



Lithium

“La ruée vers l’or blanc”

Mélina Bouamrène, Pierre-Henri
Bournazel, Marie Racine, Matteo
Khoudair, Emma Victor



01

Le lithium : propriétés,
réserves et production

03

Recyclage des
batteries Li-ion

02

Economie, géopolitique
et enjeux de la
transition



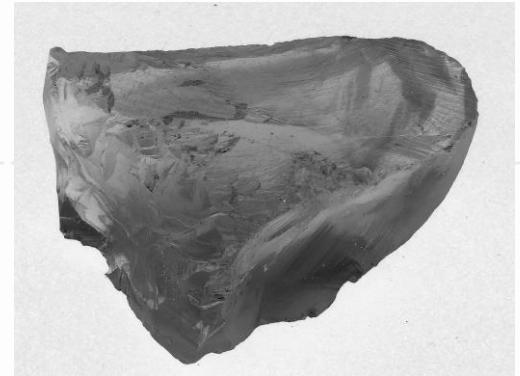
01

Le lithium

Propriétés, réserves et
production

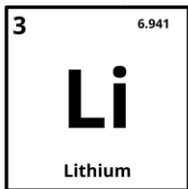
Origine du lithium

- Le lithium a été un des 3 seuls éléments présents dès le Big Bang. (nucléosynthèse primordiale)
 - ^1H et ^4He : 99%
 - ^2H et ^3He : 1%
 - ^7Li : $10^{-10}\%$ → présent seulement à l'état de trace
- Les deux isotopes ^6Li et ^7Li stables du Lithium sont majoritairement présents dans l'univers grâce aux réactions de spallation, qui viennent casser les éléments Carbone, Azote et Oxygène.
- La teneur en lithium (Li) de l'écorce terrestre est de 20 ppm (20 g/t), celle des océans est de 0,18 g/m³
- Découvert en 1807 par Johann August Arfwedson, chimiste suédois en étudiant des minéraux de pétalite ($\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$)

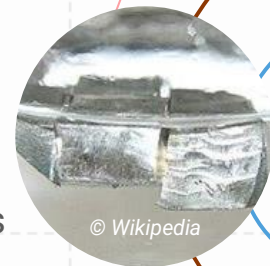


Pétalite (wikipedia)

Propriétés physico-chimiques



- **Métal** le plus léger de la famille des **alcalins**
- **Ductile**, grisâtre
- Caractéristiques **électrochimiques** intéressantes → batteries
- Très **réactif** avec l'eau et l'air à l'état pur (s'oxyde) : n'existe pas sous cette forme dans la nature



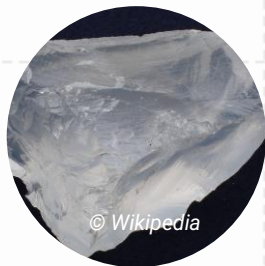
Formes naturelles

Pegmatites

Principale source de lithium rocheux, les pegmatites sont composées de **minéraux contenant du lithium**



Spodumène
 $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$



Pétalite
 $\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$



Lépidolite
 $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$

Saumures

Déserts de sel, lacs asséchés



Chiffres clés

22 000 000 t

Réserves mondiales

86 000 000 t

Ressources mondiales

60 %

Des ressources situées en
Bolivie, Chili, Argentine
"Le triangle du Lithium"

100 000 t

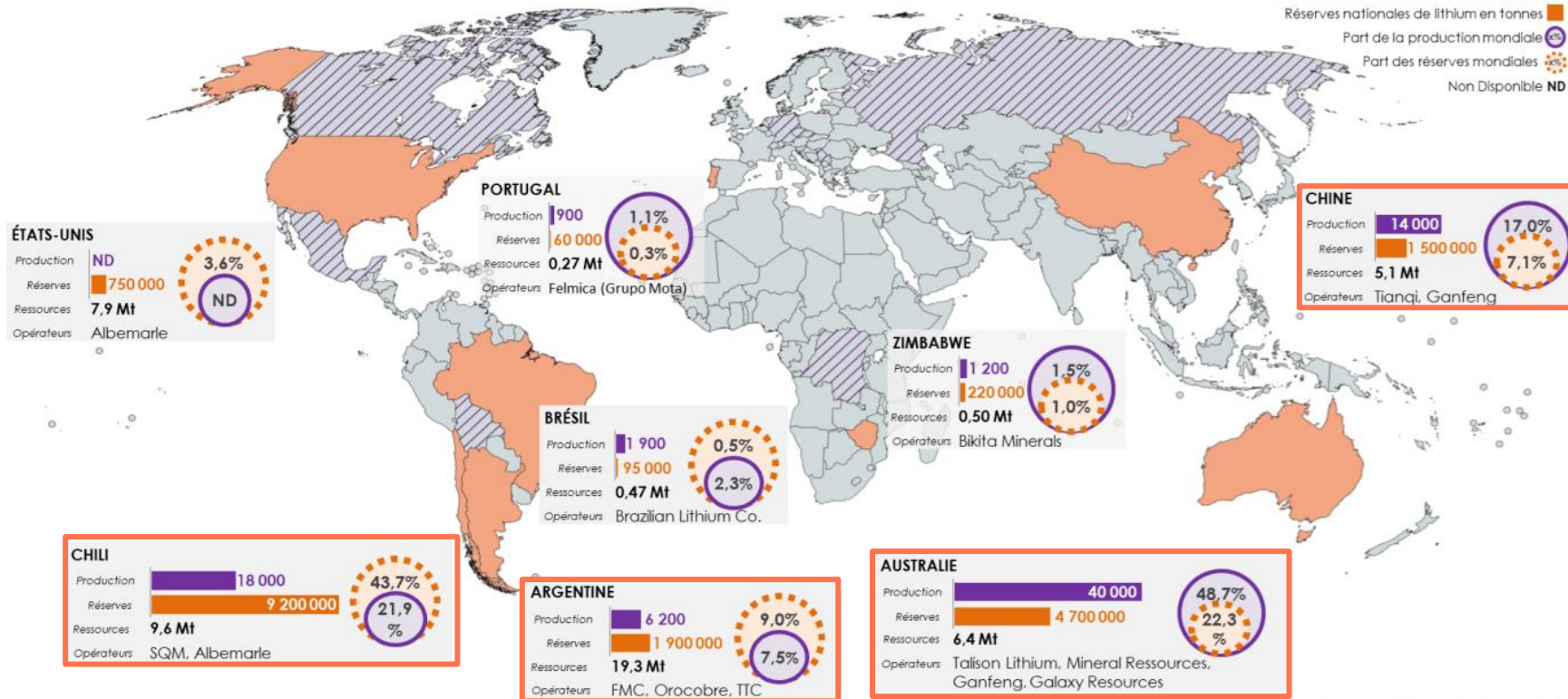
Production annuelle en
équivalent Li

55 %

De la production est Australienne,
suivi par le Chili (26%) en 2021

PRODUCTION ET RÉSERVES MONDIALES DE LITHIUM EN 2020 (t)

- Les 8 pays producteurs de lithium
- Pays non producteur détenteur de ressources > 1 Mt
- Production nationale de lithium en tonnes
- Réserves nationales de lithium en tonnes
- Part de la production mondiale
- Part des réserves mondiales
- Non Disponible ND



Source : U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2021
Carte créée par IFP Energies Nouvelles avec Mapchart.net

Exploitation des roches



- Mode d'extraction typiquement australien (aussi en Chine, Portugal, Zimbabwe)
- Teneur en Li_2O pouvant atteindre 4%
- **Plus court que l'exploitation des saumures mais plus coûteux en raison d'une forte demande en énergie tout au long du processus**

Pré-traitement :

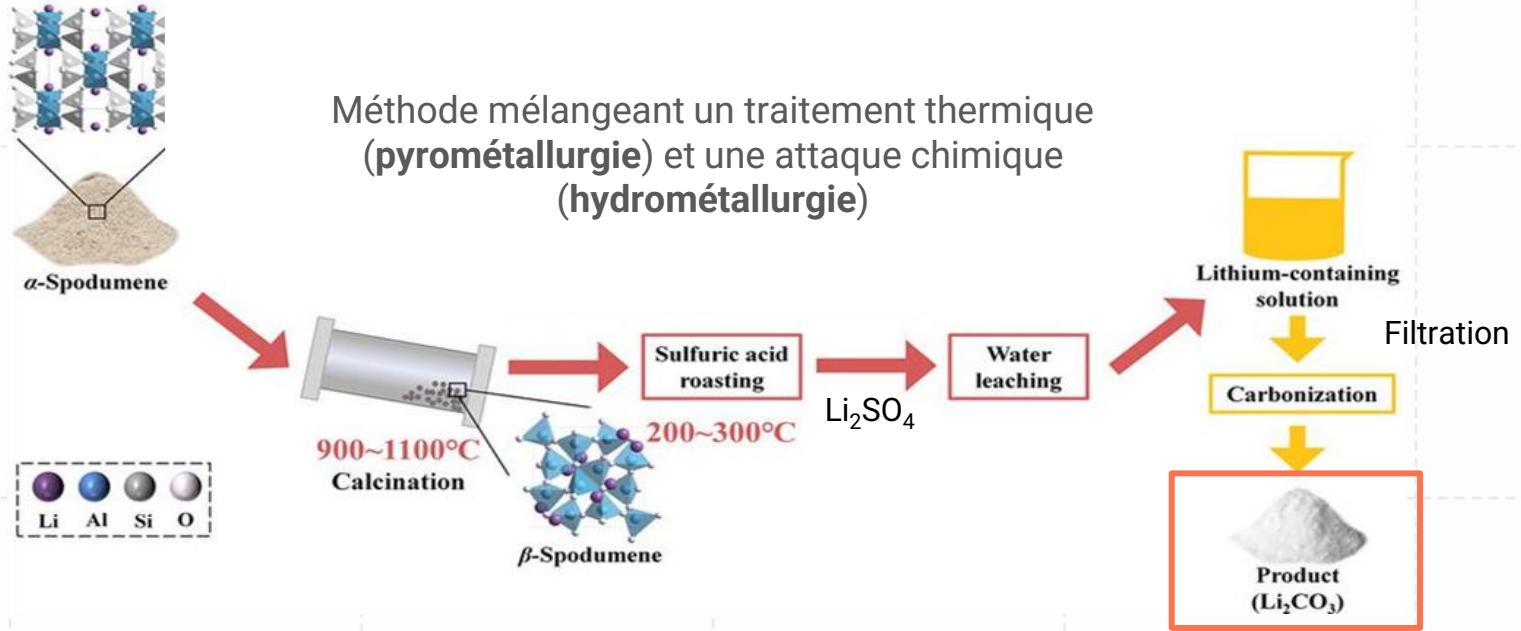
Extraction > Concassage > Séparation > Concentration à 6% en Li_2O ("SC6")

→ Puis raffinage du concentré pour produire du carbonate (Li_2CO_3) ou de l'hydroxyde de lithium (LiOH), historiquement en Chine



Exploitation des roches

Traitement par voie acide (méthode traditionnelle)



Forte consommation d'énergie à chaque étape du processus

Exploitation des saumures



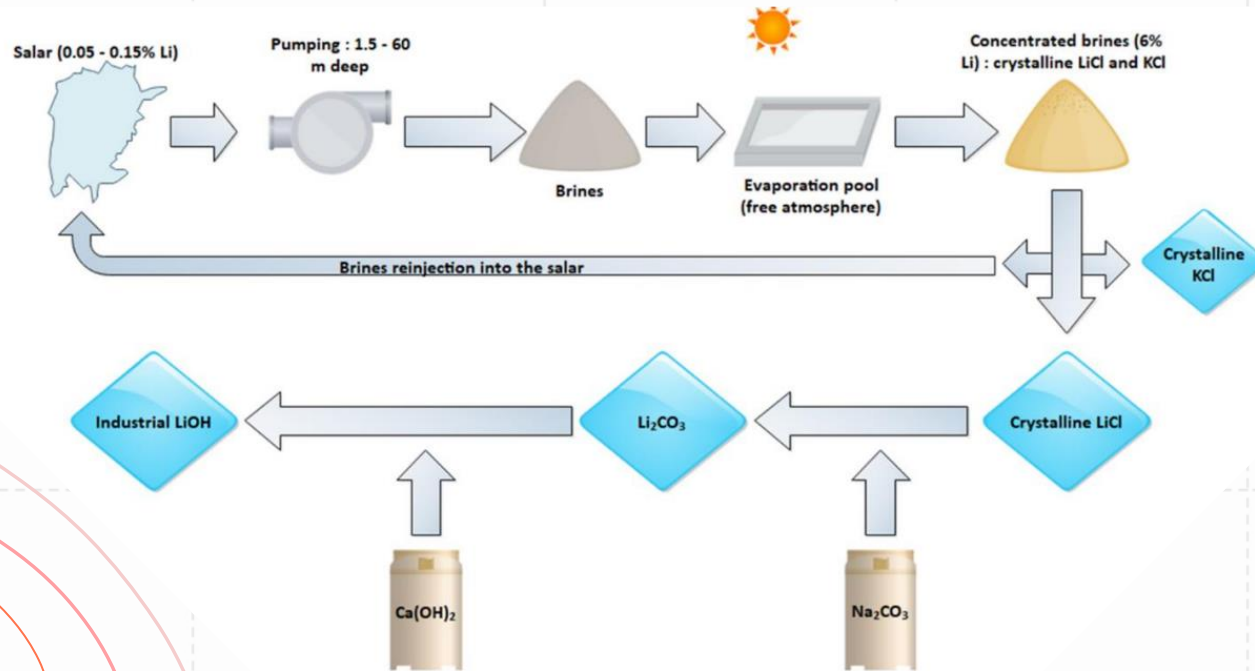
Exploitation des saumures

- Principalement exploitées en Amérique du Sud: Les Salars
- Teneur en lithium sous ces anciens lacs salés: 0,05% à 0,16%
- Production annuelle venant des salars: 48 000 tonnes
- Le Salar d'Uyuni en Bolivie est la plus grande accumulation de lithium connue 10 582 km²: 9 millions de tonnes. Mais une concentration élevée en Mg ne permet pas pour l'instant son exploitation à grande échelle.



Salar d'Uyuni

Exploitation des saumures




Exploitation des saumures

- 2 sources d'eau utilisées dans ce procédé:
 - **L'eau d'évaporation:** jusqu'à 2000 m³/t de lithium
 - Issue des saumures, cette eau chargée en sel est impropre à la consommation. Son pompage massif peut perturber l'équilibre hydrogéologique régional
 - **L'eau de traitement:** 41m³/t de lithium (peu de sources)
 - 2 millions de m³ par an pour les salars
- Enjeux pour les communautés locales dans des régions arides (la région des mines dans l'Atacama a perdu 65% de sa ressource en eau)



Culture de Quinoa

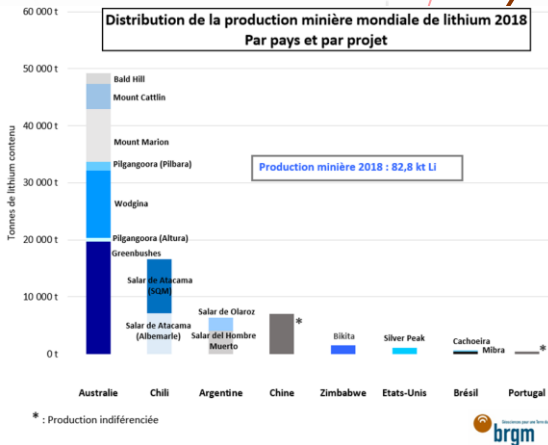
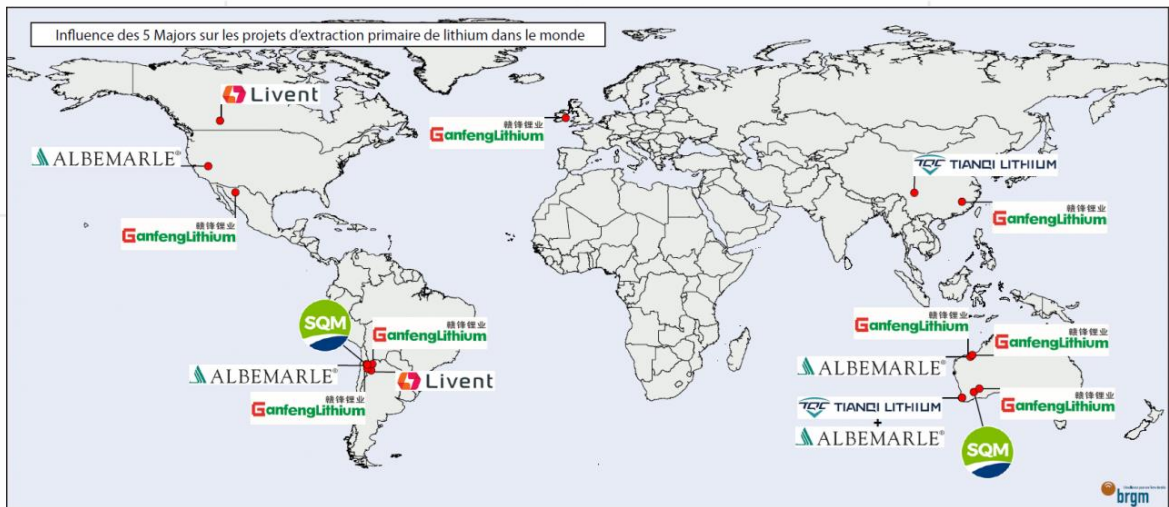




02

Economie, géopolitique
et enjeux de la
transition énergétique

Un marché concentré économiquement et géographiquement



Principaux producteurs

en % de la production mondiale de composés de lithium

Ganfeng	17 %	Tianqi	9 %
Albemarle	14 %	Livent	4 %
SQM	13 %		

Source : Eramet

- 55% des réserves actuelles en Australie
- 2 entreprises chinoises regroupent 26% de la production mondiale, suivies des Etats-Unis et du Chili.
- 80% du lithium extrait en Australie est traité en Chine
- 61% des capacités de production des batteries lithium-ion en Chine

Une demande exponentielle (échelle mondiale)

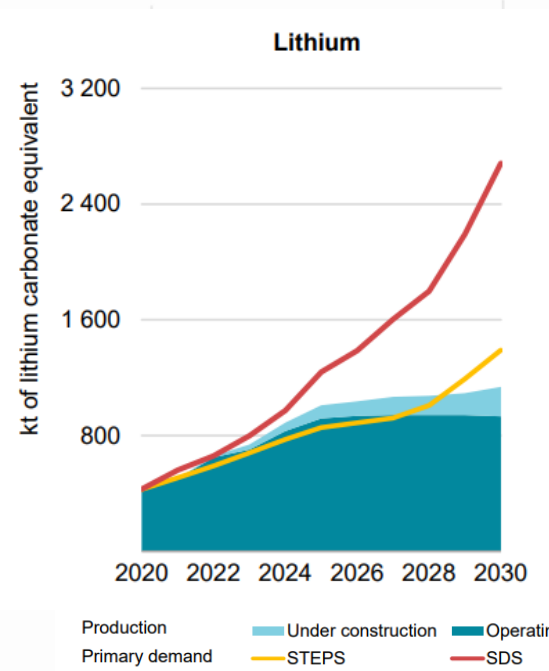


Lithium
(en tonnes de métal contenu dans la production minière)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Production mondiale	40 100	68 500	95 000	86 000	82 500	100 000
Argentine	5 800	5 700	6 400	6 300	5 900	6 200
Australie	14 000	40 000	58 800	45 000	39 700	55 000
Brésil	200	200	300	2 400	1 420	1 500
Chili	14 300	14 200	17 000	19 300	21 500	26 000
Chine	2 300	6 800	7 100	10 800	13 300	14 000
États-Unis	2 100	1 420				
Portugal	400	800	800	900	348	900
Zimbabwe	1 000	800	1 600	1 200	417	1 200



Source : "Métaux "électrique" : un avenir radieux pour les producteurs, un impératif de sécurisation pour les industriels", Cyclope, 2022, 9-20.



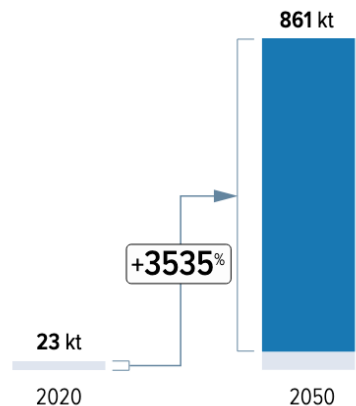
Source : Production minière et demande en lithium, The role of critical minerals in Clean Energy transitions, IEA, 2021.

Une demande exponentielle (échelle européenne)

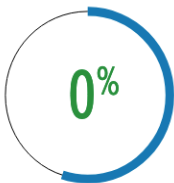
- Tmhnm dtqnodmmd hmsdqchbshnm udmsd cd ughbtkdr sgdqlhptr mdr dm 1/24

Besoin européen en lithium

Lithium (kt, LCE)



Autosuffisance de l'Europe pour ses besoins en matières premières primaires et métaux primaires, scénario de base 2030



Lithium
up to +55%
uncertain projects

Mining



Lithium
up to +65%
uncertain projects

Refining

Top transition uses (all battery metals):



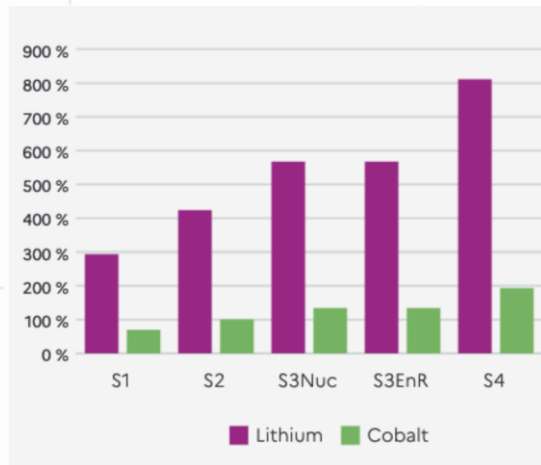
EVs



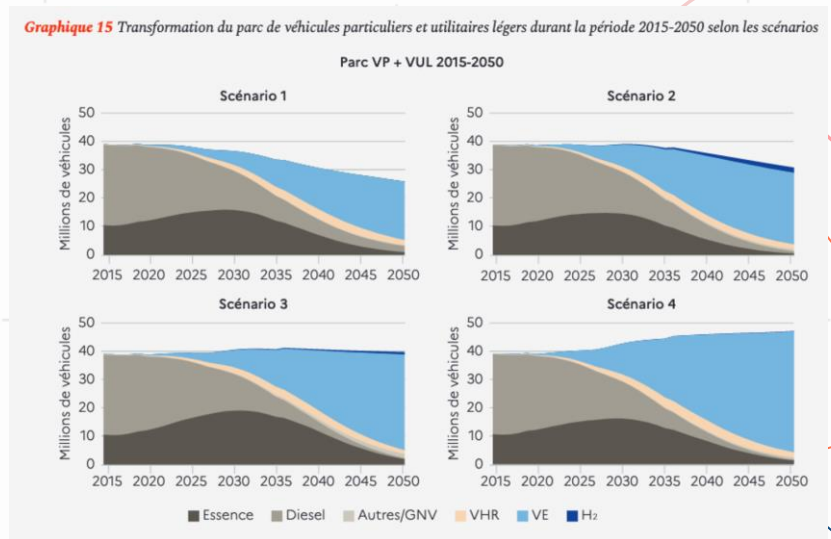
Battery storage

Des besoins en lithium différents selon les trajectoires de décarbonation (échelle française)

- Dm khdm `udb kdr rbm`qhn r cd sq`mrhshnm cd k@CDL D+ oktr kd rbm`qhn sdmc udqr k` rnaqhs+nhmr kd adrnhm dm l`sqh`tw rdq` kdu-
- K` bnmrnl`shnm ct khsghtl dwoknrd c`mr sntr kdr rbm`qhn+ltkshokhd o`q 2 ontq kd rbm`qhn 0 ds o`q 7 ontq kd rbm`qhn 3-



Augmentation des besoins en métaux selon les différents scénarios par rapport à 2020, ADEME, 2022.



Transformation du parc de véhicules particuliers et utilitaires légers durant la période, 2015-2050, ADEME, 2022.

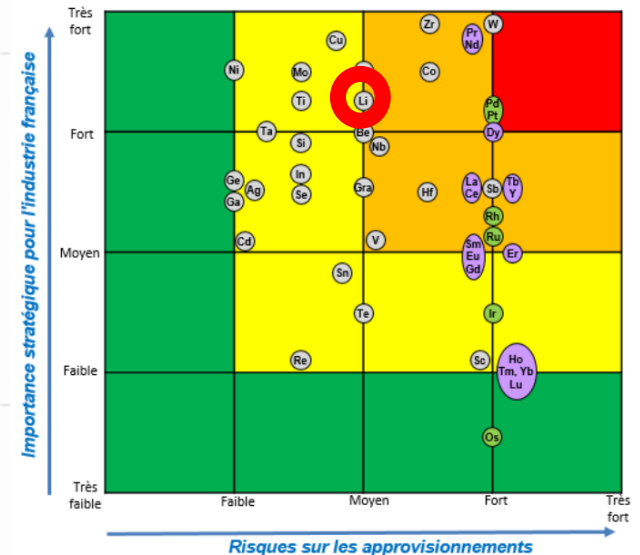
Transition énergétique : vers de nouvelles dépendances ?

- **Métal critique** : métal aux propriétés remarquables pouvant entraîner des impacts industriels ou économiques négatifs importants liés à un approvisionnement difficile, sujet à des aléas. (définition du BRGM).

Criticité du lithium : moyenne à forte

- **Risques de rupture d'approvisionnement moyen** : risques géopolitiques maîtrisés (Australie et Chili comme acteurs majeurs), sous-capacités industrielles ...
- **Importance stratégique pour l'industrie française forte** : forte augmentation de la demande en batteries.

ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ DES SUBSTANCES OU GROUPES DE SUBSTANCES ÉTUDIÉS PAR LE BRGM
Positionnements actualisés à fin 2020 ("Fiches de criticité")



L'impact de la transition énergétique sur les approvisionnements

Source : La matrice de criticité mise à jour à fin 2020 est disponible sur Minéralinfo, BRGM, 2020.

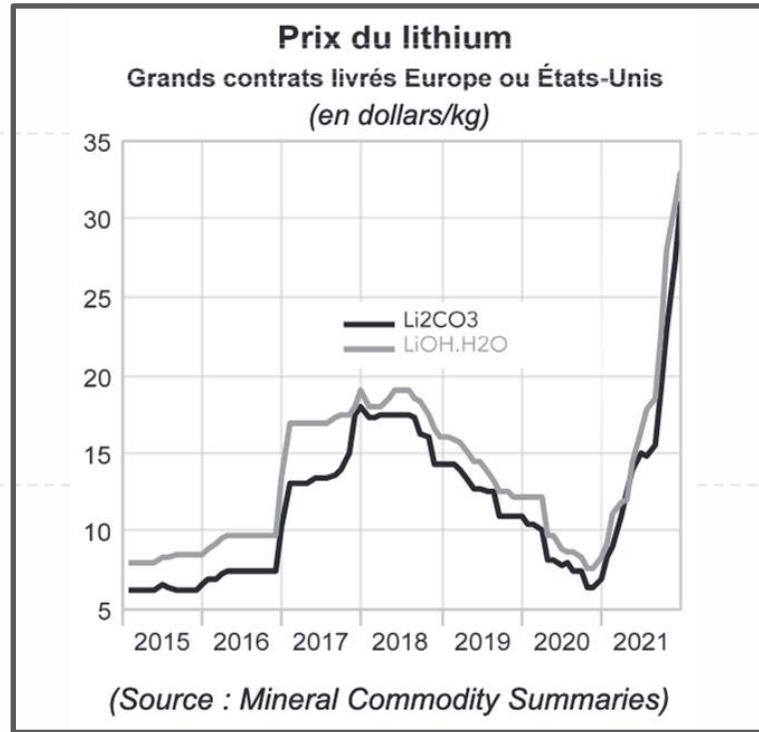
Un risque d'épuisement physique limité mais des ruptures d'approvisionnements à anticiper

- **Concentration géographique** et mainmise sur la production par **5 « majors »** du secteur.
- **Croissance de la demande** : fois 40 selon l'IEA d'ici 2040.
- **Temporalité de développement des projets miniers**
- **Volatilité des prix**
- **Risque de qualité de la ressource déclinante**
- **Préoccupation environnementale et sociale croissante**
- **Augmentation de l'exposition aux risques climatiques**



Marché contraint et volatilité des prix : freins au développement de nouveaux projets ?

- Les entreprises nouvellement entrantes sur le marché sont plus vulnérables à une baisse des prix du lithium qui pourrait freiner la rentabilité de certains projets
- *Fly up* depuis fin 2020 : prix anormalement élevés
- Près de 80 000 euros la tonne de carbonate de lithium en Chine (octobre 2022, source : Statista)



Diversification des exploitations

Capacités de production cumulées des Majors

Compagnie	Opération	Capacité de production totale	Contrôle actionnarial de la compagnie	Equivalent Production Li théorique	Commentaire éventuel
Albermarle	Salar de Atacama	8 266	100%	8 266	
	Greenbushes	35 000	49%	17 150	
	Wodgina	20 880	60%	12 528	
	Silver Peak	1 879	100%	1 879	
				39 823 t Li	
SQM	Salar de Atacama	13 150	100%	13 150	
	Mount Holland	8 804	50%	4 402	
				17 552 t Li	
Livent	Salar del Hombre Muerto	4 854	100%	4 854	
	Clearwater - Alberta E3 Metals Corp	ND	ND	ND	Faisabilité. Appui financier et technologique de Livent
				4 854 t Li	
Tianqi	Greenbushes	35 000	51%	17 850	
	Cuola	ND	100%	ND	
				17 850 t Li	
Ganfeng	Mount Marion	10 440	50%	5 220	En production
	Cauchari-Olaroz	7 515	51%	3 832	Faisabilité
	Sonora	6 575	22,50%	1 479	Faisabilité
	Avalonia	ND	79%	ND	Faisabilité
	Mariana	1 879	86,297%	1 621	Faisabilité
	Ningdu Heyuan	3 288	100%	3 288	En production
Pilgangoora (Pilbara Minerals)	Pilgangoora (Pilbara Minerals)	9 187	9,5%	873	Equity ownership dans Pilbara Minerals : 9,5%
	Pilgangoora (Altura Mining)	6 125	ND	ND	Accord d'enlèvement (Offtake) Stage 1 : 9 ktLCE Stage 2 : 14 ktLCE
				15 046 t Li	
TOTAL		172 842 t Li		96 393 t Li	

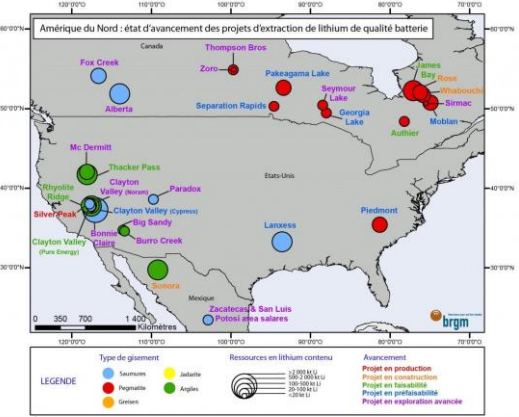
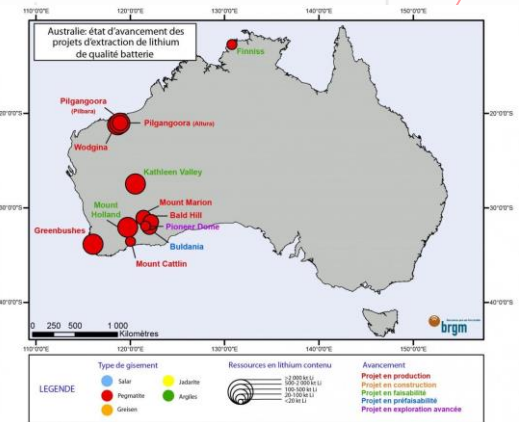
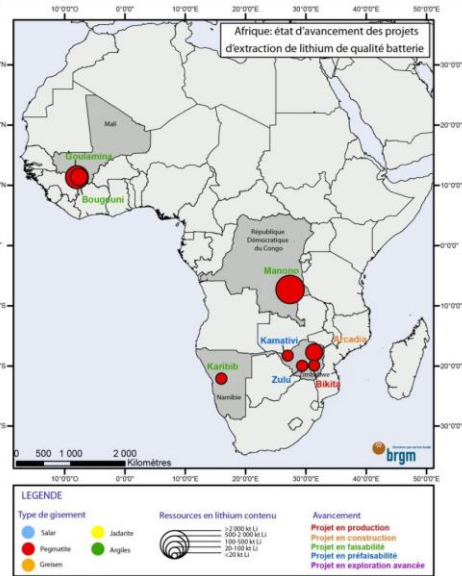
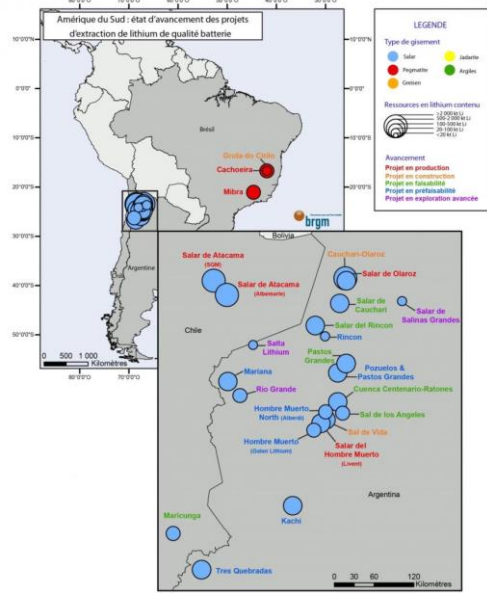
Les entreprises diversifient leurs activités afin de rester dominantes dans un marché en forte évolution.

L'ouverture de nouvelles exploitations étant peu rentable sur le court-terme, leur stratégie principale est de prendre des participations dans des mines déjà exploitées. Par exemple:

- Tianqi détient 51% des parts de la mine la plus productive à Greenbushes, qui a produit 35 000 t de lithium contenu en 2021,
- Tianqi a acquis 23,77% des parts du groupe SQM qui exploite surtout les salars chiliens.
- Ganfeng détient des parts dans les exploitations australiennes et américaines

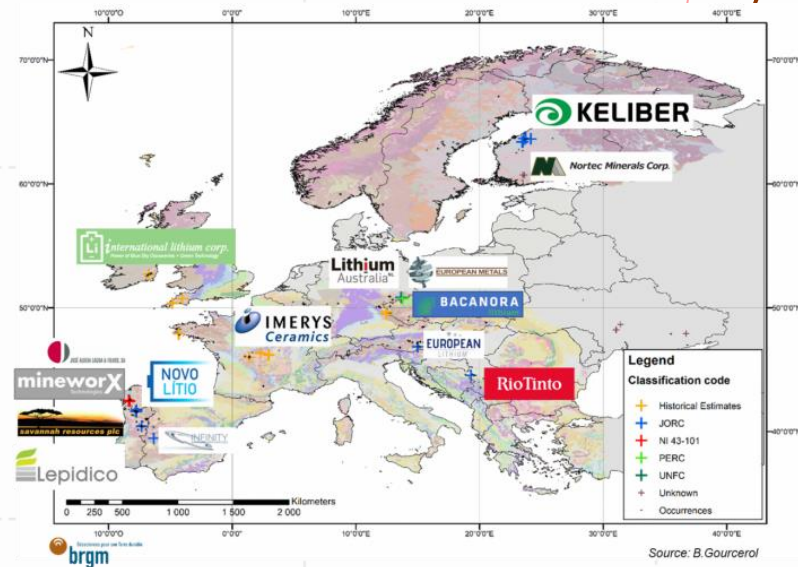
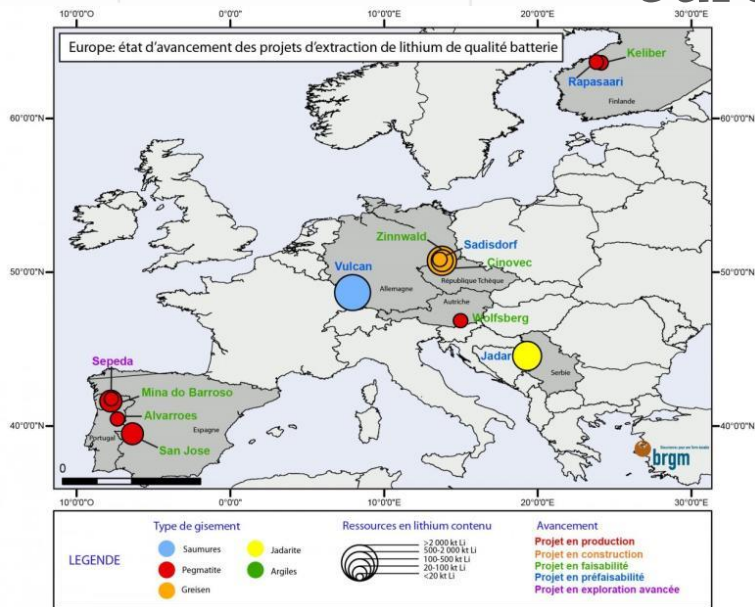
Capacités de production cumulées des majors sur le marché du lithium

La course aux investissements



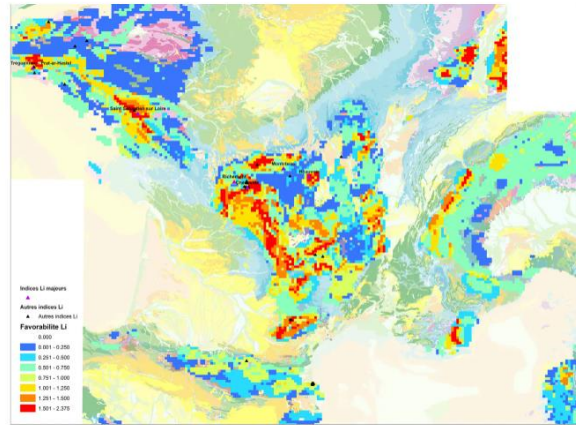
- Le triangle du lithium représente un potentiel important pour les majors, avec 53% des réserves mondiales estimées (salars notamment)
- En Afrique, 4 projets sont à l'étape de faisabilité, dont Manono au Congo qui représente plus de 2 millions de tonnes de lithium en réserve.
- En Australie, l'entreprise australienne Liontown Ressources a investi dans deux nouveaux projets. La plupart des gisements sont actuellement en production, détenus par les majors
- Des projets sont envisagés en Amérique du Nord, certains d'entre eux provenant de sources non-conventionnelles (Argiles). Les réserves sont estimées à 6,8 millions de tonnes de lithium contenu

Enjeux du développement d'une filière européenne



- Selon le BRGM, les réserves européennes ne représentent que 1% des réserves mondiales
- Néanmoins, de nouvelles exploitations sont envisagées pour réduire la dépendance aux majors du lithium.

Entre souveraineté et enjeux environnementaux : la transition énergétique sur le territoire français



Carte de probabilité de découverte de minéralisations en lithium en France métropolitaine.
Les zones les plus favorables sont en rouge.
© BRGM

Source : Ressources françaises en lithium sous la forme de roches dures, BRGM, 2019.

- La France importe 76% de son hydroxyde de lithium des Pays-Bas, 64% de son carbonate de lithium d'Argentine. Le reste vient essentiellement des Etats-Unis et de Chine.
- L'entreprise minière Imerys projette d'ouvrir une mine de lithium dans l'Allier où se concentrent une partie des ressources françaises de lithium (estimées à 23 564t mesurées par le BRGM en 2019). Cela reste très faible par rapport au lithium importé.

ÉCONOMIE - INDUSTRIE



Une première mine de lithium va être exploitée en France, avec l'ambition d'équiper 700 000 véhicules en batteries par an

Le leader mondial des spécialités minérales pour l'industrie Imerys a annoncé, lundi, le lancement d'un important projet d'exploitation à Echassières, dans l'Allier.

Par Jean-Yves Vif (Moulins, correspondant)

Publié le 24 octobre 2022 à 08h01, mis à jour le 25 octobre 2022 à 08h01 · Lecture 3 min · [Read in English](#)

Article réservé aux abonnés



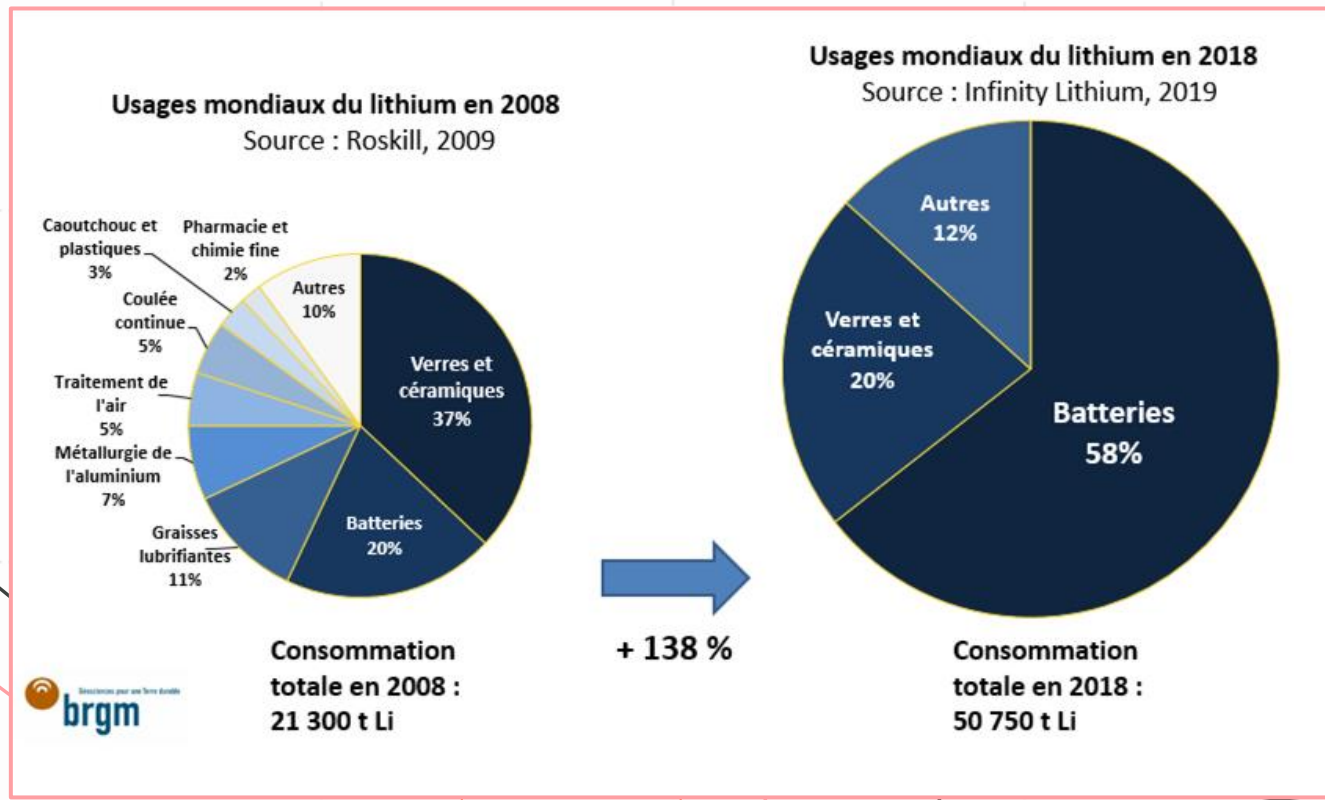
Source : Le Monde, 2022.



03

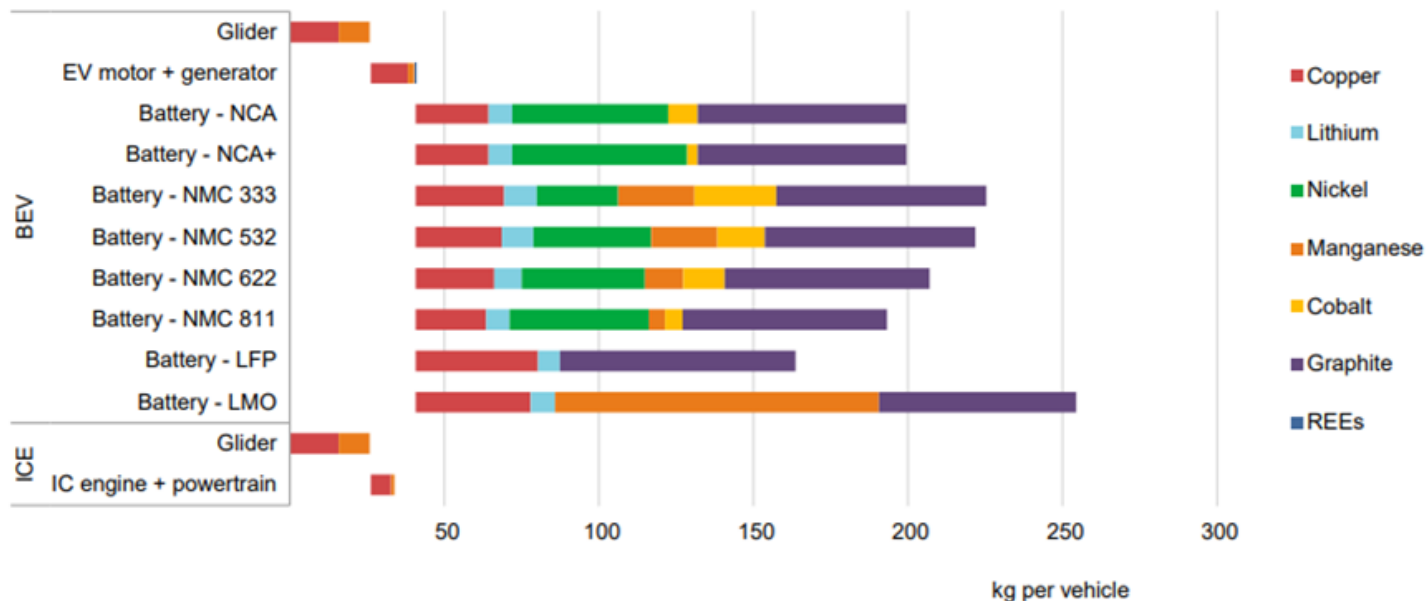
RECYCLAGE

Le recyclage du Lithium : enjeu environnemental et stratégique



EVs use around six times more minerals than conventional vehicles

Typical use of minerals in an internal combustion engine vehicle and a battery electric vehicle

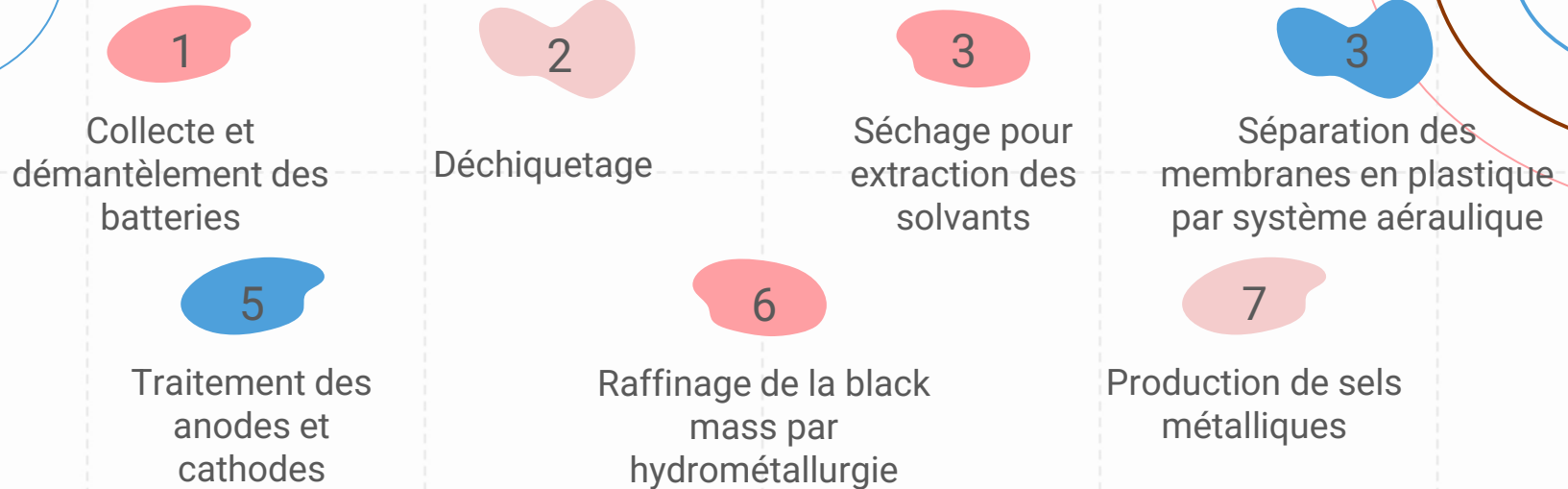


IEA. All rights reserved.

Notes: For this figure, the EV motor is a permanent-magnet synchronous motor (neodymium iron boron [NdFeB]); the battery is 75 kilowatt hours (kWh) with graphite anodes.

Sources: Argonne National Laboratory (2020b, 2020a); Ballinger et al. (2019); Fishman et al. (2018b); Nordelöf et al. (2019); Watari et al. (2019).

Processus de recyclage du Lithium en boucle fermée



Tout procédés et tout acteurs compris : des capacités de recyclage en Europe estimées à 15000 tonnes/an > un objectif de 50000 t/an en 2027

Comparaison de différentes méthodes

Comparison of different LiB recycling methods



	Technology readiness	Complexity	Quality of recovered material	Quantity of recovered material	Waste generation	Energy usage	Capital cost	Production cost
Pyrometallurgy
Hydrometallurgy
Direct recycling

	Presorting of batteries required	Cathode morphology preserved	Material suitable for direct re-use	Cobalt recovered	Nickel recovered	Copper recovered	Manganese recovered	Aluminium recovered	Lithium recovered
Pyrometallurgy	No	No	.....	.....	.....	.....	No	.....
Hydrometallurgy	No	No	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Direct recycling

Source : Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature 575, 75–86 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>

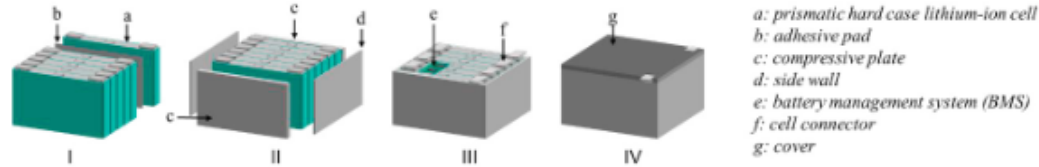


Fig. 2: Schematic representation of the production steps and parts for prismatic hard case lithium-ion battery modules

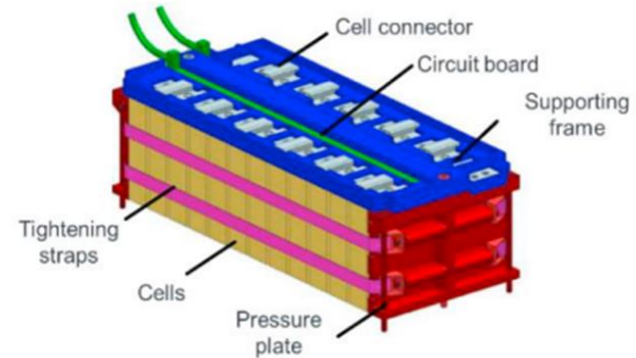
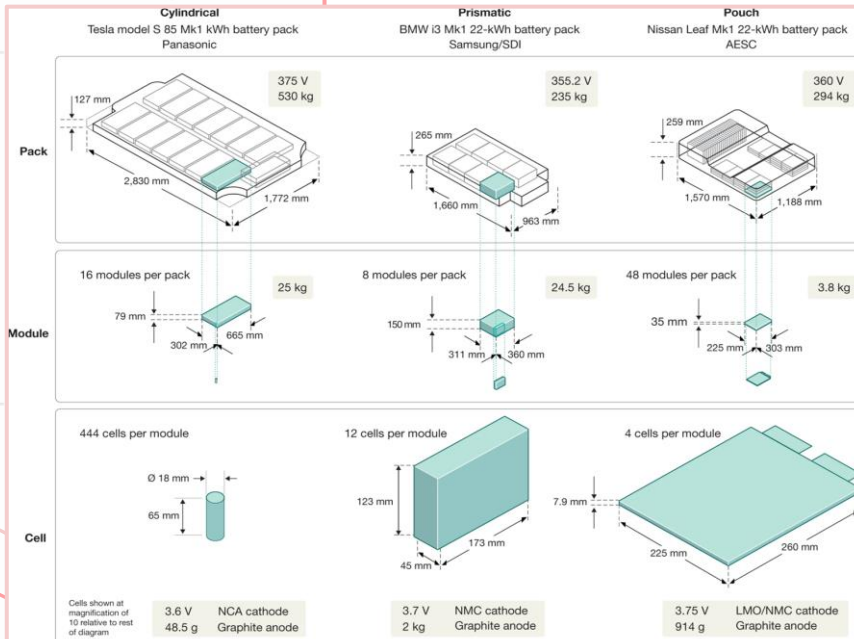


Fig. 3: Redesigned and remanufacturable battery module [8]



Merci !

Bibliographie

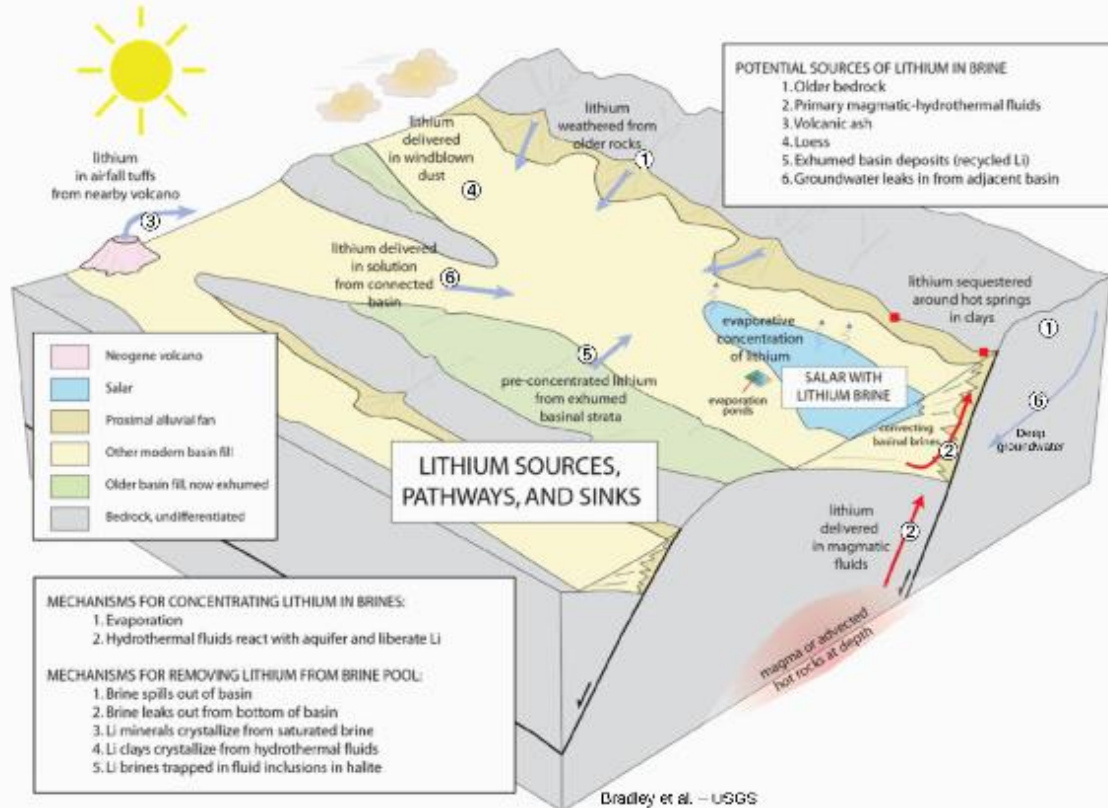
- *Le lithium (Li) : aspects géologiques, économiques et industriels*, O.Dubourdieu, P.Thomas, 2019, :<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lithium-or-blanc.xml>
- *Le lithium*, <https://lelementarium.fr/element-fiche/lithium/>
- Carte des réserves et productions mondiales :
<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/lithium-transition-energetique-au-dela-question-des-ressources>
- *Kinetics and Mechanism of Lithium Extraction from α -Spodumene in Potassium Hydroxide Solution*, Shengbo Qiu, Yue Zhu, Youfa Jiang, Chenglin Liu, and Jianguo Yu, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Res. 2022, 61, 15103–15113
- Photos des salars : Tom Hegen, <https://www.tomhegen.com/collections/the-lithium-series-i>
- *Metals for clean energy : pathways to solving Europe's raw materials challenge*, Policymaker summary, L. Gregoir, L. van Acker, *Eurometaux*, 2022,
<https://www.eurometaux.eu/media/20ad5yza/2022-policymaker-summary-report-final.pdf>
- *Métaux"électrique" : un avenir radieux pour les producteurs, un impératif de sécurisation pour les industriels* , *Cyclope*, 2022, 9-20.

Bibliographie

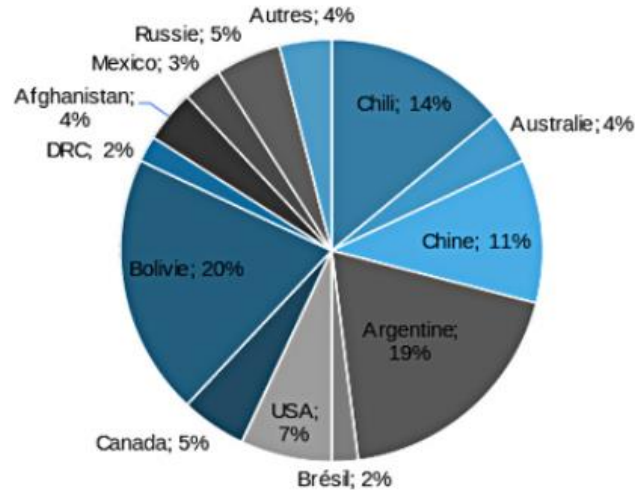
- *The role of critical minerals in Clean Energy transitions*, D@+q`oonqs+ 1/10+ 176o+ gssor9.. vvv-hd`-nqf.qdonqsr. sgd,qnkd,ne,bqshb`k,lhmdq`kr,hm,bkd`m,dmdqfx,sq`mrhshnmr
- *Le marché du lithium en 2020 : enjeux et paradoxes*, AQFL+ 1/1/+ gssor9.. vvv-lhmdq`khmen-eq.eq. dbnlhmd.l`qbgd,ct,khsghtl,1/1/,dmidtw,o`q`cnwdr
- *K`l`sqhbd cd bqshbhs lhrd intq ehm 1/1/ drs chronmhakd rtq L hmdq`khmen+1/1/+* gssor9.. vvv-lhmdq`khmen-eq.eq. `bst`khsd.`bst`khsd.l`sqhbd,cd,bqshbhsd,lhrd,intq,ehm,1/1/,drs, chronmhakd,rtq,lhmdq`khmen
- gssor9.. vvv-kdlnmcd-eq.ok`mdsd.`qshbkd. 1/10.01.02.dm,rdqahd,tm,oqnids,cd,lhmd,cd,khsghtl, onqsd,o`q,qhn,shmsn,e`hs,e`bd,`,tmd,eqnmcd,hmdchsd^50/47//^2133-gslk
- gssor9.. vvv-kdlnmcd-eq.dbnmnlhd.`qshbkd. 1/11./0.11.`oqdr,cd,rdl`hmdr,cd,l`mheds`shnmr,k`, rdqahd,lds,ehm,`t,oqnids,cd,lhmd,cd,khsghtl,cd,qhn,shmsn^500/421^2123-gslk
- gssor9.. vvv-kdlnmcd-eq.hcddr.`qshbkd. 1/11./8.18.k`bntqrd,`t,khsghtl,kd,odsqnkd,ct,wwh,rhdbkd, drs,cdnrql`hr,`trrh,qtcd,ptd,fkna`kd^5032524^2121-gslk
- gssor9.. vvv-dbnknfhd-fntu-eq.eq`mbd,1/2/,fntudqmdldms,cdunhkd,4,oqdlhdqr,k`tqd`sr,k`oodk, oqnidsr,lds`tw,bqshsptdr
- gssor9.. eq-rs`shrs`-bnl.hmenfq`oghd. 17548.dunktshnm,ct,oqhw,ct,khsghtl,ds,bnmrnl`shnm, lnmch`kd."9)9sdws<B&drs\$1/dmuhqnm\$1/kd\$1/cntakd+k`\$1/snmmd\$1/dm\$1/c\$B2\$@8bdlaqd\$ 1/1/10(-

Annexes

Modèle théorique de formation d'un gisement de lithium de type saumure

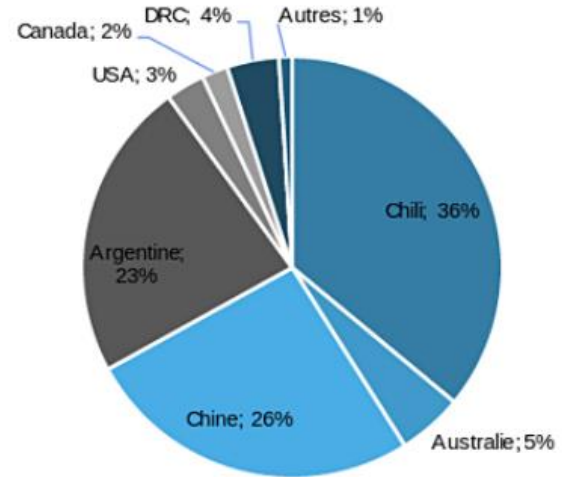


Annexes



Source - © 2019 Adapté de données Deutsche Bank

Figure 2. Répartition géographique des ressources de lithium (total : 273 Mt Li)



Source - © 2019 Adapté de données Deutsche Bank

Figure 3. Répartition géographiques des réserves de lithium (total : 102 Mt Li)

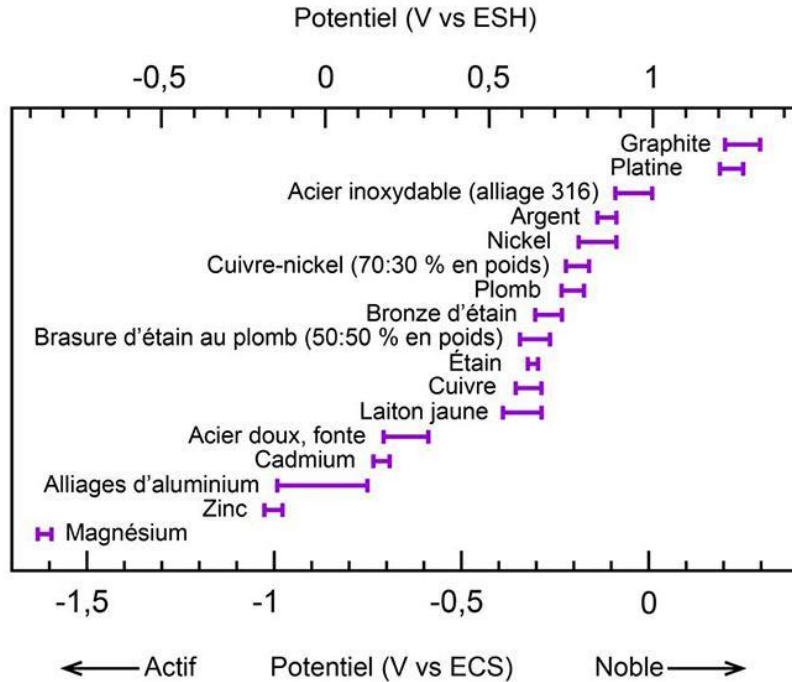
Annexes

Comparison rechargeable battery technologies

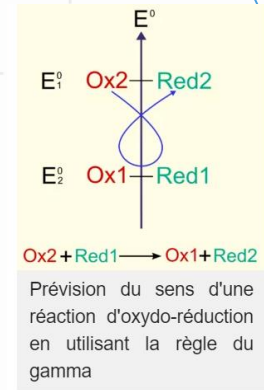
	Lead acid	Nickel Cadmium	Nickel Metal Hydride	Lithium Ion	
				Graphite/NMC	Titanate Oxide
Energy Density	40 Wh/kg	45-60 Wh/kg	80 Wh/kg	120-200 Wh/kg	70-80 Wh/kg
Cycles	200-300	1000-1500	300-500	500-3000	15000-20000
Charge power	★	★★★	★★★	★★★	★★★★★
Discharge power	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
Energy efficiency	★	★★★	★★★	★★★★★	★★★★★
Nominal cell voltage	2.0 V	1.2 V	1.2 V	3.6 V	2.3 V

Leclanché developed and manufactures both Lithium Graphite/NMC and Lithium Titanate Oxide (LTO) technologies.

Annexes

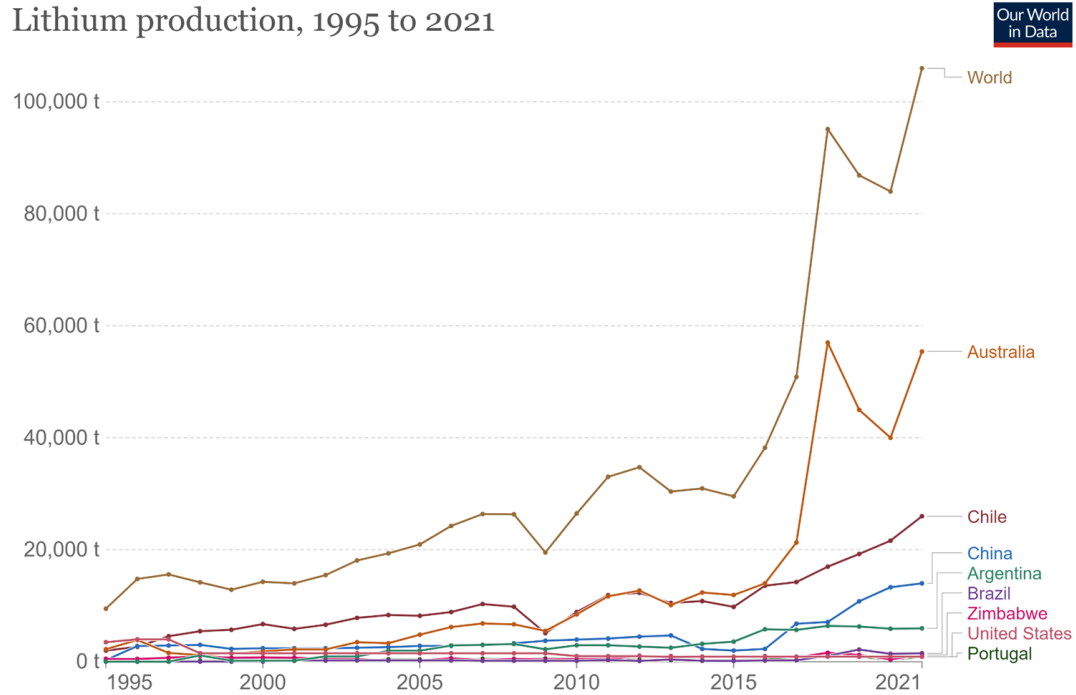


forme oxydée A_{Ox}	$+ n e^-$ $+ n e^-$	forme réduite A_{Red}	E^0 / V
$Li^+_{(aq)}$	$+ e^-$	$Li_{(s)}$	-3,04
$K^+_{(aq)}$	$+ e^-$	$K_{(s)}$	-2,92
$Na^+_{(aq)}$	$+ e^-$	$Na_{(s)}$	-2,71
$Zn^{2+}_{(aq)}$	$+ 2 e^-$	$Zn_{(s)}$	-0,76
$Pb^{2+}_{(aq)}$	$+ 2 e^-$	$Pb_{(s)}$	-0,13
$2 H^+_{(aq)}$	$+ 2 e^-$	$H_{2(g)}$	0,00
$N_{2(g)}$	$+ 8 H^+_{(aq)} + 6 e^-$	$2 NH^+_{4(aq)}$	+0,27
$Cu^{2+}_{(aq)}$	$+ 2 e^-$	$Cu_{(s)}$	+0,34
$I_{2(s)}$	$+ 2 e^-$	$2 I^-_{(aq)}$	+0,54
$O_{2(aq)}$	$+ 2 H^+_{(aq)} + 2 e^-$	$H_2O_{2(aq)}$	+0,68
$Fe^{3+}_{(aq)}$	$+ e^-$	$Fe^{2+}_{(aq)}$	+0,77
$NO^-_{3(aq)}$	$+ 4 H^+_{(aq)} + 3 e^-$	$NO_{(g)} + 2 H_2O_{(l)}$	+0,96
$O_{2(g)}$	$+ 4 H^+_{(aq)} + 4 e^-$	$2 H_2O_{(l)}$	+1,23
$Cl_{2(g)}$	$+ 2 e^-$	$2 Cl^-_{(aq)}$	+1,36
$Cr_2O^{2-}_{7(aq)}$	$+ 14 H^+_{(aq)} + 6 e^-$	$2 Cr^{3+}_{(aq)} + 7 H_2O_{(l)}$	+1,36
$MnO^-_{4(aq)}$	$+ 8 H^+_{(aq)} + 5 e^-$	$Mn^{2+}_{(aq)}$	+1,49
$H_2O_{2(aq)}$	$+ 2 H^+_{(aq)} + 2 e^-$	$2 H_2O_{(l)}$	+1,78
$F_{2(g)}$	$+ 2 e^-$	$2 F^-_{(aq)}$	+2,87



Annexes

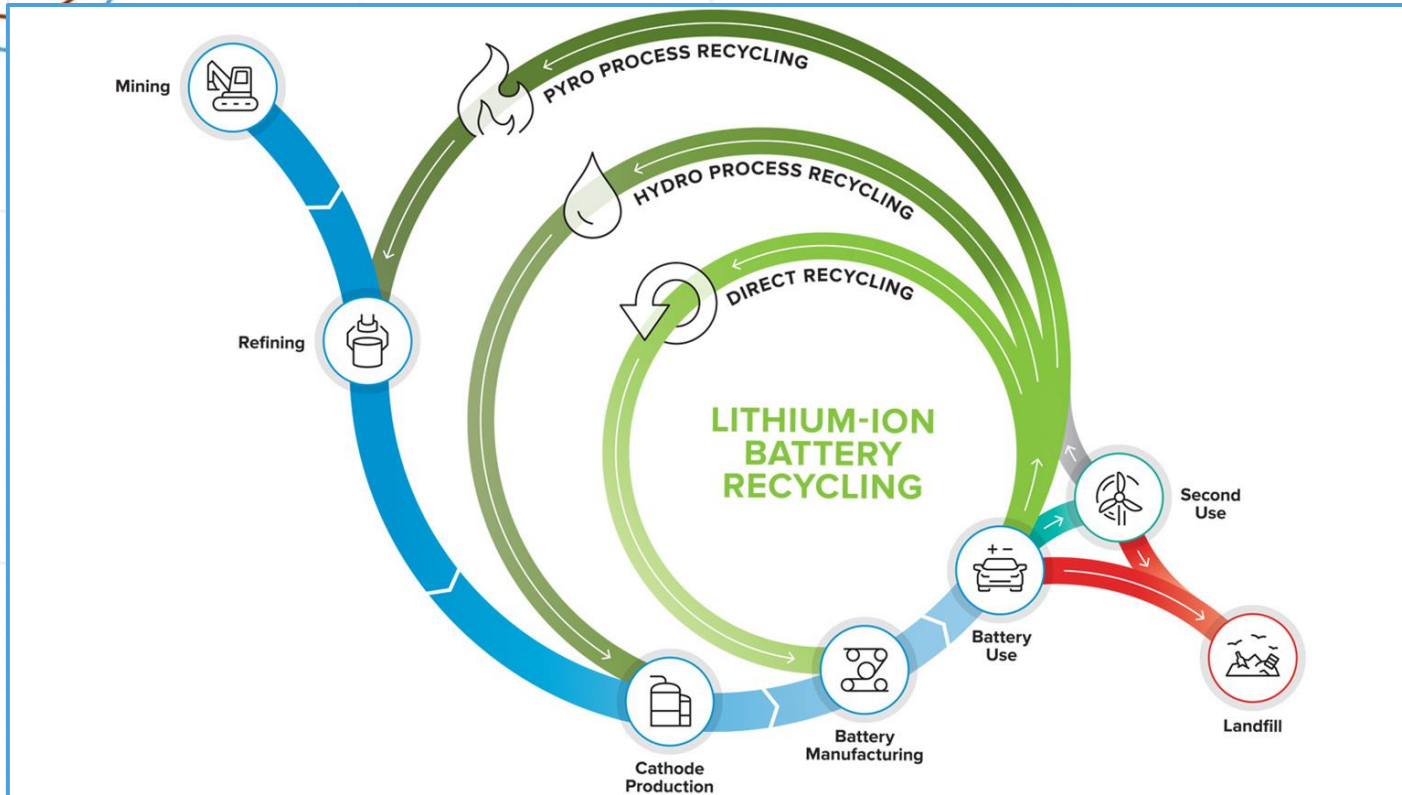
Lithium production, 1995 to 2021



Source: Statistical Review of World Energy - BP (2022)

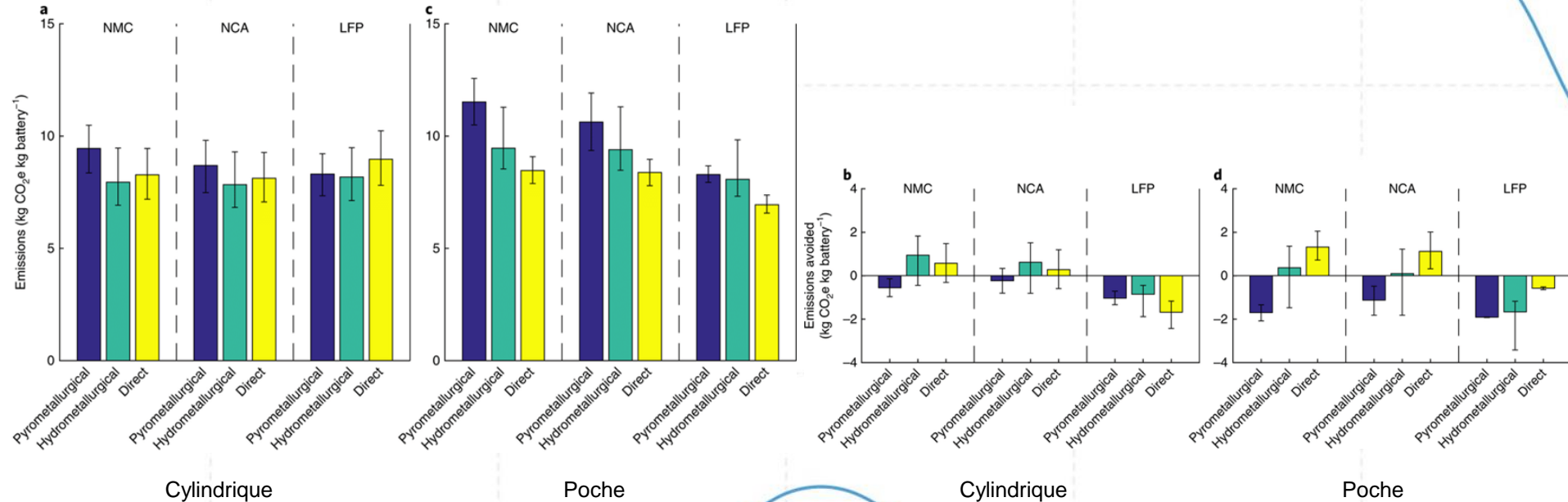
CC BY

Une deuxième vie de la batterie ?



Source : Recell Center, Advanced Battery Recycling

Émissions et émissions évitées



Annexes

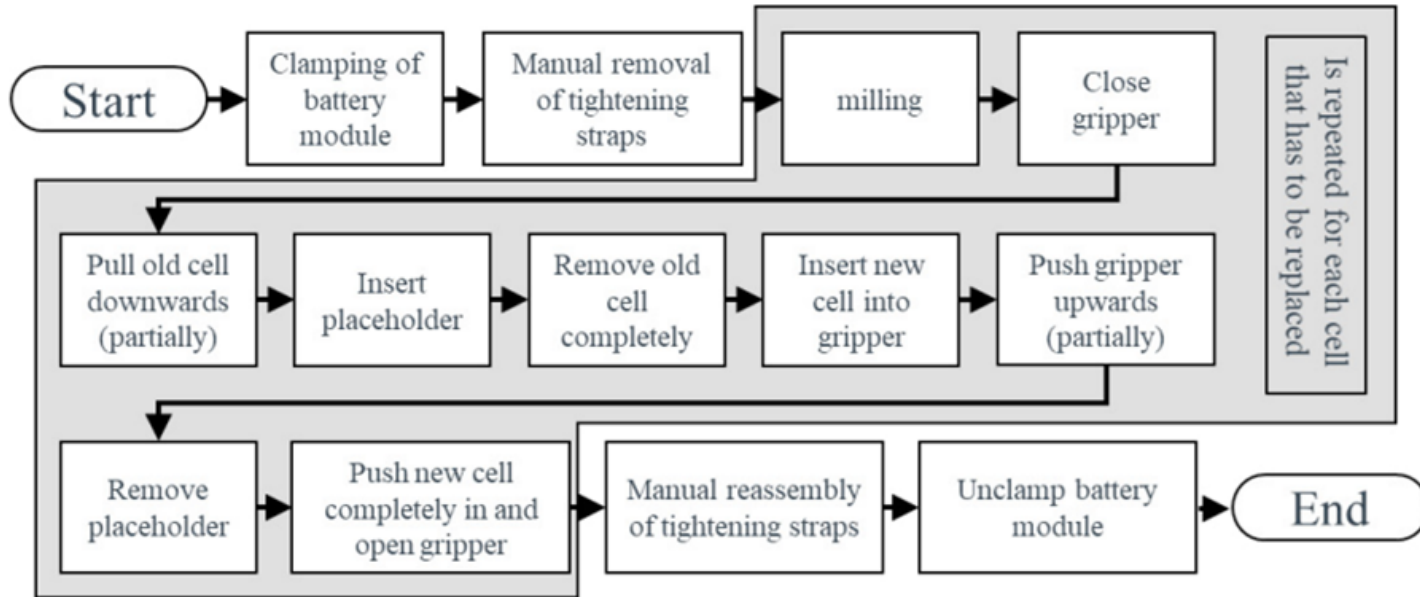
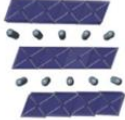

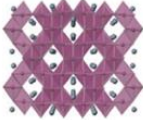
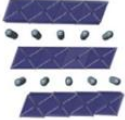
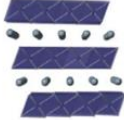


Fig. 5: work flow chart of automated remanufacturing

Annexes

LIB cathode chemistries



Cathode types	LCO	LFP	LMO	NCA	NMC
Chemical formula	LiCoO_2	LiFePO_4	LiMn_2O_4	$\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$	$\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$ (NMC111) $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ (NMC532) $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ (NMC622) $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC811)
Structure					
Year introduced	1991	1996	1996	1999	2008
Safety	●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Energy density	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●●	●●●●●
Power density	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Calendar lifespan	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Cycle lifespan	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Performance	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Cost	●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●
Market share	Obsolete	Electric bikes, buses and large vehicles	Small	Steady	Growing (from NMC 111 > NMC 532 > NMC 622 > NMC 811 to no-cobalt chemistries)

Annexes

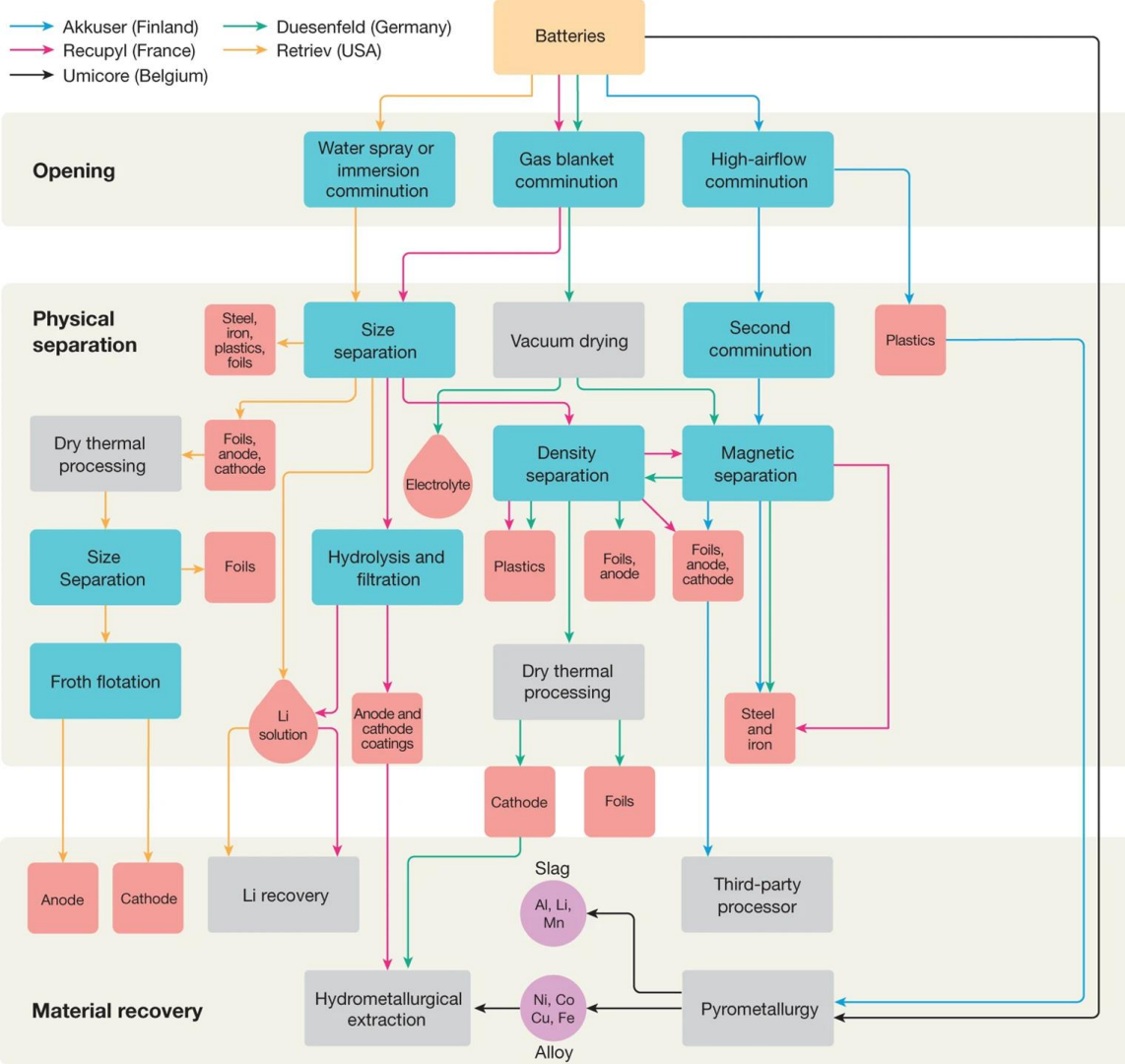


Fig. 5: Flow chart representing potential routes for the circular economy of LIBs, detailing second-use applications, re-use, physical recovery, chemical recovery and biorecovery.

Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E. *et al.* Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 75–86 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>