

CENTRALE ENERGIES, 27 MAI 2020



LES MATÉRIAUX DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE : REMPLACER UN PROBLÈME PAR UN AUTRE ?

Dr. Emmanuel HACHE, Dr. Gondia S. SECK, Dr. Fernanda GUEDES, Marine SIMOEN et l'ensemble de l'équipe GENERATE

Projet GENERATE (Géopolitique des Energies Renouvelables et Analyse Prospective de la Transition Énergétique) AAPG 2017-Projet 2017-2020



1

PLAN

- ✓ Quelques réflexions sur le projet GENERATE et sur la transition énergétique mondiale
- ✓ La question d'une nouvelle géopolitique de la transition énergétique
- ✓ Quelques éléments méthodologiques
- ✓ Les « nouvelles » questions géopolitiques liées aux ENR
 - ✓ La question des matériaux stratégiques
 - ✓ Lithium
 - ✓ Cuivre
 - ✓ Nickel
 - ✓ Cobalt
 - ✓ Terres rares
 - ✓ La criticité environnementale : l'eau
- ✓ Éléments de conclusion

2 | © 2016 IFPEN



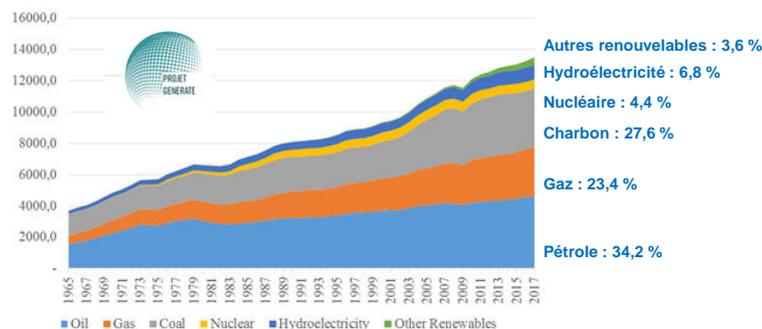
GENERATE

- Le projet GENERATE est un projet intégré de compréhension des processus de transition énergétique. Son originalité repose sur la prise en compte simultanée de trois conséquences majeures engendrées par cette dynamique mondiale :
- **Les ressources:** cette partie est axée sur la mesure de la criticité des matériaux et la mise en place d'outils d'aide à la décision dans le cadre de la transition énergétique.
 - **Matières premières retenues :** aluminium, cuivre, béton, cobalt, lithium, nickel
 - **Méthodologie:** modélisation prospective (Modèle TIMES Markal), complétée par une analyse de l'organisation industrielle des marchés et par une analyse géopolitique
- **Les brevets:** cette partie est axée sur la compréhension des enjeux des innovations de la transition énergétique
 - **Méthodologie :** cartographie et analyse bibliométrique des brevets de la transition énergétique
 - Mise en évidence des pouvoirs de marché et des recompositions industrielles possibles
- **La transition dans les pays producteurs d'hydrocarbures :** cette partie interroge les trajectoires des pays producteurs et leurs influences sur la stabilité régionale, les marchés énergétiques et les marchés financiers
 - **Méthodologie :** prospective (Delphi), analyse géopolitique

DE LA COMPLEXITÉ DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

- Elle sera lente car elle est mal définie
- Le monde a déjà connu des transitions énergétiques, il s'agit plus d'empilements énergétiques que de réelles substitution

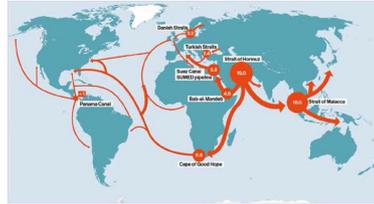
Consommation énergétique dans le monde (en Mtep)



Sources : BP Statistical Review 2018, DOE

POURQUOI LES ENR TRANSFORMENT-ELLES LA GÉOPOLITIQUE DE L'ENERGIE ?

- Absence de concurrence d'usages; réduction de l'intensité de la géopolitique des détroits



Note: All estimates in million barrels per day. Includes crude oil and petroleum liquids.
Based on 2016 data.
Source: U.S. Energy Information Administration.

- Les ENR peuvent être déployées à de nombreuses échelles (démocratisation de la production et de la consommation) et systèmes décentralisés possibles
- Une réduction de 20 % des coûts à chaque doublement de la production
- Mais les ENR créent d'autres dépendances et posent davantage de questions géopolitiques qu'elles n'en résolvent

LES QUESTIONS GÉOPOLITQUES LIÉES AUX ENR

● La question des matériaux stratégiques

- Crainte d'une criticité géologique : la multiplication des usages de matériaux critiques engendre des peurs de pénurie de matériaux (Ex : Lithium et électrification du transport, cobalt, terres rares, etc.). Les dynamiques de consommation doivent ainsi être envisagées à l'horizon 2050 et 2100
- Crainte d'une cartellisation des marchés de matières premières : de nombreux marchés dépendent de peu de producteurs ou d'entreprises : quelles influences sur les pays consommateurs ? Cette question dépasse largement le seul secteur des ENR (Exemple du tantale pour le secteur de la Défense)
- Crainte d'une dépendance stratégique : cas des terres rares pour lesquelles les réserves sont détenues à 50 % par la Chine et la Russie, et la production à plus de 80 % par la Chine (2017)
- Crainte de conséquences environnementales majeures

LA QUESTION DES MATÉRIAUX STRATÉGIQUES



7

LES BESOINS DES TECHNOLOGIES BAS CARBONE

- Stockage
- Connectivité
- Efficacité énergétique
- Catalyse (automobile, fuel cells)
- Production et transport d'électricité
- Nucléaire
- PV
- Aimants permanents (VE, éolien TGV)
- Superconducteurs
- LED

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 <i>Rf</i>	105 <i>Db</i>	106 <i>Sg</i>	107 <i>Bh</i>	108 <i>Hs</i>	109 <i>Mt</i>	110 <i>Ds</i>	111 <i>Rg</i>	112 <i>Cu₁₁₂</i>	113 <i>Cu₁₁₃</i>	114 <i>Cu₁₁₄</i>	115 <i>Cu₁₁₅</i>	116 <i>Cu₁₁₆</i>	117 <i>Cu₁₁₇</i>	118 <i>Cu₁₁₈</i>

Lanthanides
(Rare-earth elements)

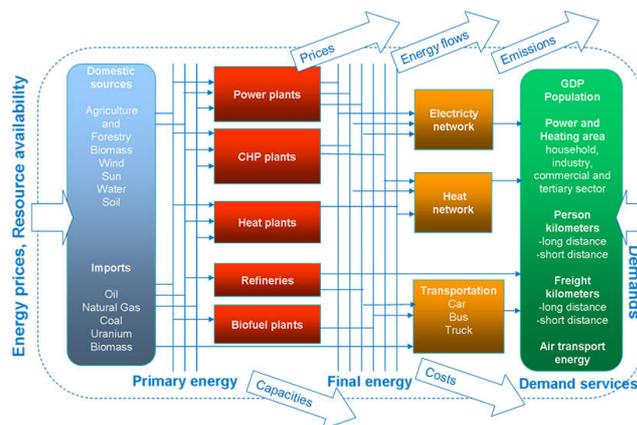
Actinides

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



LE MODÈLE TIAM-IFPEN

ENERGY SYSTEM MODELLING



Le modèle TIMES

- **Les questions principales**
 - Changement climatique
 - Sécurité d'approvisionnement
- **Diversité de modèles**
 - Secteurs et géographie
 - Concepts économiques
 - Résolution...
- **Identifier des options de substitutions, des leviers**
 - Anticiper des futurs réalisables
 - Adéquation ressources – filières – services à des objectifs donnés
- **Allocation de ressources rares (y.c. environnement)**
- **Quantifier pour expliquer et non pour prédire**



9 | © 2018 IFPEN

SUBDIVISION GÉOGRAPHIQUE DU MODÈLE

ENERGY SYSTEM MODELLING

TIAM name	Region
AFR	Africa
AUS	Australia, New Zealand and Oceania
CAN	Canada
CHI	China
CSA	Central and South America
IND	India
JAP	Japan
MEA	Middle-east
MEX	Mexico
ODA	Other Developing Asia
SKO	South Korea
USA	United States of America
EUR	Europe 28 +
RUS	Russia
CAC	Central Asia and Caucase (Armenia, Azerbaijan, Georgia, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan, Uzbekistan)
OEE	Other East Europe (Albania, Belarus, Bosnia-Herzegovina, Macedonia, Montenegro, Serbia, Ukraine, Moldova)

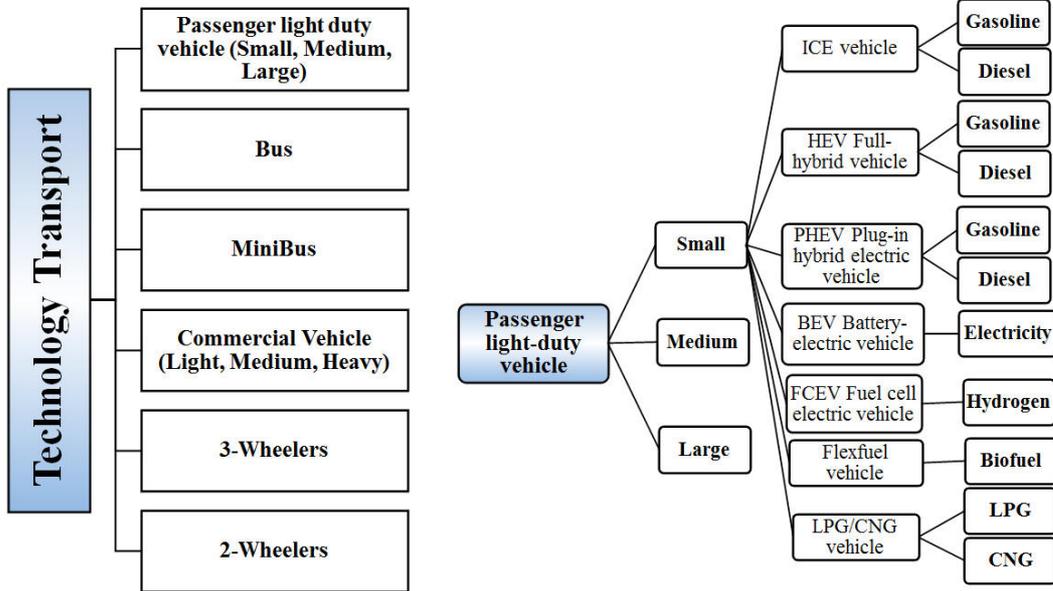
- ✓ **Le modèle est désagrégé en 16 régions** au sein desquelles chacune a son propre système énergétique avec des demandes propres associées.
- ✓ Chaque région peut échanger des ressources fossiles, de la biomasse, des matériaux ou des permis d'émission avec d'autres régions ou sur un marché centralisé.
- ✓ **Le modèle décrit en détail dans chaque région** toutes les technologies existantes et futures, de l'offre (ressources primaires) aux différentes étapes de conversion et les demandes d'utilisation finales.



10 | © 2018 IFPEN

LE MODELE TIAM-IFPEN : SECTEUR DU TRANSPORT

ENERGY SYSTEM MODELLING

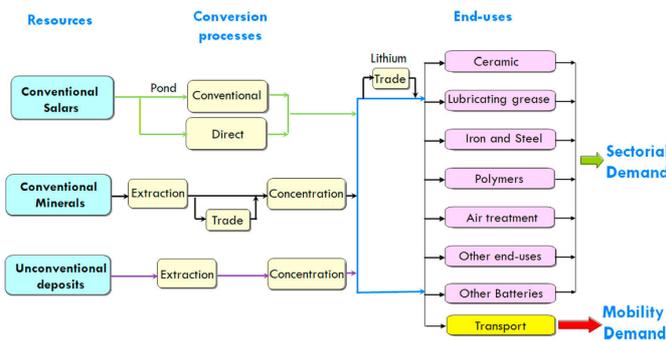


11



REPRÉSENTATION DE LA CHAÎNE DE VALEUR DU LITHIUM

LITHIUM SUPPLY CHAIN



✓ Three different deposits have been considered in the model:

- ❑ Two conventional deposits (Minerals and Brine from salars)
- ❑ Unconventional lithium deposits

✓ Trade is included in the model:

- ❑ The first one is about lithium ore from the mineral deposits to the refining sites. The main flow is as of today from Australia to China.
- ❑ The second trade concerns the chemical derivatives.

Regional disaggregation of the lithium resources (in Mt) by type of deposits in 2017

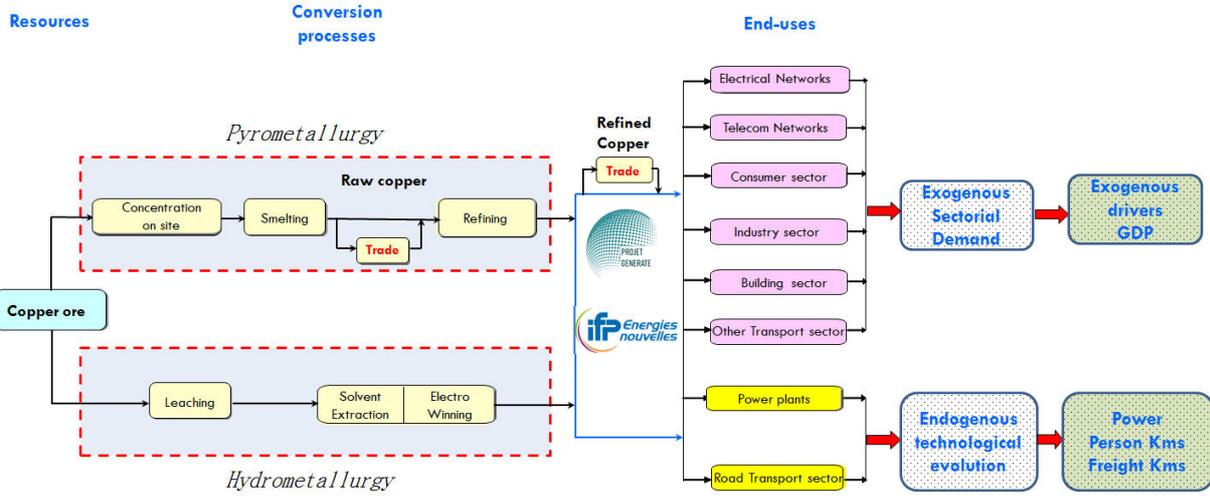
	AFR	AUS	CAC	CAN	GHI	CSA	EUR	IND	JPN	MEA	MEX	ODA	OEE	RUS	SKO	USA
Brine					5.25	25.5										2.07
Mineral	1.2	2		2	1.75	0.2	0.01			1.5				1		4.14
Clay							1.033				0.845		1.033			0.69

Source: USGS, 2018



REPRÉSENTATION DE LA CHAÎNE DE VALEUR DU CUIVRE

COPPER SUPPLY CHAIN



13 | © 2018 IFPEN

SPÉCIFICATION DES SCÉNARIOS (SCÉNARIO GENERATE)

ENERGY SYSTEM MODELLING

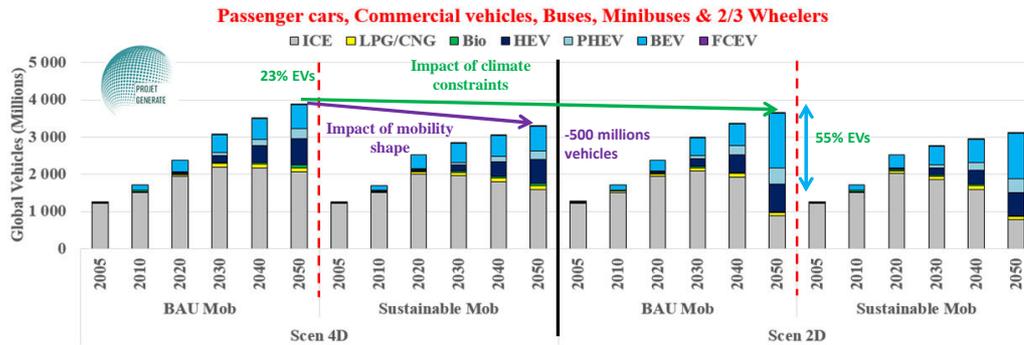
- ✓ Nous avons examiné 4 scénarios où nous avons considéré deux scénarios climatiques avec deux formes de mobilité différentes afin d'évaluer l'impact sur le marché de différentes matières premières de l'électrification des transports :
 - ✓ Scénario 4D correspond à une hausse de la température moyenne mondiale à 4°C au-dessus des niveaux préindustriels d'ici 2100.
 - ✓ Scen 2D qui traduit les objectifs climatiques de limitation du réchauffement climatique à 2°C d'ici 2100.
- ✓ Dans chaque scénario climatique, deux formes de mobilité ont été considérées et dérivées du modèle de mobilité de l'AIE
 - ✓ Une mobilité BAU
 - ✓ Une mobilité durable
- ✓ Le recyclage des matériaux est pris en compte dans le modèle
- ✓ Différents types de batteries de véhicules électriques sont pris en compte

14 | © 2018 IFPEN



EVOLUTION DES STOCKS DE VÉHICULE 2005-2050

RESULTS



- Le parc mondial de véhicule est dominé par les moteurs thermiques entre 2005 et 2050, excepté dans le scénario 2D à partir de 2040
- Moins de 500 millions de véhicules dans le scénario 2°C avec une mobilité durable
- Environ 1/3 de la flotte mondiale est constituée de 2/3 roues (principalement en Chine et en Inde)
- Véhicules électriques : plus de 50% de la flotte électrique est constituée des 2/3 roues. Le parc de véhicules électriques est principalement situé dans des pays asiatiques (Chine, Inde et autres pays en développement d'Asie) en raison de la forte présence de véhicules à deux et trois roues

15 | © 2018 IFPEN

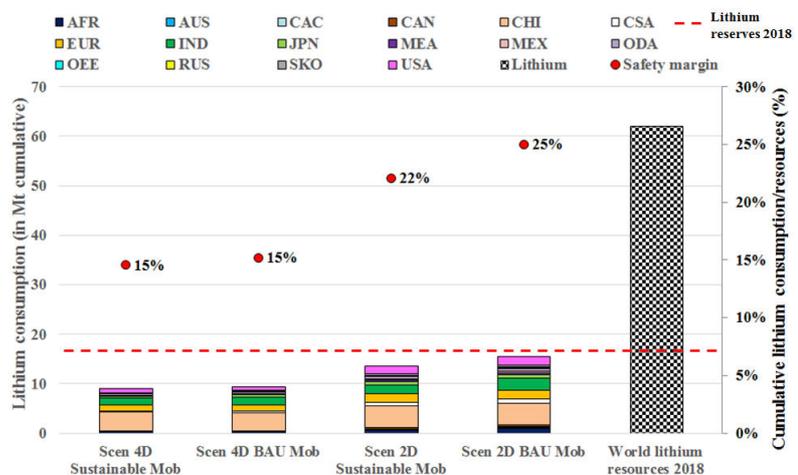


CRITICITÉ DU LITHIUM

RESULTS

Comparison between the cumulative lithium consumption (2005-2050) and the world lithium resources in 2019

- Dans les scénarios 2°C, la marge de sécurité (Rapport de la demande cumulée d'ici 2050 aux ressources) est de 25 %, soit une criticité moyenne
- D'autres facteurs peuvent toutefois induire des facteurs de risques
 - Nécessité de développer les réserves
 - Présence d'un oligopole d'entreprises (5 entreprises font 90 % du marché mondial)
 - Stratégies nationales
 - La contrainte eau



16 | © 2018 IFPEN

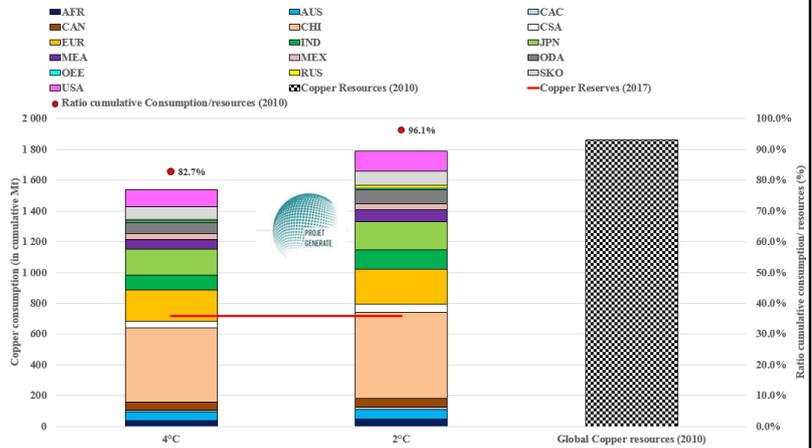


CRITICITÉ DU CUIVRE

RESULTS

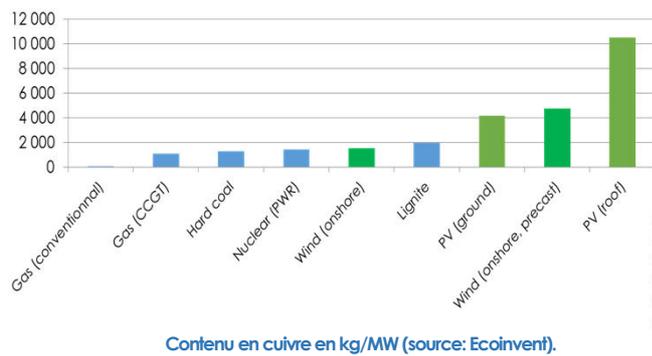
- Dans les scénarios les plus contraints (2°C), la marge de sécurité est de 3,9 %, soit une criticité élevée
- Les réserves de cuivre doivent être multipliées par 2,7 entre 2010 et 2050 dans un scénario 2°C
- Elles ont été multipliées par 2,25 entre 1996 et 2015
- Facteurs de risques
 - Eau
 - Structure du marché et poids des stratégies nationales
- Prise en compte des possibles politiques publiques

Comparison between the cumulative copper consumption (2005-2050) and the world copper resources in 2010

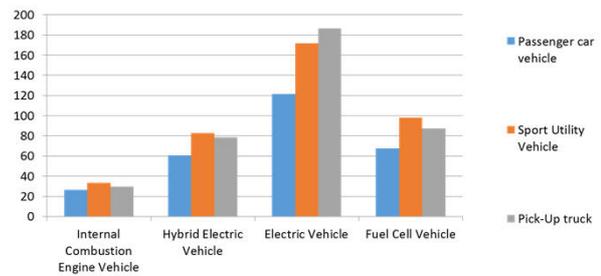


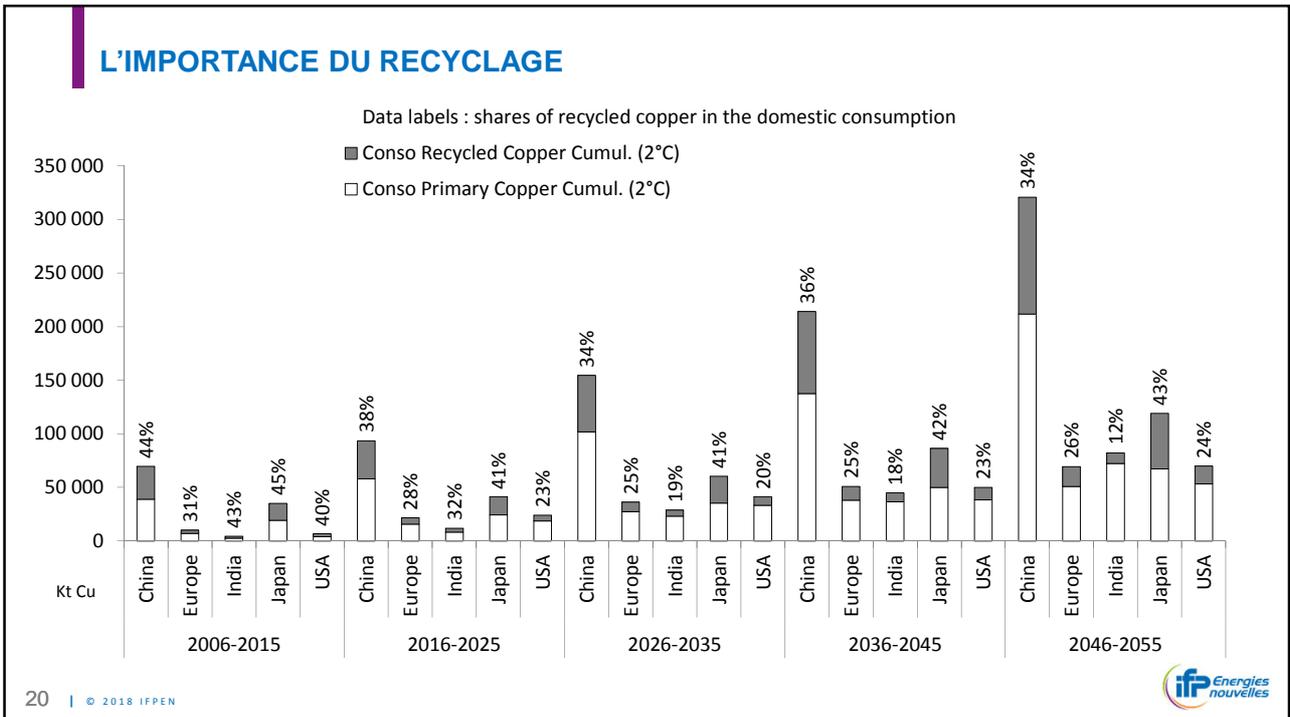
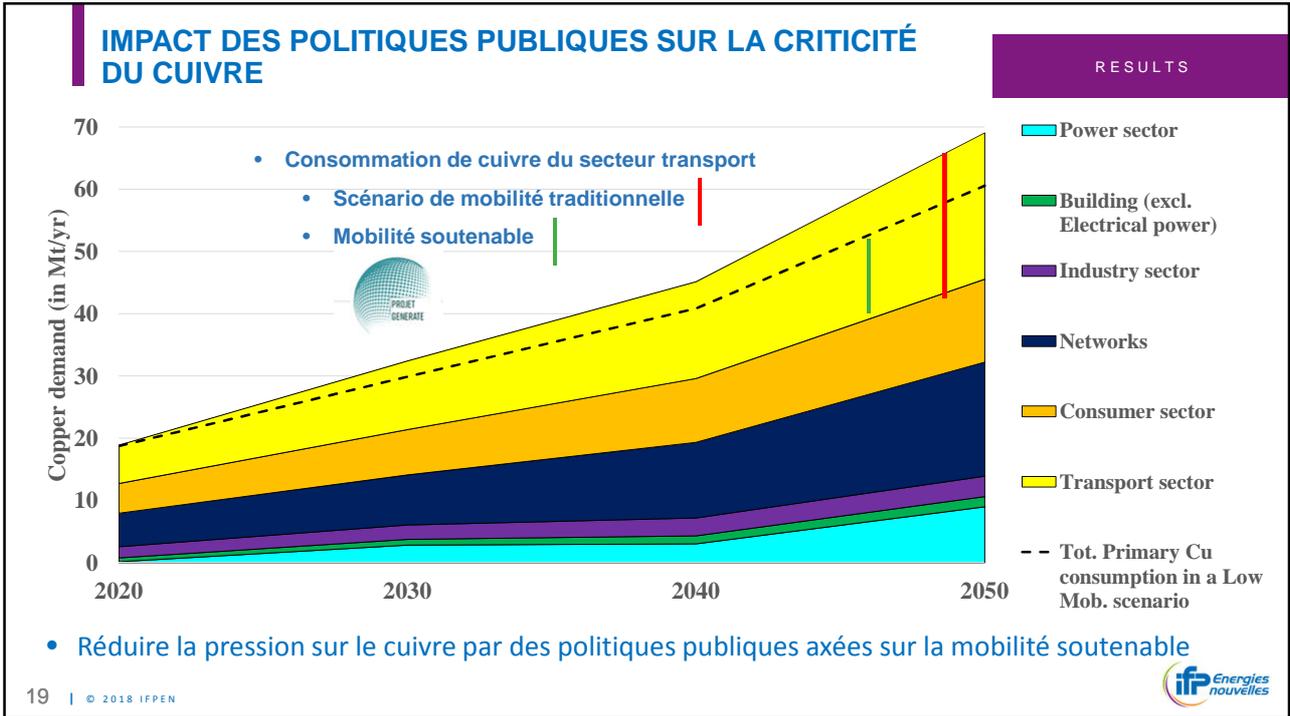
CONTENU EN CUIVRE DES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE

RESULTS



Contenu en cuivre des véhicules en kg (source: GREET2).





CRITICITÉ DU NICKEL

RESULTS

Comparison between the cumulative nickel consumption (2005-2050) and the world nickel resources in 2011



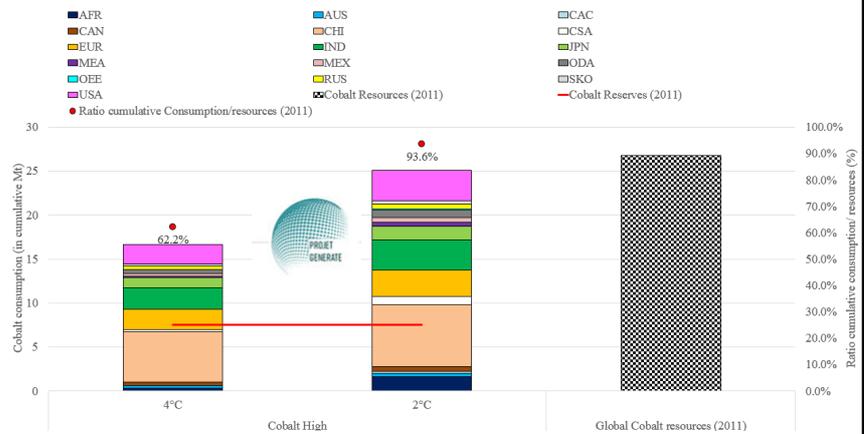
- Dans les scénarios les plus contraints (2°C), la marge de sécurité est d'environ 40 %, soit une criticité moyenne
- Facteurs de risques : qualité du nickel, organisation industrielle du secteur

CRITICITÉ DU COBALT (SCENARIO MOBILITÉ BAU)

RESULTS

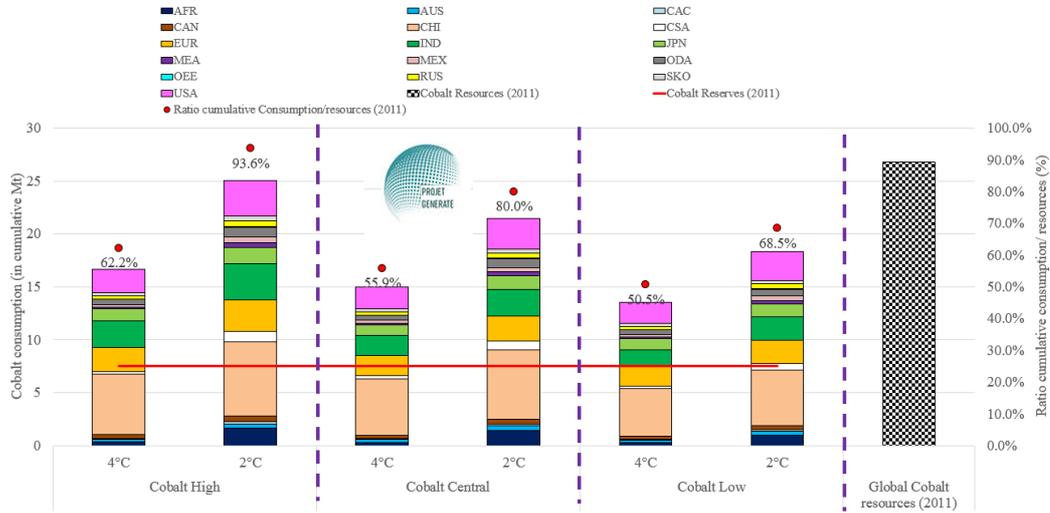
Comparison between the cumulative cobalt consumption (2005-2050) and the world cobalt resources in 2011

- Dans les scénarios les plus contraints (2°C), la marge de sécurité est de 5,4 %, soit une criticité élevée (<40 %)
- Facteurs de risques supplémentaires
 - Géopolitique (RDC)
 - Stratégie des acteurs chinois
- Facteurs de relâchement des contraintes
 - Effet « Pépite » : ouverture de mines
 - Effet progrès technique : types de batteries envisagées (voir slide suivant)



CRITICITÉ DU COBALT (SELON 3 BATTERIES DIFFÉRENTES)

RESULTS

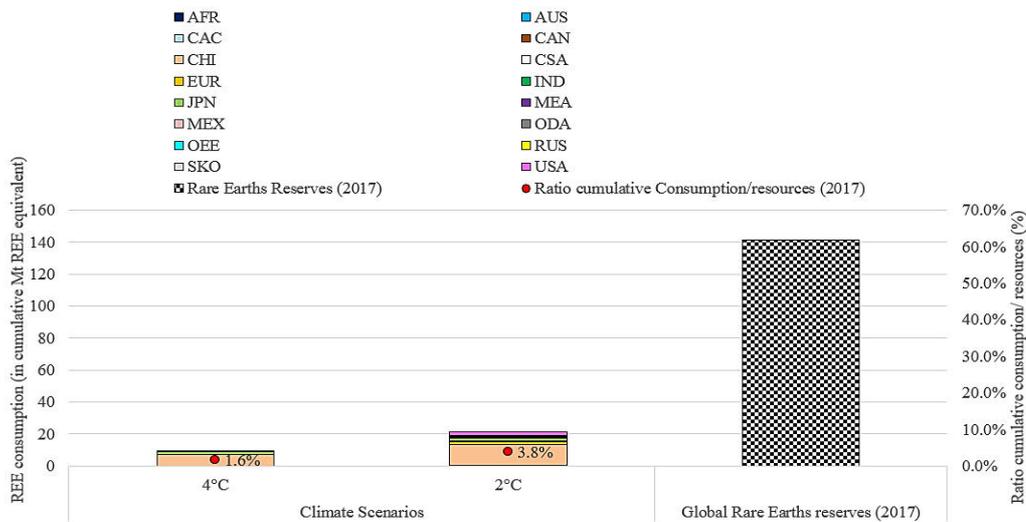


23 | © 2018 IFPEN



CRITICITÉ DES TERRES RARES

Comparison between the cumulative rare earths consumption (2005-2050) and the world rare earths resources in 2017

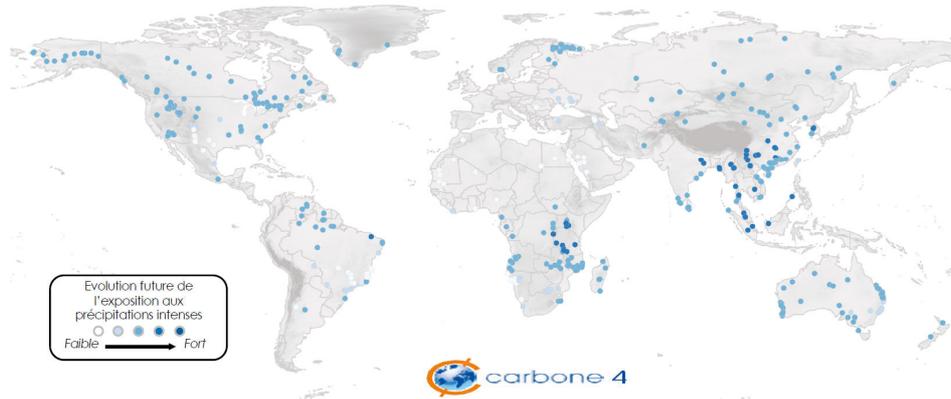


24 | © 2018 IFPEN

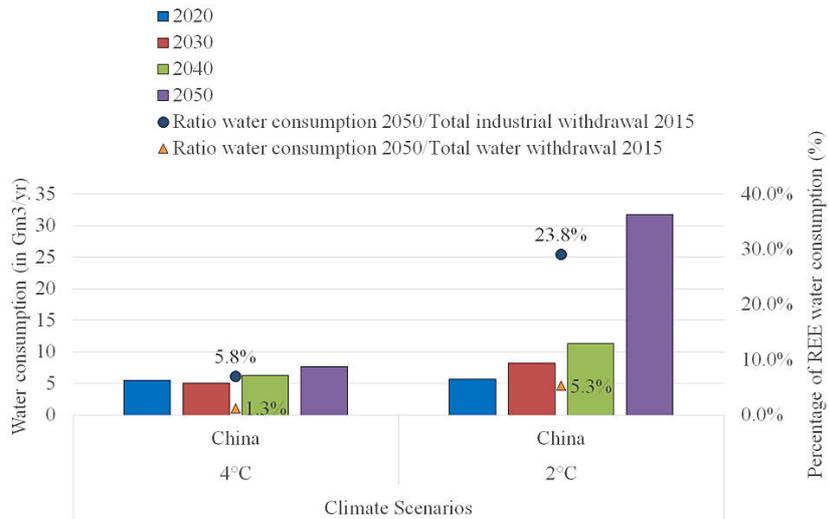


MÉTAUX ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

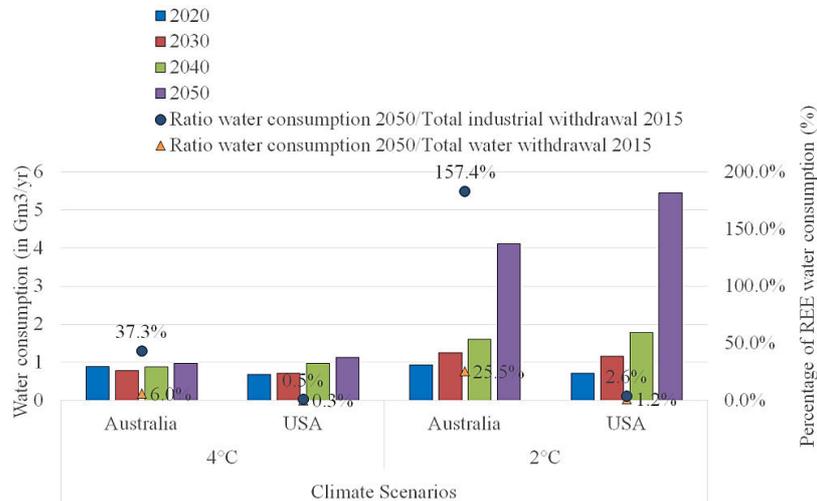
EVOLUTION FUTURE DE L'EXPOSITION DES GISEMENTS DE TERRES RARES AUX PRÉCIPITATIONS INTENSES



TERRES RARES ET EAU EN CHINE



TERRES RARES ET EAU EN AUSTRALIE ET AUX ETATS-UNIS



27 | © 2016 IFPEN



QUANTITÉ D'EAU ET D'ÉNERGIE UTILISÉE POUR L'EXTRACTION DE MINÉRAI OU LA RÉUTILISATION DE DÉCHETS DE L'INDUSTRIE MINIÈRE

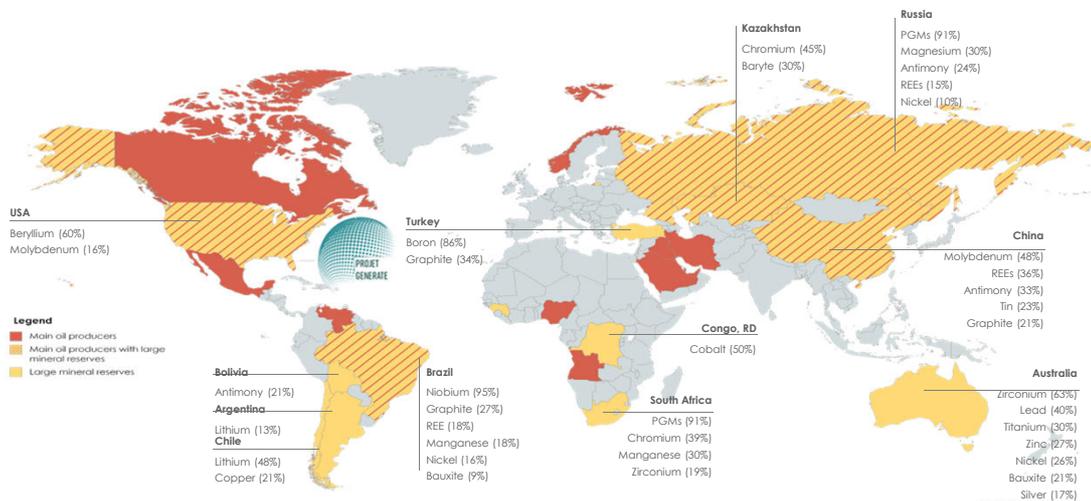
	Energie (MJ/kg)		Eau (M ³ /tonne)	
	Scrap	Minérai	Scrap	Minérai
Fer	6	20-100	12-16	50-600
Aluminium	10	238-925	2-10	11-320
Magnésium	10	165-230	2	2-15
Cuivre	14	31-2 040	15	40-200
Zinc	11	32-63	20	75-100
Plomb	9	32-45	40	50-75
Chromium	6	22-51	12	52-92
Nickel	20	130-370	20	60-320
Cobalt	20-140	140-2100	30-100	40-2 000
PGM	1 400-3 400	18 860-254 860	3 000-6 000	100 000-1 200 000
Zirconium	230	1 320-1 500	260	12 600-13 000
Or	140-230	13 300-52 300	30	120 000-420 000
Argent	80-180	480-4 280	20-40	60-200
Étain	15	480-2 180	5	75-130
Terres rares	1 000-5 000	5 500-7 200	250-1 250	1 275-1 800

Source : Sverdrup and Koca, 2016

28 | © 2016 IFPEN



EN CONCLUSION : CARTE MONDIALE DES RÉSERVES DE MATÉRIAUX LIÉS À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



29 | © 2016 IFPEN



CONCLUSION

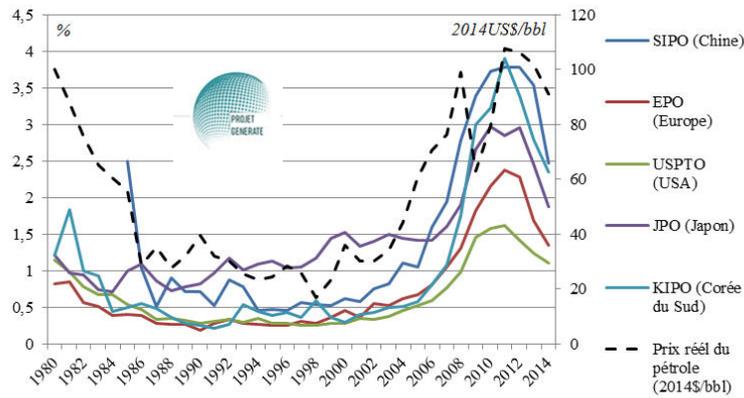
- **Pas d'universalité de la criticité : chaque métal stratégique a sa propre problématique**
 - Criticité élevée : Cuivre et cobalt
 - Criticité moyenne : Lithium, Nickel
 - Criticité faible : terres rares
- **Les métaux communs sont aussi sensibles à la transition énergétique que les matériaux dits stratégiques**
- **Les politiques publiques ont un rôle majeur**
 - La mobilité soutenable
 - Le recyclage
 - L'évaluation des politiques publiques doit être renforcée
- **Les technologies de batteries influencent la consommation de matériaux stratégiques comme le cobalt**
- **La problématique de l'eau est universelle, elle sera un point crucial à étudier pour le secteur minier**
- **De nouveaux ensembles géopolitiques se constituent**

30 | © 2018 IFPEN



CONCLUSION (2) : LA QUESTION TECHNOLOGIQUE ET LES PRIX DU PÉTROLE SERONT DES VARIABLES CLÉS

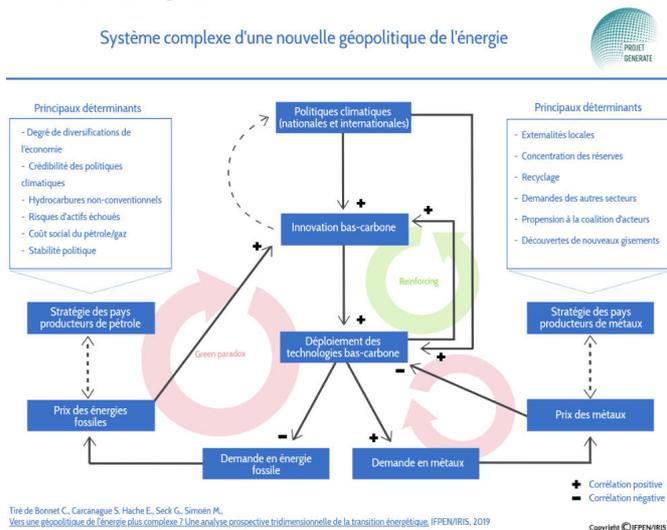
ÉVOLUTION DE LA PART DES BREVETS ENR DANS LE TOTAL DES BREVETS DÉLIVRÉS PAR LES CINQ PRINCIPAUX OFFICES DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE



Source : PATSTAT

CONCLUSION (3) : UNE NOUVELLE GÉOPOLITIQUE DE L'ÉNERGIE

Système complexe d'une nouvelle géopolitique de l'énergie



Titre de Bonnet C., Carcanague S., Hache E., Seck G., Simoin M.
Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe ? Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique, IFPEN/IRIS, 2019



- Une géopolitique de l'énergie plus complexe
 - Nouveaux risques
 - Nouveaux acteurs
- Un moyen pour améliorer les négociations climatiques internationales
 - Les ressources sont des actifs pour la transition énergétique
 - Les technologies sont des actifs pour la transition énergétique
 - Le rôle des pays producteurs d'hydrocarbures est clé

Innovating for energy

Find us on:

 www.ifpenergiesnouvelles.com

 [@IFPENinnovation](https://twitter.com/IFPENinnovation)

