

12^{ÈME} COLLOQUE ANNUEL DU CLUB STOCKAGE



ACV STOCKAGE Stationnaire Adiabatique par Air Comprimé (A-CAES), LI-ION, STEP

Maxime LUCAS – Ingénieur chercheur en evaluation environnementale (R141 – IFPEN)


Maxime.lucas@ifpen.fr

Les résultats présentés ici proviennent d'articles de recherche actuellement soumis à revue par des pairs pour publications.

Equipe ACV IFPEN (R141)

- BioTfuel
- Futurol
- BioButterfly
- E-fuel...

Projets CRPE




- CCU/CCS
- DMX
- Co-processing
- Procédés de recyclage...

Projets CRCI




- E4T
- Flottes VNF
- GSEM
- H2/PAC...

Projets CRM



- Stockage énergétique (batteries, AACAES...)
- NTE

Projets CRSE




- StrategyCCUS/DMX
- SUN2CHEM
- PEPR H2, Décarb. Industrie, sous-sol...

Projets collaboratifs



- Méthodologie
- Thèses
- Réseaux ACV
- Réglementation...

Recherche / Information



- Cours écoles
- Sensibilisations interne/externe...

Interventions




Sandra BEAUCHET
2017



Valerie SAINT-ANTONIN
2020



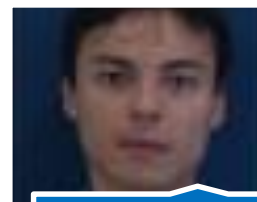
Guillaume BATÔT
2021



Olivier GUYON
2021



Julien GARCIA
2022



Maxime LUCAS
2022



Leidy Tatiana VARGAS IBANEZ
2022



Mickael LOSZKA
2023

Ph.D.



Tiphaine GAILLOT
2020

Impacts des GES émis en altitude (transport aérien)

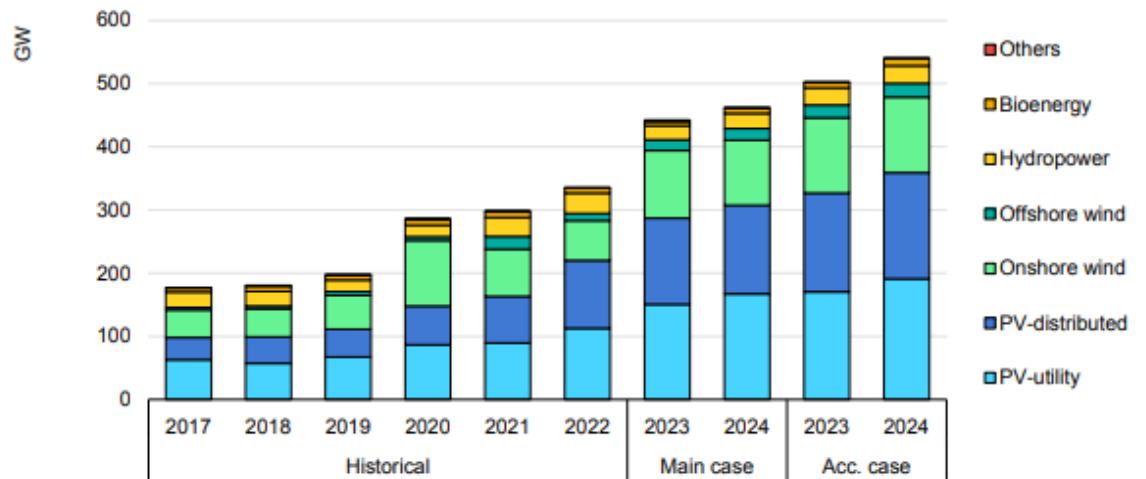


Sibylle DUVAL-DACHARY
2020

Potentiel d'émissions négatives des technologies d'utilisation du CO2 (CCU)

Les enjeux environnementaux de la transition énergétique

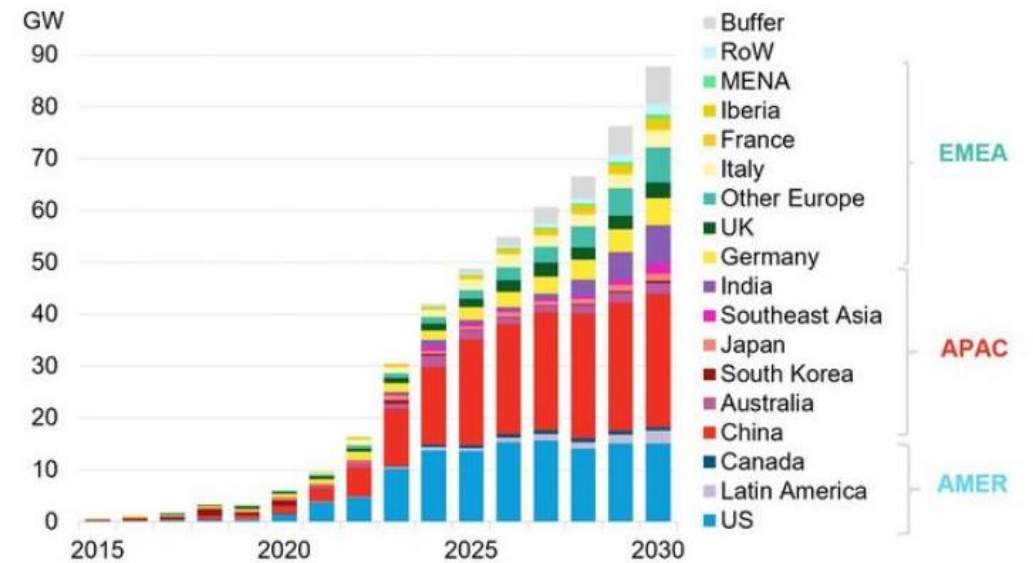
Net renewable electricity capacity additions by technology, historical, main and accelerated cases



IEA. CC BY 4.0.

IEA- Renewable Energy Market Update Outlook for 2023 and 2024

Global gross energy storage capacity additions by key market



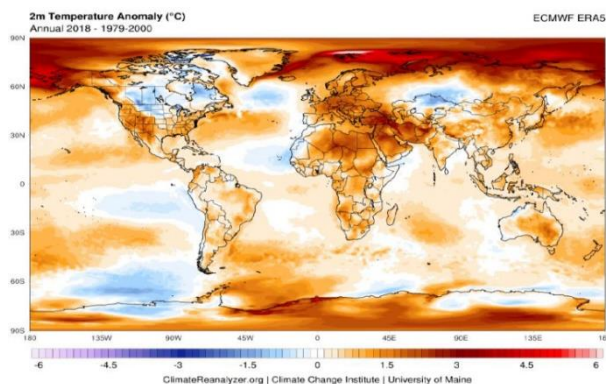
BloombergNEF: 2023 Energy Storage Market Outlook

Impact environnementaux du stockage batterie

“Lithium-ion battery storage continued to be the most widely used, making up the majority of all new capacity installed.” (IEA 2023)

- Changement climatique (CO₂, NO_x, d’autres GES)
- Impacts sur la santé humaine (particules, composés cancérogènes, radiation ionisante, toxines organiques...)
- Épuisement des ressources
- Pollution des eaux

...



Source : ECMWF



Exploration minière “sauvage” de cobalt, RDC

Source: : Bianca NOGRADY

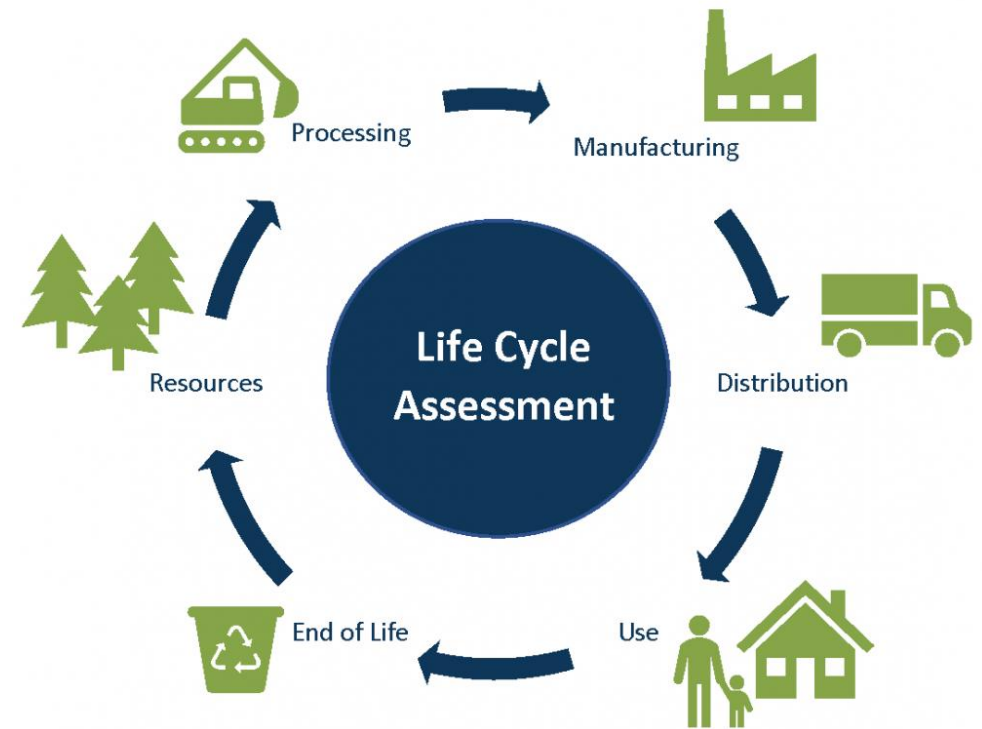


Mine de lithium NEVADA

Source: : Diane MACEACHERN

La méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

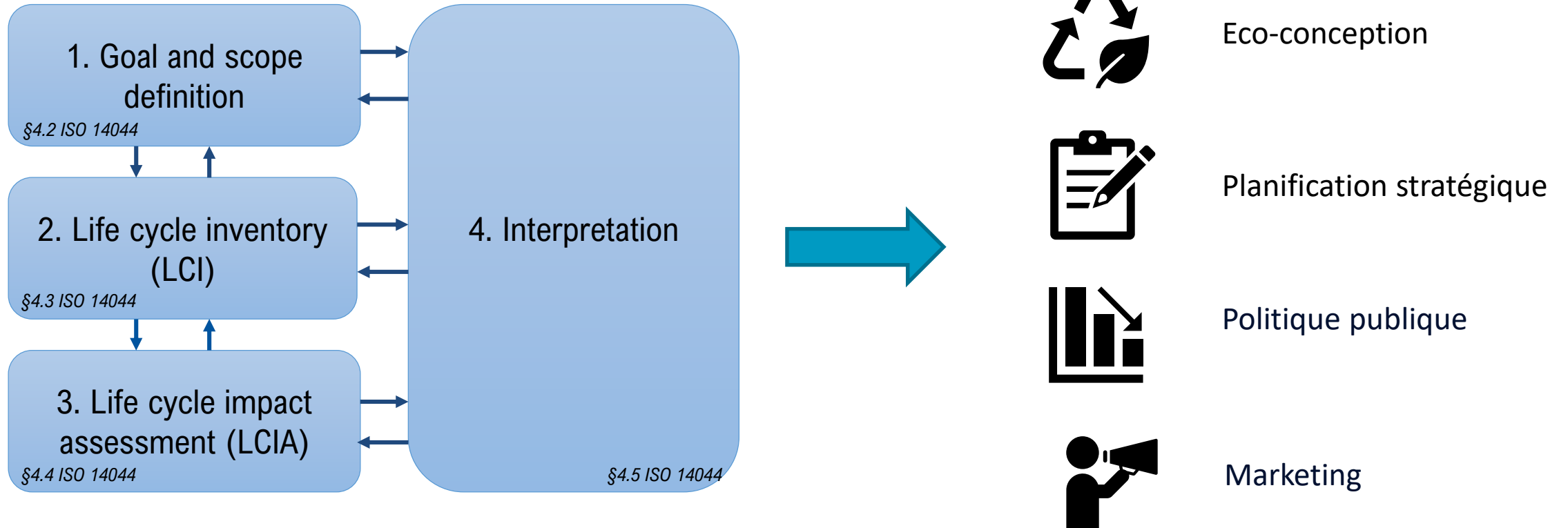
- Une **méthodologie normalisée** ISO 14040-44:
 - ISO 14040 : Principes et cadre
 - ISO 14044 : Exigences et lignes directrices
- ILCD Handbook (Commission européenne) : Recommandations méthodo et bonnes pratiques pour l'ACV à destination des praticiens ACV et décideurs.
- L'ACV vise à :
 - évaluer les **incidences potentielles sur l'environnement d'un système**, d'un produit (bien, service) ayant une fonction donnée
 - **sur l'ensemble de son cycle de vie** (de l'extraction des matières premières à l'élimination finale des déchets)
 - et de les comparer à ceux d'un autre système



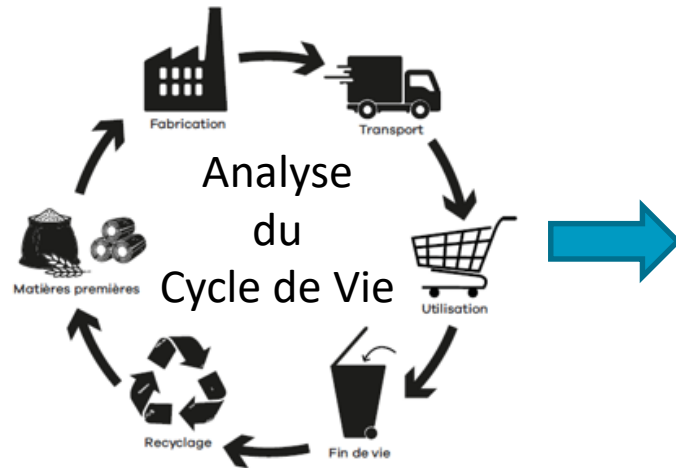
Source: <https://www.ncasi.org/technical-studies/sustainable-manufacturing/life-cycle-assessment/>

Source: ISO 14040

La méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)



Analyse de Cycle de Vie (ACV) stockage stationnaire



- 1- Quels impacts environnementaux sur le cycle de vie d'une batterie?
- 2- Comparaison avec autres systèmes à usage équivalent

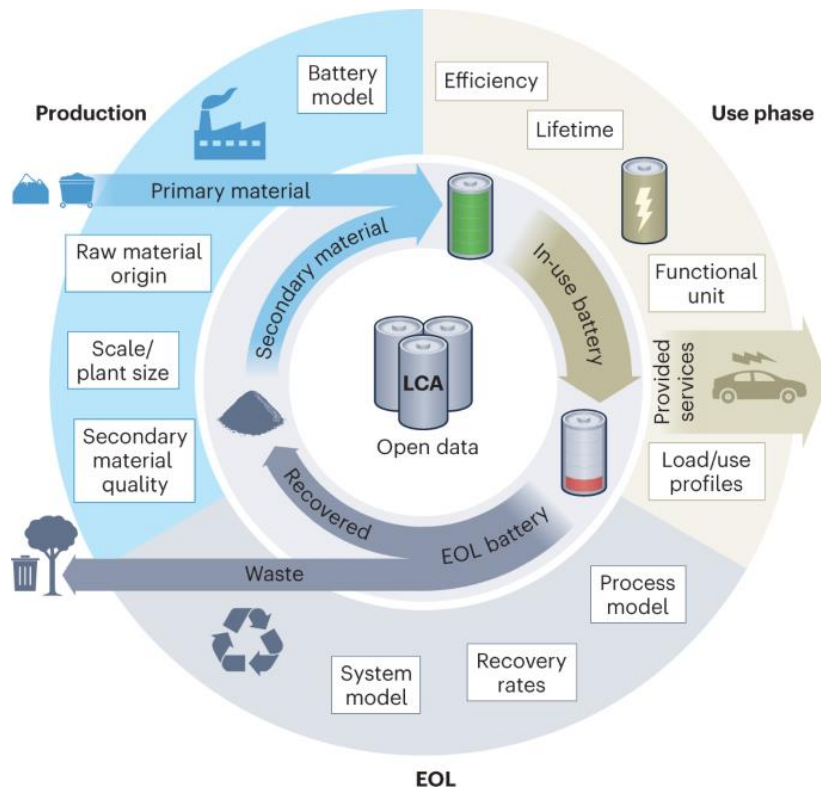


Papiers en cours de publi. dans IJLCA:

[Bewi Komesse, et al., 2022] "A comprehensive cradle-to-grave life cycle assessment of three representative lithium-ion stationary batteries targeting a 20-year daily charge-discharge service."

[Bewi Komesse, et al., 2023] "Environmental assessment of daily electricity restitution operated by 10MW and 100MW Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems (A-CAES)."

1- Stockage electro-chimique



Source: Jens F. Peters

Nature Sustainability volume 6, pages 614–616 (2023)

- Durée de service est fixée à 20 ans, à raison d'un cycle de charge par jour.
- Unité fonctionnelle: restitution quotidienne d'énergie par un système de batteries au réseau, à partir de n'importe quelle source d'énergie, à raison d'un cycle de charge par jour pendant 20 ans.
- Les résultats de l'ACV sont exprimés par système de batterie (flux de référence).
- Production CN, recyclage FR
- Outils de modélisation: SimaPro 9.0.4 – Ecoinvent 3.9.1

1- Stockage electro-chimique

	Charge-discharge efficiency	Life duration	Inventory data
Lithium Iron Phosphate/Graphite (LFP/G)	79 %	10 ans (batterie pack)	Energy Neighbor prototype 192 kWh stationary battery (www.energyneighbor.de/en/home.html) & Li, et al., 2017
Nickel Manganese Cobalt/Graphite (NMC/G)	79 %	5 ans (batterie pack)	Majeau-Bettez, et al., 2011 & Gratz, et al., 2014
Nickel Manganese Cobalt/Lithium Titanate Oxide (NMC/LTO)	79 %	20 ans (batterie pack)	Majeau-Bettez, et al., 2011 & Laucournet, et al., 2016 & Yin, et al., 2019 & Gratz, et al., 2014

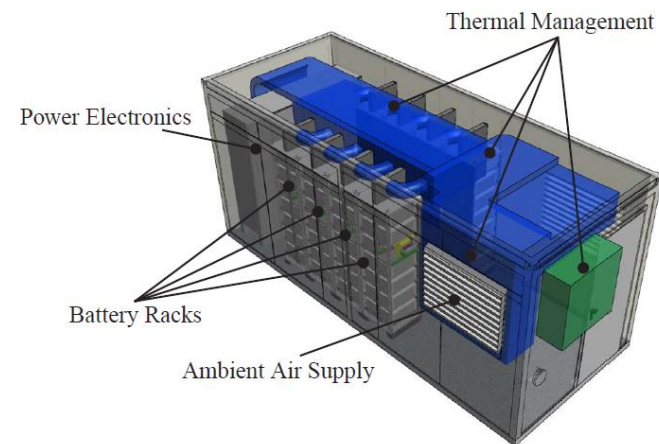


Fig. 2. Container storage system *Energy Neighbor*. Picture from [39].



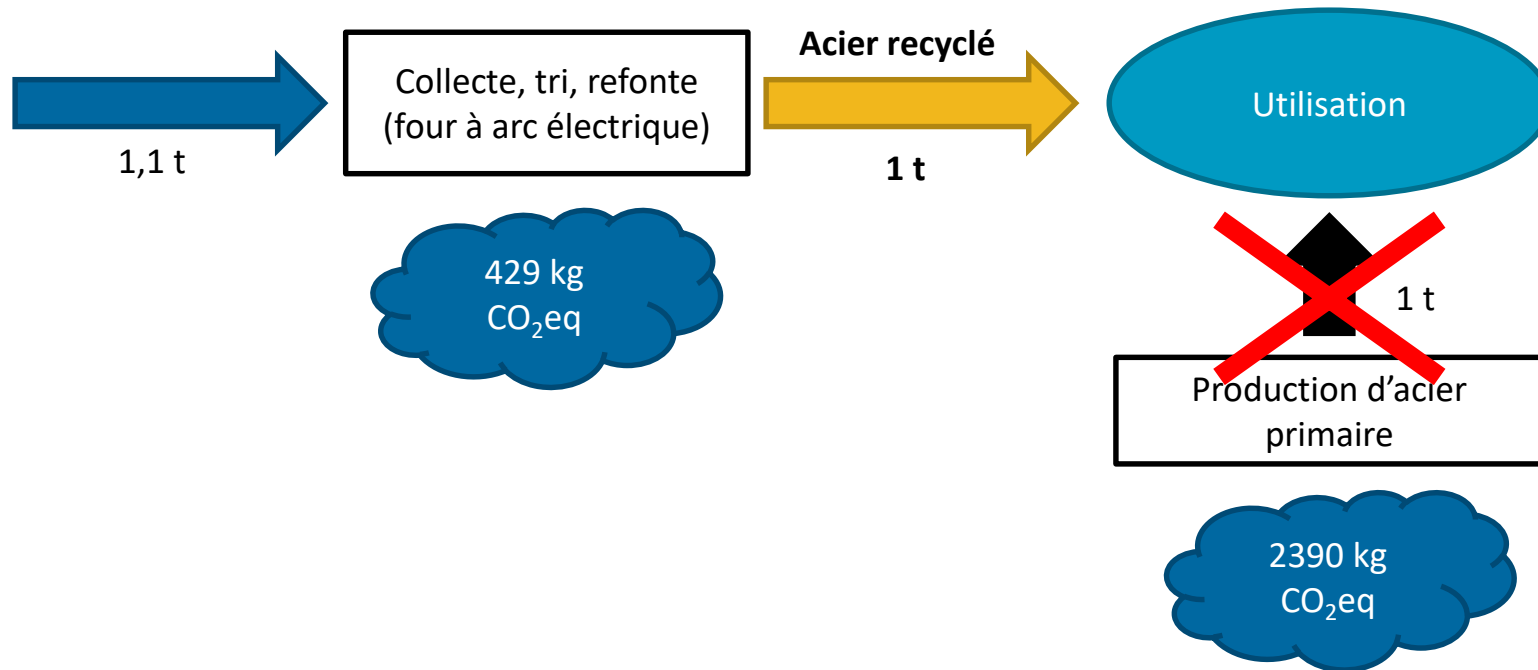
Advanced Battery Storage par Renault -> Batteries seconde vie issues de VE + quelques batteries neuves pour stocker > 60 MWh.

1- Stockage electro-chimique

Fin de vie – modélisation du recyclage

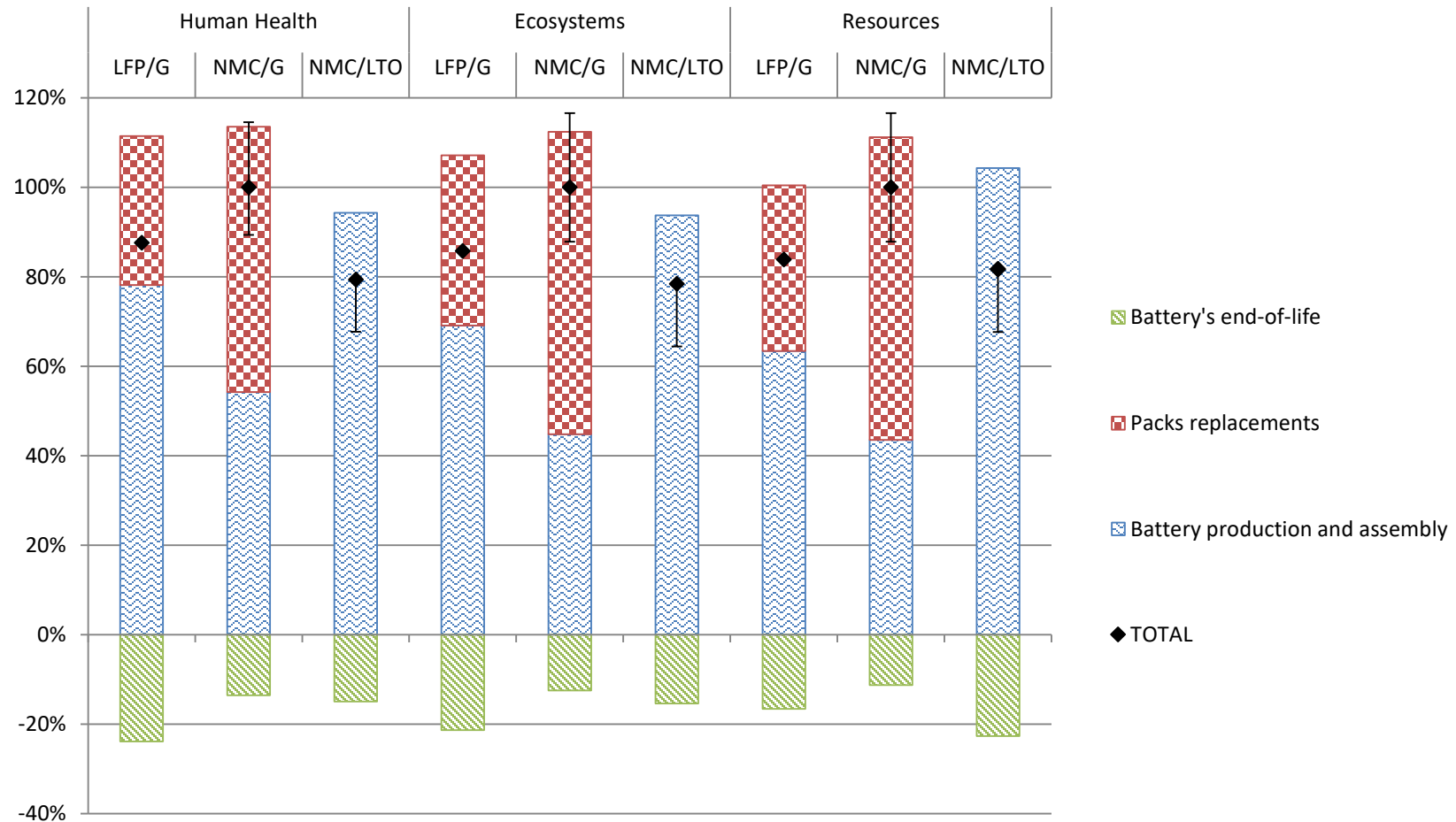
Méthode choisie : **substitution** → le système porte 100% des impacts *générés* par les étapes de recyclage, et 100% des impacts *évités* par la substitution de la quantité de matériau primaire correspondant par le matériau recyclé ⇔ recyclage en boucle fermée

Exemple:



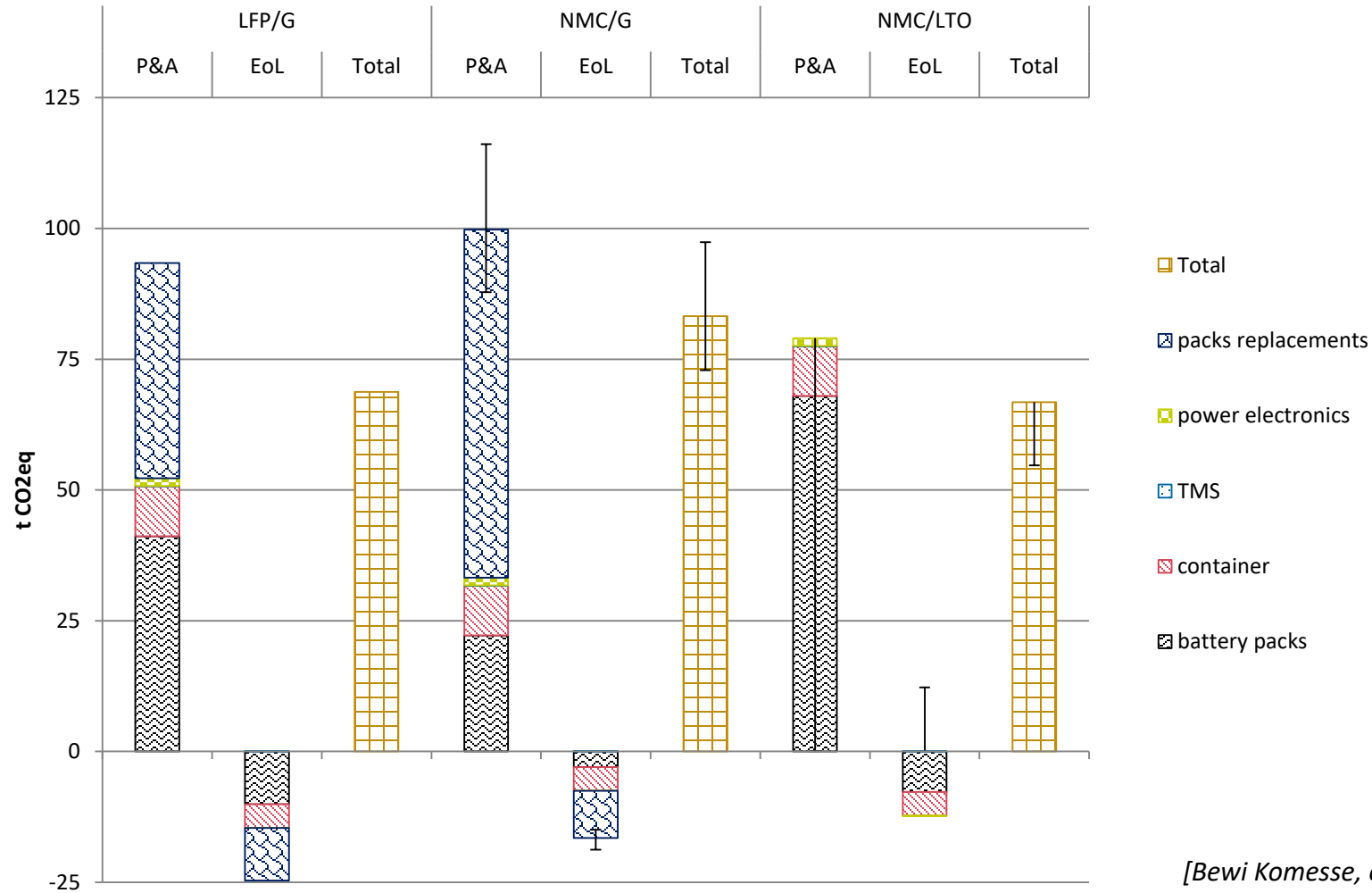
Bilan pour la réutilisation de 1t d'acier recyclé :
 $429 - 2390 = -1961 \text{ kg CO}_2\text{eq}$

Relative impacts of LFP/G, NMC/G and NMC/LTO batteries on human health, ecosystems and resources (ReCiPe endpoint categories). Bars show the variability of the results for cell density variation of NMC/G (base case: 225 Wh/kg, upper limit: 190 Wh/kg, lower limit: 260 Wh/kg) and NMC/LTO (base case: 80 Wh/kg, lower limit: 100 Wh/kg).



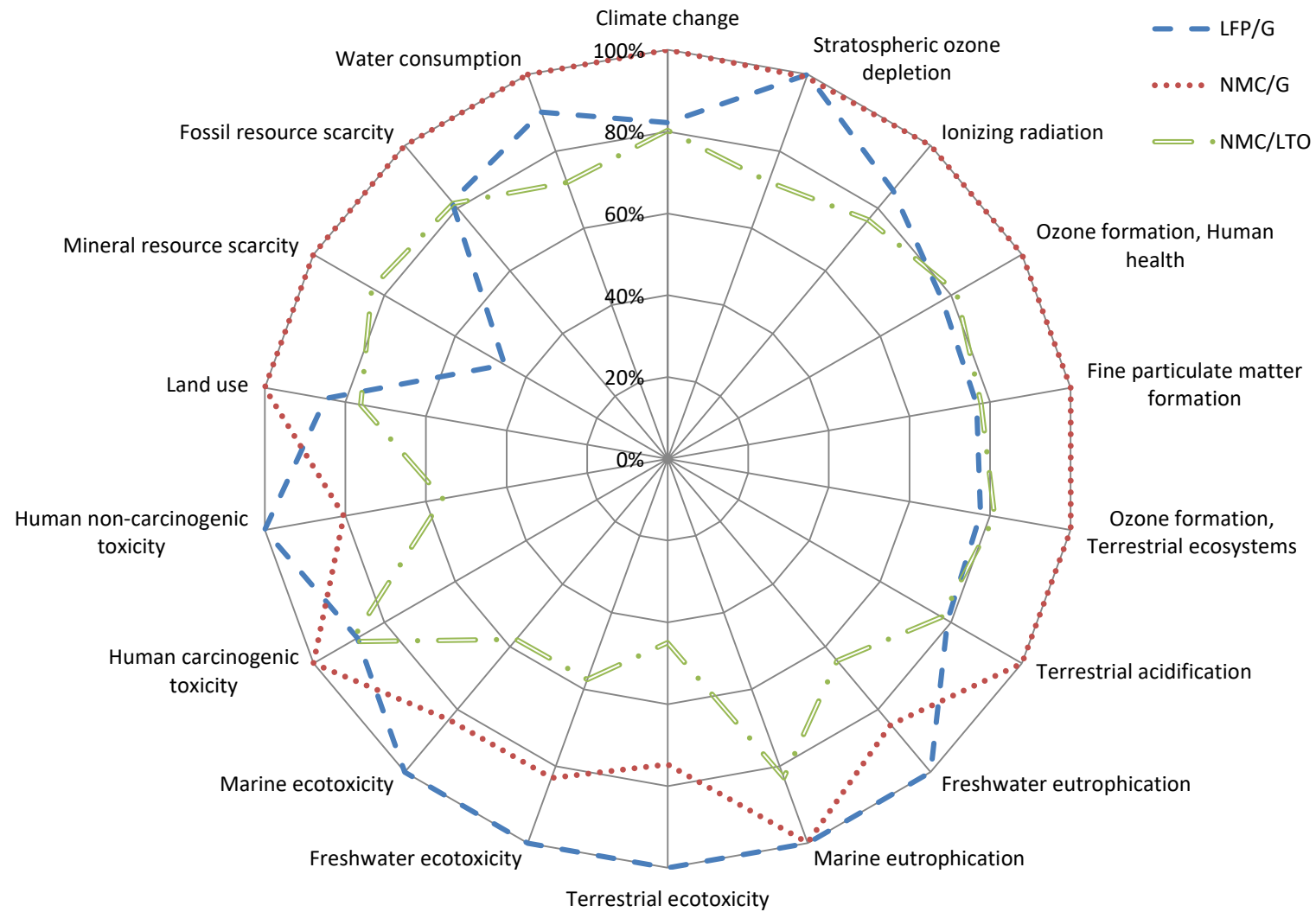
[Bewi Komesse, et al., 2022]

Impact on climate change of initial production and assembly (P&A, including replacement of packs) and end-of-life (EoL, including treatment of used packs) of LFP/G, NMC/G and NMC/LTO batteries. Bars show the variability of the results for cell density variation of NMC/G (base case: 225 Wh/kg, upper limit: 190 Wh/kg, lower limit: 260 Wh/kg) and NMC/LTO (base case: 80 Wh/kg, lower limit: 100 Wh/kg).



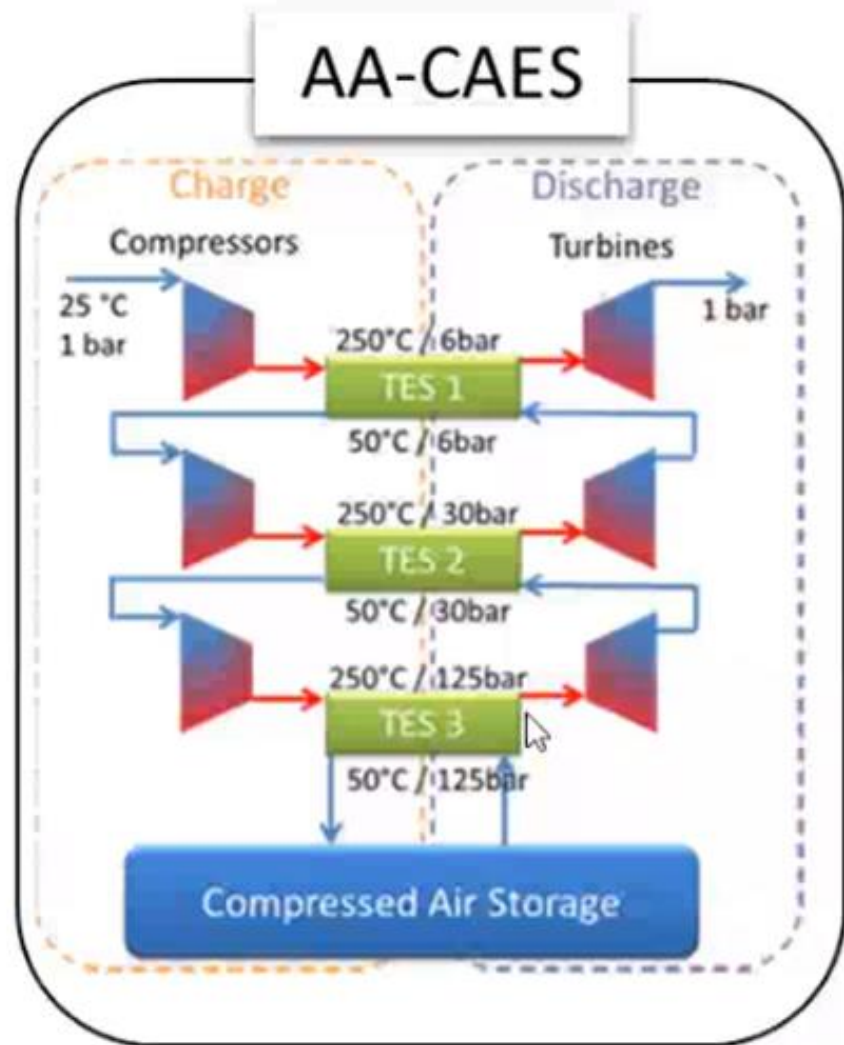
[Bewi Komesse, et al., 2022]

Relative impacts of LFP/G, NMC/G and NMC/LTO batteries on ReCiPe midpoint categories



[Bewi Komesse, et al., 2022]

2- Stockage AA-CAES



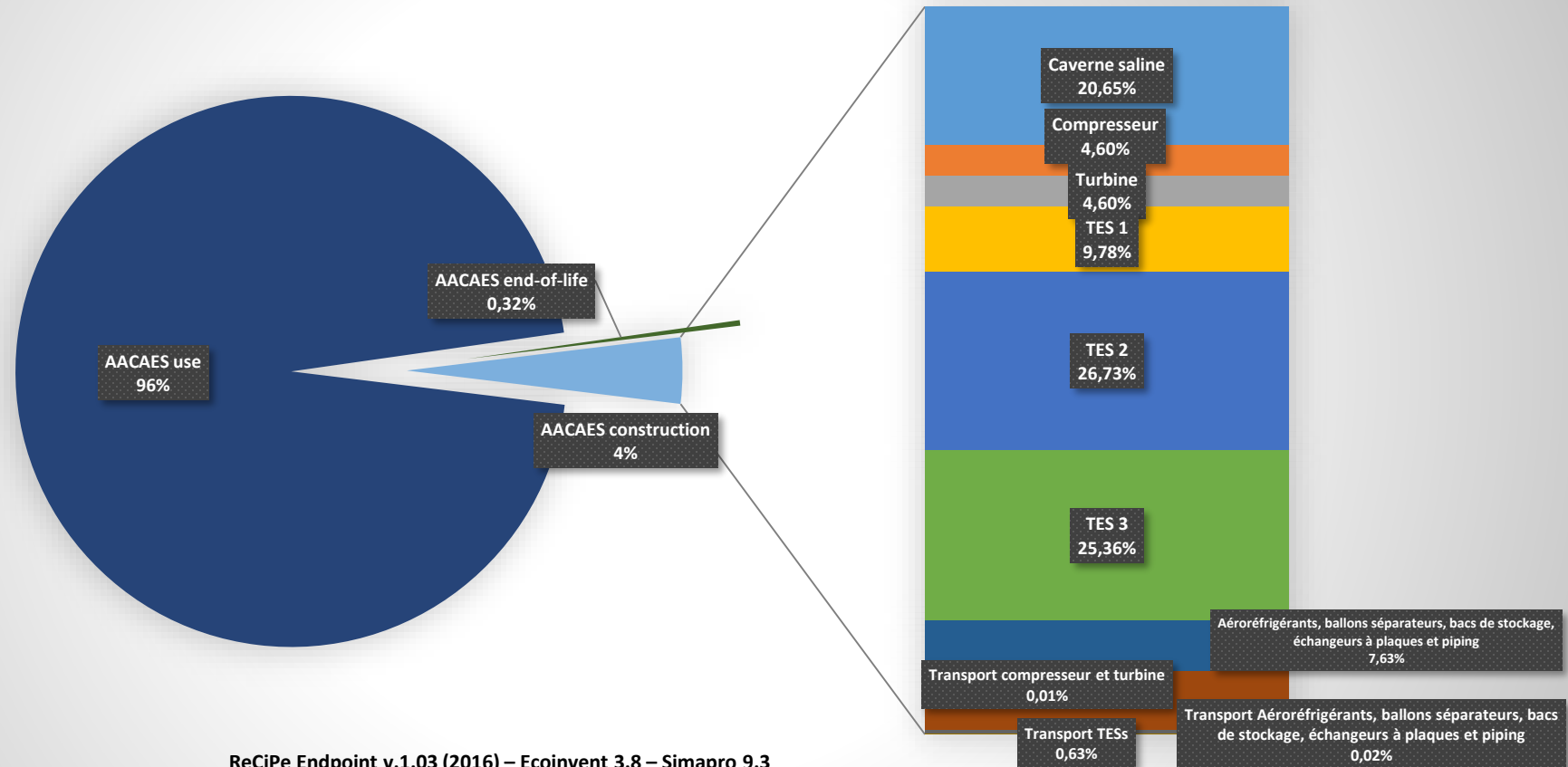
	AA-CAES – 1 GWhe
Surface Main Equipment	3 TES / 3 compressors / 3 expanders / 1 heat exchanger
Saline caverns number	2 caverns of 300 000 m3
Efficiency	72.7%
Power at discharge	100 MWe
Surface area	25 625 m2
System lifetime	30 years

Un cycle par jour: phase de compression (charge) de 14 heures et une phase de détente (décharge) de 10 heures, conduisant à la restitution nette de 1 GWhe par cycle au réseau.

2- Stockage AA-CAES

Unité Fonctionnelle: restitution quotidienne de 1 GWhe d'électricité (mix FR) au réseau pendant 30 ans.

Répartition des émissions de GES (% de kgCO2e.) sur le cycle de vie des systèmes de l'AA-CAES



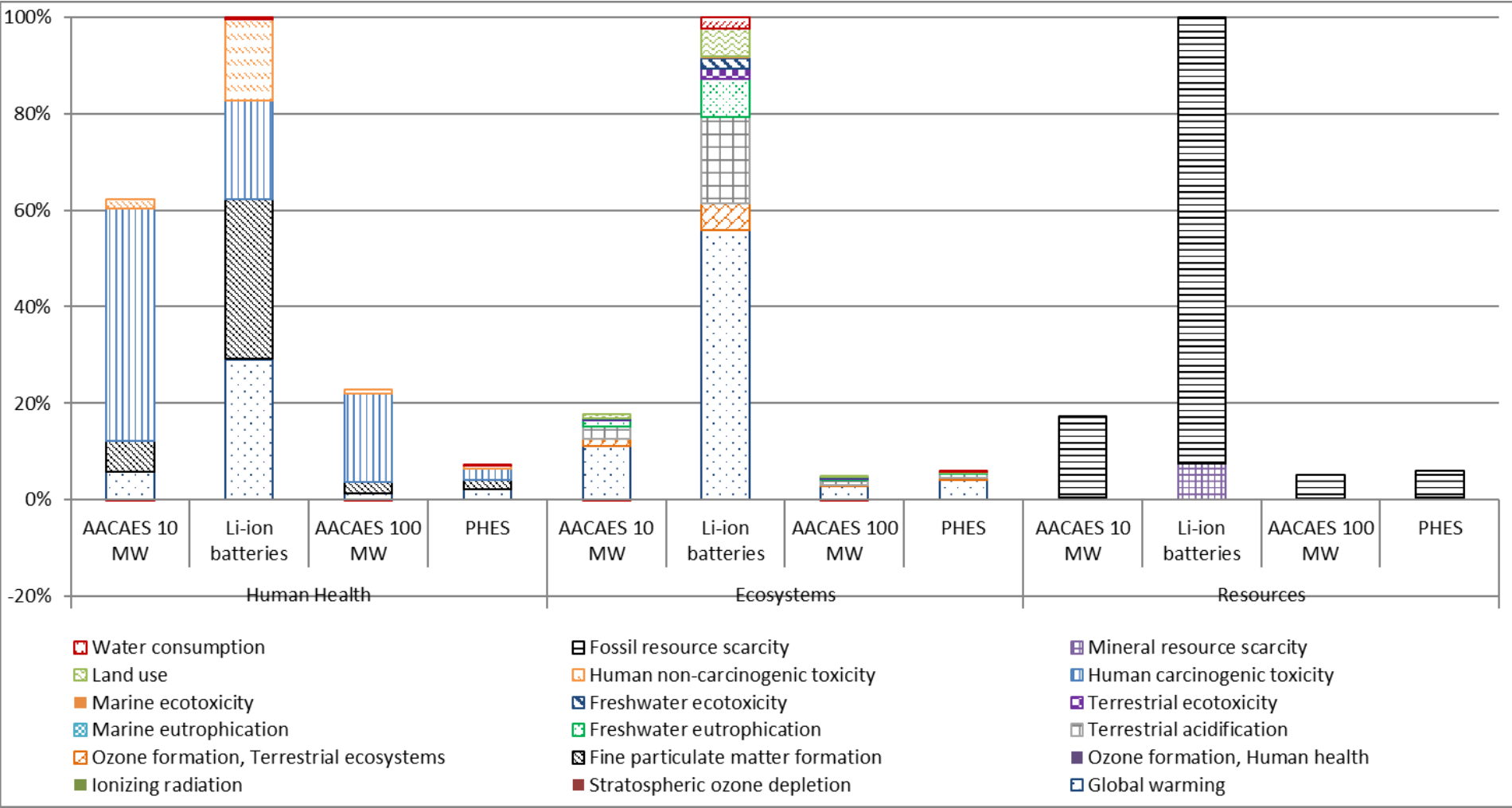
ReCiPe Endpoint v.1.03 (2016) – Ecoinvent 3.8 – Simapro 9.3

Fin de vie cut-off + substitution: les impacts générés et évités par la fin de vie sont attribués au système considéré.

2- Stockage AA-CAES

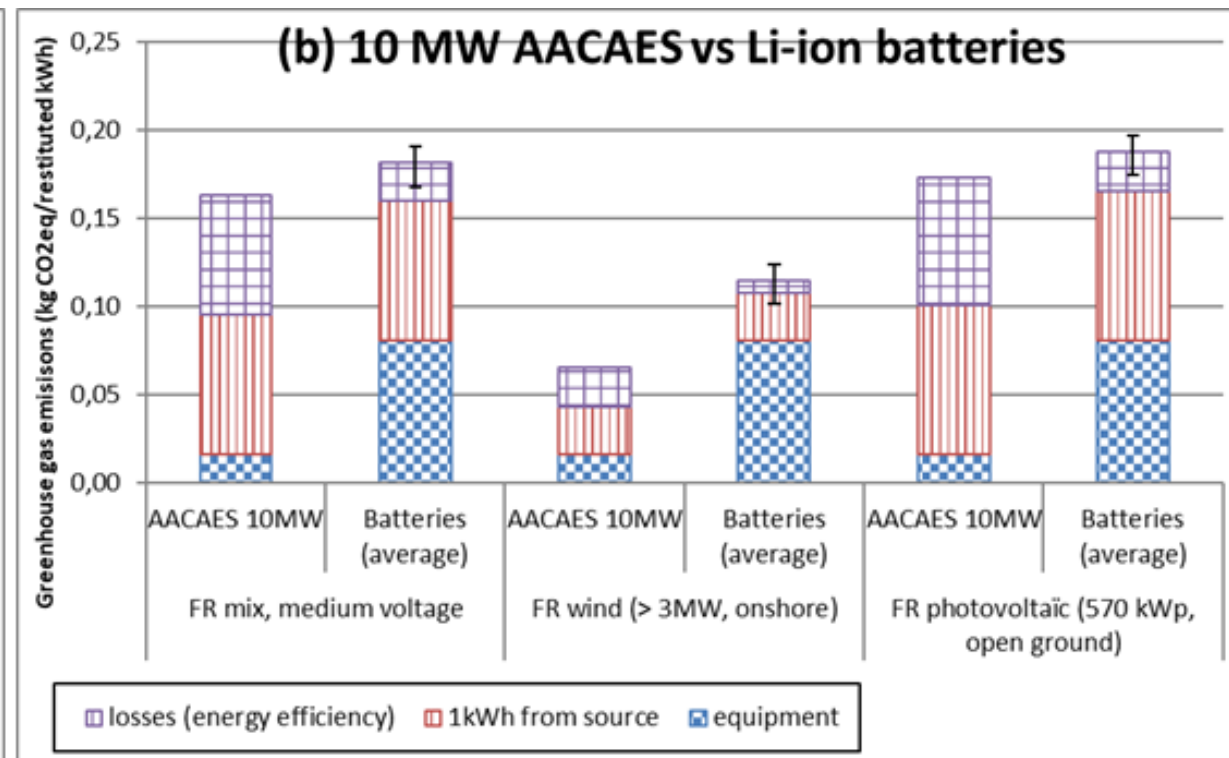
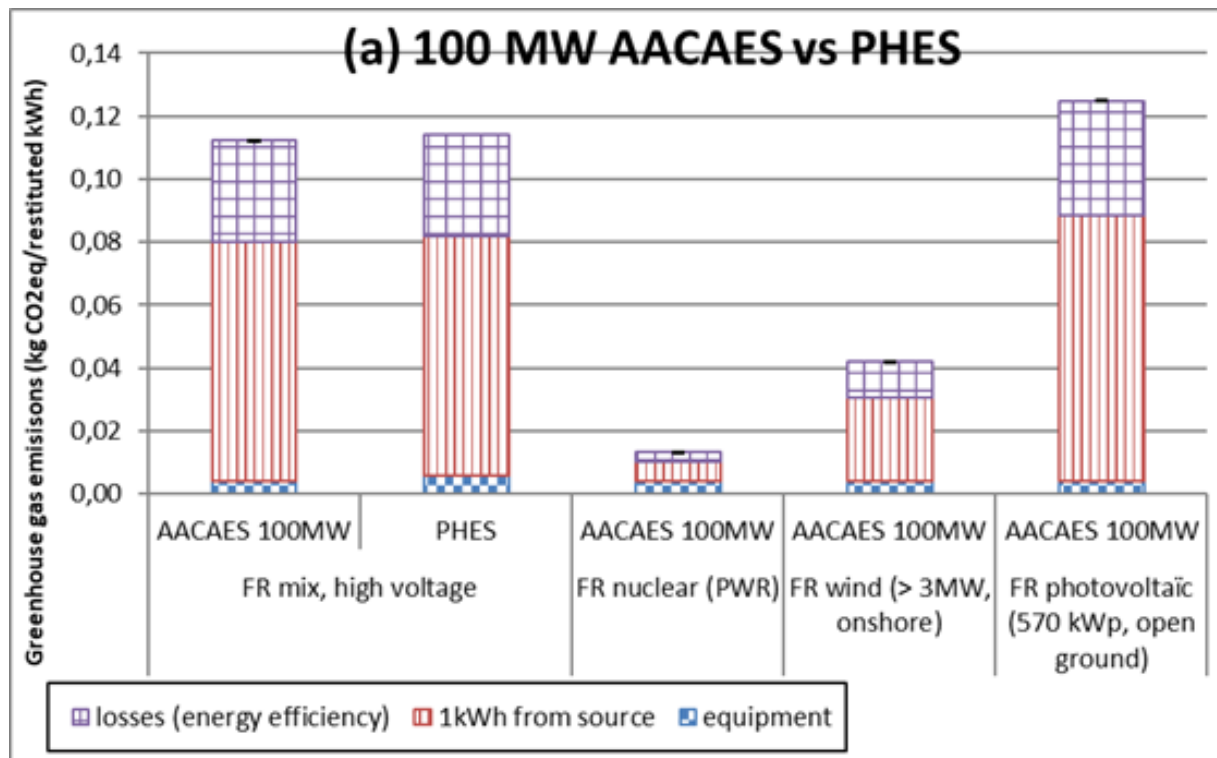
	Charge-discharge efficiency	Life duration	Inventory data
Lithium Iron Phosphate/Graphite (LFP/G)	79 %	10 years (battery pack)	Energy Neighbor prototype 192 kWh stationary battery (www.energyneighbor.de/en/home.html) & Li, et al., 2017
Nickel Manganese Cobalt/Graphite (NMC/G)	79 %	5 years (battery pack)	Majeau-Bettez, et al., 2011 & Gratz, et al., 2014
Nickel Manganese Cobalt/Lithium Titanate Oxide (NMC/LTO)	79 %	20 years (battery pack)	Majeau-Bettez, et al., 2011 & Laucournet, et al., 2016 & Yin, et al., 2019 & Gratz, et al., 2014
AA-CAES (100 MW) AA-CAES (10 MW)	72 % 54%	30 years 30 years	IFPEN (feasibility study) + publicly available data
PHES	70 %	150 years	Ecoinvent 3.9.1

Relative impacts of the 10 MW AA-CAES, Li-ion batteries (average), the 100 MW AA-CAES, and the PHES equipment's life cycles on human health, ecosystems and resources (ReCiPe endpoint categories), per restituted kWh, with relative contributions of the different midpoint indicators



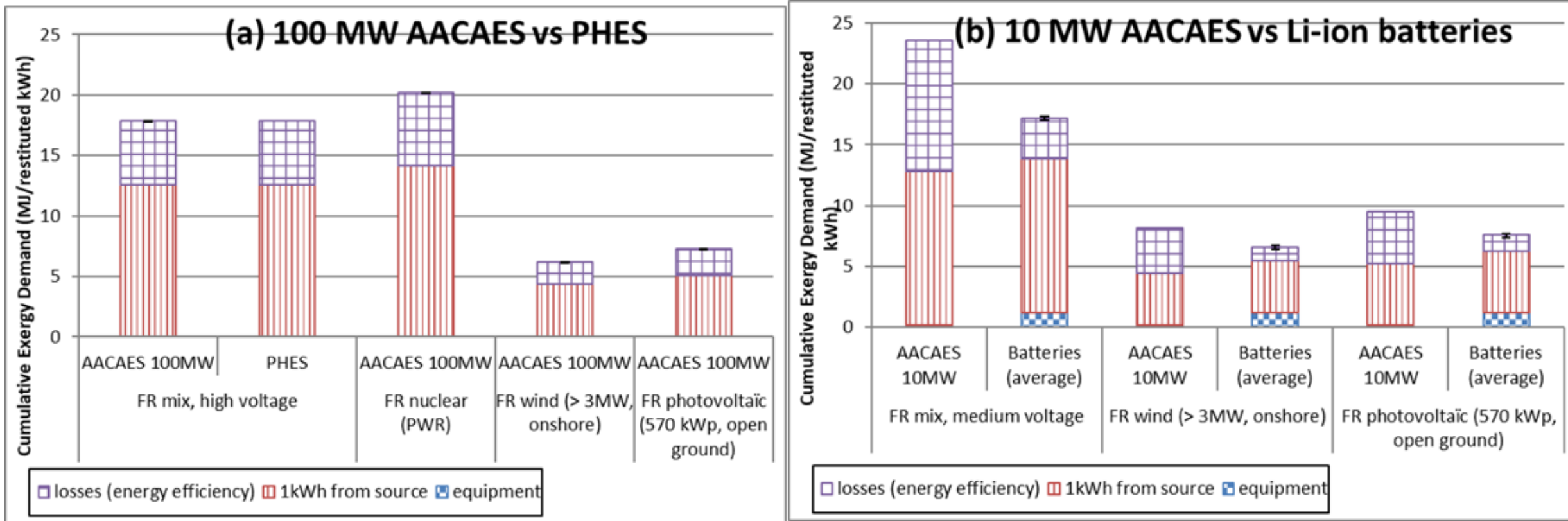
[Bewi Komesse, et al., 2023]

Focus on impact on climate change (GHG emissions), per kWh restituted from different electricity sources. Bars represent variations of the results around the average for the Li-ion batteries according to their chemistry (higher bound = NMC/G, lower bound = NMC/LTO).



[Bewi Komesse, et al., 2023]

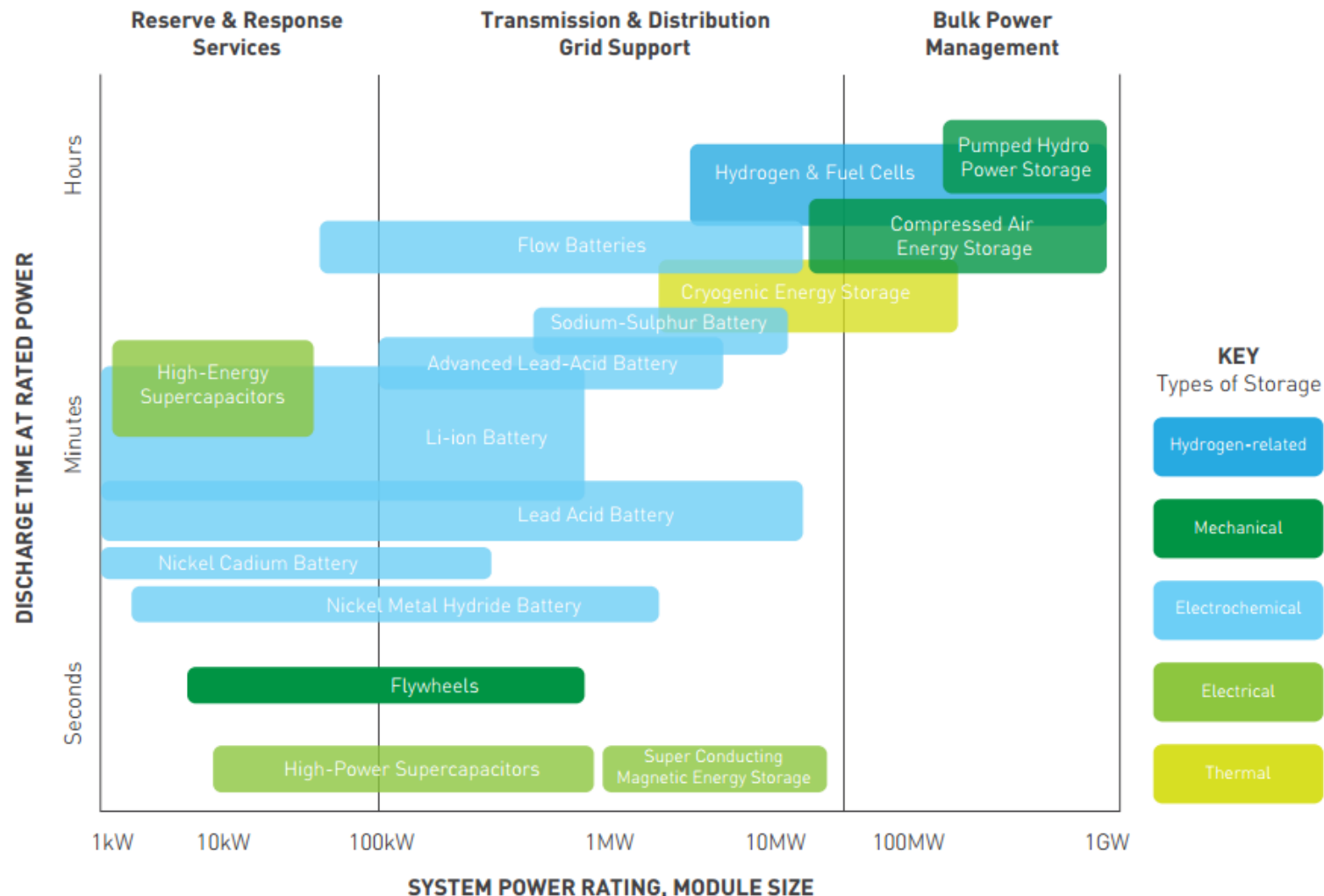
Focus on Cumulative Exergy Demand, per kWh restituted from different electricity sources. Bars represent variations of the results around the average for the Li-ion batteries according to their chemistry (higher bound = NMC/G, lower bound = NMC/LTO).



[Bewi Komesse, et al., 2023]

Travaux futurs

- Compléter la comparaison avec d'autres types de systèmes de stockage prometteurs (batteries à flux, batteries sodium-ion ou sodium-soufre, Power-to-X-power, volants d'inertie etc.).
- Inclure des scénarios pour des applications spécifiques (régulation de la fréquence, équilibre entre l'offre et la demande...) à l'aide de données réelles sur la production et la consommation quotidiennes.
- Evaluation prospective et Intégration dans scénarios d'évolution (IAMs).



[Centre For Low Carbon Futures – “Pathways for energy storage in the UK”(2012) (p. 22)
<http://www.lowcarbonfutures.org/sites/default/files/Pathways%20for%20Energy%20Storage%20in%20the%20UK.pdf>

Merci!

Chef de projet AA-CAES – TEIXEIRA David, david.teixeira@ifpen.fr (R17 - Direction Physico-chimie et Mécanique appliquées)

Etude environnementale – LUCAS Maxime, maxime.lucas@ifpen.fr (R141 – Economie & évaluation environnementale)

Innovater les énergies

Retrouvez-nous sur :

 www.ifpenergiesnouvelles.fr

 @IFPENinnovation



ANNEXE - SOURCES

- *IEA- Renewable Energy Market Update Outlook for 2023 and 2024*
- *BloombergNEF: 2023 Energy Storage Market Outlook*
- <https://www.ncasi.org/technical-studies/sustainable-manufacturing/life-cycle-assessment/>
- [Bewi Komesse, et al., 2022] “A comprehensive cradle-to-grave life cycle assessment of three representative lithium-ion stationary batteries targeting a 20-year daily charge-discharge service.”
- [Bewi Komesse, et al., 2023] “Environmental assessment of daily electricity restitution operated by 10MW and 100MW Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems (A-CAES).”
- Source: Jens F. Peters, Nature Sustainability volume 6, pages 614–616 (2023)
- [Centre For Low Carbon Futures – “Pathways for energy storage in the UK”(2012) (p. 22)
<http://www.lowcarbonfutures.org/sites/default/files/Pathways%20for%20Energy%20Storage%20in%20the%20UK.pdf>