

Les ressources du sous-sol de la transition énergétique : enjeux sociétaux et environnementaux, du global au local

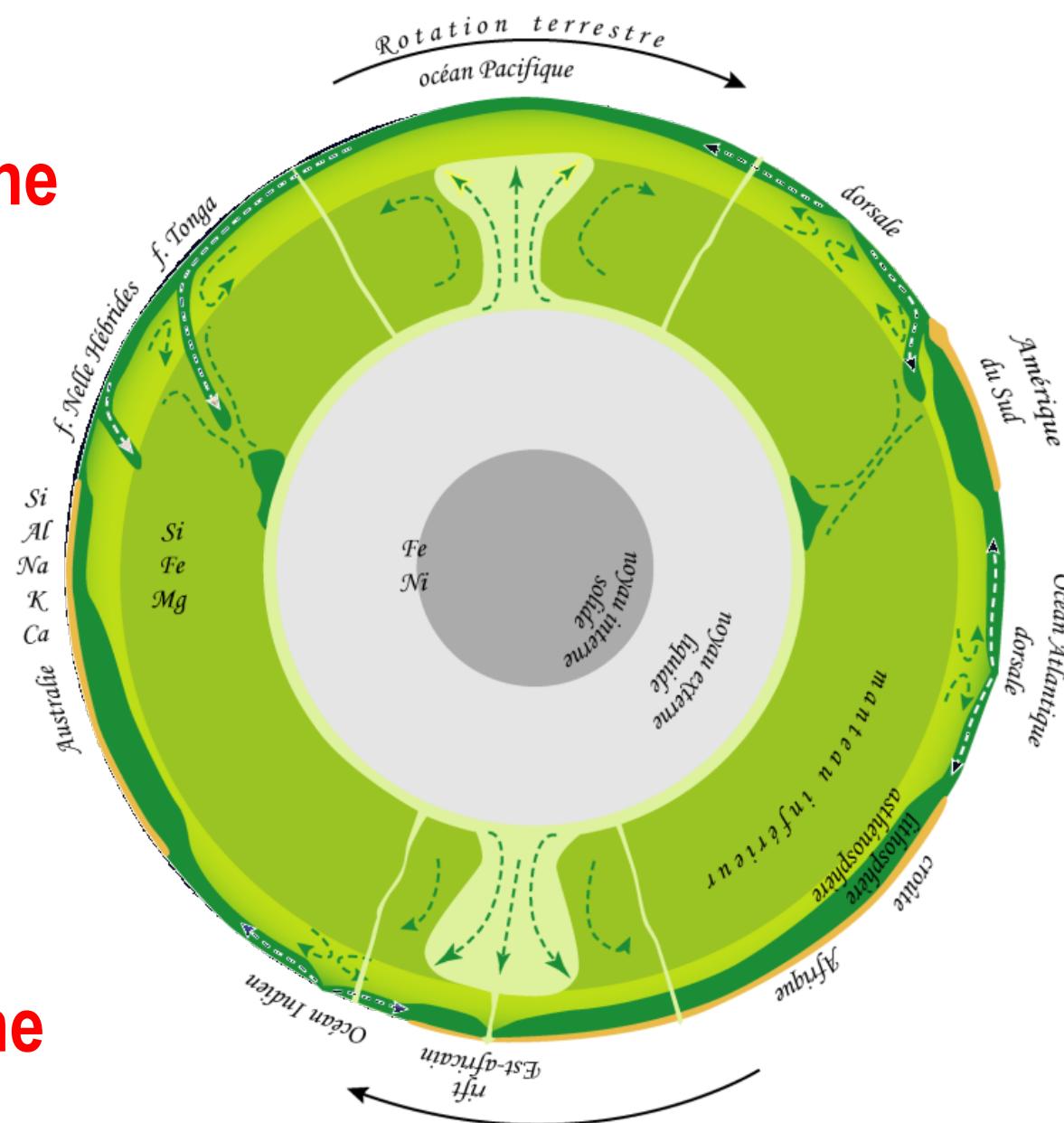
VANDERHAEGHE Olivier
olivier.vanderhaeghe@get.omp.eu

Illustrer la Science, Mardi 10 Juin 2025



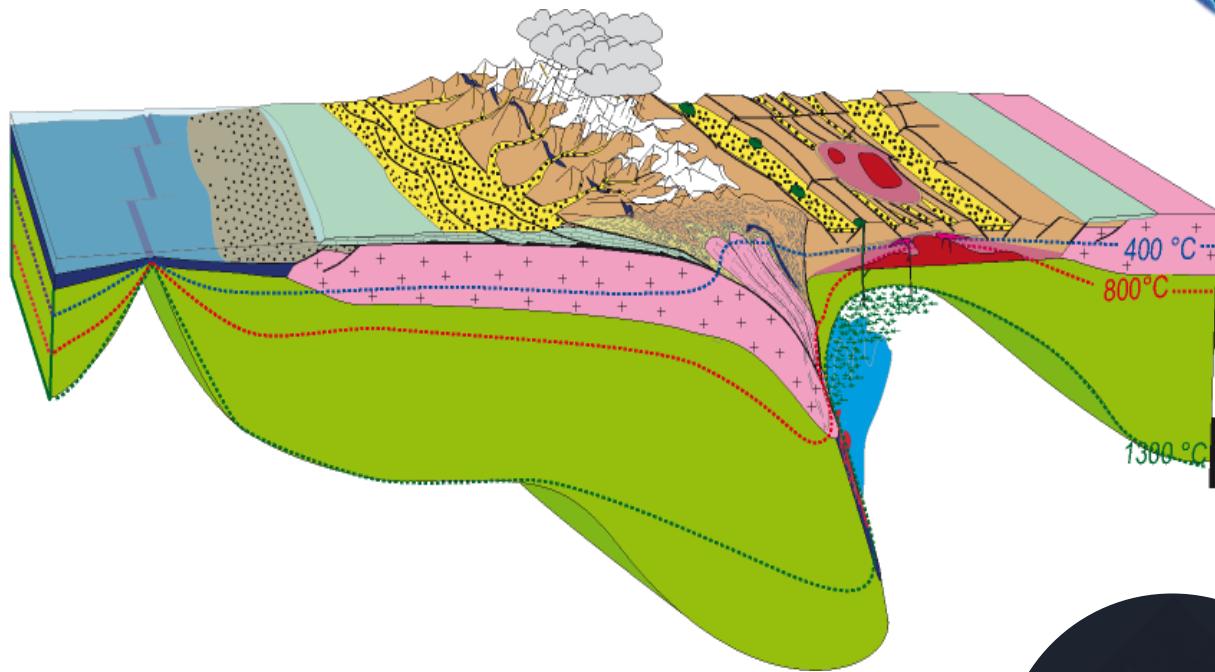
Géosciences

Terre externe

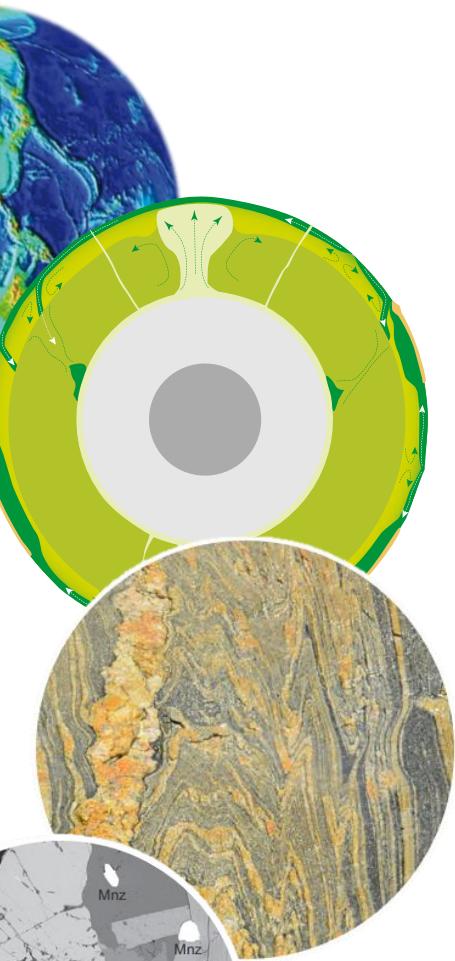
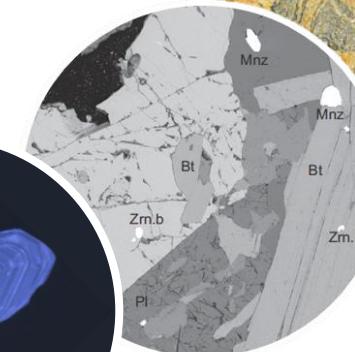
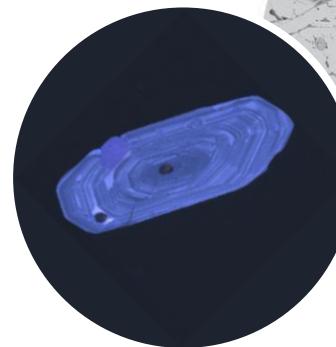


Terre interne

De la lithosphère ...



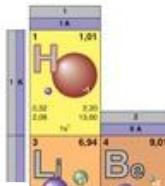
... au minéral



Roches



Eléments chimiques



Minéraux

Granite



Granite

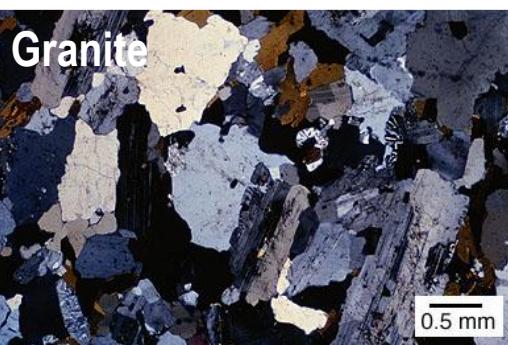
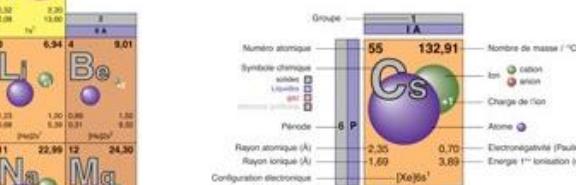


TABLEAU PÉRIODIQUE
rayon atomique - électronégativité



Métalloïde :
 - métalloïde
 - métalloïde semi-métal
 - métalloïde diamanté

Non métalloïde :
 - non métalloïde
 - non métalloïde semi-métal
 - gaz rares
 - halogène



Contexte de la Transition Energétique-Ecologique

Pressions:

- Développement du mode de vie occidental
- Augmentation de la population mondiale
- Raréfaction des ressources du sous-sol
- Pollution de l'environnement
- Changement climatique
- Mise en péril de la biodiversité

Enjeux:

- Préservation de l'habitabilité de la planète
- Réponse équitable aux besoins humains

« Retrouver les liens entre le monde où l'on vit et le monde dont on vit » (Latour, 2017)

Penser global, agir local
Planète-territoire !





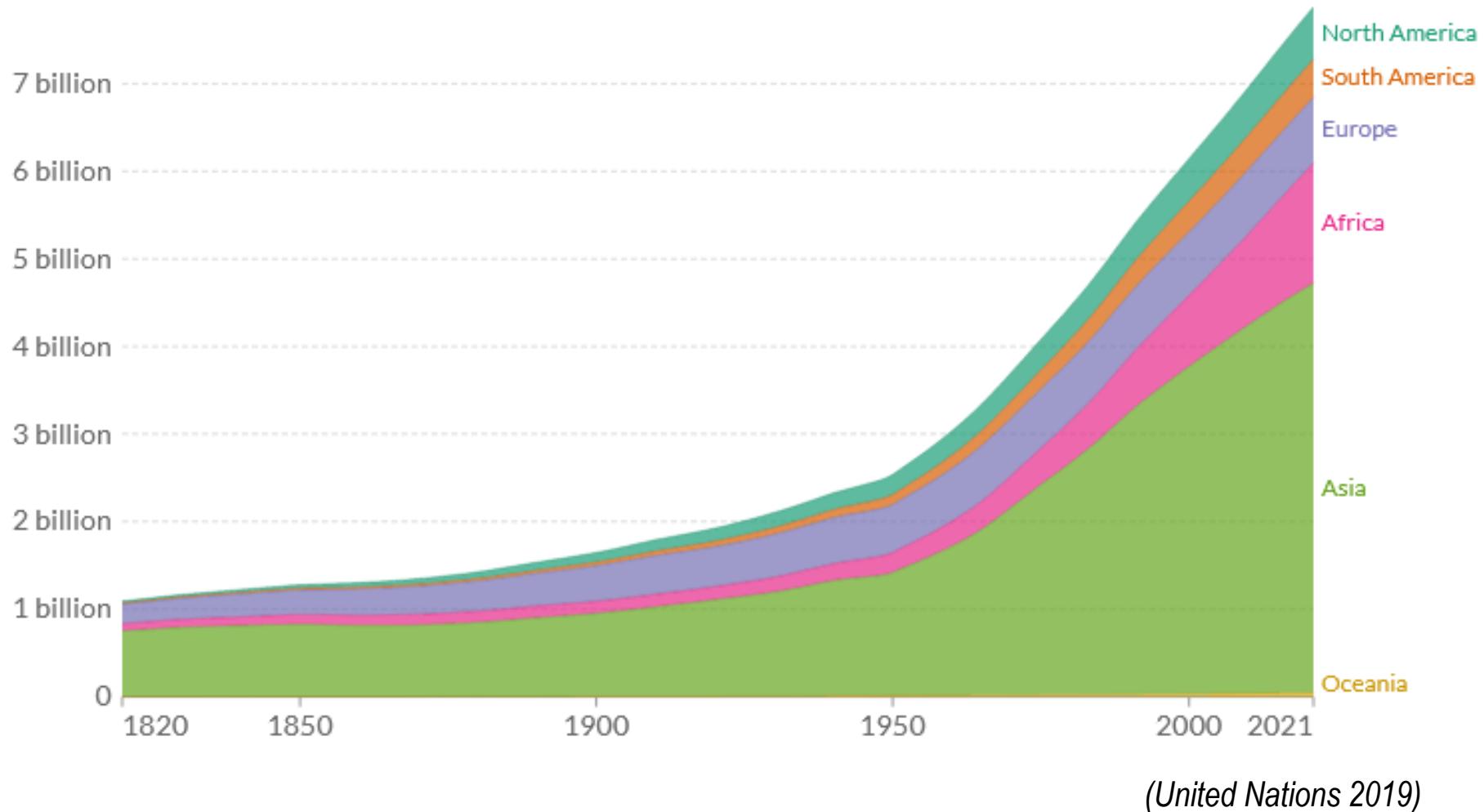
Throwaway Living

DISPOSABLE ITEMS CUT DOWN HOUSEHOLD CHORES

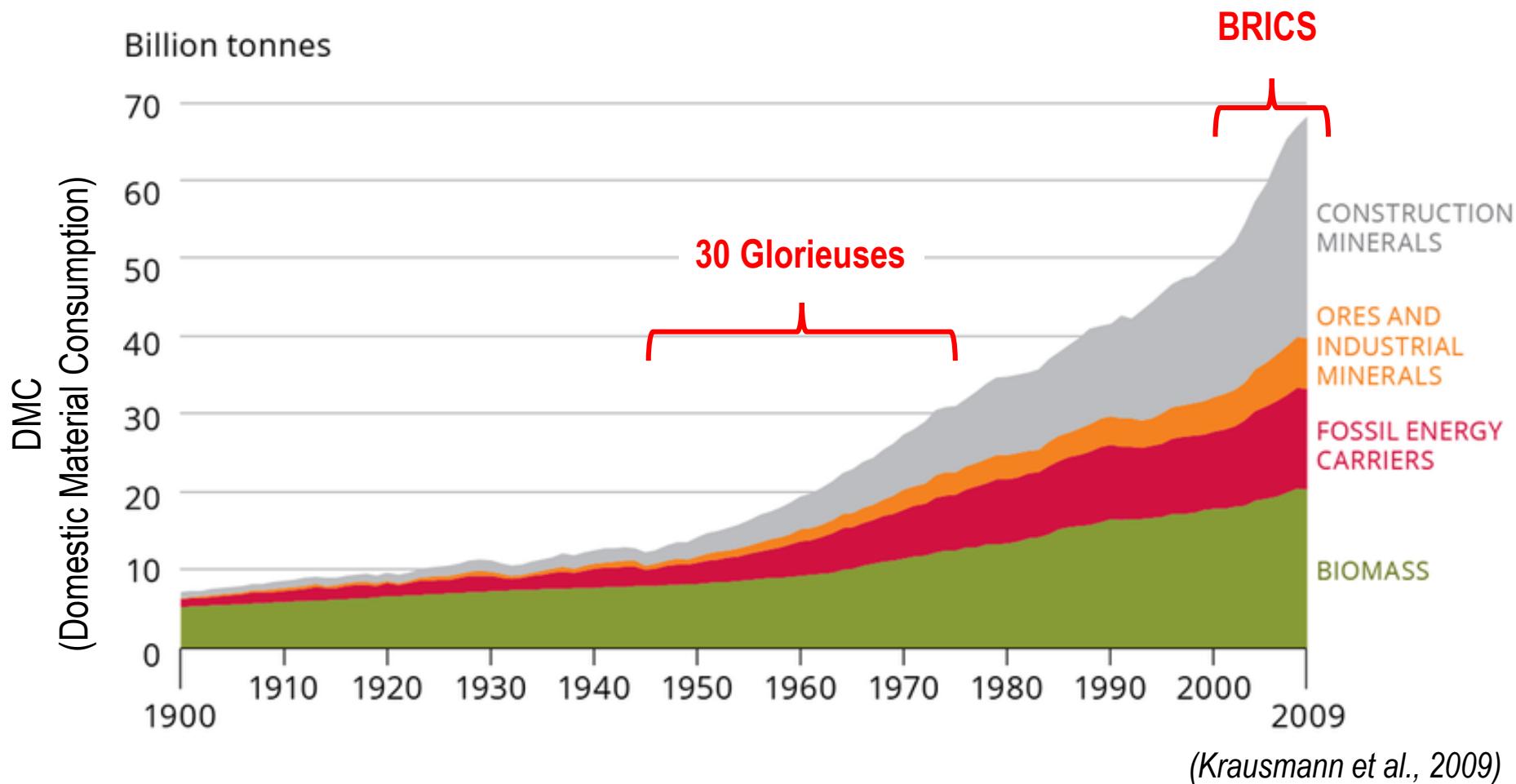




Démographie : Population mondiale x3 depuis 1950

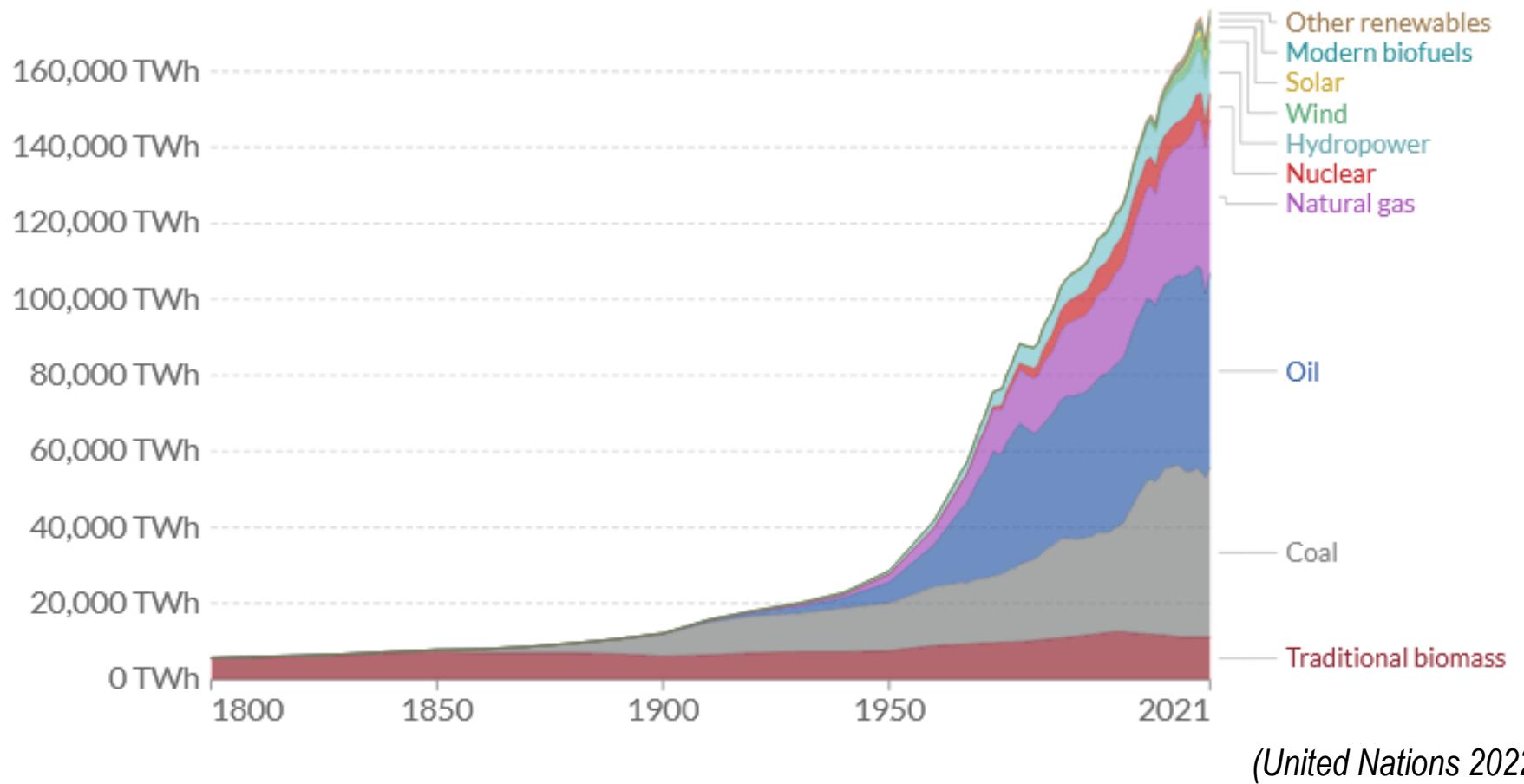


Matières premières: Consommation x7 depuis 1950



De la société du végétal à la société du minéral

Energie: Consommation x7 depuis 1950



Sans transition : une nouvelle histoire de l'énergie
(Fressoz, 2024)

Energie :

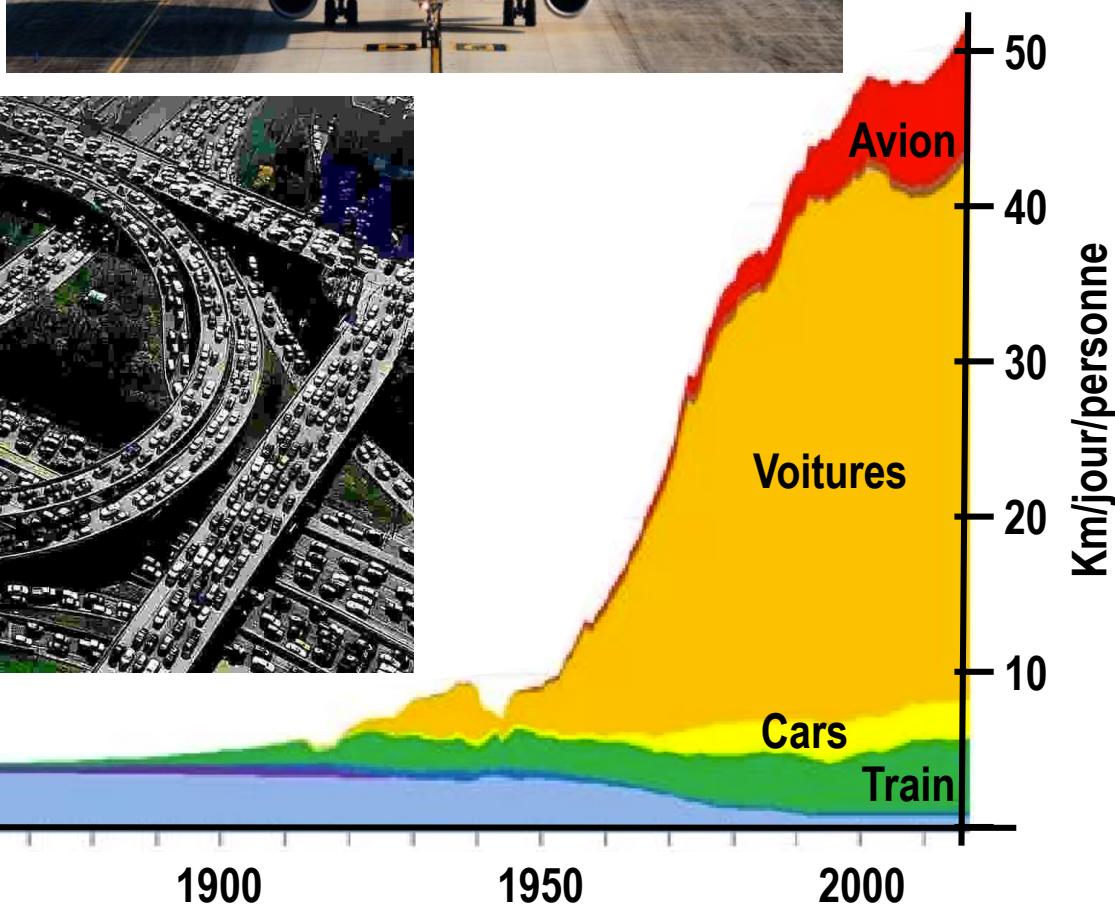
- Transport
- Industrie
- Habitat
- Agriculture

Plus vite, plus loin (pas moins!)

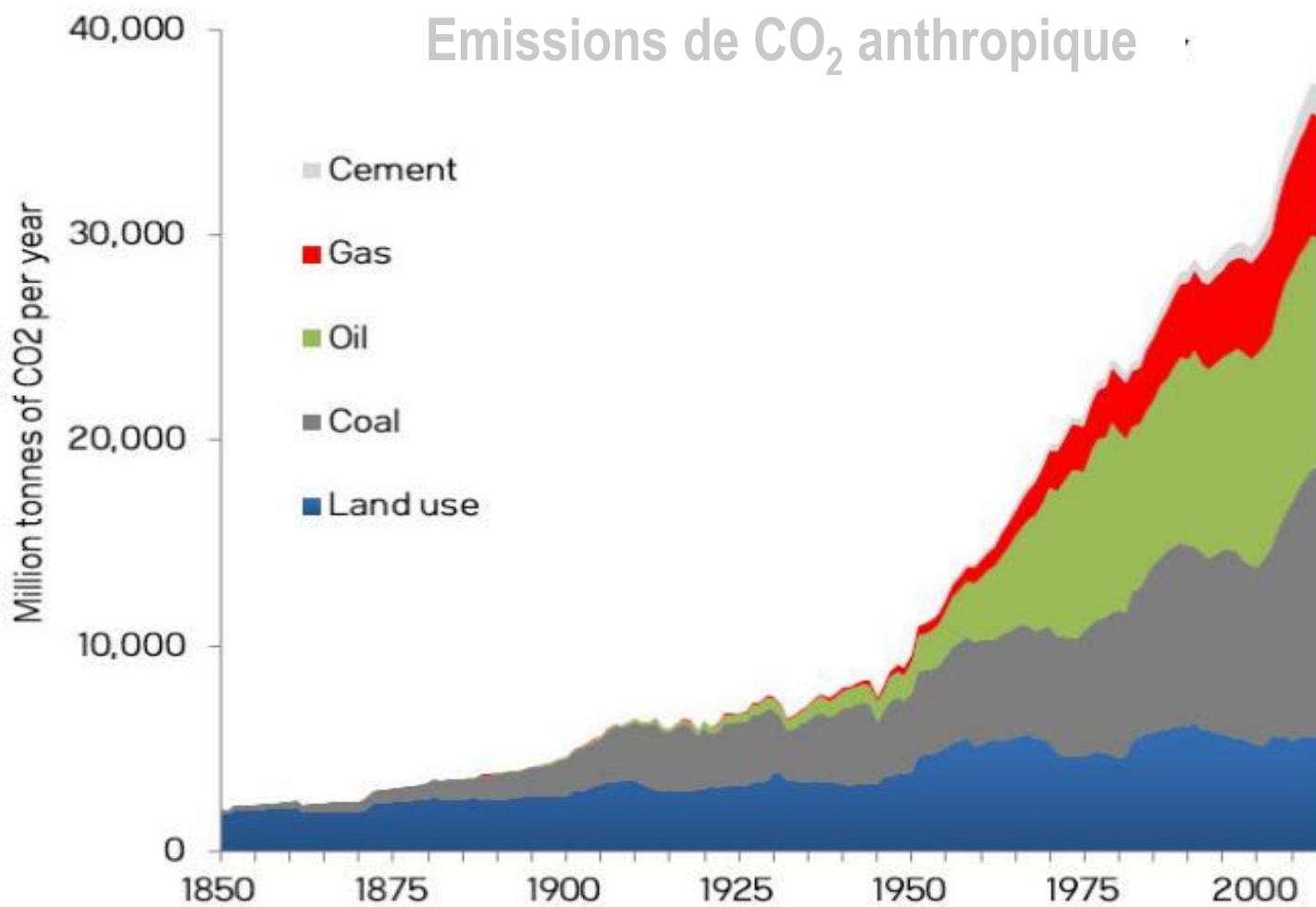


(Bigot, 2017)

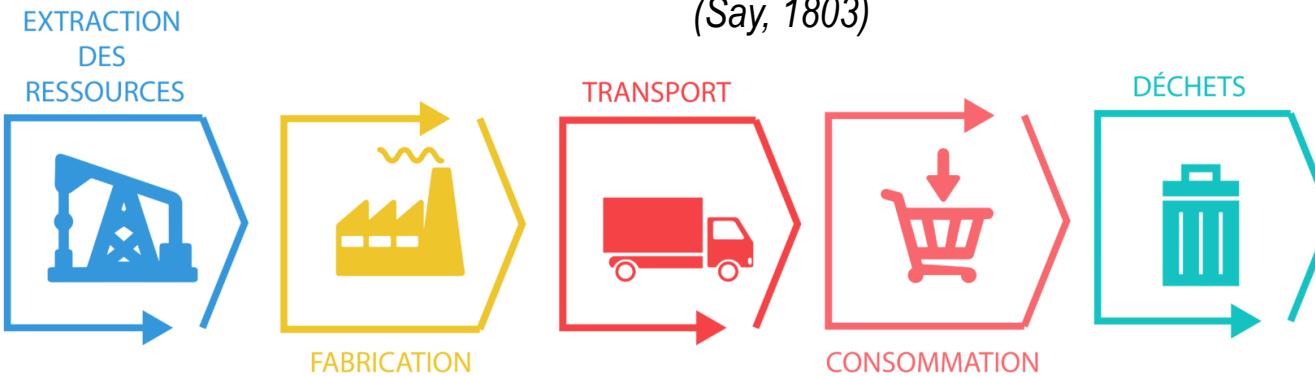
Marche à pied



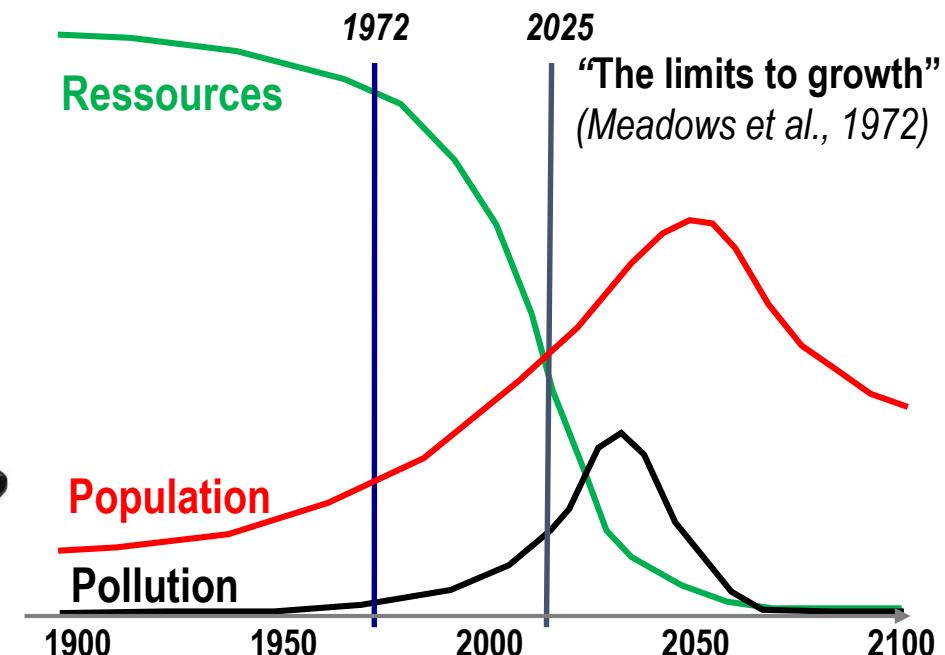
Gas à effet de serre: Emissions de CO₂ x4 depuis 1950



Economie linéaire



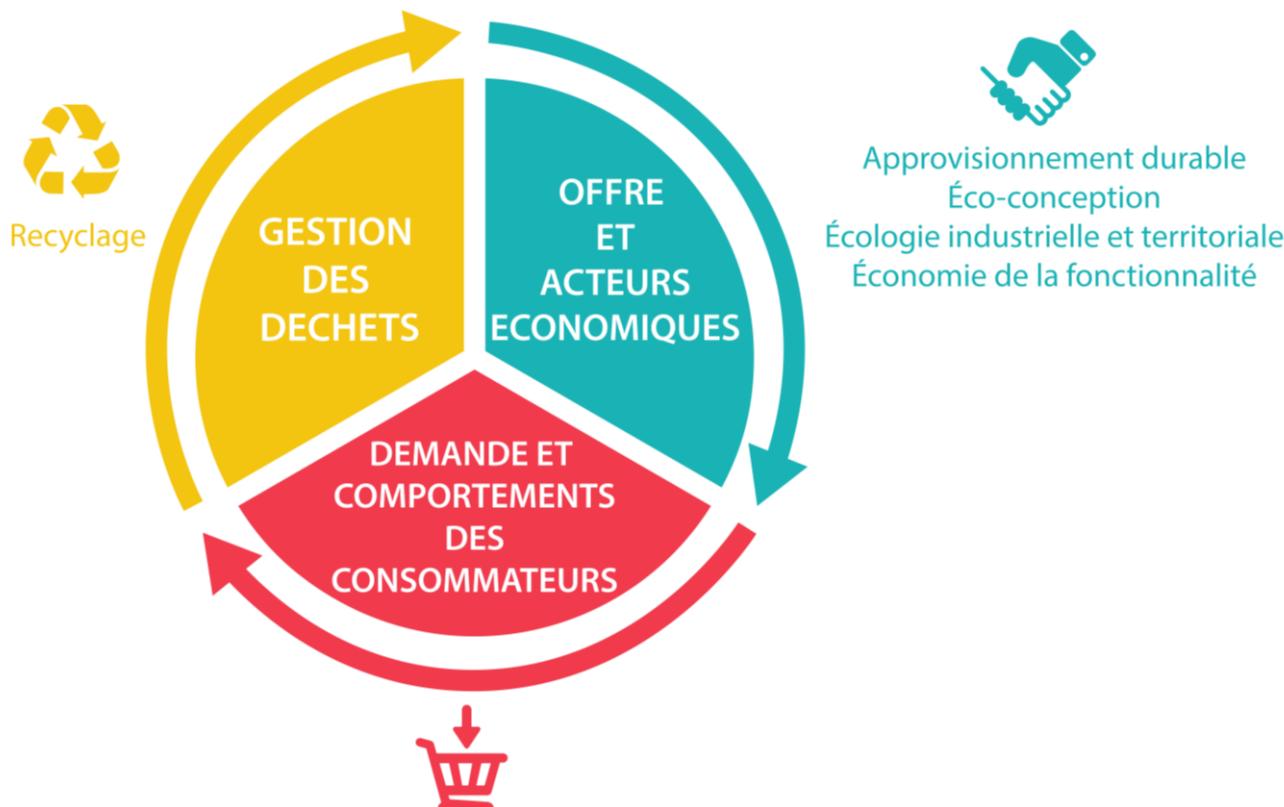
"Only one Earth"
(Ward & Dubos, 1972)



« The existing type of "linear economy", which runs from mines to dumps, cannot go on forever, [...] transition into a **small, closed, limited, planetary society**, dependant on solar energy, and it will have to **recycle** all its materials into a **circular economy**, in which the dumps become the mines. »
(Boulding, 1972)

Economie circulaire

« Dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter ».
(Loi de transition énergétique pour une croissance verte, 2015)



Mondialisation - dématérialisation ?
Croissance “verte” ?

C'est quoi l'énergie ?

Energie = Puissance x temps

$$E = P \times t$$

$$(Wh) (W) (h)$$

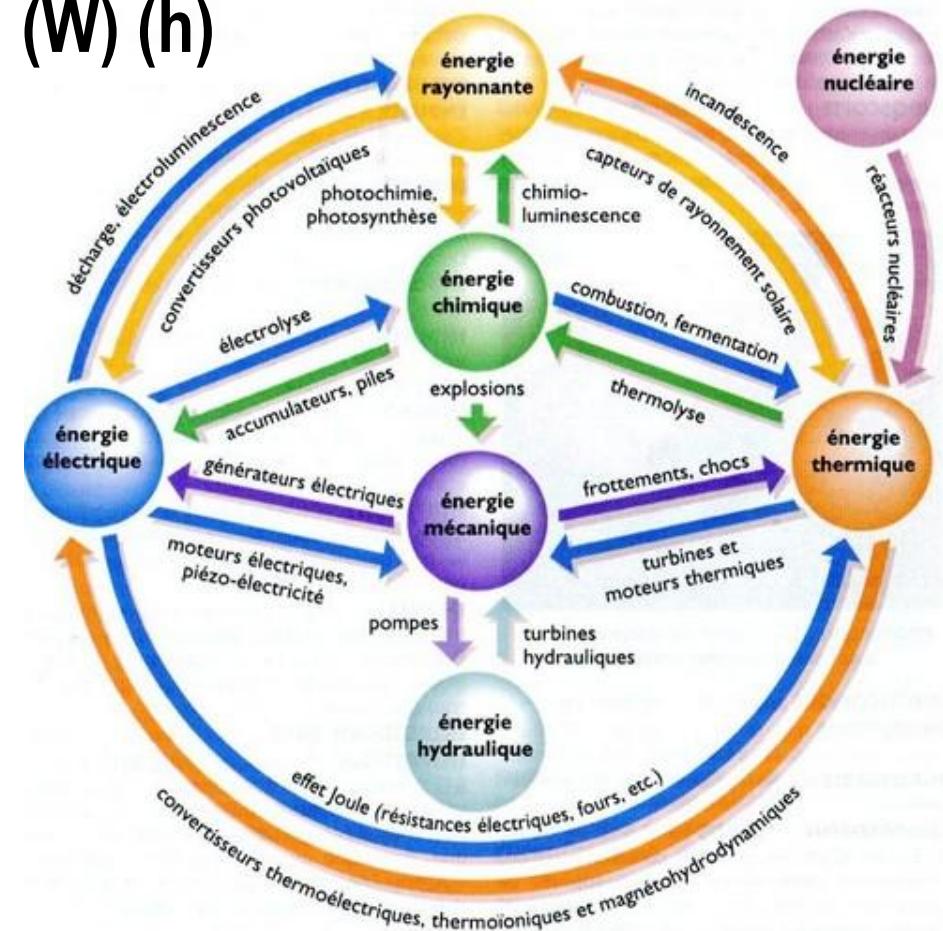
$$E = mc^2$$

Energie libre:

- Cinétique
- Thermique
- Electrique
- Rayonnante

Energie stockée:

- Potentielle
- Chimique
- Radioactive

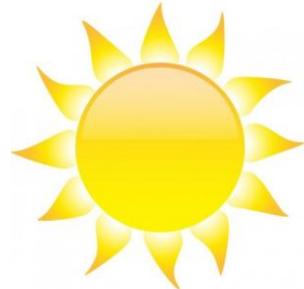


Energie primaire

Renouvelable « décarbonée »

Inépuisable ?

Soleil
(rayonnante)



Hydraulique
(cinétique)



Vent
(cinétique)



Géothermie
(thermique)



Biomasse
(thermique)



Pétrole, gaz, charbon
(thermique)



Renouvelable-carbonee

Fossiles (carbonée)

Nucléaire
(thermique)



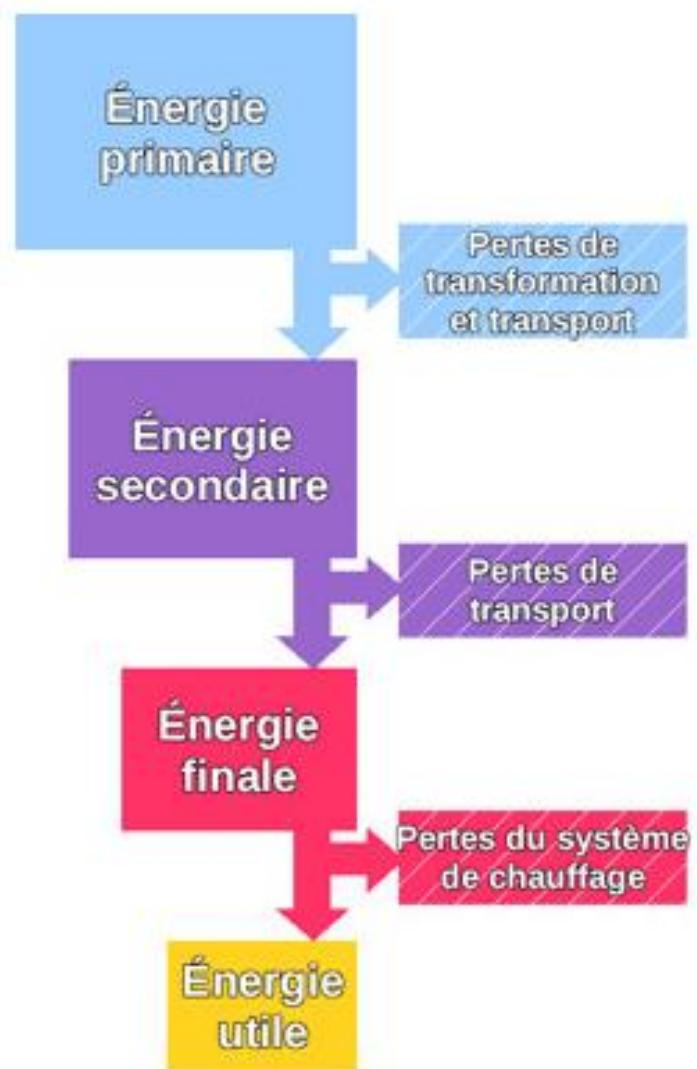
Décarbonée

Energie primaire :
énergie brute

Energie secondaire :
énergie primaire transformée
avant transport

Energie finale :
énergie livrée à l'utilisateur
avant consommation

Energie utile :
énergie finale dont bénéficie
l'utilisateur



Consommation d'énergie finale annuelle en France:
2,2 MWh/habitant

Acteurs du cycle de l'énergie

Décideurs politiques

Industriels

LA PRODUCTION

Activités en concurrence

Differentes sources d'énergie (nucléaire, thermique, énergies renouvelables tels l'hydraulique, l'éolien ou le solaire).



LE TRANSPORT

RTE

À l'échelle nationale, il est assuré en 400 000 volts, à l'échelle régionale, en 225 000, 90 000 et 63 000 volts.

Rte

LA DISTRIBUTION

Enedis

L'électricité est distribuée via deux niveaux de tension : la haute tension A (HTA 20 000 volts) et la basse tension (BT de 400 volts à 230 volts). Enedis en assure l'exploitation, le développement et l'entretien.

enedis



Industriels

LA FOURNITURE D'ÉLECTRICITÉ

Activités en concurrence

Ouverte totalement à la concurrence depuis le 1^{er} juillet 2007



Privé

Public

Associations

Industriels

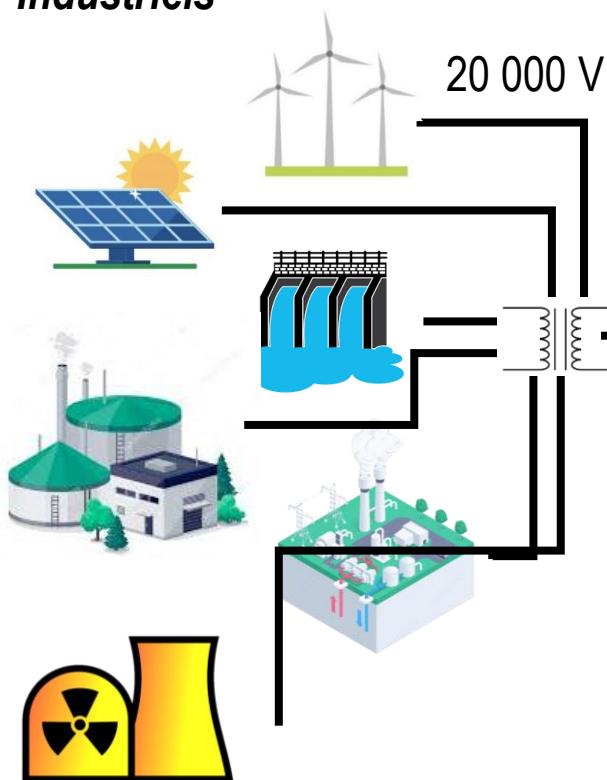
Consommateurs

Privé

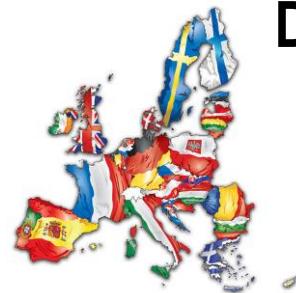
Acteurs du cycle de l'énergie

Décideurs politiques

Production
Transformation
Industriels

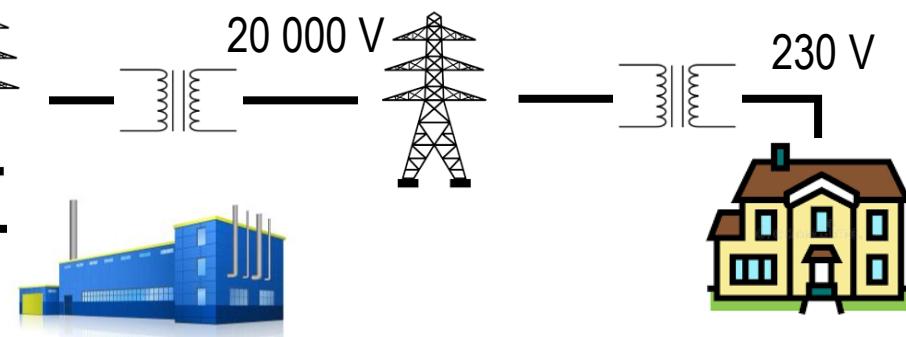


Transport
Haute tension



Distribution

Basse tension
ENEDIS



Industriels

Public

Fourniture
Fournisseurs



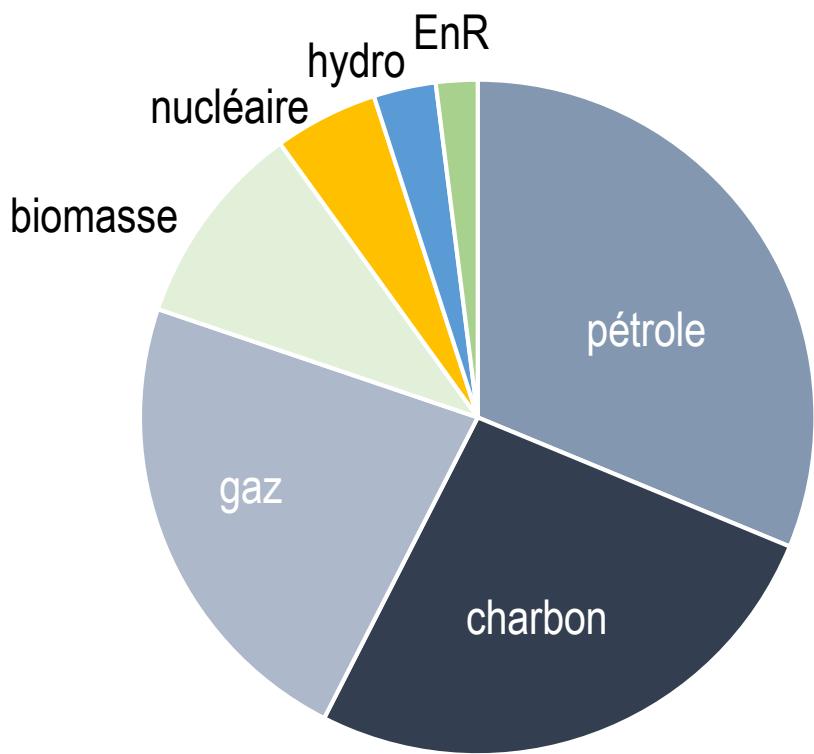
Associations
Consommateurs
Privé

Energie primaire dans le Monde (2018)

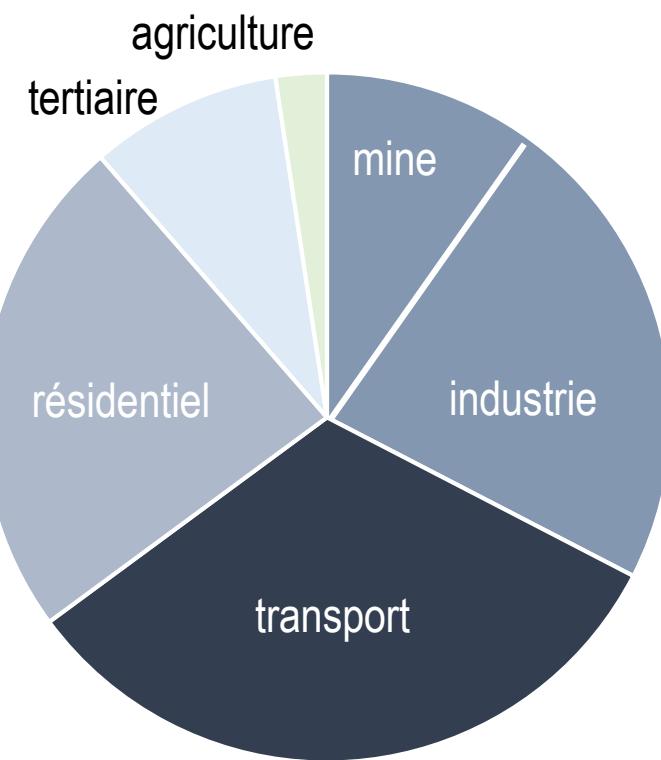
Consommation : 166 000 TWh

(BP Statistical Review of World Energy; gouv.fr)

Types



Secteurs



- Flux de chaleur terrestre : 47 TW (410 000 TWh)
 - Rayonnement solaire : 170 000 TW (745 000 000 TWh)
- (Archer, 2012; Davies & Davies, 2010)

$$\text{Energie} = \text{Puissance} \times \text{temps}$$

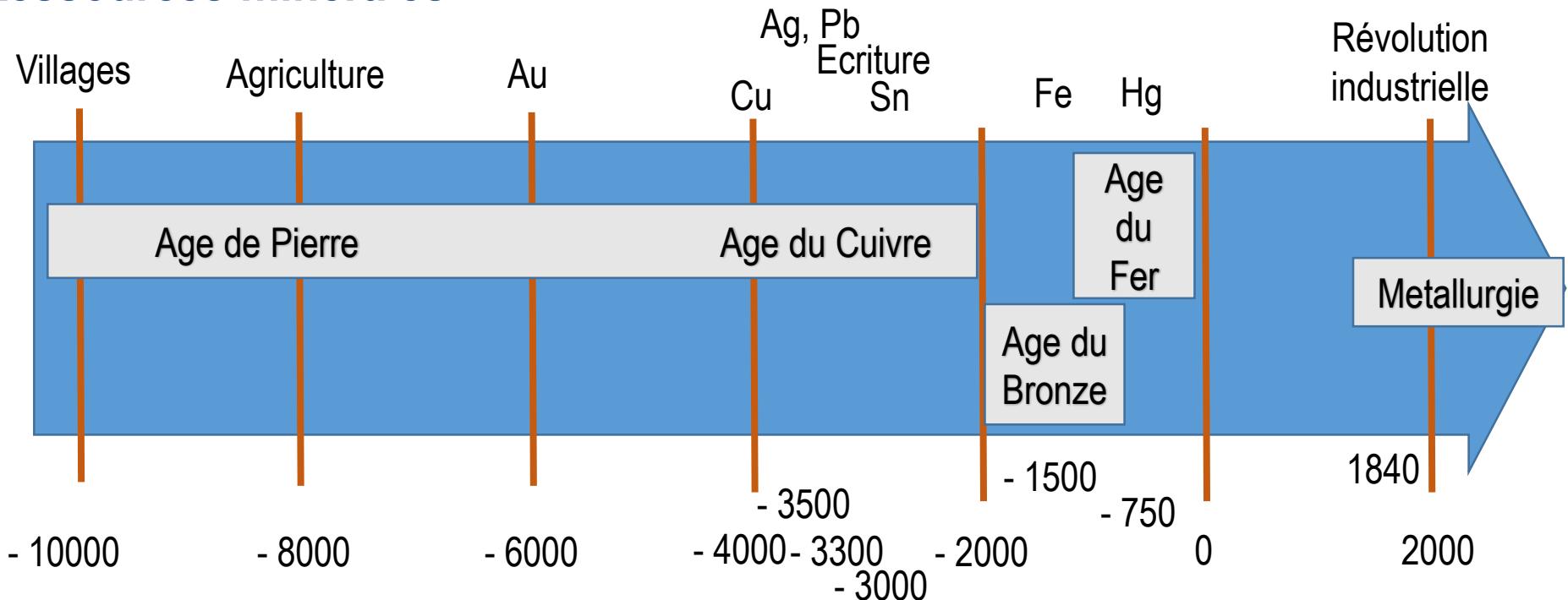
(Wh)	(W)	(h)
------	-----	-----

Rendements énergétiques

Puissance: Capacité installée = 10 MW
(Energie = Puissance x 365 jours x 24h)

	Photovoltaïque	Eolien	Hydroélectrique	Géothermie	Nucléaire
Rendement (%)	10-25	30-50	70-90	15	35
En France (RTE)					
Facteur de charge (%)	15	20	25	95	95
Production Energie (MWh)	13 140	17 520	21 900	83 200	83 200
Emprise surfacique (m²)	15 000	20 000	100 000	4 000	500
Production surfacique (MWh/m²)	0,9	0,9	0,2	20,8	166,4

Ressources minérales



Minéral et métaux :

- Métaux de la sidérurgie (Fe, Al, Mn, Mg)
- Métaux de base (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Sn)
- Métaux précieux (Au, Pt)

Minéraux industriels :

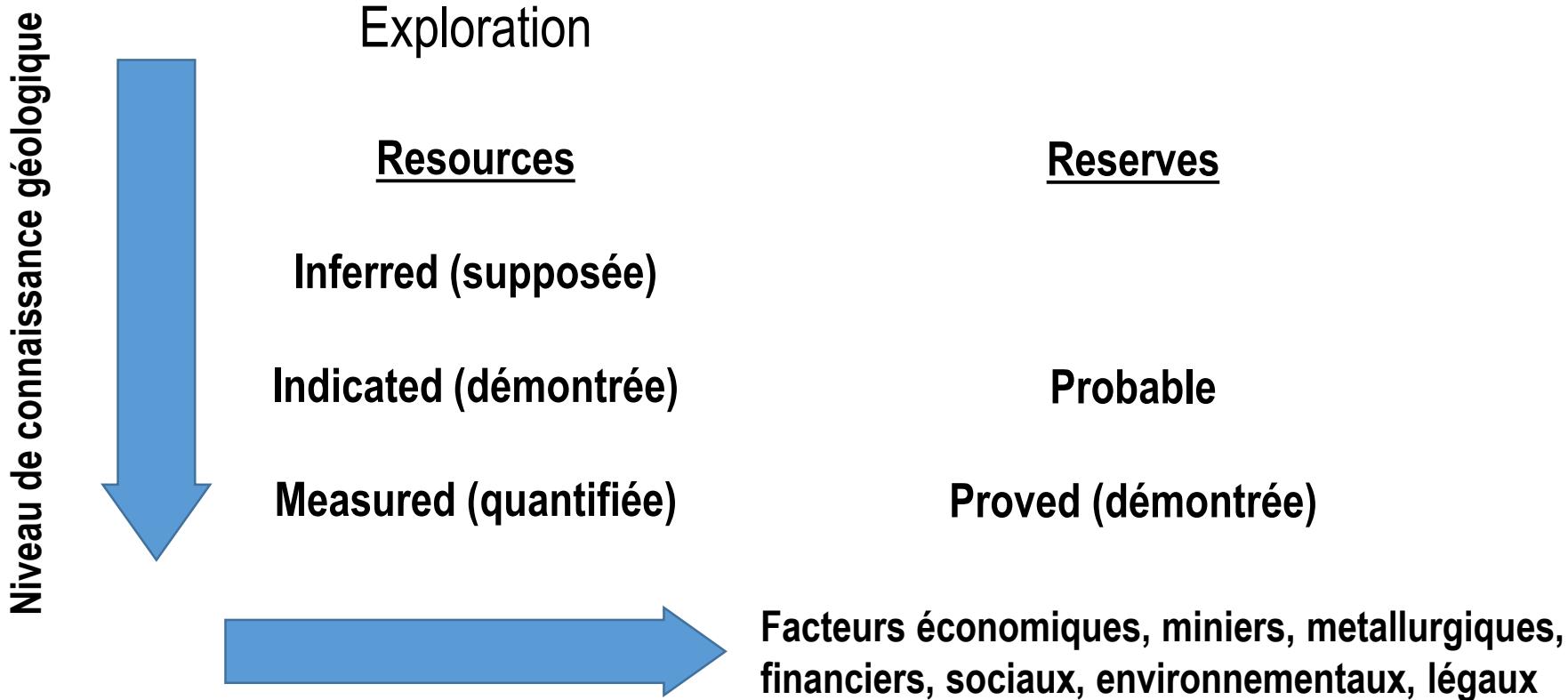
- Diamant, corindon (dureté)
- Kaolinite, talc, calcite (charge minérale)
- Mica, talc, andalousite (résistance thermique, électrique)

Matériaux de carrière :

- Pierres de construction
- Granulats, sables
- Platre : gypse déshydraté
- Ciment : calcite + argile + gypse

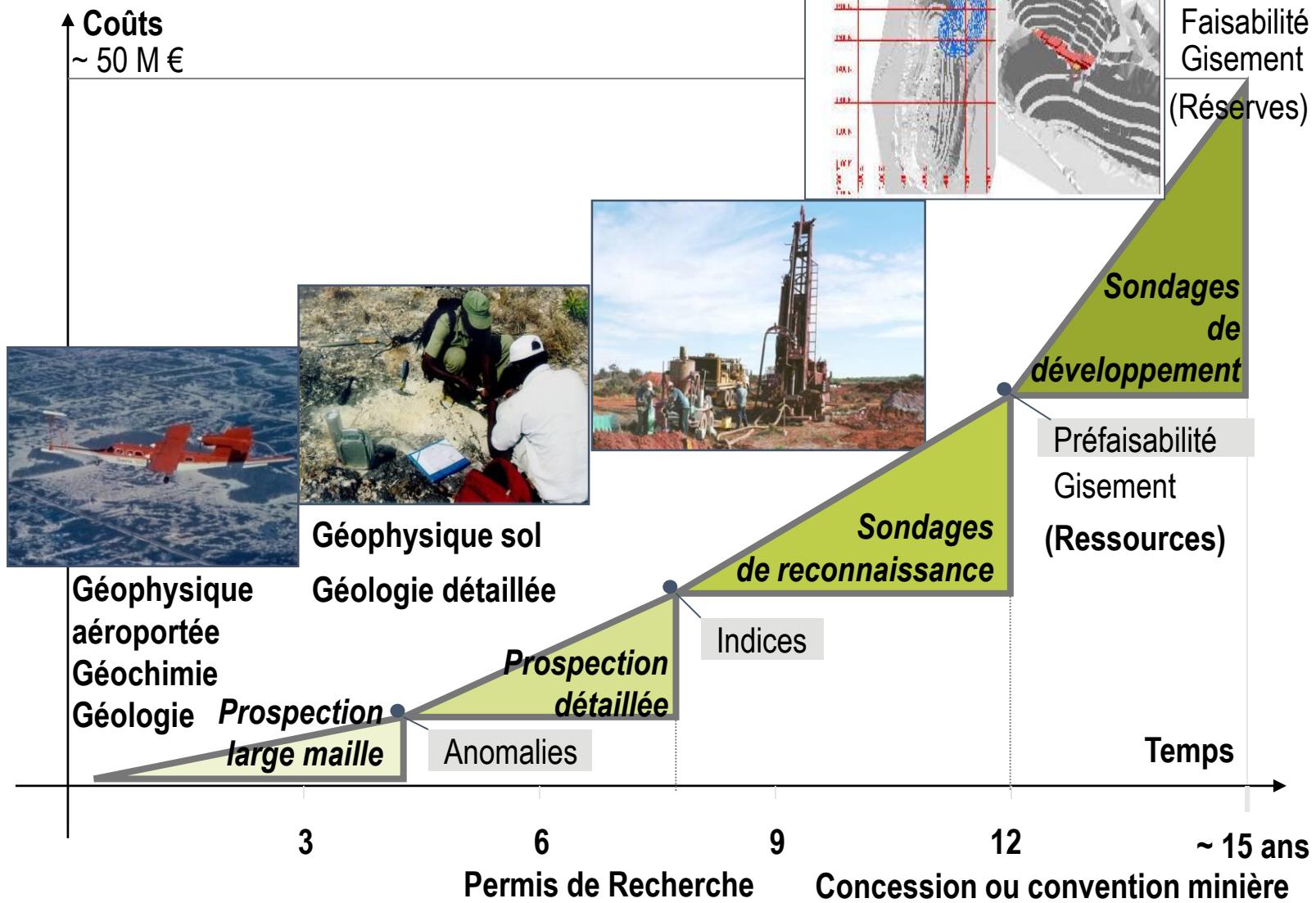
Ressources minérales

- **Minerai** : substance minérale dont on peut extraire avec profit, un ou plusieurs éléments
- **Teneur** : Proportion d'un métal ou d'un minéral industriel contenu dans un minerai
- **Gisement** : Concentration minérale exploitabile économiquement



De l'exploration à l'exploitation ...

...15 ans de recherche.

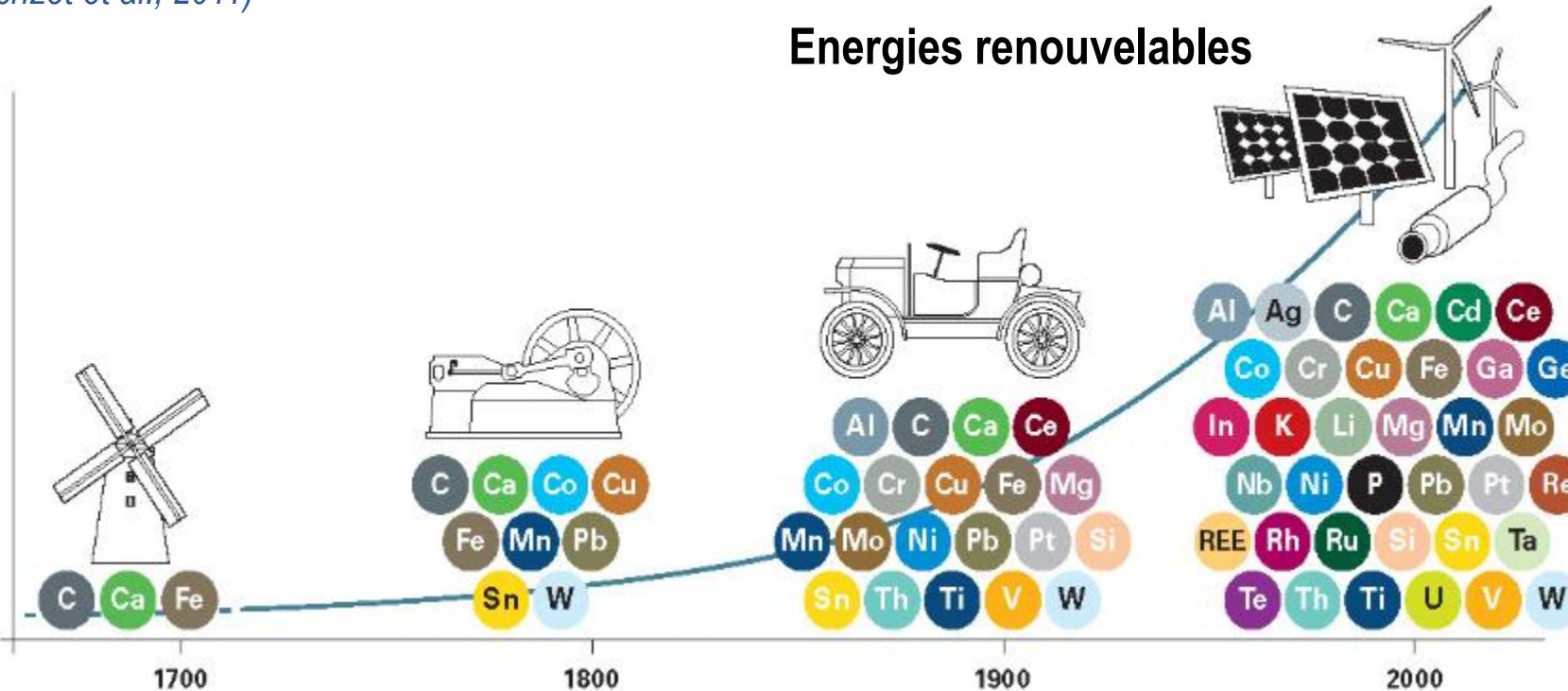


Utilisation des éléments

Diversification depuis la révolution industrielle et technologique

(Achzet et al., 2011)

Energies renouvelables



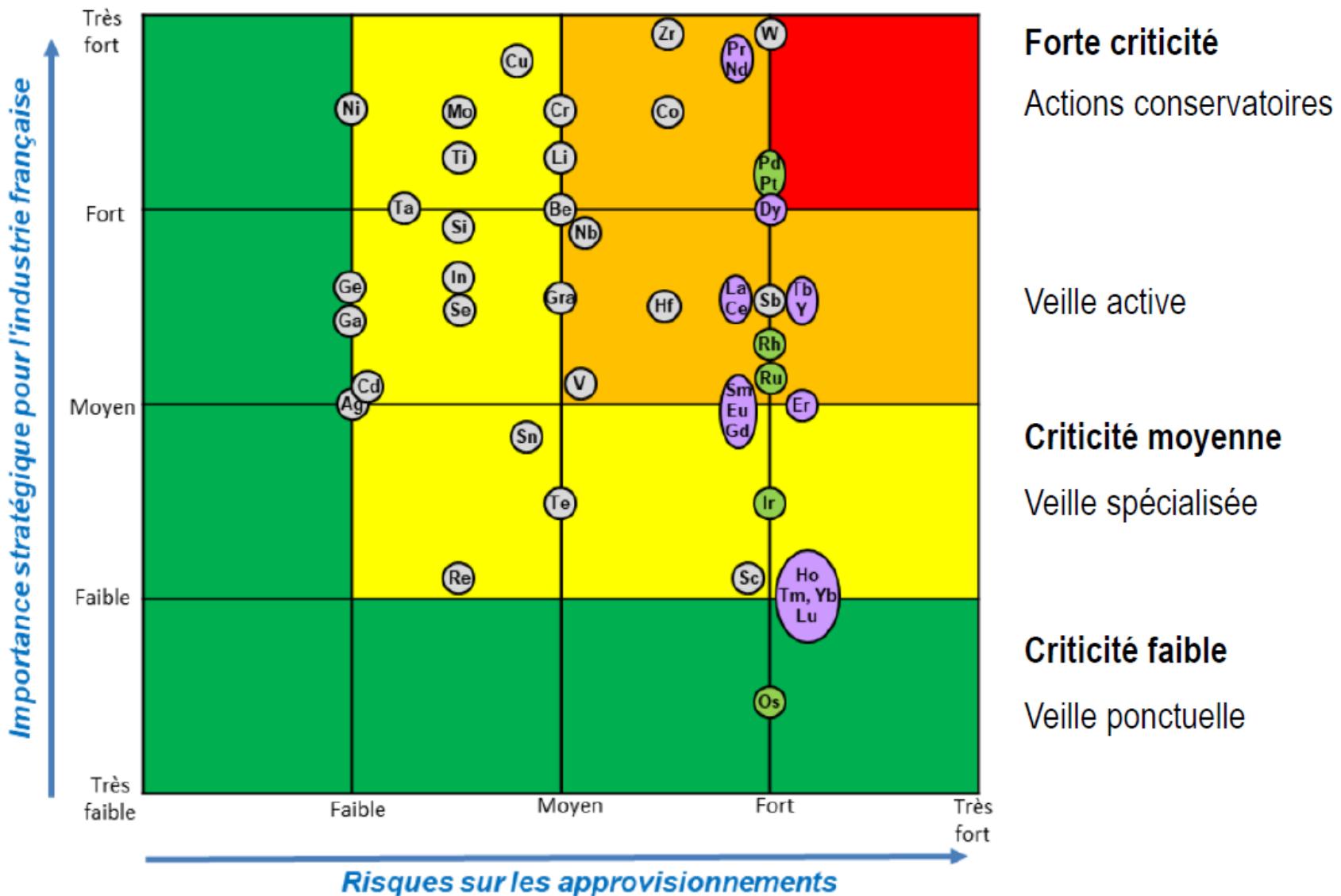
La ruée minière du XXI^e siècle

(Izoart, 2022)

Numérique, Aéronautique Armement



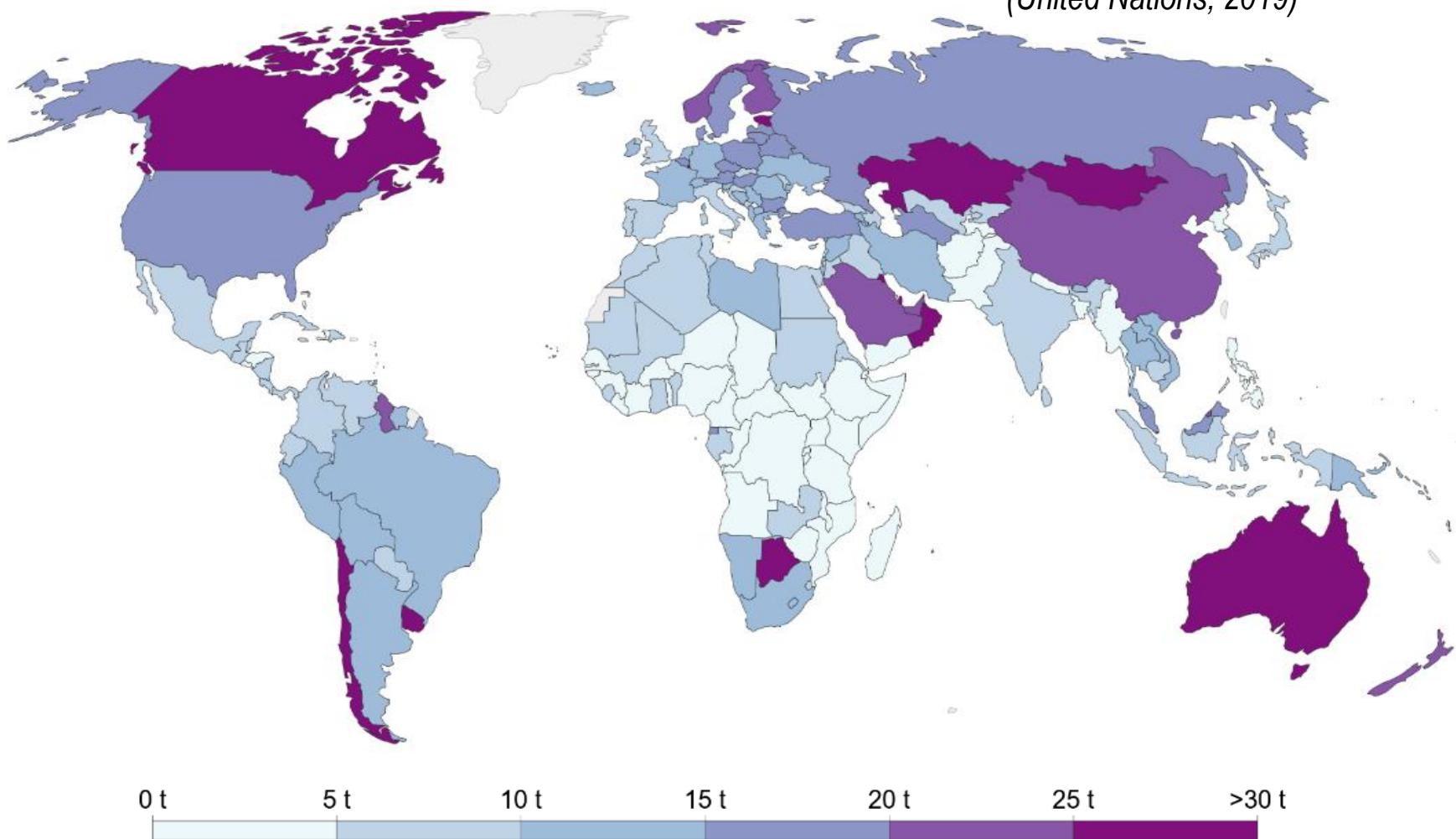
Métaux critiques



Ces bilans globaux masquent des inégalités “Nord” - “Sud”

Consommation de matières premières par habitant (2017)

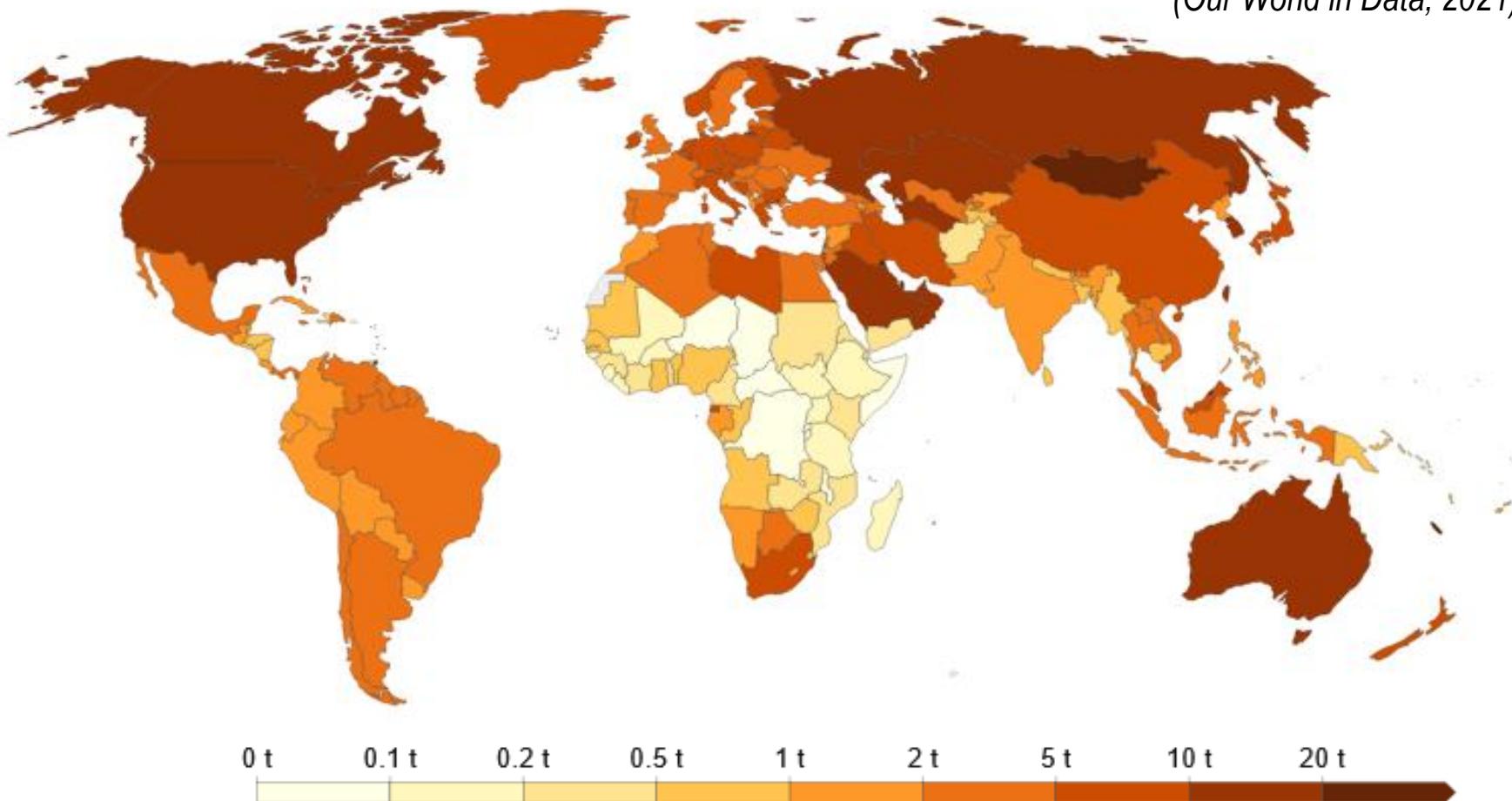
(United Nations, 2019)



Ces bilans globaux masquent des inégalités “Nord” - “Sud”

Emissions de CO₂ par habitant (2020)

(Our World in Data, 2021)

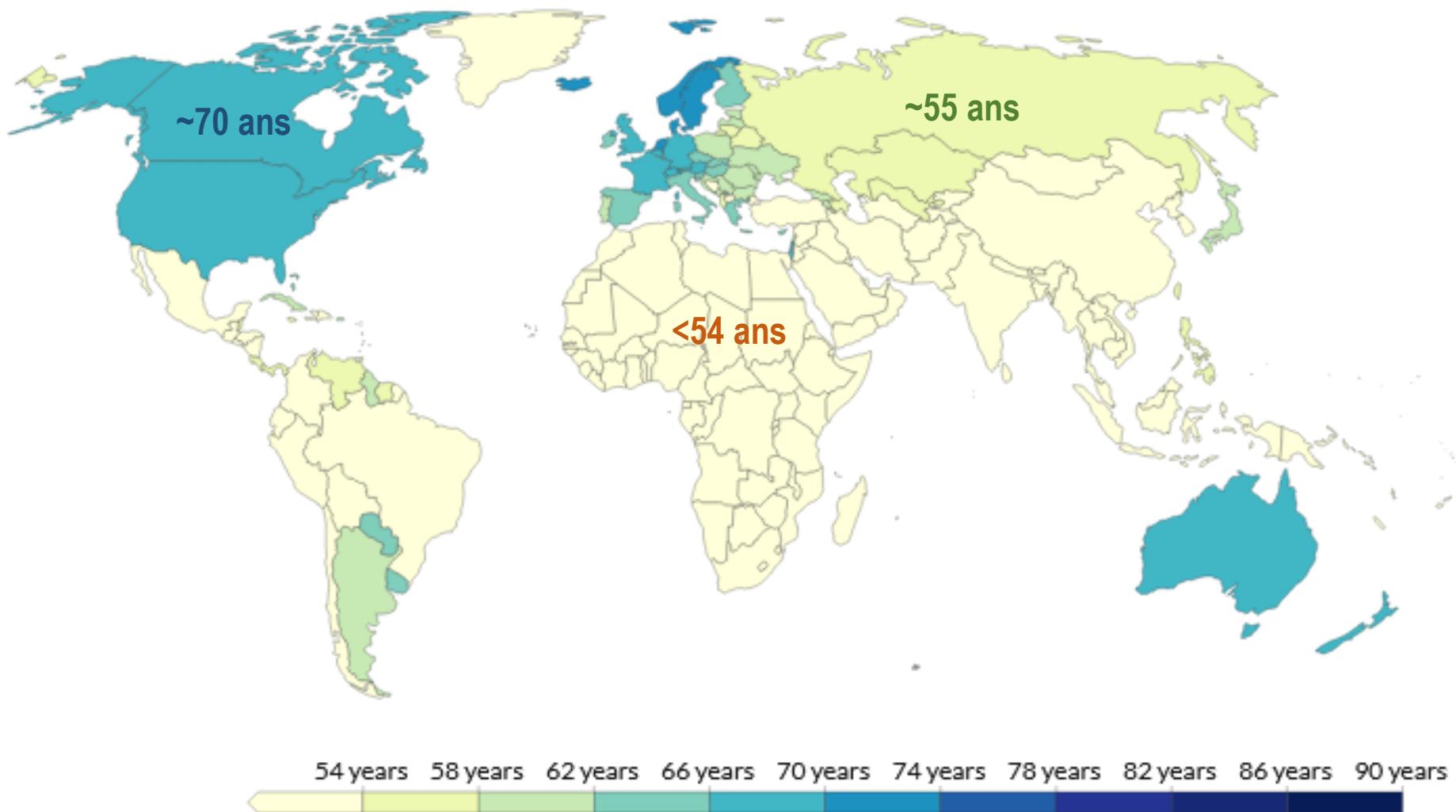


10 % de la population mondiale produit 50 % des émissions de CO₂

Ces bilans globaux masquent des inégalités “Nord” - “Sud”

Espérance de vie (2019)

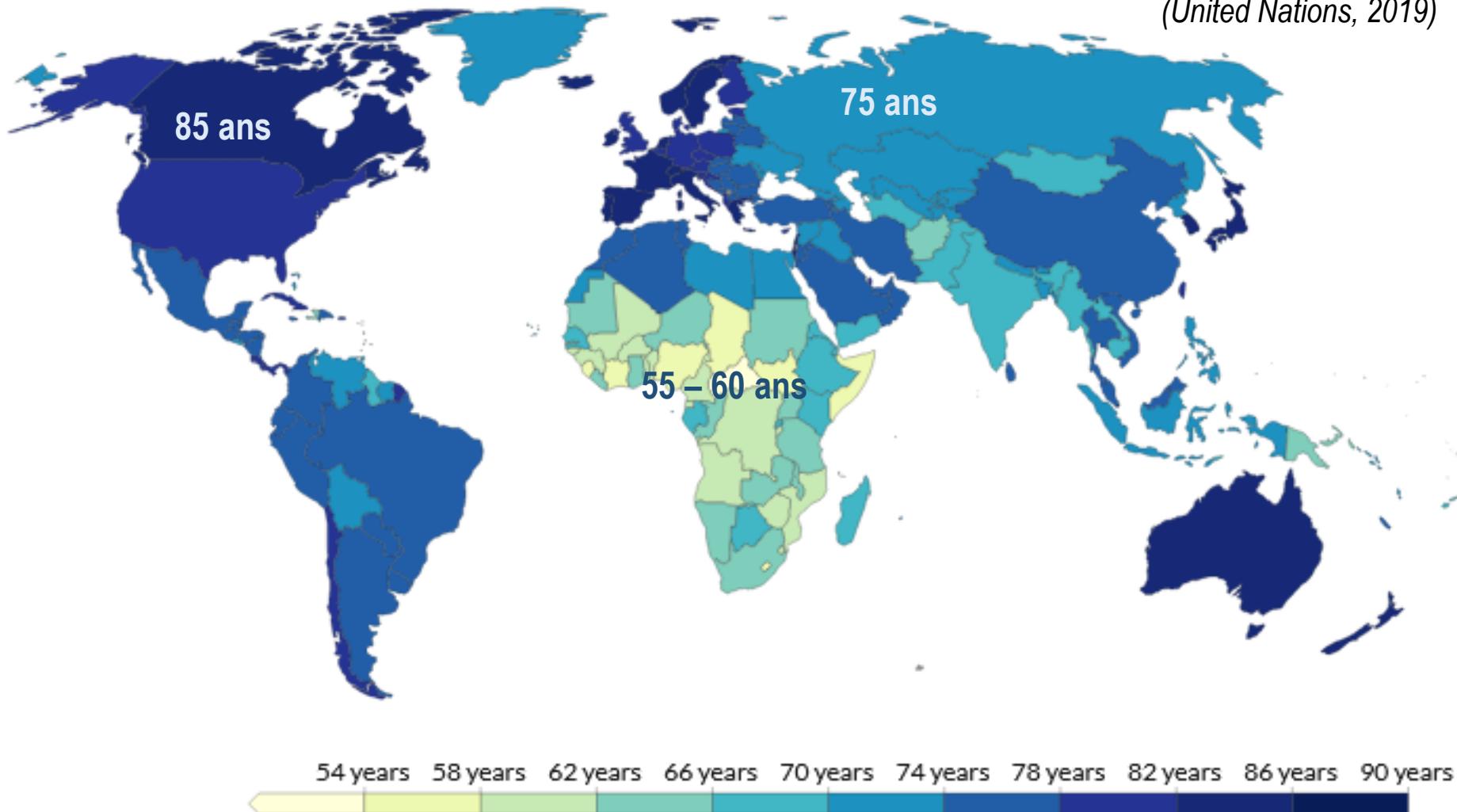
(United Nations., 2019)



Ces bilans globaux masquent des inégalités “Nord” - “Sud”

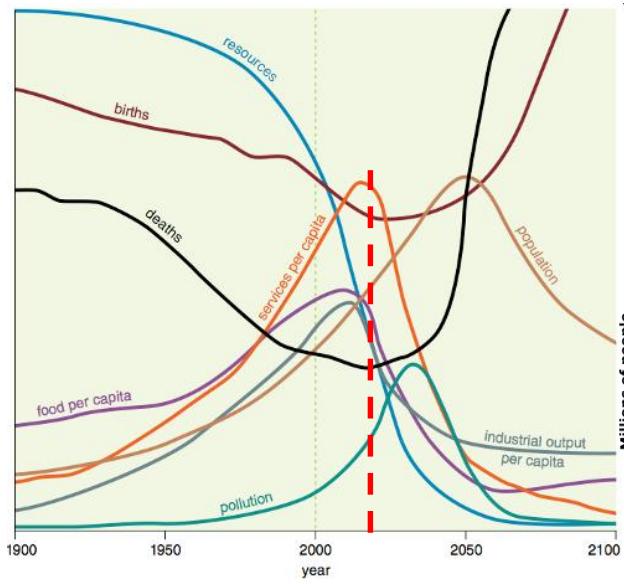
Espérance de vie (2019)

(United Nations, 2019)

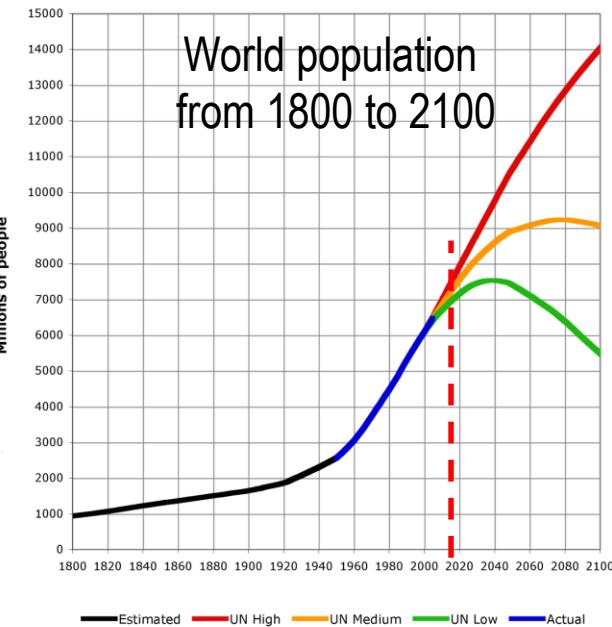


Un peu de Sciences Humaines et Sociales :

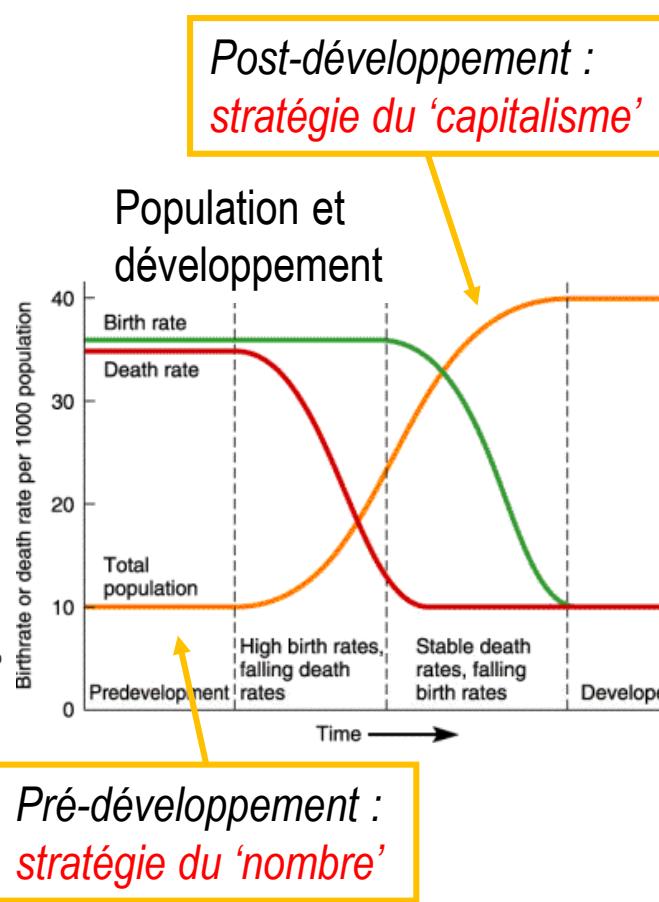
Différents scénarios pour l'évolution de la démographie mondiale



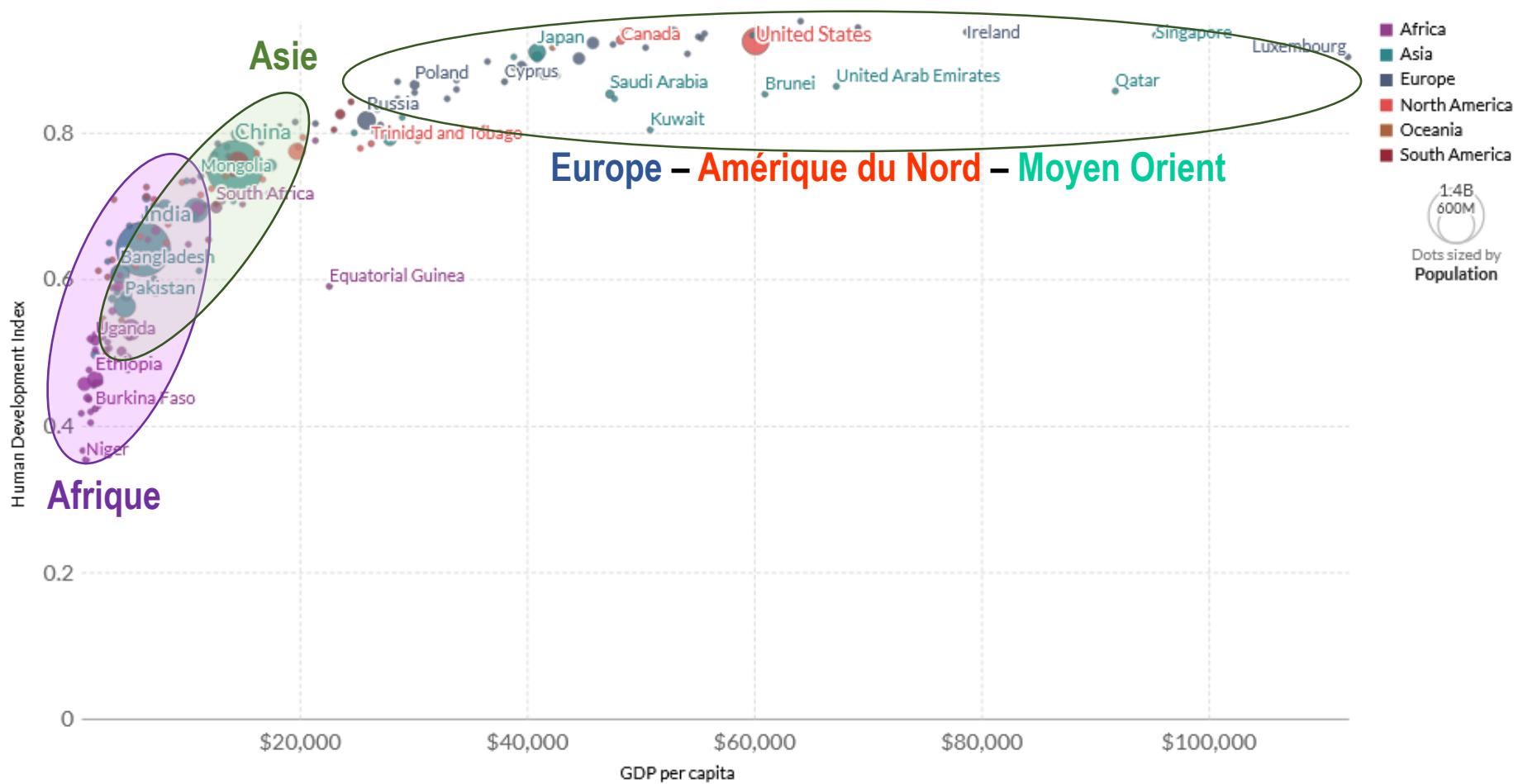
(Meadows et al., 1972)



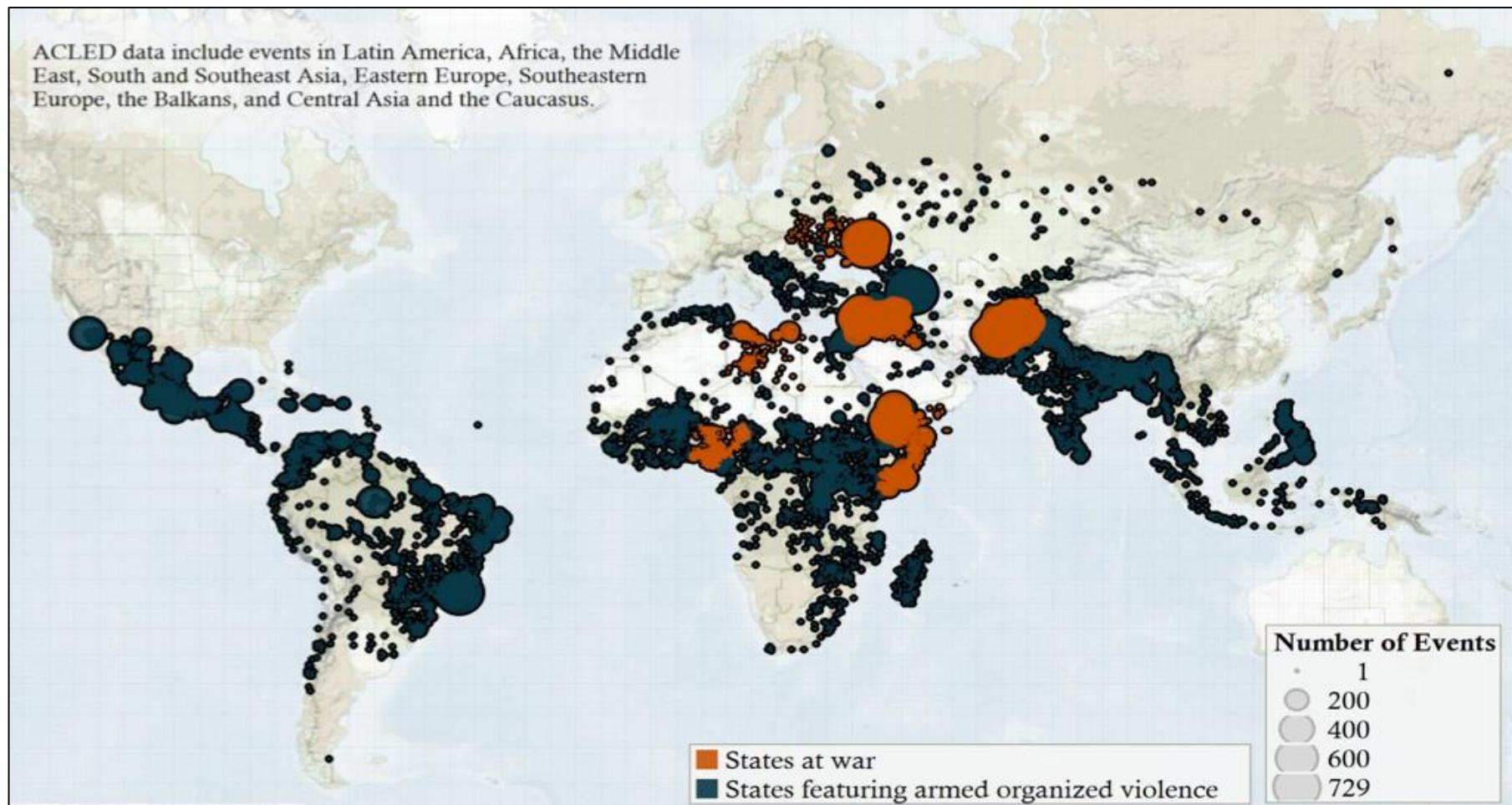
(UN 2004,
US Census Bureau
historical estimates)



Indice de développement humain en 2020 (santé, espérance de vie, éducation, conditions de vie, ...)



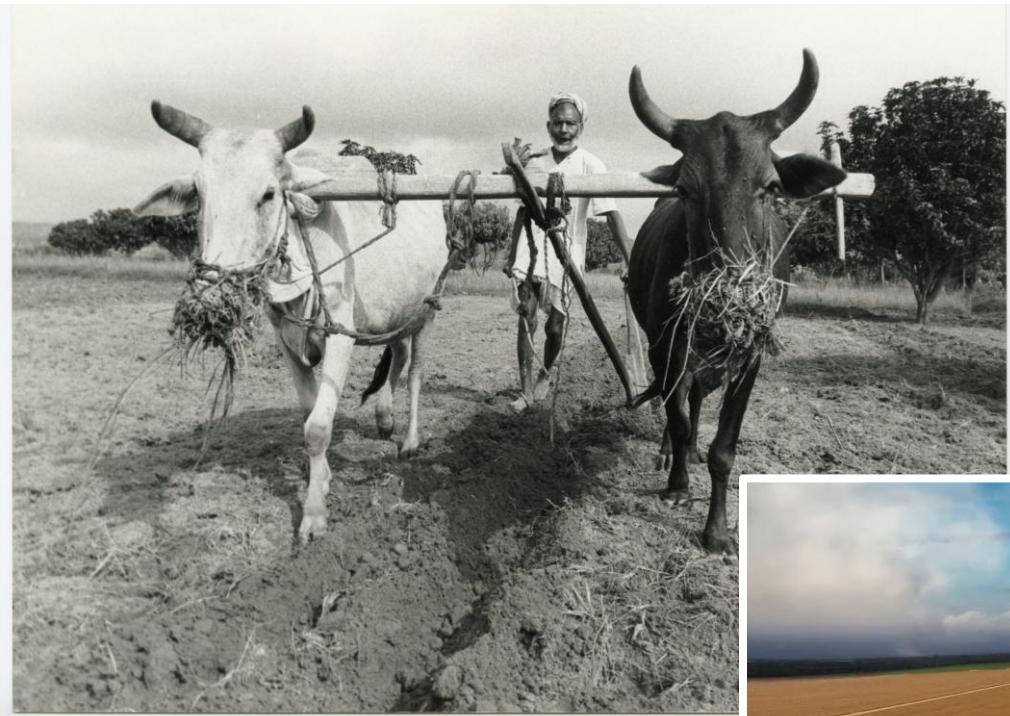
Conflits armés et pays en guerre (2018-2020)



(Armed Conflict Location & Event Data Project: <https://acleddata.com>)

Tensions internationales-nationales autour des lieux d'extraction et de transport des ressources
Perte de souveraineté des pays développés

Des boeufs ...



... aux tracteurs



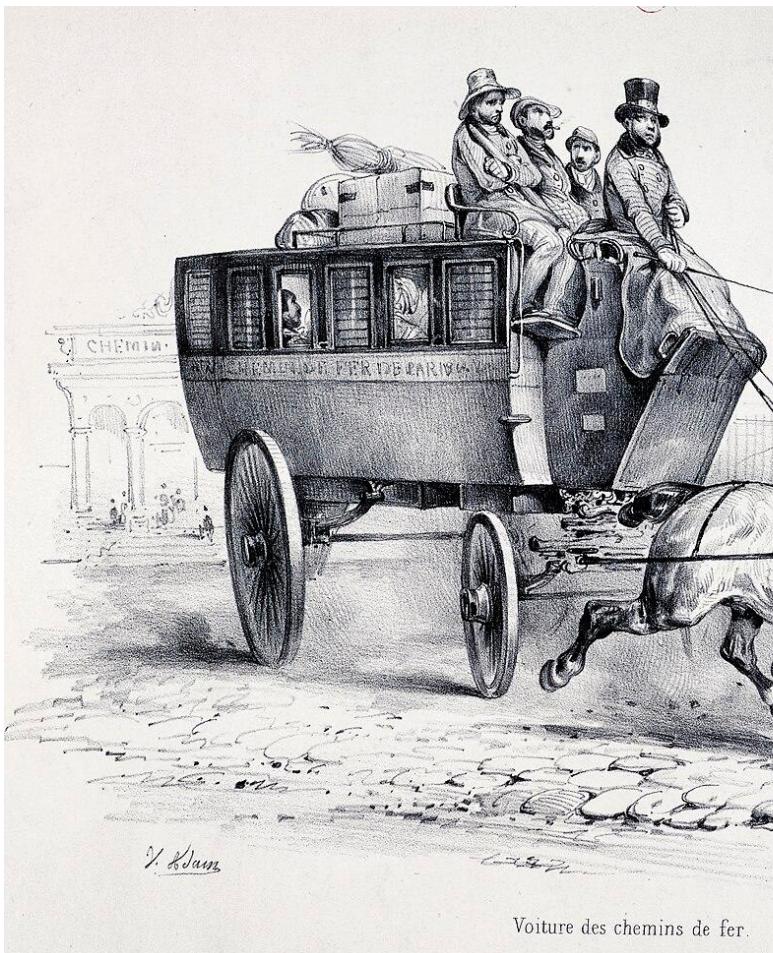
Des moulins à vent ...



... aux éoliennes



Des chevaux ...

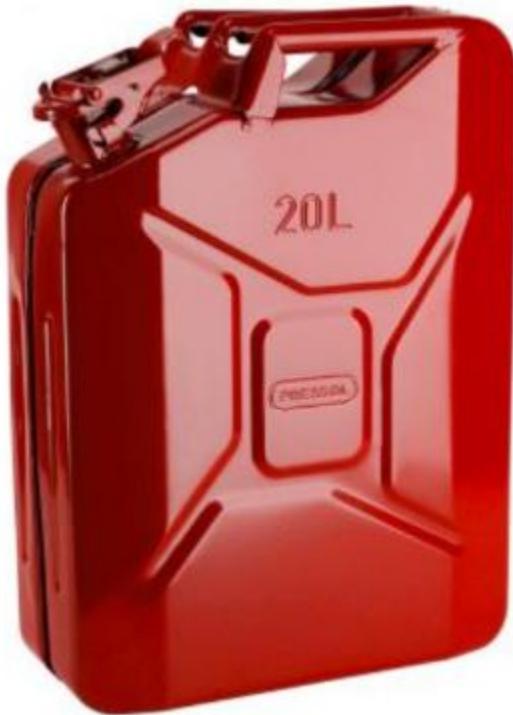


... aux SUV



Energie manuelle et pétrole

20 l d'essence :



400 personnes de 80 + 10 kg
effectuant un dénivelé de 2000 m



4000 personnes
décaissant 6 m³ sur 1 m de haut

Energie manuelle et pétrole

20 l d'essence :



30 €

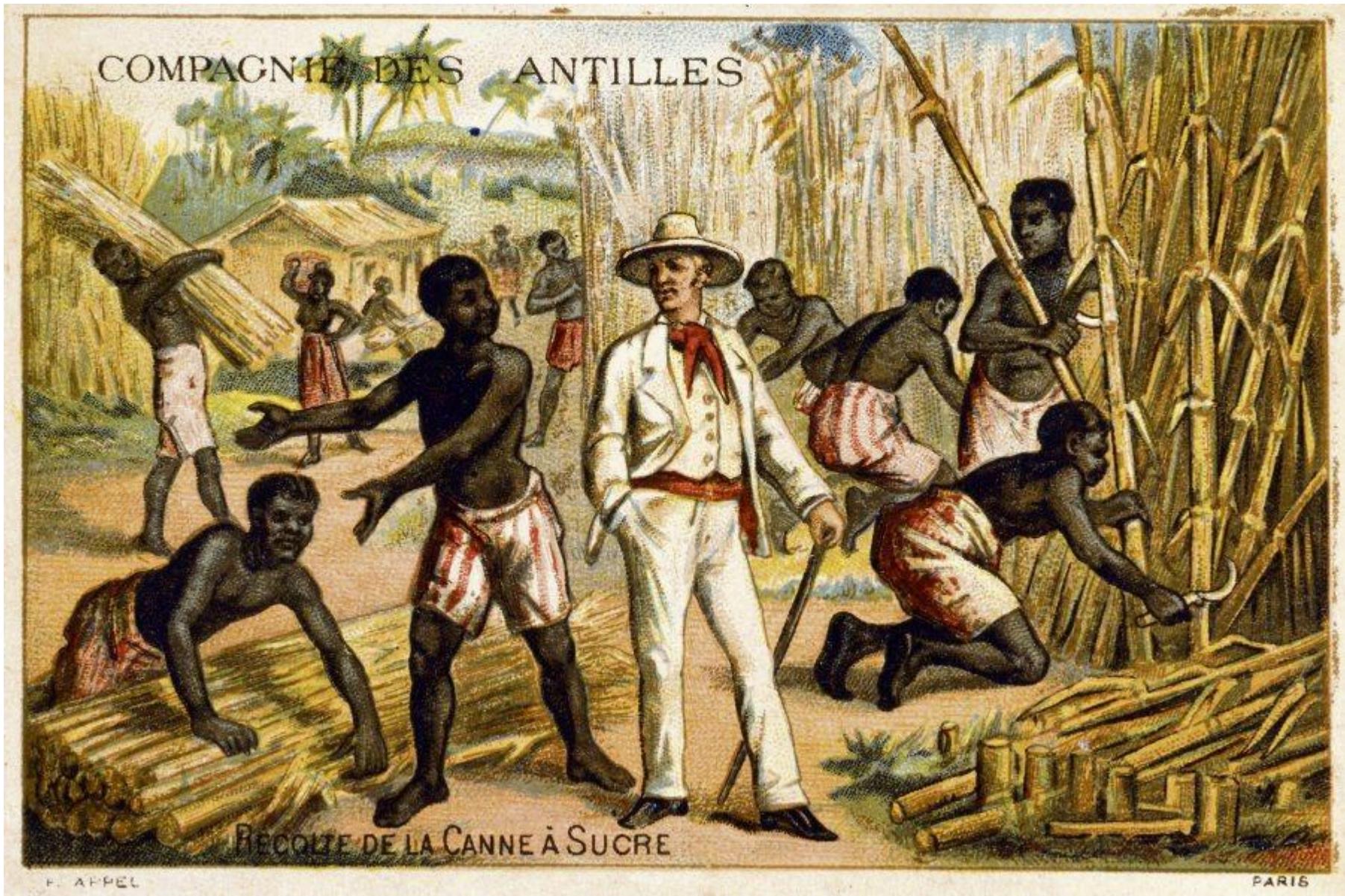
400 personnes de 80 + 10 kg
effectuant un dénivelé de 2000 m



4000 personnes
décaissant 6 m³ sur 1 m de haut

30 000 – 300 000 €

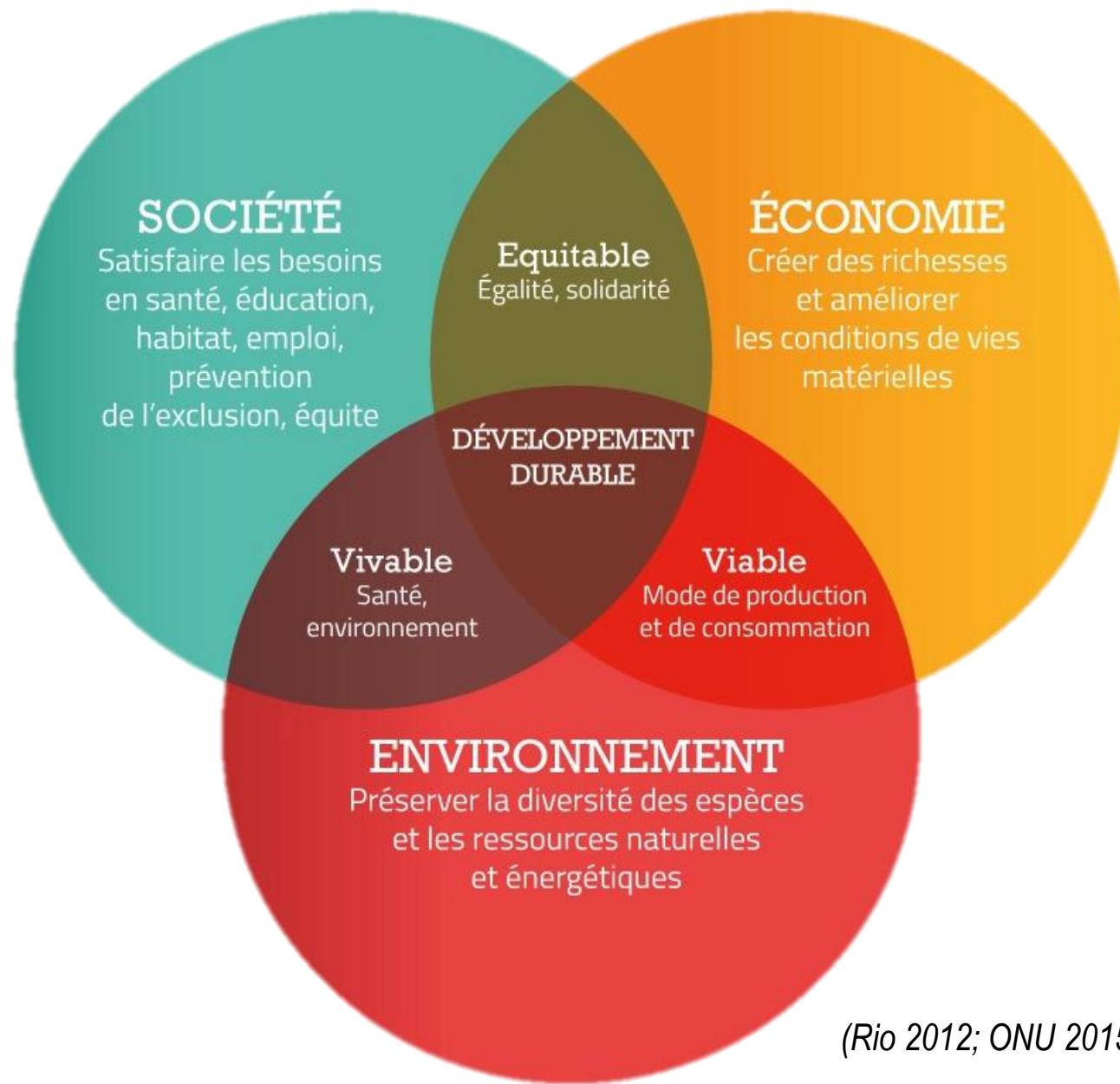
Energie manuelle et esclavage



Energie manuelle et mondialisation

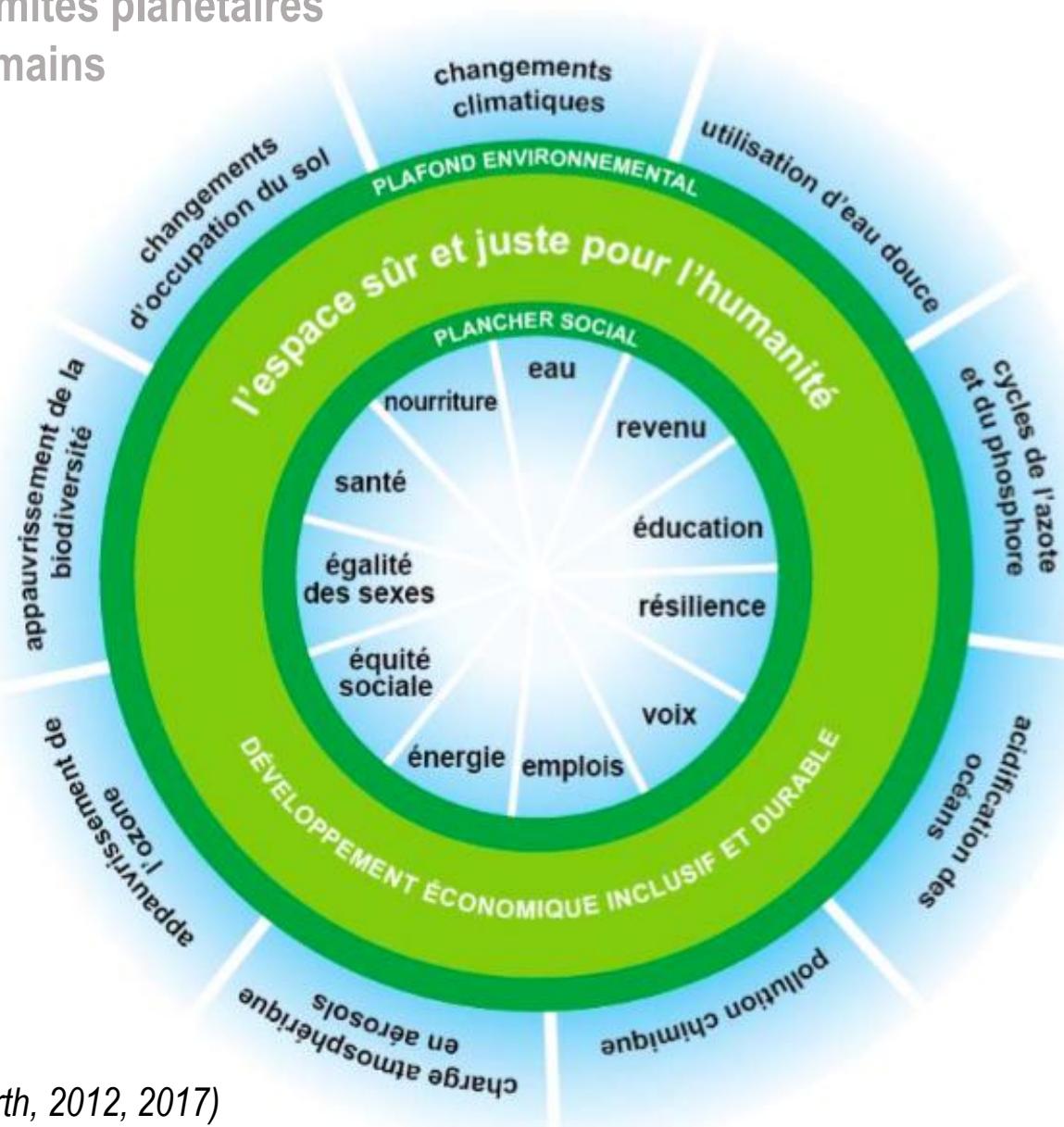


Développement durable

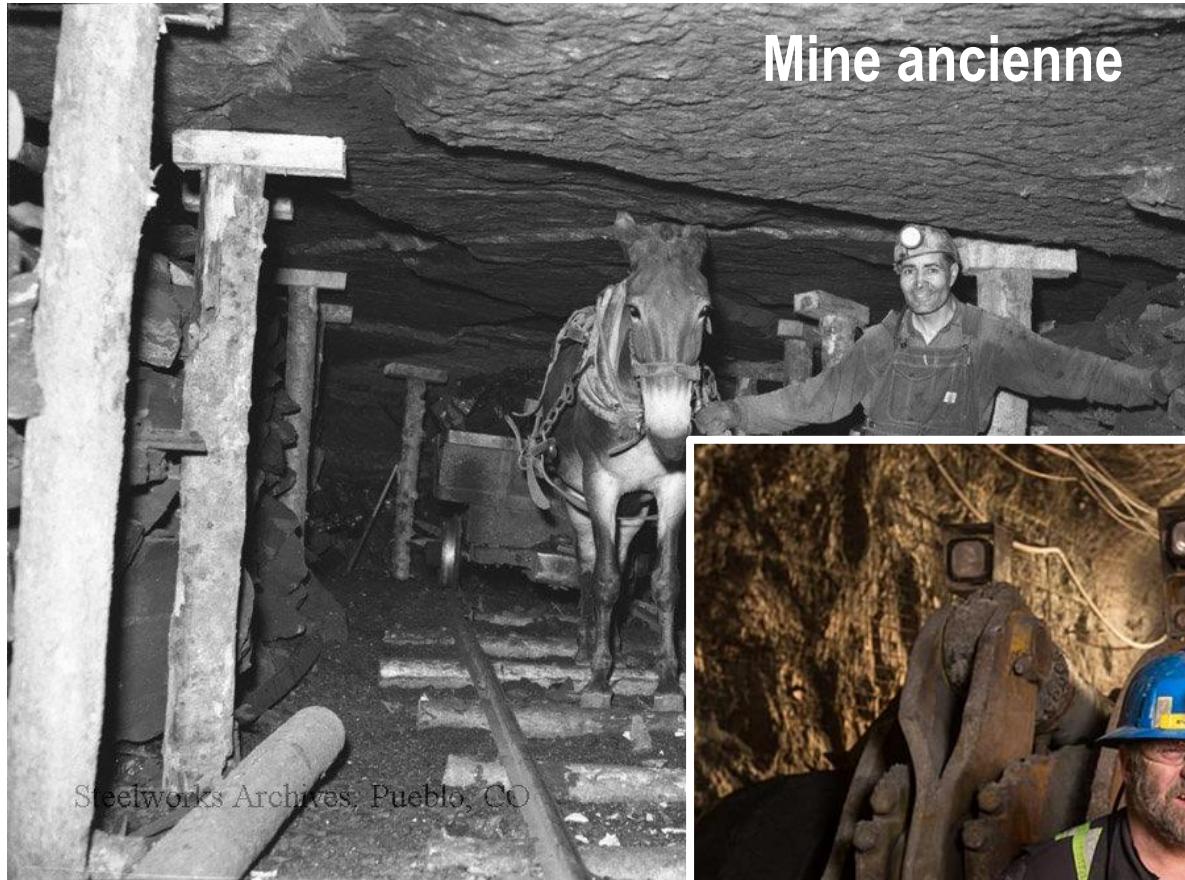


Développement durable et Terre habitable:

- Plafond environnemental : Limites planétaires
- Plancher social : Besoins humains



Impacts de l'utilisation des ressources du sous-sol



Impacts de l'utilisation des ressources du sous-sol

Orpaillage artisanal Madagascar



Impacts de l'utilisation des ressources du sous-sol

Pollution des sols et des eaux

Orpaillage artisanal au Suriname



Mine d'Uranium en Ukraine



(© Vanderhaeghe)

(© Vanderhaeghe)

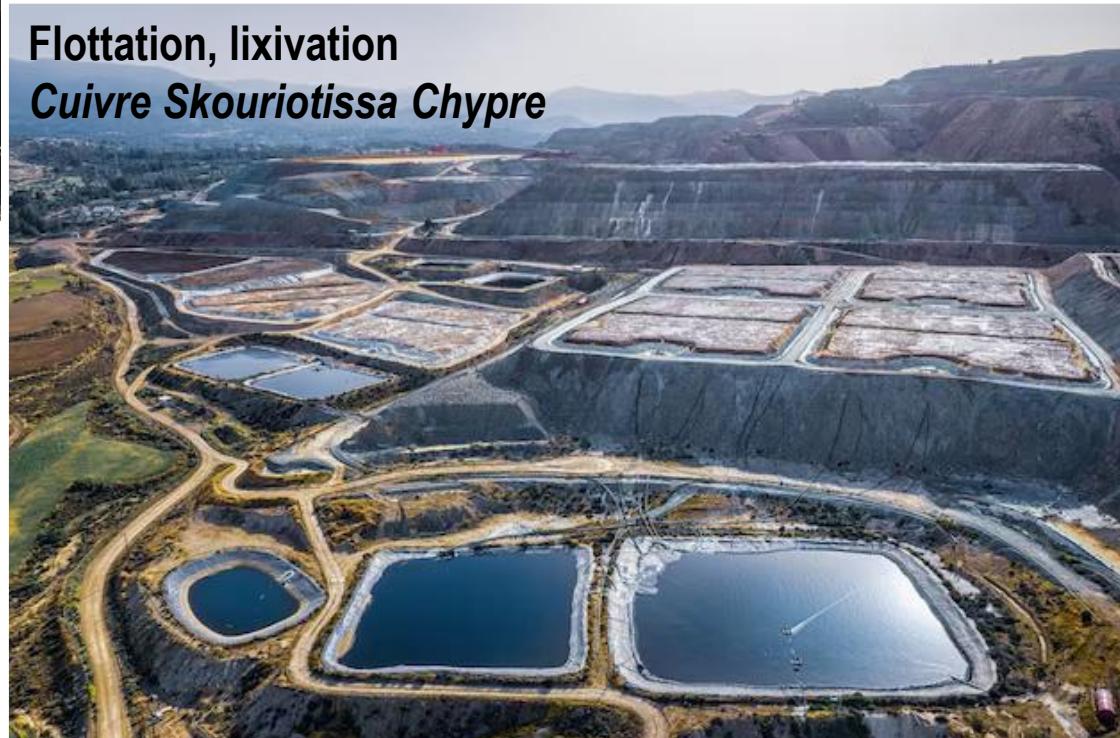
Impacts de l'utilisation des ressources du sous-sol

Broyage, concassage



~5 % de l'énergie mondiale
(Aramendia, 2023)

Flottation, lixiviation
Cuivre Skouriotissa Chypre



Ressources minérales : impact environnemental



Ressources minérales : Impacts social et économique

Escondida Mine (Chili)

Réserve : 100 Mt de cuivre

(BHP - Rio Tinto - JECO)

Profondeur : 800 m

Diamètre: 4 100 m

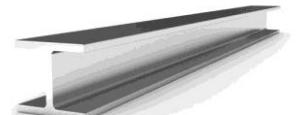
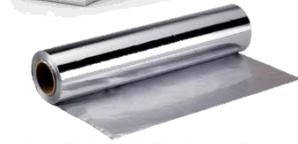


**Emplois directs et indirects : 2000 / 8000
10 % du PIB du Chili**

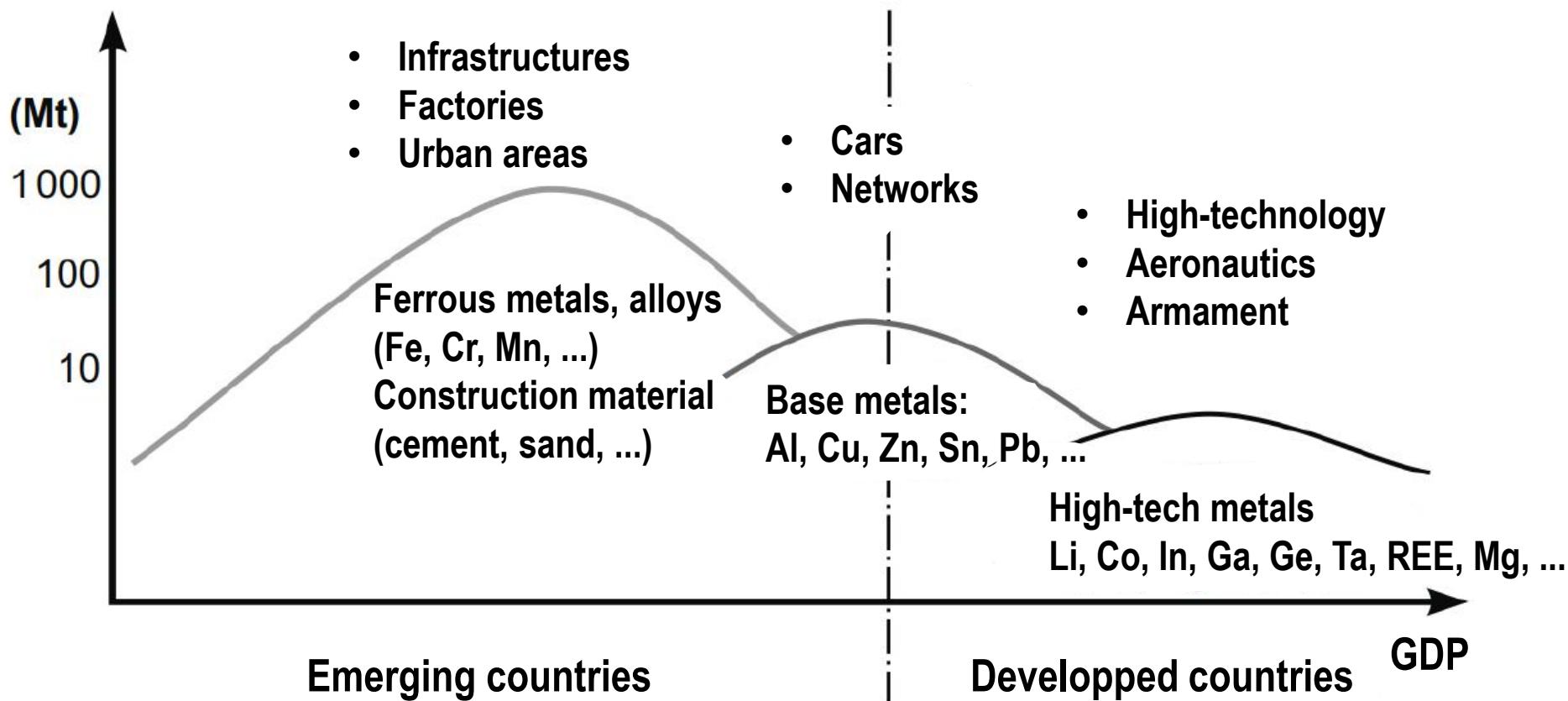


Ressources minérales

Concentration et prix des métaux

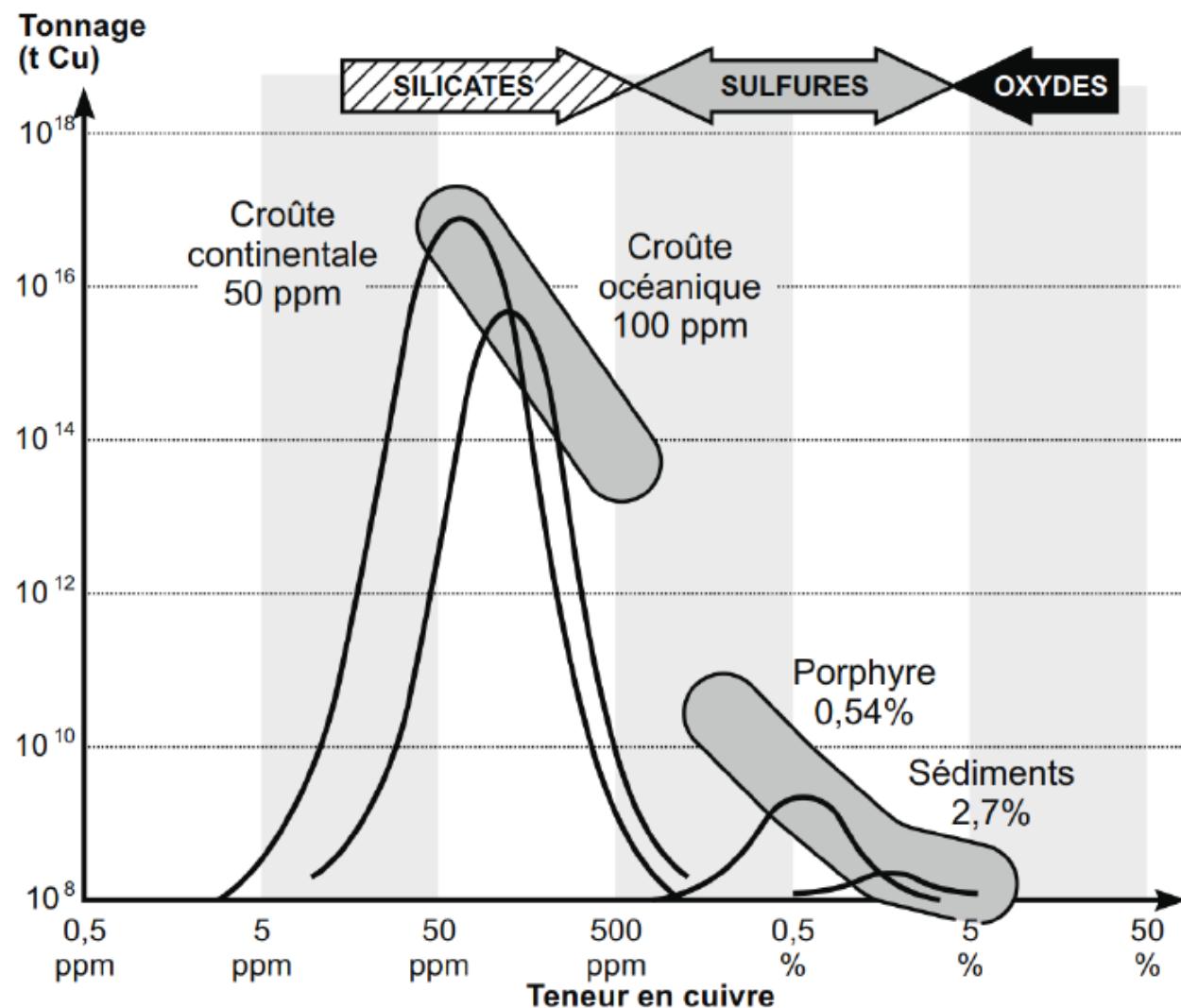
Métal	Teneur dans la croûte %	Teneur d'exploitation %	Gisement de classe mondiale	Prix au kg US\$ (2024)	
Fe	5	60	100 Mt	0,1	
Al	8	30	50 Mt	2	
Cu	0,0055	0,5	5 Mt	7	
Ni	0,0075	1	1 Mt	15	
Co	0,0025	0,3	1 Mt	25	
Li	0,002	1,5	1 Mt	30	
Terres rares	0,08	5	1 Mt	5-250	
U	0,0002	0,1	20 kt	50	
Au	0,00000005	0,00023	200 t	60 000	

Ressources minérales et développement économique-industriel



(Jébrak & Marcoux, 2008)

Ressources minérales : teneur/tonnage - réserves (Jébrak, 2015)



La ressource augmente avec la diminution des teneurs!

Les déchets, la nouvelle resource ?

Mine urbaine



Les déchets, la nouvelle resource ?

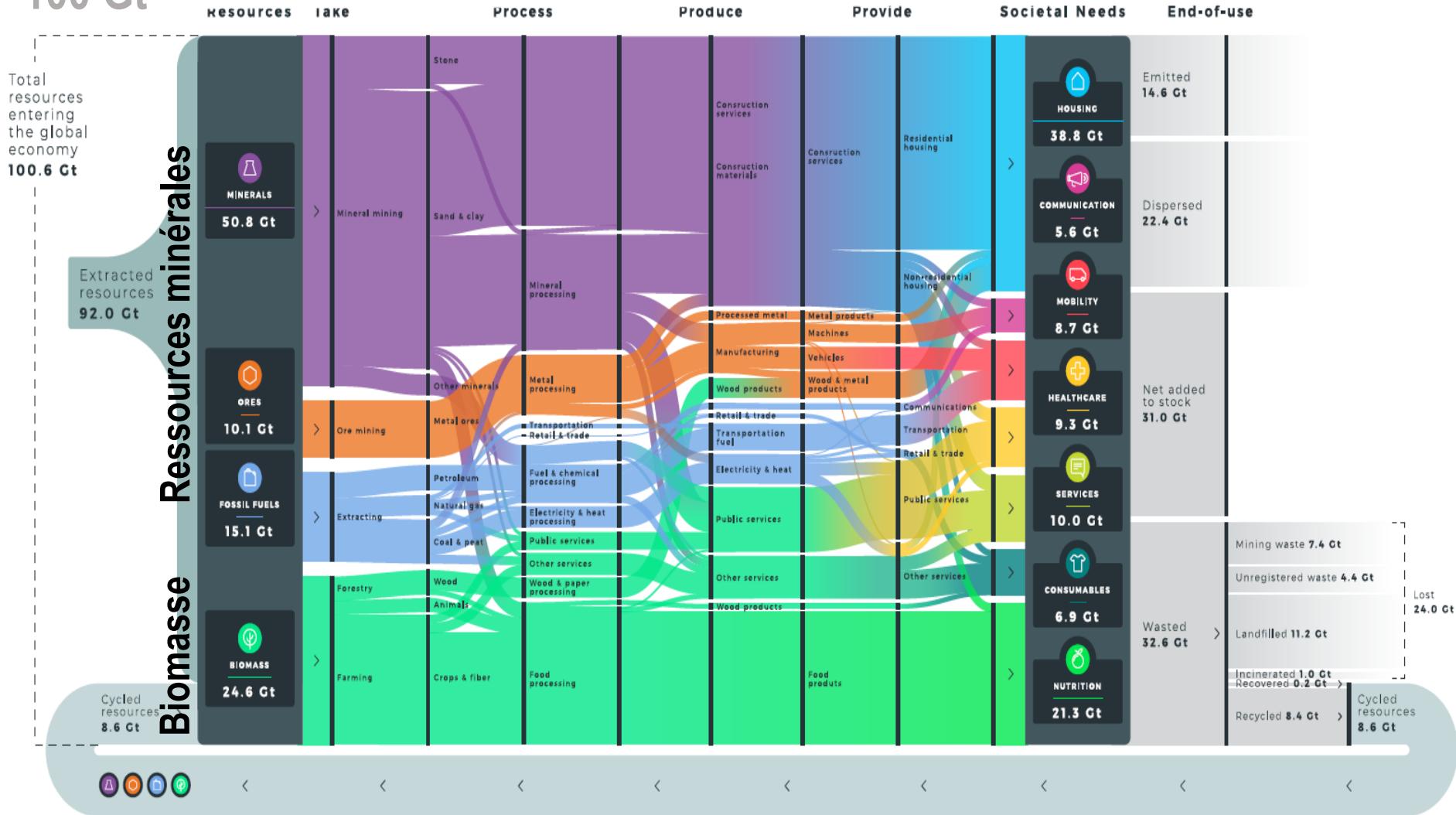
La ruée vers l'ordure (Cavé, 2016)



Flux de matière de la société industrielle et de consommation

Matières premières:

100 Gt



Recyclage : 8,6 Gt (8,5 % en 2022; 7,2 % en 2023!) (Circularity Gap Report 2022, 2023)

Autonomie énergétique de l'Occitanie ?

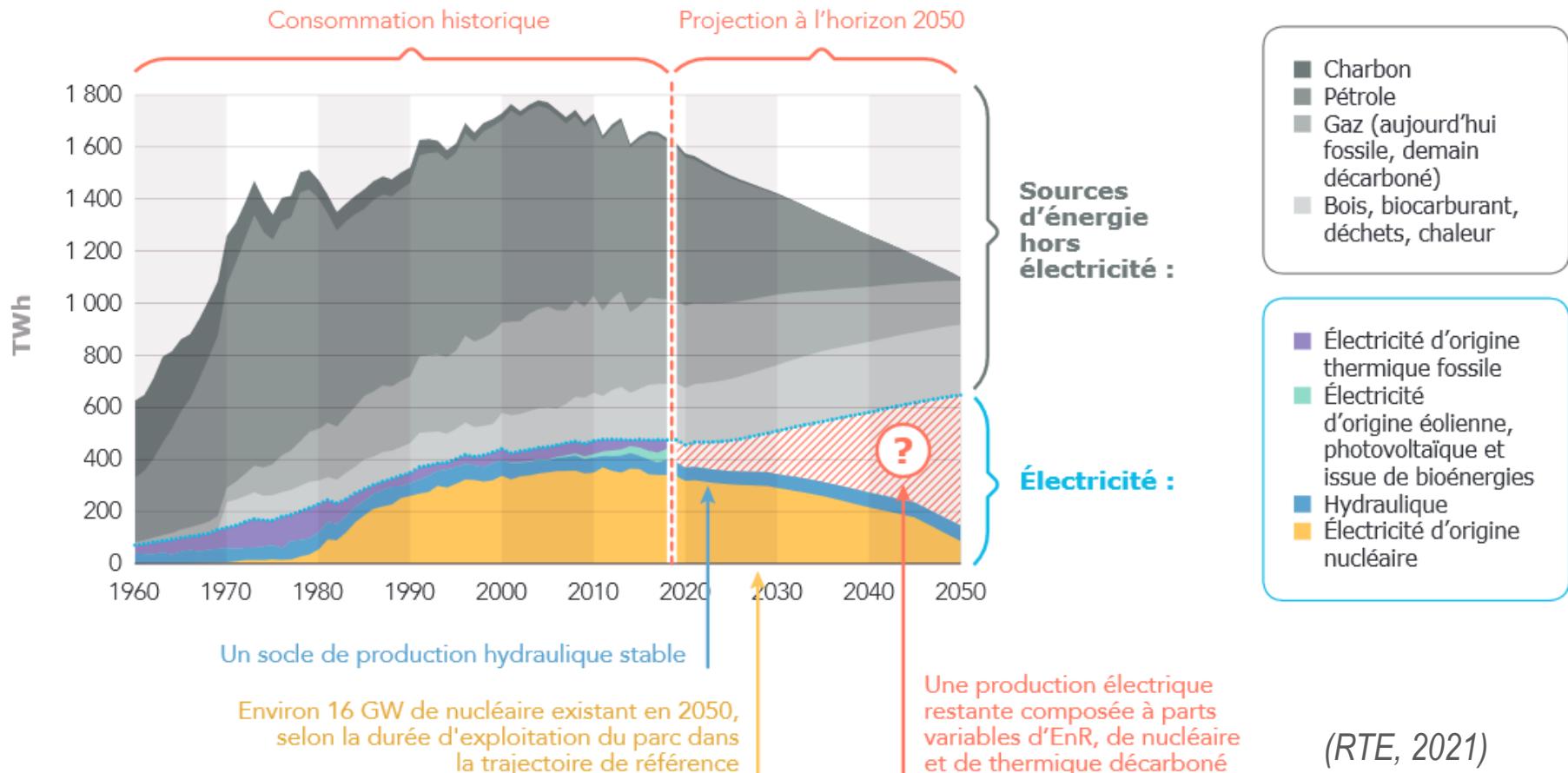
- A la suite d'un référendum d'auto-détermination, l'Occitanie vient d'obtenir son indépendance
- L'écologie étant citée à l'article 1 de la nouvelle constitution, l'Etat a pour objectif l'auto-suffisance en énergie à horizon 2050 pour répondre à de nombreux enjeux:
 - Environnemental : Assurer l'habitabilité du territoire
 - Sociétaux : Répondre équitablement aux besoins en énergie du territoire
 - Géo-politique : Assurer la souveraineté énergétique du territoire



Transition énergétique – écologique à l'horizon 2050

Stratégie Nationale Bas Carbone (2015, 2018-2019)

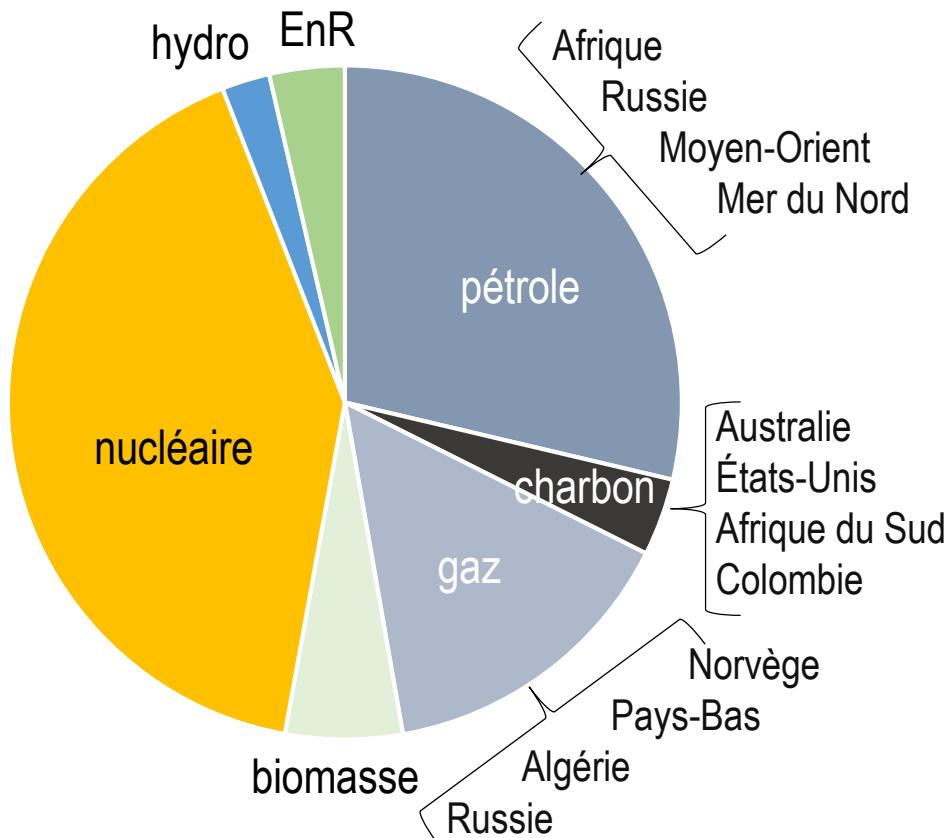
Evolution de la consommation d'énergie finale



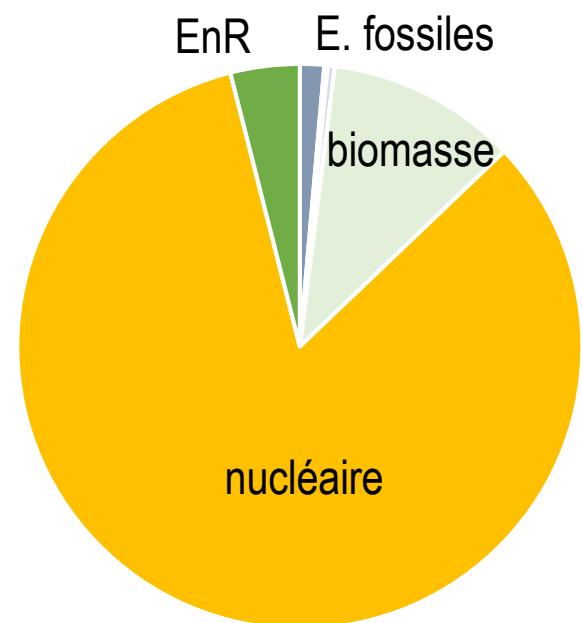
- Réduire la consommation de 40 % par rapport à 2015
- Réduire les énergies fossiles
- Augmenter les énergies renouvelables (et le nucléaire ?)

Energie primaire en France (2018)

Consommation
2900 TWh



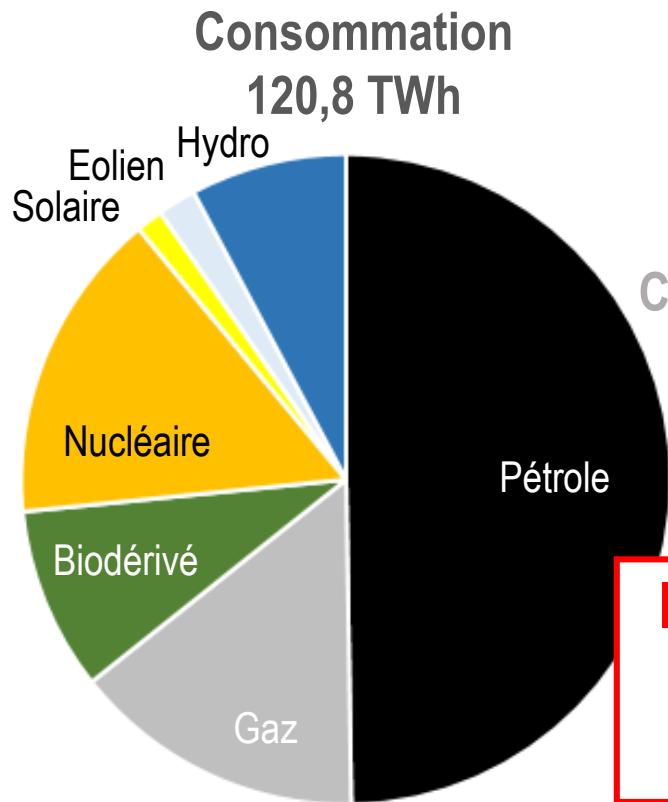
Production
1600 TWh



(SDES; energieplanete.fr)

- Importation ~100 % des énergies fossiles
- Production = 55 % Consommation

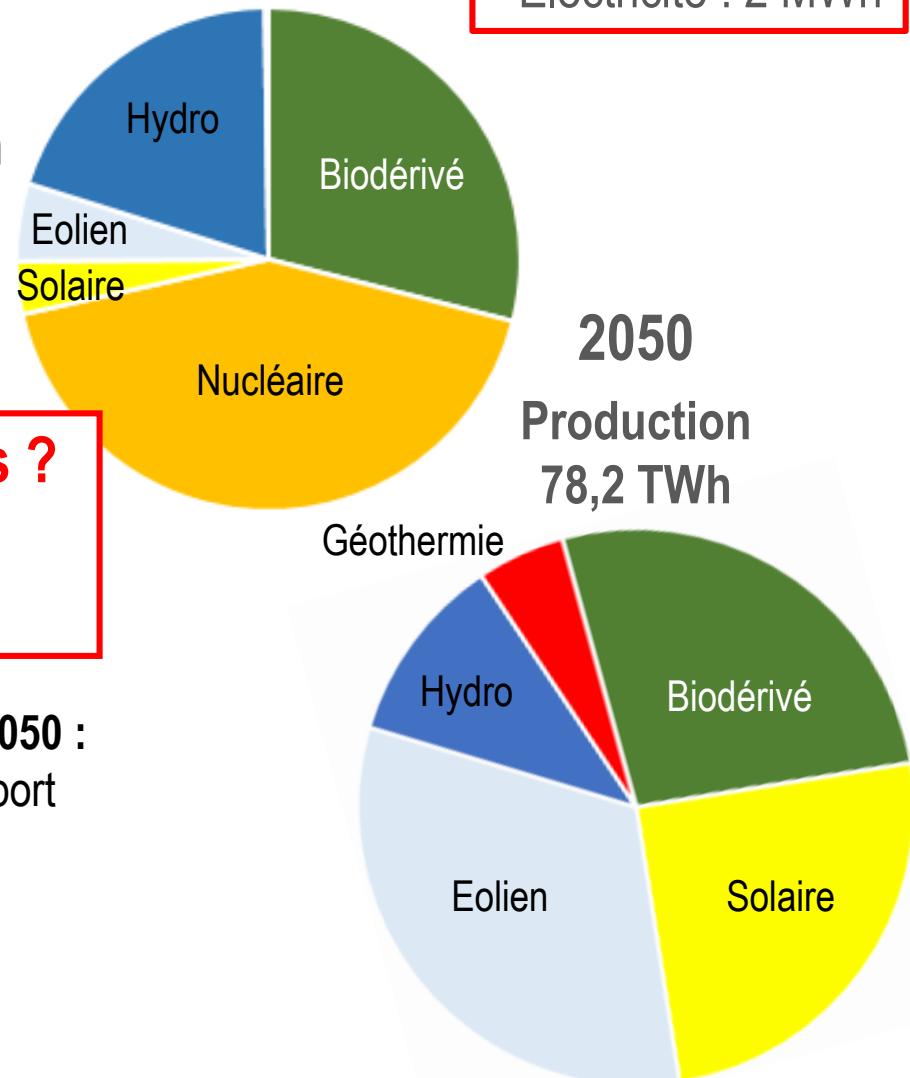
Vers l'autonomie énergétique de l'Occitanie ?



2015
Production
= 46 %
Consommation

Production
44,2 TWh

Conso /hab/an:
- Total : 20 MWh
- Electricité : 2 MWh



Implications ?
Verrous ?
Leviers ?

SRADDET, REPOS (Région à Energie POSitive) 2050 :

- réduire la consommation d'énergie (-40% par rapport à 2015) par la sobriété et l'efficacité énergétiques
- couvrir les besoins résiduels par la production d'énergies renouvelables locales

Systèmes de production électrique Hydroélectrique



Barrage d'Orlu (88 MW; 616 GWh)



Barrage du Ramier (4,4 MW; 30 GWh)



Facteur de charge :

25% (RTE, IEA)

Rendement surfacique :

0,9 MWh/m²

Matériaux-métaux :

Béton, remblais

Impact GES :

Nul, en dehors de l'extraction des matériaux

AVANTAGES :

- Technologie maîtrisée
- Forte réactivité à la demande, capacité de stockage
- Faible émission en GES

INCONVENIENTS :

- Dépendant des aléas climatiques, saisonnier
- Forte emprise au sol, impact environnemental
- Risque de rupture

Systèmes de production électrique Solaire



Centrale photovoltaïque ZAC Oncopole
19 ha, 15 MWc; 19 700 MWh



Facteur de charge : 15% (*RTE, IEA*)

Rendement surfacique : 0,9 MWh/m²

Matériaux-métaux : Si purifié, Al (*BRGM*)

Impact GES : Nul, en dehors de l'extraction des matériaux

AVANTAGES :

- Coût de production faible
- Technologie connue et fiable
- Risques très faibles

INCONVENIENTS :

- Intermittent
- Emprise au sol élevée
- Dépendance géopolitique (Si purifié)

Systèmes de production électrique Eolien



Par éolien du Lauragais : 11 éoliennes, 18 MW



Facteur de charge :

15% (RTE, IEA)

Rendement surfacique :

0,9 MWh/m²

Matériaux-métaux :

Béton, Acier, Cu, Al, Cr (BRGM)

Impact GES :

Nul, en dehors de l'extraction des matériaux

AVANTAGES :

- Coût de production faible
- Technologie connue et fiable
- Risques faibles

INCONVENIENTS :

- Intermittent
- Facteur de charge faible
- Impact visuel fort

Systèmes de production électrique Nucléaire



Facteur de charge :

95% (RTE, IEA)

Rendement surfacique :

166,4 MWh/m²

Matériaux-métaux :

Béton, U (BRGM)

Impact GES :

Nul, en dehors de l'extraction des matériaux

AVANTAGES :

- Coût de production faible
- Faible emprise au sol, fort rendement
- Non intermittent

INCONVENIENTS :

- Risque d'accident nucléaire
- Combustible importé
- Fort besoin en eau
- Traitement des déchets et démantèlement

Systèmes de production électrique Biomasse



Facteur de charge :	95 % (RTE, IRENA)
Rendement surfacique :	16,6 MWh/m ²
Matériaux-métaux :	Béton
Impact GES :	Emission de CO ₂

AVANTAGES :

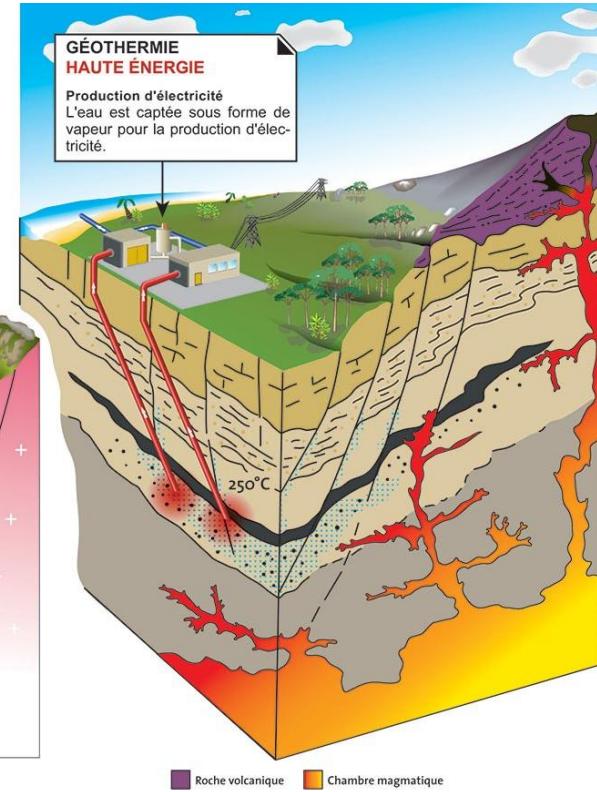
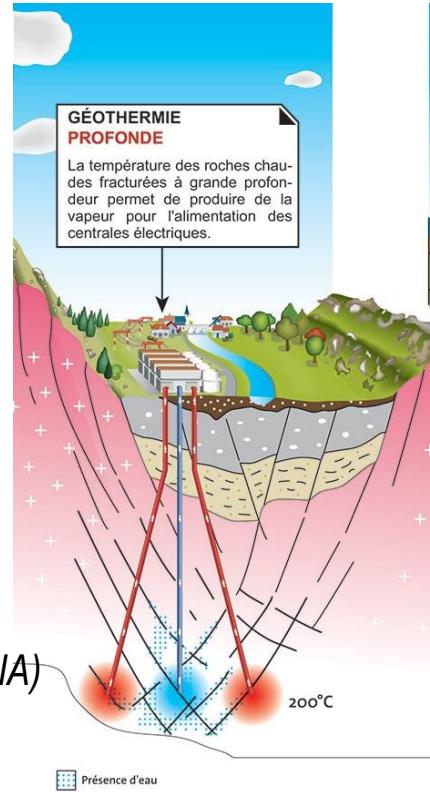
- Valorisation de déchets
- Intermittence liée au combustible
- Co-production de chaleur

INCONVENIENTS :

- Energie carbonée
- Consommation de terres agricoles/forêts

Systèmes de production électrique

Géothermie



Facteur de charge :

95 % (RTE, IRENA)

Rendement surfacique :

20,8 MWh/m²

Matériaux-métaux :

Béton

Impact GES :

Nul

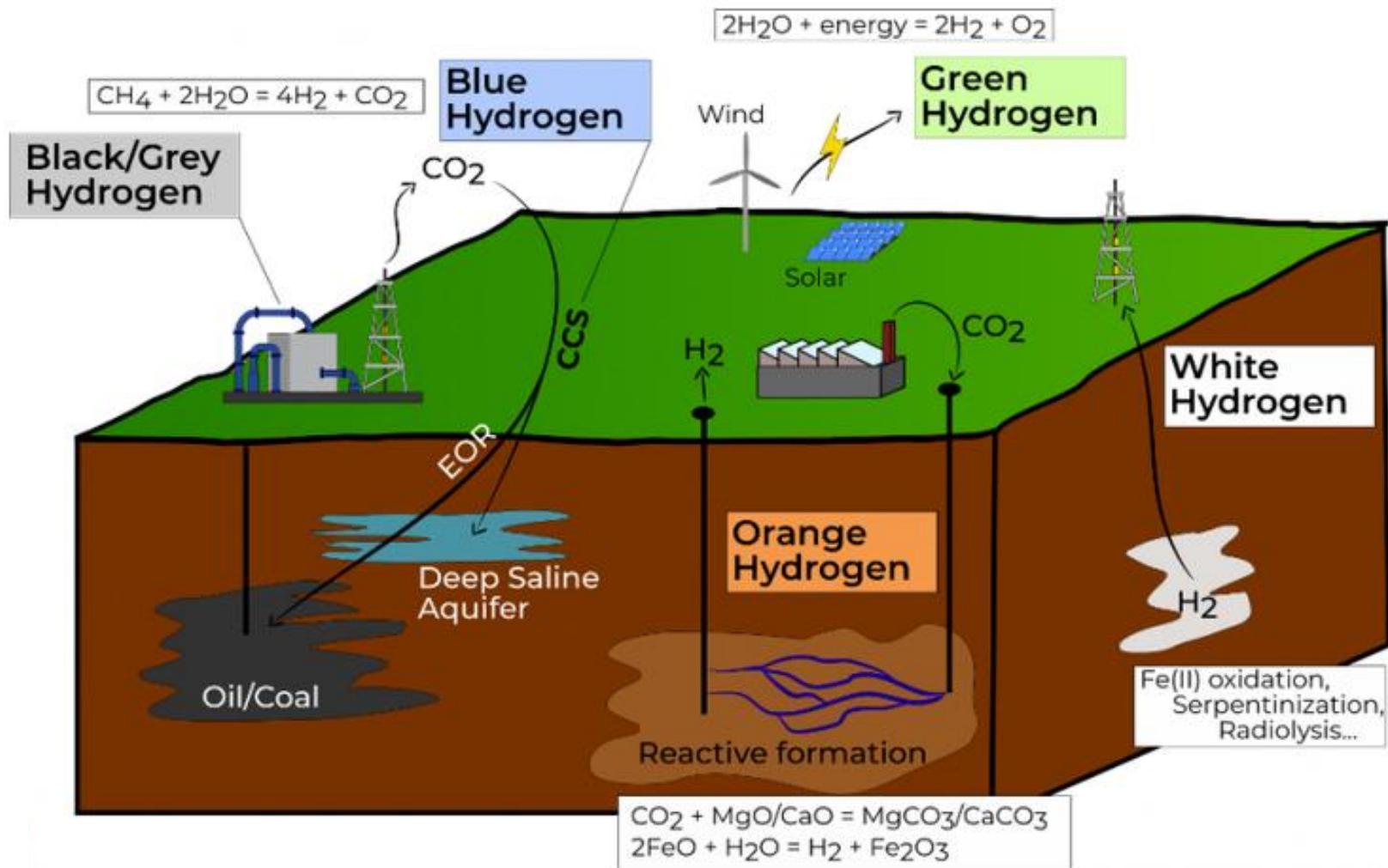
AVANTAGES :

- Indépendant du climat et de la météo
- Non intermittent
- Faible emprise au sol
- Faible impact visuel

INCONVENIENTS :

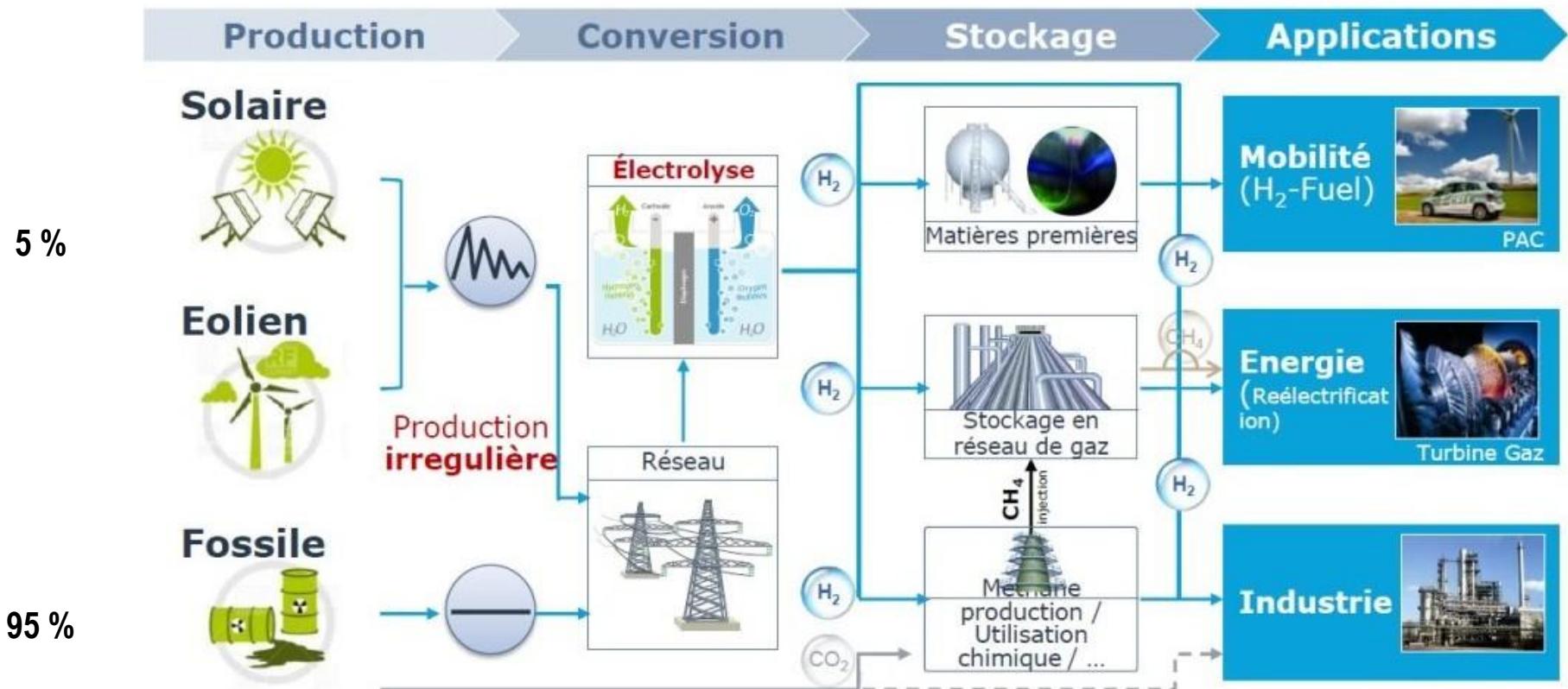
- Nécessite une phase exploratoire complexe
- Fort investissement initial « à risque »
- Ressource à exploiter localement

Systèmes de production électrique Hydrogène



(Osselin et al., 2022)

Systèmes de production électrique Hydrogène



AVANTAGES :

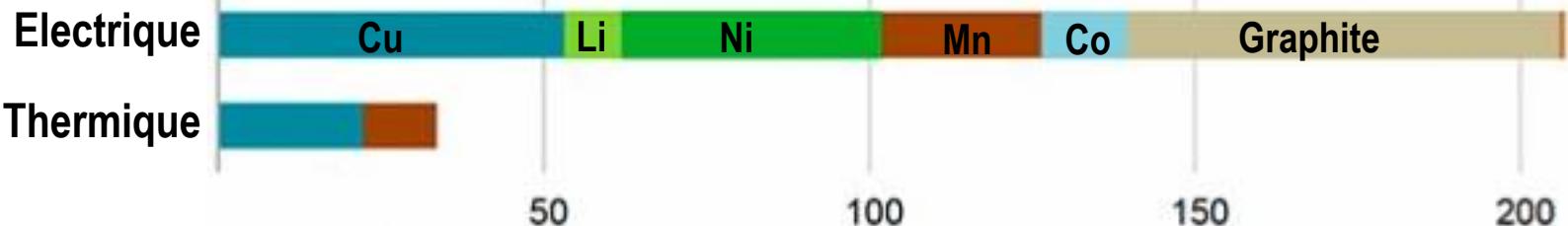
- Non intermittent
- Faible impact environnemental

INCONVENIENTS :

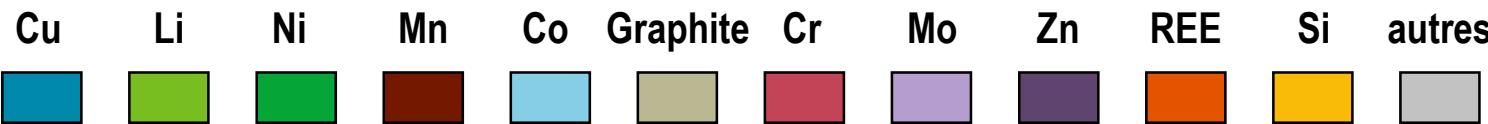
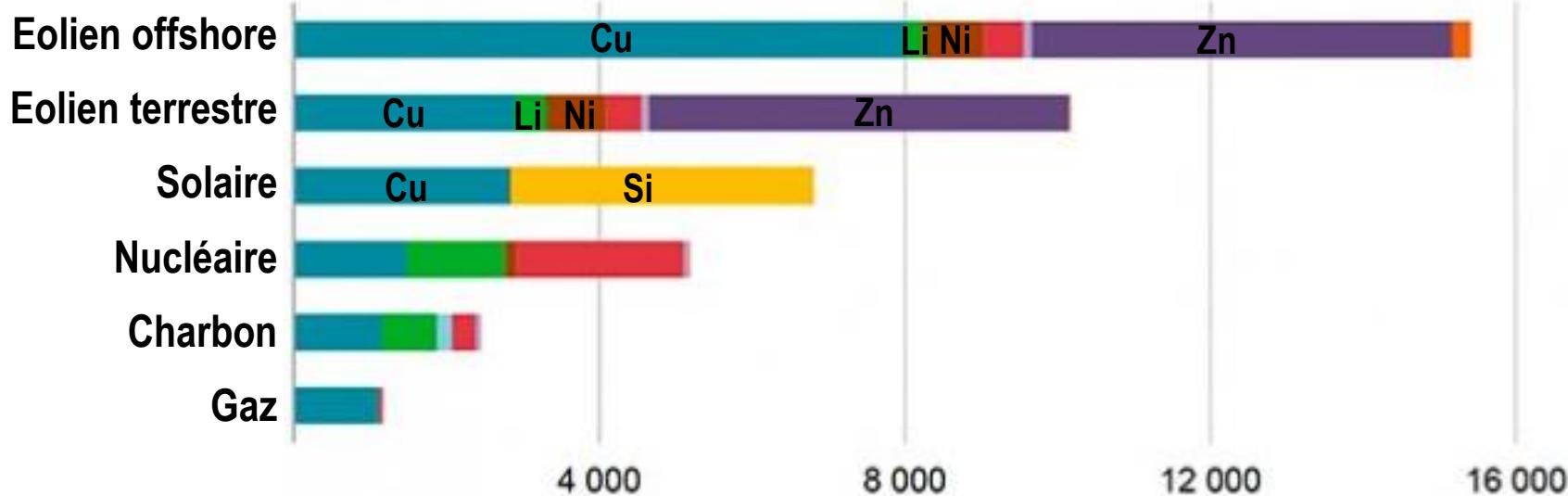
- Exploratoire
- Dépend (pour l'instant) des énergies fossiles

Empreinte matérielle de la transition énergétique

Transport (kg/véhicule)



Production d'énergie (kg/MW)



(IEA, 2022)

Implications du scénario REPOS

	2015 (GWh)	→	2050 (GWh)	Ressources minérales	Environnement climat	Emprise au sol	Impacts socio-éco
	78 500		2 300	<ul style="list-style-type: none"> • Bilan de la consommation et de la production d'énergie • Quantification des besoins en ressources du sous-sol • Identification des acteurs du territoire et caractérisation des profils • Inventaire du potentiel du sous-sol • Identification des procédés de valorisation • Evaluation des impacts environnementaux, climatique • Evaluation des impacts socio-économiques 			
	18 700						
	9 400		9 800				
	12 800		20 900				
	2 300		24 000	?	?	?	?
	1 600		20 000	?	?	?	?
				?			

Besoins en 2050 en Occitanie

Photovoltaïque

x12,5

+18,4 TWh



Eolien

x10,4

+21,7 TWh



Véhicules électriques



Nombre

2050

$48 \cdot 10^6$

2023

75 000

5 000

3 000 000

800

100 000

Surface (ha)

9 300

(0,13%)

2 500

(0,03%)

Réserves

Total

Monde

France

Cuivre (kt)

18

10

160

188

1 000 000

750

Nickel (kt)

0,5

80

80,5

70 000

5 600

Cobalt (kt)

136

136

11 000

140

Lithium (kt)

16

16

28 000

350

Total métaux : 420 kt

Teneur de 1% : 70 mines Jubilee, 4 Salsigne

Besoins et régulations

Nécessaires

Vitaux

Essentiels

Indispensables

Utiles

Accessoires

Futiles

Extravagants

Inacceptables

Nuisibles

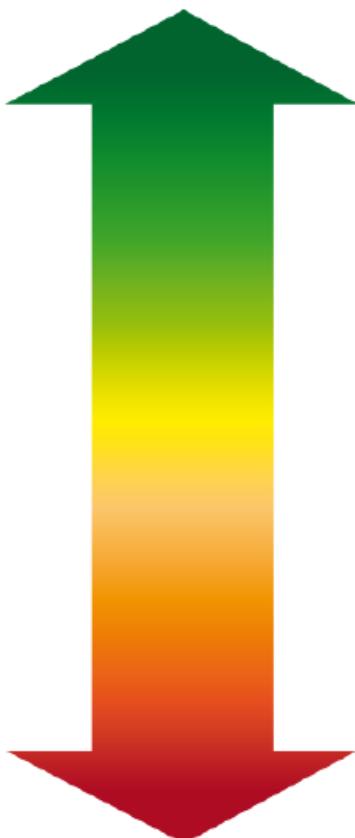
Superflus

Obligation

Incitation

Dissuasion

Interdiction



La vie à 2 tCO₂/an/cap

60 m²



REPAS 1



216 cal



110 cal



90 cal

416 CAL / 34 GP

REPAS 2



430 cal



70 cal

500 CAL / 45 GP

REPAS 3



530 CAL / 30 GP

COLLATION



250 CAL / 14 GP



4 kg/an/cap



70
l/jr/cap



40 000 km/an



(Millward-Hopkins et al., 2020)

Approvisionnement durable en ressources du sous-sol:

Co-construction de trajectoires pour la transition énergétique et écologique d'un territoire

- Réponse équitable aux besoins humains
- Préservation de l'habitabilité de la planète

**Rapprocher les lieux d'exploitation,
de transformation, d'utilisation,
des ressources du sous-sol ?**

**Penser-agir local-global
dans le temps court-long !**



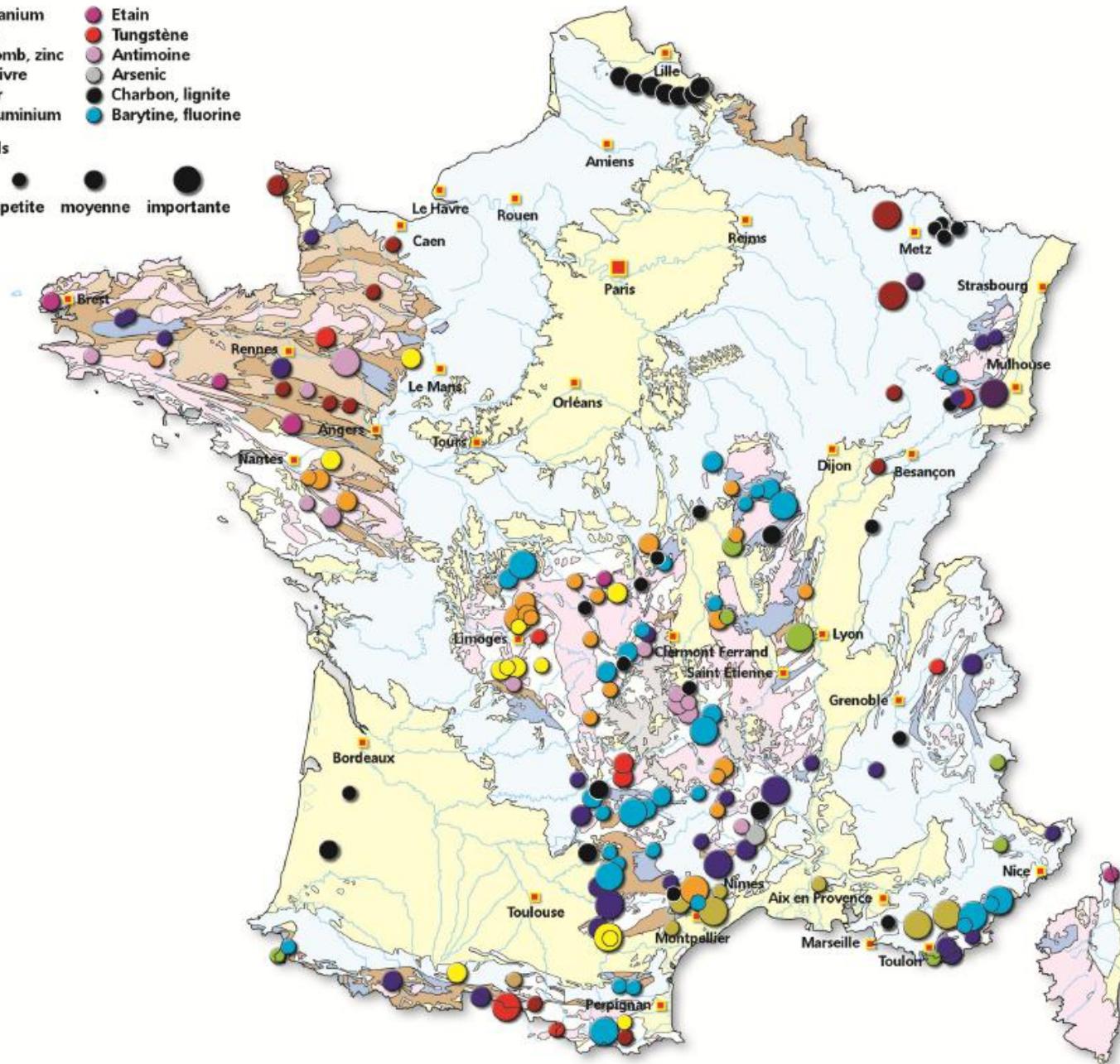
Simplification des procédures minières pour accélérer la transition énergétique et renforcer la sécurité d'approvisionnement française

Communiqué de Presse Lemaire & Lescure, Avril 2024

« Les réserves [en cuivre de la France sont estimées à 850 kt (pour une consommation annuelle tous usages confondus de 170 kt). D'ici 2040 nous aurons besoin de 35 kt de cuivre/ par an pour atteindre nos objectifs de déploiement d'éoliennes et de panneau solaires. »

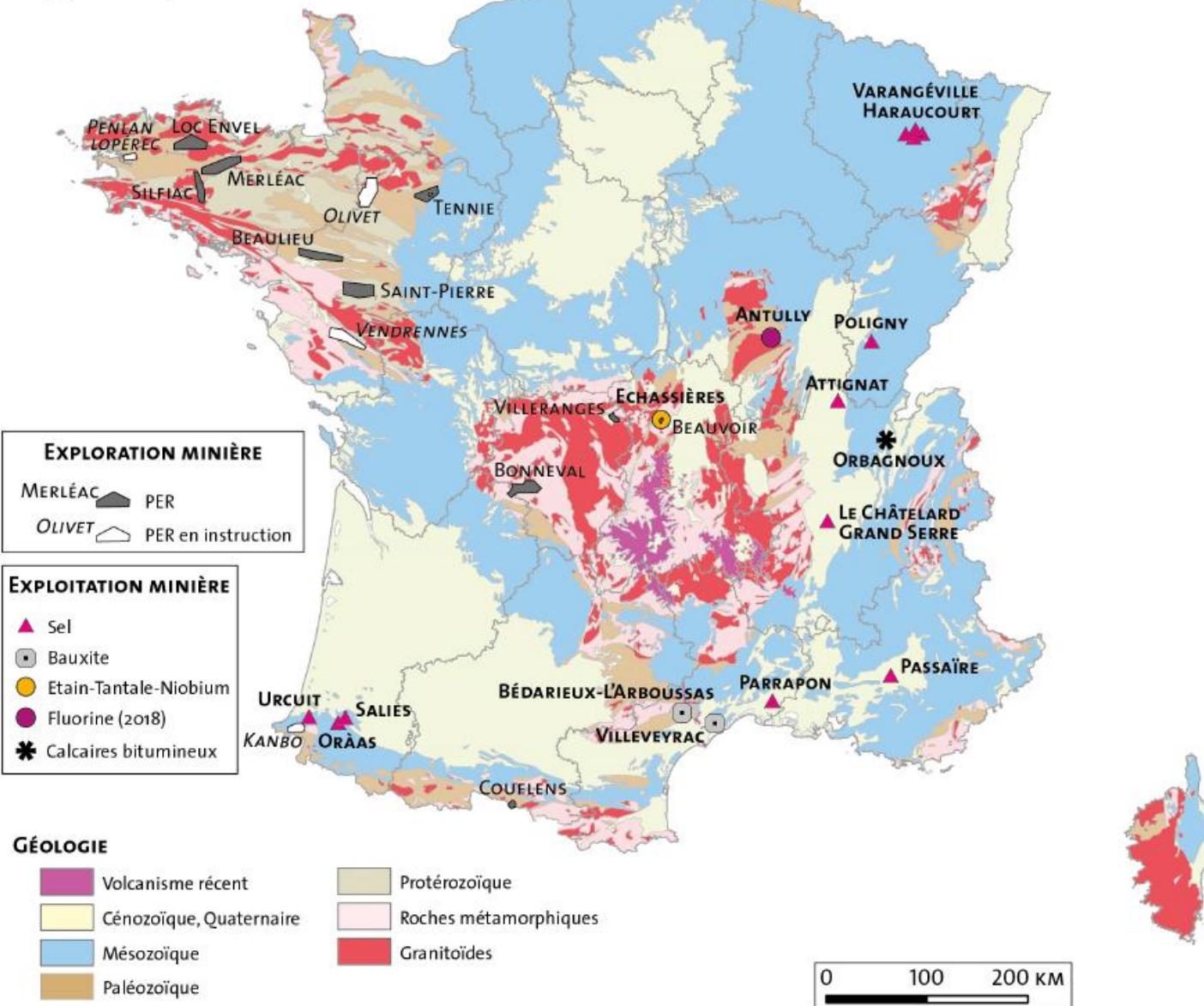
- Uranium
- Or
- Plomb, zinc
- Cuivre
- Fer
- Aluminium
- Sels
- Etain
- Tungstène
- Antimoine
- Arsenic
- Charbon, lignite
- Barytine, fluorine

Taille : petite moyenne importante



L'ACTIVITÉ MINIÈRE EN FRANCE

Au 15 février 2017



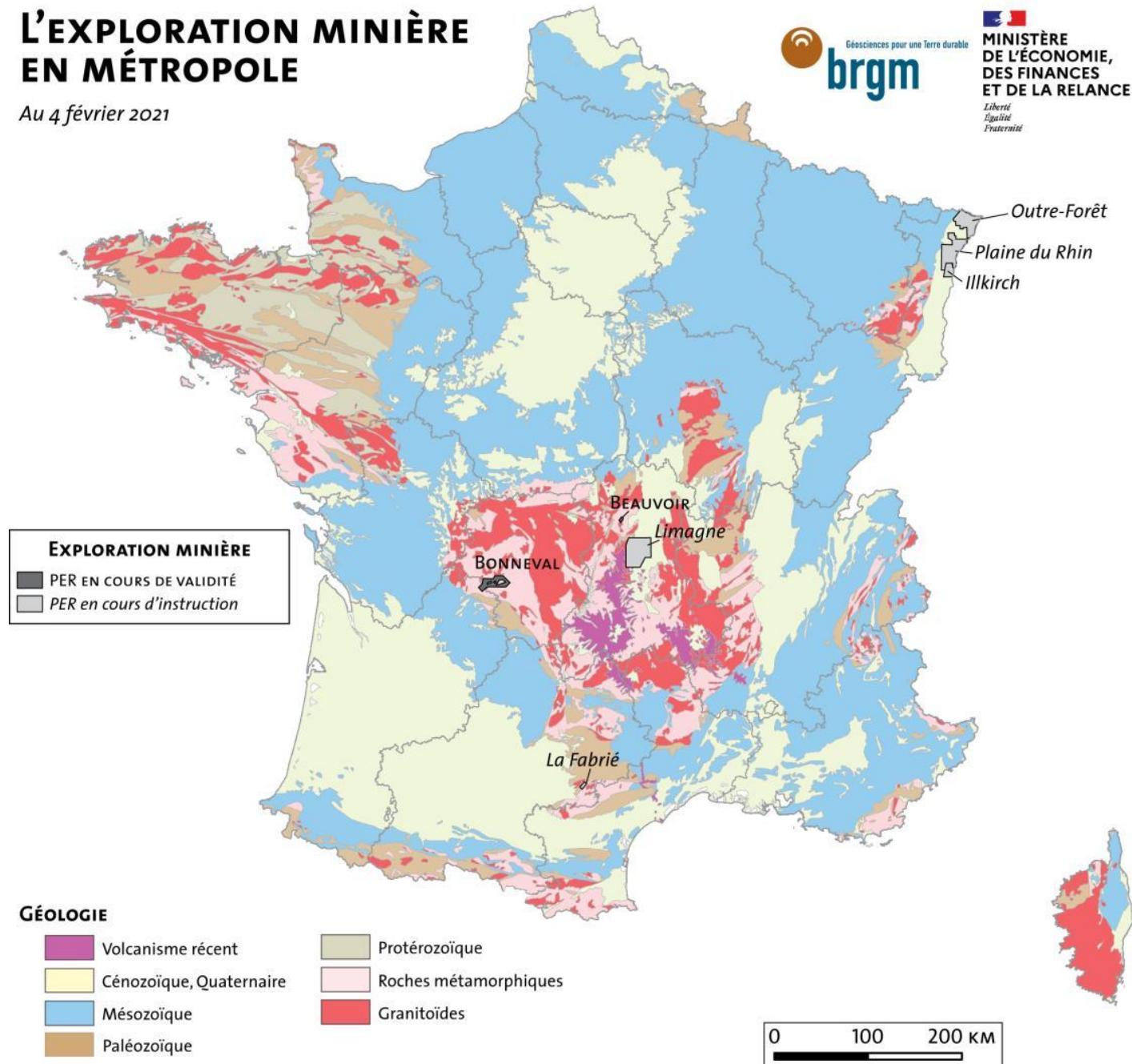
L'EXPLORATION MINIÈRE EN MÉTROPOLE

Au 4 février 2021

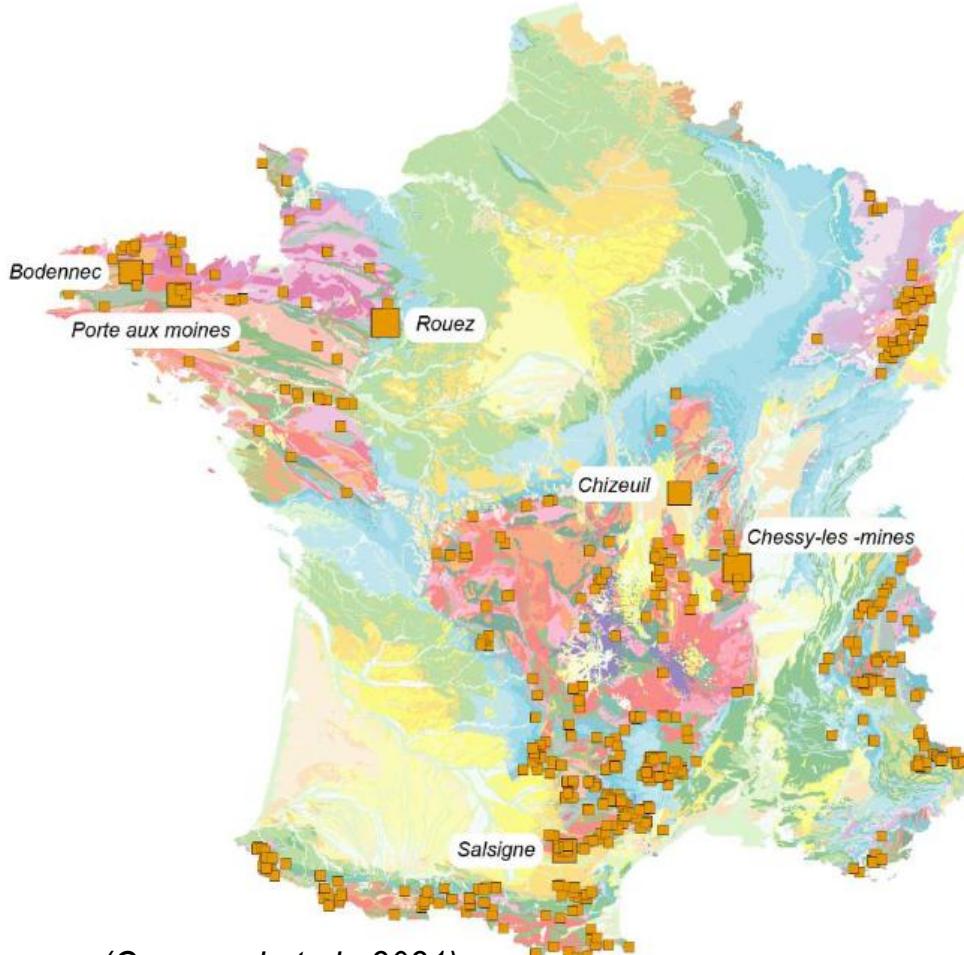


Géosciences pour une Terre durable
brgm

MINISTÈRE
DE L'ÉCONOMIE,
DES FINANCES
ET DE LA RELANCE
Liberté
Égalité
Fraternité



Cuivre



Légende

Taille du gisement

- Moyen ($1 \text{ Mt} > X > 100 \text{ kt Cu}$)
- Faible ($100 \text{ kt} > X > 10 \text{ kt Cu}$)
- Indice ($< 10 \text{ kt Cu ou non estimé}$)

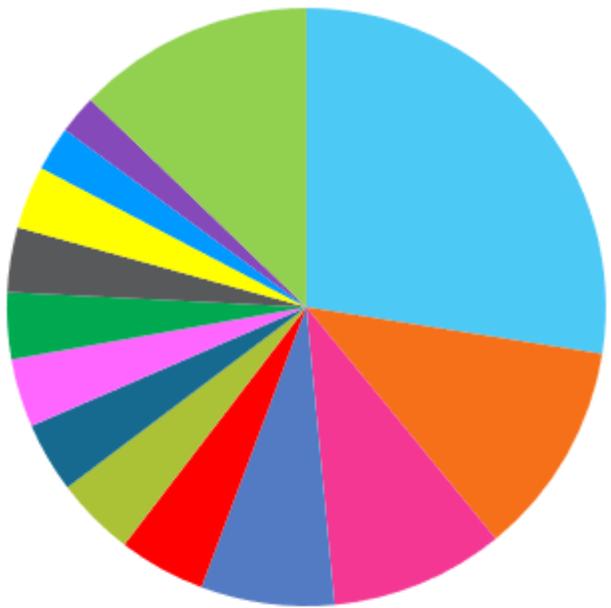
Production historique cumulée (période gauloise à 1998) : 100 kt

Réserve en France métropolitaine : 750 kt

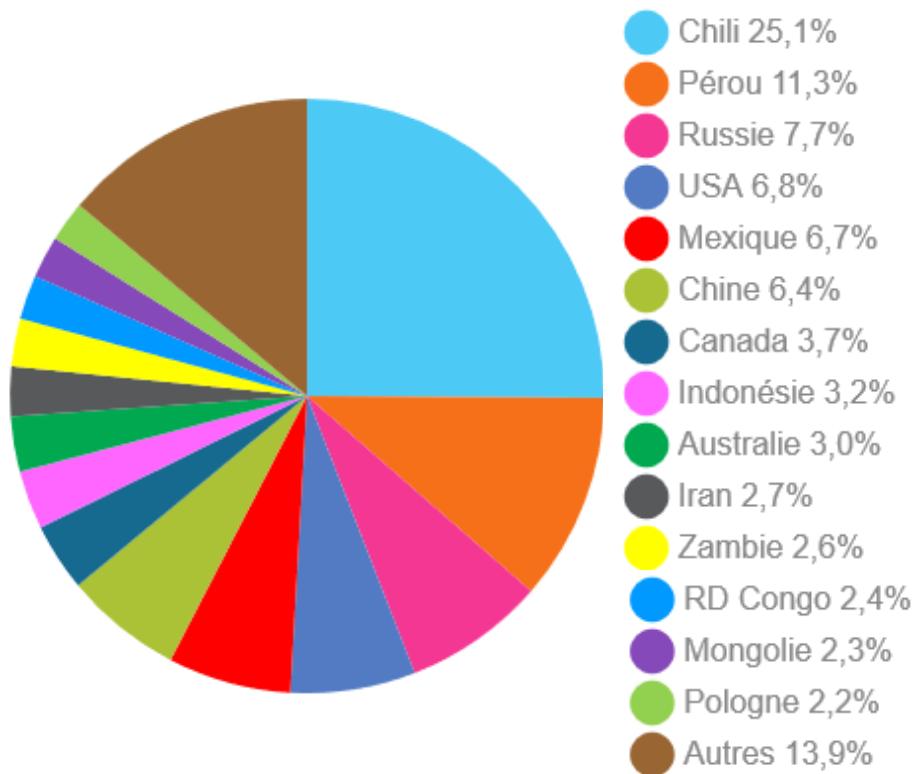
Taux de recyclage: 40-50 %

Cuivre

Production (2016)
20 Mt



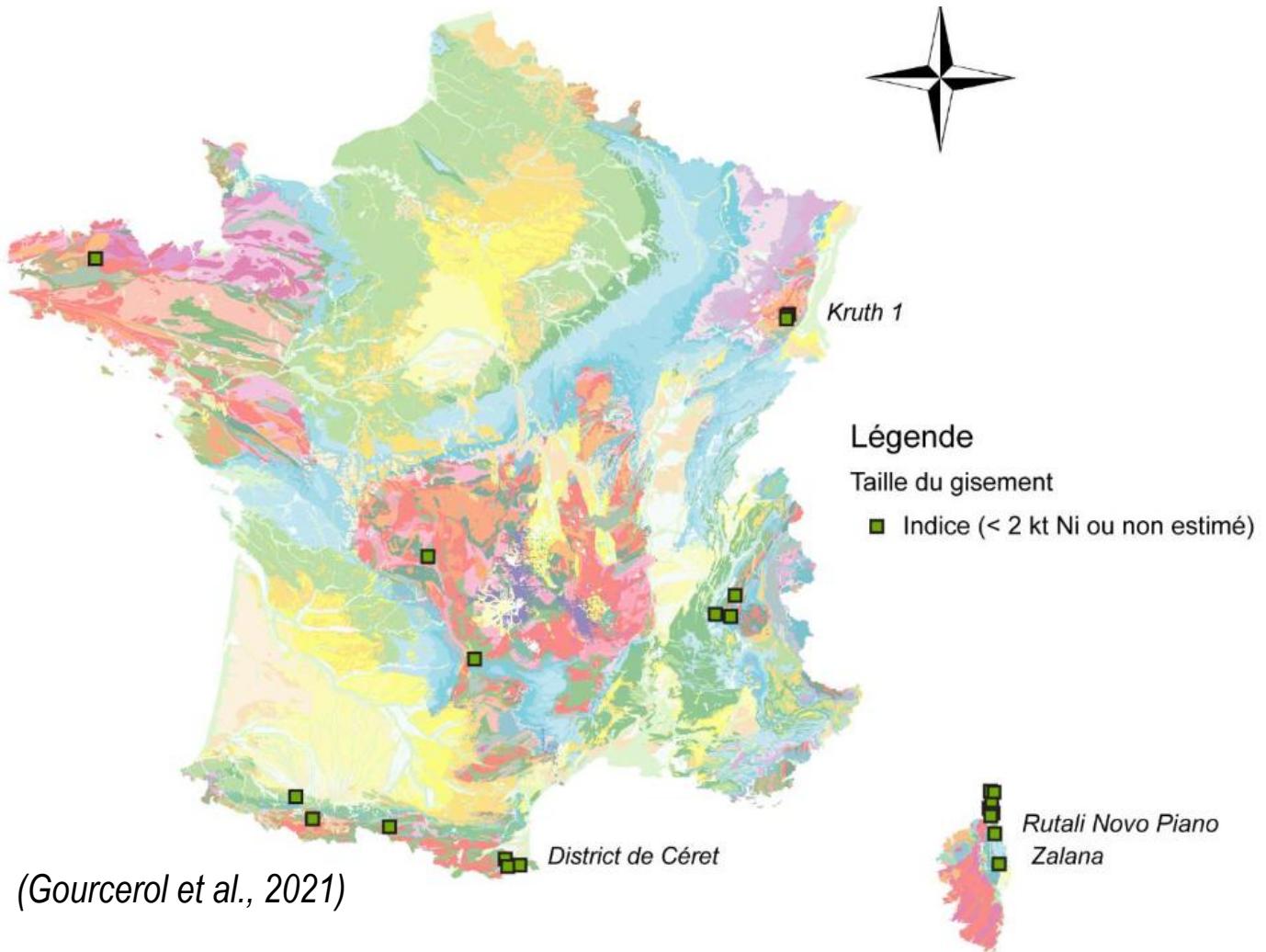
Réserves (2017)
777 Mt



Production historique cumulée en France (période gauloise à 1998) : 100 kt Cu
Réserve en France métropolitaine : 750 kt
Taux de recyclage: 40-50 %

(Mineralinfo BRGM; Gourcerol et al., 2021)

Nickel

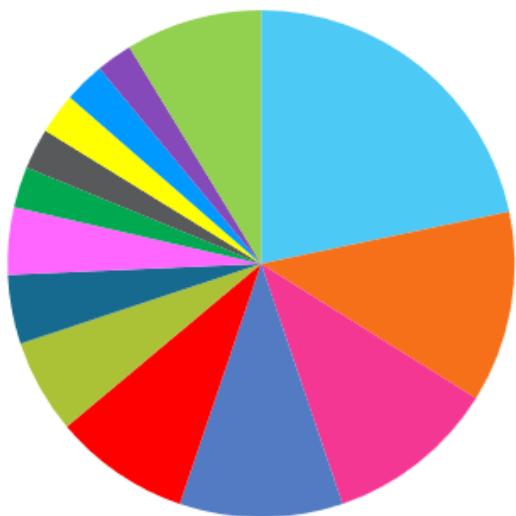


Production historique cumulée en France : 235 kt Ni (Nouvelle Calédonie 6,2 Mt)
Réserve en France métropolitaine : 0 (Nouvelle Calédonie 5,6 Mt)
Taux de recyclage: 60 %

Nickel

Production (2015)

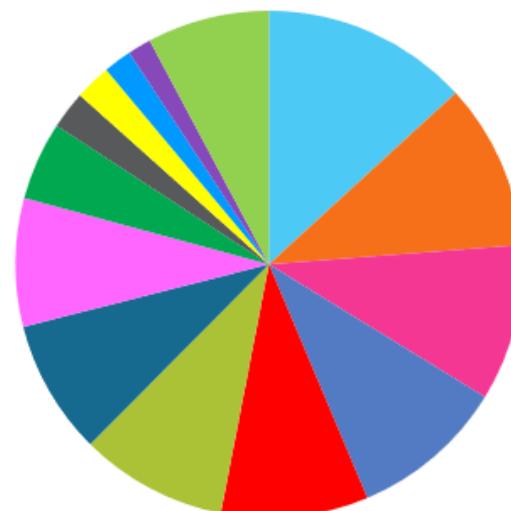
2,15 Mt



Philippines 21,7%
Russie 12,2%
Canada 10,9%
Australie 10,4%
Nouvelle-Calédonie 8,7%
Indonésie 6,0%
Brésil 4,4%
Chine 4,3%
Afrique du Sud 2,6%
Cuba 2,6%
Guatemala 2,6%
Colombie 2,6%
Madagascar 2,3%
Autres 8,7%

Réserves (2015)

69 Mt



Russie 13,2%
Philippines 10,6%
Indonésie 10,0%
Cuba 9,9%
Chine 9,4%
Australie 9,4%
Canada 8,6%
Nouvelle-Calédonie 8,2%
Brésil 5,0%
Guatemala 2,4%
Madagascar 2,3%
Etats-Unis 1,8%
Afrique du Sud 1,5%
Autres 7,8%

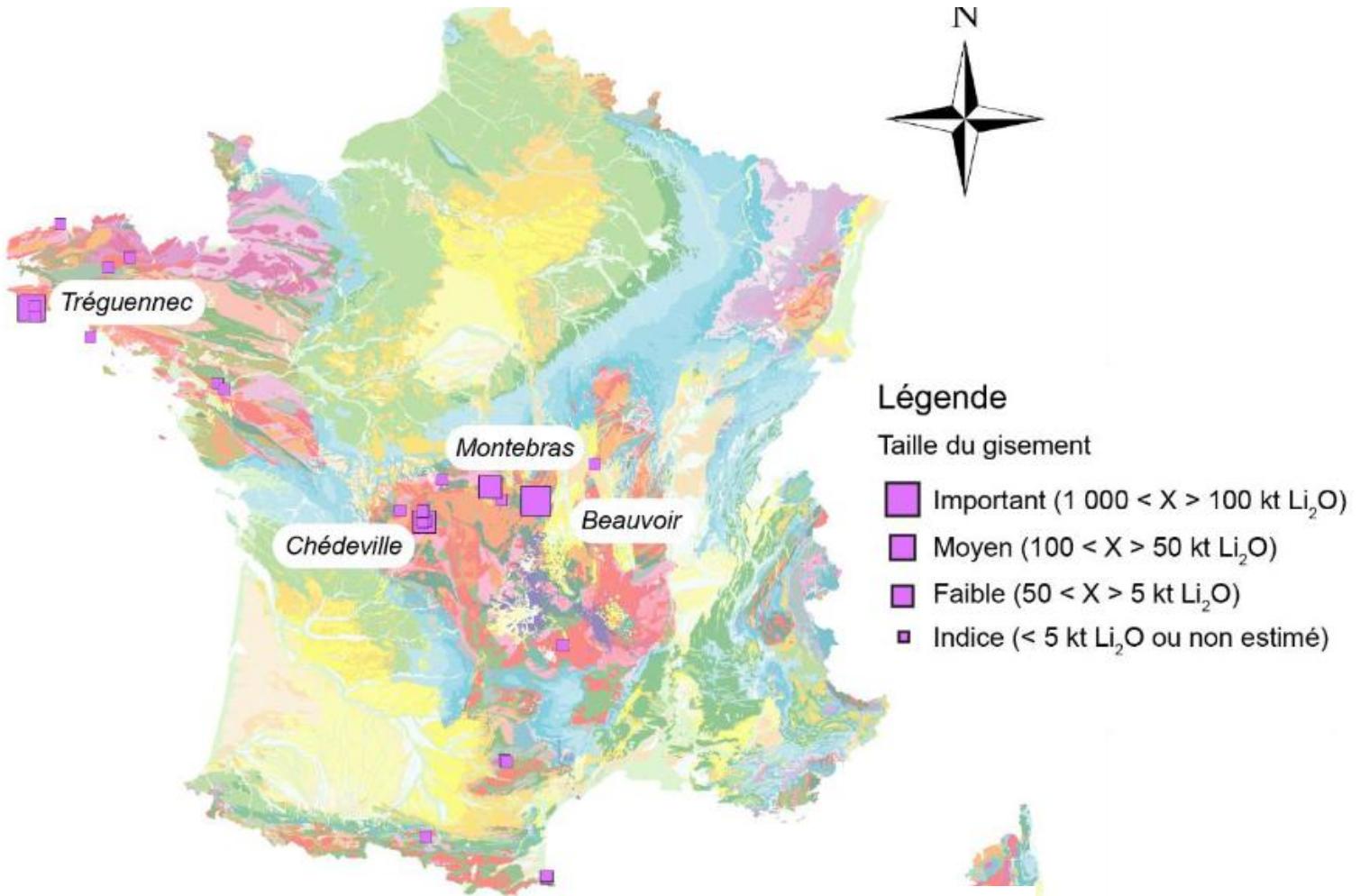
Production historique cumulée en France : 235 kt Ni (Nouvelle Calédonie 6,2 Mt)

Réserve en France métropolitaine : 0 (Nouvelle Calédonie 5,6 Mt)

Taux de recyclage: 60 %

(USGS; Mineralinfo BRGM; Gourcerol et al., 2021)

Lithium



Production historique cumulée en France : 9 kt

Réserve en France (Beauvoir): 350 kt

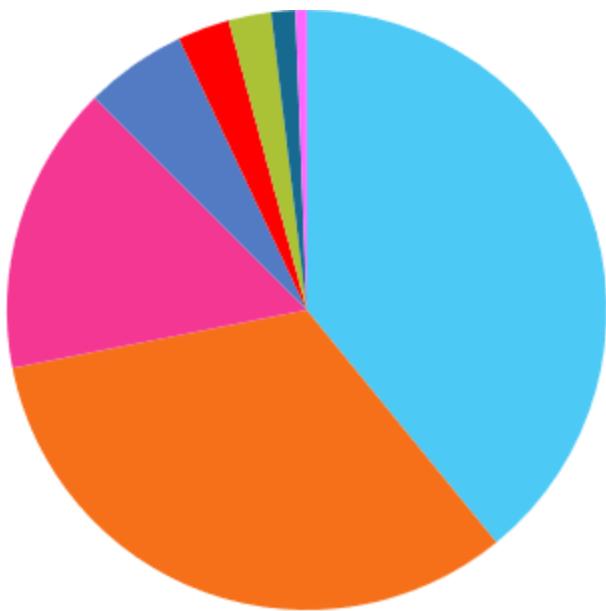
Taux de recyclage: 1 %

(Gourcerol et al., 2021)

Lithium

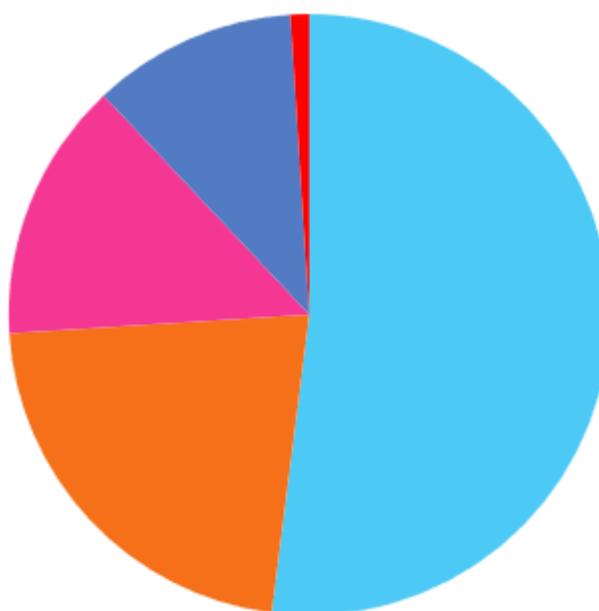
Production (2016)

36,5 Mt



Réserves (2017)

14,5 Mt

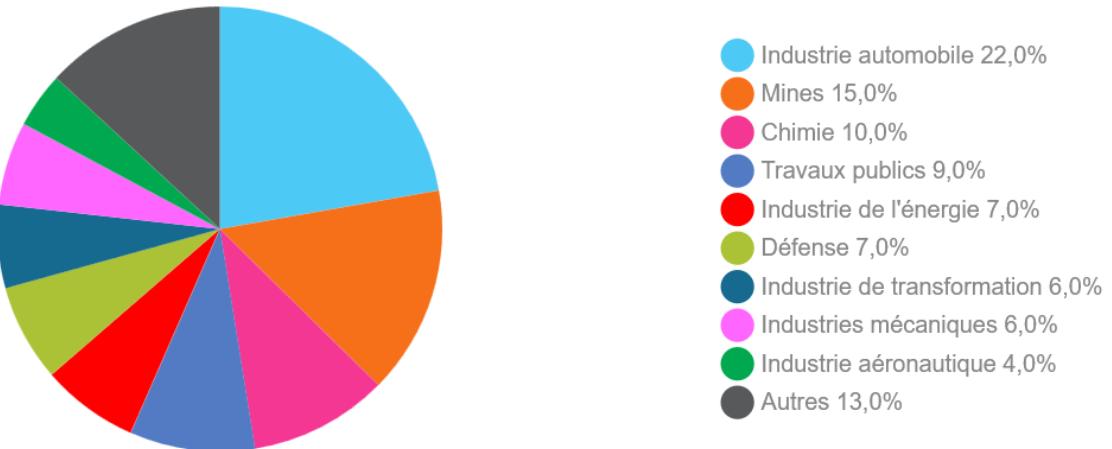


Production historique cumulée en France : 502 t

Réserve en France (Beauvoir): 350 kt

Taux de recyclage: 1 %

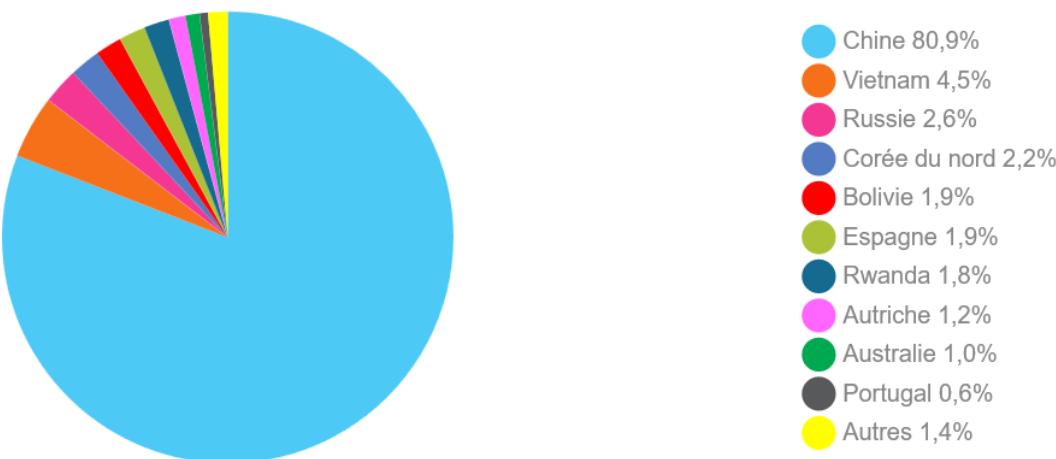
Répartition des usages du tungstène par filière en 2019



Consommation mondiale en 2020 91 500 t

Source de données : [ITIA, 2020](#)

Production minière de tungstène en 2023

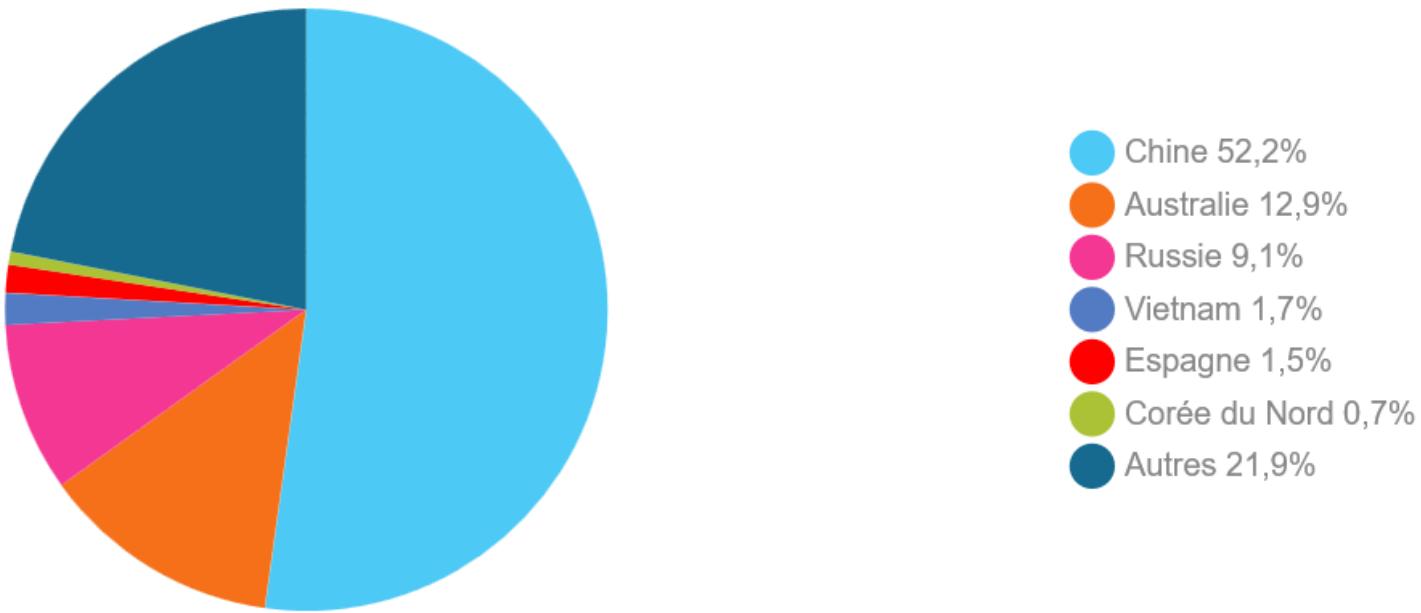


Production minière en 2023 78 kt W

Source de données : [USGS, 2024](#)

Concentration élevée : IHH = 0,66

Répartition des réserves de tungstène en 2022



Réserves mondiales en 2023 4,4 Mt W

Source de données : [USGS 2024](#)

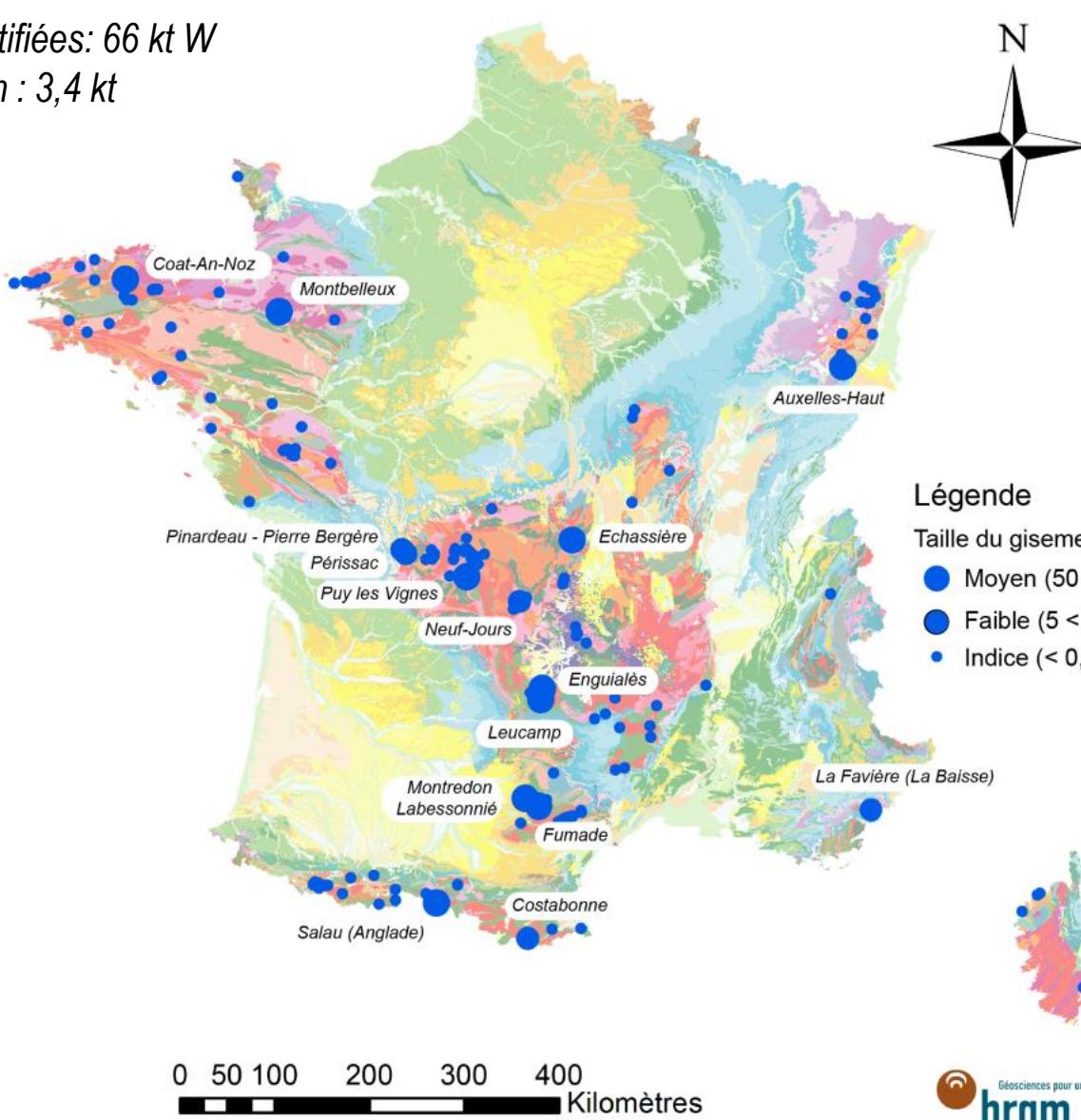
Concentration modérée : IHH = 0,35

Le tungstène en France métropolitaine

Gisements et indices

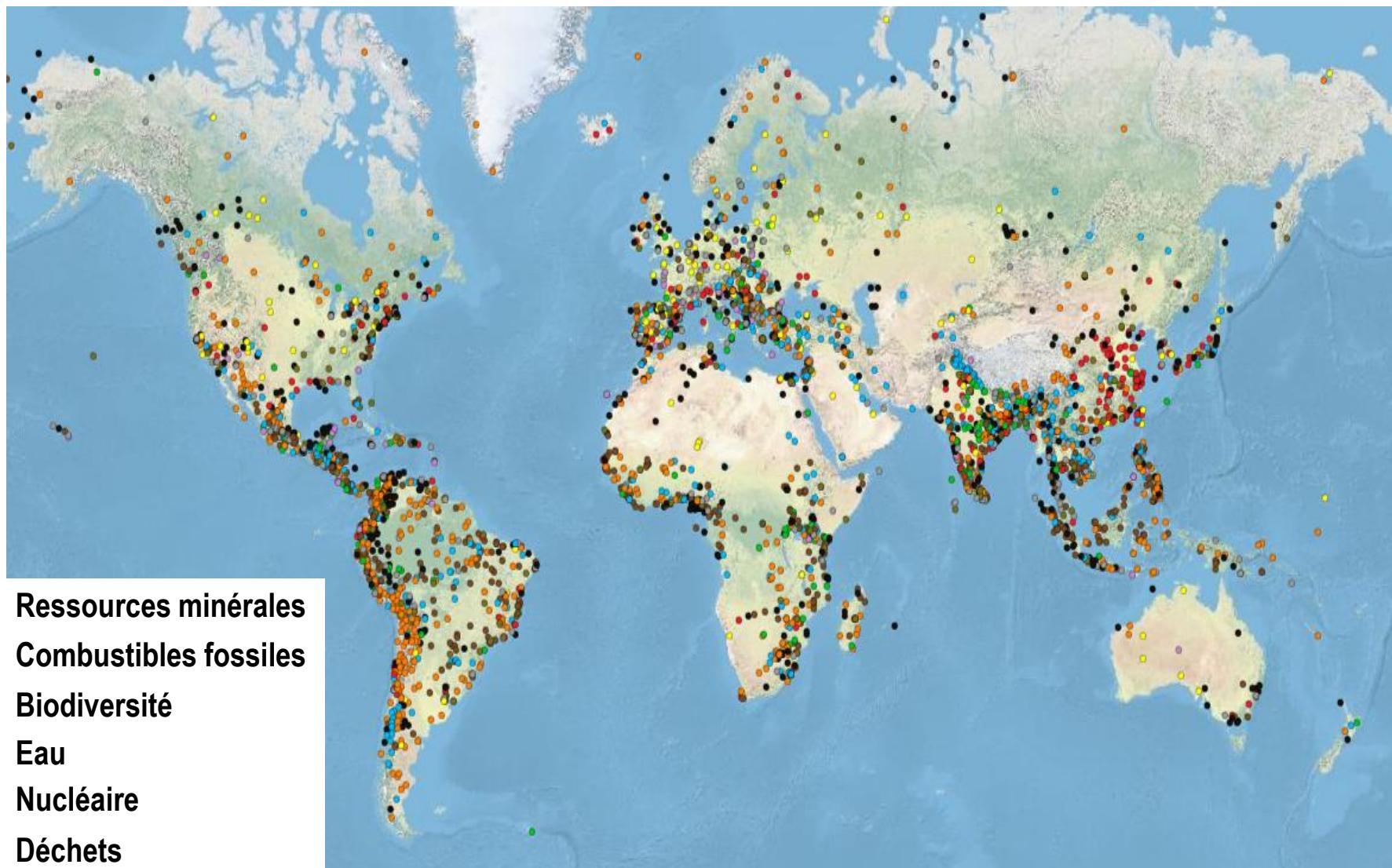
Réserves identifiées: 66 kt W

Consommation : 3,4 kt



Source des données:
Base de données ARMADA / ProMine au 09/06/2021
Carte géologique de la France au 1:1 000 000

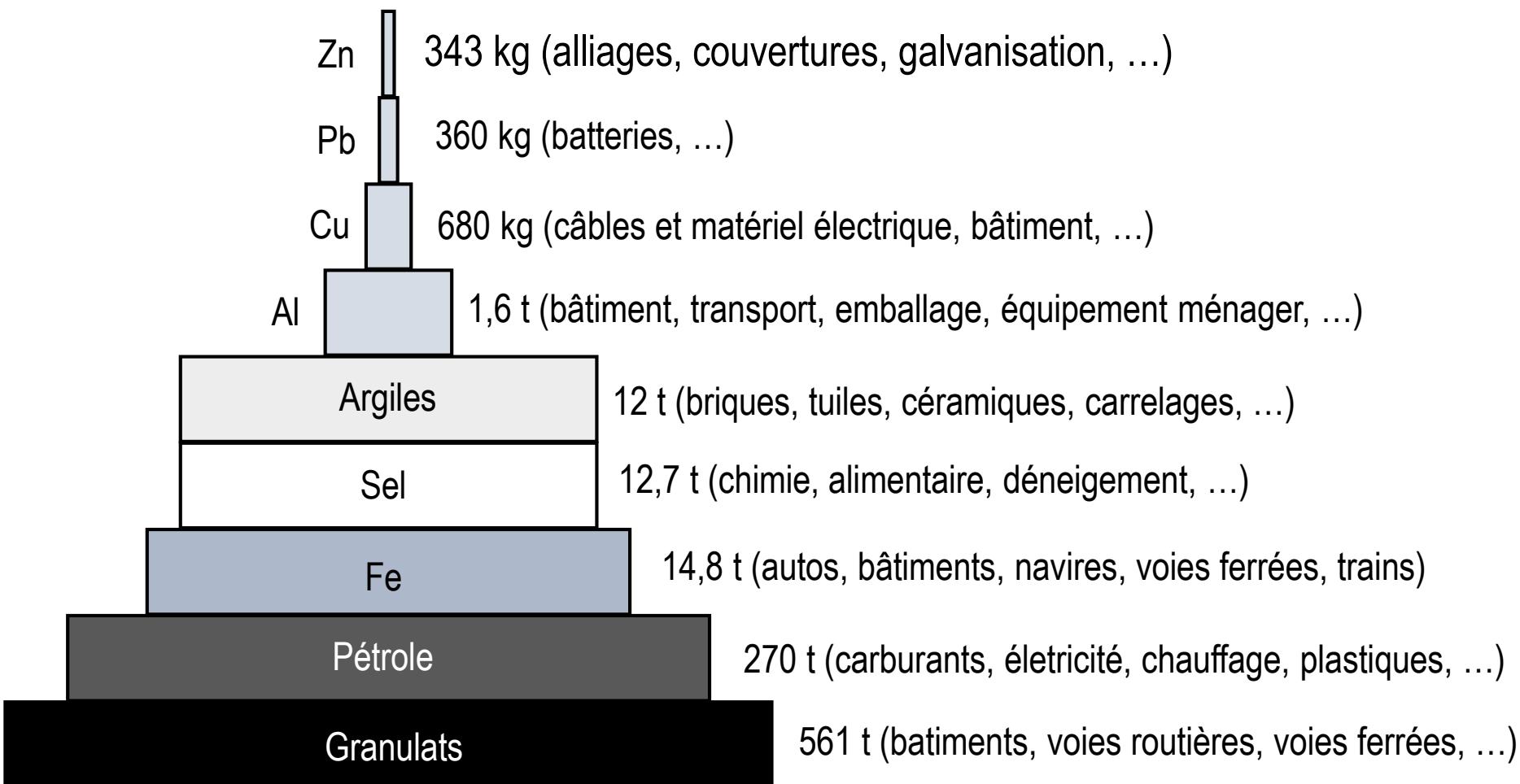
Conflits liés aux ressources



Atlas de justice environnementale: <https://ejatlas.org>

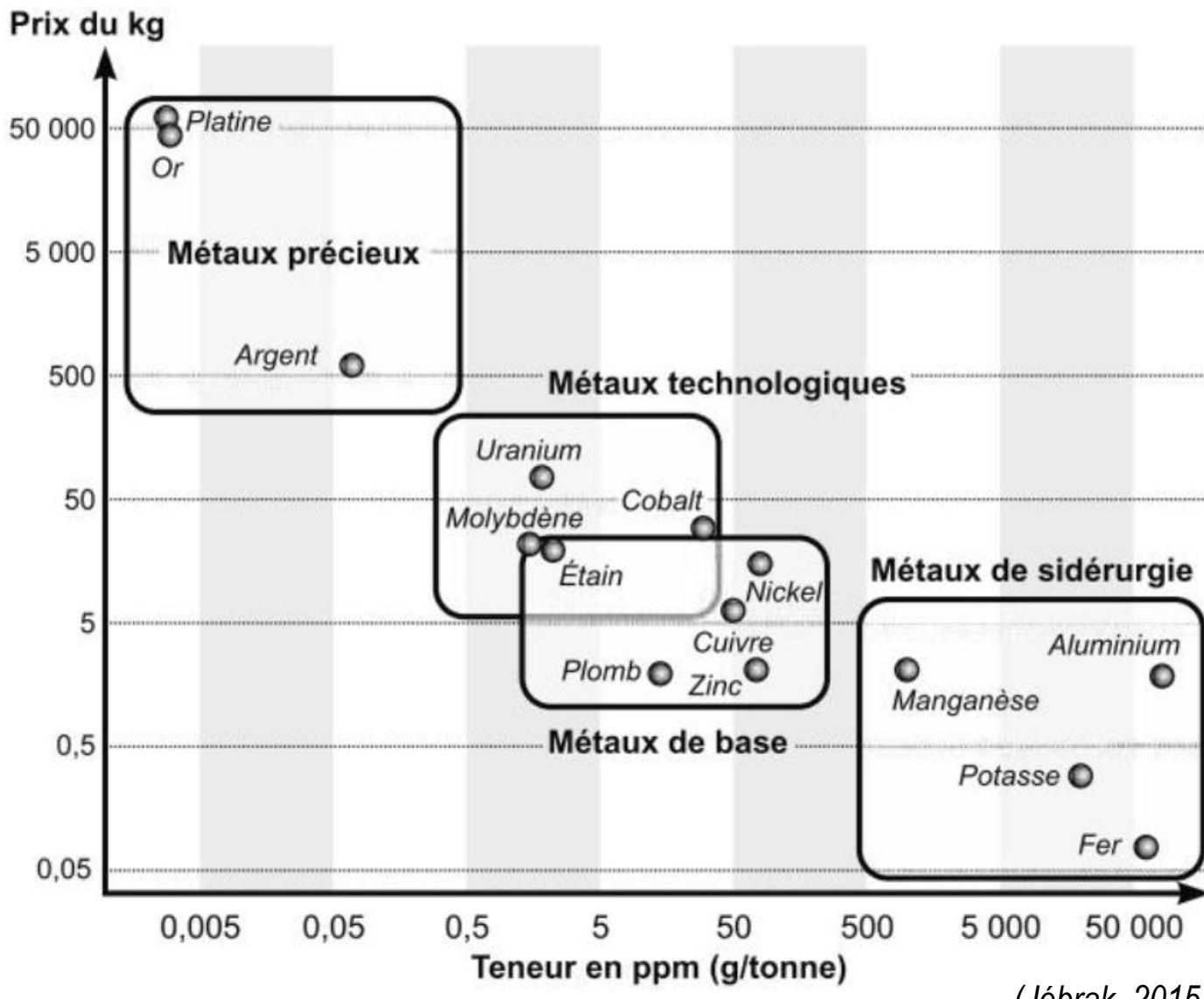
Ressources minérales

Consommation moyenne de ressources minérales par habitant en pays industrialisé au cours d'une vie



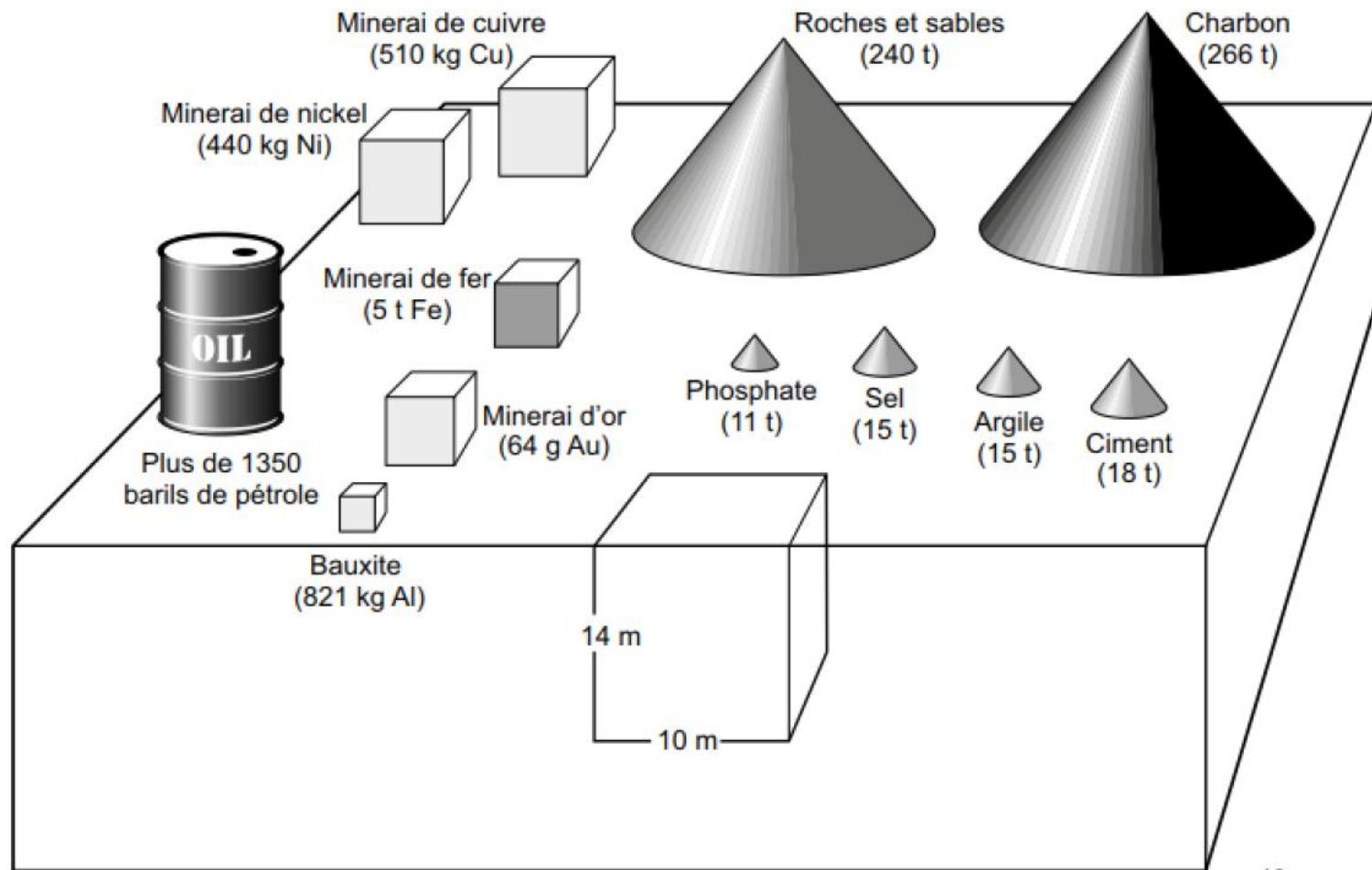
(Varet, 2005; Jébrak & Marcoux, 2008)

Ressources minérales : prix/teneur



Ressources minérales

Consommation moyenne de ressources minérales par habitant en pays industrialisé au cours d'une vie



(Jébrak & Marcoux, 2008)

Ressources minérales en Europe : depuis l'émergence des BRICS (fin 90's), enjeu économique



Acteurs du cycle de l'énergie

Décideurs politiques

Matières non renouvelables ou phénomènes renouvelables

Source d'énergie primaire

Production

Energie secondaire

Transport
Distribution
(Stockage)

Energie finale

Utilisation

Energie utile

Consommateurs

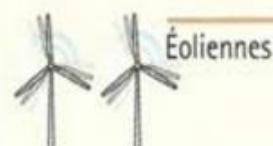
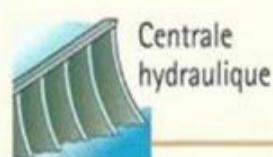
Compagnies minières

Publics

Privé

Associations

PRODUCTION TRANSPORT DISTRIBUTION



Centrale
thermique



Centrale
nucléaire

Transformateur élévateur de tension

Grand consommateur industriel



400 000 V

Transformateur abaisseur de tension

225 000 V
90 000 V
63 000 V



400 V
230 V

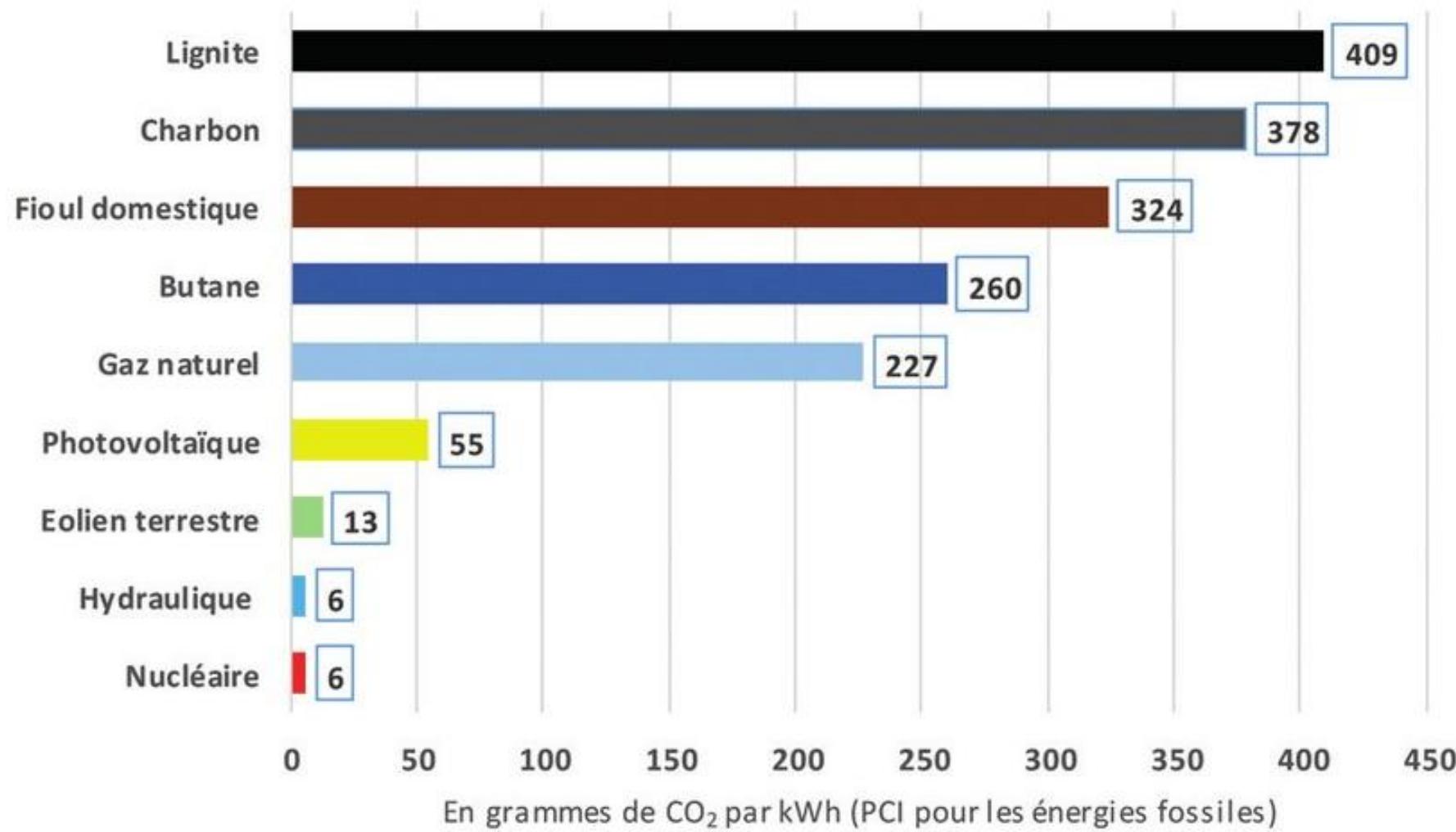


20 000 V

Poste source

Industriels, Réseau National, Distributeurs

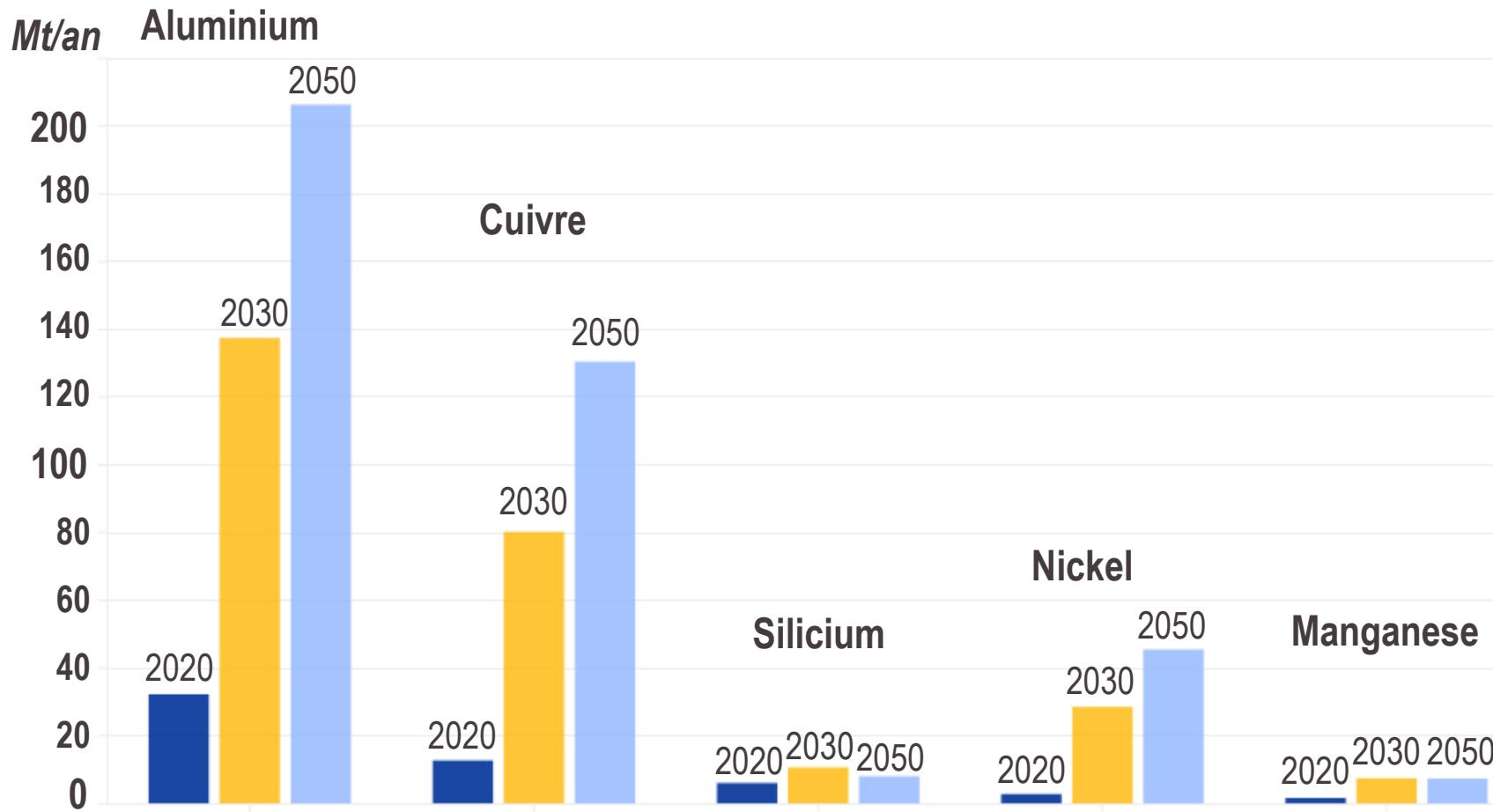
Empreinte Carbone de la production d'énergie



(ADEME, 2019)

Empreinte matière de la transition énergétique en Europe

Consommation en Europe cumulées entre 2020-2050 de ressources minérales

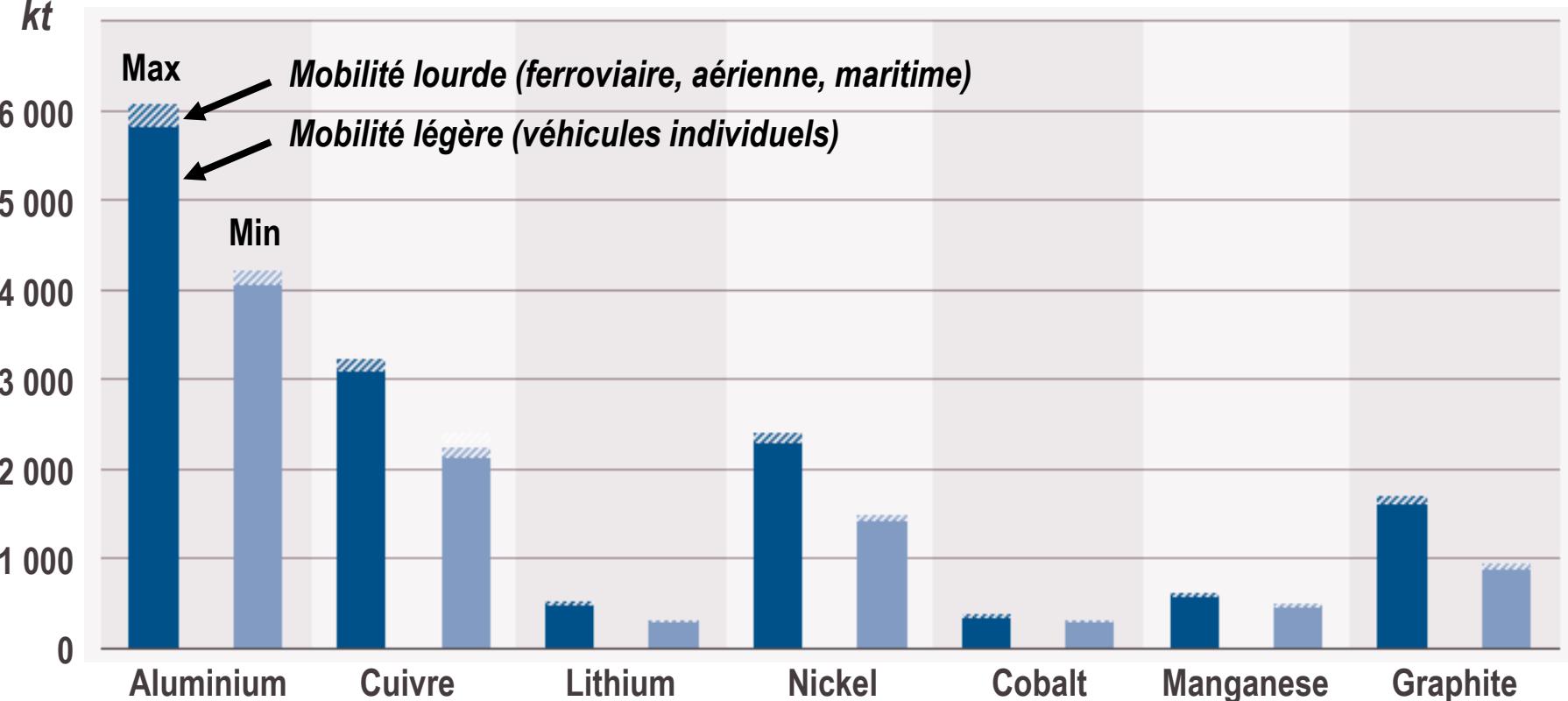


(Commission Européenne)

Empreinte matière de la transition énergétique

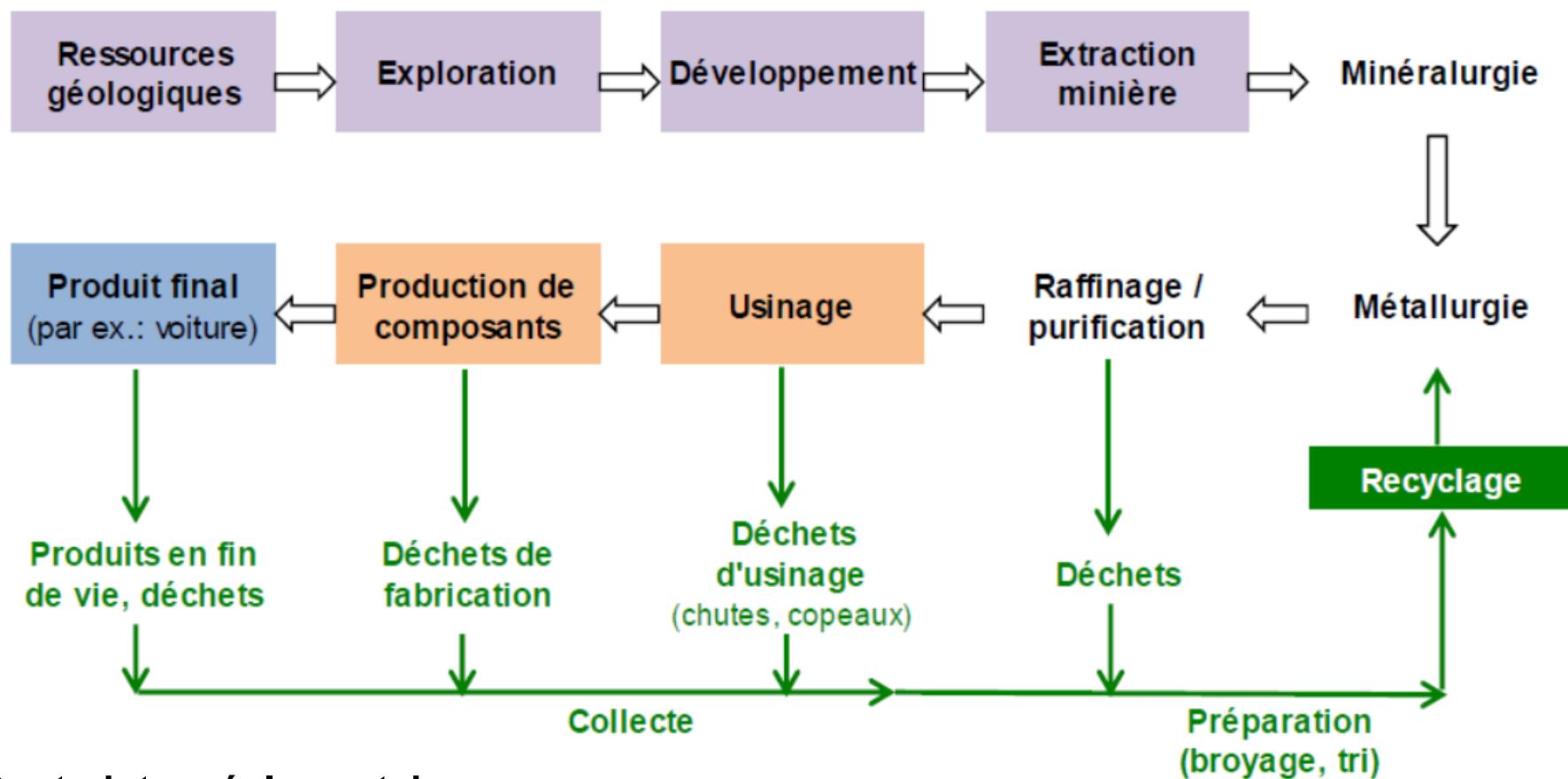
Consommation cumulées entre 2020-2050 de ressources minérales pour les batteries des véhicules électriques

kt



(RTE, 2021)

Chaine de valeur d'une matière première minérale

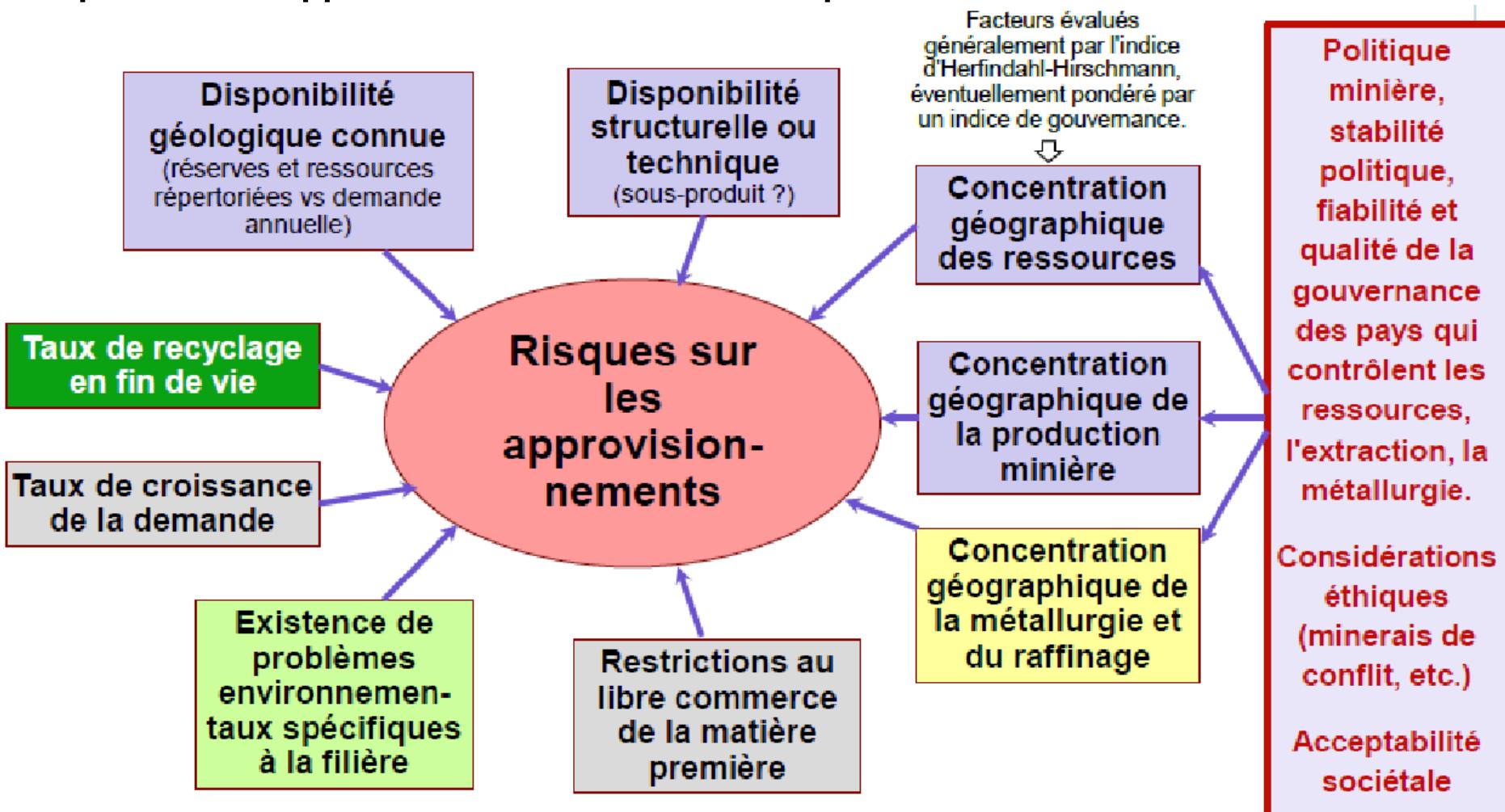


Contraintes réglementaires:

- environnementales
- sanitaires
- protection des travailleurs
- commerciales

(RTE, 2022)

Risques sur les approvisionnements en matière première minérale



Décalage temporel :

- Evolution technologique
- Evolution des besoins, démographie
- Mise en œuvre d'un projet minier : 10-15 ans

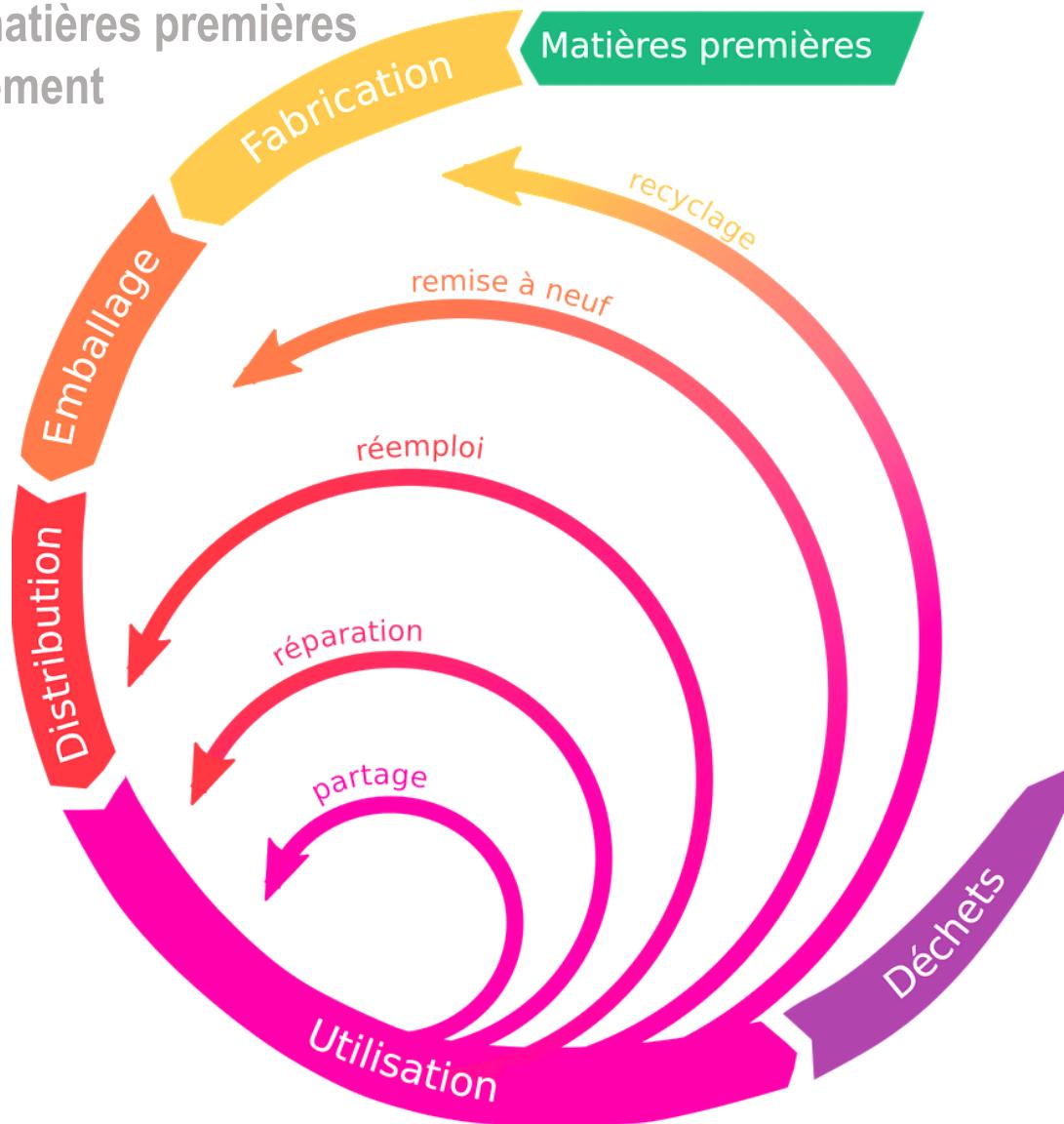
(RTE, 2022)

Economie circulaire:

- Assurer le bien-être des individus
- Approvisionnement durable en matières premières
- Diminuer l'impact sur l'environnement

Approvisionnement durable des ressources du sous-sol :

- Rapprocher les lieux d'exploitation, de transformation et d'utilisation
- Identifier les besoins
- Quantifier les ressources potentielles
- Evaluer les impacts environnementaux et socio-économiques
- Co-construire des scénarios



Economie circulaire:

Economie libérale des ressources naturelles et de l'environnement :

La nature est un sous-système économique capable, avec la technologie et la croissance, de remplacer le capital naturel

Economie écologique de préservation de la nature:

L'économie est un sous-système naturel (entropie)

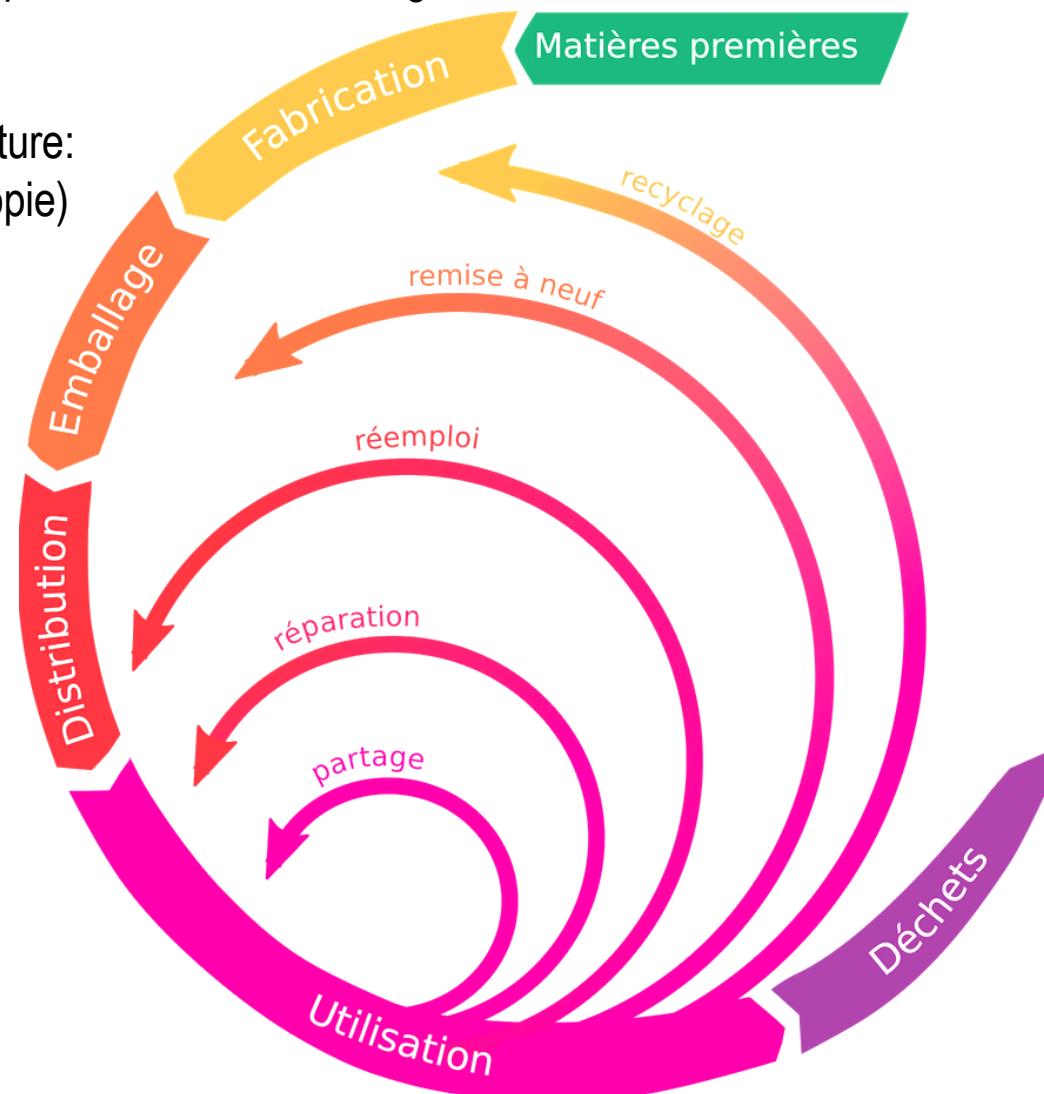
Terre système fermé (+ entropie)

Société d'équilibre, pacifiste, responsable

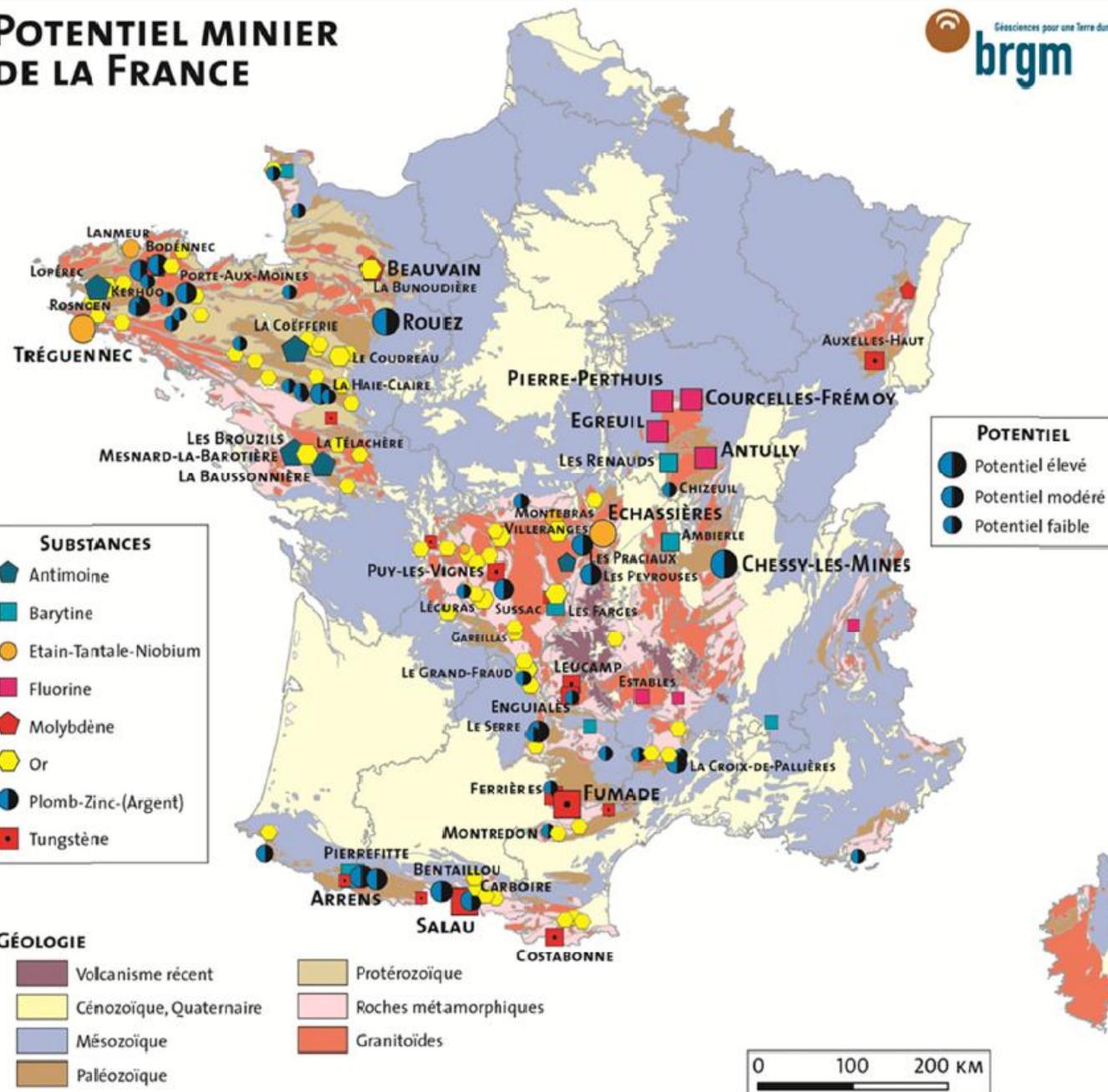
Besoins essentiels

Echanges:

- Matière
- Energie
- Capitaux s.l., « objets, êtres humains, organisations,
- Information/connaissance



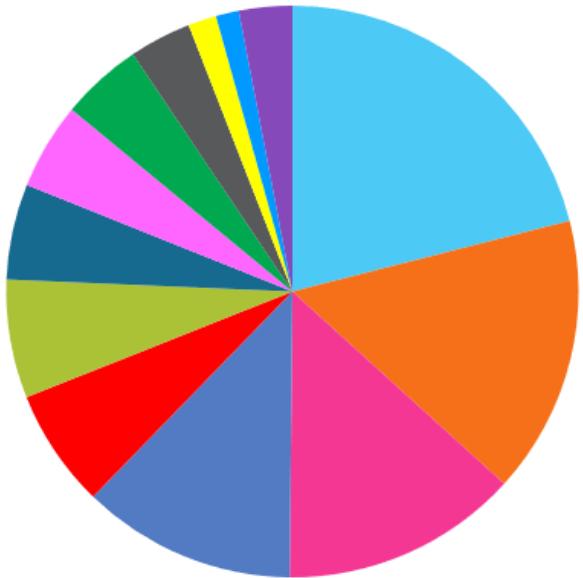
POTENTIEL MINIER DE LA FRANCE



Titane

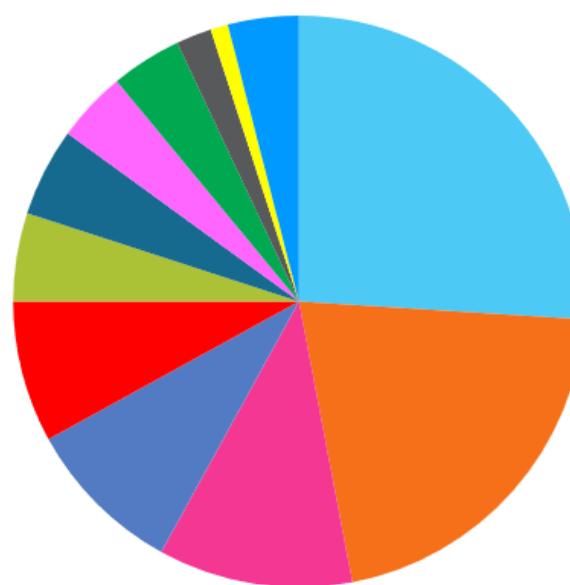
Production (2017)

7,4 Mt



Réserves (2017)

831 Mt

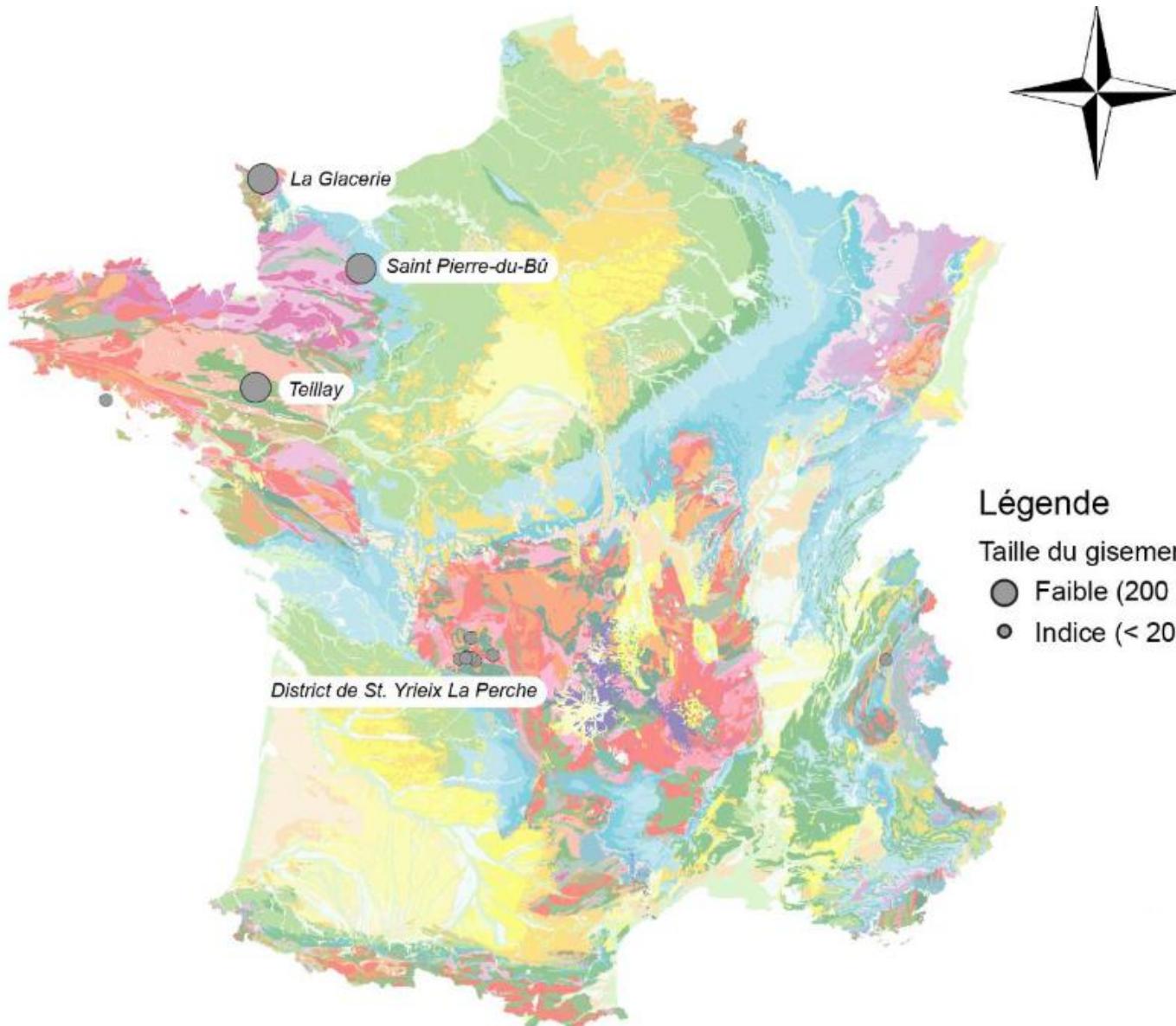


Production historique cumulée en France : 66 t

Réserve en France (Beauvoir): 1040 kt

Taux de recyclage: 0-90 %

Titane

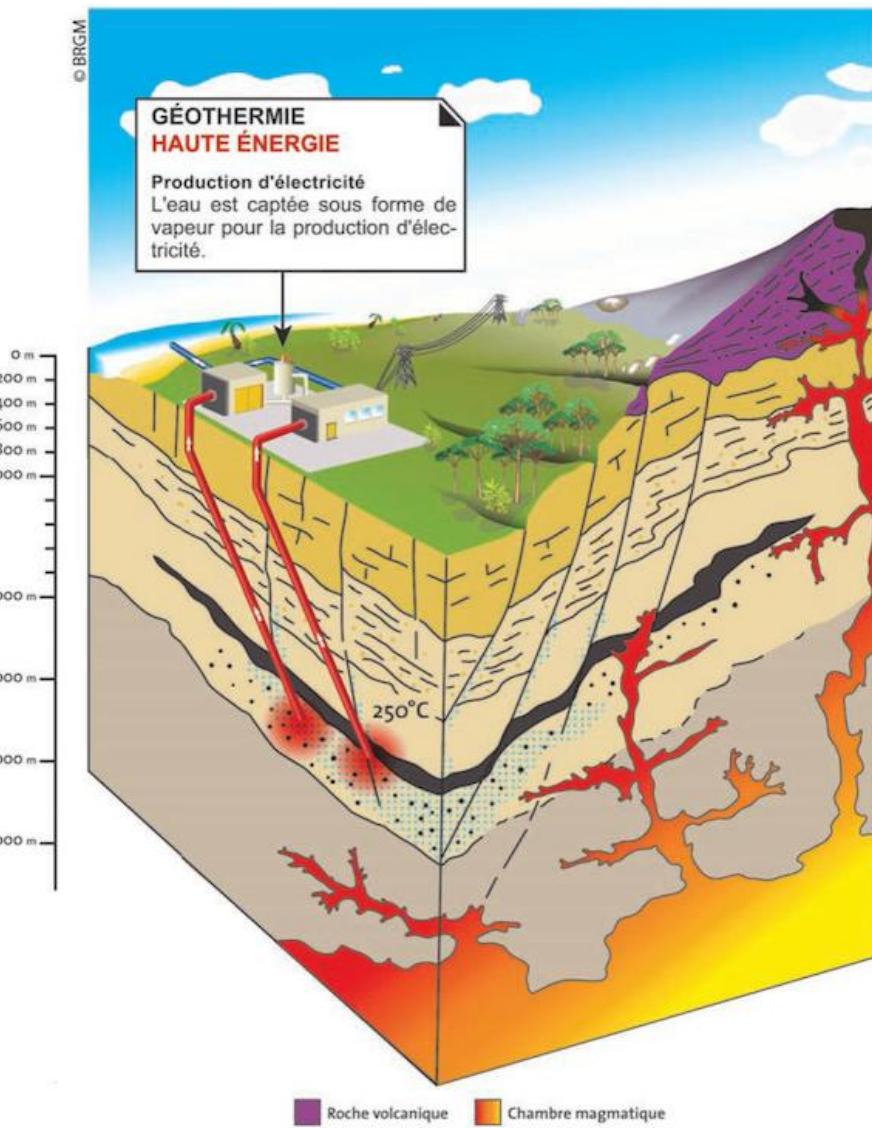


Légende

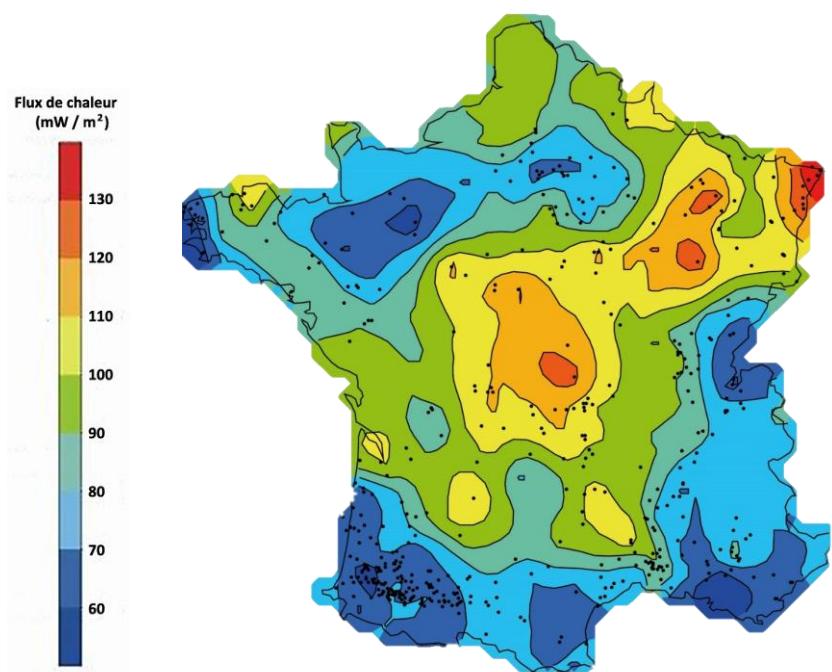
Taille du gisement

- Faible ($200 \text{ kt} > X > 20 \text{ kt TiO}_2$)
- Indice ($< 20 \text{ kt TiO}_2$ ou non estimé)

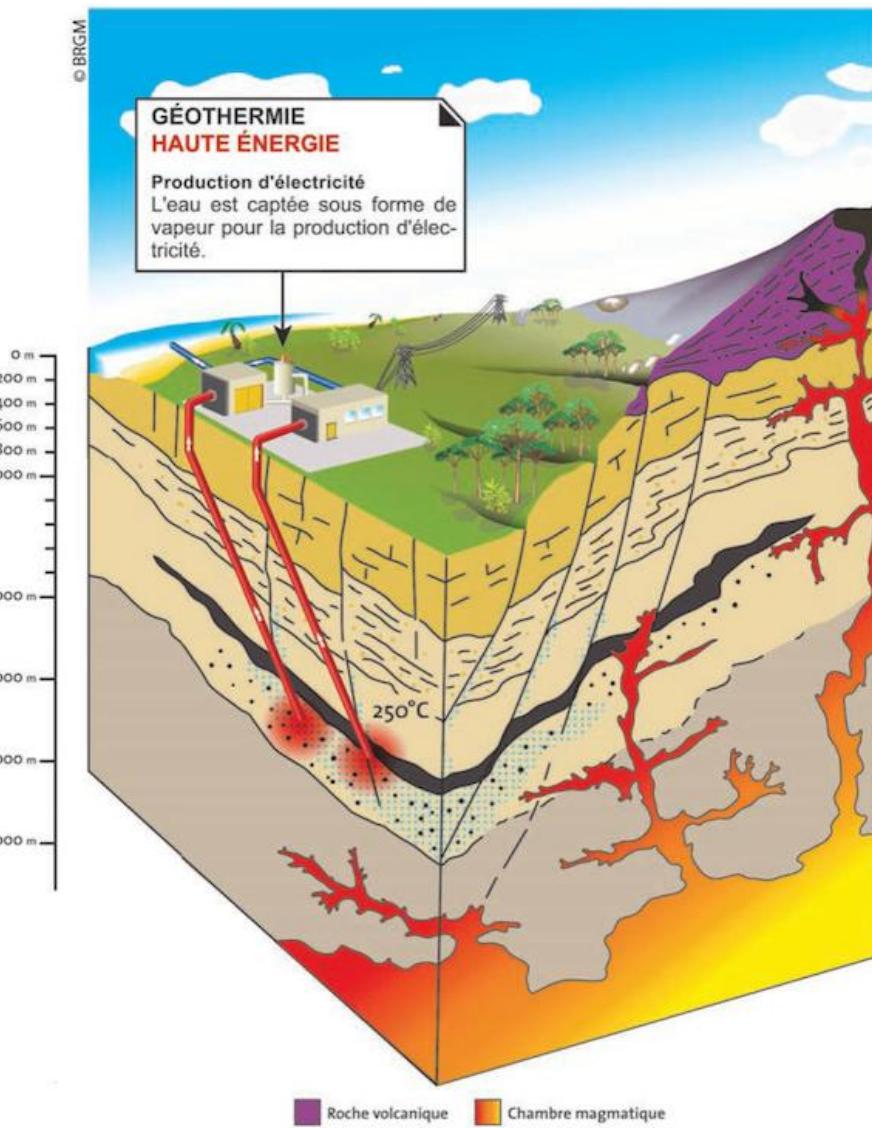
Géothermie profonde



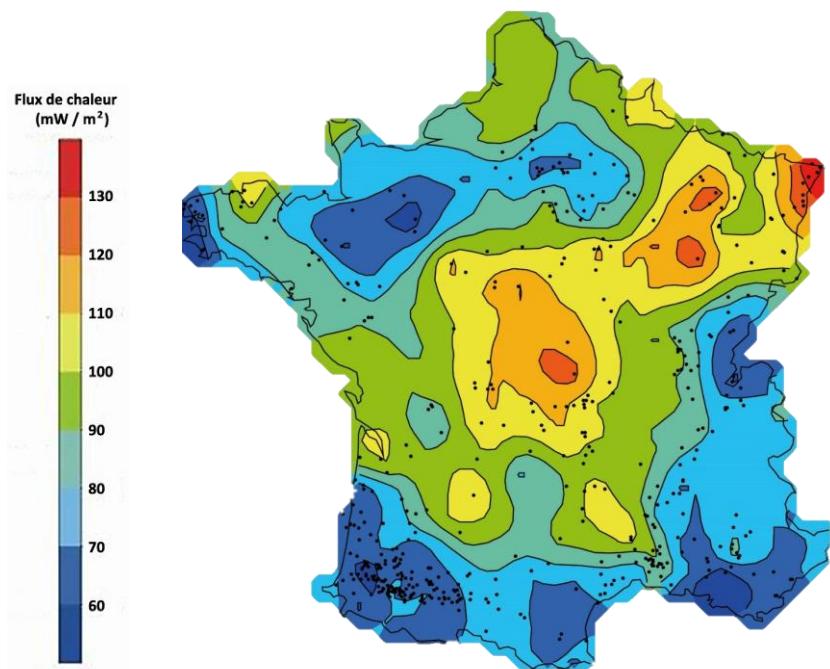
Flux de chaleur à la surface



Géothermie profonde

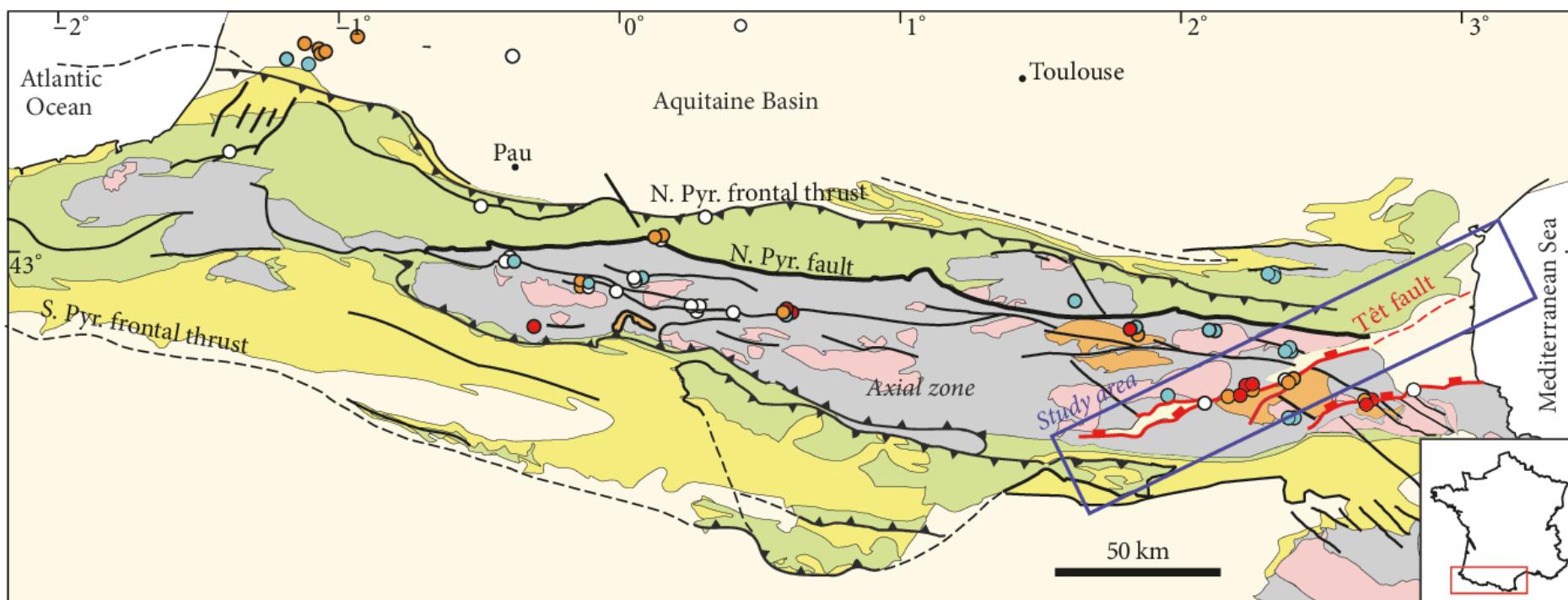


Flux de chaleur à la surface



Géothermie profonde

Potentiel du front des Pyrénées



 Tertiary in forelands
 Pyrenean tertiary
 Mesozoic

(1) (3) Paleozoic basement
(2)
 (1) Granite
 (2) Gneiss
 (3) Paleoproterozoic sediments

 Hot springs and temperatures (°C)
 25 75

Postdoc ISIFOR Audrey TAILLEFER
(Mars 2024)

(Taillefer et al, 2017)

	Niveau d'accroissement* de la demande par rapport aux consommations et réserves connues actuellement pour...		Disponibilité des réserves	Risque de monopole sur le marché	Concurrence entre usages	Recyclabilité	Substituabilité	Impact social et environnemental
	... le système électrique	... les batteries des véhicules électriques						
Cuivre								
Aluminium								
Cobalt								
Lithium								
Nickel								
Graphite								
Silicium								
Acier								
Niveau de criticité	<u>Niveau d'accroissement :</u>		<u>Niveau de criticité actuel :</u>		<u>Tendance future :</u>			
NC non concerné	élevé		élevé		à la hausse			
ND non disponible	moyen		moyen		stable			
	faible		faible		à la baisse			

	Niveau d'accroissement* de la demande par rapport aux consommations et réserves connues actuellement pour...		Disponibilité des réserves	Risque de monopole sur le marché	Concurrence entre usages	Recyclabilité	Substituabilité	Impact social et environnemental
	... le système électrique	... les batteries des véhicules électriques						
Argent	●	●	▶	▶	▶	▼	▼	▶
Manganèse	●	●	▲	▶	▲	▶	▶	▶
Béton	●	●	▲	▶	▲	▶	▶	▼
Terres rares	●	NC	▶	▼	▲	▶	▼	▼
Uranium	●	NC	▲	▶	▶	▼	▶	▶
Zirconium	●	NC	▶	▶	▶	▶	▶	▼
Zinc	ND	ND	▶	▶	▶	▶	▶	▼
Chrome	ND	ND	▼	▶	▼	▶	▼	▼

**Niveau
de criticité**NC non concerné
ND non disponibleNiveau
d'accroissement :

- élevé
- moyen
- faible

Niveau de
criticité actuel :

- élevé
- moyen
- faible

Tendance
future :

- ▲ à la hausse
- ▶ stable
- ▼ à la baisse

H																				He
Li	Be													B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg													Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn		Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd		In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb		Bi	Po	At	Rn		
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh			Uuo		

Lanthanides (Terres rares)	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Hm	Er	Tm	Yb
Actinides	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No



Stockage de l'énergie
Connectique
Economies d'énergie
Catalyse (automobile, piles à combustible)



Production et transport de l'électricité
Industrie électrique nucléaire
Photovoltaïque
Aimants permanents (véhicules électriques, éoliennes, TGV...)



Eclairage
Supraconducteurs

Compilation: P. Christmann, BRGM

Figure 2 : Matières premières nécessaires au secteur de l'énergie provenant de l'industrie minérale (à l'exception des gaz : H, He, Ne, Ar, Kr et Xe) (Source : BRGM).

Minéraux industriels (minéraux réfractaires tels que l'andalousite, certaines qualités de bauxite et de chromite, la sillimanite, les phosphates, la potasse, le sel, la silice, le soufre, etc.).

Exploitation à ciel ouvert

broyage, criblage, tamisage, lavage

Minéraux métallifères :

Exploitation minière à ciel ouvert ou souterraine,

Traitement physique et/ou chimique et/ou bactériologique du minerai pour produire un concentré (ou du métal), traitement métallurgique par divers procédés pour extraire le métal, raffinage en une ou plusieurs étapes pour produire un métal de pureté spécifique.

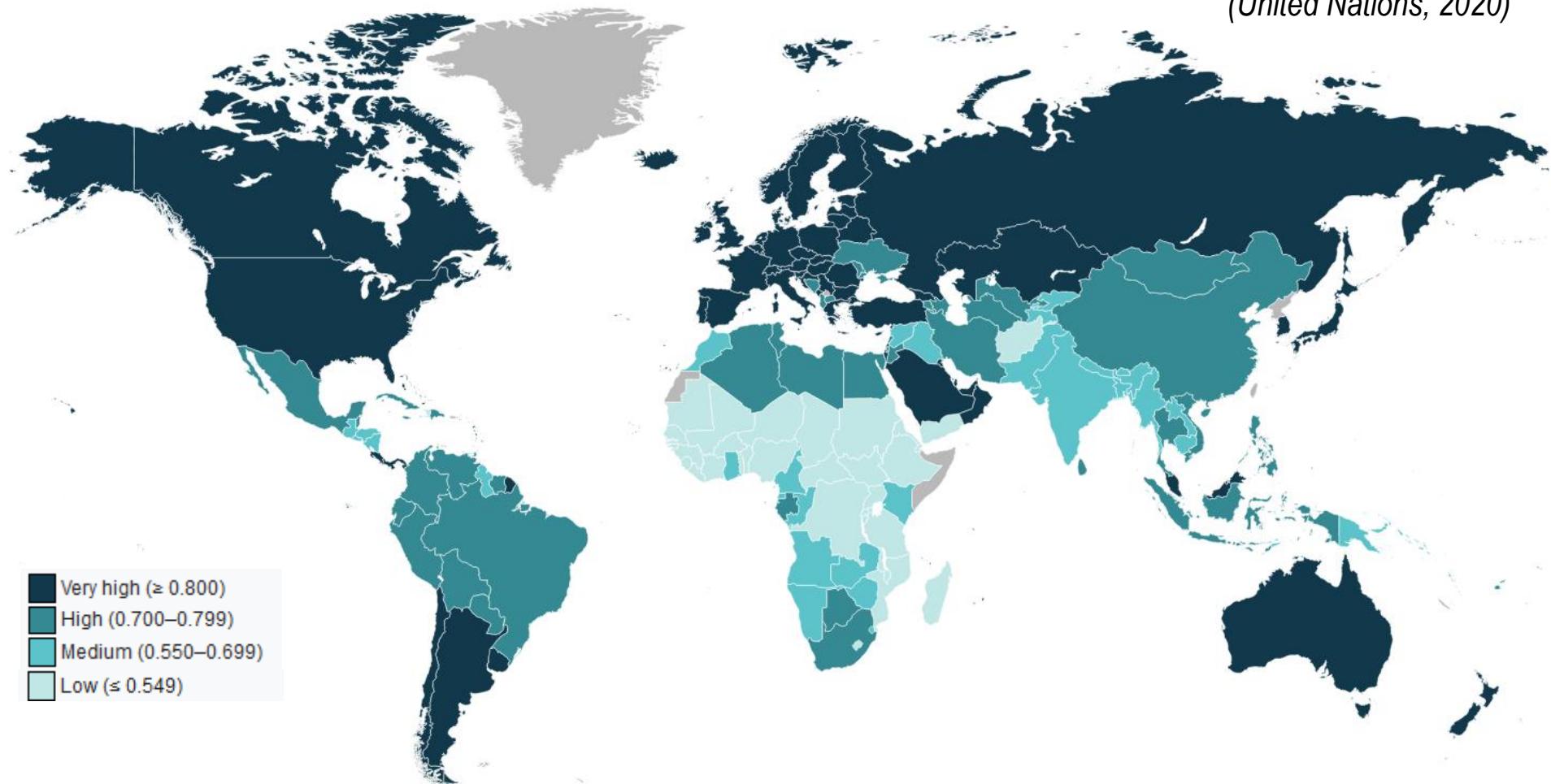
Les **substances de mines** qui sont listées à l'article L. 111-1 du code minier et sont régies par ce code. Les substances non-énergétiques, périmètre de la présente collection, sont principalement mais pas seulement des métaux (Tableau 1). Par dérogation au principe du Code civil qui veut que la propriété du fond emporte celle du tréfonds, ces substances n'appartiennent pas au propriétaire du sol.

Les **substances de carrières**, par défaut toutes les autres substances dont l'exploitation relève du Code de l'environnement en tant qu'installations classées. Leur exploitation nécessite l'accord du propriétaire du sol

Ces bilans globaux masquent des inégalités “Nord” - “Sud”

Indice de développement humain (2020)

(United Nations, 2020)

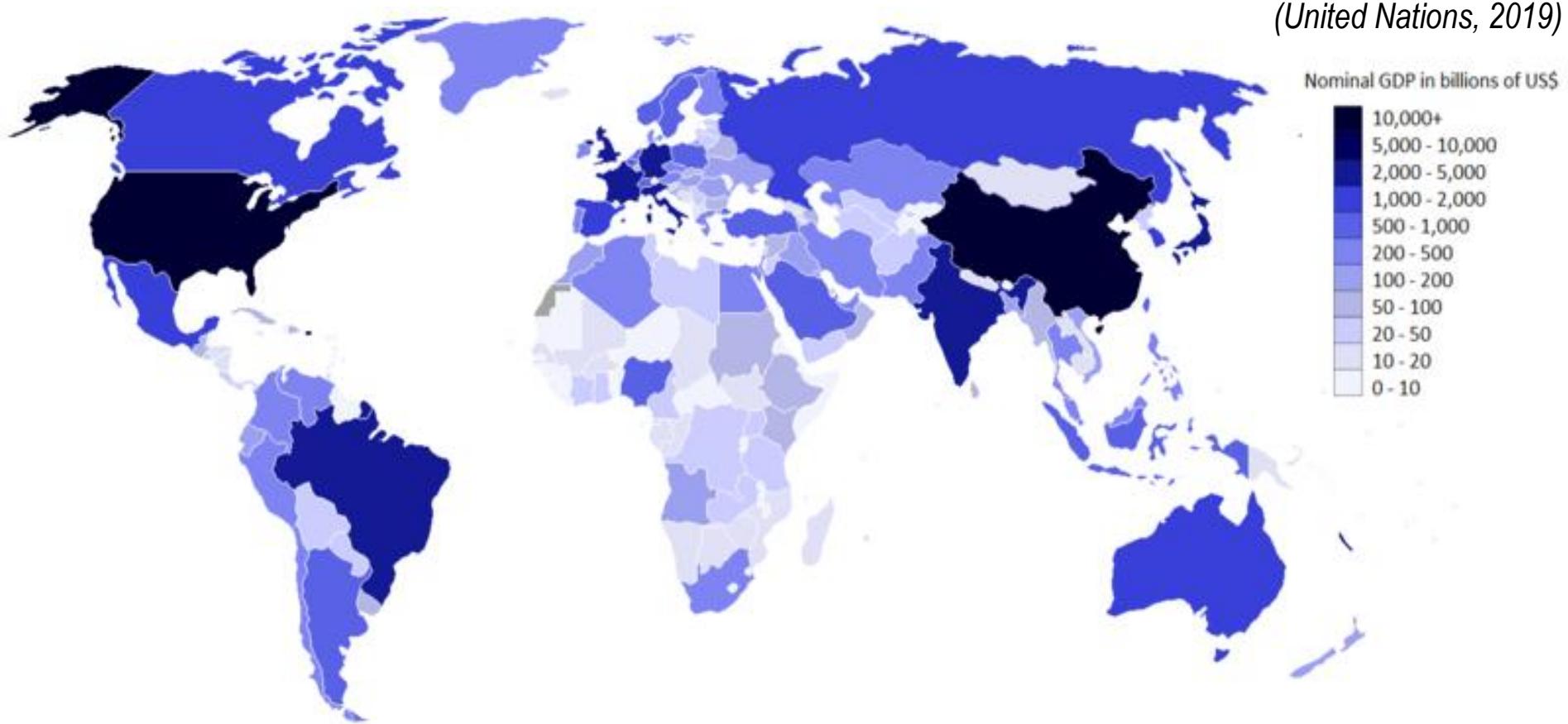


(espérance de vie, santé, éducation, conditions de vie, ...)

Ces bilans globaux masquent des inégalités “Nord” - “Sud”

Produit Intérieur Brut (2014)

(United Nations, 2019)



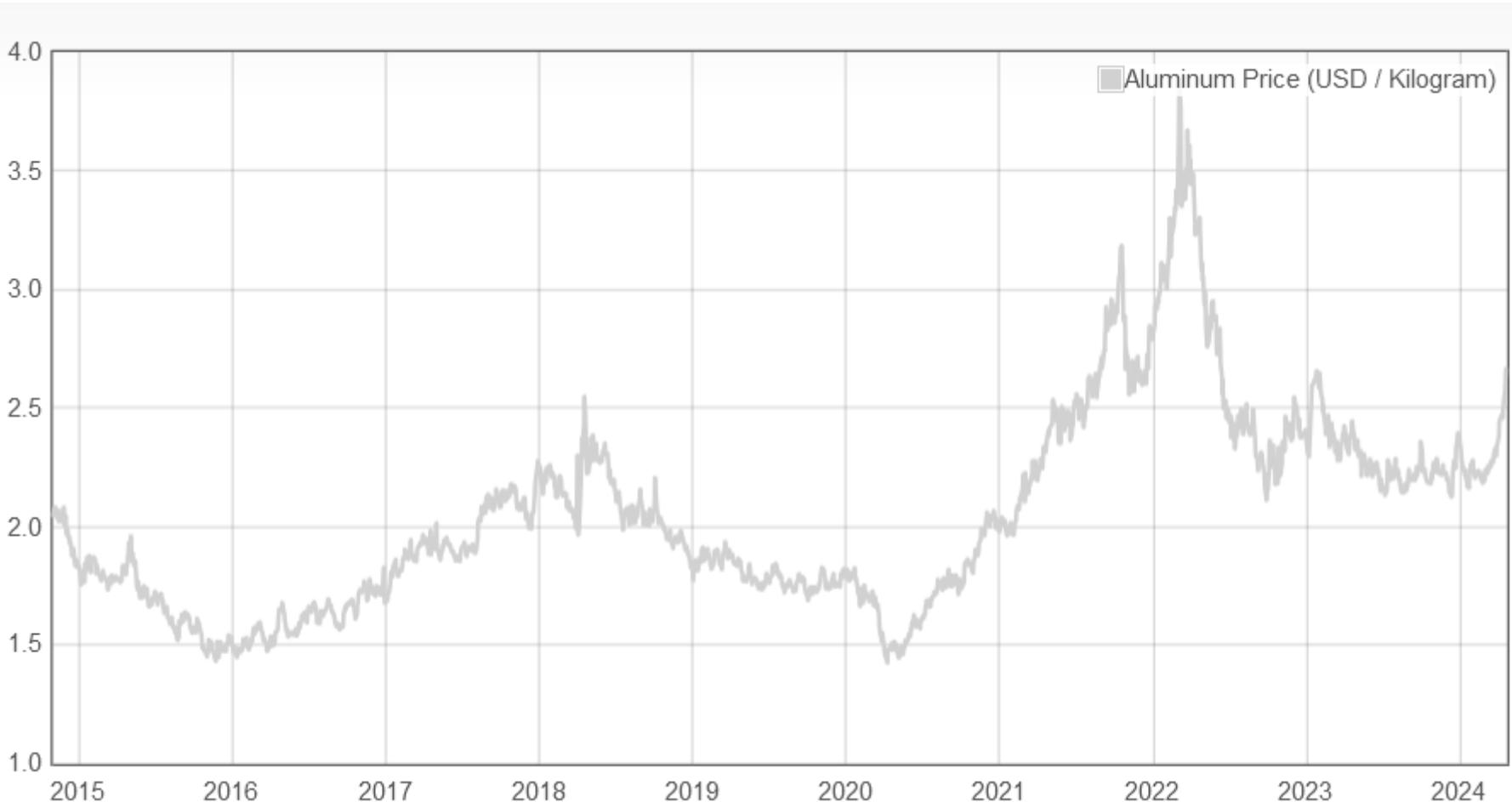
Gross Domestic Product (GDP): valeur des biens et services produits au sein d'un pays (PIB)

Gross National Product (GNP): valeur des biens et services d'un pays échanges internationaux inclus (PNB)

Transition énergétique pour la croissance verte 2015:

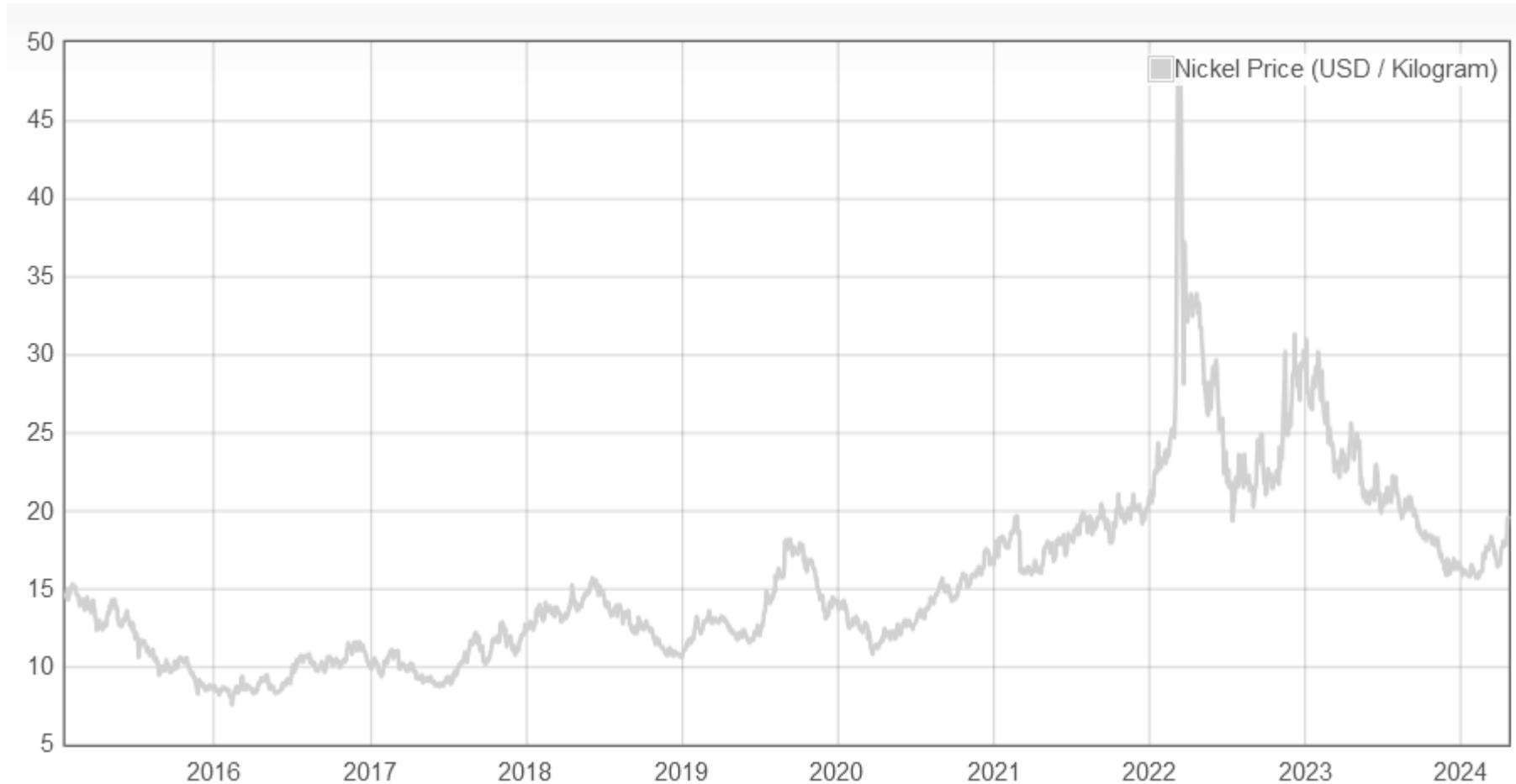
« le Gouvernement soumet au Parlement, tous les cinq ans, une stratégie nationale de transition vers l'économie circulaire, incluant notamment un plan de programmation des ressources nécessaires aux principaux secteurs d'activités économiques qui permet d'identifier les potentiels de prévention de l'utilisation de matières premières, primaires et secondaires, afin d'utiliser plus efficacement les ressources, ainsi que les ressources stratégiques en volume ou en valeur et de dégager les actions nécessaires pour protéger l'économie française ».



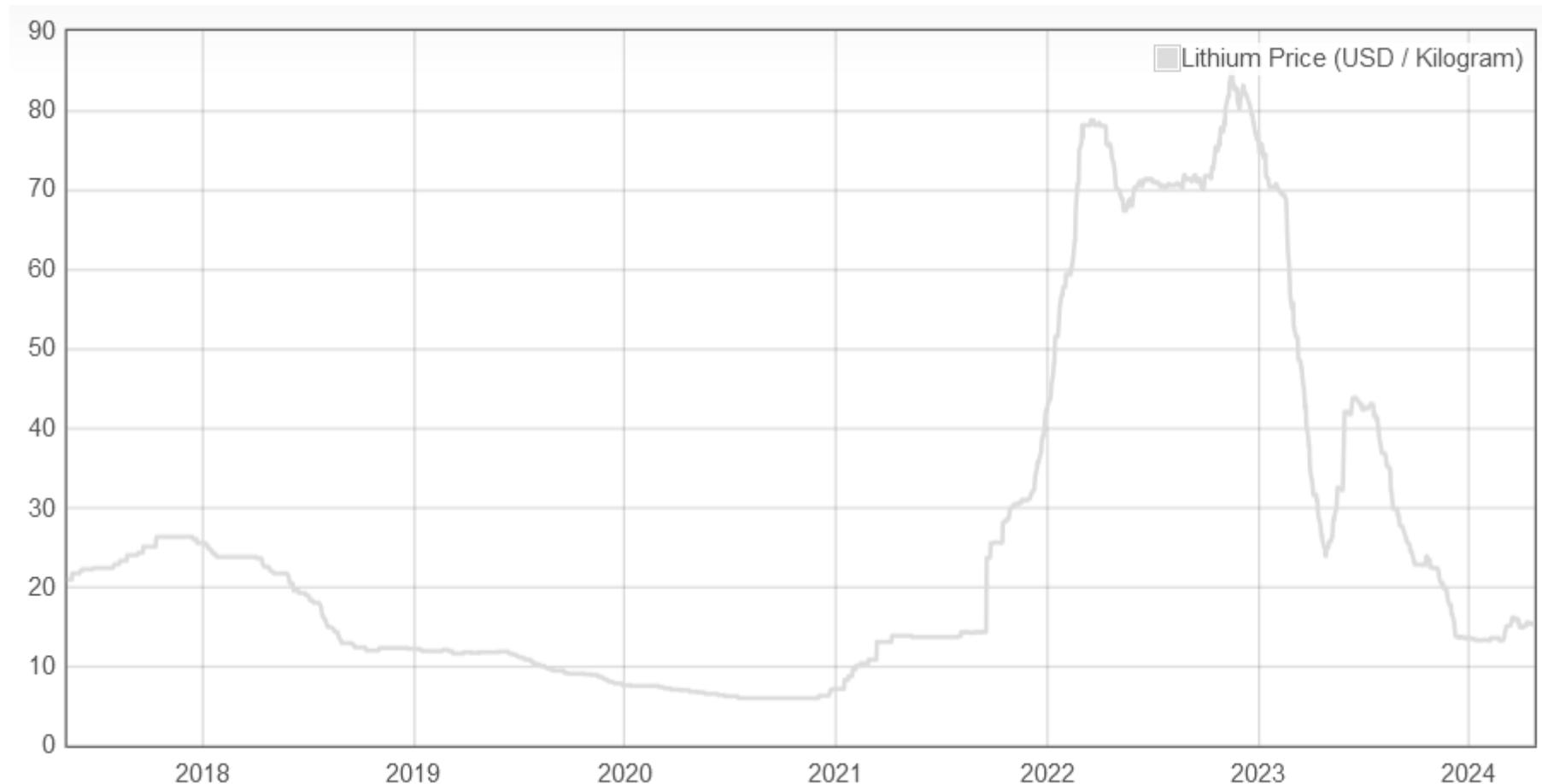


Dailyprice





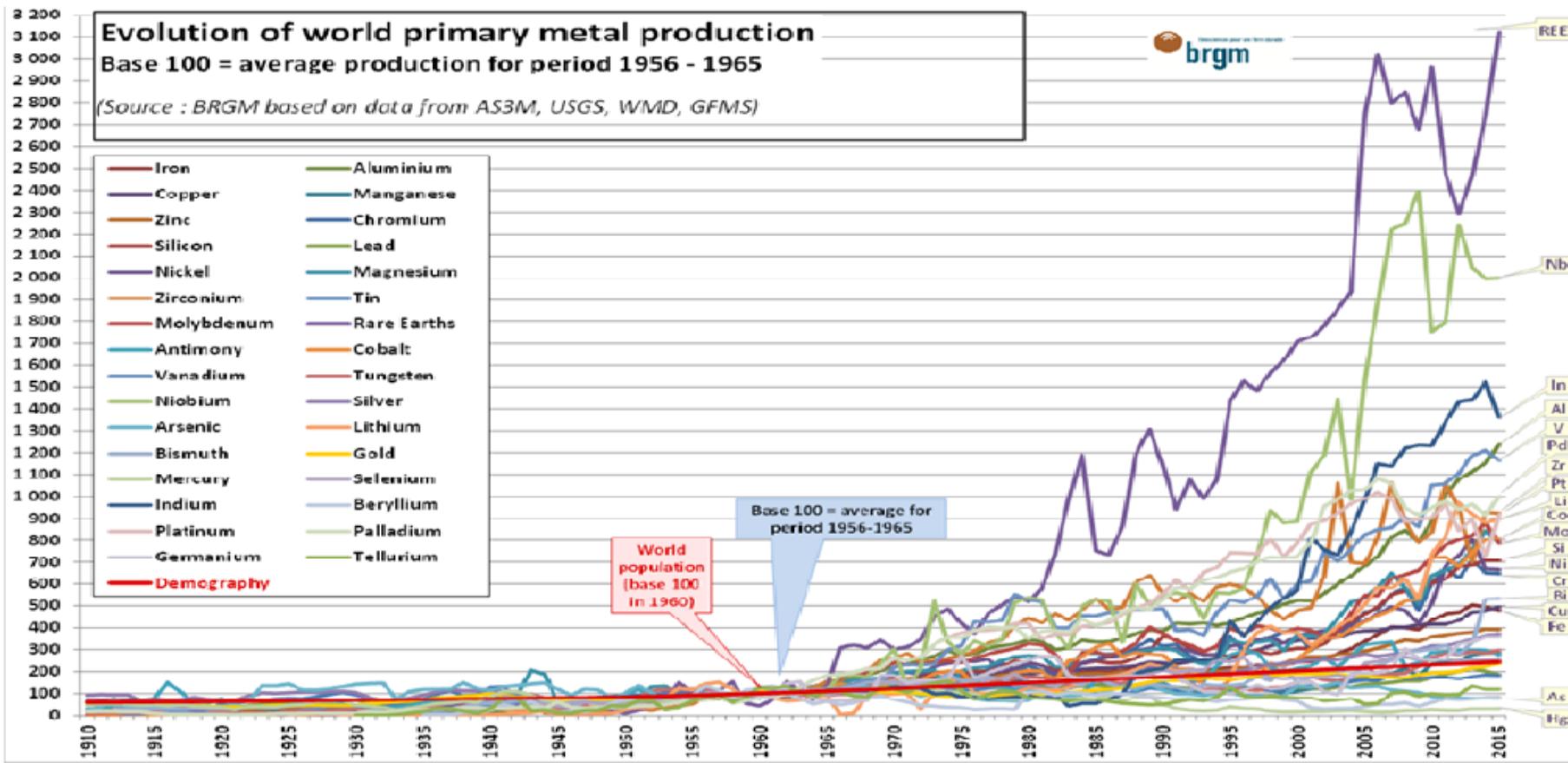






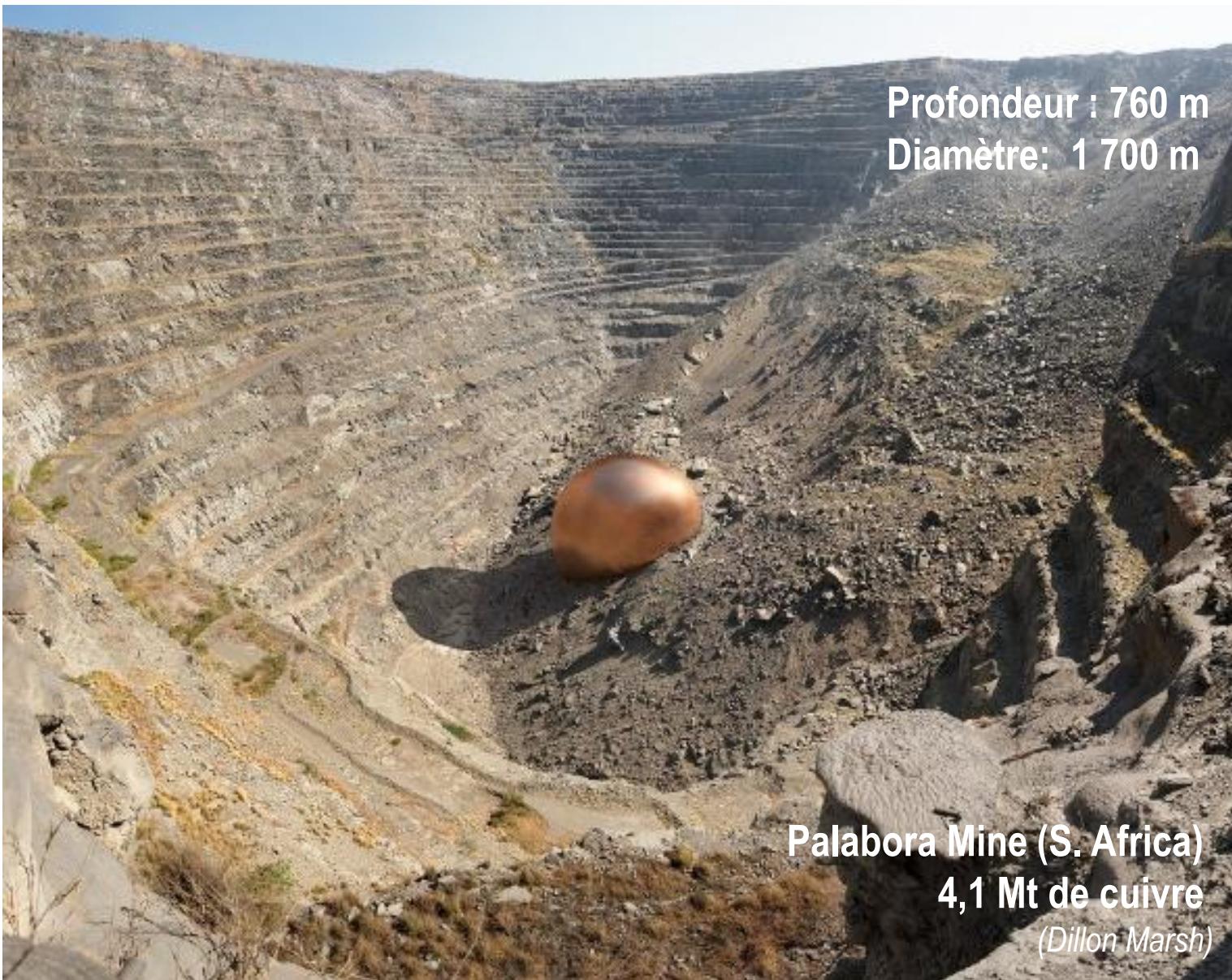


Graphique 1 – Evolution de la production mondiale primaire de métaux



Source : BRGM (données AS3M, USGS, WMD, GFMS)

Ressources minérales : impact environnemental

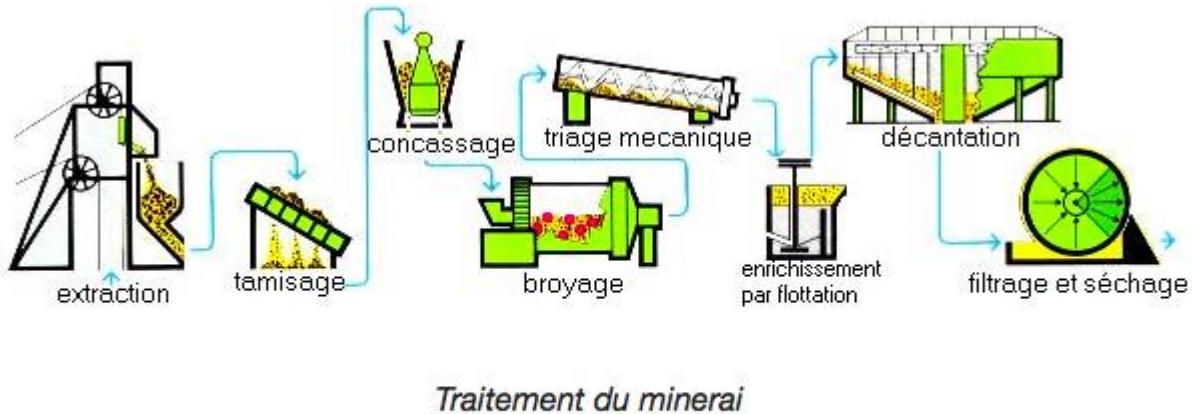


Ressources minérales : impacts environnemental, social et économique

- Mine souterraine
- Ciel à ouvert

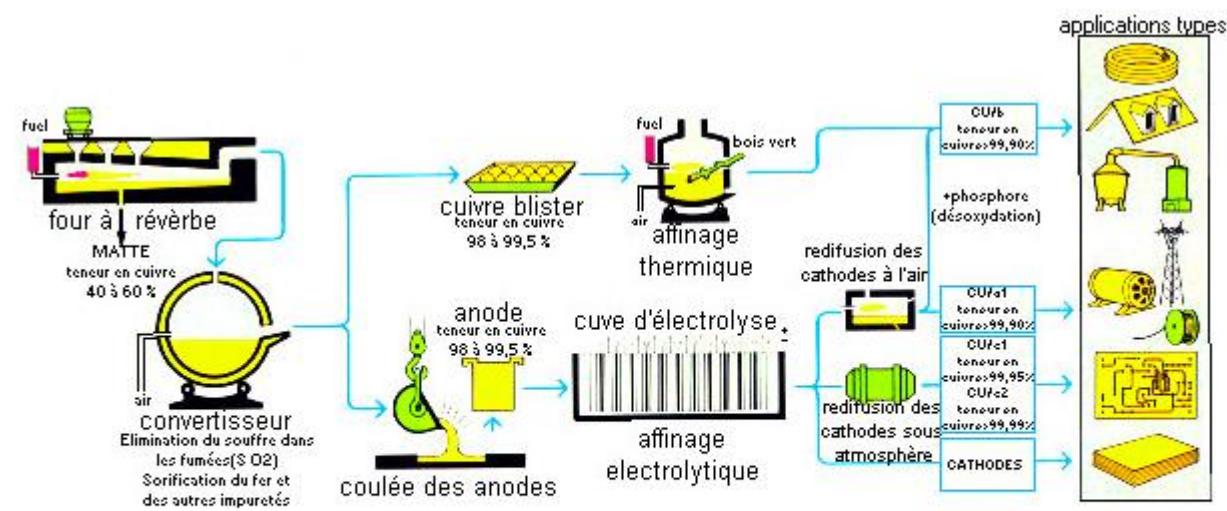
Risques environnementaux:

- Extraction, tamisage
 - Concassage
 - Broyage
 - Flottation
 - Lixiviation
- Impacts sur l'air, l'eau, les sols et la biodiversité



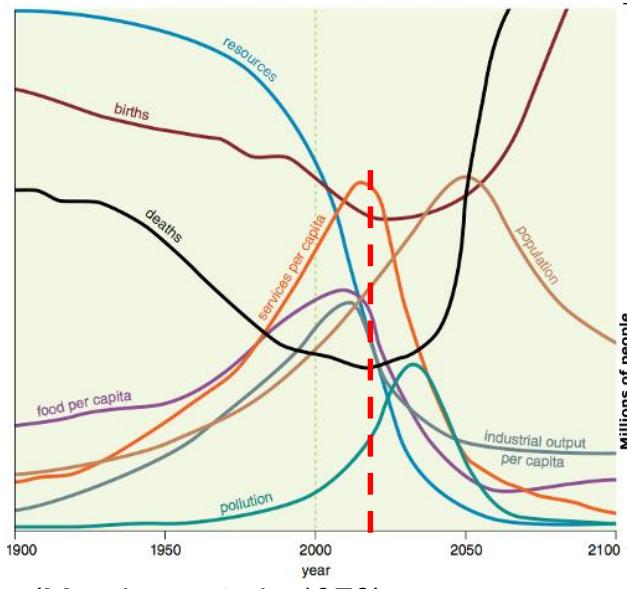
Risques sociaux:

- Conditions de travail
- Risques sanitaires
- Conflits d'usage des surfaces et de l'eau

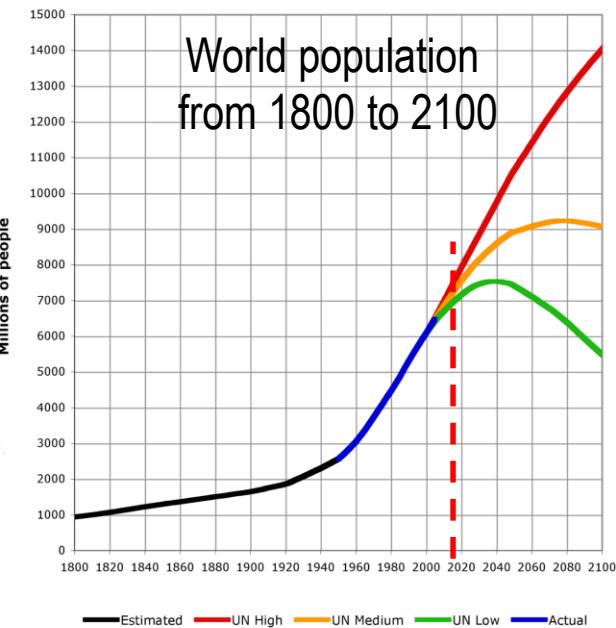


Élaboration et affinage

Un peu de Sciences Humaines et Sociales :
Différents scénarios pour l'évolution de la démographie mondiale



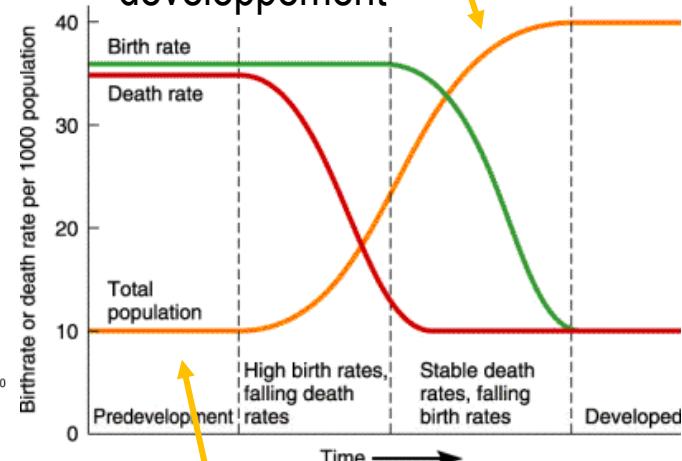
(Meadows et al., 1972)



(UN 2004,
US Census Bureau
historical estimates)

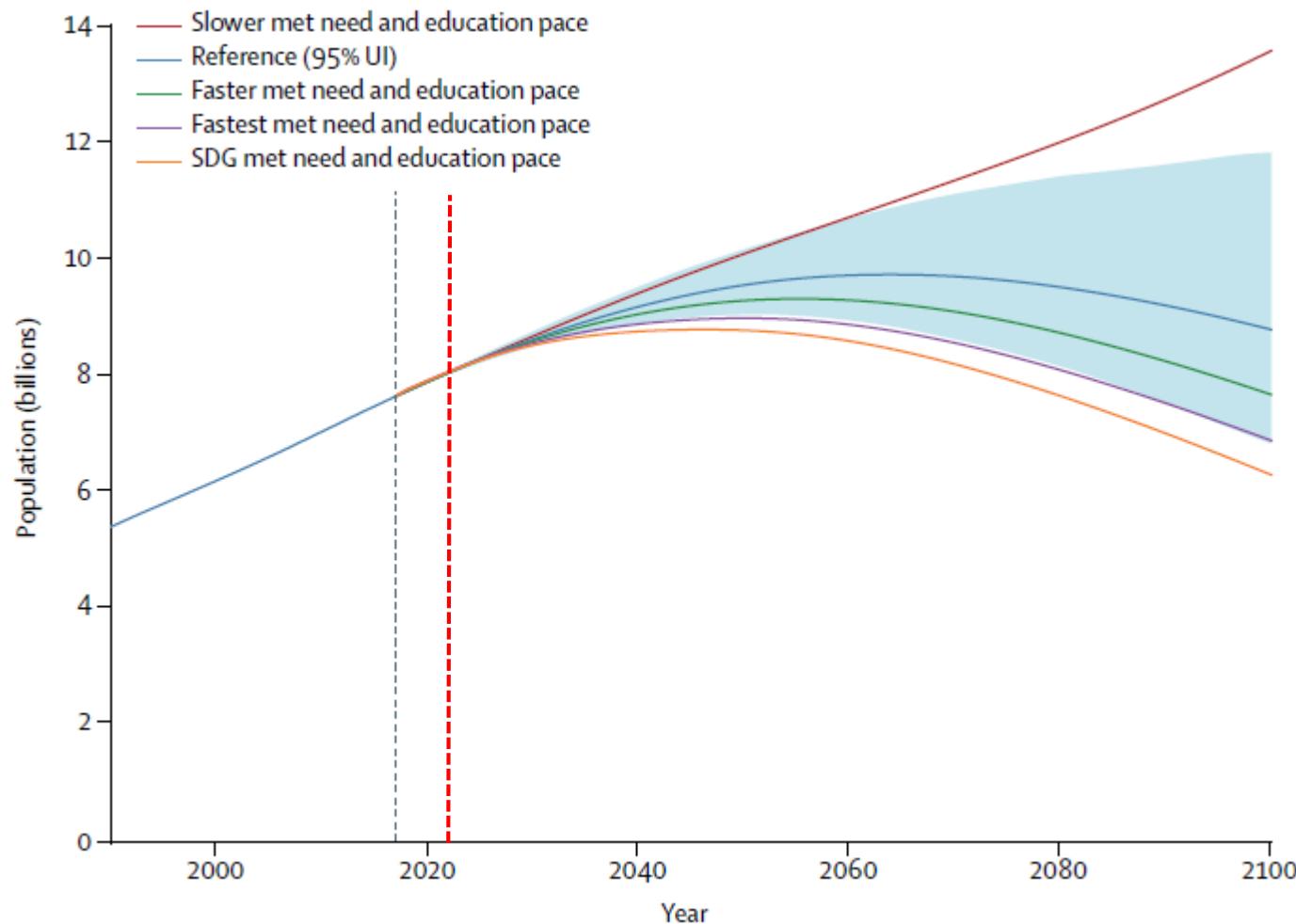
**Post-développement :
stratégie du 'capitalisme'**

Population et
développement



**Pré-développement :
stratégie du 'nombre'**

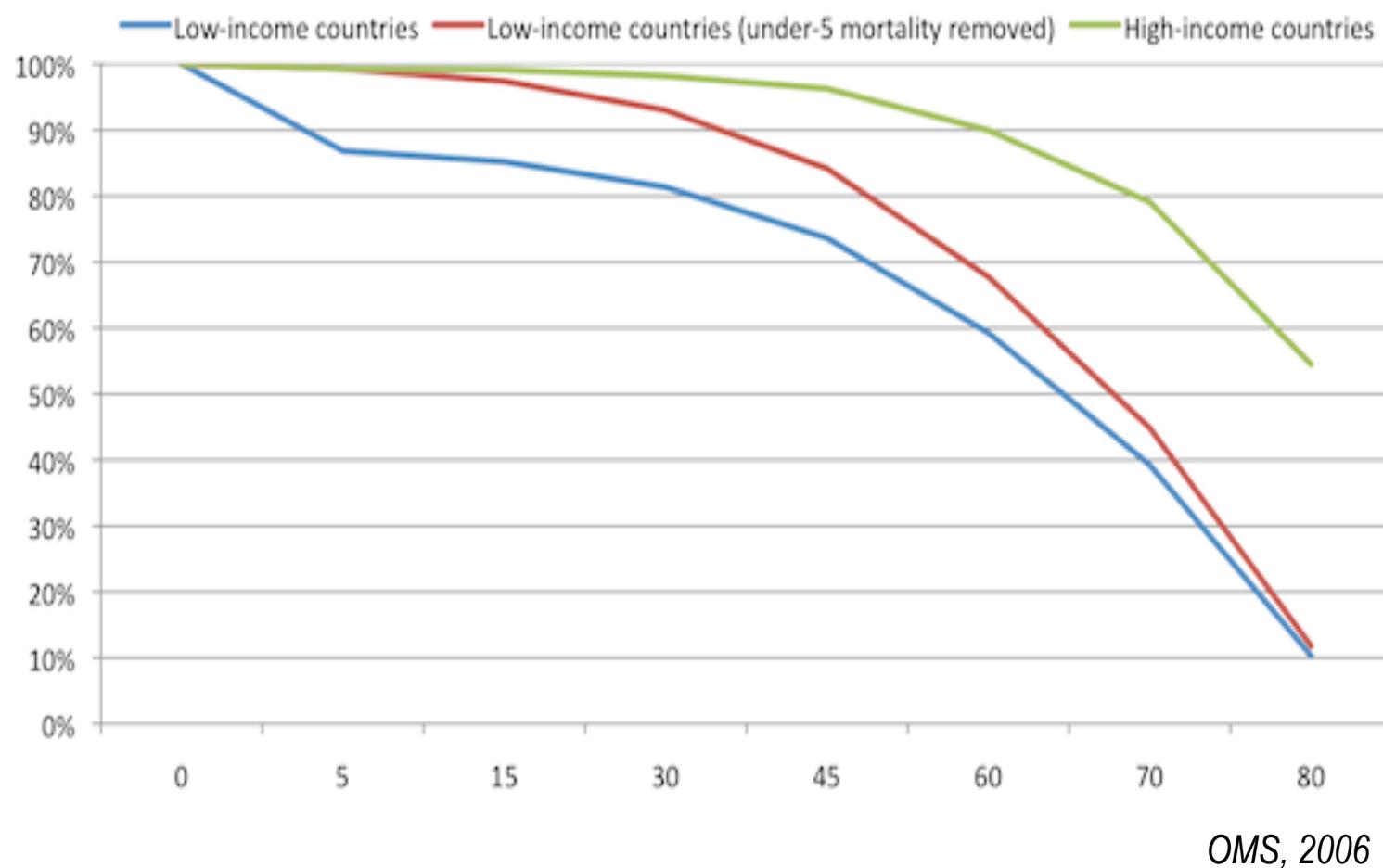
Evolution de la population mondiale



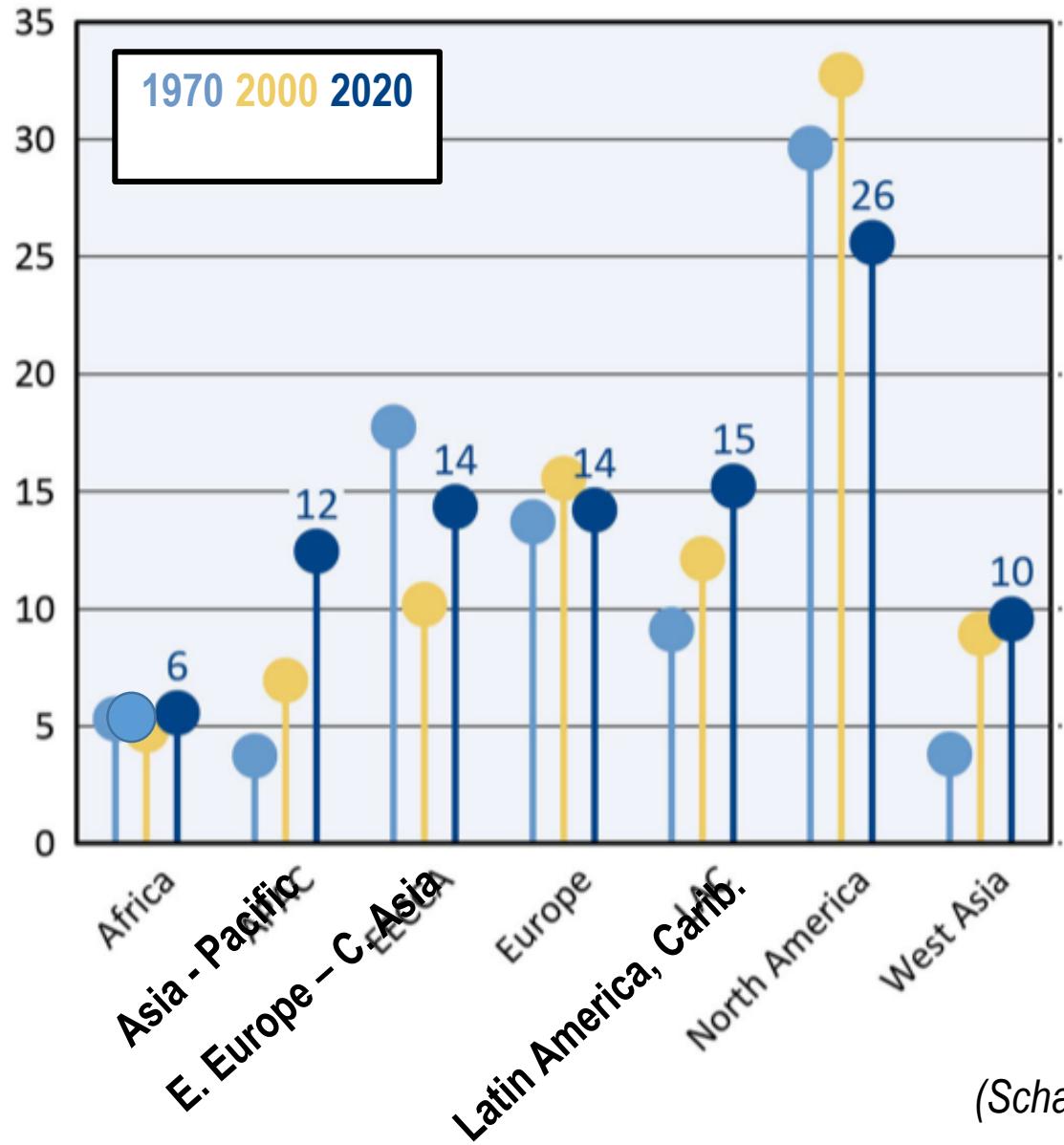
SDG: sustainable development goal

Vollset et al., 2020

Espérance de vie en fonction du PIB (2006)

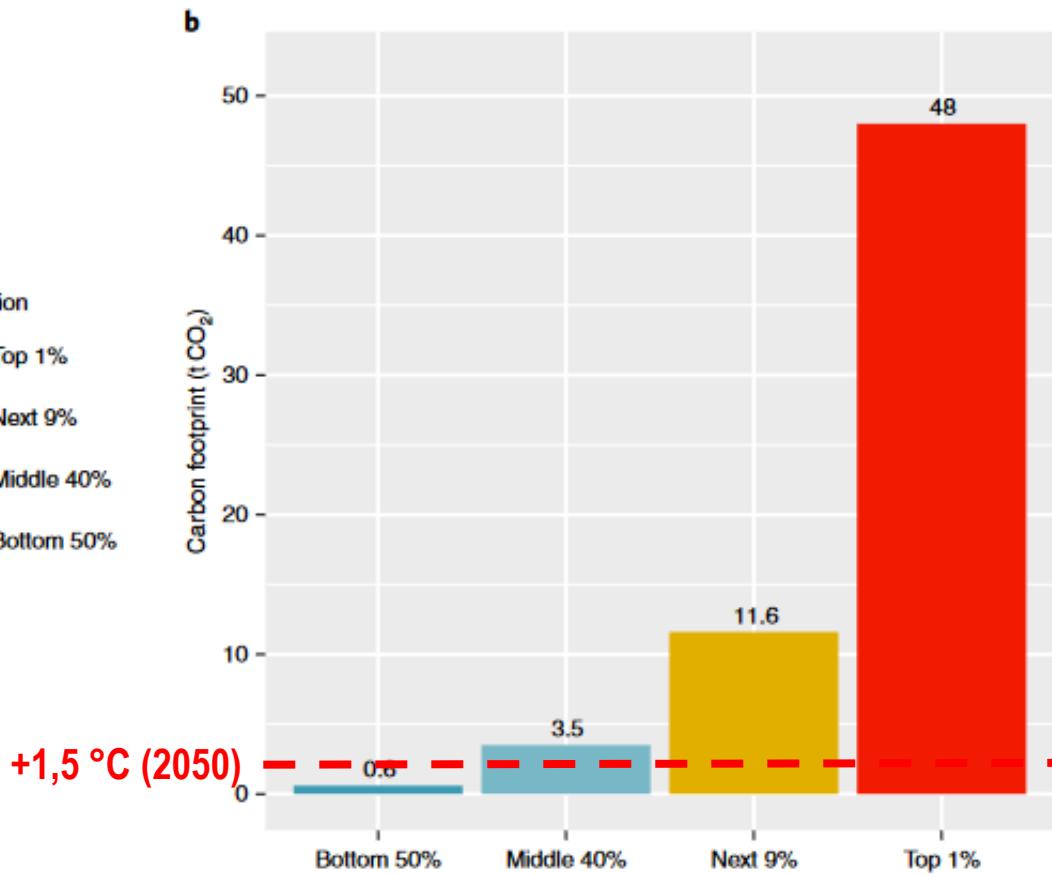
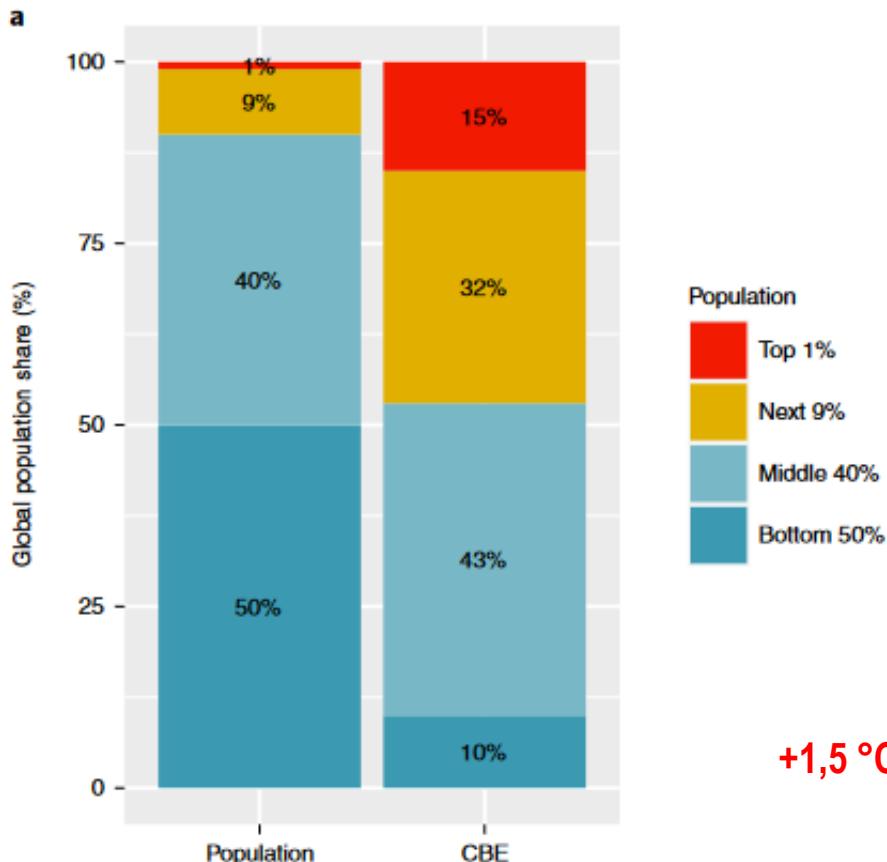


(c) DMC per capita by world region



(Schandl et al., 2024)

Emissions de CO₂ par habitant en 2020



(Brueckner et al., 2022)

Indice de développement humain en 2020 (santé, espérance de vie, éducation, conditions de vie, ...)

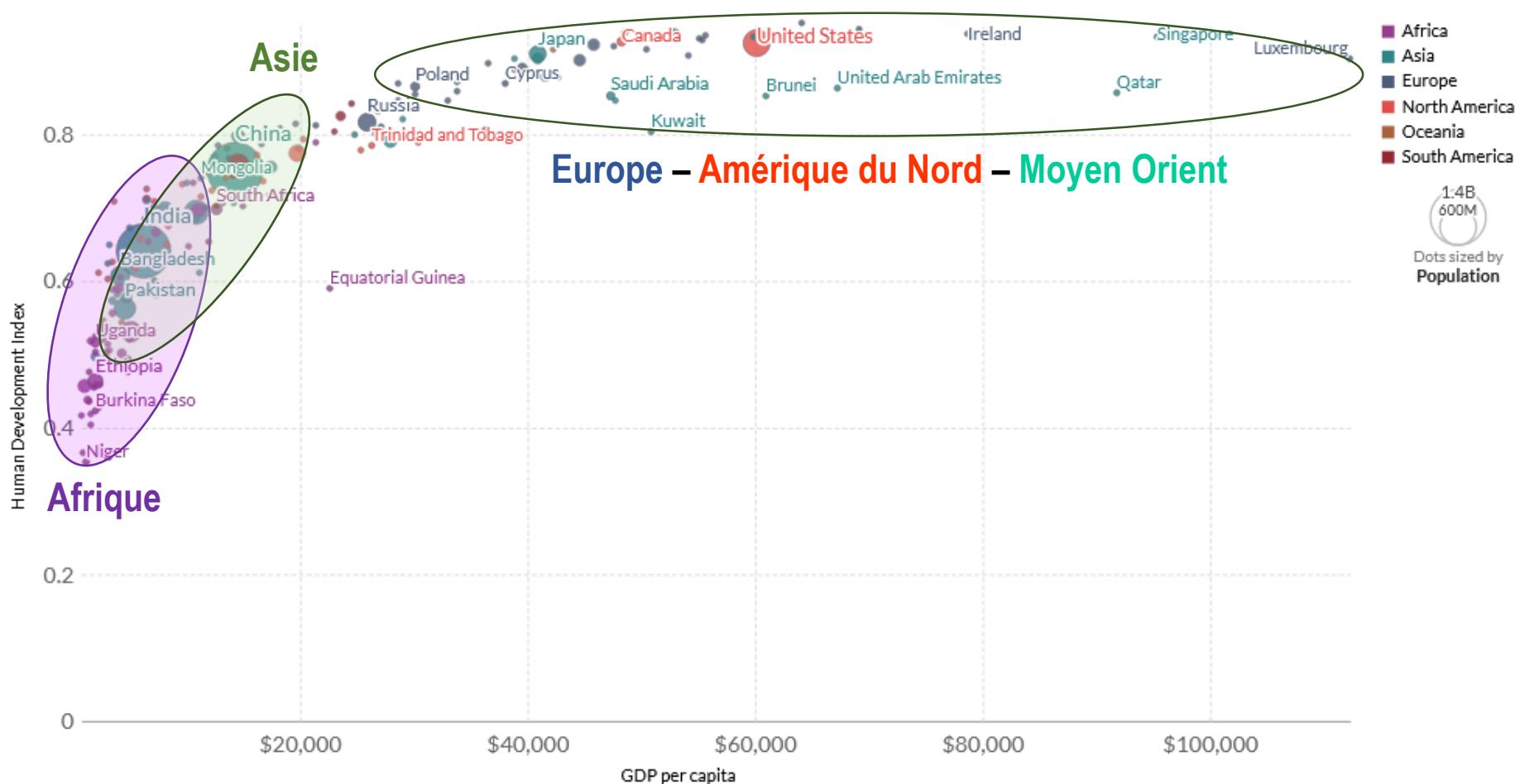
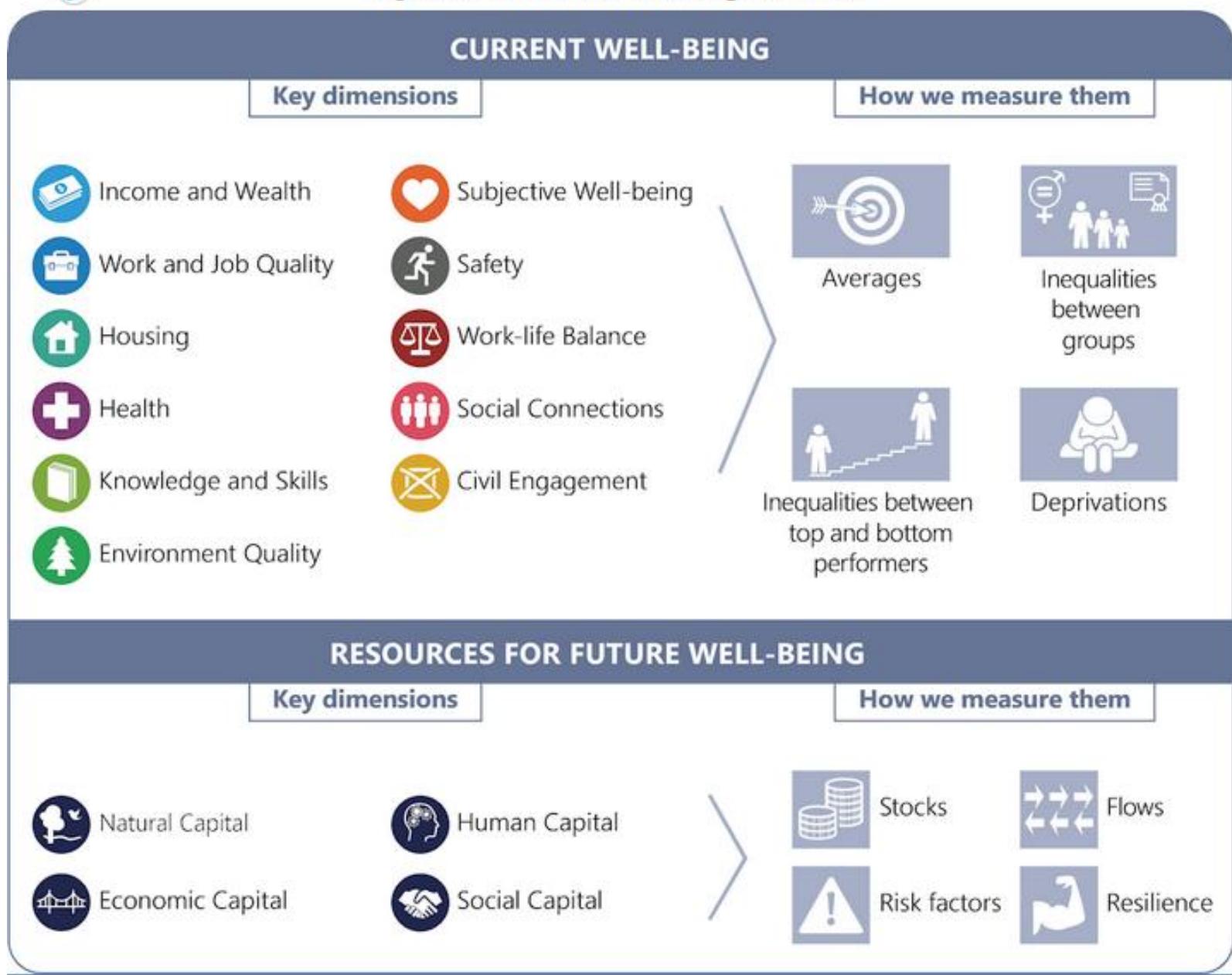
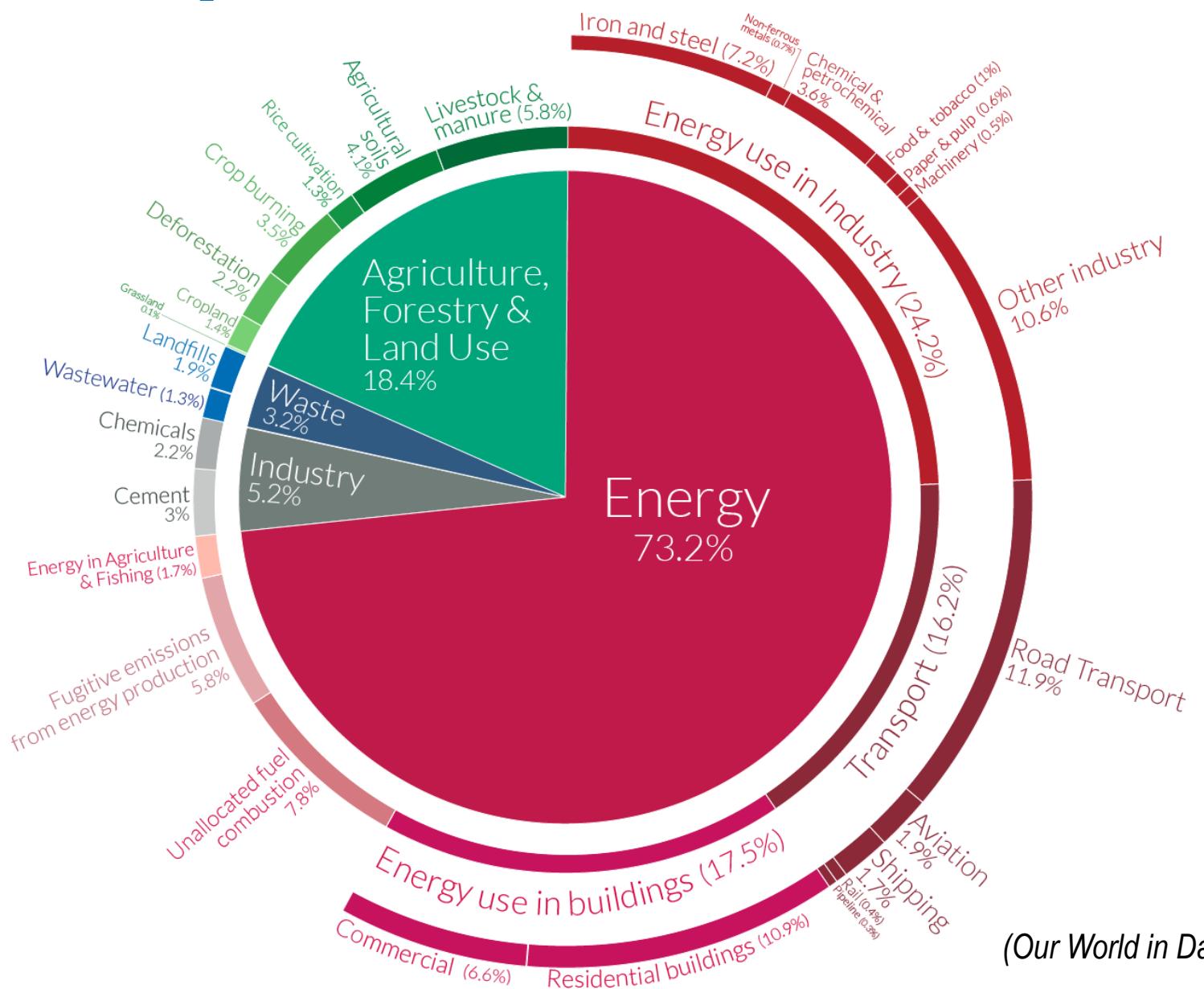




Figure 1.1. The OECD Well-being Framework

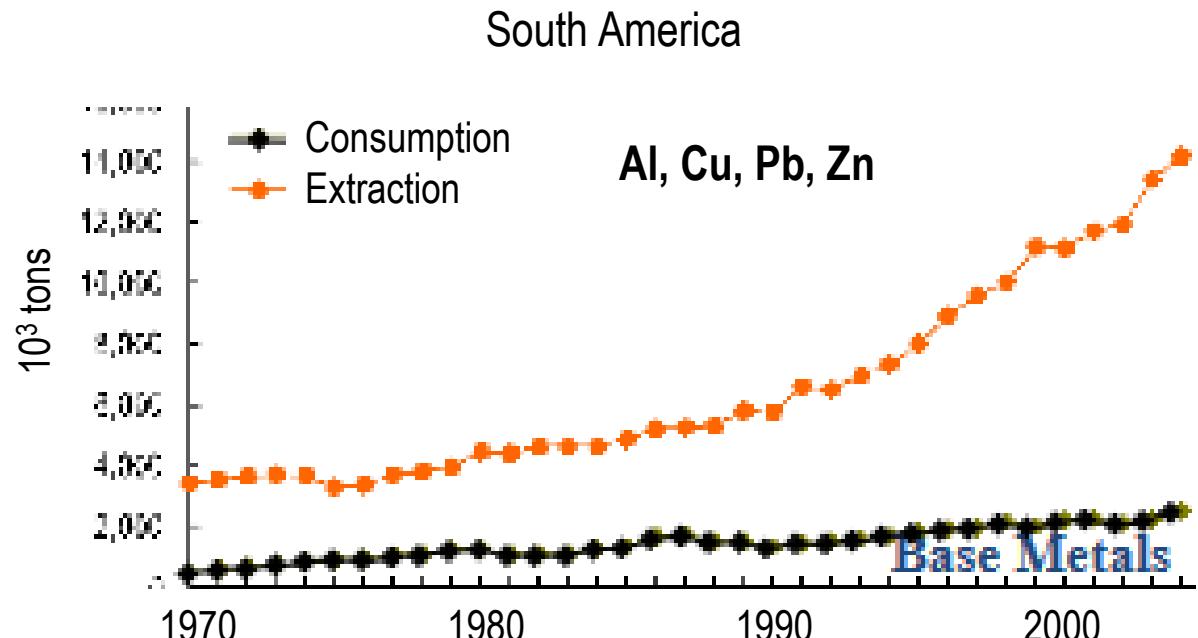


Emissions de CO₂ par secteur en 2016

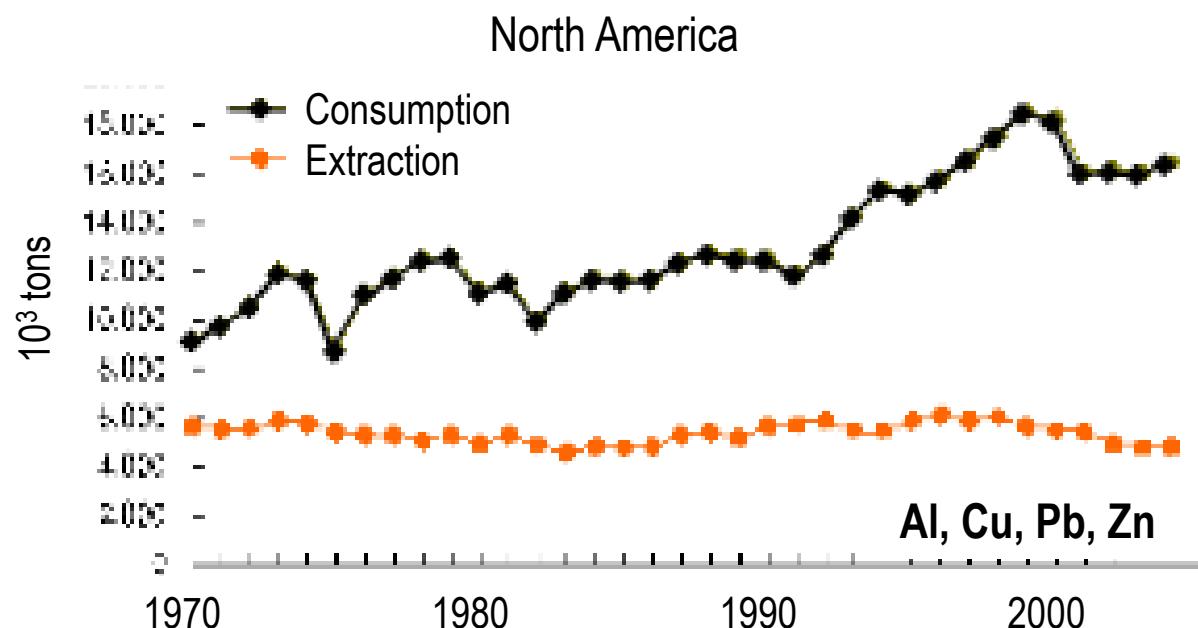


Ressources Minérales

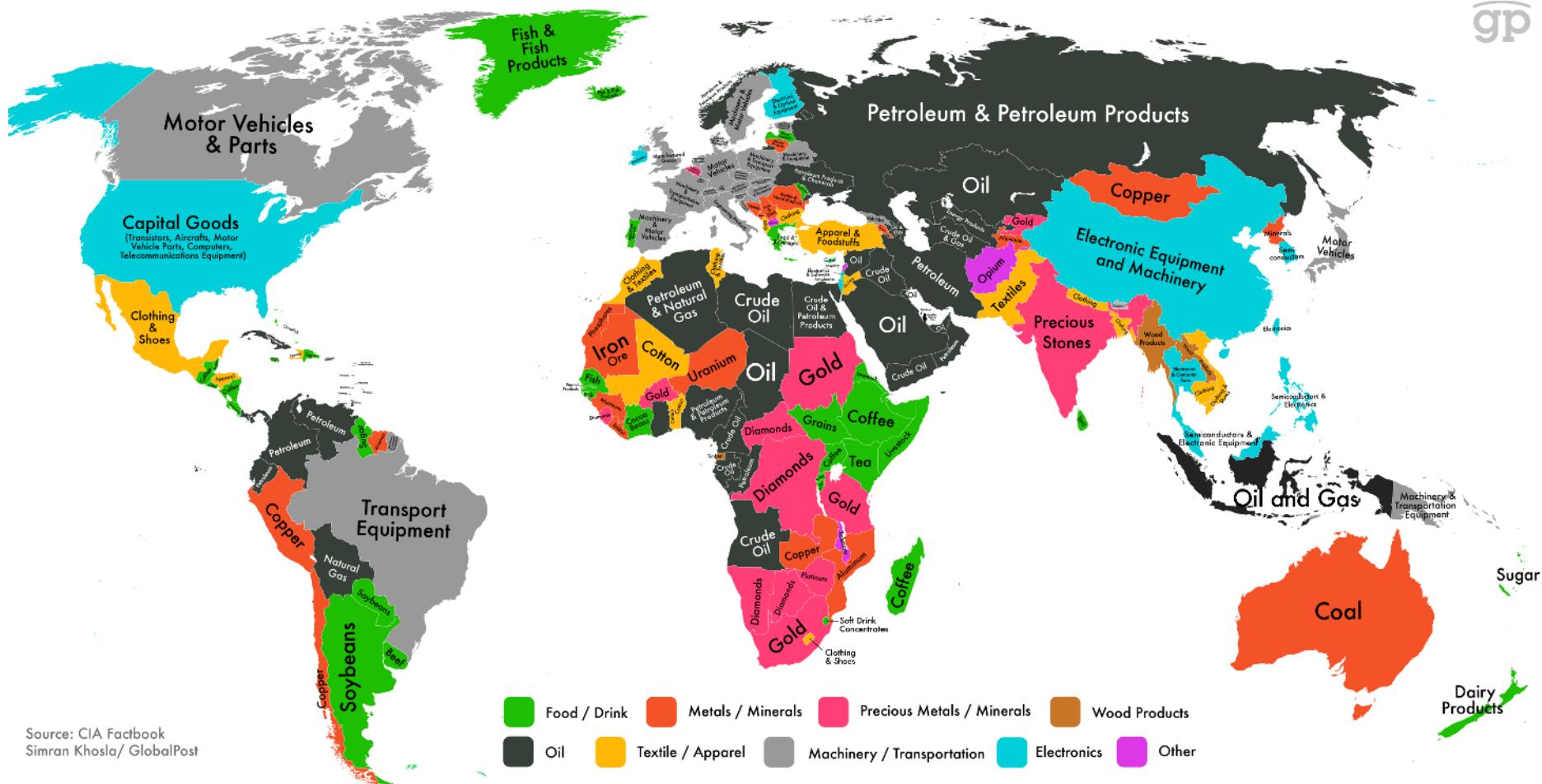
Du producteur...



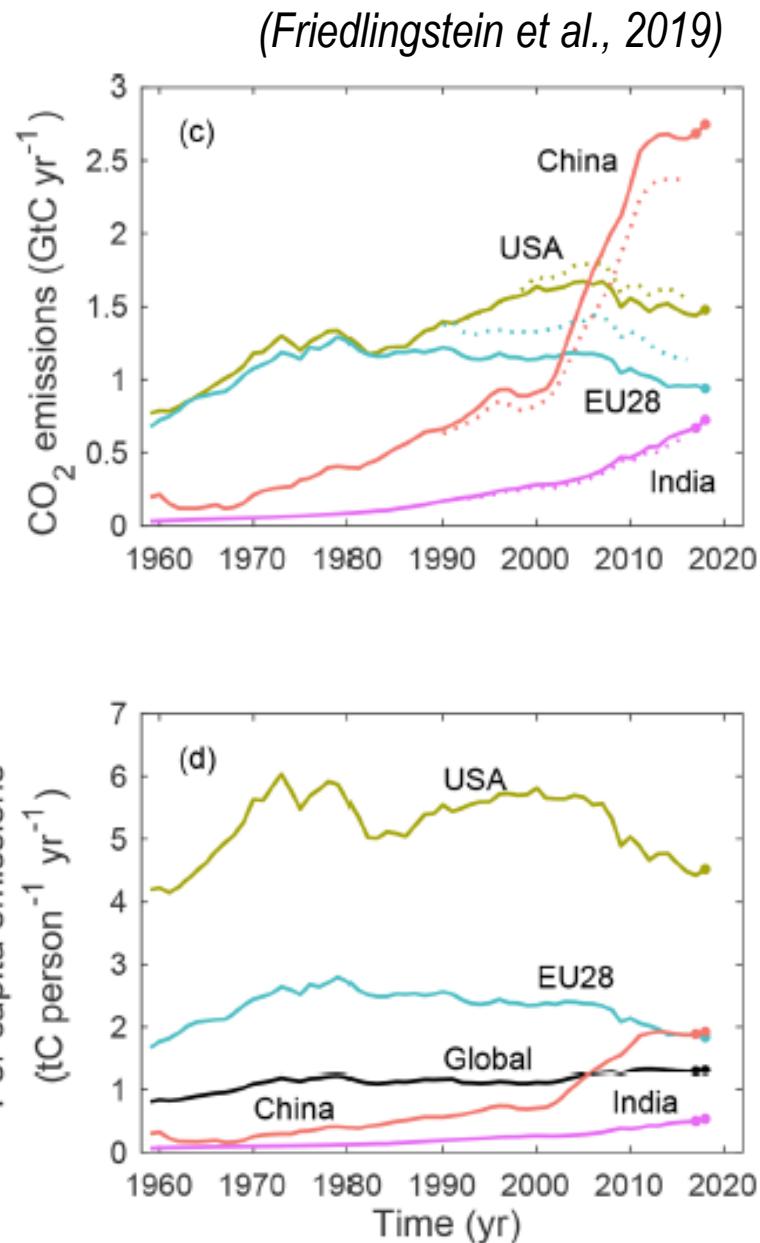
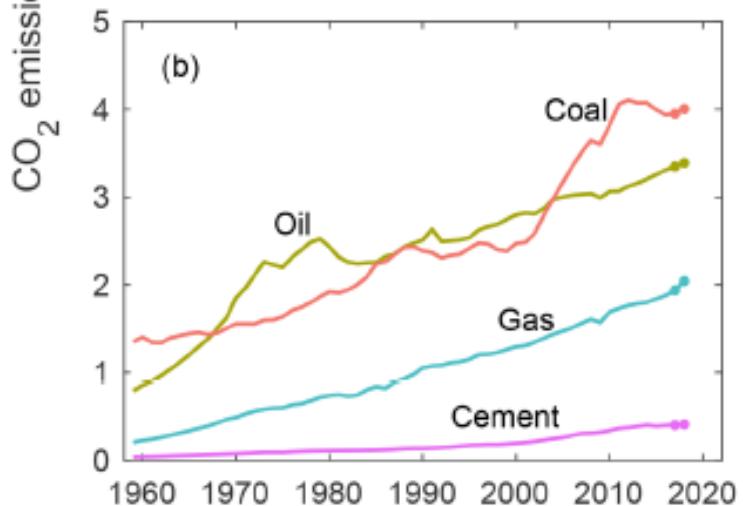
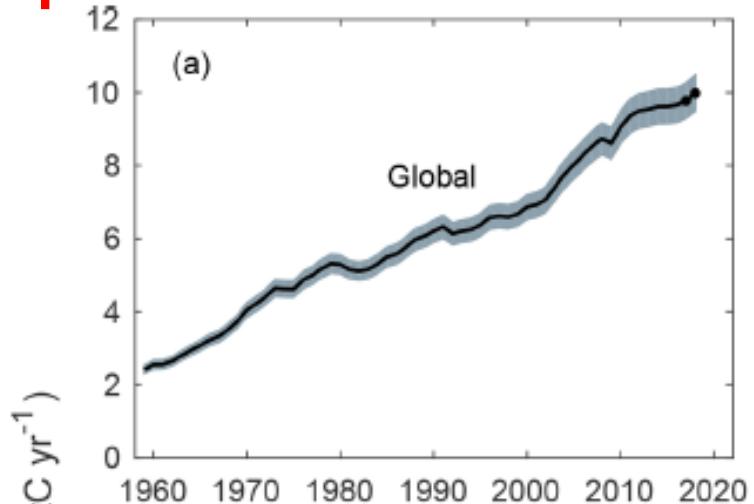
...au consommateur.



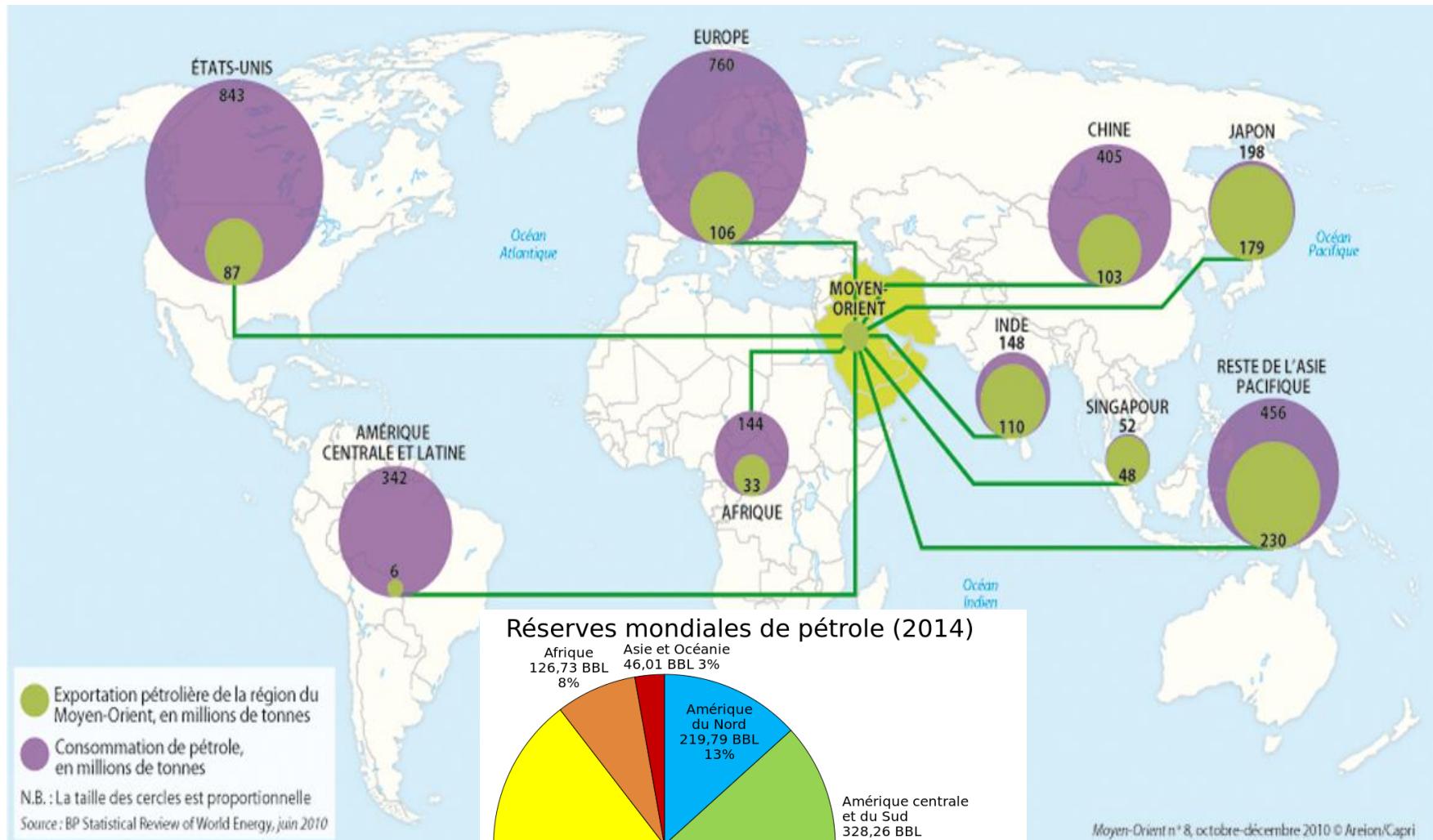
Exportations, spécificités régionales



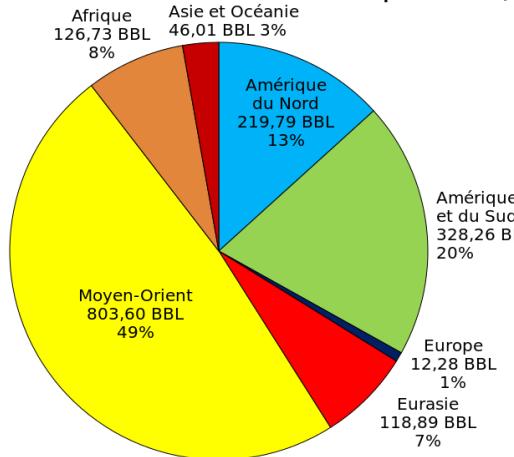
Exploitation-utilisation des ressources ...et pollution!



Répartition des ressources pétrolières



Réserves mondiales de pétrole (2014)

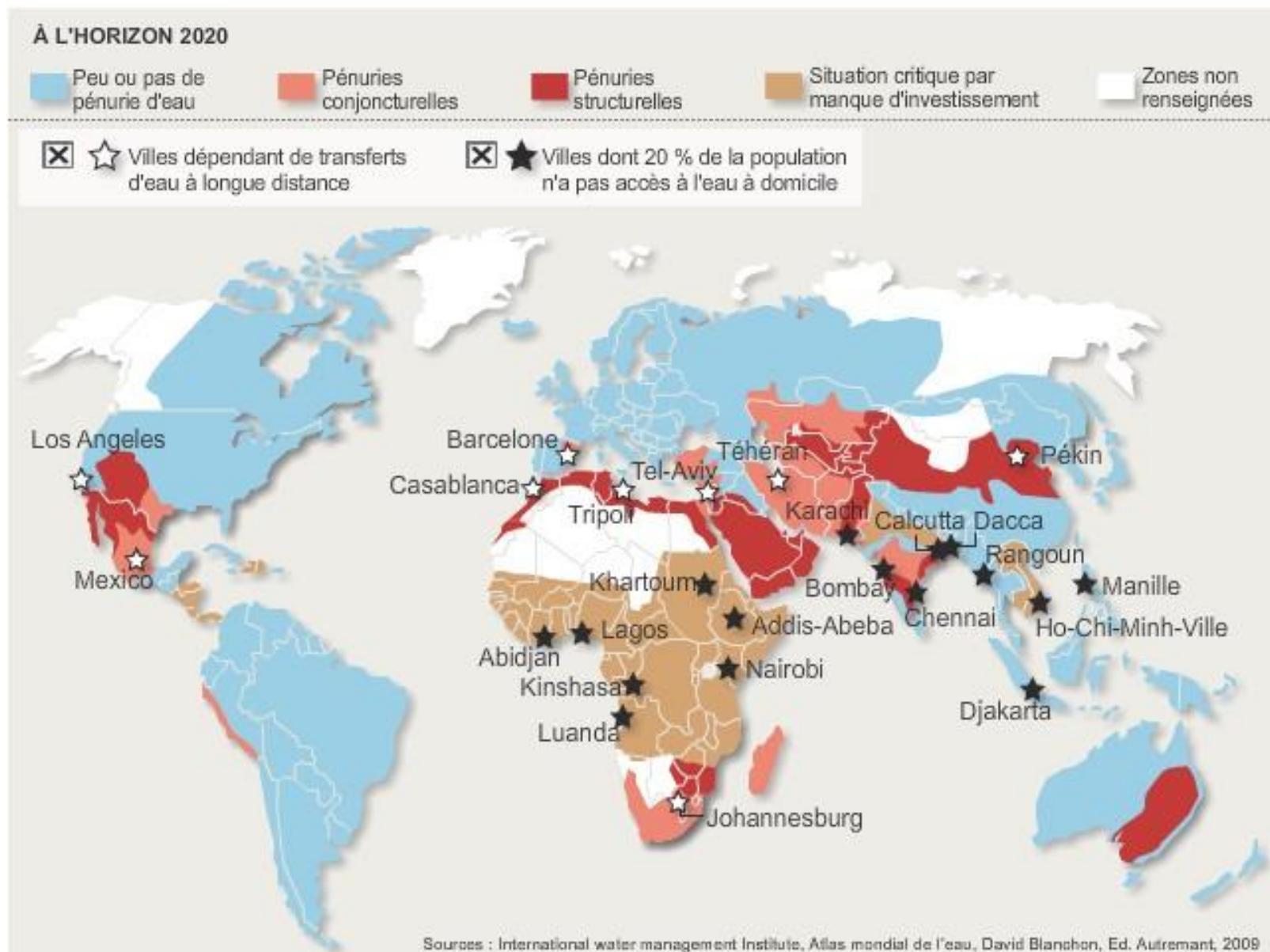


Répartition des ressources minérales

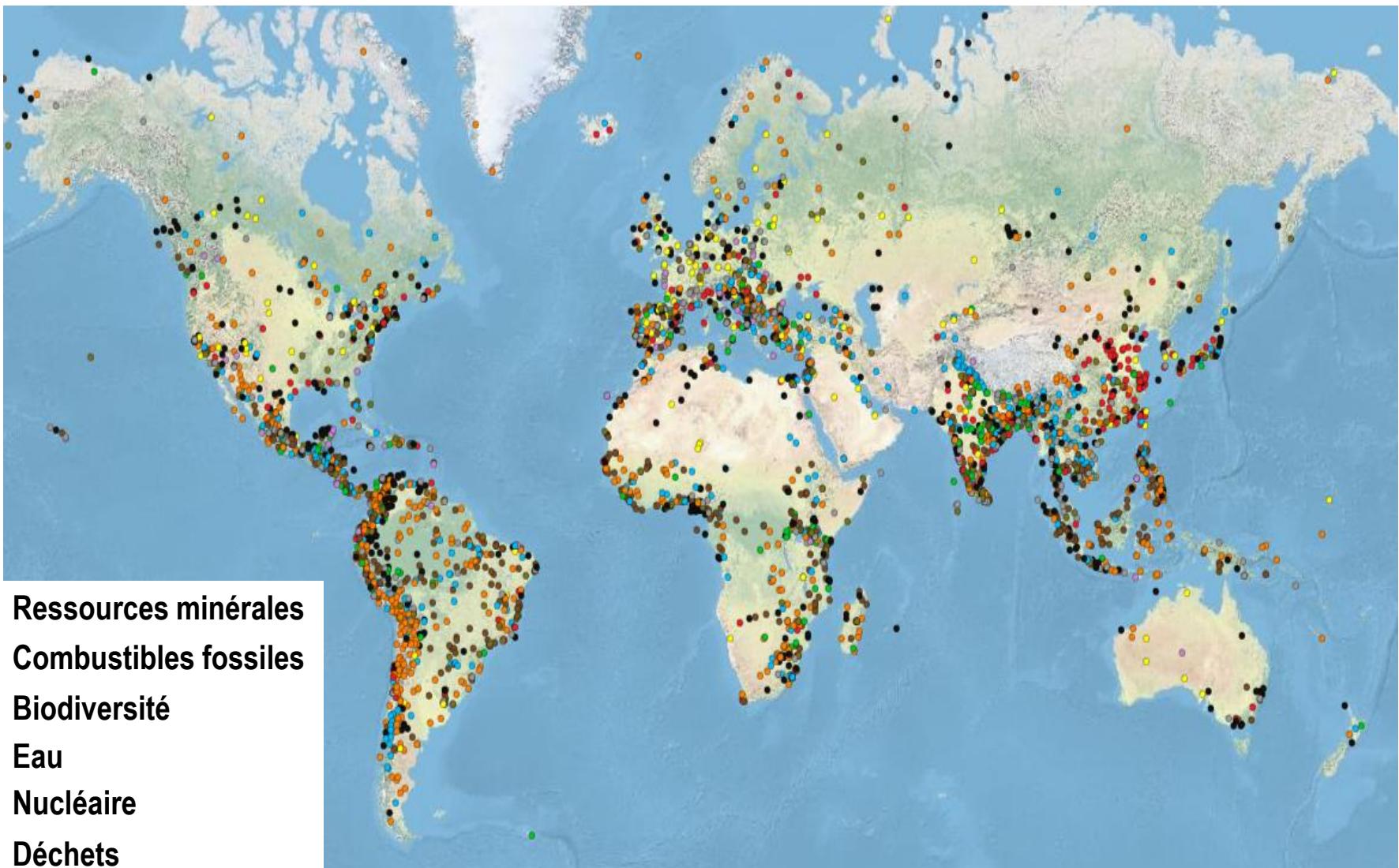
L'AFRIQUE : ENTRE RICHESSES ET CONFLITS



Accès aux ressources en eau



Conflits liés aux ressources



Atlas de justice environnementale: <https://ejatlas.org>

Transitions 2050 : Scenarios ADEME (2021)



S1 GÉNÉRATION FRUGALE

Frugalité contrainte

Villes moyennes
et zones rurales

Low-tech

Rénovation massive

Nouveaux indicateurs
de prospérité

Localisme

3x moins de viande



S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

Modes de vie
soutenables

Économie du partage

Gouvernance ouverte

Mobilité maîtrisée

Fiscalité environnementale

Coopérations
entre territoires

Réindustrialisation ciblée



S3 TECHNOLOGIES VERTES

Technologies
de décarbonation

Biomasse exploitée

Hydrogène

Consumérisme vert

Régulation minimale

Métropoles

Déconstruction / reconstruction



S4 PARI RÉPARATEUR

Consommation
de masse

Étalement urbain

Technologies
incertaines

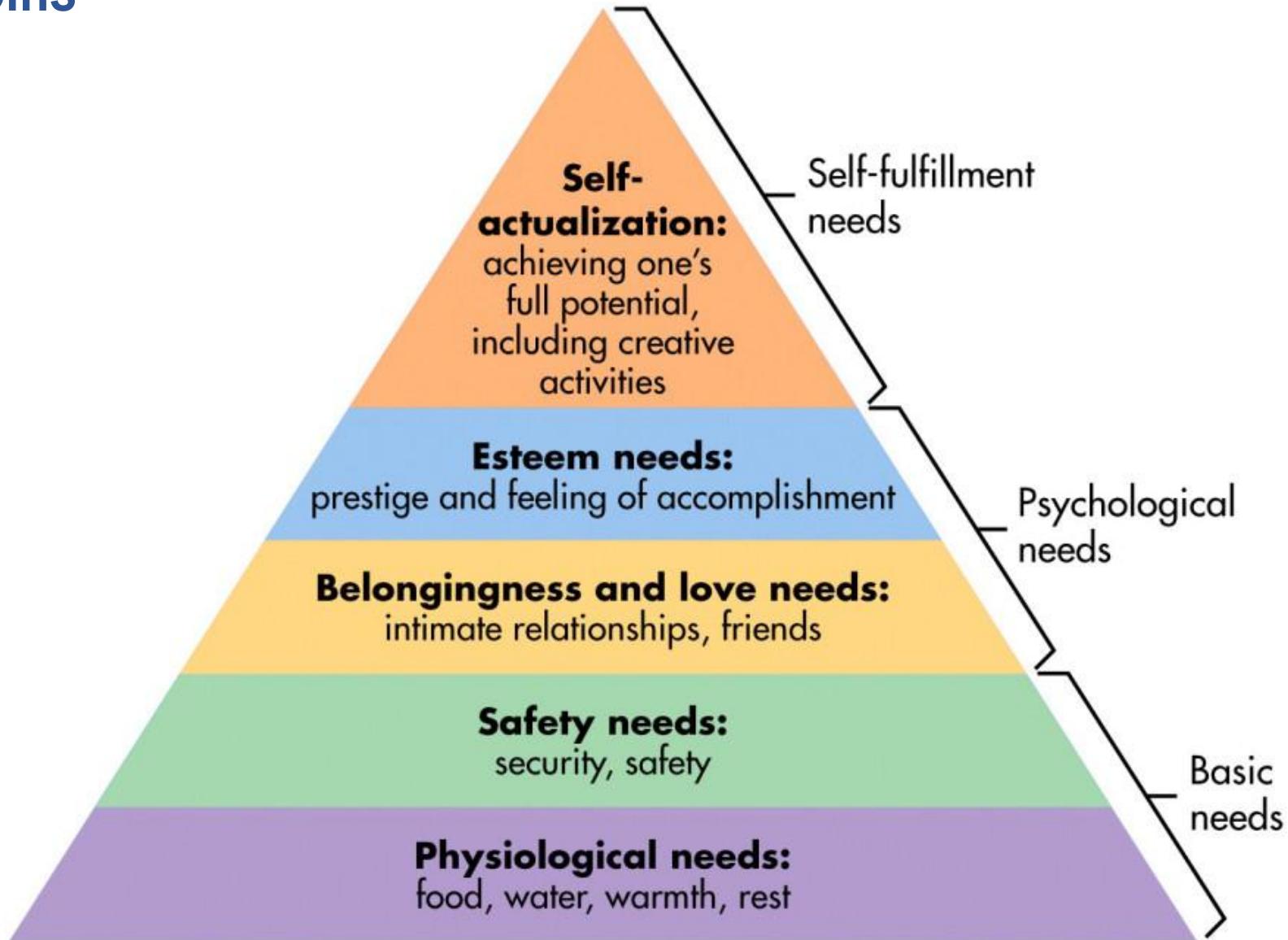
Économie mondialisée

Intelligence artificielle

Captage du CO₂ dans l'air

Agriculture intensive

Besoins

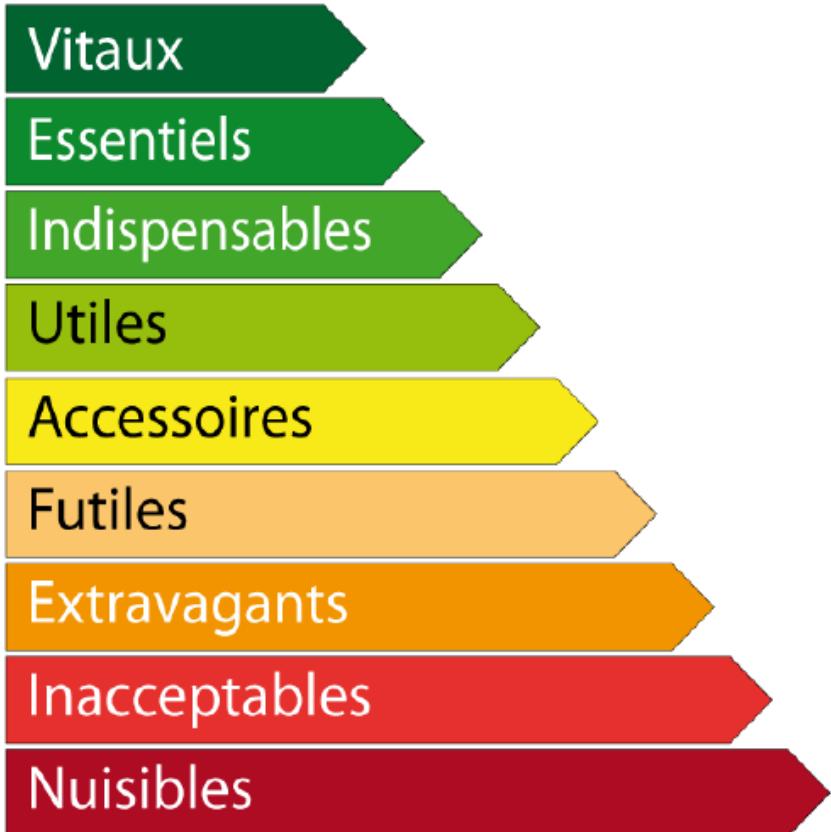


(Maslow, 1943; 1970)

Besoins et régulations

Nécessaires

Superflus

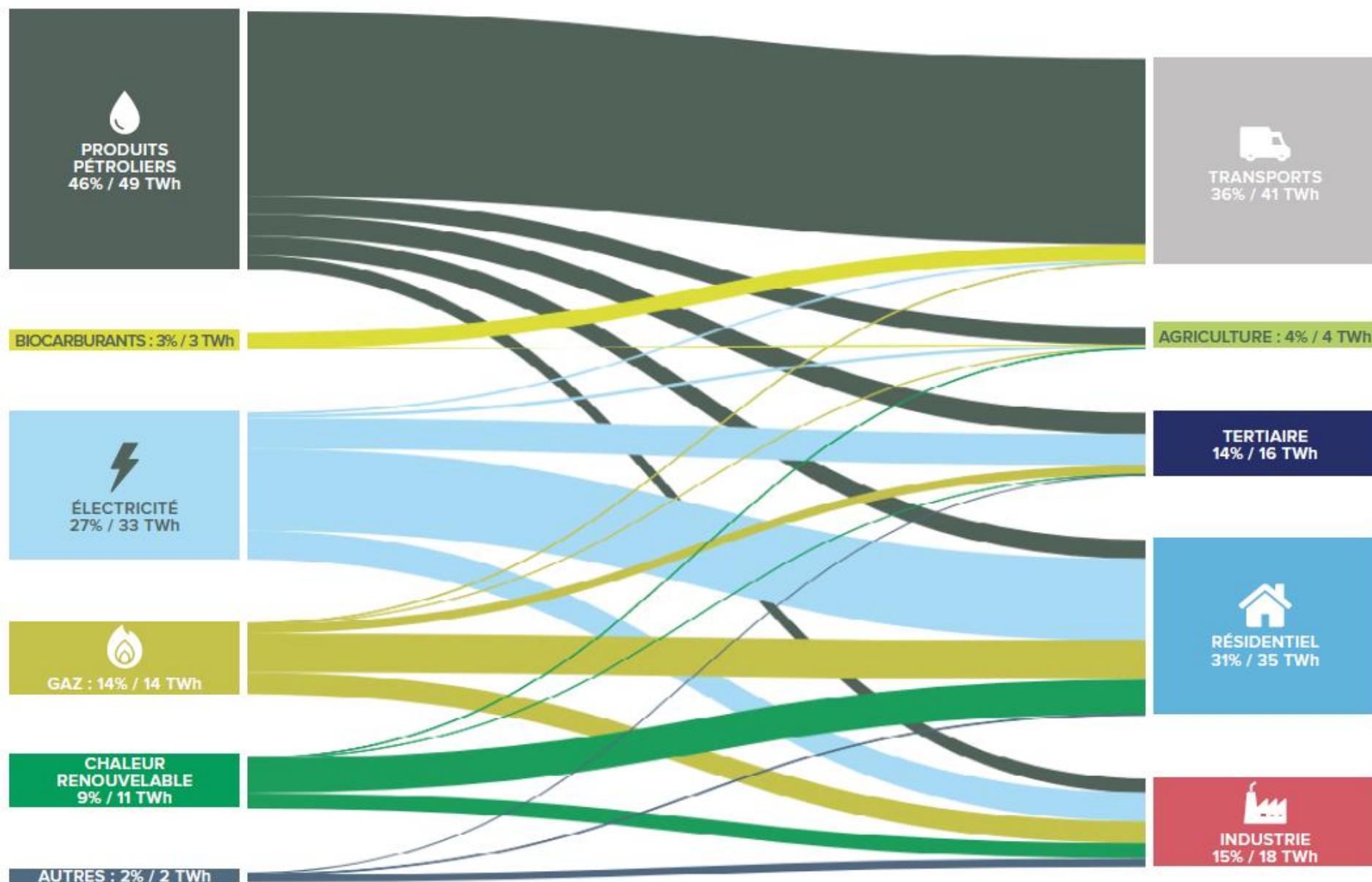


Obligation

Incitation

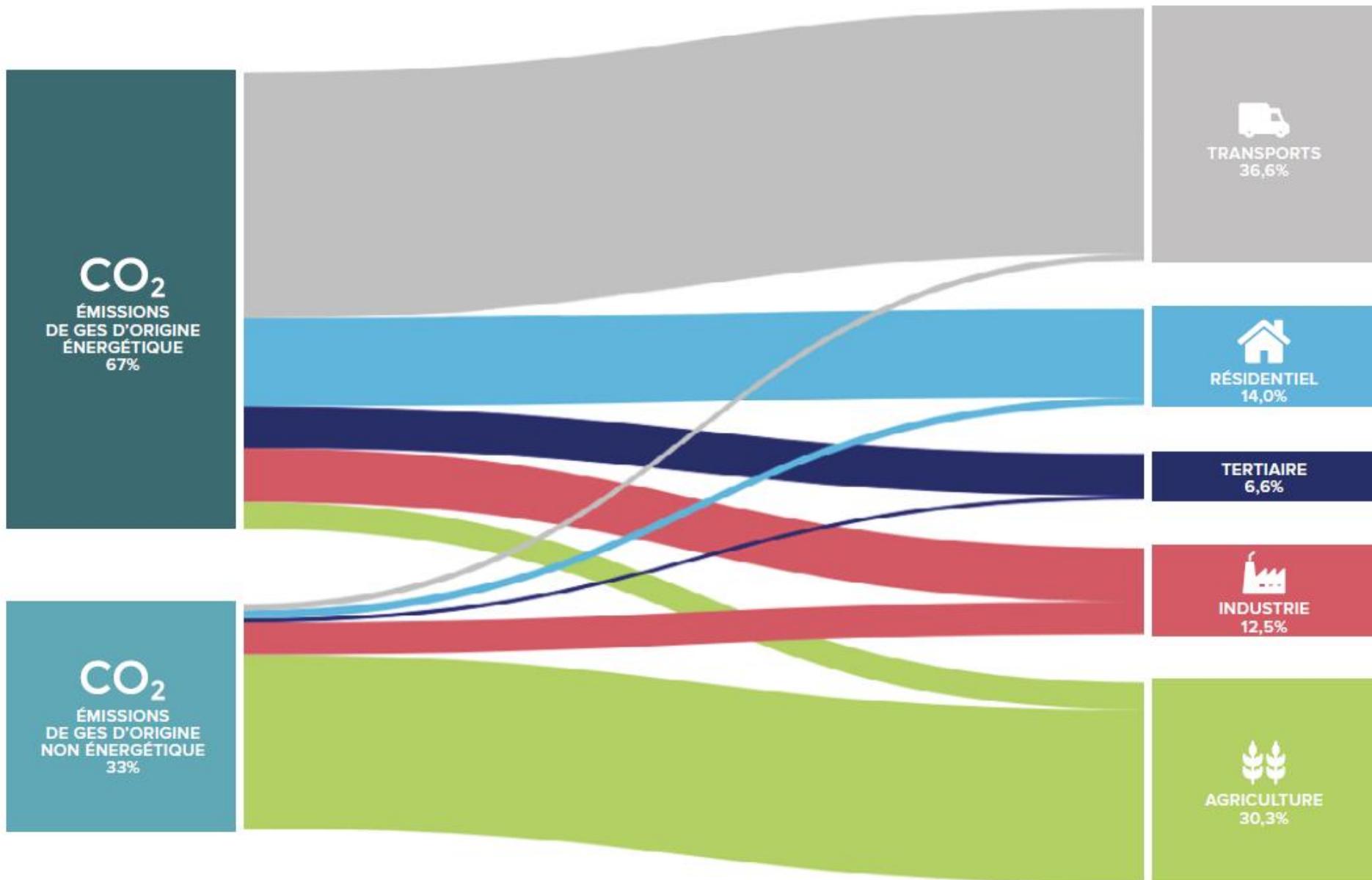
Dissuasion

Interdiction



Consommation d'énergie finale en 2020 : 114 TWh.

Lien entre les vecteurs énergétiques et les secteurs de consommation.

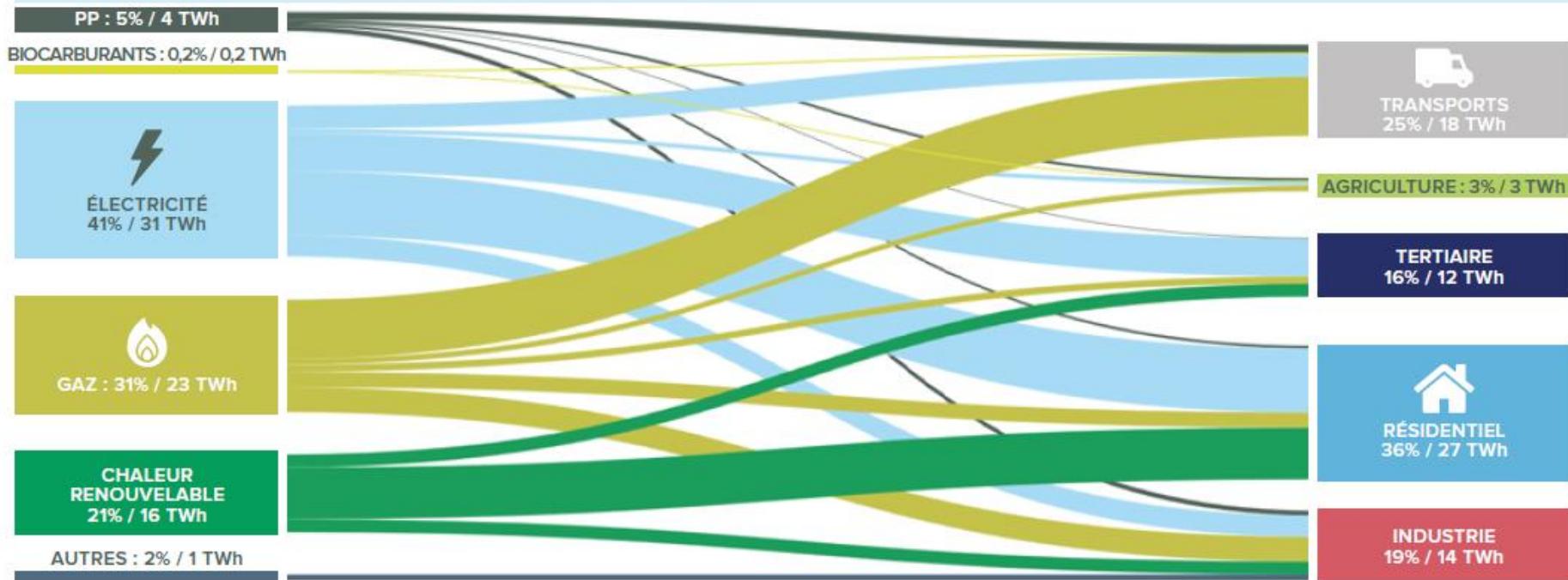


Émissions de GES en équivalent CO₂ en 2020.

Lien entre les émissions de GES par origine et les secteurs d'activité émetteurs.

42%

RÉDUCTION DES CONSOMMATIONS EN 2050
PAR RAPPORT À 2015

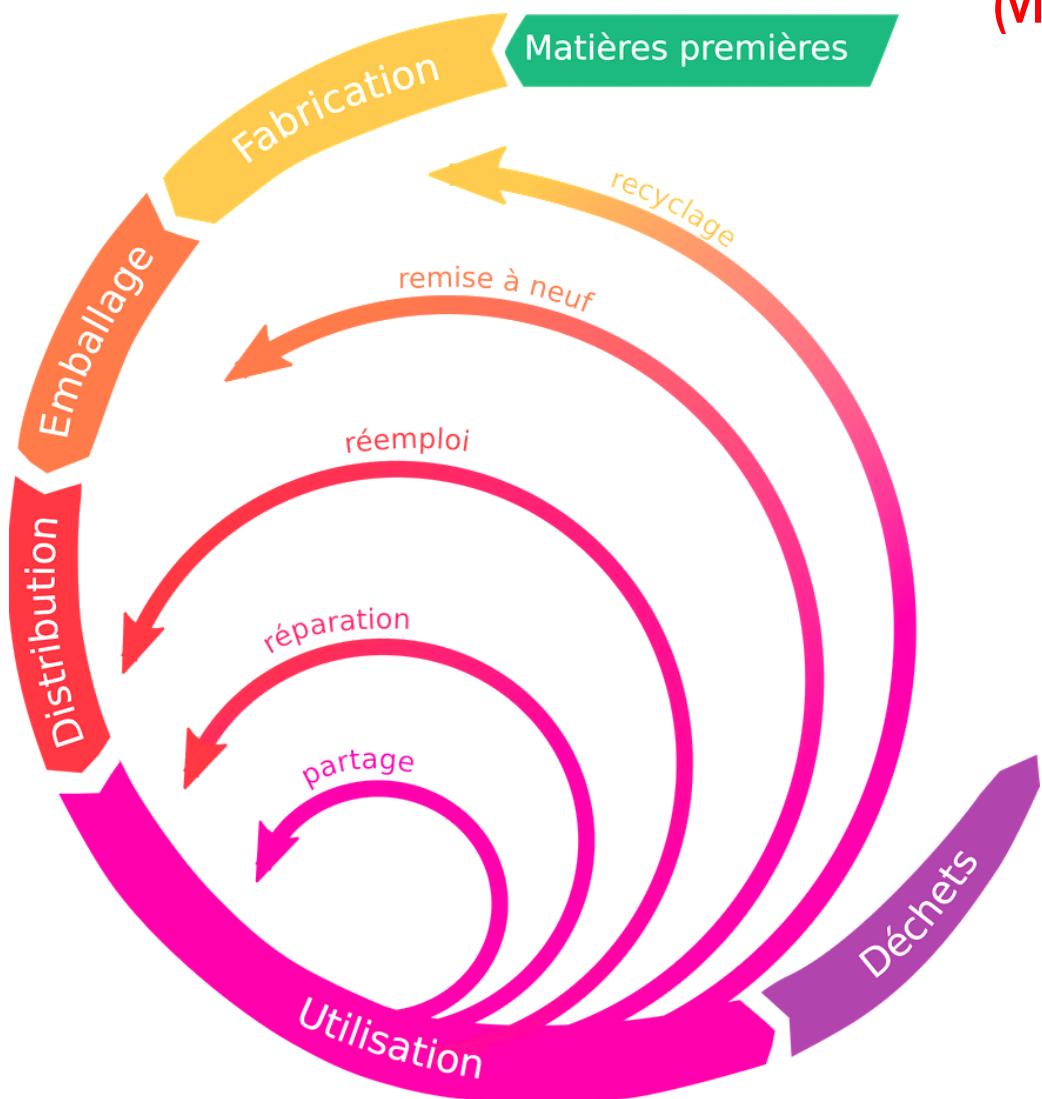


Scénario REPOS - Consommation d'énergie finale en 2050 : 74 TWh.
Lien entre les vecteurs énergétiques et les secteurs de consommation.

Economie “permacirculaire”

(Arnsperger & Bourg, 2017)

Réduction de l'utilisation des ressources et
approvisionnement durable en matières premières
(vivable, équitable, viable)



énergétique

Energie manuelle et mondialisation



NAFTA : North American Free Trade Agreement

WTO : World Trade Agreement