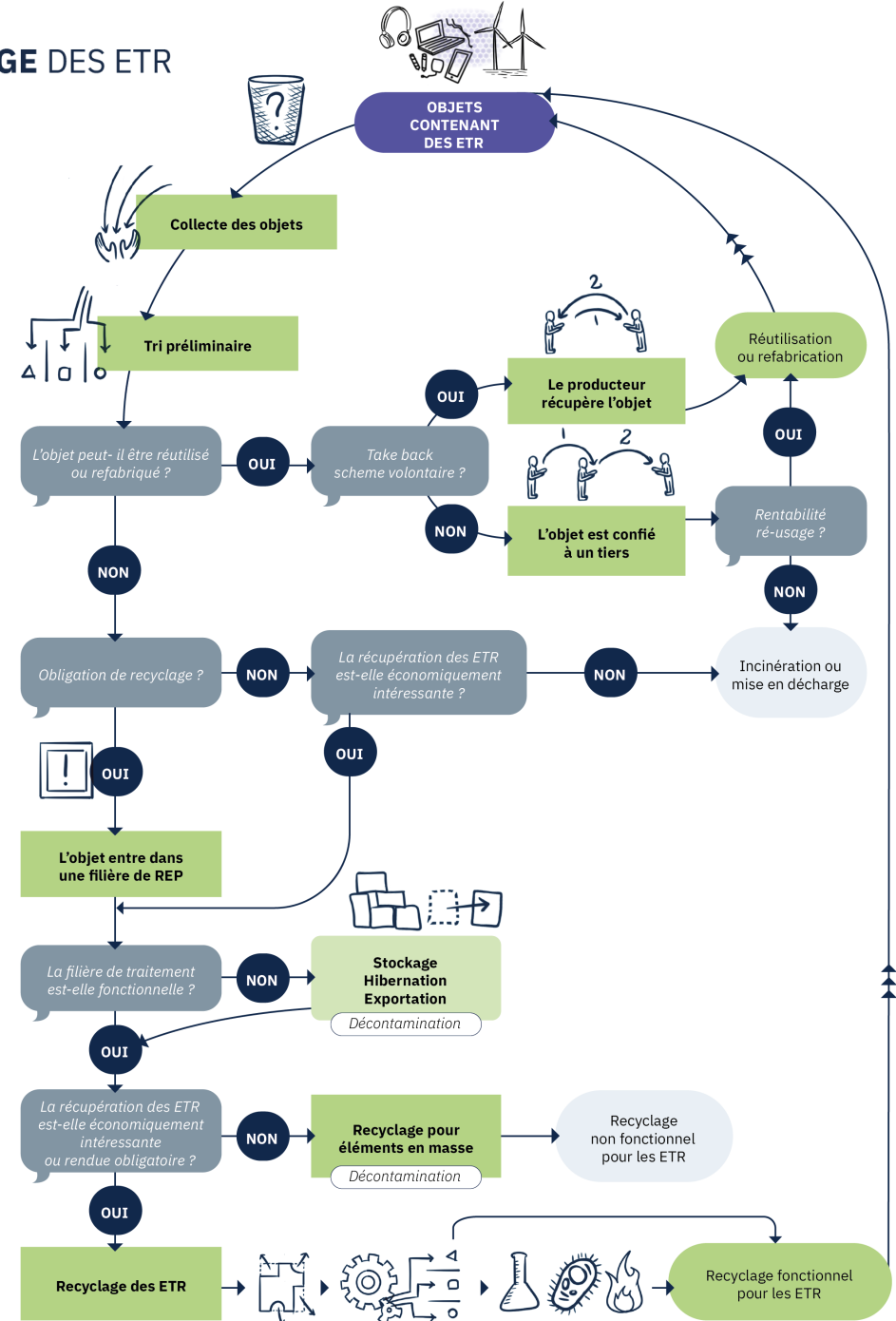
Aucune législation n'oblige à l'heure actuelle à faire mention de la présence de terres rares ou à indiquer les actions spécifiques à réaliser à leur endroit en matière de recyclage : **la législation ne distingue pas les produits contenant les terres rares parmi les produits.**

La littérature montre que l'action publique, via le droit ou les politiques publiques, aurait pourtant un rôle déterminant à jouer dans la structuration d'un marché du recyclage des terres rares.

La littérature permet de documenter le caractère **systemique** du recyclage.

Le développement du recyclage :

- appelle une compréhension fine de **la vie sociale des choses** (stocks et flux disponibles, durée d'hibernation, durée de vie)
- repose sur le développement de dispositifs juridiques ou politiques d'**encadrement des marchés** (responsabilité élargie du producteur, obligation de recyclage fonctionnel)
- ... qui sont susceptibles de participer à la **sécurisation des approvisionnements** pour une part significative de certaines terres rares (notamment les terres rares lourdes).



Le recyclage a un grand potentiel mais **n'est pas à même d'assurer une couverture entière des besoins en ETR dans le cadre d'une demande toujours croissante** même s'il permet de répondre à certaines demandes tout en minimisant le « balance problem » (Grosse et al. 2014, Granvik et al. 2025). ¶

Dans le cas des terres rares, la demande est forte (la demande pour le Néodyme a presque doublé en 10 ans) et la réduction ou le recyclage abordés dans les axes 1 et 2 ne suffiront pas à répondre aux besoins croissants.

Les objectifs de sobriété ne sont pas tous compatibles entre eux : substituer peut paradoxalement réduire le stock de terres rares recyclables dans le futur.

Il est donc nécessaire de penser aussi à d'autres formes d'approvisionnement.

Principaux résultats - EXTRAIRE AUTREMENT

En Europe, **les gisements** présentant un potentiel important **se situent au Nord** (Groenland, Suède, Norvège). **Il n'existe pas de potentiel géologique significatif en France.**

Il existe des sources alternatives de terres rares. Néanmoins, leur exploitation demeure entourée de fortes incertitudes.

Ressources minérales offshore



En Europe, **les gisements** présentant un potentiel important **se situent au Nord** (Groenland, Suède, Norvège). **Il n'existe pas de potentiel géologique significatif en France.**

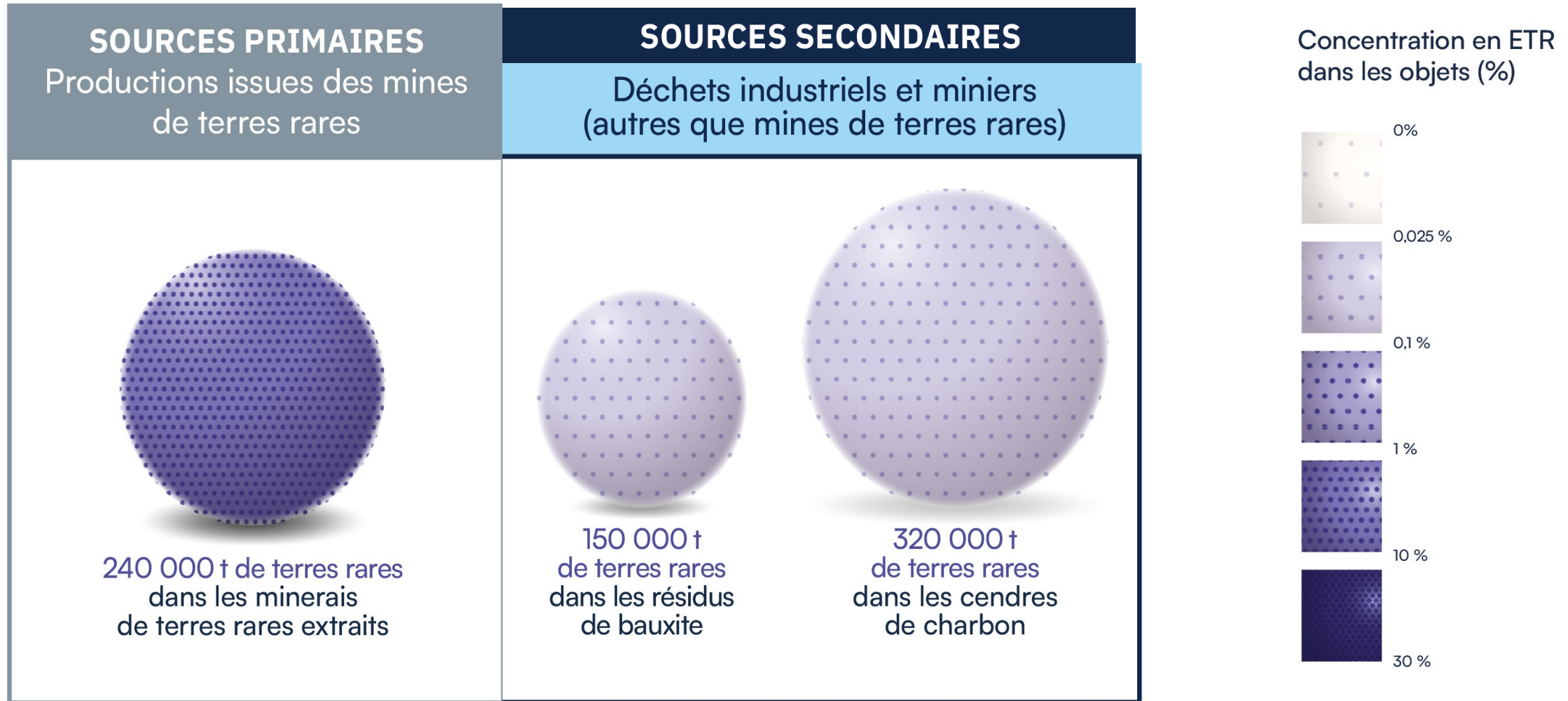
Néanmoins, il existe des sources alternatives de terres rares. Leur exploitation demeure entourée de fortes incertitudes.

Déchets miniers et industriels (résidus de bauxite, cendres de charbon, phosphogypse)



POTENTIELLES SOURCES DE TERRES RARES :

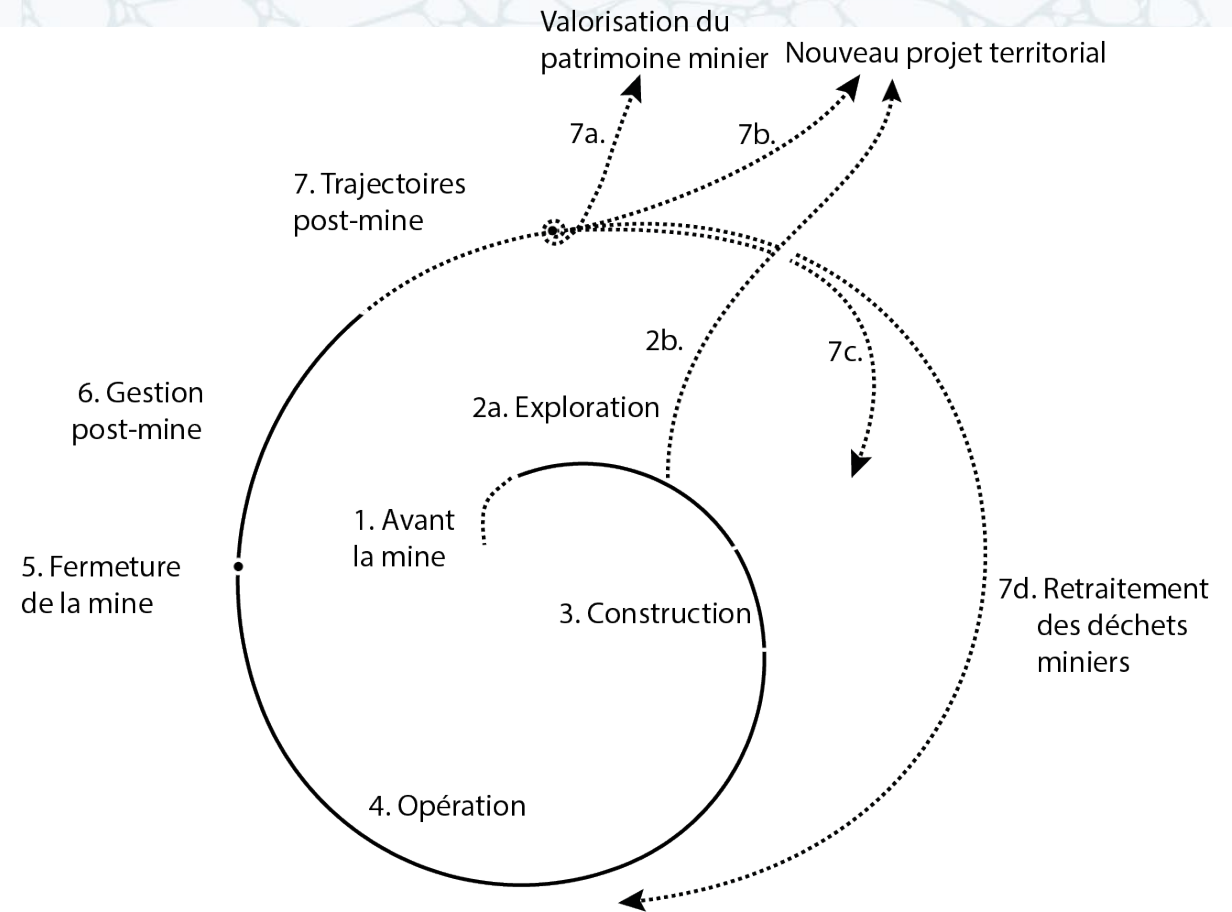
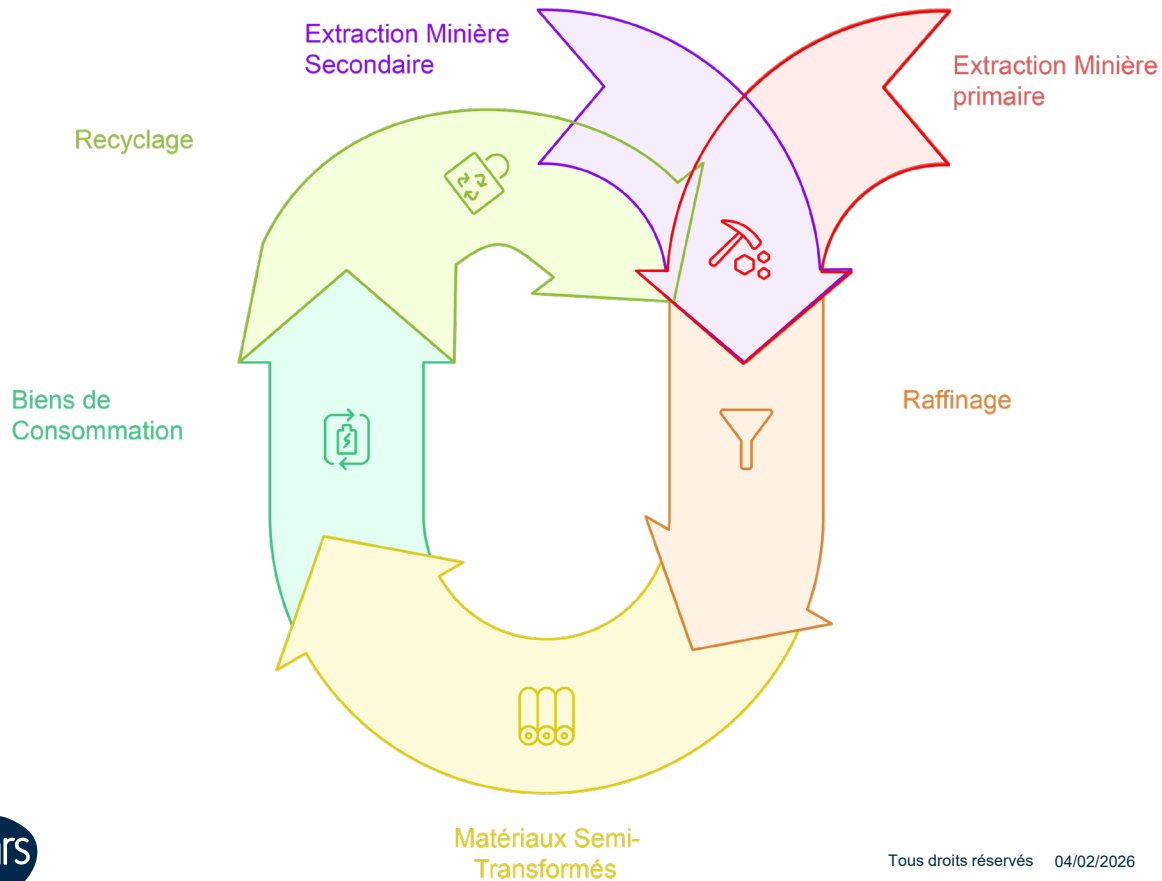
QUANTITÉS DE TERRES RARES DANS LES OBJETS GÉNÉRÉS EN 2020 DANS LE MONDE



Infographie tirée du chapitre « Extraire autrement » de l'expertise sur les terres rares

Des exploitations contestées

A toutes les étapes de la chaîne de valeur et à toutes les étapes du cycle minier

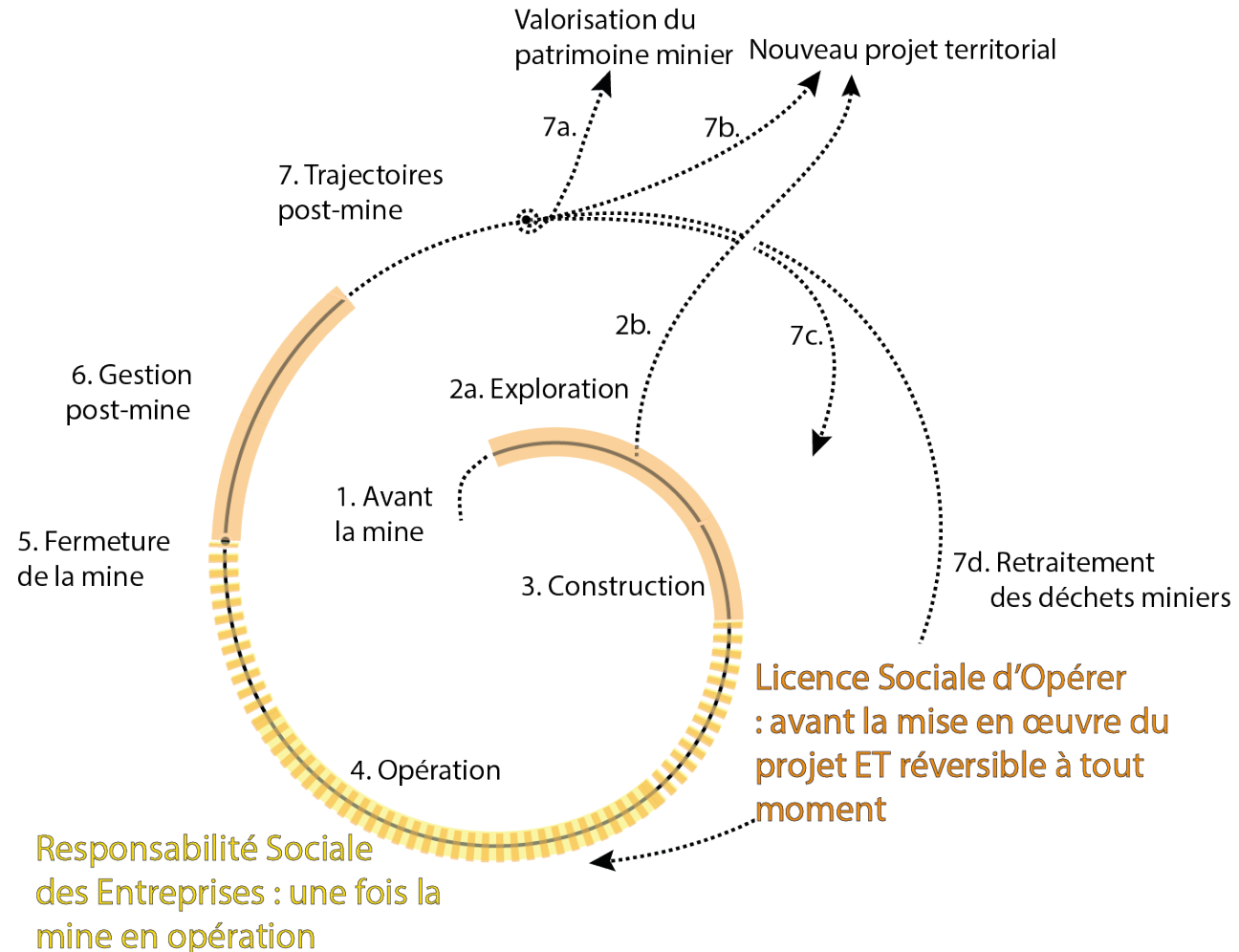


Des exploitations contestées

« Extraire autrement » ne se réduit pas à l'amélioration des pratiques existantes

Des modes de régulation insuffisants et ambivalents

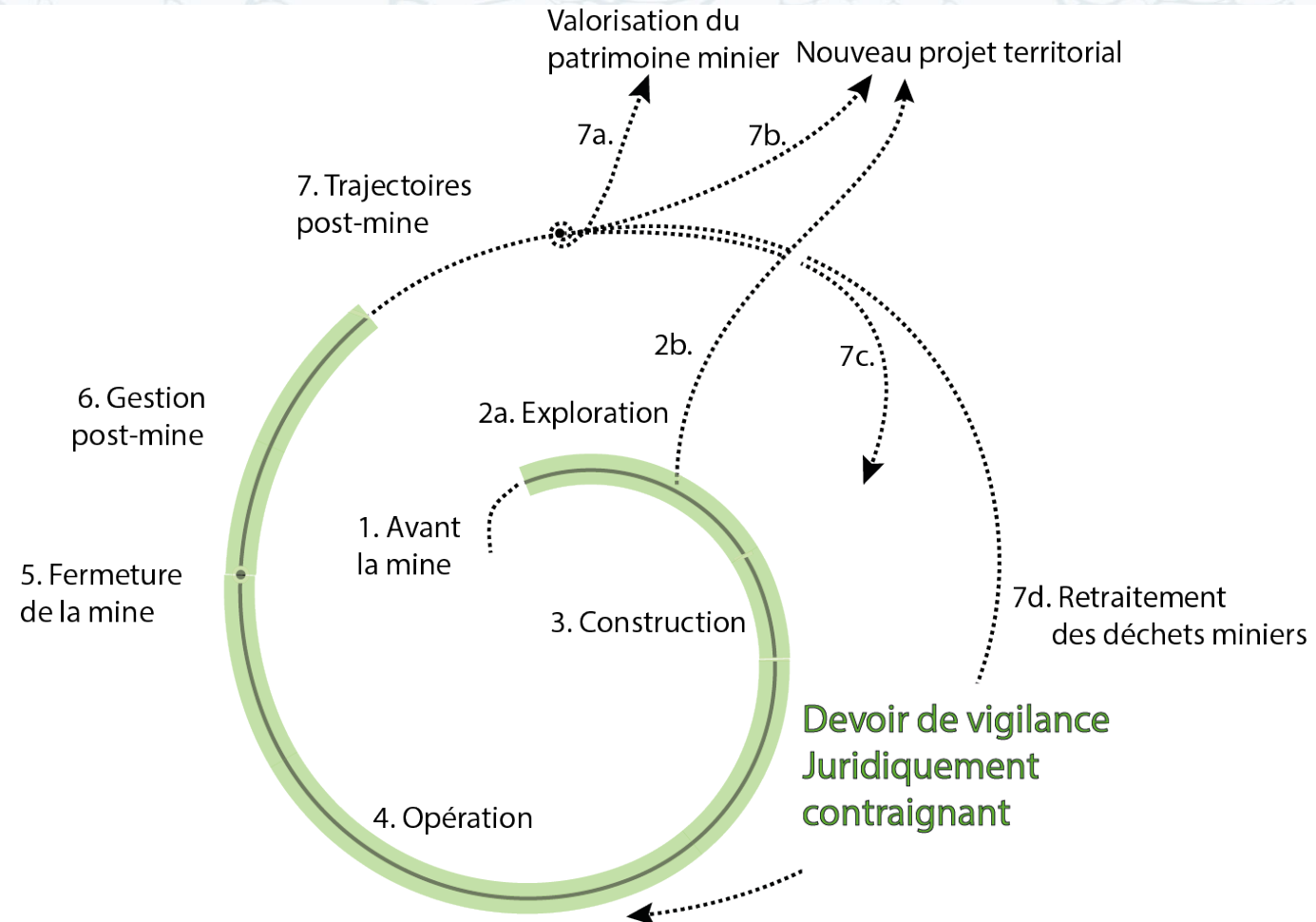
- De la Responsabilité Sociale des Entreprise (RSE) à la Licence Sociale d'Opérer (SLO)
- Exemple Montagne d'Or (Guyane, France)



Des exploitations contestées

Des modes de régulation insuffisants et ambivalents

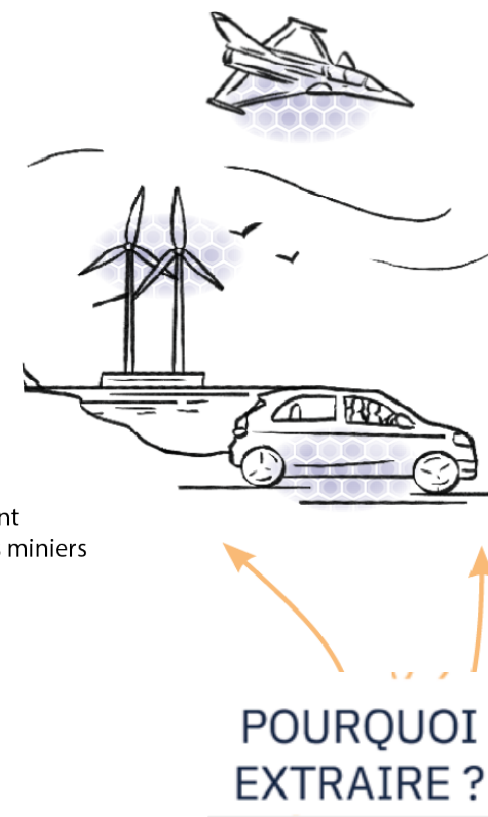
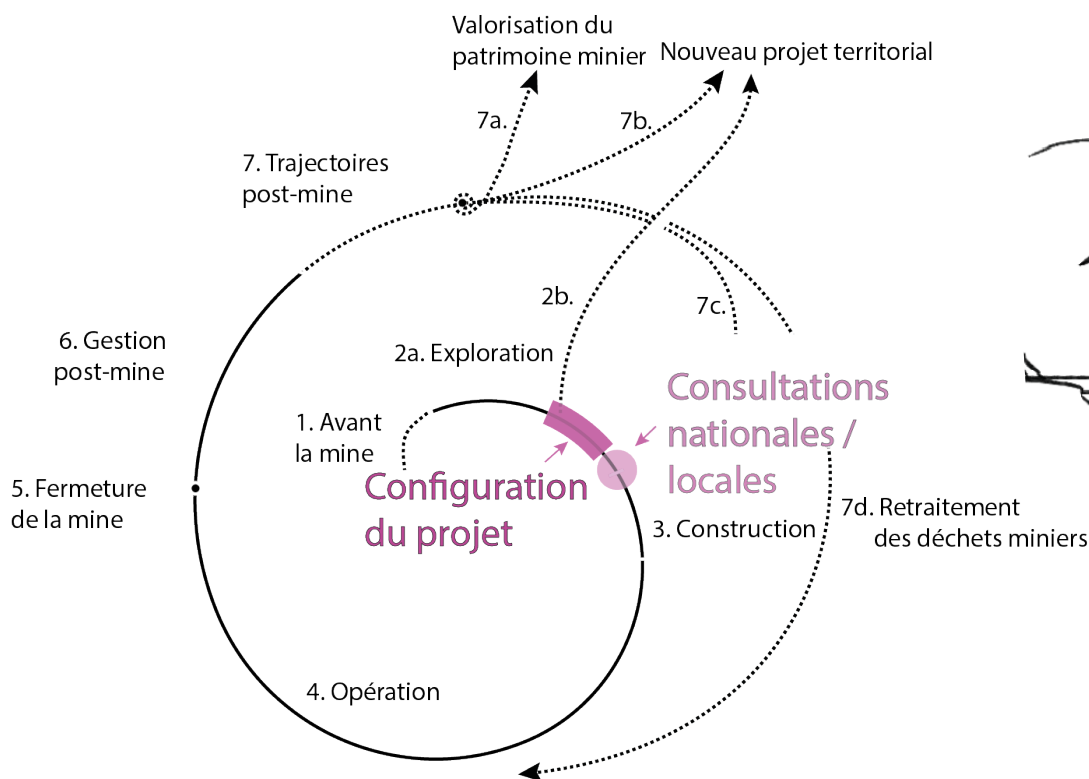
- Guides sectoriels bonnes pratiques : **pédagogie ne suffit pas**
- Pas de prise en compte des spécificités territoriales
- Ne limite pas les phénomènes de corruption
- Effets d'exclusion par les mécanismes participatifs
- Ex. Narsaq, Groenland (mine de Kuannersuit / Kvanejjeld)
- Inscription dans le droit **juridiquement contraignant** (devoir de vigilance)



La transition énergétique, envisager l'extraction autrement ?

Que faut-il extraire, pour quels usages, au bénéfice de qui, et à quel coût social et environnemental ?

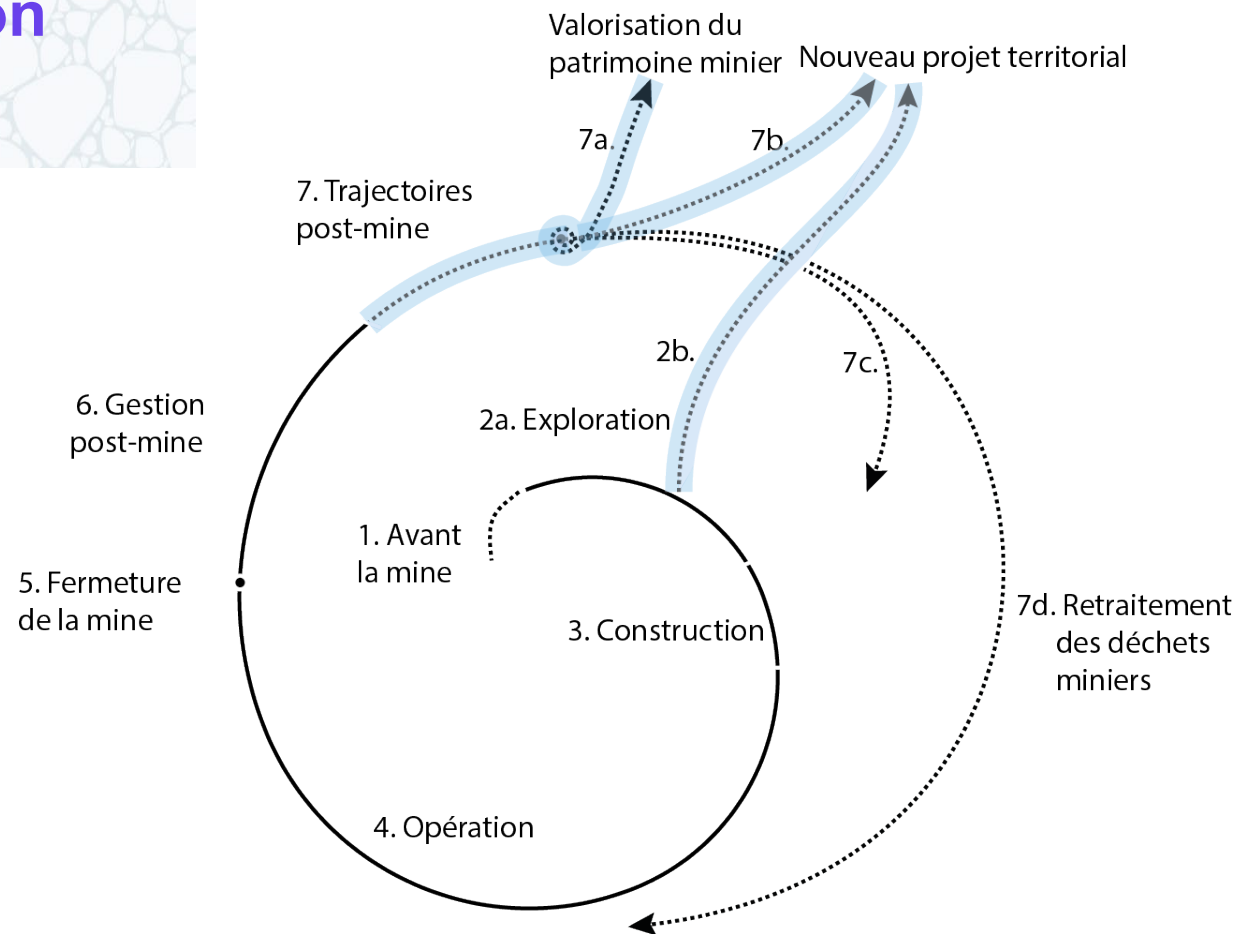
- La transition énergétique exacerbe des inégalités anciennes
- Colonialisme / Colonialisme interne
- Ex. Bayan Obo, Groenland
- manque de transparence, temporalité inadaptée, absence de pouvoir décisionnel des populations locales, mauvaise accessibilité de l'information



La transition énergétique, envisager l'extraction autrement ?

Comment mettre en place une extraction et une transition juste

- assurer différentes formes de justice
- transition vers un modèle économique alternatif
- Ex. République de Sakha en Russie



Conclusions et perspectives

1. La réduction du recours aux éléments de terres rares par la **technologie** et par la **sobriété d'usage** représente une **opportunité**

2. La France dispose de **ressources secondaires potentiellement importantes**

- Les déchets des produits d'usage : la **mine urbaine**
- Les **déchets miniers et de l'industrie**

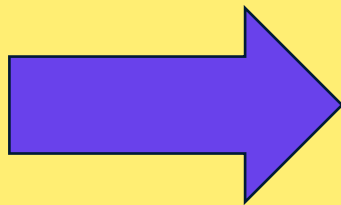
3. Quand bien même un recours à l'extraction demeurerait nécessaire, la littérature invite à prendre en compte de manière plus poussée les enjeux sous-jacents : **que faut-il extraire, pour quels usages, au bénéfice de qui, et à quel coût social et environnemental?**

« Absences » et gaps de recherche

Type I : *déficit d'informations* sur certains usages des ETR (« science secrète », Gallison)

Type II : *manque d'actualisation* de données existantes (par ex., proportion d'ETR recyclées ou dynamique des usages vs balance problem)

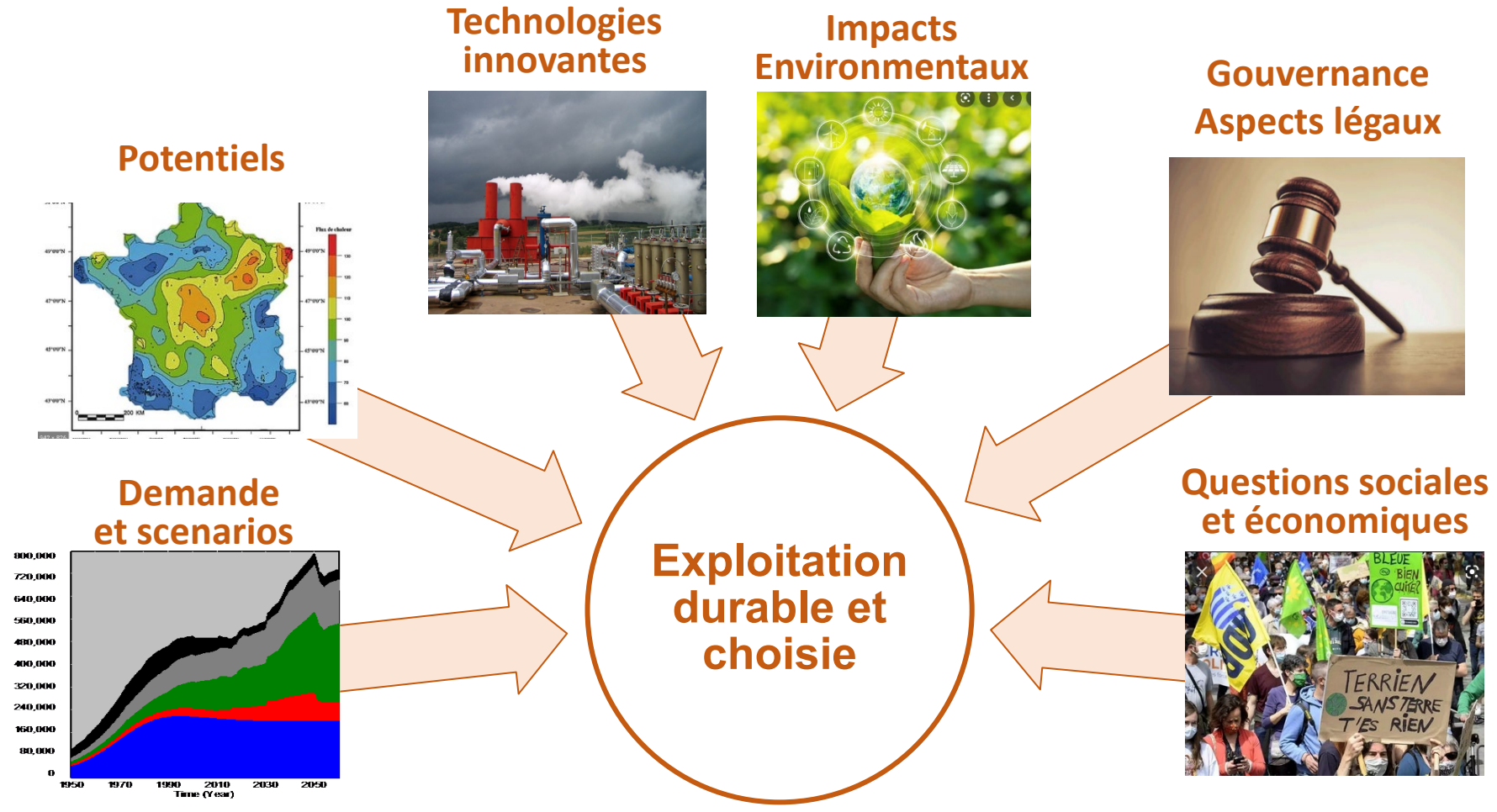
Type III : vraies inconnues => « gaps »



1. Comment apprécier la sobriété d'usage par rapport à d'autres formes de réduction de la demande (par exemple substitution) ?
2. Sur quels fondements pourrait s'établir la hiérarchie des usages légitimes?
3. Comment les dispositifs de traçabilité peuvent-ils contribuer aux objectifs d'économie circulaire?
4. Comment améliorer la connaissance sur les quantités et la qualité des ressources secondaires?
5. Il manque des études empiriques sur le fonctionnement du marché et des chaînes de valeur.
6. On sait peut de choses sur les conséquences santé-environnement de la production et de l'usage des ETR.

- Les sujets traités dans l'ESCO Terres rares intersectent ceux du PEPR sous-sol
- Conclusions: approche systémique et pluridisciplinaire nécessaire

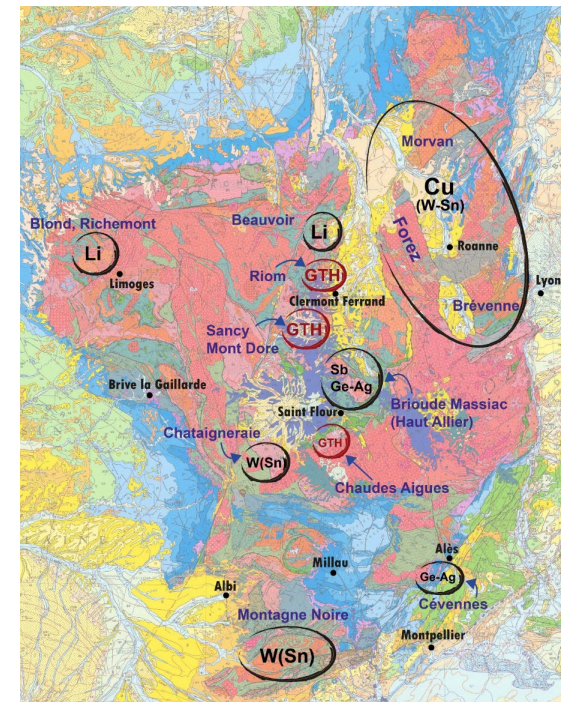
- Le PEPR sous-sol est bâti autour de cette approche



Terres rares dans les chantiers

A ce stade, pas de projet dédié aux terres rares mais c'est un sujet sous-jacent à plusieurs projets.

- **Chantier Massif central**, « *Concentration, distribution et remobilisation du Germanium, Gallium, Indium et des terres rares dans les systèmes minéralisés polyphasés du district de Langeac* » → comprendre le devenir des métaux critiques ayant une affinité chimique avec les systèmes Pb-Zn-(Ag-Ba-F) dans les gisements situés dans des environnements orogéniques.
- **Chantier Guyane** “*Profils d’alteration et fractionnements chimiques*” dont terres rares → comprendre le timing de la mise en place des couvertures latéritiques ou bauxitiques et leur potentiel en tant que géoressources.



Complémentarité ESCO – PEPR

Souveraineté: définie sur les capacités de production (10% **consommation** en **production** domestique, 40% en **raffinage**, 25% en **recyclage**)

- Nécessité de quantifier sur la demande future. Pour quels **scénarios** ?
- Energie et coûts de production
- Impacts locaux ou délocalisés: LCA, approche économique
- Perception

-> **Modèles** stock & flux, bottom-up, durée de vie, taux de collecte et de recyclage, intensité matière, etc adaptés pour les terres rares

Les enjeux REE sont-ils très différents des enjeux des autres ressources minérales ?

REE demand (metal) – base line. 15 technologies

world

europe

france

china

RR = 1%

REE demand (metal) – base line world. 15 technologies

	catalysis HC	RR 0%
		RR 90%
glass & ? ceramics		RR 0%
	electronic devices	RR 0%
permanent magnet BEV		RR 90%
	catalytic exhauster	RR 90%

The recycling rate will increase at the pace of BEV and offshore wind turbines development

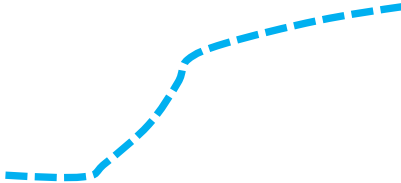
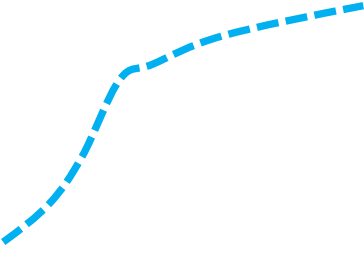
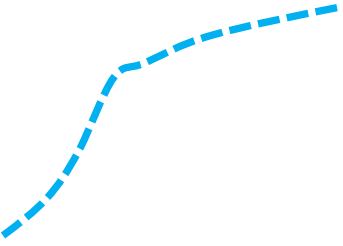
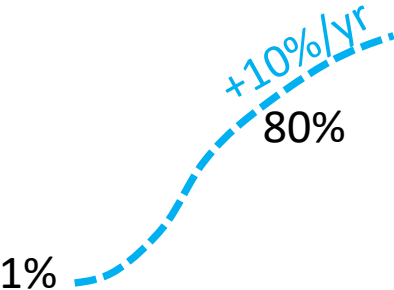
REE demand (metal) – base line. 15 technologies

world

europa

france

china



REE demand (metal) – SSP IPCC -World

SSP1

SSP2

SSP3

SSP4

SSP5

world

Energy – price REE

The economic viability of production is assessed using capital (CAPEX) and operational expenditure (OPEX), net present value (NPV) and internal rate of return (IRR)

Alternatively, it can be estimated from the **energy of production**

$$\text{price} \sim \text{cost} \sim (E = \underbrace{\text{comminution} + \text{separation}}_{\text{1/C}} + \text{metalurgy/digestion/leaching}) \cdot P_{\text{Energy}}, \text{FEP}$$

1/C depends on geology and cumulative production

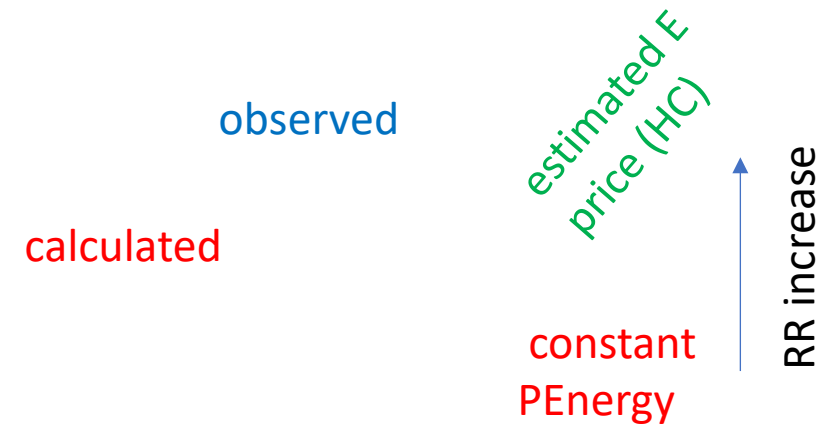
Co-production reduces the comminution energy per element **mining residues** if the **stock is significant** + possibly coal ash (to be discussed in the context of the energy transition).

Energy – price REE

The economic viability of production is assessed using capital (CAPEX) and operational expenditure (OPEX), net present value (NPV) and internal rate of return (IRR)

Alternatively, it can be estimated from the **energy of production, which depends on concentration**

- average concentration (Nassar et al., 2023)
- Bayan obo co-produced with iron



Environmental impacts: Coupling state of art LCA with dynamic models => Dynamic and regionalised LCA (PC6-PC2)

Costs of impacts : a quantitative approach (PC1)

Social issues: no specific project yet, but arises in many WP, even if not specifically for REE:

- PC 1: reflexive action on demand scenarios
- PC 7: national strategies of sovereignty, and its articulation with international issues
- PC 8: legal issues
- PC Massif central: local issues regarding exploration

Complémentarité ESCO – PEPR ?

- Le PEPR sous-sol partage la vision systémique et pluridisciplinaire autour de thématiques, autour d'objets et autour de questions transverses
- Il travaille sur les stratégies nationales et questions de souveraineté en articulation avec les dimensions internationales, mais aussi sur les aspects légaux et de régulation.
- Une communauté avec les bons outils et mobilisable pour répondre aux gaps de recherche identifiés par l'ESCO, avec des approches quantitatives et scientifiquement à la pointe
- Il essaye d'impliquer les non-spécialistes et de rendre accessibles les grands enjeux
- Il est peu présent sur la question spécifique des terres rares, mais soutient les projets autour du thème...

SCRIPT pour ETR dans Axe 2

- **SLIDE 1 – Intro Terres rares dans les trois axes du programme**

- Les sujets traités dans l'ESCO Terres rares intersectent ceux du PEPR sous-sol et plusieurs experts qui ont été mobilisés par l'ESCO participent activement aux projets du PEPR sous-sol
- Le PEPR sous-sol est un programme de recherche qui ambitionne de réunir la communauté sous-sol pour 1) mieux maîtriser les besoins futurs, de mieux connaître le sous-sol et son potentiel et de mieux gérer les conditions techno, env, soc et légale de son exploitation et utilisation
- Ces ambitions sont mises en œuvre dans trois axes de recherche déclinés en projets qui feront l'objet de présentations détaillées en fin de matinée et cet après-midi.
- Il n'y a pas à ce stade de la mise en œuvre du PEPR Sous-sol, un projet dédié exclusivement ou principalement aux terres rares mais c'est un sujet sous-jacent à plusieurs projets.

- **SLIDE 2 – Les terres rares dans les projets ciblés Massif central et Guyane**

- Dans ces chantiers, deux tâches concernent plus spécifiquement les terres rares et leur concentration/distribution.
- Dans le chantier Massif central, une des tâches (2.1.6) concerne l'étude de la concentration, distribution et remobilisation du Germanium, Gallium, Indium et des terres rares dans les systèmes minéralisés polyphasés du district de Langeac (Bénédicte Cenko, Univ. Montpellier)
- Dans le chantier Guyane une des tâches (1.2) concerne l'étude des profils d'altération et les fractionnements chimiques dont terres rares (cf Cécile Gautheron, UGA)).