QUE LA LUMIÈRE SOIT :

EXPLOITER LES BATTERIES DE LA PROCHAINE GÉNÉRATION POUR RÉPONDRE AUX BESOINS EN ÉNERGIE DE L'AFRIQUE

AUDA-NEPAD
AFRICAN UNION DEVELOPMENT AGENCY

A propos de l'UA et de l'AUDA-NEPAD

L'UNION AFRICAINE

L'Union africaine (UA) est un organisme continental composé des 55 pays du continent africain. Elle a été créée le 26 mai 2001 à Addis-Abeba, en Éthiopie, et lancée le 9 juillet 2002 en Afrique du Sud[1] dans le but de remplacer l'Organisation de l'unité africaine (OUA). Les décisions les plus importantes de l'UA sont prises par l'Assemblée de l'Union africaine, une réunion semestrielle des chefs d'État et de gouvernement de ses États membres. Le secrétariat de l'UA, la Commission de l'Union africaine, est basé à Addis-Abeba en Éthiopie.

L'UA a été créée à la suite de la déclaration de Syrte, le 9 septembre 1999, des chefs d'État et de gouvernement de l'Organisation de l'unité africaine (OUA). L'UA est fondée sur une vision commune d'une Afrique unie et forte et sur la nécessité de construire un partenariat entre les gouvernements et tous les segments de la société civile, en particulier les femmes, les jeunes et le secteur privé, afin de renforcer la solidarité et la cohésion entre les peuples d'Afrique. En tant qu'organisation continentale, elle se concentre sur la promotion de la paix, de la sécurité et de la stabilité. Le travail de développement de l'UA est guidé par l'Agenda 2063 de l'UA, qui est un plan sur 50 ans visant à exploiter l'avantage comparatif de l'Afrique pour concrétiser la vision de "L'Afrique que nous voulons".

AGENCE DE DÉVELOPPEMENT DE L'UNION AFRICAINE (AUDA-NEPAD)

L'Agence de développement de l'Union africaine (AUDA-NEPAD) est un cadre stratégique pour le développement socio-économique panafricain. L'AUDA-NEPAD est le fer de lance des dirigeants africains pour relever les défis critiques auxquels le continent est confronté, notamment la pauvreté, le développement et la marginalisation internationale de l'Afrique. L'AUDA-NEPAD offre des opportunités uniques aux pays africains de prendre le contrôle total de leurs agendas de développement, de travailler plus étroitement ensemble et de coopérer plus efficacement avec les partenaires internationaux.

L'AUDA-NEPAD est coordonné et facilité par l'Agence de planification et de coordination du NEPAD (AUDA-NEPAD) qui a été créée en février 2010 à la suite de l'intégration du NEPAD dans les structures et processus de l'UA. L'AUDA-NEPAD gère un certain nombre de programmes et de projets dans quatre portefeuilles d'investissement, à savoir la gouvernance des ressources naturelles, la jeunesse et le développement des compétences, l'intégration régionale, les infrastructures et le commerce, et l'industrialisation, la science, la technologie et l'innovation.

[1] A propos de l'Union africaine https://au.int/en/overview

Rapport du groupe de haut niveau de l'UA sur les technologies émergentes sur le thème "Que la lumière soit" : Exploiter les batteries de la prochaine génération pour répondre aux besoins en énergie de l'Afrique

Ce rapport technologique est le produit du groupe de haut niveau de l'Union africaine sur les technologies émergentes (APET). Il fait partie d'un effort plus large de l'Agence de développement de l'Union africaine (AUDA-NEPAD) pour promouvoir la connaissance et l'apprentissage, partager des idées, fournir un accès libre à ses recherches et contribuer à la politique de développement. Les articles présentés dans le rapport technologique de l'APET sont considérés comme ayant un rapport avec la mission de l'AUDA-NEPAD et ses objectifs stratégiques, conformément à l'Agenda 2063 de l'UA, qui est une vision panafricaine d'une Afrique intégrée, prospère et pacifique, dirigée par ses propres citoyens et représentant une force dynamique sur la scène internationale.

Citation: Rapport sur la technologie APET AUDA-NEPAD - Que la lumière soit: Exploiter les batteries de la prochaine génération pour répondre aux besoins en énergie de l'Afrique

© Agence de développement de l'Union africaine - NEPAD
(AUDA-NEPAD) 230 15th Road, Randjespark, Midrand,
Johannesburg, 1685, Afrique du Sud

+27 11 256 3600
www.nepad.org

Twitter
@Nepad_agency

ISBN: 978-1-990964-05-3

Août 2021

Droits et autorisations

Tous droits réservés

Le texte et les données de cette publication peuvent être reproduits si la source est citée. La reproduction à des fins commerciales est interdite. Les rapports technologiques de l'APET diffusent les conclusions des travaux en cours, les résultats des recherches préliminaires, ainsi que les expériences et les enseignements en matière de développement, afin d'encourager l'échange d'idées et de réflexions novatrices entre les chercheurs, les praticiens du développement, les décideurs et les partenaires du développement. Les résultats, interprétations et conclusions exprimés dans les rapports technologiques APET de l'AUDA-NEPAD sont entièrement ceux des auteurs et ne représentent pas nécessairement l'opinion de l'Agence de développement de l'Union africaine ou des États membres de l'Union africaine. Les rapports technologiques de l'APET sont disponibles en ligne à l'adresse https://www.auda-nepad.org

Groupe de haut niveau de l'Union africaine sur les technologies émergentes (APET)

AUTEURS

1. Groupe de haut niveau de l'UA sur les technologies émergentes, et
2. Secrétariat de l'APET
3. Experts et chercheurs africains sur la technologie blockchain

PRESIDENCE D'APET

Yaye Kène Gassama, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal

MEMBRES DU GROUPE

Abdallah Daar, Université de Toronto, Canada
Berhanu M. Abegaz, Académie africaine des sciences, Éthiopie
Francine Ntoumi, Fondation Congolaise pour la Recherche Médicale, Congo-Brazzaville
Karim Maredia, Université d'État du Michigan (MSU), East Lansing, Michigan, USA
Oye Ibidapo-Obe, (Décédé) Federal University Ndufu Alike, Ikwo (FUNAI), Nigéria
Rachel Chikwamba, Conseil pour la recherche scientifique et industrielle (CSIR), Afrique du Sud
Roseanne Diab, Académie des sciences d'Afrique du Sud (ASSAf), Afrique du Sud
Shireen Assem, Centre de recherche agricole et Institut de recherche en génie génétique et biotechnologie (AGERI), Égypte

EQUIPE DE RECHERCHE ET DE REVISION

Adeola Balogun, University of Lagos, Nigeria, **Elvis Shoko**, University of Liverpool, **Nechan Naicker**, The Megamillion Energy Company, **Bernard Bladergroen**, University of the Western Cape, **Bhekani Mbuli**, University of Johannesburg, **Aggrey Ambal**i, AUDA- NEPAD, **Towela Nyirenda-Jere**, AUDA-NEPAD, **Diran Makinde** (Late), AUDA-NEPAD, **Justina Dugbazah**, AUDA-NEPAD, **Barbara Glover,** AUDA-NEPAD, **Andriette Ferreira**, AUDA-NEPAD

SECRÉTARIAT DE L'APET

Aggrey Ambali – AUDA-NEPAD **Justina Dugbazah** – AUDA-NEPAD **Barbara Glover** – AUDA-NEPAD **Thelma Dlamini** – AUDA-NEPAD **Chifundo Kungade** – AUDA-NEPAD
Mahama Ouedraogo – Commission de l'Union africaine
Monica Idinoba – Commission de l'Union africaine
Hambani Masheleni – Commission de l'Union africaine

REMERCIEMENTS

Nous remercions les différents experts identifiés par le Groupe de haut niveau de l'Union africaine sur les technologies émergentes, qui ont apporté leurs contributions et leurs commentaires sur les versions précédentes de ce rapport.

Hommages

Prof Calestous Juma

"Pour toute une génération, et peut-être pour les futures générations de dirigeants, il a été un enseignant et un penseur exceptionnel, ainsi que l'une des lumières de l'Afrique dans la sphère intellectuelle." **– Dr Ibrahim Mayaki, AUDA-NEPAD**

"Ceux qui ont eu le plaisir de le rencontrer - ou de communiquer avec lui en ligne et hors ligne - témoigneront de sa chaleur, de son amour de l'apprentissage et de sa grande générosité. » **- S. E. Uhuru Kenyatta, Président de la République du**

"Calestous était un champion infatigable du développement économique et social en Afrique. Son héritage perdurera grâce aux fruits de ses nombreuses années de travail en tant qu'universitaire passionné, défenseur intrépide et mentor pour les étudiants et les décideurs politiques du monde entier."
- **Fondation Bill et Melinda Gates**

"Nous avons perdu un esprit brillant qui se consacrait à l'innovation, à l'éducation et à la prospérité de l'Afrique."
- S.E. Paul Kagame, Président de la République du Rwanda

"Doté d'un immense esprit, d'un charme, d'un courage, d'un humour et d'une modestie - une combinaison rare - le professeur Juma était un conseiller de confiance pour les chefs d'État et de gouvernement du monde entier sur les questions cruciales qui touchent l'humanité aujourd'hui."
Marché commun de l'Afrique orientale et australe (COMESA)

Prof Diran Makinde

Nombreux sont ceux qui, en Afrique et dans le monde, se souviendront longtemps du professeur Oladiran Martin Makinde comme d'un champion de l'exploitation de la science, de la technologie et de l'innovation pour améliorer les conditions de vie des peuples d'Afrique. Mais ceux d'entre nous qui ont vécu et travaillé avec lui presque tous les jours et qui souffriront longtemps de sa disparition connaissent le professeur Diran (comme nous l'appelions communément) sous de nombreux autres titres qu'il a portés : Époux. Père. Frère. Grand père. Directeur, mentor, conseiller et bien d'autres encore.

Il était la personne ensoleillée et joyeuse qui illuminait chaque moment avec son sourire contagieux, que vous le rencontriez dans les couloirs, dans la cuisine du personnel, dans la salle du conseil pour les réunions, mais partout et toujours. Il avait une incroyable capacité à s'adapter et à travailler avec les gens, indépendamment de leurs points de vue différents. Il chérissait la vie et la vie le chérissait et tous ceux qui l'ont rencontré, tous ceux qui l'ont connu se souviendront de son sourire invincible et de son rire contagieux.

Un vrai gentleman avec un grand sens de la vie, qui a été à la hauteur de l'énergie positive qu'il a choisi d'apporter à ceux avec qui il a interagi et interagi chaque jour. Sa sagesse et ses conseils ont joué un rôle déterminant dans la création d'ABNE et le succès qu'elle continue d'obtenir à ce jour est le résultat des éléments de base solides que lui et d'autres ont contribué à mettre en place il y a 10 ans.

Nous ne nous sommes pas encore remis du décès du professeur Diran. Nous ne pouvons pas savoir avec certitude pourquoi il nous a quittés si tôt. Mais nous restons réconfortés par l'assurance que nous nous retrouverons un jour. Nous prions pour le confort, la force et la paix pour tous ses proches.

Prof Oyewusi Ibidapo-Oye

En décembre 2016, le regretté professeur Oyewusi Ibidapo-Obe a été nommé membre du panel de haut niveau de l'Union africaine sur les technologies émergentes (APET) par le président de la Commission de l'Union africaine (CUA) de l'époque, S.E. Dr Nkosazana Dlamini Zuma. C'est ainsi qu'a commencé notre voyage avec cet éminent expert que nous appelions affectueusement Prof Oye.

Son esprit, son ambiance et son sens de l'accueil sont des caractéristiques qu'il a apportées à l'APET et qui ne seront pas oubliées de sitôt.

La caractéristique du professeur Oye de sacrifier son temps et son énergie pour le continent était tout à fait authentique - il le faisait avec charme et joie et avait toujours quelque chose à apporter aux discussions. Il était toujours prêt à offrir au panel des suggestions d'experts continentaux qui peuvent contribuer au développement de l'Afrique.

Nous nous souvenons de l'hommage affectueux qu'il a rendu au défunt professeur Calestous Juma, et de la joie avec laquelle il a parlé de poursuivre son héritage - qu'il a adéquatement rempli. Aujourd'hui, nous nous souvenons de quelqu'un dont l'héritage a influencé de nombreuses personnes dans le monde entier, notamment les jeunes, qui étaient son cœur.

Le professeur Oye était passionné par le maintien des connaissances indigènes de l'Afrique et l'AUDA-NEPAD s'engage à poursuivre ses idées sur l'exploitation efficace de nos connaissances indigènes pour relever les défis continentaux.

Prof Oye! Ta vie a été une bénédiction, ta mémoire un trésor, tu es aimé au-delà des mots et tu nous manques au-delà de toute mesure. Le jour où nous avons appris ta mort, c'était comme un rêve. La mort nous attend tous, mais nous ne pouvions pas accepter que c'était ton heure. Dans les quelques jours qui ont précédé ta mort, tu étais activement avec nous, alors c'était si difficile d'accepter que tu ne sois plus avec nous.

Table des matières

A PROPOS DE L'UA ET DU NEPAD i
Union africaine (UA) i
Le Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD) i

MEMBRES DU GROUPE AFRICAIN DE HAUT NIVEAU SUR LES TECHNOLOGIES ÉMERGENTES ii
Co-présidents ii
Membres du groupe ii
Secrétariat ii
Chercheurs ii
Remerciements ii

HOMMAGES iii
Prof Calestous Juma iii
Prof Diran Makinde iii
Prof Oyewusi Ibidapo-Oye iv

TABLE DES MATIÈRES v
FIGURES vii
TABLEAUX viii
ACRONYMES ix

RÉSUMÉ EXÉCUTIF 1

1 INTRODUCTION 14
1.1 Contexte: Défis énergétiques de l'Afrique 14
1.2 Modèles d'accès à l'électrification sur le continent 15
1.3 Solutions existantes proposées pour relever les défis énergétiques de l'Afrique 16
1.4 Opportunités pour l'industrie de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables 17
1.4.1 Pourquoi l'énergie solaire ne répond pas actuellement aux besoins énergétiques de l'Afrique 19
1.5 Les batteries au centre du défi, de l'opportunité et de la solution 21
1.6 Conclusion 22

2. ANALYSE CRITIQUE DES BATTERIES DE NOUVELLE GÉNÉRATION 23
2.1 Présentation des batteries 23
2.2 Caractéristiques des batteries actuelles et de la prochaine génération 24
2.2.1 Résumé des technologies actuelles des batteries 25
2.3 Feuille de route de technologie possible 27
2.3.1 Batteries lithium-ion avancées 28
2.3.2 Au-delà des batteries au lithium-ion 29
2.3.3 Au-delà des batteries au lithium 29
2.4 Conclusion 30

3. PERTINENCE DES BATTERIES DE NOUVELLE GÉNÉRATION POUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'AFRIQUE
3.1 Contexte des batteries de nouvelle génération dans les besoins de l'Afrique 32
3.2 Applications actuelles des NGB en Afrique 32
3.2.1 Études de cas des batteries de nouvelle génération 33
3.3 Pertinence des batteries de nouvelle génération en Afrique 34
3.4 Exploiter la puissance des NGB 35
3.5 Critères souhaitables pour les micro-réseaux 36
3.6 Conclusion 36

4. RISQUES ET AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE DES BATTERIES DE NOUVELLE GÉNÉRATION 37
4.1 Risques et avantages liés à la valorisation des minéraux locaux pour la production de batteries de pointe 37
4.2 Risques et avantages liés à un plan coordonné de RD&I 38
4.3 Conclusion 38

5. CONSIDÉRATIONS ÉTHIQUES 40
5.1 Considérations éthiques : l'environnement, le social et la gouvernance dans l'industrie du LiBs 40
5.2 Extraction et prétraitement des minéraux 43
5.3 Fabrication des batteries 44
5.4 Distribution, seconde vie, recyclage et élimination 45
5.5 Conclusion 46

6. STRATÉGIE, RECHERCHE, DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION 47
6.1 La perspective stratégique 47
6.2 L'industrialisation immédiate 52
6.3 Recherche, innovation et développement (RI&D) 53
6.3.1 Priorités de recherche 54
6.4 Répartition géographique du programme 60
6.5 Conclusion 60

7 CADRE POLITIQUE ET RÉGLEMENTAIRE 62
7.1 Politique minérale 62
7.2 Politique du marché 62
7.3 Politique d'investissement 63
7.4 Politique d'achat et de taxation 63
7.5 Politique relative à la seconde vie, au recyclage et à l'élimination des déchets 64
7.6 Conclusion 66

8. JEUNESSE, COMPETENCES ET DEVELOPPEMENT DES CAPACITES 67
8.1 Développement des ressources humaines et enseignement des technologies 67
8.2 Investissement dans la recherche pour la prochaine génération de technologies de batteries 68
8.3 Conclusion 68

9. ÉTAT DE PRÉPARATION DE L'AFRIQUE POUR LA MISE EN ŒUVRE DES TECHNOLOGIES DE BATTERIES DE NOUVELLE GÉNÉRATION 70

9.1 Cadre institutionnel 70

9.1.1 Le modèle 70

9.2 Infrastructure: L'industrialisation immédiate 74

9.2.1 L'avantage des matières premières 75

9.2.2 L'avantage des technologies de fabrication 75

9.2.3 L'avantage logistique 76

9.3 Infrastructure: Recherche, développement et innovation 76

9.3.1 Installations à grande échelle pour la recherche sur les matériaux 76

9.3.2 Infrastructure de calcul à haute performance 76

9.4 Capital humain 77

9.5 Conclusion 78

10. RECOMMANDATIONS 79

10.1 Ressources minérales et cadres réglementaires : recommandations aux États membres 79

10.2 Améliorer les compétences, la fabrication et les centres de recherche sur le continent 80

10.3 Résumé des éléments structurels et institutionnels requis pour un calendrier technologique réaliste de la prochaine génération de batteries 80

10.4 Conclusion 82

11. BIBLIOGRAPHIE 83

Figures

Figure 1. Projection de la croissance démographique mondiale d'ici 2050 14

Figure 2. Comparaison régionale de l'Afrique en termes de population, de PIB par an, d'accès à l'électricité et d'électricité par habitant 17

Figure 3. Les repères mondiaux du LCOE des batteries photovoltaïques et éoliennes 18

Figure Le potentiel de l'énergie photovoltaïque en Afrique 19

La désindustrialisation en Afrique sub-saharienne 20

Figure Batterie Li-ion montrant les électrodes de l'anode (borne négative) et de la cathode (borne positive), séparateur et électrolytes 23

Figure (a) Les considérations de performance dans la technologie des batteries conduisent à un "trilemme de la batterie", et ; (b)
rêve d'une technologie de batterie capable de concurrencer le moteur à combustion interne en termes de densités d'énergie et de puissance
..... 24

Une comparaison qualitative des cinq principaux types de batteries sur six critères. L'axe

Figure 9 : a) Progrès de la chimie des NMC en fonction des générations, et ; b) Applications pour les batteries lithium-ion divisées en trois phases avec des chimies plus avancées demandées, pour les applications dans les régions périphériques …….. 27

Figure 10. Une étude portant sur 890 entreprises révèle un rendement des capitaux propres (RCP) supérieur de 2,5 % pour les entreprises qui divulguaient leurs politiques de diversité et d'égalité des chances (D&EO) ……. 42

Figure 11. L'économie circulaire : La transition du flux linéaire traditionnel vers le circuit fermé le plus long possible pour un produit donné..... 45

Figure 12. Schéma simplifié de la chaîne de valeur de la technologie des batteries lithium-ion. Les cases vertes représentent les secteurs de la chaîne de valeur où une infrastructure substantielle existe déjà, alors qu'il n'en existe aucune dans les cases rouges. L'ovale jaune met en évidence les secteurs qui doivent être créés pour la composante d'industrialisation immédiate du programme que nous proposons. La fabrication comprend le système de gestion des batteries et la technologie des packs …….. 50

Figure 13. Chaîne de valeur du lithium dans la technologie des batteries lithium-ion [Source : Future Smart Strategies, 2018] 52

Figure 14. Prolonger la durée de vie des batteries grâce à des applications de seconde vie avant le recyclage ; créant ainsi une économie circulaire 57

Figure 15. La capacité cumulée prévue des batteries de seconde vie comme stockage flexible pour les énergies renouvelables 58

Figure 16. Exemples de technologies de recyclage des batteries..... 59

Figure 17. Un couplage possible entre les opérations de recyclage et de seconde vie où l'opération de recyclage effectue le test de l'état de santé des batteries usagées des véhicules électriques.115 65

Figure 18. Emplois liés montrant les emplois dans le domaine des batteries lithium-ion aux États-Unis 67

Figure 19. La "Triple hélice", l'espace hybride transversal composé d'acteurs de l'État, de l'industrie et des institutions académiques qui collaborent étroitement pour co-créer des produits et services innovants. Il a été démontré qu'il s'agit du point de convergence des systèmes d'innovation performants et qu'il intègre à la fois l'offre et la demande d'innovation..... 71

Figure 20. Coût par pack de batteries pour les batteries basées sur la chimie des cellules NCA/Gr en fonction de la capacité de production de l'usine, les courbes représentant respectivement une part de 60 %, 66 % et 88 % du coût des matériaux.
La ligne en pointillé indique 3 GWh, le point auquel les effets d'économie d'échelle basés sur le processus atteignent leur maximum, ... 73

Tableaux

Tableau 1: Générations de technologies de batteries au lithium 26

Tableau 2: Calendrier de commercialisation prévu pour la technologie des batteries jusqu'à un peu plus de 2030 28

Tableau 3: Les " cinq grands " minéraux pour batteries au lithium-ion : Production africaine (2018) et réserves connues.
Les données relatives au nickel sont celles de 2017. Pour chaque minéral, les données ne sont fournies que pour le producteur le mieux classé ou le détenteur des plus grandes réserves connues 51

Acronymes

ABIC	African Battery Innovation Council
ASESMA	African School on Electronic Structure Methods and Applications
AfCFTA	Zone de libre-échange continentale africaine
AICC	African Innovation Capital Company
APET	Panel africain de haut niveau sur l'innovation et les technologies émergentes
ARENA	Agence internationale pour les énergies renouvelables
ATTC	Centre africain de transfert de technologie
AUC	Commission de l'Union africaine
CAGR	Taux de croissance moyen composé
CHPC	Centre for High-Performance Computing
CSIR ERG	Council for Scientific and Industrial Research Eurasian Resources Group
ESG	Environmental, Social and Governance
EV	Véhicules électriques
FDI	Investissement direct étranger
GHG	Gaz à effet de serre
GHI	Irradiance horizontale globale
ICE	Moteur à combustion interne
IoT	Internet des objets
kWh	Kilowattheures
LCO	Oxyde de cobalt et de lithium
LiBs Li-ion	Batteries au lithium-ion Lithium-ion
LiPFs	Hexafluorophosphate de lithium
Li-S	Lithium-Soufre
LME	London Metals Exchange
LMO	Oxyde de lithium et de manganèse
LTO	Lithium-Titanate
NaFeCl2	Dichlorure de fer sodique
NCA	Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide
NECSA	South African Nuclear Energy Corporation
NiFE	Nickel Fer

NMC	Oxyde de nickel, de manganèse et de cobalt
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OEMs PV	Original Equipment Manufacturers (OEM)
	Photovoltaïque
PWh	Pétawattheure
RD&I	Recherche, développement et innovation
RFW SHS	Cadres réglementaires
SIBs SKA	Systèmes solaires domestiques
SSA	Batteries sodium-ion
STEM	Réseau d'un kilomètre carré
	Afrique subsaharienne
TCFD	Science, technologie, ingénierie et mathématiques
	Task Force on Climate-related Financial Disclosure
UAVs	Véhicules aériens sans pilote
ODD ONU	Objectifs de développement durable 2030 des Nations unies

Résumé exécutif

L'énergie électrique est un élément essentiel de la vie moderne de l'homme qui lui permet de bénéficier de systèmes de soins de santé, de transport, d'éducation et de communication. L'énergie électrique permet également à l'humanité de fournir les moyens de produire de l'eau potable, de la nourriture et des biens L'Afrique reste confrontée au défi de la croissance démographique la plus rapide au monde. Par conséquent, un accès accéléré à une électricité abordable, durable et de haute qualité est essentiel à la prospérité et au développement socio-économique de l'Afrique. Cependant, l'approvisionnement en électricité reste inaccessible, peu fiable et irrégulièrement réparti sur le continent, plus particulièrement dans la région de l'Afrique subsaharienne.

Ces dernières années, l'électricité issue de ressources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne est devenue plus abordable que l'électricité issue de combustibles fossiles. Cette évolution rapide devrait jouer un rôle essentiel dans la réalisation d'un accès accéléré et abordable à l'électricité pour les Africains. Cependant, la société moderne a besoin d'un approvisionnement en électricité ininterrompu, à la demande et constant, d'une tension (220V) et d'une fréquence (généralement 50Hz) exactes. L'électricité produite à partir de ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire ne correspond généralement pas à la demande d'électricité de la société africaine L'Afrique a besoin de tampons énergétiques rentables qui peuvent être exploités pour atténuer l'écart entre la demande et l'offre d'électricité. Ces tampons sont connus sous le nom de systèmes de stockage de l'énergie. Ces systèmes de stockage de l'énergie peuvent améliorer l'approvisionnement en électricité grâce à des capacités de stockage solides sur tout le continent.

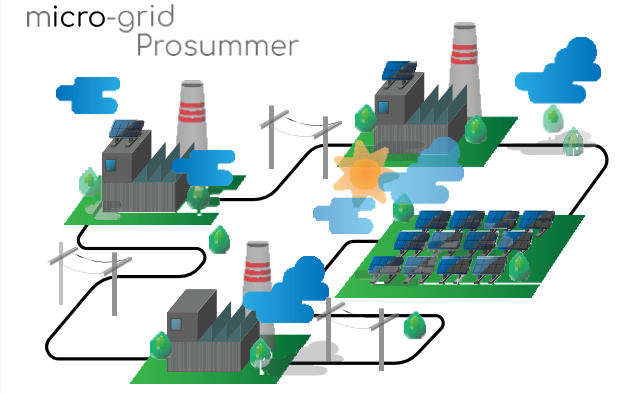
Des avancées majeures ont été réalisées dans le développement et la production de systèmes de stockage d'énergie, en particulier ceux contenant des batteries Li-ion. Par conséquent, les grands constructeurs automobiles du monde entier commencent à voir l'inévitable et à se préparer à remplacer la chaîne cinématique à combustion interne par des moteurs électriques alimentés par des batteries, intrinsèquement plus efficaces. L'industrie des batteries devrait devenir un marché stupéfiant de plusieurs milliards de dollars d'ici 2040. Avec une planification précise, l'Afrique a le potentiel pour devenir l'un des principaux bénéficiaires de cette technologie, car elle dispose de minéraux adaptés aux batteries de nouvelle génération. Cela peut considérablement rendre l'Afrique compétitive par rapport aux autres acteurs mondiaux de l'industrie des batteries.

Ce rapport de l'APET sur les batteries de nouvelle génération se concentre sur le cadre stratégique que les États membres de l'Union africaine peuvent adopter pour le stockage de l'énergie grâce aux batteries de nouvelle génération. Il articule en outre les deux objectifs clés sur lesquels les États membres peuvent se concentrer pour atteindre ces objectifs et produire des impacts mesurables et des cadres de mise en œuvre spécifiques.

Pour y parvenir, les États membres de l'Union africaine sont encouragés à mettre en place une recherche et un développement transversaux pour les universités et les instituts de recherche qui collaborent étroitement avec le secteur public et privé. Ils peuvent s'appuyer sur la capacité de l'Afrique à générer de nouvelles idées et connaissances et à les traduire en technologies et services de valeur. De cette manière, les États membres peuvent construire des économies fondées sur la connaissance pour le bénéfice socio-économique direct des Africains et de toute l'humanité. Les États membres peuvent ainsi garantir la création d'un avenir souhaité pour leurs citoyens.

Plus important encore, ce rapport APET articule un modèle continental pour un programme qui était à la fois illustratif et démontrait le scénario de mise en œuvre préféré spécifiquement adopté et adapté au contexte africain. La proposition de valeur s'appuie fortement sur les avantages concurrentiels clés du continent africain. Il est connu que les pays africains sont dotés des minerais nécessaires aux technologies de batteries de nouvelle génération. En raison de cet avantage, les pays africains sont encouragés à tirer parti de ces minéraux et à améliorer leur valorisation pour atteindre les normes requises pour les batteries de la prochaine génération afin de réaliser plus de valeur et de bénéfices. Il a également été démontré que les plus gros investissements dans la chaîne de valeur devraient être consacrés à la chaîne de valeur du traitement et de la valorisation des minéraux. Cela peut également inclure la fabrication de cellules pour les batteries et le conditionnement des batteries, car cette partie de la valeur reste lucrative. Il a été signalé que la simple vente de minéraux non transformés n'apporte pas de valeur ajoutée aux Africains qui bénéficient de ces matériaux.

Ainsi, en valorisant correctement ces matériaux, l'Afrique pourra en tirer le meilleur parti et améliorer son développement socio-économique[1]. Dans l'ensemble, le programme proposé aborde directement deux des domaines prioritaires pour la mise en œuvre des objectifs 2 et 7 de l'ODD7 et de l'Agenda 2063. Il s'agit notamment de l'intensification du développement et du renforcement des capacités des citoyens africains, qui peut être réalisée par le biais de programmes d'éducation et de formation appropriés visant à doter les Africains des compétences adéquates pour tirer parti de la technologie des piles de nouvelle génération. Cet objectif peut également être atteint par des approches renouvelées et intersectorielles entre toutes les parties prenantes en Afrique et les partenaires internationaux. En outre, les États membres de l'Union africaine devraient développer des capacités humaines et institutionnelles axées principalement sur les compétences afin de soutenir l'accès universel à l'énergie et la transformation du secteur énergétique. Les États membres sont encouragés à améliorer les systèmes d'innovation aux niveaux national, régional et continental. Cela peut inclure la recherche, le développement, le déploiement et la diffusion dans la conception et l'exploitation de l'ensemble du système énergétique.



Les recommandations que l'APET a identifiées pour que les États membres de l'Union africaine bénéficient au mieux de la prochaine génération de technologies de batteries sont résumées ci-dessous. Ceci afin d'aider les pays africains à combattre avec succès la pauvreté de leurs citoyens :

1. Les décideurs et les responsables politiques d'Afrique sont encouragés à capitaliser sur le désir mondial de produire des batteries de nouvelle génération telles que les batteries Li-ion (LiBs). Les efforts des États membres de l'Union africaine peuvent se concentrer sur l'enrichissement local des minerais et l'assemblage local des batteries. Les États membres sont encouragés à investir dans des usines locales pour le raffinage et l'enrichissement des ressources naturelles locales. Cette suggestion permettra non seulement aux Africains de bénéficier de l'importante valeur ajoutée des matériaux, mais aussi de stimuler la création d'emplois et la chaîne d'approvisionnement locale. En retour, cela créera d'innombrables opportunités pour la croissance socio-économique locale.
2. Les États membres de l'Union africaine sont encouragés à formuler des cadres réglementaires qui aideront à surveiller et à protéger les pays africains de l'exploitation étrangère des ressources minérales essentielles à la production de NGB. Essentiellement, ces ressources peuvent être exploitées au profit de l'Afrique d'abord. En outre, ces cadres réglementaires peuvent également être responsables de l'attribution de droits miniers qui garantissent l'enrichissement des matériaux locaux et interdisent l'exportation de matières premières sans un raffinement local substantiel. Ces cadres réglementaires veilleront également à ce que la raffinerie locale soit affectée à une usine locale d'assemblage de batteries.
3. Les États membres sont encouragés à adopter un modèle dans lequel les gouvernements se portent candidats pour accueillir les différents centres de recherche et de développement, d'innovation et de fabrication sur le continent, en fonction des matériaux et de l'expertise disponibles. De cette façon, il peut y avoir un élan continental vers l'établissement d'un dossier commercial pour une chaîne de valeur complète des LiBs en Afrique. En outre, toutes les parties prenantes sont encouragées à investir dans la recherche et le développement, les brevets de propriété intellectuelle, le développement des ressources humaines, les installations et les équipements, et les contrats de chaîne d'approvisionnement en Afrique. Cela peut également inclure des efforts en faveur de l'emploi de la main-d'œuvre africaine (scientifiques, ingénieurs, et technologies avec des diplômes de doctorat) pour améliorer la recherche et le développement et permettre des avancées technologiques efficaces.

[1] UN Policy Briefs in Support of the First SDG7 Review at the UN High-Level Political Forum 2018

1

Introduction

1.1 Contexte: Défis énergétiques de l'Afrique

Comme l'indique le Forum économique mondial, "la population de l'Afrique devrait doubler pour atteindre environ 2 milliards d'habitants d'ici 2050. De plus, d'ici 2100, la population africaine pourrait facilement avoir doublé à nouveau.[3] Si cela se produit, au moins quatre milliards des 11 milliards d'habitants de la planète seront africains.

Cette augmentation spectaculaire de la population pose de nombreux défis aux économies locales, à l'approvisionnement alimentaire, à la demande d'énergie, à la prestation de services de santé, aux systèmes éducatifs et à l'entretien des infrastructures dans les pays africains. Afin de relever ces défis à temps et avec succès et d'atteindre efficacement les Objectifs de développement durable (ODD) 2030 des Nations unies ainsi que l'Agenda 2063 de l'Union africaine, l'Afrique doit donner la priorité et mettre en œuvre certaines politiques continentales liées aux technologies critiques.

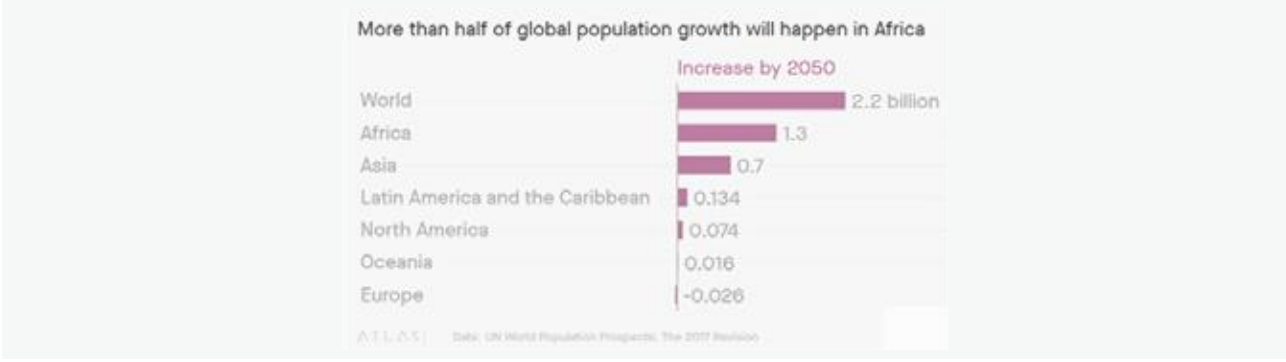


Figure 1. Projection de la croissance démographique mondiale d'ici 2050

L'Agenda 2063, qui résume les aspirations de l'Afrique en matière de développement sur une période de 50 ans, prévoit une augmentation de 50 % de l'accès à l'électricité et de 50 % de la production et de la distribution d'électricité. L'agenda aspire également à ce que 70 % des Africains aient accès à l'électricité d'ici 2023 et à ce que l'efficacité énergétique soit améliorée de 30 %. En outre, l'énergie propre et abordable fait partie des objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies, qui visent l'électrification universelle. À cette fin, l'Afrique s'efforce de réaliser l'objectif 7 des ODD et de l'Agenda 2063, dans le contexte de l'Afrique. Cet objectif peut être atteint en créant des synergies entre Power Africa, l'énergie durable pour tous et le financement du climat afin de réaliser l'accès universel à l'énergie avant 2030.[4,5]

Pour parvenir à une énergie propre universelle en Afrique, il faut tenir compte des effets du changement climatique en intégrant des stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre conformément à l'accord de Paris sur le changement climatique. La Climate Bonds Initiative, une organisation internationale à but non lucratif axée sur les investisseurs, travaille à la mobilisation d'un marché obligataire de 100 000 milliards de dollars US pour les solutions au changement climatique.[6] Cette initiative a pour mission de faire baisser le coût du capital pour les projets à grande échelle liés au climat et à l'environnement

[3] https://www.weforum.org/agenda/2019/06/9-7-billion-on-earth-by-2050-but-growth-rate-slowing-says-new-un-population-report/
[4] IRENA and IEA-ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Program), 2015a. Solar Heating and Cooling for Residential Applications: Technology Brief, Abu Dhabi: IRENA.
[5] IRENA (2015), Africa 2030: Roadmap for a Renewable Energy Future. IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org/remap
[6] https://www.climatebonds.net/2020/09/climate-bonds-initiative-and-fsd-africa-launch-africa-green-bonds-toolkit-practical-guide

et les projets d'infrastructure et pour soutenir les gouvernements qui cherchent. L'augmentation des investissements sur les marchés de capitaux qui ont été mis en place pour atteindre les objectifs climatiques Afrique s'est élevée à 898 millions de dollars US en 2019. En outre, il a été signalé que le marché africain a été dominé par le prêt de projet de 567 millions de dollars américains accordé à Redstone Solar Plant. Cependant, même en tenant compte de cela, la composition des investissements a considérablement changé en 2019, le reste étant composé d'émissions d'institutions d'entreprises et du deuxième souverain vert du Nigeria.

1. Modèles d'accès à l'électrification sur le continent

Selon la Banque africaine de développement[7], "Plus de 640 millions d'Africains n'ont pas accès à l'énergie, ce qui correspond à un taux d'accès à l'électricité pour les pays africains d'un peu plus de 40 %, le plus bas du monde. La consommation d'énergie par habitant en Afrique subsaharienne (hors Afrique du Sud) est de 180 kWh, contre 13 000 kWh par habitant aux États-Unis et 6 500 kWh en Europe".

L'accès à l'électricité en Afrique varie d'une région à l'autre du continent. Par exemple, l'Afrique du Nord est presque entièrement électrifiée (jusqu'à 99 %). Alors qu'en Afrique subsaharienne (ASS), à l'exclusion de l'Afrique du Sud, les taux d'électrification de la plupart des pays restent inférieurs à 30 %, l'Afrique du Sud est majoritairement électrifiée (jusqu'à 86 %). Notamment, le manque d'accès à l'électricité en ASS est prédominant dans les zones rurales, qui représentent 63% de la population de l'ASS.8 La majorité de la population rurale est hors réseau et faiblement distribuée.9 Heureusement, depuis 2014, le nombre de personnes sans accès à l'électricité en ASS a diminué. Cela s'explique par le fait que les efforts d'électrification avec l'ASS ont dépassé la croissance démographique. Cependant, les pays africains ont encore du pain sur la planche pour relever les défis de l'électrification et les disparités observées sur le continent. À cette fin, l'APET suggère un rôle croissant des solutions d'énergie renouvelable décentralisées qui ont récemment pris de l'ampleur sur le continent.

Le manque d'accès à l'électricité n'est pas la seule composante du défi de l'électrification en ASS. Même parmi les personnes qui ont accès à l'électricité, il existe encore de grandes disparités dans la consommation annuelle par habitant entre les trois régions. Par exemple, l'Afrique subsaharienne dispose en moyenne de 225 kilowattheures (kWh) d'électricité, les zones rurales n'ayant accès qu'à 100 kWh. En comparaison, la moyenne est de 1 500 kWh en Afrique du Nord et de 4 200 kWh en Afrique du Sud. En outre, même dans les endroits où le raccordement au réseau existe déjà, les foyers et les industries doivent souvent se contenter d'une alimentation électrique irrégulière.

[7] Light Up and Power Africa – A New Deal on Energy for Africa https://www.afdb.org/en/the-high-5/light-up-and-power-africa-%E2%80%93-a-new-deal-on-energy-for-africa

[8] https://www.worldbank.org/en/region/afr/overview

[9] Tracking the SDG7: The Energy Progress Report: https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2019-Tracking%20SDG7-Full%20Report.pdf

Ces approvisionnements erratiques en électricité se caractérisent par de longues coupures, en moyenne 7 par mois, en raison de graves sous-capacités dans les pays d'Afrique subsaharienne.[10] Ce scénario a un impact négatif profond sur la productivité industrielle et la qualité de vie globale des citoyens ruraux d'Afrique subsaharienne. Ce scénario a un impact négatif profond sur la productivité industrielle et la qualité de vie globale des citoyens ruraux de l'Afrique subsaharienne. [11,12]

1.3 Solutions existantes proposées pour relever les défis énergétiques de l'Afrique

Dans son rapport, le Groupe de haut niveau de l'Union africaine sur les technologies émergentes (APET) a recommandé que les États membres de l'Union africaine exploitent la technologie des micro-réseaux pour la transformation socio-économique du continent.[13] L'APET a également suggéré que les responsables et les décideurs des gouvernements et du secteur privé adaptent et contextualisent la mise en œuvre des micro-réseaux aux réalités de l'Afrique. Cela devrait prendre en compte des facteurs tels que la sélection des sites, le nombre attendu de connexions par site, ainsi que la demande et la volonté de payer. En outre, il est essentiel de prendre en compte des facteurs supplémentaires tels que le rendement attendu par connexion et le développement des compétences et des capacités pour les communautés mal desservies. Plus particulièrement, ce renforcement des capacités devrait porter sur le rôle du "secteur informel" dans le soutien à la mise en place de micro-réseaux. Les éléments mentionnés ci-dessus pourraient atténuer les cas signalés dans certains pays où les installations de micro-réseaux ont souffert d'une exploitation et d'une maintenance inadéquates. Cela aidera donc les communautés qui peuvent à peine réaliser les avantages escomptés des micro-réseaux.

En outre, les pays africains pourraient relever le défi de l'électrification grâce à l'énergie solaire, afin de répondre immédiatement à la capacité de production supplémentaire nécessaire pour parvenir à l'électrification universelle du continent. Heureusement, l'Afrique possède les ressources solaires les plus élevées sur la base de l'irradiance horizontale globale (GHI). L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (ARENA) a déterminé que le potentiel continental de production d'énergie photovoltaïque (PV) pouvait atteindre 660 pétawattheures, où 1 pétawattheure (PWh) équivaut à 1 000 000 GWh par an.[14] La même étude fait état d'un potentiel de production d'énergie éolienne de 460 PWh. Cette étude excluait les "régions éloignées" qui n'étaient pas proches des réseaux nationaux existants. Ainsi, ces chiffres sont directement pertinents uniquement pour la demande non desservie qui est déjà connectée au réseau existant. Toutefois, ces chiffres démontrent le vaste potentiel d'électrification de l'Afrique grâce à l'exploitation des ressources solaires. Le potentiel de production photovoltaïque (PV) est nettement plus élevé si les "zones reculées" sont incluses dans le modèle de production distribuée. Ceci est impératif pour réaliser l'électrification universelle de l'Afrique.

La métrique à 5 niveaux de la Banque mondiale peut être utilisée pour mesurer le niveau d'accès à l'énergie sur la base de huit facteurs. Ces facteurs sont la capacité, la disponibilité, la fiabilité, la qualité, le caractère abordable, la légalité, la commodité, la santé et la sécurité. Il s'agit d'un cadre utile que l'Afrique peut utiliser pour comprendre l'électrification sur le continent.15 Il est demandé que l'Afrique adopte le niveau 3 d'électrification lorsqu'elle exploite l'énergie solaire, ce qui inclut l'éclairage général, la circulation de l'air, la radio, la télévision et les appareils à faible consommation d'énergie tels que la transformation des aliments et le lavage. Ces niveaux sont généralement considérés comme le seuil permettant la transformation économique et correspondent à une consommation d'électricité par habitant de 160 kWh par an.[16,17]

[10] Cole, M, Elliott, R, Occhiali, G & Strobl, E 2018, 'Power outages and firm performance in Sub-Saharan Africa', Journal of Development Economics, vol. 134, pp. 150-159. https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2018.05.003
[11] https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity
[12] https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019
[13] https://www.nepad.org/blog/let-there-be-light-harnessing-microgrid-energy-africa#_ftn4
[14] Sebastian, Hermann, Asami Miketa, Nicolas Fichaux (2014), Estimating the Renewable Energy Potential in Africa, IRENA-KTH working paper, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
[15] World Bank, https://www.seforall.org/sites/default/files/GTF-2105-Full-Report.pdf
[16] Re-thinking Access to Energy Business Models Ways to Walk the Water-Energy-Food Nexus Talk in Sub-Saharan Africa, RES4Africa Foundation, Rome, Italy (2019): https://[16] sun-connect-news.org/fileadmin/DATEIEN/Dateien/New/RES4Africa-RE-thinking-Access-to-Energy-Business-Models.pdf
[17] https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?locations=ZF

1.4 Opportunités pour l'industrie de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables

En Afrique, le secteur de la production d'électricité est dominé par de petits systèmes coûteux fonctionnant aux combustibles fossiles. En outre, la Banque africaine de développement affirme que les combustibles fossiles sont actuellement le moyen le plus coûteux de produire de l'électricité. Le coût des combustibles fossiles varie entre 0,20 et 0,30 USD par kWh. C'est beaucoup plus que le coût de la production conventionnelle. En revanche, le coût actualisé de l'électricité (LCOE) provenant de sources renouvelables, tel que rapporté par Bloomberg (voir figure 3), a récemment montré que l'électricité d'origine photovoltaïque et éolienne est nettement inférieure au coût de l'électricité provenant de combustibles fossiles.

L'énergie renouvelable aidera les économies à faire la transition des gaz à effet de serre (GES) les plus élevés vers des économies à faible émission de carbone et pour réduire stratégiquement les GES, il faut passer des combustibles fossiles aux énergies renouvelables. Actuellement, les énergies renouvelables en Afrique ne contribuent qu'à une très faible part de la production et de l'utilisation totales de l'énergie. Les énergies renouvelables combinées constituent environ 13% de l'approvisionnement en énergie primaire dans le monde. Ainsi, les énergies renouvelables permettront de réduire d'urgence les émissions de carbone. En outre, les énergies renouvelables apporteront de l'électricité dans les zones africaines qui ne sont actuellement pas connectées au réseau central. Elles peuvent également améliorer le réseau peu fiable et servir de systèmes de secours en cas de besoin.

Figure 2. Comparaison régionale de l'Afrique en termes de population, de PIB par an, d'accès à l'électricité et d'électricité par habitant

Les énergies renouvelables peuvent également favoriser le développement économique des pays africains en développement. La figure 4 montre que de nombreux pays africains sont géographiquement bien placés. Ils ont ainsi la possibilité d'exploiter le potentiel énergétique, car la plupart de ces pays d'Afrique subsaharienne se trouvent sous des latitudes basses et bénéficient d'un fort ensoleillement. Ainsi, les énergies renouvelables permettent de répondre aux préoccupations croissantes concernant les prix futurs de l'énergie et la sécurité énergétique. Cette situation s'inscrit dans le contexte d'une augmentation rapide de la demande d'énergie au niveau mondial, principalement due à la hausse du niveau de vie dans les pays en développement et émergents. En outre, les énergies renouvelables offrent des opportunités économiques car les technologies liées aux énergies renouvelables sont déjà compétitives aux prix du marché. Ainsi, la production décentralisée d'électricité peut potentiellement mobiliser des investissements privés à petite échelle pour les économies africaines. Par conséquent, les investissements dans les énergies renouvelables offrent également des possibilités considérables de création d'emplois, une préoccupation majeure de politique publique dans de nombreux pays africains. En effet, il existe un potentiel d'emploi substantiel associé au développement, à la construction et à l'installation de projets pour toutes les technologies d'énergie renouvelable.

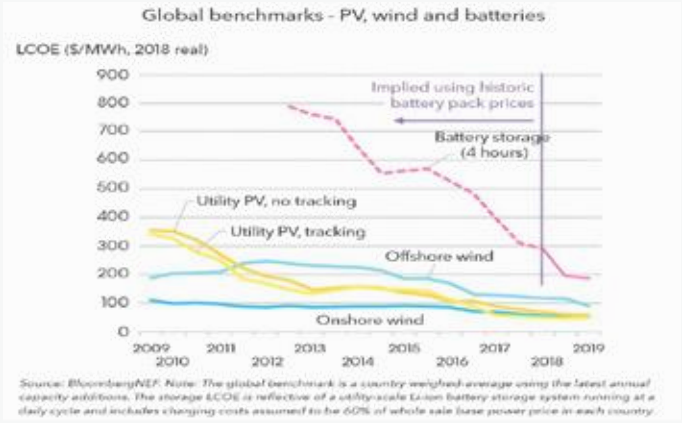


Figure 3. Les repères mondiaux du LCOE des batteries photovoltaïques et éoliennes

Sur la base des données de rayonnement solaire, le potentiel d'extraction de l'électricité solaire en Afrique est parmi les meilleurs au monde et présente une opportunité majeure alors que les prix continuent de baisser. Les potentiels théoriques totaux sur le continent africain sont estimés à environ 470 pétawattheures (PWh), 660 PWh et 460 PWh pour l'énergie solaire à concentration (CSP), le photovoltaïque et l'éolien, respectivement.18 Selon la figure 3, les prix de la production d'énergie photovoltaïque, éolienne en mer et éolienne terrestre ont considérablement diminué depuis 2009. On s'attend donc à ce qu'ils baissent encore plus prochainement, tout particulièrement lorsque la capacité de stockage des batteries augmentera.

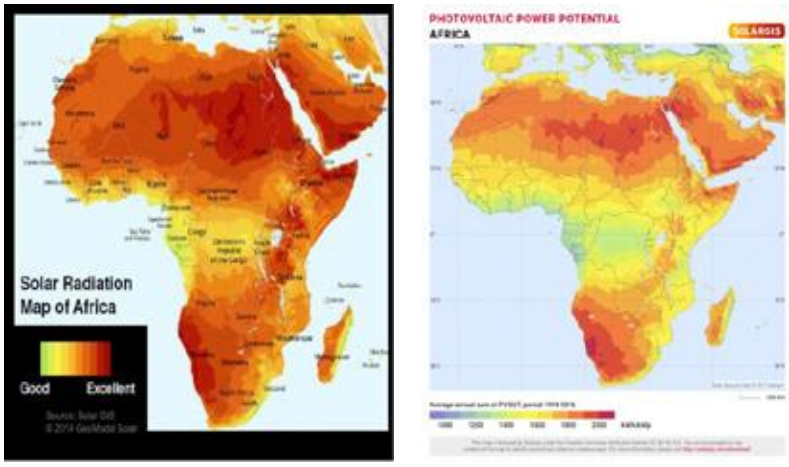


Figure 4. Le potentiel de l'énergie photovoltaïque en Afrique

Pour répondre à la demande d'électricité imminente, une plus grande partie de l'énergie africaine devra provenir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique. Ainsi, l'importante population rurale de l'Afrique offre des possibilités d'installations de micro-réseaux décentralisés alimentés par des énergies renouvelables. Ceci est soutenu par l'un des messages clés du document d'orientation sur la réalisation de l'ODD7 qui se lit comme suit : "Pour assurer l'accès universel à l'énergie d'ici à 2030, les options décentralisées constituent la solution la moins coûteuse pour 60 % des personnes qui en sont actuellement privées". L'Afrique peut donc améliorer l'approvisionnement en électricité de ses citoyens.

18 S. Hermann, A. Miketa, N. Fichaux (2014), Estimating the Renewable Energy Potential in Africa, IRENA-KTH working paper, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

1.4.1 Pourquoi l'énergie solaire ne répond pas actuellement aux besoins énergétiques de l'Afrique

Avec une population non électrifiée de 650 millions de personnes sur le continent, la capacité de production distribuée requise est de 104 TWh/an, ce qui implique une capacité de stockage par batterie d'environ 700 GWh.[19] Cependant, il faut noter que cela ne représente qu'une petite fraction du potentiel de ressources solaires photovoltaïques de l'Afrique. Par conséquent, la question se pose immédiatement de savoir pourquoi de nombreuses personnes en Afrique sont toujours privées d'électricité. La principale raison d'une telle disparité est le coût nécessaire pour stocker l'électricité produite à partir de sources solaires. En particulier, la principale raison de ce coût et de cette répartition inégale sont les technologies de stockage de l'énergie solaire. Notamment, le coût des panneaux solaires a considérablement diminué au point d'être désormais à la portée de nombreux habitants africains. Par conséquent, le principal obstacle à l'adoption à grande échelle de l'énergie solaire photovoltaïque est le coût du stockage de l'énergie. S'il existe d'autres solutions de stockage de l'énergie telles que les volants d'inertie, l'air comprimé, le thermique, l'hydroélectricité par pompage et les supercondensateurs, les batteries restent la technologie la plus flexible.

Traditionnellement, les batteries plomb-acide sont utilisées avec les panneaux solaires photovoltaïques et restent populaires comme unités de stockage d'énergie pour de nombreux Africains en raison de leur faible coût. De toute évidence, la technologie de stockage de l'énergie est le facteur le plus important qui détermine le succès ou l'échec de l'ODD7 en Afrique. Par conséquent, cela a des implications continentales majeures sur les politiques gouvernementales qui régissent et réglementent la production d'énergie solaire et les cadres de stockage. Ainsi, la question à laquelle les gouvernements africains doivent répondre est de savoir comment ils peuvent générer l'électricité de 104 TWh/an qui est nécessaire pour alimenter l'Afrique en énergie solaire et éolienne se traduire par une capacité de stockage réelle. Cette mise à l'échelle des installations de stockage contribuera énormément aux programmes d'industrialisation immédiats nécessaires pour augmenter la capacité d'un facteur compris entre 20 et 25 % en Afrique, comme le montre la figure 1.[20] Cependant, en l'état actuel des choses, la production photovoltaïque reste un potentiel sous-utilisé.21 Il est incroyable de constater que ce paradoxe apparent entre le potentiel des ressources solaires et son actualisation découle principalement de la politique gouvernementale. Cette situation est observée même si l'adoption de l'énergie solaire à des fins d'électrification en Afrique semble offrir de grandes possibilités.

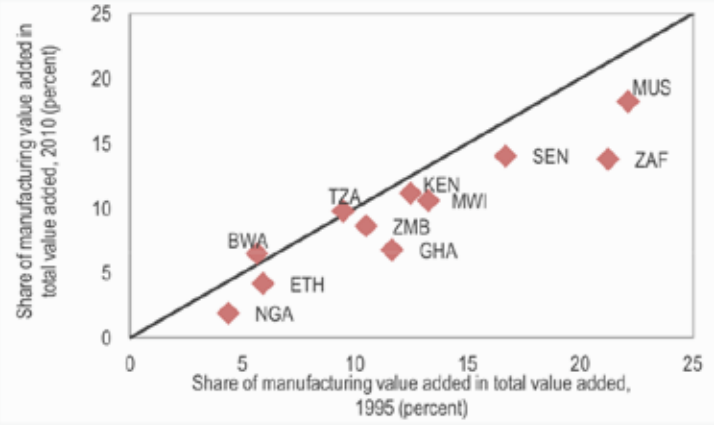


Figure 5. La désindustrialisation en Afrique sub-saharienne[22]

[19] Renewables (2013), Global Status Report: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013_Full-Report_English.pdf
[20] P. Trotter, Energy planning in Africa: Challenges and opportunities for insourcing capabilities, Smith School of Enterprise and the Environment University of Oxford, United Kingdom, Long-term Energy Scenario (LTES) Forum, Berlin, April 12th, 2019: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2019/Apr/LTES-2019/Philipp-Trotter-
--University-of-Oxford.pdf?la=en&hash=E5D20154DE9C03D63DEA775270B3CC1638720FEF.
[21] Jäger-Waldau, A., PV Status Report 2019, EUR 29938 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-12608-9, doi:10.2760/326629, JRC118058.
[22] International Monetary Fund: World Economic and Financial Surveys, Regional Economic Outlook, Sub-Saharan Africa (2015)

D'autres nations dans le monde sont déjà conscientes et capitalisent sur les avantages de la production photovoltaïque. Par conséquent, des alliances et des collaborations à grande échelle sont formulées pour un positionnement stratégique et une concurrence pour le contrôle de cette technologie. Alors que le monde entier s'oriente vers un positionnement stratégique pour tirer parti de ces opportunités, l'Afrique doit suivre le mouvement. Cependant, la question à laquelle les pays africains doivent répondre est de savoir comment ils vont se positionner aux niveaux national, régional et continental. L'Afrique doit également capitaliser sur les avantages stratégiques qu'elle possède par rapport à d'autres pays du monde, tels que le talent de sa jeunesse et sa dotation en ressources naturelles nécessaires à ce type de développement technologique, de fabrication et de mise en œuvre. À ce stade, l'Afrique ne peut pas se permettre d'attendre et de voir ce qui transpire de cette technologie sans une participation active et délibérée.

L'APET croit que l'Afrique est à un tournant technologique critique. Cela présente une chance rare pour l'Afrique qui ne devrait pas être laissée échapper et rejoindre la liste toujours croissante des opportunités manquées pour l'Afrique. Il y a actuellement une révolution mondiale dans le stockage électrochimique de l'énergie qui va bouleverser les modèles traditionnels de mobilité humaine et d'accès à l'énergie. La question cruciale est de savoir où ce tournant technologique va laisser les pays africains. Bien qu'il soit difficile de le prévoir avec certitude à ce stade, il est évident que les Africains ne peuvent pas se permettre d'attendre et de voir Au contraire, l'Afrique doit agir de toute urgence en saisissant toutes les opportunités qui se présentent à elle. En outre, l'Afrique doit délibérément créer d'autres opportunités pour que ses citoyens puissent prendre en main leur destin technologique dans cette révolution mondiale en plein bouleversement.

1.5 Les batteries au centre du défi, de l'opportunité et de la solution

Si le coût de l'électricité dérivée des ressources renouvelables est tombé en dessous du coût de l'électricité provenant des ressources fossiles, les ressources renouvelables ne fournissent pas nécessairement la bonne qualité d'énergie électrique Une industrie moderne prospère a besoin d'une alimentation électrique ininterrompue, à la demande et constante, d'une tension (220V) et d'une fréquence (généralement 50Hz) exactes. Par conséquent, l'électricité produite à l'aide de ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire ne correspond généralement pas à la demande de la société. L'Afrique a besoin de tampons énergétiques rentables qui peuvent être exploités pour atténuer l'écart entre la demande et l'offre d'électricité. Ces tampons sont connus sous le nom de systèmes de stockage de l'énergie.

Des avancées majeures ont été réalisées dans le développement et la production de systèmes de stockage d'énergie, en particulier ceux contenant des batteries Li-ion. Par conséquent, les grands constructeurs automobiles du monde entier commencent à voir l'inévitable et à se préparer à remplacer la chaîne cinématique à combustion interne par des moteurs électriques alimentés par des batteries, intrinsèquement plus efficaces. En outre, en 2018, le Groupe de la Banque mondiale a engagé un montant initial d'un milliard de dollars US en faveur d'un programme visant à accélérer les investissements dans les systèmes de stockage sur batterie dans les pays émergents.[23] Ce type d'investissements vise à accroître l'efficacité des énergies éolienne et solaire, à améliorer la fiabilité et la qualité des réseaux existants et à réduire les émissions de carbone.

1.6 Conclusion

Il est nécessaire que les gouvernements africains stimulent et assurent les progrès socio-économiques dans la production de systèmes de stockage d'énergie, en investissant dans les batteries de nouvelle génération telles que les batteries Li-ion. Notamment, les grands constructeurs automobiles du monde entier remplacent inévitablement les moteurs à combustion interne par des moteurs électriques alimentés par des batteries, intrinsèquement plus efficaces. Il est donc nécessaire que les États membres investissent dans un programme qui accélérera la mise en place de systèmes de stockage sur batteries dans leur pays. Ce type d'investissement peut effectivement augmenter la capacité de production d'énergie éolienne et solaire. Ainsi, ils amélioreront la fiabilité et la qualité du réseau existant et réduiront les émissions de carbone. Ces mesures peuvent être mises en œuvre afin de répondre à la demande d'électricité imminente grâce à des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique. Par conséquent, il s'agit de soutenir les installations de micro-réseaux décentralisés de l'Afrique alimentées par les énergies renouvelables et de réaliser les cadres politiques de l'ODD7 qui visent à fournir un accès universel à l'énergie d'ici 2030 aux 60 % de la population africaine qui en sont actuellement privés. L'Afrique peut donc améliorer l'approvisionnement en électricité de ses citoyens.

[23] https://www.worldbank.org/en/news/feature/2018/09/26/powering-new-markets-for-battery-storage

2

Analyse critique des batteries de nouvelle génération

2.1 Présentation des batteries

L'énergie électrique joue un rôle fondamental dans notre vie quotidienne moderne. Aujourd'hui, de nombreux appareils de la troisième révolution industrielle destinés à l'informatique et aux communications, tels que les ordinateurs portables, les tablettes et les téléphones mobiles, dépendent largement de l'énergie fournie par des dispositifs de stockage d'énergie tels que les batteries. Bien que nous ne puissions pas stocker l'électricité, nous pouvons stocker l'énergie électrique dans les produits chimiques présents à l'intérieur d'une batterie et convertir ultérieurement cette énergie en électricité en cas de besoin.

Une batterie est formée lorsque deux ou plusieurs cellules sont connectées. Une cellule énergétique individuelle est un système assez complexe de produits chimiques et de composants, conditionnés de manière efficace pour faciliter les applications pratiques de stockage d'énergie. Toutes les cellules comprennent trois composants essentiels, les bornes anodique et cathodique (généralement des métaux), et un milieu électrolytique (figure 6). Le milieu électrolytique sépare ces bornes tout en permettant la circulation de la charge électrique entre elles. Lors de la décharge de l'électricité dans le circuit externe connecté, les ions de l'anode transportent le courant dans l'électrolyte de la cellule, tandis que les électrons circulent dans le circuit externe. C'est ce processus qui génère un courant électrique pour alimenter les appareils auxquels les piles sont connectées.

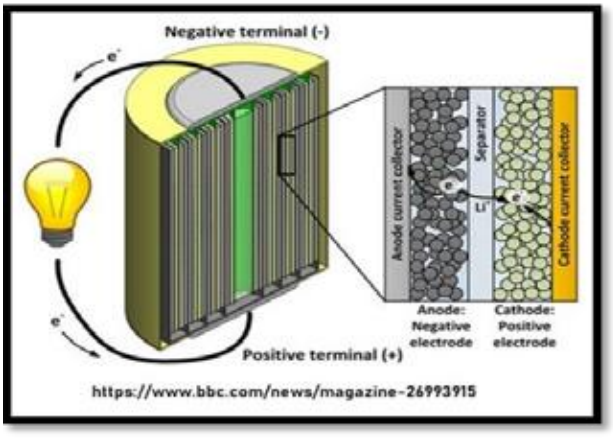


Figure 6. Batterie Li-ion montrant les électrodes anode (borne négative) et cathode (borne positive), le séparateur et les électrolytes.

Des avancées technologiques significatives dans le domaine du stockage de l'énergie ont été réalisées depuis que le physicien italien Alessandro Volta a créé la première batterie moderne en 1800, avec de nombreux procédés chimiques et méthodologies employés depuis lors. La batterie lithium-ion rechargeable est aujourd'hui la batterie la plus largement utilisée depuis son premier lancement commercial pour l'électronique portable par Sony et Asahi Kasei Corporation en 1991. Le lithium est le plus léger de tous les métaux connus et possède le plus grand potentiel électrochimique, offrant ainsi l'un des meilleurs rapports énergie/poids.[24] Il n'est donc pas surprenant que les batteries lithium-ion soient devenues la technologie de batterie la plus investie pour la plupart des applications rechargeables modernes. Cela inclut le dernier mouvement mondial vers l'électrification des véhicules pour un environnement plus propre. Les progrès de la technologie des batteries ont principalement porté sur les caractéristiques chimiques, physico-chimiques et mécaniques des cathodes et des anodes. Cependant, l'accent a été mis récemment sur l'électrolyte. Ces progrès permettent d'obtenir des densités d'énergie et de puissance plus élevées, un poids et une taille réduits, une durée de vie plus longue, une meilleure sécurité et une réduction significative des coûts.

[24] P. Peljo, H.H. Girault, Electrochemical potential window of battery electrolytes: the HOMO–LUMO misconception, Energy and Environmental Science 11 (2018)

2.2 Caractéristiques des batteries actuelles et de prochaine génération

En plus d'être bon marché et sûre, la batterie idéale doit être capable de stocker la plus grande quantité d'énergie pour la plus petite masse et le plus petit volume (densité énergétique). La batterie doit également être capable de fournir et/ou d'accepter la plus grande quantité d'énergie dans le temps le plus court possible (densité de puissance). Une batterie idéale doit pouvoir supporter le plus grand nombre de cycles de charge et/ou de décharge (longue durée de vie). Il est difficile d'optimiser mutuellement ces trois exigences dans une même batterie, d'où ce que l'on appelle le "trilemme de la batterie", comme le montre la figure 7 (a). Les performances des technologies de batterie sélectionnées sont comparées à celles du moteur à combustion interne, comme le montre la figure 7 (b). Dans la figure 7 (b), la flèche verte indique la voie privilégiée dans le développement des technologies de batteries, car elle offre un équilibre "idéal" entre les densités d'énergie et de puissance. Ainsi, toutes les technologies de batteries se situent au-dessus de la flèche verte, ce qui indique des densités de puissance comparativement faibles. En revanche, les supercondensateurs présentent des densités de puissance très élevées, mais de faibles densités d'énergie. Cependant, toutes les batteries chimiques situées au-dessus de "lithium ion" dans la figure 7 (b) doivent encore faire l'objet d'une démonstration commerciale. Mais même si elles sont commercialisées, elles s'écartent considérablement de la flèche verte. Cela montre donc que des progrès majeurs sont nécessaires pour rapprocher les technologies de batteries des performances du moteur à combustion interne.

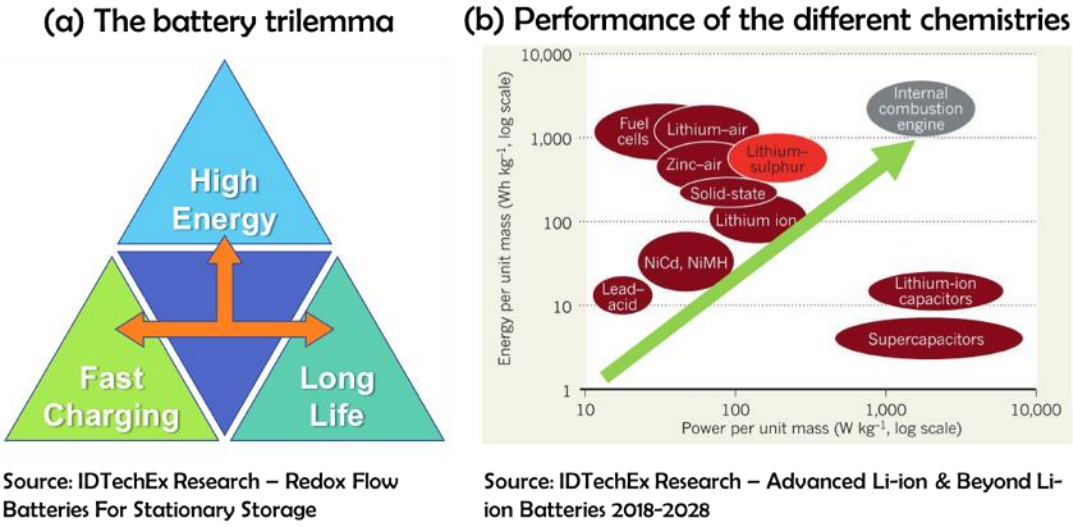


Figure 7. (a) Les considérations de performance dans la technologie des batteries conduisent à un "trilemme de la batterie", et ; (b) Le rêve d'une technologie de batterie qui peut rivaliser avec le moteur à combustion interne en termes de densités d'énergie et de puissance.

2.2.1 Résumé des technologies actuelles des batteries

Les différentes technologies de batteries lithium-ion sont classées en "chimies", en fonction de la composition chimique de la cathode. Les cinq principales compositions chimiques des technologies actuelles sont l'oxyde de cobalt de lithium (LCO), l'oxyde d'aluminium de nickel et de cobalt de lithium (NCA), l'oxyde de cobalt de nickel et de manganèse de lithium (NMC), l'oxyde de manganèse de lithium (LMO) et le phosphate de fer de lithium (LFP). Toutes ces compositions chimiques utilisent une anode en graphite (carbone). Mais la sixième composition chimique a également été définie comme un lithium-titanate (LTO). Dans ce cas, le graphite de l'anode du LMO ou du NCA est remplacé par du titanate de lithium. Parmi ces six éléments, le LCO est la composition chimique la plus mature et la chimie de choix pour l'électronique grand public Cependant, ce n'est pas l'objet de ce rapport. Les caractéristiques des cinq autres principales compositions chimiques de batteries peuvent être comparées qualitativement sur des graphiques multicritères, comme le montre la Figure 8. De plus, ces graphiques révèlent une variation significative entre les différentes compositions chimiques sur les six critères considérés. De toute évidence, la NMC présente le profil le plus équilibré de ces graphiques. Par conséquent, cette caractéristique, associée à une voie relativement claire vers de nouvelles avancées, fait de cette composition chimique de batterie un choix attrayant pour la production à grande échelle.

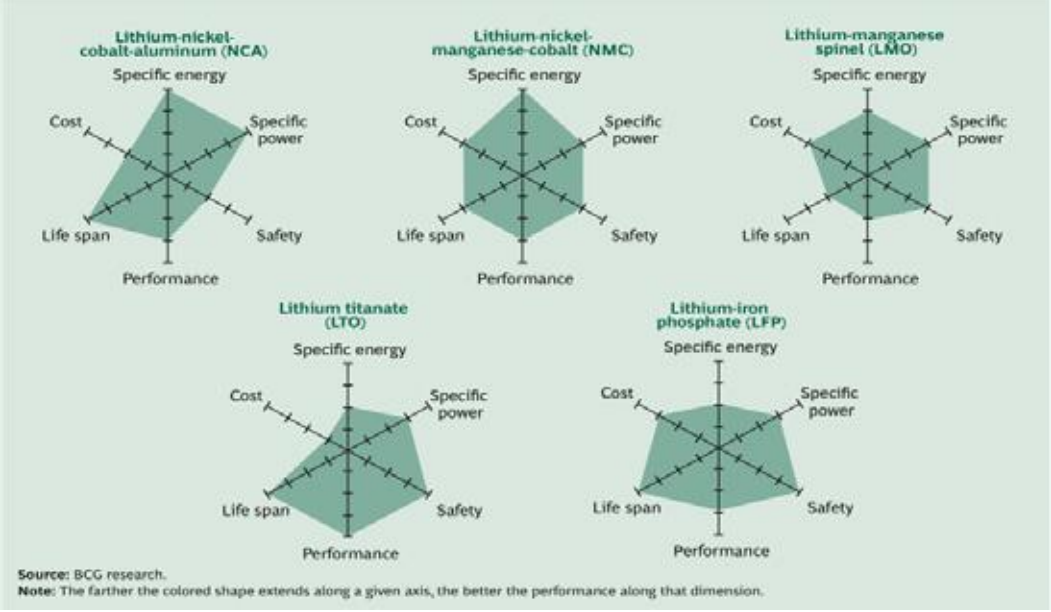


Figure 8. Une comparaison qualitative des cinq principaux types de batteries sur six critères. L'axe "Performance" fait référence à la façon dont la batterie se comporte dans des conditions de temps NMC offre un profil plus équilibré sur les six critères, ce qui explique en partie pourquoi cette chimie suscite actuellement le plus d'intérêt pour la recherche, le développement et la production à grande échelle.

Les technologies des batteries lithium-ion sont également classées en "générations", même si cette classification ne permet pas une délimitation claire. Le tableau 1 présente la classification qui a été partiellement adoptée dans ce rapport. Notamment, les "générations" ont été définies en fonction de la composition chimique spécifique de la batterie. Pour une chimie spécifique, les générations révèlent plus clairement une stratégie d'amélioration des performances. Par exemple, pour les NMC, la figure 8 montre une stratégie à deux volets consistant à augmenter la densité énergétique en augmentant la teneur en nickel et à réduire les coûts en réduisant la teneur en cobalt. D'autre part, les générations de l'ensemble de l'industrie du tableau 1 ne montrent que des stratégies plus larges. Par exemple, le tableau 1 a montré que jusqu'à la génération 3, les avancées concernaient principalement la cathode. Mais depuis lors, des progrès ont été réalisés dans les électrodes et les électrolytes. Selon le tableau 1, les batteries de la prochaine génération (mise en évidence) seront de deux compositions chimiques. La première composition chimique est constituée de NMC à haute énergie (HE-NMC) qui contient un NMC à haute teneur en lithium. La deuxième composition chimique est le spinelle haute tension (HVS). Le HVS est un LMO amélioré caractérisé par un remplacement partiel du manganèse par du nickel. Les deux compositions chimiques ont été complétées par des anodes à teneur croissante en silicium pour obtenir des capacités plus élevées.

Tableau 1: Générations de technologies de batteries au lithium.[26]

Génération	Chimie
5	Lithium/Oxygène (Lithium-air)
4	Tout solide avec anode en lithium métallique Matériaux de conversion (lithium-soufre)
3b*	Cathode: HE-NMC, HVS Anode:
3a	Cathode: NMC 622 à NMC811 Anode : Carbone + Silicium (5-
2b	Cathode: NMC523 à NMC622 Anode : 100% carbone
2a	Cathode: NMC111 Anode: 100%
1	Cathode: LFP, NCA Anode: 100%

*La génération 3b a été identifiée comme la technologie de "prochaine génération".

Les différentes générations de la technologie des batteries conduisent à différentes applications adressables et celles-ci ont été classées en trois phases qui se chevauchent quelque peu, selon la figure 9 (b). Les batteries de la prochaine génération visent la phase II des applications, plus particulièrement les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie (ESS) tels que les mini-réseaux. Ainsi, le rôle central des batteries de nouvelle génération pour les ESS est au cœur de ce rapport. La chimie avancée des NMC, suivie par les HVS, devrait dominer dans un premier temps les applications de la phase II. Celles-ci seront principalement axées sur les applications automobiles, comme le montre la figure 9 (a). Par conséquent, la stratégie immédiate proposée pour l'industrialisation est axée sur cette chimie correspondant aux applications de la phase II. Néanmoins, ce point de vue est loin d'être universellement accepté. Par exemple, il a été suggéré que les NCA étaient les plus appropriés pour les systèmes solaires domestiques (SHS) en raison de leur haute densité énergétique qui bat les LFP sur le prix.27 Cependant, il y a une perception que le profil de coût global des NCA par rapport aux NMC (Figure 9) les rend défavorables pour les ESS à grande échelle dans le contexte africain.

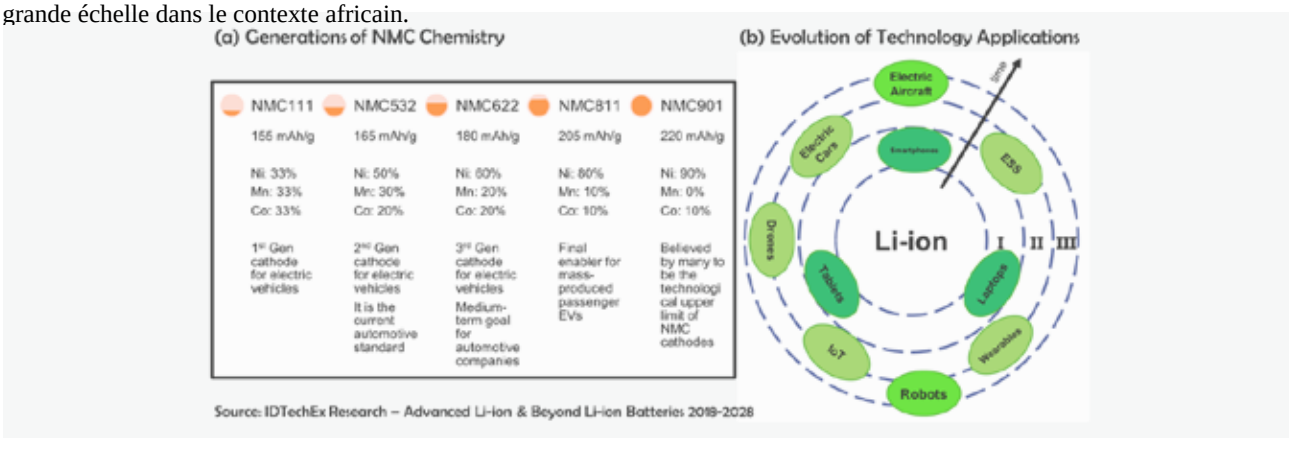


Figure 9. (a) Progrès de la chimie des NMC en fonction des générations, et ; (b) Applications pour les batteries lithium-ion divisées en trois phases avec des chimies plus avancées demandées, pour des applications dans les régions extérieures.

[26] T. Placke, Progress and Challenges: Generation 3b, European Battery Cell R & I Workshop, Brussels (2018)
[27] S. Deuten, J.J.G. Vilchez, C. Thiel, Analysis and testing of electric car incentive scenarios in the Netherlands and Norway, Technological Forecasting & Social Change 151 (2020) 119847

2.3 Feuille de route de technologie possible

Pour conclure ce chapitre, nous avons tenté d'établir une prévision technologique. La situation actuelle, dans laquelle de nombreuses compositions chimiques de batteries font l'objet de recherches, rend extrêmement difficile de prédire avec confiance les compositions chimiques de batteries qui domineront potentiellement le marché à l'avenir. En conséquence, l'échange suivant sur l'évolution possible de la technologie des batteries doit être compris dans le contexte de cette mise en garde. En outre, les principaux moteurs de la transition vers de nouvelles technologies de batteries sont quelque peu différents selon les applications. Par exemple, les densités de puissance et d'énergie sont des considérations essentielles pour l'électromobilité. Toutefois, le coût de production et le caractère abordable peuvent l'emporter sur ces autres caractéristiques dans les applications de stockage stationnaire à grande échelle. Le présent rapport est principalement axé sur ces dernières applications. Ainsi, le coût et l'accessibilité de cette dernière technologie pour l'Afrique seront développés tout au long de ce rapport. Le tableau 2 présente la trajectoire technologique prévue par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour une période allant juste au-delà de 2030. Comme on pouvait s'y attendre, il existe de légères différences entre les tableaux 1 et 2 qui reflètent les incertitudes inhérentes à ces projections. Néanmoins, la perspective générale est la même.

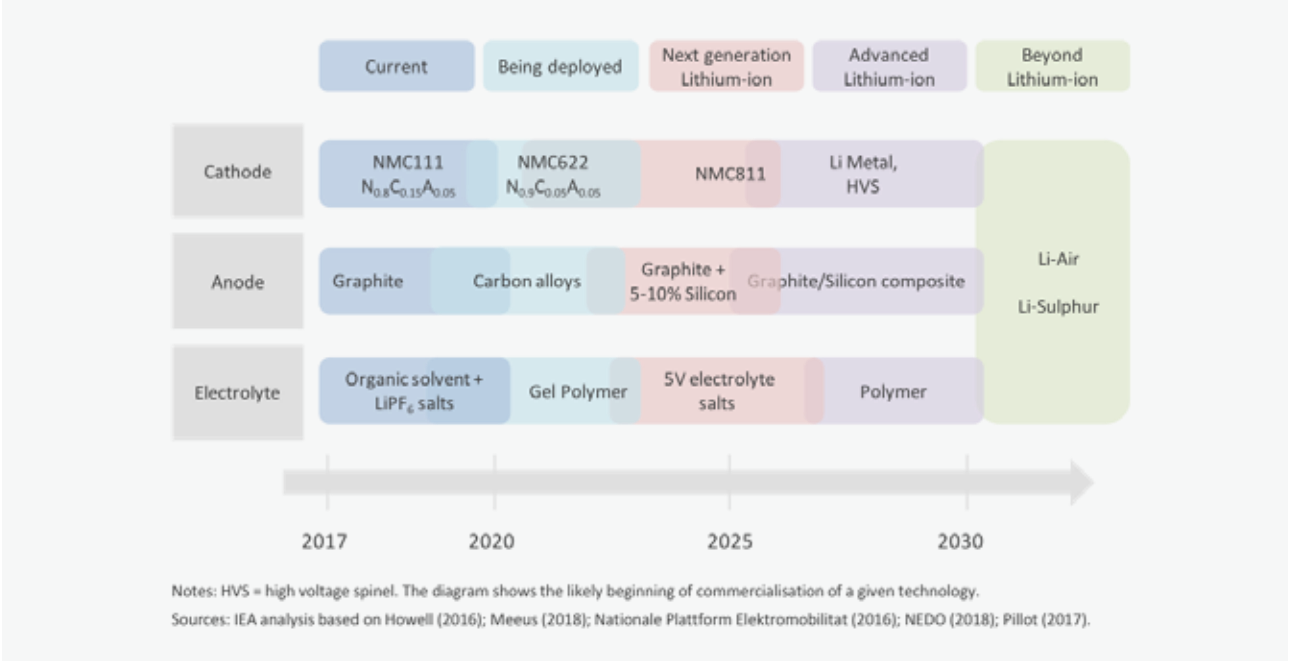


Tableau 2: Calendrier de commercialisation prévu pour la technologie des batteries jusqu'à un peu plus de 2030

Ce qui est actuellement disponible sur le marché depuis 2017, ce sont les cathodes composées de NMC111, le graphite comme anode et les électrolytes qui consistent en un solvant organique et des sels LiPF6. Cependant, depuis 2020, une anode constituée d'alliages de carbone, une cathode constituée de NMC622 et un électrolyte constitué d'un gel polymère sont en cours de développement. La prochaine génération de batteries Li-ion qui devrait voir le jour vers 2025 sera constituée de cathodes connues sous le nom de NMC811, d'anodes composées de graphite et de silicium (5-10%), et de sels d'électrolyte 5V. Les batteries Li-ion avancées se composent de cathodes HVS en métal Li, de composites de graphite et de silicone comme anodes et d'électrolytes polymères (tableau 2). Au-delà de 2030, les batteries Li-ion sont composées de Li-air et de Li-soufre comme cathode, anode et électrolytes.

2.3.1 Batteries lithium-ion avancées

Ces batteries visent à atteindre des densités d'énergie élevées en combinant des cathodes à haute tension (environ 5 eV) et des anodes à haute capacité comme les composites graphite/silicium (environ 1500 mAh/g contre 400 mAh/g pour le graphite). Cependant, les tensions élevées imposent de nouvelles exigences strictes en matière de stabilité électrochimique des électrolytes. Pour relever ce défi et d'autres, des électrolytes solides sont en cours de développement. Par exemple, les électrolytes solides inorganiques, en particulier les oxydes, semblent être les plus prometteurs depuis les électrolytes solides organiques. Actuellement, les électrolytes solides organiques n'atteignent pas le seuil de conductivité et doivent être exploités à des températures élevées comprises entre 50°C et 80°C.28 Heureusement, de nombreuses entreprises semblent faire des progrès significatifs vers des batteries lithium-ion avancées. Récemment, des annonces de prototypes ont été faites par Sion Power Corporation. Cette société a présenté sa batterie Licerion avec une anode en métal Li et une cathode riche en Ni- offrant une densité d'énergie de 500 Wh/kg.

2.3.2 Au-delà des batteries au lithium-ion

Les batteries Li-ion font appel à des procédés chimiques de conversion, mais le lithium est le porteur de charge. En outre, les procédés chimiques précédents reposent sur la chimie d'intercalation. Cela signifie qu'ils reposent sur l'insertion et la désinsertion réversibles d'ions lithium aux électrodes de la batterie. Cependant, la quantité d'ions de lithium pouvant être logée dans la structure cristalline d'une électrode est fondamentalement limitée, entre 350 Wh/kg et 400 Wh/kg. Comme on s'attend déjà à ce que les batteries lithium-ion avancées atteignent cette limite, il est impératif de mettre au point des produits chimiques qui la surmontent. Il est intéressant de noter que les produits chimiques de conversion du lithium offrent la solution la plus prometteuse à ces limites. Parmi celles-ci figurent le lithium-soufre et le lithium-air, le premier étant plus proche de la commercialisation. Par exemple, Oxis Energy prévoit de commercialiser des batteries au lithium-soufre. Ces types de batteries sont destinés à l'industrie des transports, principalement l'aviation, les bus et les camions.29 Ainsi, les batteries au lithium-soufre offrent une capacité spécifique théorique très élevée de 1675 mAh/g, une densité d'énergie de 2600 Wh/kg et un rendement énergétique élevé de 80%.30 Cependant, la forte baisse de capacité est due à l'effet de navette du polysulfure. Cependant, la forte diminution de la capacité est due à l'effet de navette du polysulfure. Ce problème doit être résolu pour la commercialisation à grande échelle des batteries au lithium-soufre[31] .

2.3.3 Au-delà des batteries au lithium

Les chimies appartenant à ce type de batteries ne figurent ni dans le tableau 1 ni dans le tableau 2. Cela s'explique par le fait que ces éléments d'intérêt s'écartent complètement du lithium comme cœur de la technologie en adoptant d'autres éléments. Par exemple, ils incorporent des éléments de sodium, de magnésium, d'aluminium et de zinc. Comme ces chimies sont fondamentalement analogues à la technologie du lithium, on peut s'attendre à ce qu'elles suivent des trajectoires analogues avec un certain saut. Par exemple, la chimie sodium-ion, la chimie avancée sodium-ion et la chimie au-delà du sodium-ion. L'intérêt croissant pour ces éléments s'explique notamment par leur abondance naturelle, qui les rend abordables, et par leur profil environnemental favorable, qui les rend durables. Ainsi, d'importantes recherches sont en cours sur les chimies ioniques et de conversion pour le sodium,[32] le magnésium,[33] l'aluminium,[34] et le zinc.[35] Cependant, à ce stade de la recherche, il est pratiquement impossible de prévoir leur calendrier de commercialisation.

---

[28] J. Schnell, N. Vaishali, L.W. Horowitz, F. Paulot, P. Ginoux, M. Zhao, D.E. Horton, Air quality impacts from the electrification of light-duty passenger vehicles in the United States. Atmospheric Environment 208 (2019) 95-102

[29] https://oxisenergy.com/

[30] A. Eftekhari, The rise of lithium–selenium batteries, Sustainable Energy Fuels 1 (2017) 14-29: https://doi.org/10.1039/C6SE00094K

[31] H. Wei, Y. Liu, X. Zhai, F. Wang, X. Ren, F. Tao, T. Li, G. Wang, F. Ren, Application of Carbon Nanotube-Based Materials as Interlayers in High-Performance Lithium-Sulfur Batteries: A Review, Frontier Energy Research (2020): https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.585795

[32] V.L. Martins, H.R. Neves, I.E. Monje, M.M. Leite, P.F.M. De Oliveira, R.M. Antoniassi, S. Chauque, W.G. Morais, E.C. Melo, T.T. Obana, B.L. Souza, R.M. Torresi, An overview on the development of electrochemical capacitors and batteries: Part II, An Acad Bras Cienc 2 (2020) 92: e20200800 DOI 10.1590/0001-3765202020200800

[33] Z. Zhao-Karger, M. Fichtner, Beyond intercalation chemistry for rechargeable Mg batteries: A Short Review and Perspective, Frontiers in Chemistry, 6 (2018) 656: doi: 10.3389/fchem.2018.00656

[34] T. Leisegang, F. Meutzner, M. Zschornak, W. Münchgesang, R. Schmid, T. Nestler, R.A. Eremin, A.A. Kabanov, V.A. Blatov, D.C. Meyer, The aluminium ion battery: A sustainable and seminal concept? Frontiers in Chemistry (2019): https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00268

[35] W. Zhang, X. Zhai, Y. Zhang, H. Wei, J. Ma, J. Wang, L. Liang, Y. Liu, G. Wang, F. Ren, S. Wei, Application of manganese-based materials in aqueous rechargeable zinc-ion batteries, Frontiers in Energy Research, (2020): https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00195

Les batteries à flux redox (RFB) constituent un format de batterie différent car elles reposent principalement sur la réaction de réduction-oxydation (redox) entre deux solutions salines qui sont stockées dans des réservoirs séparés. Dans ce cas, pendant l'opération d'oxydoréduction, chaque solution est pompée à travers l'un des compartiments d'électrodes de la pile où se trouvent les solutions. Ces sels peuvent interagir à travers une membrane perméable qui permet au processus d'oxydoréduction de se produire. En raison des faibles densités d'énergie, cette configuration de batterie est intrinsèquement adaptée au stockage à grande échelle (au moins des dizaines de KWh à l'échelle du MGWh), et à long terme qui peut être de plus de 6 heures. Cependant, ces possibilités sont rendues possibles par les grands réservoirs installés pour une plus grande capacité. Ainsi, les RFB semblent être une proposition intéressante pour l'électrification de l'Afrique par le biais de mini-réseaux et de micro-réseaux. Néanmoins, le coût d'investissement de la batterie à flux de vanadium, qui est la plus développée de ces technologies, reste trop élevé pour une pénétration profonde du marché. Mais comme l'Afrique ne possède pas d'avantage stratégique dans cette technologie de batterie, le présent rapport ne s'y attarde pas.

Notamment, les supercondensateurs ne sont pas traditionnellement définis comme des batteries. En effet, les supercondensateurs stockent leur énergie de manière électrostatique, et non électrochimique, comme le font les batteries traditionnelles. C'est pourquoi, en tant que dispositifs de stockage d'énergie, les supercondensateurs peuvent soit concurrencer les batteries, soit les compléter. Les supercondensateurs se caractérisent par leur densité de puissance élevée et leur très faible densité d'énergie, comme le montre la figure 7 (b). Malheureusement, leur faible densité d'énergie associée à l'autodécharge reste un inconvénient majeur qui limite les applications des supercondensateurs. Leur seule application de niche est uniquement les bus électriques. Les supercondensateurs peuvent être utilisés en tandem avec des batteries pour des applications exigeant à la fois une haute densité énergétique (batteries) et une haute densité de puissance (supercondensateurs). Par conséquent, les supercondensateurs ne seront pas abordés plus avant dans ce rapport.

2.4 Conclusion

Une batterie idéale doit être bon marché, sûre et capable de stocker la plus grande quantité d'énergie pour une masse et une densité d'énergie aussi faibles que possible. Les innovateurs doivent s'assurer que la batterie peut fournir et/ou accepter la plus grande quantité d'énergie dans la densité d'énergie la plus courte. De cette façon, la batterie idéale peut résister à des cycles de vie extrêmement longs. Les innovateurs africains peuvent donc s'assurer que les batteries sont mutuellement optimisées en termes de densités d'énergie et de puissance. Ainsi, toutes les technologies de batteries doivent présenter des densités de puissance élevées. Ces batteries peuvent donc renforcer l'élan continental vers les technologies émergentes, plus particulièrement l'intelligence artificielle, les technologies numériques et l'électrification de la mécanisation pour un environnement plus propre. Notamment, les progrès de la technologie des batteries ont principalement porté sur la chimie, et plus particulièrement sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des cathodes et des anodes. Les innovateurs africains doivent donc se concentrer sur la chimie des électrolytes pour améliorer les rendements. Ainsi, les innovateurs africains peuvent obtenir des densités d'énergie et de puissance plus élevées, un poids et une taille réduits, une durée de vie plus longue, une sécurité améliorée et une réduction significative des coûts.

3

Pertinence des batteries de nouvelle génération pour le développement de l'Afrique

3.1 Contexte des batteries de nouvelle génération dans les besoins de l'Afrique

Alors que le reste du monde développé navigue vers l'industrie 4.0 avec des technologies telles que les véhicules autonomes, l'intelligence artificielle, l'internet des objets, les drones, la robotique et les dispositifs à porter, de nombreuses régions d'Afrique n'ont pas encore réussi à mettre en œuvre l'industrie 2.0. Ainsi, il reste évident que les pays africains doivent investir dans un approvisionnement en énergie qui soit fiable, accessible et abordable avant de mettre en œuvre les dernières technologies. Par conséquent, pour identifier les applications des batteries de nouvelle génération pour l'Afrique, il faut d'abord s'attacher à répondre au besoin criant d'un approvisionnement énergétique stable et disponible en permanence. Ainsi, si cette crise énergétique n'est pas résolue immédiatement, elle sera très probablement désastreuse pour l'avenir de l'Afrique. Ce défi entravera le progrès technologique des habitants de l'Afrique. Par conséquent, pour l'instant, afin de relever ce défi énergétique, les efforts d'investissement et d'innovation doivent se concentrer sur les meilleures et les plus récentes technologies de batteries pour répondre aux énormes besoins de stockage d'énergie de l'Afrique. Ainsi, les applications futures des batteries de nouvelle génération pour l'Afrique peuvent permettre l'avènement des nouvelles technologies de l'industrie 4.0. En effet, les technologies de l'industrie 4.0 dépendent fortement d'un approvisionnement énergétique fiable, accessible et abordable pour des applications et des mises en œuvre réussies.

3.2 Applications actuelles des NGB en Afrique

De nombreux projets réussis ont été réalisés en Afrique, où les batteries ont complété des installations solaires à grande échelle. L'un de ces exemples est un système combiné de centrale solaire et de batterie situé dans la province zambienne de Chisamba. Ce système est installé dans le centre de formation et de connaissances agricoles du district de Chibombo. Cette installation est gérée par le ministère allemand et zambien de l'agriculture. L'installation se compose de 260 modules solaires d'une capacité totale de 86 kWh. Elle fournit à une exploitation céréalière de 90 000 m_2 les 450 kWh nécessaires à l'énergie renouvelable destinée à l'irrigation, et ce jusqu'à 12 heures par jour. Selon Tobias Kriete (directeur régional des projets solaires de BayWa r.e. [36]la centrale photovoltaïque et le système de batteries combinés ont été conçus pour assurer un approvisionnement stable en électricité. Il s'agissait en particulier d'assurer la sécurité énergétique et la productivité.

Dans certaines régions d'Afrique, comme l'Afrique du Sud, les batteries de nouvelle génération sont employées dans des technologies plus avancées telles que les drones pour l'agriculture et la photographie aérienne, les véhicules aériens sans pilote (UAV) pour l'armée et la logistique, et la robotique pour la sécurité et l'éducation. Elles sont également utilisées dans les applications de l'internet des objets (IoT) telles que la télédétection et la surveillance du trafic. Par exemple, Lightstone, une société d'analyse sud-africaine, a révélé que depuis le début des véhicules à moteur électrique

[36] https://www.baywa-re.fr/en/company/news/details/national-energy-globe-award-for-solar-project-in-zambia/

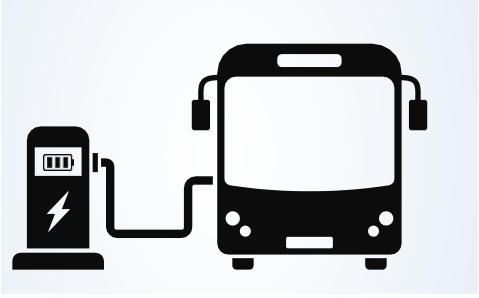
(EV) en Afrique du Sud, un total de 375 ont été vendus. Fait incroyable, on estime que les ventes de véhicules électriques (VE) représenteront 55 % de toutes les ventes de véhicules neufs d'ici 2040. Cela démontre clairement le potentiel des batteries de nouvelle génération en Afrique. En effet, les batteries de prochaine génération observeront la plus grande demande future provenant des VE.

3.2.1 Études de cas des batteries de nouvelle génération

Cette sous-section présente des études de cas pertinentes sur les applications des batteries de nouvelle génération. Une étude de cas est réussie, et l'autre étude de cas n'a pas été couronnée de succès.

3.2.1.1 Étude de cas : Bus électrique alimenté par des batteries lithium-ion[37]

Marché : Commercial
Solution: Bus entièrement électrique
Produit: Module de batterie intelligente au lithium fer assemblé en un système de 92kWh à 332V.
Application: En travaillant avec un grand constructeur mondial de bus, Valence est devenu un fournisseur clé de bus électriques en Europe. La principale offre de cette gamme de véhicules est un bus de 10 mètres qui peut transporter jusqu'à 37 passagers assis et a une autonomie maximale de 150 kilomètres. Les autobus électriques sont alimentés par des batteries lithium-ion avec recharge sans fil et surveillance complète à distance
Résultat : Ce véhicule est un tel succès qu'il est utilisé au Royaume-Uni et en Europe pour le transport urbain, le transport universitaire, les navettes aéroportuaires et le tourisme



Actuellement, plus de 60 bus sont en service. En outre, ce véhicule est bien placé pour faire partie de la plus grande flotte d'autobus entièrement électriques en Europe.

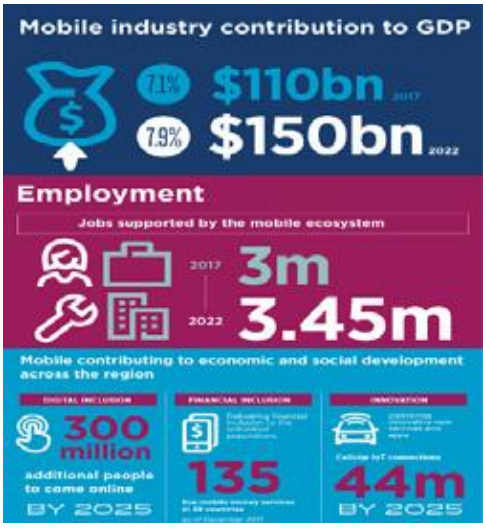
3.2.1.2 Étude de cas : Rappel du Galaxy Note 7[38]

Marché : Commercial
Solution: Batterie lithium-ion pour téléphone mobile
Produit: Téléphone mobile Galaxy Note 7
Application: Les incendies émanant de la batterie ont causé des dommages corporels à plusieurs personnes ainsi que des déclarations de dommages matériels qui ont été déposées. L'enquête de Samsung a révélé que la surchauffe et l'incendie des téléphones ont été causés par des défauts au sein des batteries. Selon les conclusions, les problèmes provenaient d'un matériau d'isolation insuffisant à l'intérieur des batteries. La conception ne prévoyait pas d'espace suffisant pour accueillir en toute sécurité les électrodes des batteries.
Résultat : Le rappel primaire a eu lieu le 15 septembre 2016, et 1 million de téléphones cellulaires ont été rappelés. Il y a eu 66 rapports de défaillances des batteries entre le 16 août et le 15 septembre 2016. Finalement, tous les téléphones cellulaires ont été désactivés pour éviter d'autres problèmes de responsabilité avec les téléphones cellulaires qui n'avaient pas été renvoyés pendant le rappel.

3.3 Pertinence des batteries de nouvelle génération en Afrique

La batterie lithium-ion a transformé notre façon de vivre et de travailler. En effet, leur capacité à stocker une énergie substantielle dans de petites empreintes a permis la distribution massive d'appareils électroniques portables sur le continent. Cela inclut les téléphones mobiles et les ordinateurs portables dans toute l'Afrique. Dans de nombreuses régions d'Afrique, le nombre de personnes disposant d'un téléphone portable dépasse largement celui des personnes ayant accès à l'électricité. Malgré cela, beaucoup doivent marcher sur une grande distance pour obtenir un signal de télécommunications clair et/ou recharger les batteries de leur appareil.

[37] http://lithiumwerks.com/wp-content/uploads/2016/02/Case-Study-Motive-Electric-Bus-Optare.pdf
[38] https://en.wikipedia.org/wiki/Samsung_Galaxy_Note_7



Avec une pénétration de 44 % en 2017, les téléphones mobiles ont transformé la vie de centaines de millions d'Africains. Dans la plupart des cas, ces téléphones mobiles sont le premier et le seul moyen de se connecter pour la plupart des Africains avec le monde extérieur. Bien entendu, les téléphones mobiles (et les tablettes) reposent sur le stockage sur batterie, la technologie dominante étant les batteries lithium-ion. Il est intéressant de noter que la technologie de la téléphonie mobile a permis aux pays pauvres de sauter par-dessus des installations téléphoniques terrestres obsolètes et coûteuses. Par exemple, en 2017, selon le site gmsa.com, les technologies et services mobiles ont généré 7,1 % du PIB de l'Afrique subsaharienne. Il s'agissait d'une contribution s'élevant à 110 milliards de dollars US et soutenant plus de 3 millions d'emplois dans l'écosystème du secteur mobile.

Les services de téléphonie mobile sont une technologie innovante qui a permis aux Africains d'envoyer de l'argent directement depuis leurs appareils mobiles pour acheter des services et des produits. Les services de téléphonie mobile ont considérablement transformé la manière dont l'argent est transféré sur le continent. Par exemple, le rapport Mobile Economy Sub Saharan Africa (2018) a indiqué qu'en 2017, la valeur totale et le nombre de transactions d'argent mobile ont augmenté de 14,4 % et de 17,9 % pour atteindre 19,9 milliards de dollars et 1,2 milliard de dollars, respectivement.[39] Dans toute la région, il a été observé que l'argent mobile continue de jouer un rôle important en offrant des services financiers aux personnes ayant un accès limité aux institutions financières conventionnelles Par conséquent, les énergies renouvelables représentent la meilleure opportunité pour l'Afrique de répondre au besoin urgent d'accès à une énergie propre, accessible, fiable et abordable. Cet accès permettra à davantage d'Africains d'avoir accès à la téléphonie mobile et aux technologies numériques qui leur permettront de relever leurs défis socio-économiques. Par conséquent, les batteries de nouvelle génération complètent de manière significative les sources d'énergie renouvelables. Elles permettront un approvisionnement continu en électricité même lorsque la source renouvelable est inactive, par exemple lorsque le soleil ne brille pas sur les panneaux solaires.

3.4 Exploiter la puissance des NGB

> Ending poverty and ensuring sustainability are the defining challenges of our time. Energy is central to both of them.
>
> World Bank Group President
> Jim Yong Kim

Il a été constaté qu'il existe une corrélation directe entre la croissance économique et un approvisionnement fiable en électricité. Par conséquent, si l'Afrique veut tenir sa promesse d'élever sa population par la réduction de la pauvreté, elle a besoin d'électricité et d'une énergie renouvelable propre. En outre, l'ancien président de la Banque mondiale, le Dr Jim Yong Kim, a déclaré que le stockage sur batterie peut aider les pays africains à passer à la prochaine génération de technologies de production d'électricité et à élargir l'accès à l'énergie. Ainsi, pour les pays africains en développement, les batteries de nouvelle génération changent la donne.

En réalité, le stockage de l'énergie va débloquer d'énormes possibilités d'investissement dans les énergies renouvelables en Afrique. Et ce, tant au niveau des services publics que de la distribution. Par conséquent, cela va complètement bouleverser le modèle traditionnel du secteur de l'électricité en Afrique. On s'attend à ce que jusqu'à 42 % de la population africaine soit desservie par des solutions hors réseau ou mini-réseau d'ici 2050. En outre, dans les zones rurales où les infrastructures et l'alimentation électrique sont limitées, les solutions de stockage d'énergie par batterie hors réseau combleront le manque d'énergie. Cela permettra à de nombreuses personnes et entreprises rurales d'avoir un accès limité à l'alimentation électrique.

Lors d'une annonce majeure au One Planet Summit en septembre 2018, le Groupe de la Banque mondiale a engagé 1 milliard de dollars US pour un nouveau programme mondial. Ce nouveau programme mondial permettra d'accélérer les investissements dans le stockage sur batterie pour les systèmes énergétiques dans les pays en développement et à revenu intermédiaire, comme les pays africains. En outre, le Groupe de la Banque mondiale prévoit de mobiliser 4 milliards de dollars US supplémentaires sous forme de financements climatiques concessionnels et d'investissements publics et privés. Ainsi, le programme de stockage par batterie est envisagé

[39] State of the Industry Report on Mobile Money (2018): https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2019/05/GSMA-State-of-the-Industry-Report-on-Mobile-Money-2018-1.pdf

pour développer les pays à revenu intermédiaire. Il leur permettra d'accroître considérablement l'utilisation des énergies renouvelables, plus particulièrement l'énergie éolienne et solaire. Par conséquent, cela améliorera la sécurité énergétique, augmentera la stabilité du réseau et élargira l'accès à l'électricité pour les pays africains. Pendant bien trop longtemps, l'Afrique a été qualifiée de "continent noir" en raison de son retard en matière de transformation technologique et de production fiable d'électricité. Par conséquent, la transformation de l'énergie par les batteries de nouvelle génération est le point de basculement pour l'avenir de l'Afrique. Potentiellement, cette transformation offrira de nouvelles opportunités pour une croissance sans précédent. Par exemple, elle permettra aux entreprises de démarrer et de se développer, générera des emplois pour la jeunesse africaine et créera même de nouveaux marchés sur le continent. En outre, les enfants de la plupart des pays africains actuellement privés d'électricité pourront étudier à la nuit tombée. D'autre part, les établissements de soins de santé tels que les hôpitaux et les cliniques peuvent être en mesure de stocker des vaccins vitaux, même en cas d'alimentation électrique peu fiable. Ainsi, les pays africains peuvent développer des économies plus compétitives et améliorer la qualité de vie globale de tous les citoyens africains.

3.5 Critères souhaitables pour les micro-réseaux

Pour que la technologie des batteries Li-ion se développe efficacement et soit compétitive pour une utilisation connectée au réseau en Europe, les coûts spécifiques des batteries doivent être inférieurs à 200 €/kWh avec une durée de vie supérieure à 2500 cycles.[40] Ainsi, il est plus probable que les batteries Li-ion deviennent plus compétitives pour l'énergie distribuée avant d'être adoptées pour les applications centralisées. Parmi les batteries LIB, la batterie LFP est celle qui est la plus susceptible de dominer l'espace de stockage du réseau. Cela se produira principalement en raison de leur durée de vie plus longue, de leur faible coût et de leur caractère écologique.41 Alors que les coûts de fabrication diminuent grâce à l'apprentissage, le prix plancher sera finalement dicté par les matériaux essentiels tels que le NMC, qui ne devrait pas descendre en dessous de 100 $/kWh.[42]

3. Conclusion

Actuellement, l'Afrique se dirige vers l'industrie 4.0 grâce à des technologies telles que les véhicules autonomes, l'intelligence artificielle, l'internet des objets, les drones, la robotique et les dispositifs portables. Cependant, l'Afrique n'a pas encore réussi à mettre en œuvre l'industrie 2.0. Les pays africains doivent donc investir de toute urgence dans un approvisionnement énergétique fiable, accessible et abordable afin de mettre en œuvre efficacement les technologies émergentes envisagées. L'Afrique est donc encouragée à s'attacher à répondre au besoin urgent d'un approvisionnement énergétique stable et disponible en permanence. La mise en œuvre réussie d'un approvisionnement énergétique fiable sous la forme de batteries de nouvelle génération alimentera des technologies avancées telles que les drones pour l'agriculture et la photographie aérienne, les véhicules aériens sans pilote (UAV) pour l'armée et la logistique, l'internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle, les technologies blockchain, les véhicules électriques et la robotique pour la sécurité et l'éducation. Ainsi, cela démontre clairement le potentiel des batteries de prochaine génération qui observeront la plus grande demande future en Afrique.

[40] H.C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, A. Jossen, Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids, Energies 10 (2017) 2107: https://doi.org/10.3390/en10122107

[41] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, G. Pasaoglu, The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89 (2018) 292-308: DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002.

[42] MIT Energy Initiative. 2019. Insights into Future Mobility. Cambridge, MA: MIT Energy Initiative. http://energy.mit.edu/insightsintofuturemobility

4

Risques et avantages de la technologie des batteries de nouvelle génération.

Le secteur de l'énergie en Afrique sub-saharienne est considérablement sous-développé en termes de capacité installée, d'accès à l'énergie et/ou de consommation globale. L'accès à une électricité propre, abordable et de qualité adéquate étant une composante essentielle de toute économie moderne, toute pénurie d'électricité est en corrélation directe avec les opportunités manquées de croissance du PIB et de réduction de la pauvreté. Ainsi, la promesse socio-économique de l'Afrique, en général, dépend de la capacité des gouvernements et des investisseurs africains à accélérer radicalement la capacité de production d'électricité.

Si la création de richesses nationales et la prospérité des Africains sont le bénéfice recherché, les gouvernements africains doivent formuler des cadres réglementaires (RFW) autour de la localisation de la production de batteries de pointe. Ces cadres réglementaires permettront le déploiement d'un grand nombre de micro-réseaux pour répondre à la croissance de la capacité de production d'électricité. En outre, l'Afrique doit formuler un plan stratégique bien coordonné en matière de recherche, de développement et d'innovation (RD&I). Ce plan stratégique de recherche, de développement et d'innovation (RD&I) permettra de maintenir un pool de ressources humaines africaines pouvant contribuer de manière significative au développement durable de la prochaine génération de batteries. Actuellement, le plus grand risque auquel le continent africain doit faire face de toute urgence est l'absence d'un engagement clair envers le plan stratégique RFW et RD&I.

Les risques et les avantages des deux approches sont expliqués dans cette sous-section.

4.1 Risques et avantages liés à la valorisation locale des minéraux pour la production de batteries de pointe

La taille du marché international des NGB est principalement motivée par la volonté mondiale de convertir l'industrie du transport du moteur à combustion interne conventionnel (ICE) à un moteur électromoteur. Si l'on sait depuis plusieurs années que les transports électriques sont beaucoup plus efficaces sur le plan énergétique que les transports effectués éventuellement avec le moteur à combustion interne, deux autres raisons ont fait que cette conversion a pris de l'ampleur. La première raison est qu'il a été prévu que la rentabilité et la faisabilité économique du NGB permettront la production en masse de véhicules électriques et électriques à moteur. En outre, le risque perçu émanant du changement climatique induit par l'homme a poussé les gouvernements du monde entier à envisager l'interdiction partielle ou complète des moteurs à combustion interne. Le potentiel du marché des batteries pour VE est éclipsé par celui des batteries, souvent considérées comme le "Saint Graal" des systèmes d'énergie renouvelable, mais il reste très important en soi. Par conséquent, l'industrie des batteries de nouvelle génération devrait devenir un marché stupéfiant de plusieurs milliards de dollars d'ici 2040. Avec une planification précise et stratégique, l'Afrique a le potentiel de devenir un bénéficiaire majeur et d'être compétitive face aux pays industrialisés et technologiquement avancés du monde entier.

Un "scénario à faible risque et à bénéfices élevés" peut être élaboré autour de l'enrichissement de ces ressources africaines qui sont liées à l'augmentation prévue de la demande de matériaux pour batteries. Ces matériaux comprennent le manganèse, le cobalt, le nickel, le lithium, le graphite, la farine, le cuivre et l'aluminium. En outre, outre les revenus générés par la production de matériaux de qualité pour batteries, la fabrication locale de batteries de pointe permettra à l'Afrique de poursuivre l'exportation de son industrie automobile existante. En effet, cela améliorera la position de l'industrie manufacturière africaine et augmentera les possibilités d'emploi pour le développement socio-économique des Africains à l'avenir. Les risques financiers associés à l'établissement d'un RFW sont minimes. En effet, l'investissement en capital peut être réalisé par le secteur privé. L'objectif de l'établissement du RFW est principalement de protéger les intérêts des Africains dans la chaîne de valeur de la prochaine génération, d'empêcher l'exportation de matériaux bruts et non raffinés, et de faciliter le raffinage local des matériaux en matériaux de qualité batterie en échange

de droits d'exportation. En outre, comme le principal risque financier sera supporté par le secteur privé, il existe de nombreuses chimies de batteries intrinsèquement rentables sur le point d'être produites commercialement. Cependant, il reste risqué de s'enfermer dans la chimie de la batterie, même si elle est actuellement considérée comme l'état de l'art. En particulier, le passage d'une anode en graphite/cathode NMC811 à une anode en lithium/cathode en soufre ne se limite pas à un simple ajustement de la chaîne de montage, mais a des implications majeures sur les systèmes de traitement des matières premières, ce qui entraîne des modifications coûteuses. Ainsi, la batterie actuelle, à la pointe de la technologie, devrait avoir une teneur plus élevée en éléments stratégiques pour l'Afrique. NGB recherche des matériaux intrinsèquement moins chers à base de Zn/air, LiS, Li-air, et avec des propriétés de stockage thermique améliorées. Ces matériaux sont des minéraux largement disponibles, et cela représente une opportunité pour les pays africains et les privés d'augmenter leur rentabilité.

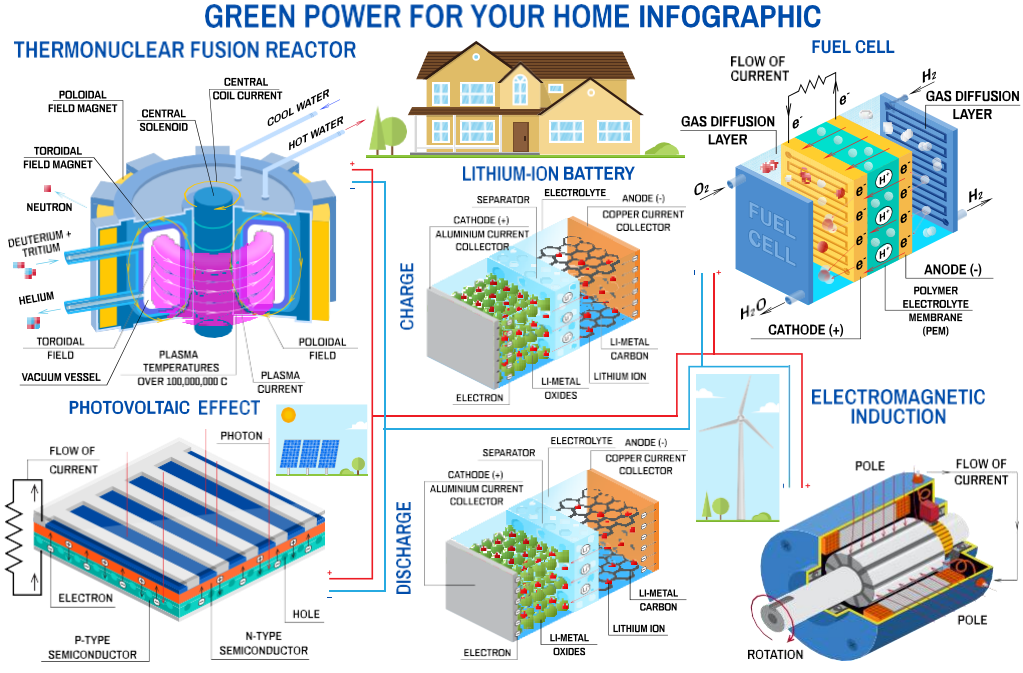
4.2 Risques et avantages liés à un plan coordonné de RD&I

La charge financière associée à l'élaboration d'un plan coordonné de recherche, de développement et d'innovation (RD&I) est substantielle. En effet, l'investissement dans les ressources humaines et la technologie des batteries peut ne présenter des avantages financiers qu'à long terme. En outre, les résultats uniques de la propriété intellectuelle générés par les ressources humaines qui font partie du plan de RD&I sont en concurrence avec des consortiums de recherche bien établis et nettement mieux financés dans le monde entier. Cependant, sans un plan de RD&I, la durabilité de l'industrie africaine des batteries sera compromise. Néanmoins, les risques financiers de ces initiatives sont certainement contrôlés si la RD&I se concentre sur le raffinement des matériaux de batteries basés en Afrique, l'assemblage et le développement de batteries en Afrique, et le déploiement efficace et bien réparti d'un système de stockage d'énergie. Cependant, les pays africains doivent éviter un cas où ils risquent de développer la technologie sur le continent, pour ensuite abandonner complètement les minéraux grâce auxquels l'Afrique a un avantage stratégique. Il est donc essentiel que les États membres de l'Union africaine prennent en charge le développement technologique et veillent à ce qu'il corresponde aux avantages stratégiques de l'Afrique.

4.3 Conclusion

Actuellement, le secteur de l'électricité en Afrique subsaharienne est considérablement sous-développé en ce qui concerne la capacité installée, l'accès à l'énergie et la consommation globale. Cependant, les États membres de l'Union africaine doivent améliorer l'accès à une électricité propre, abordable et de qualité adéquate en tant que composante essentielle de l'économie africaine. Notamment, toute pénurie d'électricité est en corrélation directe avec les opportunités manquées de croissance du PIB et de réduction de la pauvreté. Ainsi, la promesse socio-économique de l'Afrique, en général, dépend de la capacité des gouvernements et des investisseurs africains à accélérer radicalement la capacité de production d'électricité. Elle aide également les États membres à créer de la richesse et de la prospérité pour leurs citoyens.

Les gouvernements africains doivent formuler des cadres réglementaires (RFW) autour de la localisation de la production de batteries de pointe. Ces cadres réglementaires permettront le déploiement d'un grand nombre de micro-réseaux pour répondre à la croissance de la capacité de production d'électricité. En outre, l'Afrique doit formuler un plan stratégique bien coordonné en matière de recherche, de développement et d'innovation (RD&I). Ce plan stratégique de recherche, de développement et d'innovation (RD&I) permettra de maintenir un pool de ressources humaines africaines pouvant contribuer de manière significative au développement durable de la prochaine génération de batteries. Il est donc nécessaire de s'engager de manière claire et urgente dans les plans stratégiques RFW et RD&I. Heureusement, le marché des NGB va se développer car l'innovation est principalement motivée par le désir mondial de convertir l'industrie du transport du moteur à combustion interne (ICE) conventionnel à un moteur électromoteur. Cela s'explique par la promesse de la rentabilité, de la fiabilité et de la faisabilité économique de leur NGB. Par conséquent, avec une planification précise et stratégique, l'Afrique a le potentiel pour devenir un bénéficiaire majeur et être compétitive face aux pays industrialisés et technologiquement avancés du monde entier en ce qui concerne les NGB.


GREEN POWER FOR YOUR HOME INFOGRAPHIC
THERMONUCLEAR FUSION REACTOR
POLOIDAL FIELD MAGNET
CENTRAL SOLENOID
CENTRAL COIL CURRENT
COOL WATER
HOT WATER
TOROIDAL FIELD MAGNET
NEUTRON
DEUTERIUM + TRITIUM
HELIUM
TOROIDAL FIELD
VACUUM VESSEL
PLASMA TEMPERATURES OVER 100,000,000 C
PLASMA CURRENT
POLOIDAL FIELD
LITHIUM-ION BATTERY
CHARGE
DISCHARGE
SEPARATOR
ELECTROLYTE
ANODE (-)
CATHODE (+)
ALUMINIUM CURRENT COLLECTOR
COPPER CURRENT COLLECTOR
LI-METAL CARBON
LITHIUM ION
LI-METAL OXIDES
ELECTRON
FUEL CELL
FLOW OF CURRENT
GAS DIFFUSION LAYER
ANODE (-)
POLYMER ELECTROLYTE MEMBRANE (PEM)
CATHODE (+)
PHOTOVOLTAIC EFFECT
PHOTON
FLOW OF CURRENT
ELECTRON
HOLE
P-TYPE SEMICONDUCTOR
N-TYPE SEMICONDUCTOR
ELECTROMAGNETIC INDUCTION
POLE
FLOW OF CURRENT
ROTATION

5

Considérations éthiques

5.1 Considérations éthiques : l'environnement, le social et la gouvernance dans l'industrie du LiBs

Le paradigme de l'environnement, du social et de la gouvernance (ESG) entraîne de profonds changements dans la façon dont les institutions privées et privées mènent leurs affaires, car les questions environnementales, sociales et de gouvernance deviennent de plus en plus prioritaires. En outre, l'industrie africaine des LIBs naît dans un contexte mondial avec des attentes élevées en matière de durabilité et d'éthique commerciale, au point que l'ESG est devenu un avantage concurrentiel.43,44 Par conséquent, l'industrie est encouragée à aspirer à une vision de la motivation éthique la plus élevée. L'objectif principal de ce modèle est de promouvoir des pratiques commerciales responsables afin de préserver le patrimoine collectif de l'Afrique en matière de nature, de culture, de soins et de protection des groupes vulnérables de la société tels que les femmes, les enfants, les personnes âgées, les minorités ethniques et les pauvres. Par conséquent, sans le bagage structurel des organisations existantes, l'industrie africaine des LIBs a une opportunité claire de faire un bond en avant dans la performance ESG. Cela peut être accompli par une conception appropriée en ce qui concerne les cadres structurels et politiques dès le départ.

En ce qui concerne la technologie des batteries lithium-ion (LIBs), la question fondamentale à laquelle les innovateurs africains doivent répondre est de savoir ce qu'est une "batterie éthique". Malheureusement, le débat sur l'éthique des batteries au lithium-ion est complexe, et deux aspects doivent être clarifiés dès le départ pour qu'il soit possible d'y répondre. Le premier aspect, comme l'a noté à juste titre le London Metals Exchange[46], est que le périmètre et les paramètres des considérations éthiques continuent d'évoluer avec l'accroissement des connaissances et des attentes de la société. Par conséquent, cette discussion n'est qu'un instantané des facteurs dynamiques rapides qui façonneront et définiront notre compréhension de ce qui constitue une " batterie éthique ". Par conséquent, cela suggère que l'industrie des LiBs doit rester attentive à ces développements et se réévaluer constamment pour aborder de manière proactive les questions qui se présentent. Le deuxième aspect est que les LiBs sont une technologie habilitante. Par conséquent, au fur et à mesure que les LiBs élargissent leurs applications et permettent diverses technologies, il doit y avoir une évaluation des implications éthiques dans un large éventail de secteurs. Ainsi, il reste essentiel de délimiter clairement les attributions de ce rapport en ce qui concerne l'éthique des LiBs. À cet égard, la portée des considérations éthiques de ce rapport dans la chaîne de valeur des LIBs comprend l'extraction, le traitement et le raffinage des minéraux, la fabrication des précurseurs et des batteries, la distribution, la seconde vie, le recyclage et l'élimination. Ces considérations sont faites en même temps que les activités de recherche, de développement et d'innovation associées, comme le montre la figure 10. Cette délimitation nécessaire exclut de nombreuses questions éthiques importantes dans les diverses applications des LIB. Par exemple, l'utilisation de dispositifs militarisés alimentés par des LiBs. Au sein de cette chaîne de valeur, certaines questions sont plus générales et touchent à de multiples opérations. Elles sont abordées en premier. D'autre part, les questions qui se rapportent davantage à des opérations spécifiques sont traitées dans leurs sections respectives.

[43] M. Taliento, C. Favino, A. Netti, Impact of Environmental, Social, and Governance Information on Economic Performance: Evidence of a Corporate 'Sustainability Advantage' from Europe, Sustainability 11 (2019) 1738; https://doi.org/10.3390/su11061738.
[44] Favino, Christian, Taliento, Marco, Netti, Antonio, Impact of Environmental, Social, and Governance Information on Economic Performance: Evidence of a Corporate 'Sustaina- bility Advantage' from Europe, Sustainability 11 (2019): DOI: 10.3390/su11061738. -
[45] I. Oncioiu, D.-M. Popescu, A. Elena Aviana, A. Serban, F. Rotaru, M. Petrescu, A. Marin-Pantelescu, The Role of Environmental, Social, and Governance Disclosure in Financial Transparency, Sustainability 12 (2020) 6757-6773; doi:10.3390/su12176757.
[46] https://www.lme.com/-/media/Files/New-initiatives/Responsible-Sourcing/

Le paradigme environnemental, social et de gouvernance d'entreprise (ESG), dans sa forme générale, s'applique à tous les composants de la chaîne de valeur des LIB. L'aspect " environnemental " concerne principalement la gestion durable des ressources et la protection de l'environnement contre les émissions industrielles nocives. L'aspect "social" concerne les personnes, les conditions de travail des employés ainsi que les relations avec la communauté et les parties prenantes. Il s'agit essentiellement de la responsabilité sociale des entreprises (RSE). Enfin, l'aspect "gouvernance" concerne la transparence de tous les processus et la prévention des conflits d'intérêts, ainsi que l'inclusion et la diversité. Il porte également sur la rémunération équitable des employés et des administrateurs. Tous ces aspects doivent être ancrés dans la conception de l'industrie, non seulement pour répondre aux attentes de la société, mais aussi pour le bien d'une entreprise responsable. La raison principale en est qu'il existe des preuves irréfutables de corrélations positives entre les performances financières des entreprises et leurs performances en matière de questions environnementales et sociales.[47] En outre, il a été fait état de preuves récentes présentées directement à partir du contexte africain qui soutiennent cette corrélation.[48]

En ce qui concerne les investissements, de meilleures performances ont été signalées pour les investisseurs institutionnels qui appliquent les mesures ESG dans la sélection des portefeuilles d'investissement en utilisant le principe d'Équateur.[49] Cette approche d'investissement exerce à son tour une plus grande pression sur les entreprises pour qu'elles réalisent des performances ESG.[50] En conséquence, on s'attend à ce que les entreprises faisant preuve d'une plus grande transparence par le biais de rapports ESG attirent de meilleurs financements d'investissement à l'avenir.[51] Cela est cohérent avec les obligations vertes qui affichent une prime par rapport aux obligations ordinaires.[52] D'ores et déjà, une déclaration claire de la dynamique en faveur de la transparence des rapports ESG dans le secteur plus large des LIB ressort du lancement récent, en décembre 2018, de la Task Force on Climate-related Financial Disclosure (TCFD) dans le cadre du Electric Utility Preparer Forum coordonné par le World Business Council for Sustainable Development.53 À cet égard, les LIB contribueront à atténuer le changement climatique. Cela se produira si elles sont principalement employées pour faciliter la pénétration des énergies renouvelables, plutôt que pour stocker l'énergie provenant des combustibles fossiles.

L'égalité, la diversité et l'inclusion sont actuellement sous le feu des projecteurs dans les cercles de gestion. Plutôt que de les laisser au hasard, on s'efforce d'y parvenir par une conception délibérée des organisations.[54,55] De nombreuses organisations mettent en place des groupes de travail sur l'égalité, la diversité et l'inclusion afin d'aborder directement ces questions de gestion. Parmi les questions spécifiques sur lesquelles elles se concentrent figurent l'égalité des chances et la lutte contre les inégalités. Par exemple, les institutions s'attaquent à l'écart de rémunération entre les sexes, au harcèlement sexuel sur le lieu de travail, à l'équilibre entre vie professionnelle et vie privée, et cherchent activement à réduire la vulnérabilité des groupes sociaux défavorisés. Par conséquent, l'industrie africaine des LIB ne doit pas créer de nouvelles inégalités économiques ni exacerber les inégalités existantes en devenant un produit haut de gamme uniquement accessible aux riches. Par conséquent, des subventions gouvernementales pourraient être nécessaires pour faciliter l'accessibilité de la technologie LiBs.

[47] E. Albertini, Does Environmental Management Improve Financial Performance? A Meta-Analytical Review, Organization & Environment 26 (2013) 431-457: DOI: 10.1177/1086026613510301.

[48] A. Aboud, A. Diab, The impact of social, environmental, and corporate governance disclosures on firm value: Evidence from Egypt, Journal of Accounting in Emerging Econo- mies, 8 (2018) 442-458: https://doi.org/10.1108/JAEE-08-2017-0079.

[49] E. Nizam, A. Ng, G. Dewandaru, R. Nagayev, M. Nkoba, The Impact of Social and Environmental Sustainability on Financial Performance: A Global Analysis of the Banking Sector, Journal of Multinational Financial Management 49 (2019): DOI: 10.1016/j.mulfin.2019.01.002.

[50] A. Dyck, K.V. Lins, L. Roth, H.F. Wagner, Do institutional investors drive corporate social responsibility? International evidence, Journal of Financial Economics, 131 (2019) 693-714: https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2018.08.013.

[51] A. Hamrouni, R. Boussaada, N. Toumi, Corporate social responsibility disclosure and debt financing, Journal of Applied Accounting Research 20 (2019): DOI: 10.1108/JAAR- 01-2018-0020.

[52] R. Johnson, The link between environmental, social, and corporate governance disclosure and the cost of capital in South Africa, Journal of Economic and Financial Sciences 13 (2020), 543: https://doi.org/10.4102/jef.v13i1.543.

[53] https://www.wbcsd.org/Programs/Redefining-Value/External-Disclosure/TCFD/Resources/Disclosure-in-a-time-of-transition-Climate-related-financial-disclo- sure-and-the-opportunity-for-the-electric-utilities-sector

[54] https://www.gov.uk/government/publications/the-business-case-for-equality-and-diversity-a-survey-of-the-academic-literature, https://www.forbes.com/sites/to-maspremuzic/2019/06/20/how-to-design-a-diversity-intervention-that-actually-works/

[55] M. Derven, Diversity and inclusion by design: Best practices from six global companies, Industrial and Commercial Training 46 (2014): DOI: 10.1108/ICT-09-2013-0063.

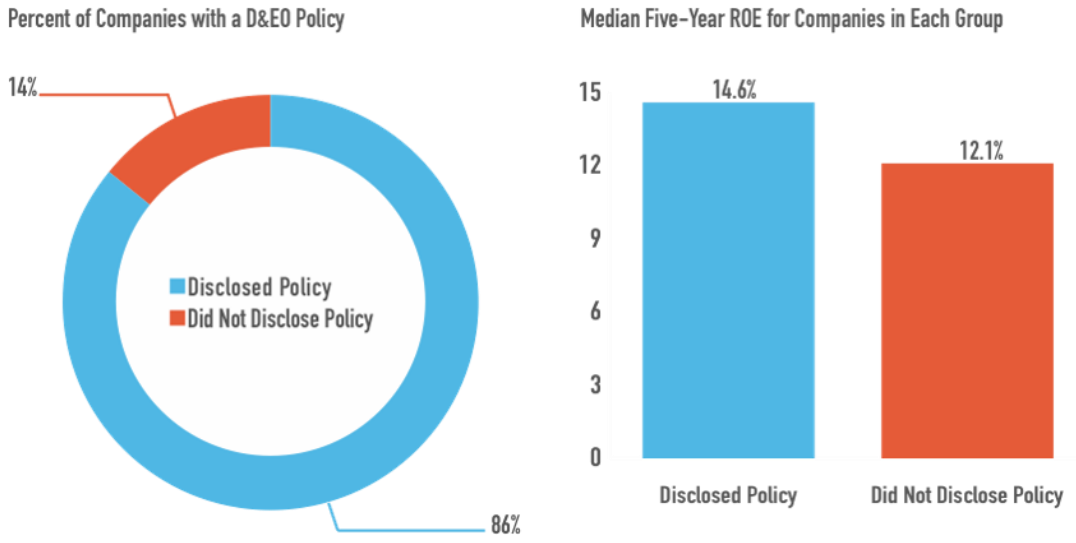


Figure 10. Une étude portant sur 890 entreprises révèle un rendement des capitaux propres (RCP) supérieur de 2,5 % pour les entreprises qui ont divulgué leurs politiques de diversité et d'égalité des chances (D&EO)[56] .

Une autre question qui fait actuellement l'objet d'un examen approfondi est celle de la diversité des sexes dans les conseils d'administration des entreprises. Les recherches ont montré une forte corrélation positive entre la transparence des entreprises, mesurée par les divulgations ESG, et la féminisation des conseils d'administration. Toutefois, cet effet n'est observé que lorsque le nombre de femmes membres atteint une masse critique.[57,58] Cela indique donc la nécessité d'une conception judicieuse des conseils d'administration des entreprises. En outre, les impacts du genre sur la performance ESG des entreprises sont encore plus frappants si l'on considère que si le PDG d'une institution a une fille, cette institution peut avoir une performance supérieure d'environ 9 % à celle d'une institution médiane.[59] Par conséquent, toutes les entités corporatives formées directement par la mise en œuvre du programme de ce rapport sont encouragées à concevoir soigneusement leurs conseils d'administration pour une diversité de genre optimale.

Il est essentiel que l'industrie africaine des LIBs s'efforce de produire des rapports ESG indépendants. Malheureusement, comme il s'agit d'un domaine en développement rapide, il existe actuellement une prolifération explosive de cadres indépendants pour mesurer et rendre compte de la performance ESG d'une organisation. En fait, on estime qu'il existe plus de 150 systèmes de notation, qui couvrent plus de 10 000 paramètres de performance en matière de durabilité.60 Cependant, la normalisation finira par avoir lieu, et des efforts dans ce sens sont déjà en cours. En attendant, les choix possibles pour l'industrie africaine des LIBs pourraient inclure la Global Reporting Initiative (GRI), le Dow Jones Sustainability Index (DJSI), et le Bloomberg ESG Score. Comme il s'agit d'un domaine qui évolue rapidement, la décision finale devrait être laissée au moment de la mise en œuvre.

[56] https://justcapital.com/reports/the-win-win-of-just-jobs/
[57] M. Taliento, C. Favino, A. Netti, Impact of Environmental, Social, and Governance Information on Economic Performance: Evidence of a Corporate 'Sustainability Advantage' from Europe, Sustainability 11 (2019) 1738; doi:10.3390/su11061738.
[58] N. Mohamed, N.K. Allam, Recent advances in the design of cathode materials for Li-ion batteries, RSC Advances 10 (2020) 21662-21685: https://doi.org/10.1039/D0RA03314F.
[59] M. Philippot, G. Alvarez, E. Ayerbe, J. Van Mierlo, M. Messagie, Eco-efficiency of a lithium-ion battery for electric vehicles: influence of manufacturing country and commodity prices on GHG emissions and costs, Batteries 5 (2019) 23: https://doi.org/10.3390/batteries5010023.
[60] https://www.ft.com/content/1244dc6e-8bec-11e9-a1c1-51bf8f989972

5.2 Extraction et prétraitement des minéraux

L'industrie africaine des technologies LIB sera cliente des différents minéraux pour batteries qui sont extraits à travers l'Afrique. Par conséquent, les chaînes d'approvisionnement en minéraux subissent une pression croissante de la part du mouvement d'approvisionnement responsable qui exige une certification de la provenance des minéraux. Les "minéraux de conflit" font partie de ces questions. "Les minerais de conflit" sont les minerais extraits de zones de conflit où les revenus peuvent être utilisés pour perpétuer le conflit, le travail forcé, les pires formes de travail des enfants, les violations des droits de l'homme, le blanchiment d'argent, la corruption et les pots-de-vin. En outre, un problème plus lourd est l'exploitation minière artisanale qui, d'une part, a une grande valeur économique pour les communautés pauvres, mais qui, d'autre part, est soumise à des conditions de travail dangereuses et abusives. Elle entraîne souvent l'effondrement des puits de mine et, par conséquent, des décès difficiles à surveiller[61].

Pour témoigner d'une partie de la dynamique en faveur de l'approvisionnement responsable, le London Metals Exchange (LME) a publié en octobre 2018[62] un document de synthèse présentant une proposition de parcours pour ses marques cotées. Ces marques sont censées réaliser des audits certifiés par rapport aux lignes directrices de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) en matière de diligence raisonnable pour les chaînes d'approvisionnement responsables de minéraux provenant de zones touchées par des conflits et à haut risque et/ou une norme équivalente. LME aura le pouvoir de retirer de la liste les marques qui ne respectent pas les nouvelles exigences. Il est à noter que le document de position du LME désigne le cobalt, un minéral crucial pour les batteries, comme le minéral nécessitant l'attention la plus urgente. Cette plus grande attention portée au cobalt est en partie due au rapport d'Amnesty International publié en 2016. Ce rapport a documenté des conditions de travail dangereuses pour les adultes et les enfants dans les mines artisanales de cobalt en République démocratique du Congo[63].

Il est donc encouragé que l'industrie africaine des LIBs, en tant que client des chaînes d'approvisionnement en minéraux, vise les meilleures pratiques de l'industrie en matière d'approvisionnement responsable. À cet égard, le document de position du LME (et ses développements futurs) pourrait servir de référence pour un approvisionnement responsable de l'industrie africaine des LIB. En particulier, le document de position du LME exige une certification environnementale (ISO 14001) et une certification en matière de santé et de sécurité au travail (ISO 45001) pour les fournisseurs de métaux de ses marques répertoriées. Outre le document de position du LME, d'autres initiatives récentes existent également. Il s'agit notamment de l'International Responsible Business Conduct Agreement for the Metals Sector.[64] Ces positions concernant les cadres de meilleures pratiques doivent être consultées lors du développement de l'industrie africaine des LIB.

Il existe actuellement d'importants travaux de prospection et de faisabilité de minéraux en batterie à travers l'Afrique Cela laisse entrevoir la perspective de l'arrivée prochaine de nouvelles et grandes exploitations minières. À l'instar du LME, l'industrie africaine des LIBs devrait exiger l'engagement communautaire de ses fournisseurs impliqués dans ces projets greenfield. Ainsi, il est essentiel d'obtenir une licence sociale d'exploitation dans les cas où les projets ont un impact sur les communautés indigènes. Cela peut se faire par la reconnaissance des droits fonciers, des cultures (par exemple, la préservation des sites naturels sacrés) et des traditions locales, ainsi que des institutions qui les soutiennent.65 Une autre considération importante dans ces projets greenfield est la préservation de la biodiversité et la protection de certaines espèces rares.

5.3 Fabrication de batteries

Il existe deux principales considérations ESG pour la fabrication en Afrique. Ces considérations sont la forte intensité énergétique de la fabrication de batteries et la conception de produits pour une économie circulaire. Par conséquent, plusieurs facteurs peuvent influencer l'intensité énergétique globale du processus de fabrication des batteries, notamment la chimie des cellules, le volume de production, la nature des étapes de traitement telles que l'utilisation de nanomatériaux connus pour augmenter la demande énergétique, et l'optimisation des processus. Cela signifie que l'intensité énergétique de la fabrication des batteries est très variable. L'impact d'une intensité énergétique donnée sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) est également très variable

61 https://edition.cnn.com/2019/02/18/africa/zimbabwe-mine-disaster-intl/index.html
62 https://www.lme.com/-/media/Files/New-initiatives/Responsible-Sourcing/
63 https://www.amnesty.org/en/documents/afr62/3183/2016/en/
64 https://www.imvoconvenanten.nl/metallurgisch?sc_lang=en
65 A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation: http://www3.wefo- rum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf

en fonction de l'intensité de carbone du mélange d'électricité utilisé pour alimenter l'usine. En outre, les moyennes qui ont été rapportées pour l'industrie sont de 328 kWh de densité énergétique cumulée et de 110 kg d'équivalent CO2 pour produire 1 kWh de stockage en batterie.[66]

Outre l'optimisation du processus de fabrication, l'éco-efficacité globale de la fabrication de batteries peut être considérablement améliorée en optimisant le contenu renouvelable de l'électricité fournie par l'usine. Avec un mix électrique optimal, des émissions de GES aussi faibles que 39,5 kg CO2eq/kWh ont été signalées.[67] Plus important encore, l'éco-efficacité réalisable peut être un facteur vital dans le choix de l'emplacement de l'usine de fabrication de batteries. Idéalement, l'usine devrait générer au moins une partie substantielle de sa demande en énergie renouvelable.

Le processus de fabrication des batteries doit viser à concevoir à la fois les cellules et les packs en vue d'une circularité des produits, afin de favoriser les transitions vers des économies circulaires. Une économie circulaire est définie comme un système régénérateur dans lequel l'apport de ressources et les déchets, les émissions et les fuites d'énergie sont minimisés. Ceci est accompli en ralentissant, fermant et réduisant les boucles matérielles et énergétiques.[68] Les processus de réduction des boucles (augmentation de l'efficacité des ressources), de ralentissement (allongement de la durée de vie du produit) et de fermeture (fermeture de la boucle entre la post-utilisation et la production) visent à optimiser les flux de ressources par le biais de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée, comme le montre la Figure 11.

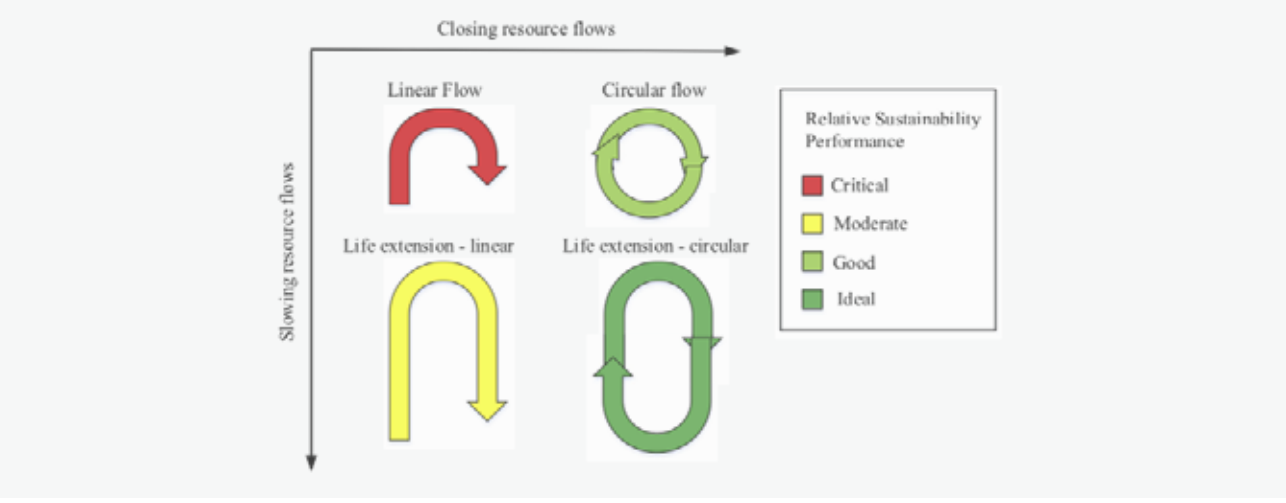


Figure 11. L'économie circulaire : La transition du flux linéaire traditionnel vers la boucle fermée la plus longue possible pour un produit donné.[69]

Dans la pratique, les transitions de la figure 11 sont réalisées par la réparation et l'entretien des produits, la réutilisation et la redistribution, la remise à neuf et la refabrication, le recyclage, ainsi que la mise en cascade et la réaffectation.[70] La plupart de ces opérations sont déjà considérées comme des pratiques standard pour l'industrie des technologies libérales. Par conséquent, l'industrie africaine des piles et accumulateurs peut faire un bond en avant dans la conception de produits circulaires

[66] J.F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, M. Weil, The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review, Renewable and Sustaina- ble Energy Reviews 67 (2017) 491-506.
[67] https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019/emissions.
[68] O. Velázquez-Martínez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, R. Serna-Guerrero, A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective, Batteries 5 (2019) 68: https://doi.org/10.3390/batteries5040068.
[69] I. Esparragoza, J. Mesa-Cogollo, A case study approach to introduce circular economy in sustainable design education, International Conference on Engineering and Product Design Education, September 2019, Department of Design, Manufacture Aad Engineering Management, University of Strathclyde, United Kingdom: DOI: 10.35199/epde2019.3.
[70] X. Zeng, M. Li, D. Abd ElHady, W. Alshitari, A.S. AlBogami, J. Lu, K. Amine, Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles: A Review, Advanced Energy Materials 9 (2019): https://doi.org/10.1002/aenm.201900161.

afin d'obtenir obtenir la certification. De plus, alors que les indicateurs de circularité sont encore un domaine de recherche actif,[71] le schéma de certification proposé par le Cradle-to-Cradle Product Innovation Institute pourrait actuellement être un choix pragmatique viable.[72] Ainsi, un aspect clé est que l'ensemble de l'industrie des bibliothèques doit être considéré comme un écosystème entier produisant une valeur économique, écologique et sociale. Cela peut être fait de manière à ce que le secteur de la fabrication ne puisse pas être optimisé en étant isolé des opérations en amont et en aval.

5.4 Distribution, seconde vie, recyclage et élimination

La garantie d'un produit qui fait l'objet d'une remise à neuf, d'une réutilisation et d'une seconde vie soulève une difficulté éthique. C'est particulièrement vrai pour les LIB en raison de leurs problèmes de sécurité complexes. Par exemple, parmi les questions à examiner figure celle de savoir qui doit assumer la responsabilité si une batterie dans une application de seconde vie explose avec des conséquences dommageables. La réponse dépend toutefois du modèle économique adopté par l'industrie. La clé réside dans un cadre clair qui délimite la responsabilité juridique entre les différents acteurs de la chaîne de valeur.

Le plus important est que les LIB soient sûres à chaque étape de la chaîne de valeur, qu'elles optimisent l'efficacité de l'utilisation des ressources, qu'elles minimisent les dommages causés à l'environnement et qu'elles transforment le tissu socio-économique de l'Afrique en responsabilisant les groupes vulnérables. En outre, les différentes opérations de la chaîne de valeur des LIB doivent développer les infrastructures et les talents locaux et accorder une attention particulière aux groupes vulnérables. L'industrie LIBs africaine doit s'efforcer de fournir un niveau économique d'électrification aux communautés africaines appauvries. Elle doit également être capable de soutenir l'entrepreneuriat à petite et moyenne échelle. Enfin, l'espoir n'est pas seulement que ces communautés soient électriquement indépendantes. Cependant, il s'agit pour elles de devenir à terme des prosommateurs de l'industrie de l'électricité et d'être en mesure de tirer des revenus de leurs propres activités de production d'électricité.

5.5 Conclusion

Lors du développement de NGB, il est nécessaire de développer un paradigme ESG robuste qui guidera son impact sur le continent. Le développement réussi d'un ESG pour le continent africain améliorera grandement l'industrie LiBs de l'Afrique pour une meilleure durabilité et éthique des affaires. Par conséquent, l'industrie LiBs est encouragée à aspirer à une vision de la motivation éthique la plus élevée. Cela signifie que le continent africain peut développer un modèle commercial ancré dans le dialogue avec les parties prenantes, la participation et l'héritage collaboratif. Par conséquent, l'industrie africaine des LiBs a une perspective distincte pour catapulter sa performance ESG. Cela peut être accompli par une conception appropriée en ce qui concerne les cadres structurels et politiques dès le départ.

[71] F. Saidani, F.X. Hutter, R-G. Scurtu, W. Braunwarth, J.N. Burghartz, Lithium-ion battery models: a comparative study and a model-based powerline communication, Advances in Radio Science 15 (2017) 83–91: https://doi.org/10.5194/ars-15-83-2017.
[72] M. Chouchane, A. Rucci, T. Lombardo, A.C. Ngandjong, A.A. Franco, Lithium ion battery electrodes predicted from manufacturing simulations: Assessing the impact of the carbon-binder spatial location on the electrochemical performance, Journal of Power Sources 444 (2019) 227285: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227285.

6

Stratégie, recherche, développement

6.1 Perspective stratégique

Il existe deux expressions de haut niveau de l'aspiration urgente au développement humain et à la durabilité qui ont une incidence directe sur la stratégie de l'Afrique en matière de technologie des batteries de nouvelle génération. La première aspiration est l'ODD 7 des Nations unies qui définit trois cibles d'ici 2030. La première cible est d'assurer l'accès à une énergie abordable, fiable, durable et moderne pour tous. Le deuxième objectif est d'augmenter considérablement la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique mondial. Le troisième objectif est de doubler le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique. En outre, la deuxième aspiration est l'Agenda 2063 de l'UA avec une référence spécifique à cinq objectifs. Le premier objectif offre aux Africains un niveau de vie élevé, une qualité de vie et un bien-être pour tous. Le deuxième objectif consiste à garantir des citoyens bien éduqués et une révolution des compétences soutenue par la science, la technologie et l'innovation Le troisième objectif consiste à offrir aux Africains des citoyens en bonne santé et bien nourris. Le quatrième objectif concerne la transformation des économies africaines et la création d'emplois. Le septième objectif est que l'Afrique doit être durable sur le plan environnemental et avoir des économies résilientes au changement climatique. Bien que les objectifs spécifiques soient différents, il y a une congruence générale entre l'ODD 7 et les objectifs sélectionnés de l'Agenda 2063. L'ODD 7 ayant un calendrier plus serré, il offre une référence plus significative pour évaluer les progrès accomplis dans la réalisation de ces aspirations.

Un examen récent de l'ODD 7, selon les Policy Briefs in Support of the First SDG 7 Review at the UN High-Level Political Forum (2018), a conclu que si l'Afrique du Nord est en bonne voie pour atteindre l'électrification universelle d'ici 2030, la région de l'Afrique subsaharienne ne sera pas à la hauteur.[73] En particulier, le rapport a déclaré que d'ici 2030, il y aura 590 millions de personnes sans accès à l'électricité et 900 millions sans accès à une cuisine propre en Afrique subsaharienne. Toutefois, ce constat est quelque peu surprenant compte tenu de la réponse internationale concertée à l'ODD 7, avec plus de 60 initiatives étrangères lancées pour soutenir l'électrification en Afrique.[74] Cependant, l'examen de la plus importante de ces initiatives, Power Africa,[75] une initiative dirigée par le gouvernement américain, donne au moins quelques indices de ce manque de succès. L'objectif du programme, qui consiste à augmenter la capacité de production installée de 30 GW d'ici 2030, ne tient pas compte des retraits de centrales. Pendant la période de mise hors service, la production d'électricité est loin de répondre aux besoins d'électrification des 650 millions de personnes non électrifiées. En outre, la comptabilisation des taux d'électrification du programme inclut le simple accès à une lanterne électrique, ce qui, en fait, ne constitue même pas une électrification de niveau 1. Dans l'ensemble, l'absence d'une stratégie continentale globale est l'un des principaux obstacles à l'électrification.[76]

Ces échecs exigent un retour aux fondamentaux pour examiner la nature du problème de manière méthodique et rigoureuse. Il faut notamment chercher à savoir pourquoi l'Afrique n'est toujours pas électrifiée et analyser les véritables causes sous-jacentes de ces anomalies. Si ces causes ne sont pas explicitement identifiées et traitées de front, tous les efforts en faveur de l'électrification de l'Afrique resteront vains. Bien que l'on reconnaisse généralement que le problème est complexe et à multiples facettes, il reste également évident que les solutions technologiques LiBs for NGB ne sont pas abordables. Cependant, l'Afrique doit répondre à la question suivante : pourquoi ces solutions ne sont-elles pas abordables pour les Africains alors que le continent est doté des minéraux adaptés à ces technologies. Pour répondre à cette lacune, les deux raisons qui expliquent ce phénomène sont imbriquées. Par exemple, le premier problème technologique est que l'Afrique ne maîtrise pas le niveau des prix.

[73] https://www.un.org/development/desa/en/news/sustainable/new-publication-calls-for-urgent-action-on-energy-to-achieve-global-goals.html
[74] http://bruegel.org/2017/09/the-role-of-international-institutions-in-fostering-sub-saharan-africas-electrification/
[75] https://www.usaid.gov/powerafrica
[76] http://bruegel.org/2017/09/the-role-of-international-institutions-in-fostering-sub-saharan-africas-electrification/

En effet, l'Afrique ne possède pas ces technologies à ce stade. Deuxièmement, les technologies peuvent être sur- ou sous-conçues pour les besoins de l'Afrique. Mais dans tous les cas, elles deviennent trop coûteuses pour les Africains et non durables. En outre, l'autre défi est la pauvreté. Il a été signalé que 437 millions de personnes en Afrique subsaharienne vivent dans une pauvreté extrême, caractérisée par un revenu inférieur à 1,90 dollar par jour. En outre, il a été prévu que 9 personnes sur 10 vivront dans l'extrême pauvreté en Afrique subsaharienne d'ici 2030.77 Par conséquent, l'Afrique doit penser stratégiquement à la création de richesses équitables et profondes en Afrique, par opposition aux richesses cosmétiques uniquement.

Actuellement, une révolution mondiale est en cours dans le stockage électrochimique de l'énergie pour soutenir les transitions énergétiques vers des économies circulaires et des sociétés à zéro émission. Le marché mondial du stockage de l'énergie devrait être multiplié par 13 pour atteindre 158 GWh d'ici 2024.[78] Les batteries rechargeables (et les supercondensateurs dans une mesure plus limitée), en particulier la technologie lithium-ion, sont au cœur de cette révolution. Cette révolution a notamment une incidence directe sur les aspirations résumées ci-dessus en raison de la perspective de reconfigurer l'économie de l'électrification par une utilisation accrue des sources d'énergie renouvelables (principalement éoliennes et solaires) à la fois dans les réseaux nationaux et les mini-réseaux (y compris les installations autonomes), et ces dernières pour les communautés hors réseau. Cette révolution doit être exploitée de manière stratégique pour répondre aux aspirations de l'Afrique en matière de stockage de l'énergie et d'électrification. Pourtant, un grave problème technologique est déjà apparent dans cette révolution ; la technologie des batteries est actuellement orientée par les exigences techniques de l'électromobilité. Bien qu'il y ait un certain chevauchement, ces exigences diffèrent encore à certains égards importants de celles de l'électrification hors réseau à grande échelle de l'Afrique. Il s'agit donc d'une question stratégique importante à laquelle l'Afrique doit s'attaquer. Son importance a récemment été soulignée par le Groupe de la Banque mondiale.

Les experts ont reconnu que l'utilisation accrue de l'énergie éolienne et solaire avec un stockage robuste peut contribuer à décarboniser les systèmes électriques, à élargir l'accès à l'énergie, à améliorer la fiabilité du réseau et à accroître la résilience du système énergétique. Cependant, il a été signalé que les exigences des réseaux des pays en développement ne sont pas encore pleinement prises en compte sur le marché actuel du stockage de l'énergie. Et ce, malgré le fait que ces pays africains pourraient avoir le plus grand potentiel de déploiement de batteries. Actuellement, le marché des batteries est tiré par l'industrie des véhicules électriques. La plupart des technologies courantes ne peuvent pas fournir un stockage de longue durée ou résister à des conditions climatiques difficiles, et ont une faible capacité de fonctionnement et de maintenance.[79] En particulier, les performances de la plupart des technologies de batteries lithium-ion se dégradent rapidement à des températures supérieures à 25°C, ce qui nécessite des mécanismes de refroidissement robustes adaptés aux climats chauds. Pour relever ce défi technologique, le Groupe de la Banque mondiale réagit par le biais de l'initiative ESP (Energy Storage Partnership Program). Il s'agit d'une initiative d'un milliard de dollars US qui vise à stimuler et à soutenir les solutions de stockage par batterie qui répondent aux exigences techniques du stockage d'énergie à grande échelle. Les gouvernements africains doivent donc être en mesure de mettre au point d'autres méthodes leur permettant de résoudre ce problème technologique, car il menace la perspective d'une électrification à grande échelle de l'Afrique par le biais d'une révolution énergétique robuste.

Le présent rapport décrit certaines mesures que les pays africains pourraient prendre pour résoudre le problème de l'électrification de l'Afrique. Ces mesures peuvent être associées à des stratégies de création de richesses profondes et de maîtrise des technologies. Il est proposé de mettre en place un programme d'industrialisation immédiat qui exploite directement la révolution actuelle du stockage de l'énergie. Ce programme peut être mis en œuvre dans un délai de cinq ans. Cette stratégie implique notamment l'adoption des technologies de pointe actuelles en matière de batteries lithium-ion pour la fabrication locale, en tirant parti du principal avantage concurrentiel de l'Afrique, à savoir les minéraux pour batteries. En raison de la nature de la technologie, ce programme est optimal pour le marché émergent des véhicules électriques. Il soutiendra également l'électrification hors réseau dans l'intervalle. L'industrialisation immédiate est soutenue par un vaste programme de recherche, de développement et d'innovation qui vise à établir une chaîne de valeur complète pour les batteries lithium-ion en Afrique et à orienter la technologie des batteries vers l'objectif à long terme de solutions sur mesure les mieux adaptées à l'électrification de l'Afrique. Les principales priorités de recherche sont définies pour les dix premières années. En outre, des politiques globales, cohérentes et réactives pour la création de richesses et la maîtrise des technologies sont un ingrédient essentiel de l'ensemble du programme. Ces éléments sont examinés en détail dans le chapitre suivant. L'impulsion de ce programme vient de la prise de conscience que le problème de l'électrification représente en fait une opportunité technologique sans précédent pour l'Afrique.

77 https://blogs.worldbank.org/opendata/number-extremely-poor-people-continues-rise-sub-saharan-africa
78 https://renewablesnow.com/news/global-energy-storage-market-to-hit-158-gwh-in-2024-650563/
79 http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2019/05/28/new-international-partnership-established-to-increase-the-use-of-energy-storage-in-developing-countries

Pour comprendre cette opportunité, il est nécessaire d'examiner la chaîne de valeur des batteries lithium-ion à l'échelle du continent telle qu'elle se présente aujourd'hui. La figure 12 est un simple schéma montrant les lacunes importantes, représentées par la couleur rouge, dans la chaîne de valeur. Notamment, la seule partie que l'Afrique contrôle est l'extraction et le traitement initial. Il est évident que cela ne représente qu'une infime partie de la valeur totale de la chaîne de valeur du LiBs. En outre, il existe également une certaine infrastructure de distribution pour traiter le produit importé. Cependant, cela ne suffit pas non plus à soutenir la révolution du stockage de l'énergie. La question à laquelle les gouvernements africains doivent répondre est de savoir qui contrôle et profite des segments rouges de la Figure 12. La réponse à cette question fournira des stratégies et des cadres techniques grâce auxquels les gouvernements africains pourront formuler des politiques qui offriront des opportunités à la population africaine Alors que le recyclage et l'élimination sont encore largement en développement, avec seulement environ 9% de la batterie lithium-ion qui est recyclée, la partie la plus lucrative de la chaîne de valeur de la Figure 12 (surlignée en ovale) est détenue et contrôlée en dehors de l'Afrique.

De façon incroyable, le marché des batteries est actuellement dominé par trois acteurs asiatiques, à savoir le Japon (Panasonic), la Corée du Sud (Samsung SDI, LG Chem, SKI) et la Chine (BYD, CATL). Collectivement, on estime qu'ils contrôlent environ 80 % du marché du stockage par batterie. D'importantes activités sont actuellement menées en Europe et en Amérique du Nord pour construire des gigafactories pour la fabrication de batteries. En particulier, les gouvernements du monde entier prennent des mesures rapides et décisives pour stimuler et soutenir la capacité nationale de fabrication de batteries. La question la plus importante à laquelle il faut répondre immédiatement est la suivante : que font les gouvernements, les chercheurs et les innovateurs africains pour combler ces lacunes afin d'augmenter leur part du marché du stockage de l'énergie par batterie.

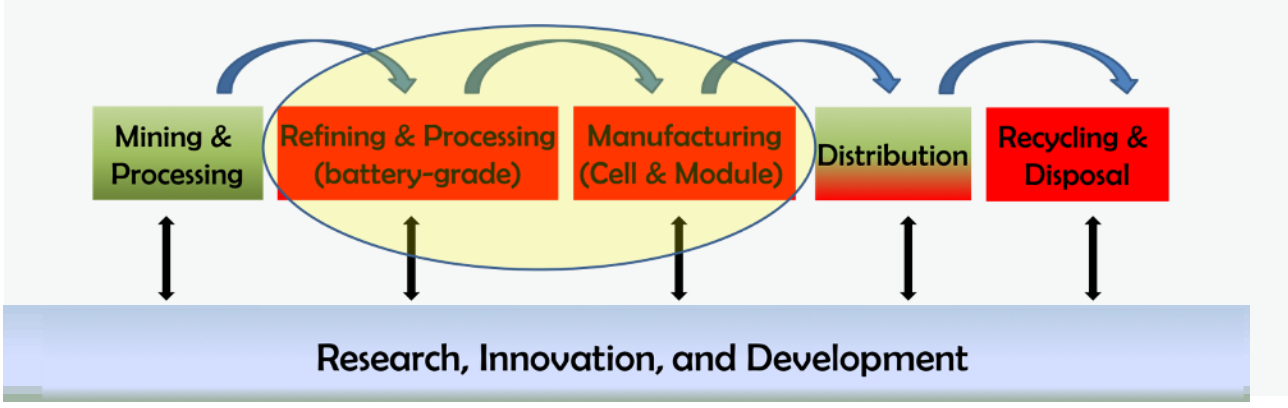


Figure 12. Schéma simplifié de la chaîne de valeur de la technologie des batteries lithium-ion. Les cases vertes représentent les secteurs de la chaîne de valeur où des infrastructures importantes existent déjà, tandis qu'il n'y en a pas pour les cases rouges. L'ovale jaune met en évidence les secteurs qui doivent être créés pour la composante d'industrialisation immédiate du programme que nous proposons. La fabrication comprend le système de gestion des batteries et la technologie des packs.

Les écarts de la figure 12 montrent clairement que l'Afrique subventionne les niveaux de vie élevés d'autres nations par un double jeu. Tout d'abord, cela est facilité par le fait de donner les minéraux de l'Afrique uniquement pour créer quelques emplois pour les Africains. Les pays bénéficiaires peuvent poursuivre l'industrialisation de leurs propres nations aux dépens de la population et des richesses africaines. Par la suite, le revenu minimal que l'Afrique tire de la vente de minéraux à ces pays est utilisé pour racheter ses propres minéraux sous forme de produits à des prix exorbitants. Malheureusement, cet écart se traduit clairement par un transfert net d'opportunités de création de richesse de l'Afrique vers d'autres nations. En particulier, l'Afrique ne peut pas prospérer tant qu'elle continue à perdre des richesses au profit du reste du monde, sans qu'aucune feuille de route stratégique claire ne permette de réduire cette anomalie et, à terme, d'y mettre fin. En général, les nations qui ont réussi à se sortir durablement de la pauvreté l'ont fait en maîtrisant au moins un domaine de la technologie moderne. Ainsi, l'Afrique a désespérément besoin de maîtriser au moins un domaine ou quelques domaines de spécialité de la technologie moderne. La question est la suivante : où se trouve la plus grande opportunité pour une entreprise aussi ambitieuse dans l'Afrique du 21e siècle ?

Le panel soutient qu'en tant que continent, l'Afrique dispose de formidables avantages concurrentiels dans le domaine de la technologie des batteries lithium-ion. Dotée de tous les minéraux clés nécessaires à la fabrication des batteries au lithium-ion, l'Afrique peut et doit établir une chaîne de valeur complète et viable pour le lithium-ion. Cela se traduira par une chaîne de valeur plus courte et nettement plus lucrative, avec de nombreux avantages fondamentaux pour les économies africaines. Le tableau 3 montre les niveaux de production et les réserves des "cinq grands" minéraux pour batteries pour la chimie NMC, ainsi que le LCO, le LMO et le NCA.

Tableau 3: Les " cinq grands " minéraux pour batteries au lithium-ion : Production africaine (2018) et réserves connues. Les données relatives au nickel sont celles de 2017. Pour chaque minéral, les données sont données uniquement pour le producteur le mieux classé ou le détenteur des plus grandes réserves connues.

Minéraux	Production (tonnes	Réserves connues (tonnes métriques)	Pays (Production, Réserves)	Classement mondial (Production, Réserves)
Lithiuma	1 600	70 000	Zimbabwé, *	5, *
Cobalt	90 000	3 400 000	République Démocratique du	1, 1
Manganèse	5 300 000	200 000 000	Afrique du Sud	1, 1
Nickelc	48 000	3 700 000	Afrique du Sud	11, 6
Graphite	9 000	17 000 000	Madagascar, Tanzanie, Mozambique	9, 4

aStatista: https://www.statista.com/. *Quantifying lithium deposits is difficult because it occurs in both rock ores and brines, that latter is difficult to quantify. bInvesting News: https://investingnews.com/. cWorld Mining Data: https://www.world-mining-data

Le niveau suivant de minéraux pour les batteries lithium-ion comprend l'aluminium et le cuivre. Ils sont principalement utilisés comme collecteurs de courant pour la cathode et l'anode, respectivement. Il est incroyable de constater que l'Afrique dispose d'une grande quantité de ces minéraux. Par exemple, 45 millions de tonnes métriques de bauxite ont été produites en Guinée[80] et 755 000 tonnes métriques de cuivre ont été produites en Zambie en 2017.[81] Même si l'on tient compte de la chimie des PPL, l'Afrique dispose encore de ressources abondantes dans les deux minéraux clés supplémentaires, le fer et le phosphate Par exemple, l'Afrique du Sud produit 80 millions de tonnes métriques de minerai de fer, ce qui en fait le 7ème producteur mondial.[82] D'autre part, le Maroc et le Sahara occidental se classent au 3ème rang mondial avec 33 millions de tonnes métriques de production de phosphate et détiennent 70% des réserves mondiales.[83]

Pour capitaliser sur cette base de ressources minérales, un impératif stratégique clé pour réussir est d'établir l'ensemble de la chaîne de valeur pour la technologie des batteries, soutenue par le modèle de production à l'échelle géante. Bien que nous ne puissions pas vérifier les données pour l'Afrique, le cas de l'Australie est aussi éclairant que convaincant. Par exemple, la figure 13 montre une réalité stupéfiante : en se concentrant uniquement sur l'extraction et la transformation du minerai de lithium en concentré, l'Australie n'a obtenu qu'un minuscule 0,53 % de la chaîne de valeur en 2017. Cependant, la figure 13 a également révélé que la véritable valeur provient de la production électrochimique, de la production de cellules de batteries et de l'assemblage de systèmes et de packs de batteries. Cela démontre clairement qu'une situation similaire pourrait être observée dans le cas de l'Afrique et que les pays africains ne profitent pas de ces opportunités de création de richesse au sein de la chaîne de valeur.

80 https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_countries_by_bauxite_production
81 https://investingnews.com/
82 https://www.worldatlas.com
83 https://investingnews.com

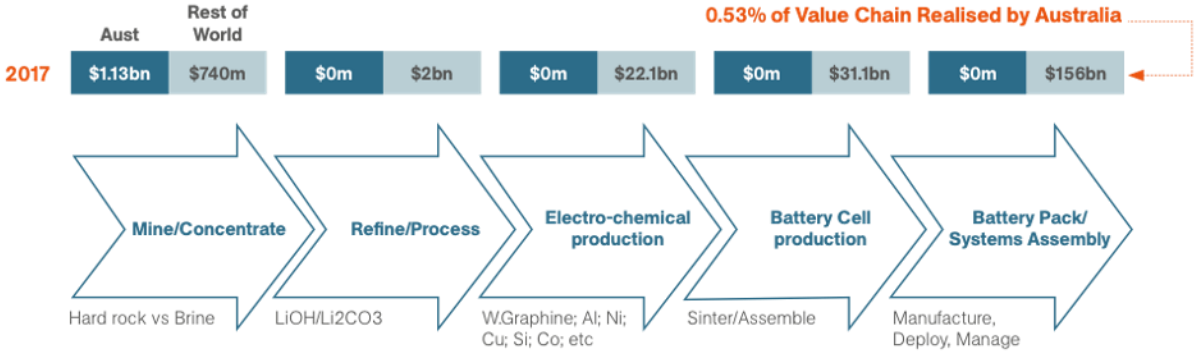


Figure 13. Chaîne de valeur du lithium dans la technologie des batteries lithium-ion [Source : Future Smart Strategies, 2018].[84]

En réponse à cette prise de conscience, l'Australie progresse rapidement vers l'établissement d'une chaîne de valeur complète des batteries lithium-ion en construisant des usines de fabrication dans le cadre de technologies sous licence. Par exemple, le projet Townsville Gigafactory (15 GWh) et Renaissance One à Darwin ont été établis par l'Australie. En outre, des efforts sont déployés pour renforcer la base de recherche correspondante. Par exemple, le Lithium Australia et le Future Battery Industries Cooperative Research Centre se concentrent sur ces efforts. Ces efforts sont étroitement complétés par une stratégie de "Lithium Valley" en Australie occidentale, qui comprend le projet d'usine d'hydroxyde de lithium de Kemerton. L'Australie est un continent riche en ressources, tout comme l'Afrique Elle offre donc un aperçu réaliste et instructif de la trajectoire que l'Afrique pourrait suivre. L'Afrique doit donc déclarer que la fabrication de batteries lithium-ion est une industrie stratégique et adopter un programme radical d'industrialisation, de recherche, de développement et d'innovation associé à un cadre politique solide et favorable. Dans la suite de ce chapitre, la stratégie audacieuse proposée pour l'industrialisation, la recherche, le développement et l'innovation est discutée. Le cadre politique fait l'objet du chapitre suivant.

6.2 Industrialisation immédiate

En développant la stratégie d'industrialisation immédiate, il semble plus logique de cibler d'abord les segments à forte valeur ajoutée de la chaîne de valeur. En effet, c'est l'approche largement adoptée dans les projets récents dans le monde. Comme le montre la Figure 13, la valeur la plus importante se trouve dans le maillon de la chaîne de valeur relatif au conditionnement des batteries et à l'assemblage des systèmes, suivi de la production des cellules de batterie. Ainsi, l'APET suggère un programme de fabrication initial qui comprend la production de cellules et le conditionnement/assemblage de systèmes. À cet égard, la trajectoire qui semble avoir fonctionné ailleurs est la suivante :

- Construire et exploiter une usine pilote : En général, on peut en créer quelques-unes d'une capacité de 100 MWh/an. Cela nécessite généralement de choisir une chimie, puis de fabriquer sous licence avec un partenaire technologique. Le coût d'une telle usine peut atteindre 200 millions de dollars US. Le délai entre l'étude de faisabilité et la mise en service de l'usine est d'environ 18 mois. L'objectif de l'usine pilote est notamment de développer les compétences locales et de mettre en place l'écosystème et l'infrastructure industriels associés. En général, l'usine est exploitée pendant au moins un an. Dans l'ensemble, l'usine pilote est une étape critique de la démonstration de la technologie et de la consolidation de l'analyse de rentabilité pour la fabrication commerciale à grande échelle.
- Usine à grande échelle : Pour bénéficier d'économies d'échelle, une capacité de 10 GWh/an est recommandée. Bien qu'il soit difficile d'obtenir des chiffres précis concernant les budgets d'investissement des usines de fabrication de batteries, on estime que le coût est d'environ 2 milliards de dollars US, avec un délai d'environ trois ans entre l'étude de faisabilité et la mise en service de l'usine. L'estimation des coûts est basée sur 200 millions de dollars US/ GWh85 selon les données du rapport Science for Policy du Centre commun de recherche (2017).[86]

[84] The Lithium-Ion Battery Value Chain, New Economy Opportunities for Australia, Commonwealth of Australia 2018
[85] McKinsey Report: https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/recharging-economies-the-ev-battery-manufacturing-outlook-for-europe.
[86] EU Competitiveness in Advanced Li-ion Batteries for E-Mobility and Stationary Storage Applications – Opportunities and Actions (2017).

- En tandem avec les deux étapes précédentes, le travail de base pour l'écosystème industriel et l'infrastructure associés est mis en place. L'écosystème comprend des éléments d'intégration en amont et en aval afin de combler les lacunes identifiées dans la figure
  13. Les raffineries de lithium, les usines de fabrication d'électrolytes et de séparateurs, ainsi que d'autres intrants de qualité batterie pour l'intégration en amont sont les plus importants. En outre, les installations de distribution, les usines de recyclage/réutilisation et d'élimination soutiennent l'intégration en amont. En particulier, d'importantes infrastructures de soutien peuvent être nécessaires et toutes les infrastructures essentielles telles que les installations électriques, routières, ferroviaires, portuaires et aéroportuaires doivent être fournies par les gouvernements.

La mise en œuvre du programme d'industrialisation immédiate implique les gouvernements, les entreprises établies et les écosystèmes de start-ups. En général, les jeunes entreprises ambitieuses créent des consortiums avec des entreprises établies qui ont une expertise dans divers aspects de la chaîne de valeur. Cette démarche doit être soutenue par les gouvernements au moyen d'infrastructures de soutien, de subventions et d'autres cadres politiques, comme indiqué au chapitre 7. Parmi les exemples de mise en œuvre de ce modèle, citons Northvolt en Suède, le consortium Imperium (iM3) pour le projet Gigafactory de Townsville, et Saft en France. Dans le cas de Saft, le programme est mis en œuvre par le biais d'un consortium avec Solvay (entreprise belge spécialisée dans les solutions de polymères et d'électrolytes), Manz (entreprise allemande spécialisée dans les équipements d'assemblage de cellules et de modules) et Siemens (entreprise allemande spécialisée dans les solutions d'automatisation de la fabrication). Saft devrait lancer la production de masse de batteries lithium-ion à électrolyte liquide de 3e génération en 2020, suivie de la génération 3B en 2022, puis des batteries de 4e génération (à l'état solide) en 2024.[87] Enfin, en supposant un démarrage de ce programme en 2020 en Afrique, le programme d'industrialisation immédiate pourrait être achevé en 2025.

6.3 Recherche, innovation et développement (RI&D)

Le champ d'application du programme de recherche proposé couvre l'ensemble de la chaîne de valeur de la technologie des piles, de la modélisation atomistique des matériaux au recyclage et à l'élimination des batteries. Par conséquent, des collaborations multisectorielles sont nécessaires pour soutenir l'ensemble du programme de recherche. Cela exige un réseau étroitement tissé d'acteurs co-créateurs capables de fournir un programme de recherche et de développement compact et stratégique. Grâce à ce programme, la recherche fondamentale et la recherche appliquée peuvent être intimement intégrées l'une à l'autre pour une traduction transparente en produits innovants. Comme nous l'avons vu au chapitre 10, un paradigme pragmatique pour la meilleure utilisation des ressources collectives dans ce scénario semble être la forme institutionnelle Triple Helix. Cette forme organisationnelle a démontré sa capacité à accélérer le développement d'innovations économiquement viables grâce au flux efficace de connaissances et d'actions au sein de l'écosystème d'innovation. Cependant, en raison de la grande diversité des acteurs qui se réunissent pour ce projet continental, il est essentiel de calibrer de manière appropriée la forme institutionnelle aux différentes circonstances des acteurs, car les structures organisationnelles et de gouvernance varieront dans chaque situation.

Les besoins précis en matière de financement du programme RI&D ne peuvent pas être facilement estimés sans une connaissance détaillée de ses composantes. Les données provenant d'autres pays et régions ne peuvent être qu'indicatives car les circonstances peuvent varier considérablement d'un endroit à l'autre. Par exemple, l'Union européenne, par le biais de l'Association européenne des batteries, est prête à investir directement 200 millions d'euros dans la recherche et l'innovation en matière de batteries. D'autre part, le gouvernement britannique, par le biais de l'ISCF Faraday Battery Challenge, a investi 246 millions de livres sterling dans son programme RI&D.

6.3.1 Priorités de recherche

Les priorités de recherche sont déterminées par la nécessité d'établir une chaîne de valeur complète et viable pour les batteries de nouvelle génération. Ainsi, les composantes de la stratégie de recherche couvrent intrinsèquement l'ensemble de la chaîne de valeur, comme le montrent les Figures 12 et 13. Toutefois, étant donné que le comblement des lacunes de la chaîne de valeur est un programme progressif, les priorités de recherche doivent être élaborées en tandem et étroitement coordonnées avec le programme d'industrialisation. En outre, l'identification et la mise en œuvre des priorités nécessitent une collaboration étroite entre les trois principaux acteurs que sont les gouvernements, l'industrie et les institutions de recherche. Cette collaboration peut être réalisée plus particulièrement en établissant des consortiums appropriés entre l'industrie et les institutions de recherche. Ce processus peut être considérablement facilité par les gouvernements africains.

[87] Reuters Business News, September 12, 2018: https://www.reuters.com/article/uk-autos-batteries-saft-idUKKCN1LS24X.

Dans l'idéal, l'industrie devrait diriger l'identification des priorités de recherche, car cela renforce les possibilités d'utilisation commerciale du programme de recherche. Étant donné que les programmes d'industrialisation et de recherche comportent des éléments intersectoriels et multidisciplinaires, une mise en œuvre réussie exige une stratégie globale cohérente dans un cadre institutionnel nouveau et solide, comme nous le verrons au chapitre 10.

En tant que guide flexible, l'APET suggère les critères suivants pour déterminer les priorités

- Soutien maximal au programme d'industrialisation immédiat : Le phasage doit être synchronisé de manière appropriée avec le calendrier du programme d'industrialisation Cela peut également faciliter la formation de la prochaine génération d'ingénieurs et de scientifiques pour l'industrie naissante.
- Axé sur le stockage de l'énergie : Comme aucune technologie de batterie ne peut satisfaire toutes les exigences des différentes applications, on s'attend à ce qu'à l'avenir, il y ait une différenciation technologique avec des spécialisations distinctes pour des applications particulières. Par conséquent, la stratégie à long terme consiste à développer un mini-/micro-réseau sur mesure et des solutions de stockage d'énergie autonomes optimisées pour le contexte africain. Ainsi, l'Afrique peut exclure toute dépense importante dans des technologies spécialisées pour d'autres espaces d'application tels que les véhicules électriques.
- Des solutions efficaces et peu coûteuses : Le caractère abordable du produit final est un facteur de réussite essentiel pour l'électrification de l'Afrique, et il convient d'en faire une priorité.
- Maximiser les avantages stratégiques de l'Afrique dans cette industrie.
- Rapport coût-efficacité : Certains programmes nécessitent uniquement une mise à niveau minime des infrastructures existantes (voir chapitre 10) et constituent donc des fruits mûrs à cibler.

Dans ce qui suit, le présent rapport ne donne que des exemples préliminaires d'aspects qui peuvent être pris en compte pour les programmes de recherche, de développement et d'innovation. En particulier, le groupe d'experts s'abstient délibérément de prescrire des domaines de recherche spécifiques, car des recherches et des preuves plus détaillées ainsi qu'une collaboration approfondie entre tous les principaux acteurs sont d'abord nécessaires, ce qui dépasse la portée du présent rapport.

6.3.1.1 Exploitation minière et transformation

L'exploitation minière et une certaine transformation ont déjà lieu en Afrique. La recherche pourrait être orientée vers l'efficacité globale de l'extraction, de la récupération et de l'élimination des ressources. Cependant, un investissement lourd dans ce domaine ne semble pas impératif.

6.3.1.2 Raffinage et traitement des matériaux de batteries

Une pureté extrême de plus de 99,8 % est exigée dans les matériaux destinés aux applications des batteries. Par conséquent, des technologies de traitement avancées sont nécessaires pour répondre à des exigences strictes. D'après les recherches effectuées par le groupe d'experts et les experts, aucun des principaux minéraux pour batteries n'est actuellement traité pour obtenir une qualité de batterie en Afrique. Il s'agit d'un domaine de recherche clé qui nécessite une priorité adéquate pour renforcer la capacité de fabrication dans ce segment de la chaîne de valeur.

6.3.1.3 Fabrication de matériaux, de cellules et de modules de batterie

Pour libérer tout le potentiel de l'industrie, il faut accorder la plus haute priorité à cette partie de la chaîne de valeur. Actuellement, il s'agit de la partie de l'industrie la plus lourde en termes de propriété intellectuelle, et il est donc obligatoire d'avoir un partenaire technologique pour l'entrée initiale. Sans surprise, c'est également le segment le plus lucratif de la chaîne de valeur et le point d'entrée que nous proposons pour le programme d'industrialisation immédiat. C'est donc ici que doivent être jetées les bases du succès éventuel de l'ensemble du programme. Par conséquent, les principales priorités de recherche se répartissent en deux grandes catégories :

- Recherche sur les matériaux avancés des batteries : Il s'agit d'un programme complet qui couvre la découverte, la synthèse, la caractérisation et la fabrication des matériaux. L'idéal serait de ne retenir qu'une ou deux compositions chimiques pour les matériaux de batterie afin de concentrer les ressources limitées sur une échelle gérable.

- Recherche avancée sur les cellules de batteries : Elle couvre la fabrication des cellules, l'assemblage des modules et des packs, ainsi que les systèmes de gestion des batteries et autres contrôles. La fabrication de cellules de pointe est une opération d'ingénierie délicate et minutieuse, caractérisée par des taux d'apprentissage très lents. Des réductions de coûts significatives peuvent être réalisées grâce à de meilleures technologies de fabrication. L'Afrique pourrait même passer aux technologies de l'usine du futur puisqu'elle n'a pas encore d'obstacles technologiques à surmonter. L'usine pilote proposée pourrait servir de banc d'essai pour certaines de ces technologies.

L'ensemble du programme doit être soutenu par une modélisation multi-échelle, de l'échelle atomique au niveau du module. Ce programme de recherche ainsi que le programme d'industrialisation immédiate constituent la plupart des emplois à haute valeur ajoutée dans cette industrie.

6.3.1.4 Distribution des produits

Il est nécessaire de cartographier les canaux de distribution existants et d'effectuer des projections des besoins futurs. En outre, il est également essentiel de développer des modèles rigoureux pour des systèmes efficaces de distribution des produits et de collecte des déchets pour l'ensemble de l'industrie.

6.3.1.5 Seconde vie, recyclage et élimination

Il est essentiel de développer des solutions présentant un profil de recyclabilité et de durabilité afin de promouvoir d'éventuelles transitions vers des économies circulaires. Cela peut se faire en mettant l'accent sur une forme adaptée de la stratégie des 3R, qui consiste à "réutiliser", "remanufacturer" et "recycler".88 Dans ce cas, des recherches sont nécessaires pour établir des technologies de recyclage et d'élimination appropriées, essentielles pour les LIB usagées. En outre, le flux de recyclage et d'élimination comprendra des batteries qui ne sont pas fabriquées en Afrique, destinées aux véhicules électriques et à d'autres applications. Ainsi, l'allongement de la durée de vie d'une batterie améliore considérablement son profil de durabilité. Après une utilisation normale d'environ 10 ans, une batterie de VE conserve environ 80 % de sa capacité nominale. Elle peut donc être utilisée pour des applications moins gourmandes en énergie, comme les bâtiments résidentiels.[89] En outre, pour être adapté à cette application secondaire, le bloc-batterie doit être testé, remis à neuf et réutilisé. Il est connu que l'utilisation d'une batterie de VE hors service dans une autre application est appelée sa seconde vie et peut prolonger considérablement sa durée de vie globale, comme le montre la Figure 13. Par exemple, pour une batterie dont la durée de vie totale est de 18 ans, l'utilisation de la seconde vie peut aller jusqu'à 8 ans. Ainsi, cela réduit clairement l'intensité globale des matières premières de l'industrie.[90]

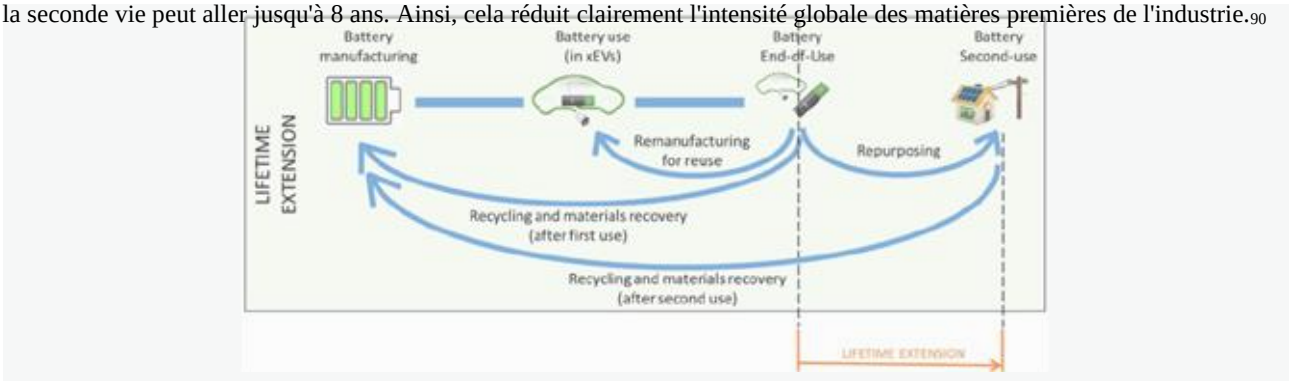


Figure 14. Prolongation de la durée de vie des batteries par des applications de seconde vie avant recyclage, créant ainsi une économie circulaire pour la technologie des batteries.[91]

88 M. Kurdve, M. Zackrisson, M.I. Johansson,B. Ebin, U. Harlin, Considerations when modelling EV battery circularity systems, Batteries 5 (2019) 40: https://doi.org/10.3390/ batteries5020040.
89 S. Arens, S. Schlüters, B. Hanke, K. von Maydell, C. Agert, Sustainable Residential Energy Supply: A Literature Review-Based Morphological Analysis, Energies 13 (2020) 432: http://dx.doi.org/10.3390/en13020432.
90 L.C. Casals, B.A. Garcia, M.M.G. Benitez, A cost analysis of electric vehicle batteries second life businesses, Conference Paper, July 2014, DOI: 10.13140/2.1.2046.8485: https://www.researchgate.net/publication/266322044.
91 S. Bobba, F. Mathieux, G.A. Blengini, How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries, Resources, Conservation and Recycling, 145 (2019) 279-291: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.022.

Afin de déterminer l'échelonnement des priorités de recherche pour la seconde vie, le recyclage et l'élimination, des estimations fiables des flux de batteries usagées sont nécessaires. Compte tenu de la croissance rapide des VE et de la durée de vie plus courte de cette application, on s'attend à ce que les batteries usagées des VE constituent initialement le flux le plus important. Le Forum économique mondial a estimé que la capacité mondiale cumulée de stockage en seconde vie atteindra presque un TWh d'ici 2030 (figure 15). Cela démontre donc clairement l'importance de cette partie de la chaîne de valeur pour l'industrie Malheureusement, les estimations précises spécifiques à l'Afrique sont actuellement difficiles à trouver, ce qui indique la nécessité de poursuivre les recherches. Néanmoins, une estimation approximative pour ce rapport peut être obtenue en doublant les 145 000 VE estimés d'ici 2025 en Afrique du Sud seulement.[92] Par interpolation dans la Figure 15, environ 3 GWh de stockage de seconde vie est alors estimé d'ici 2025 pour le continent. En supposant une durée de vie de 10 ans, l'infrastructure pour l'utilisation de seconde vie avec une capacité de traitement d'environ 120 000 tpa sur la base d'un pack de batteries de 400 kg par véhicule peut être réalisée. Le recyclage devrait être prêt en 2030, tandis que les installations de collecte doivent être mises en place plus tôt pour commencer l'accumulation progressive des matériaux.

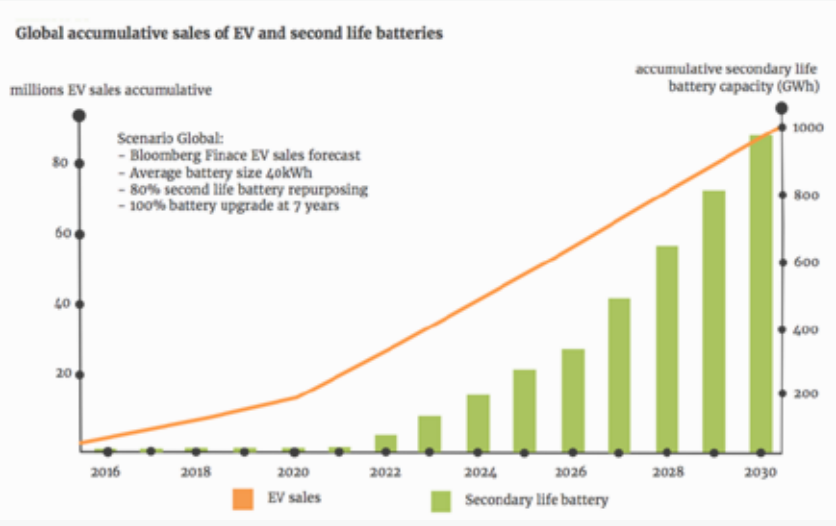


Figure 15. La capacité cumulée prévue des batteries de seconde vie comme stockage flexible pour les énergies renouvelables.[93]

Le recyclage des batteries lithium-ion est très différent de celui des batteries conventionnelles. Un large éventail de technologies de recyclage peut être envisagé, comme le montre la Figure 15. Cependant, il est crucial de noter que ces technologies de recyclage n'en sont qu'à leurs débuts et qu'il reste encore beaucoup de recherche et de développement à effectuer. Par exemple, le ministère américain de l'énergie n'a créé que récemment son centre de recyclage des batteries au lithium, dirigé par l'Argonne National Laboratory.[94] Les taux de recyclage des batteries au lithium sont d'environ 3%[95] , ce qui est extrêmement faible. En outre, la plupart des technologies commerciales ne recyclent que les cathodes afin de récupérer le cobalt et le nickel, ce qui rend la récupération du lithium peu rentable.[96] Cependant, les voies hydrométallurgiques offrent une voie plus prometteuse vers la récupération du lithium.[97] Par conséquent, une part importante de l'effort de recherche devrait être consacrée à la détermination de la technologie la plus appropriée au contexte africain et au développement de cette technologie à l'échelle commerciale. Il en va de même pour les technologies d'élimination finale.

92 https://www.businesslive.co.za/bd/life/motoring/2019-01-31-get-ready-for-the-brave-new-electric-car-world/
93 https://www.weforum.org/agenda/2017/11/battery-batteries-electric-cars-carbon-sustainable-power-energy/
94 Recycling Today, February 18, 2019: https://www.anl.gov/article/recell-center-could-save-costly-nickel-and-cobalt-transform-battery-recycling-worldwide
95 A. Beaudet, F. Larouche, K. Amouzega, P. Bouchard, K. Zaghib, Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials: Review, Sustainability 12 (2020) 5837: doi:10.3390/su12145837.
96 https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/sustainability-second-life-cobalt-lithium-recycling.pdf.
97 X. Zheng, Z. Zhu, X. Lin, Y. Zhang, Y. He, H. Cao, Z. Sun, Research Green Industrial Processes—Review A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries, Engineering 4 (2018) 361-370: https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.018.

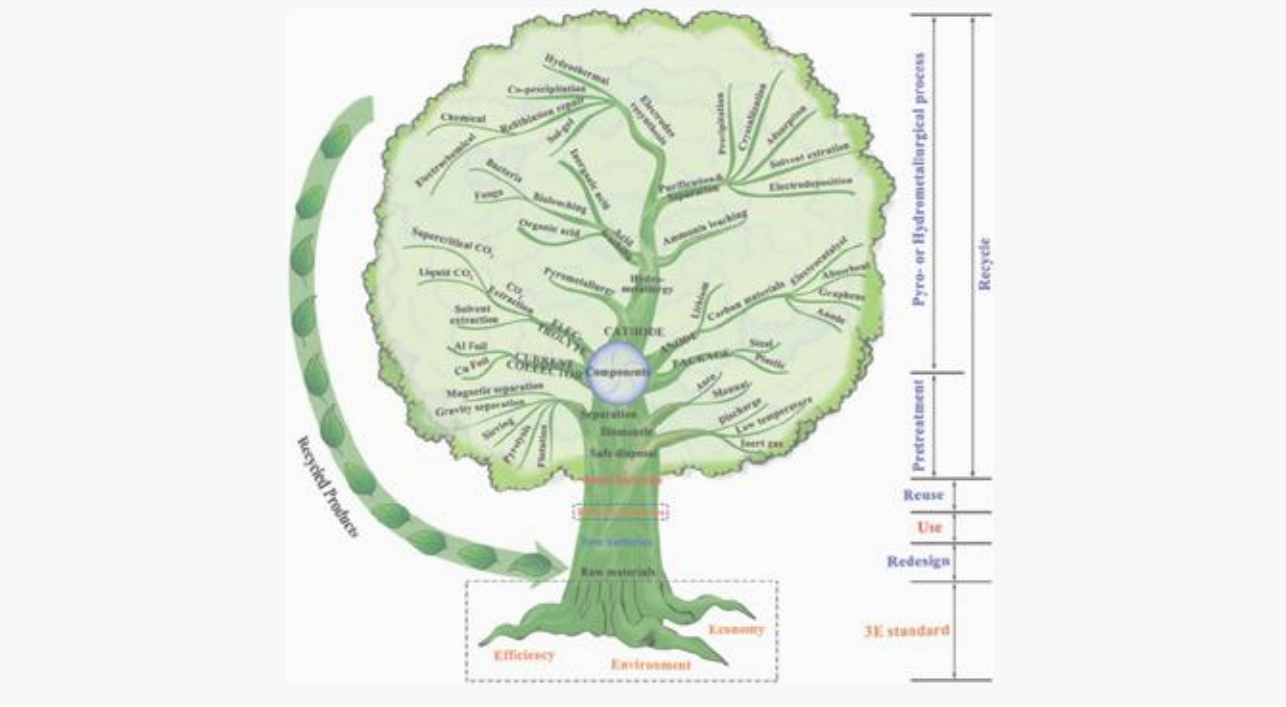


Figure 16. Exemples de technologies de recyclage des batteries.[98]

6.3.1.6 Cadre politique

Il y a des questions complexes de politique, de normes techniques, de sécurité et de réglementation environnementale qui doivent être résolues tout au long de la chaîne de valeur. Bien que certains de ces éléments puissent être adaptés à partir d'autres juridictions, un développement original sera presque certainement nécessaire dans les domaines où des solutions innovantes sur mesure sont mises en œuvre, comme dans le recyclage des batteries. Un autre domaine important de recherche politique est la protection de la propriété intellectuelle (PI) afin d'offrir certitude et prévisibilité aux innovateurs. L'Afrique est actuellement mal classée dans un grand nombre de paramètres clés dans ce domaine, comme l'indiquent l'indice mondial de l'innovation de l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle[99] et l'indice international de la propriété intellectuelle des États-Unis.[100]

6.3.1.7 Environnement commercial

Les gouvernements africains sont encouragés à répondre à la nécessité de comprendre l'environnement opérationnel local et mondial et à innover et mettre à jour en permanence les modèles commerciaux de l'industrie. s'agit notamment de développer des stratégies pour améliorer à la fois l'indice global de performance logistique[101] et l'indice de compétitivité mondiale du WEF sur le continent. Il s'agit d'indices respectés dans le monde des affaires qui déterminent le flux mondial d'IDE.[102] Par conséquent, il est nécessaire que l'Afrique effectue des recherches axées sur l'élaboration de stratégies spécifiques pour obtenir de meilleures performances dans ces indices.

98 X. Zhang, L. Li, E. Fan, Q. Xue, Y. Bian, F. Wua, R. Chen, Towards sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries, Chemical Society Reviews 47 (2018) 7239-7302: https://doi.org/10.1039/C8CS00297E.
99 https://www.wipo.int/publications/en/
100 https://www.uschamber.com/press-release/us-chamber-releases-2019-international-ip-index
101 https://lpi.worldbank.org/
102 https://www.weforum.org/reports/the-global-competitveness-report-2018

6.4 Répartition géographique du programme

Si ce programme est mis en œuvre à l'échelle continentale comme cela est envisagé dans ce rapport, l'APET suggère la création de pôles de fabrication avec des clusters d'innovation co-localisés. Par exemple, cela signifie qu'une raffinerie de bauxite pour produire de l'aluminium de qualité batterie est située près d'une mine de bauxite. Cela peut se faire en même temps que d'autres industries en aval, comme la fabrication de feuilles d'aluminium laminées pour les collecteurs de courant cathodique, et la production de boîtes et de boîtiers en alliage d'aluminium pour l'emballage des batteries. Ce pôle de fabrication peut être soutenu par un cluster de recherche et d'innovation approprié composé d'institutions de recherche et d'entrepreneurs. Cela peut permettre une collaboration approfondie et un solide triangle de connaissances pour accélérer l'innovation et la commercialisation. Le pôle d'innovation peut bénéficier d'un partage efficace des infrastructures, des équipements, des connaissances, des compétences et de l'expertise offerts par la proximité physique. Il est important de s'appuyer sur les forces existantes. Par exemple, on part du principe que les institutions de recherche, plus particulièrement les universités, existent déjà. Cependant, ces institutions de recherche peuvent avoir besoin de ressources supplémentaires et d'un renforcement des capacités pour accueillir le nouveau programme. Dans certains cas, ces institutions de recherche peuvent déjà posséder des installations spécialisées pour un segment particulier de la chaîne de valeur. Cela peut donc être exploité dans le cadre de la localisation des pôles d'innovation. Par exemple, l'Université de Western Cape en Afrique du Sud possède déjà une très petite usine pilote de batteries lithium-ion. Cela pourrait faire de cette université un bon candidat pour accueillir une composante du programme. En outre, il est envisagé qu'une fois que les détails du programme complet auront été élaborés, les États membres de l'UA pourront soumettre des offres techniques pour accueillir les différentes composantes du programme.

6.5 Conclusion

Sur la base de l'aspiration urgente au développement humain et à la durabilité, la stratégie de l'Afrique en matière de technologie de batterie de nouvelle génération doit garantir l'accès à une énergie abordable et fiable pour tous les Africains. L'Afrique doit augmenter de manière substantielle sa part d'énergie renouvelable dans le cadre énergétique mondial. Cela offrira aux Africains un niveau de vie élevé, une qualité de vie et un bien-être pour tous, conformément aux ODD. Si le programme des NGB est mis en œuvre à l'échelle continentale, il est nécessaire de créer des pôles de fabrication avec des clusters d'innovation co-localisés. Ces pôles peuvent être structurés de telle sorte qu'il existe d'autres industries en aval, comme la fabrication de feuilles d'aluminium laminées pour les collecteurs de courant cathodique, et la production de boîtes et de boîtiers en alliage d'aluminium pour l'emballage des batteries.. En outre, le centre de fabrication peut être soutenu par un pôle de recherche et d'innovation approprié composé d'institutions de recherche et d'entrepreneurs. Par conséquent, la collaboration approfondie et un solide triangle de connaissances pour accélérer l'innovation et la commercialisation pourraient profiter aux pôles d'innovation pour un partage efficace des infrastructures, des installations, des connaissances, des compétences et de l'expertise offerts par la proximité physique.

7

Cadre politique et réglementaire

L'intention générale du cadre politique est de stimuler et de soutenir une chaîne de valeur viable pour la technologie des batteries lithium-ion sur le continent. Cela nécessite une stabilité politique, une prévisibilité et une transparence réglementaire afin d'atteindre une durabilité sociale, technologique et environnementale tout en améliorant la facilité de faire des affaires et en réduisant les risques d'investissement à long terme. Le cas idéal est la mise en œuvre du cadre politique à l'échelle continentale et, dans tous les cas, il faut viser au moins l'échelle régionale, car les économies nationales individuelles n'offrent peut-être pas des marchés assez vastes Les institutions régionales et continentales existantes susceptibles de faciliter l'élaboration des politiques, telles que le Centre africain d'études technologiques, doivent être identifiées et consultées. Certains aspects de l'ensemble des politiques envisagées sont décrits dans la discussion suivante.

7.1 Politique des minéraux

L'objectif de ces politiques est de développer et de sécuriser des matières premières de qualité pile pour le programme d'industrialisation immédiat. La politique devrait décourager l'exportation de minéraux pour batteries sous forme de minerai ; au lieu de cela, des incitations complètes devraient être offertes pour une valorisation avancée. Le niveau d'enrichissement doit augmenter progressivement de sorte qu'en 2030, il existe une capacité locale suffisante pour produire des matières premières de qualité pour batteries à partir de tous les minéraux extraits sur le continent. Par exemple, l'exigence d'exportation du lithium peut, dans un premier temps, se limiter à la transformation en un concentré à 6 % (carbonate de lithium), avant de passer progressivement à la qualité de batterie d'ici 2030. Cette exigence doit être complétée par un régime de prix préférentiel pour les fabricants locaux de batteries. La Vision minière africaine prévoit déjà implicitement une politique minérale soutenue par une forte impulsion en faveur de la valorisation locale.[103]

7.2 Politique du marché

L'industrie des batteries est extrêmement compétitive et le paysage du marché se reconfigure rapidement. Par exemple, la part de marché des géants sud-coréens tels que LG Chem, Samsung SDI et SKI est passée de 30 % en 2014 à seulement 11 % en 2018. Dans le même temps, les entreprises japonaises telles que Panasonic, principalement grâce à un partenariat avec Tesla, et les entreprises chinoises telles que BYD et CATL, largement soutenues par les concurrents du marché intérieur, ont enregistré une croissance significative [Korean Economic Research Institute]. Récemment, LG Chem aurait intenté un procès à Volkswagen pour faire valoir un statut de fournisseur exclusif après que ce dernier ait conclu un accord d'approvisionnement avec SKI.[104] La concurrence provient non seulement des fabricants de batteries traditionnels, mais aussi des constructeurs automobiles qui intègrent à rebours des chaînes d'approvisionnement à l'épreuve du temps.[105]

Plus important encore, pour que l'industrie africaine des batteries lithium-ion proposée décolle et prospère dans cet environnement hostile, il est impératif d'introduire un ensemble de politiques visant à garantir des marchés intérieurs viables pour la capacité de production de batteries proposée. En particulier, les gouvernements et les services publics seront de gros consommateurs de produits de stockage d'énergie. Par conséquent, il est nécessaire de mettre en œuvre des politiques pour les départements gouvernementaux et leurs entités associées dirigeant l'approvisionnement en produits de stockage d'énergie pour soutenir la stratégie continentale de batteries.[106]

[103] https://au.int/sites/default/files/documents/30984-doc-africa_mining_vision_english.pdf
[104] http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20190512000157
[105] https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2019/04/133_265987.html
[106] https://www.theafricareport.com/21865/africa-must-assume-its-place-in-the-global-battery-race/

7.3 Politique d'investissement

Un programme d'innovation réussi nécessite la création d'un écosystème de capital-risque solide. Il est donc nécessaire d'établir un véhicule d'investissement en capital-risque sous la supervision directe de la Commission de l'UA. Son champ d'action peut se concentrer principalement sur toutes les technologies émergentes dans le cadre du programme AUDA-NEPAD. Pour faciliter les choses, l'APET désigne ce véhicule d'investissement sous le nom de Société Africaine de Capital d'Innovation (AICC) tout au long de ce rapport. L'objectif principal de l'AICC est de compléter les capitaux privés dans le domaine des technologies émergentes pour soutenir le cycle de vie complet de l'innovation. De manière cruciale, l'AICC fournira du capital-risque aux premiers stades de l'innovation pour les investissements de démarrage, le soutien et le financement du démarrage, et les cadres de soutien à la croissance précoce. Ainsi, les innovations naissantes seront accompagnées dans la "vallée de la mort". Un modèle de co-investissement dans lequel l'AICC co-investit une participation de 30% avec des entités privées de capital-risque réputées. Pour soutenir le cycle de vie complet de l'innovation en termes d'amorçage, de démarrage, de croissance précoce, d'expansion et de maturité, deux types de fonds d'investissement primaires sont proposés :

- Fonds "à risque" : Il s'agit de capital-risque public directement financé par le budget de la Commission de l'UA et dédié aux premières étapes de l'innovation.
- Fonds "sécurisés" : La diaspora africaine est la principale source de ces fonds destinés aux dernières étapes de l'innovation, notamment les premières étapes de croissance, d'expansion et de maturité. Il existe une possibilité importante de mobiliser des fonds d'investissement substantiels de la diaspora africaine si un instrument d'investissement transparent approprié est établi, comme les obligations de la diaspora.

Dans l'ensemble, il convient de créer un environnement financier favorable à l'échelle du continent pour encourager tous les acteurs de l'innovation dans les technologies émergentes à participer. En particulier, un environnement concessionnaire pour les emprunteurs est nécessaire avec des plateformes de crédit complètes telles que des garanties de prêt et des prêts à taux réduit.

7.4 Politique d'achat et de taxation

Il est essentiel de fournir des incitations substantielles pour l'acquisition de terrains, d'équipements et de machines destinés à l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries. Cela devrait inclure des mesures d'exonération fiscale et d'autres subventions pour les innovateurs et les entreprises africaines.

7.5 Politique relative à la seconde vie, au recyclage et à l'élimination des déchets

En règle générale, les batteries des véhicules électriques conservent environ 80 % de leur capacité d'origine lorsqu'elles sont retirées du marché.[107] La durée de vie utile de ces blocs de batteries peut être prolongée en les réutilisant pour une utilisation secondaire, généralement dans des applications stationnaires, comme le montre la Figure 17. Le recyclage des batteries LIB est motivé par la protection de la santé humaine et de l'environnement ainsi que par la récupération de métaux précieux pour l'industrie des batteries Plus important encore, il faut reconnaître que les LIB contiennent des matériaux qui sont toxiques et considérés comme des métaux lourds tels que le cobalt[108] et inflammables tels que les électrolytes organiques. Ces matériaux sont réactifs en cas de défaillance catastrophique, comme l'hexafluorophosphate de lithium (LiPF6), car ils peuvent réagir avec d'autres composants de la batterie pour produire de l'acide hydrofluorique (HF) toxique.[109] D'autre part, les matières premières représentent environ 60 % du coût total de la batterie, dont 40 % pour les matériaux de cathode. Par conséquent, le recyclage de ces matériaux est économiquement intéressant et réduit l'intensité énergétique de la production des batteries de 40 à 50 %[110].

Il faut développer un système de gestion de la pile en fin de vie qui se couple au système de seconde vie. Il existe de nombreuses configurations possibles pour la relation entre les systèmes de recyclage et de seconde vie. La configuration exacte mise en œuvre dépend du modèle commercial adopté. Celui-ci dépend à son tour du cadre réglementaire. En général, deux modèles commerciaux sont possibles en fonction des obligations légales imposées aux fabricants d'équipements originaux (OEM), c'est-à-dire les fabricants de batteries ou de VE.[111]

[107] https://www.greencape.co.za/assets/Uploads/ELECTRIC-VEHICLES-MARKET-INTELLIGENCE-REPORT-WEB.pdf.
[108] L. Leyssens, B. Vinck, C. Straeten, F. Wuyts, L. Maes, Cobalt toxicity in humans. A review of the potential sources and systemic health effects, Toxicology, 387 (2017): DOI: 10.1016/j.tox.2017.05.015.
[109] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires, Scientific Reports 7 (2017) 10018: https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z.
[110] https://greet.es.anl.gov/publication-lib-lca
[111] M. Kurdve, M. Zackrisson, M.I. Johansson, B. Ebin, U. Harlin, Considerations when modelling EV battery circularity systems, Batteries 5 (2019) 40;

Dans le cadre d'une politique de responsabilité élargie des producteurs, les équipementiers sont tenus de respecter un taux de recyclage déterminé pour leurs batteries. Dans ce cas, la société de recyclage des piles électriques de la figure 17 est contrôlée par l'équipementier.

Bien que ce cadre politique soit plus simple à mettre en œuvre et qu'il puisse encourager les équipementiers à concevoir des batteries recyclables, il impose une charge commerciale importante à l'équipementier en raison de l'important investissement en capital nécessaire pour construire des usines de recyclage de batteries. En revanche, une politique de marché ouvert pour le recyclage et les activités de seconde vie permet à des acteurs indépendants de participer uniquement en fonction des bénéfices réalisés par le secteur. Ce modèle est actuellement prédominant pour les accumulateurs au plomb usagés en Afrique et le principal défi est la prolifération d'opérations artisanales qui imposent un énorme fardeau en matière d'autorisation et d'inspection, comme l'a bien montré le projet Lead Recycling Africa.[112] Ce modèle pose également d'autres problèmes propres aux batteries LIB. Alors que les batteries plomb-acide n'ont qu'une seule chimie, les LIB existent en plusieurs chimies différentes qui nécessitent des technologies de recyclage différentes. Les flux de différentes chimies sont plus susceptibles d'être mélangés dans un environnement de marché libre, ce qui exige un étiquetage complet des produits pour garantir une manipulation et un traitement sûrs. En outre, le démontage des packs LIB est beaucoup plus compliqué que celui des batteries plomb-acide et, s'ils ne sont pas complètement déchargés, des explosions catastrophiques peuvent se produire.

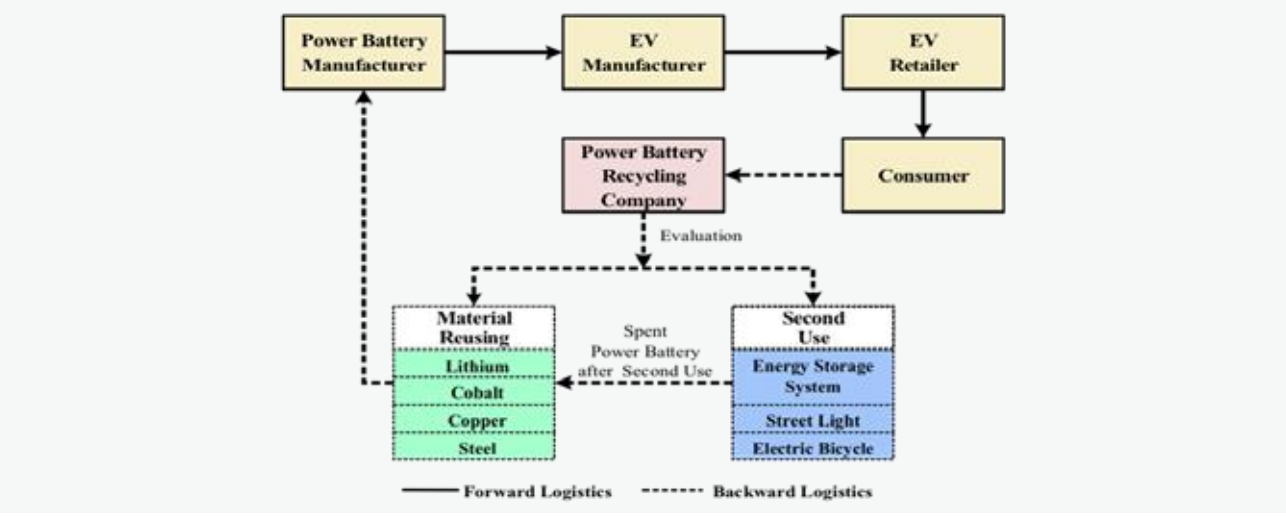


Figure 17. Un couplage possible entre le recyclage et les opérations de seconde vie où l'opération de recyclage effectue les tests d'état de santé des blocs de batteries de véhicules électriques (VE) usagés[115].

Bien que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour déterminer l'environnement politique le plus approprié, certaines considérations générales peuvent être énoncées ici. Par exemple, le stock et les flux de matériaux doivent être quantifiés afin de développer des politiques qui guident la seconde utilisation sûre des blocs de batteries usagées des véhicules électriques, compte tenu de l'hétérogénéité de ces blocs.[113] Cela signifie que des normes techniques appropriées devront être développées pour réglementer la collecte, le transport et les tests des batteries usagées avant qu'elles ne puissent être réutilisées pour des applications de seconde vie. En particulier, le cadre réglementaire doit prendre en compte le risque accru auquel est exposé l'utilisateur de seconde vie, car l'état de santé d'une batterie usagée dépend fortement de son historique d'utilisation. Il est donc nécessaire de mettre en place un cadre réglementaire qui permette la classification et le traitement des batteries LIB en fin de vie. Il existe notamment un large éventail de technologies de recyclage des LIB, comme le montre la Figure 17.[114] Par conséquent, la technologie la plus appropriée peut être déterminée une fois que les caractéristiques des LIB sont connues, c'est-à-dire les chimies et les quantités.

[113] E. Martinez-Laserna, I. Gandiaga, E. Sarasketa-Zabala, J. Badeda, D.L. Stroe, M. Swierczynski, A Goikoetxea, Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art, Renewable and Sustainable Energy Reviews 93 (2018): DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.035.-

[114] M. Chen, X. Ma, B. Chen, R. Arsenault, P. Karlson, N. Simon, Y. Wang, Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries, Joule 3 (2019) 1–25: https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.014.

[115] E. Mossali, N. Picone, L. Gentilini, O. Rodrìguez, J.M. Pérez, M. Colledani, Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments, Journal of Environmental Management 264 (2020) 110500: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110500.

Des incitations politiques doivent être déployées pour attirer les acteurs privés dans l'activité de recyclage des LIBs afin qu'une infrastructure robuste de collecte et de recyclage des déchets de LIBs puisse être établie. En particulier, il convient de noter que l'activité de seconde vie et de recyclage des LIBs est sensible au prix des nouvelles batteries. Par conséquent, il est possible que ce prix tombe en dessous de la marge de rentabilité de cette activité de recyclage à l'avenir. Dans ce cas, il pourrait être nécessaire de mettre en place de nouvelles mesures d'incitation gouvernementales pour soutenir l'élimination continue des déchets dangereux de LIB dans l'environnement. Étant donné qu'une stratégie plus efficace de recyclage des LIB nécessite la séparation des flux de déchets de LIB en fonction de leur composition chimique, des réglementations en matière d'étiquetage devraient être élaborées afin que la composition chimique des LIB puisse être facilement identifiée à partir du boîtier du produit. Ainsi, des programmes d'éducation du public pour soutenir le recyclage seront nécessaires pour que le public comprenne les risques et les avantages du recyclage des LIBs. Enfin, en l'absence d'infrastructures de recyclage, il peut être possible d'éliminer temporairement de petites quantités de LIB usagées entièrement déchargées dans des décharges scellées pour empêcher la contamination des eaux souterraines par les lixiviats métalliques.

7.6 Conclusion

Les gouvernements africains sont encouragés à créer des cadres politiques et juridiques qui peuvent stimuler et soutenir une chaîne de valeur viable pour la technologie des batteries lithium-ion sur le continent. Cela nécessitera une stabilité politique, une prévisibilité et une transparence réglementaire afin d'atteindre une durabilité sociale, technologique et environnementale. En retour, ces cadres politiques et réglementaires pourraient améliorer la conduite des affaires et réduire les risques liés aux investissements à long terme pour le secteur privé. Ces politiques peuvent être mises en œuvre aux niveaux national, régional et continental pour garantir que les investissements appropriés sont proposés par le secteur privé. Il est nécessaire d'investir dans l'activité de recyclage des LIBs afin d'établir une infrastructure solide de collecte et de recyclage des déchets de LIBs. Notamment, le secteur de la seconde vie et du recyclage des LIB est sensible au prix des nouvelles batteries, ce qui a un impact sur la marge de rentabilité du secteur du recyclage à l'avenir. Cependant, l'incitation et le renforcement de la capacité de l'entreprise de recyclage garantiront l'élimination continue des déchets dangereux de LIBs de l'environnement.

8

Jeunesse, compétences et développement des capacités

8.1 Développement des ressources humaines et enseignement des technologies

La technologie de stockage de l'énergie continuera à jouer un rôle important dans la promotion d'un environnement plus vert, la stimulation de l'industrie par un approvisionnement énergétique fiable et la réduction de la pauvreté par la création d'emplois Par conséquent, pour profiter de cette énorme opportunité, l'Afrique doit investir massivement dans le développement des ressources humaines et l'éducation technologique concernant les batteries de nouvelle génération Pour assurer la continuité des activités au taux d'expansion prévu, l'accent doit être mis sur le développement des ressources humaines.

Actuellement, l'essentiel des technologies de batteries avancées est développé dans l'hémisphère nord. D'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement de la prochaine génération de batteries, comme les batteries à l'état solide et les nanotechnologies. Il n'est donc pas surprenant que presque toutes les ressources intellectuelles soient également situées dans le nord. Par exemple, le Japon et la Corée du Sud dominent la mise au point de nouvelles technologies, tandis que la Chine domine la production et le déploiement de masse. Les États-Unis d'Amérique et l'Allemagne ont également contribué à améliorer les technologies, la fabrication et les processus de test des batteries. Toutefois, le plus grand réservoir de ressources humaines se trouve en Asie, ce qui explique que de nombreuses start-up d'Europe et des États-Unis d'Amérique se lancent dans la chasse aux têtes en Asie. C'est le cas de la société suédoise Northolt, qui emploie l'ancien cadre de Sony et de BASF, Yasuo Anno, comme directeur du développement. Par conséquent, avec un solide programme de développement des ressources humaines et l'enseignement des technologies en Afrique, il est possible d'améliorer de manière significative les compétences des jeunes en Afrique et d'améliorer les perspectives de création d'emplois et d'emploi des jeunes. Ainsi, l'Afrique doit mettre en place des politiques favorables qui soutiendront ces efforts et amélioreront les perspectives de la prochaine génération de vie technologique des batteries sur le continent africain.

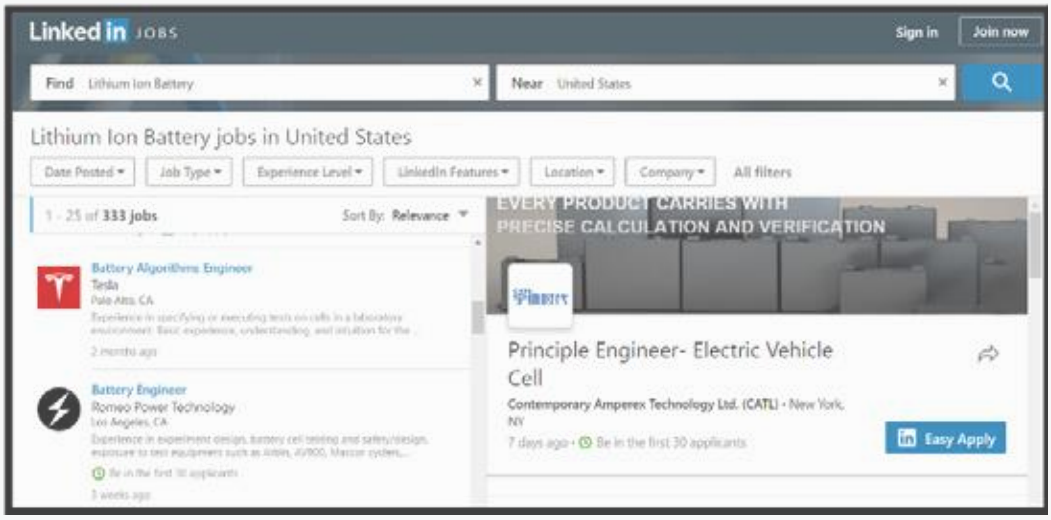


Figure 18. Emplois liés montrant les emplois dans le domaine des batteries lithium-ion aux États-Unis

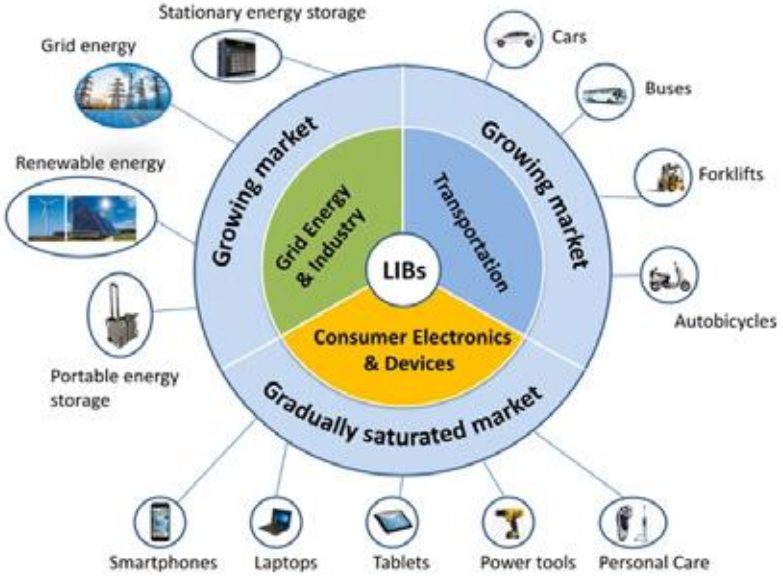
8.2 Investissement dans la recherche pour la prochaine génération de technologies de batteries

De nombreuses universités de l'hémisphère nord, des laboratoires nationaux et d'autres établissements d'enseignement supérieur ont établi un programme d'études pour former les apprenants aux technologies des batteries, ainsi que pour mettre au point de nouvelles technologies et méthodologies. Par exemple, en Afrique du Sud, plusieurs initiatives et institutions dirigées par le gouvernement ont été créées pour s'occuper des batteries de nouvelle génération et du développement des ressources humaines. Une institution de premier plan en Afrique du Sud est l'Energy Storage Innovation Laboratory de l'Université de Western Cape, dirigé par le professeur Ben Bladergroen. L'Energy Storage Innovation Laboratory a été lancé en 2015 et se concentre sur les systèmes de stockage d'énergie électrochimique, notamment le développement de batteries Li-ion, NaFeCl2 et NiFe. Ce laboratoire a été créé comme une plateforme pour commercialiser les technologies émergentes en partenariat avec les entreprises locales. Parmi les autres initiatives sud-africaines concernant les batteries, citons le Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), qui dispose d'une unité chargée des matériaux énergétiques, Uyilo, qui possède un laboratoire d'essai des batteries, la South African Nuclear Energy Corporation (NECSA), qui se concentre sur le développement du LiFP6, l'université de Limpopo, qui fabrique des précurseurs, et la Nelson Mandela Metropolitan University, qui se consacre à la certification des

Si les initiatives visant à investir dans l'éducation à la technologie des batteries et les industries connexes sont louables, elles sont loin d'être suffisantes. Un défi auquel sont confrontés de nombreux pays africains est l'accès au financement pour établir un centre remarquable pour l'excellence de la technologie des batteries de prochaine génération. Il est donc plus raisonnable de suggérer que les centres de technologie de batteries de prochaine génération soient établis dans des régions et/ou des pays désignés qui ont un meilleur accès aux matières premières essentielles des batteries. Par exemple, un centre technologique spécialisé devrait être établi en Afrique du Sud en raison de l'abondance de manganèse et de spath fluor. Cela peut permettre de combiner de manière incroyable les ressources d'experts afin qu'un effort commun et concentré soit appliqué pour faire progresser la base de connaissances et les développements actuels. Un autre pôle technologique spécialisé pourrait être établi en Afrique de l'Ouest, peut-être au Ghana ou en Guinée, en raison de l'abondance de bauxite (aluminium) et de graphite. Et un autre centre pourrait être ouvert en République démocratique du Congo en raison de la dépendance du monde à l'égard de ses réserves de cobalt. Les efforts d'enrichissement locaux peuvent financer ces centres technologiques afin d'améliorer le traitement et l'enrichissement des matières premières pour augmenter la valeur des matériaux exportés. Les ressources humaines peuvent être développées pour comprendre les processus de fabrication des batteries. Des recherches peuvent être menées pour découvrir la prochaine meilleure solution possible pour les batteries.

8.3 Conclusion

Si les pays africains possèdent uniquement les matières premières nécessaires à la fabrication des batteries, l'Afrique restera une économie extractive. Cependant, une valorisation minimale de ces matières se traduira par des taux de croissance du PIB faibles ou négatifs et une forte dépendance à l'égard de l'assistance technique et financière d'autres pays. Pour changer ce paysage, il faut mettre l'accent sur le renforcement de l'éducation technologique en suscitant une soif de progrès dans la société. Dès l'enseignement de base et secondaire, les matières scientifiques, technologiques, d'ingénierie et mathématiques (STEM) doivent être promulguées, ainsi qu'une stratégie claire sur les technologies sur lesquelles l'Afrique doit se concentrer pour son avenir. Par conséquent, avec un solide programme de développement des ressources humaines et l'enseignement des technologies en Afrique, il est possible d'améliorer de manière significative les compétences des jeunes en Afrique et d'améliorer les perspectives de création d'emplois et d'emploi des jeunes. Cela peut être rendu possible par des politiques délibérément favorables qui soutiendront de tels efforts et amélioreront les perspectives de la prochaine génération de vie technologique des piles sur le continent africain.



Source: Ding, Y., Cano, Z.P., Yu, A. et al. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. Electrochem. Energ. Rev. 2, 1–28 (2019). https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z

9

État de préparation de l'Afrique pour la mise en œuvre des technologies de batteries de prochaine génération

L'Afrique a un énorme retard en matière de recherche et d'innovation dans de nombreux domaines, et le stockage de l'énergie ne fait pas exception. Par conséquent, en l'absence d'une approche coordonnée, il est peu probable qu'un NGB grand public soit développé et commercialisé en Afrique. Cela ne sera pas dû à un manque de potentiel, mais à la concurrence féroce qui règne dans le monde entier. Cette concurrence est alimentée par la promesse de générer 300 milliards de dollars de revenus d'ici 2024. Ainsi, la volonté de l'Afrique de participer à la mise en œuvre du NGB repose principalement sur l'avantage stratégique de ses ressources. Ce rapport aborde plusieurs aspects clés de l'aptitude de l'Afrique à mettre en œuvre les technologies NGB, en mettant l'accent sur le cadre institutionnel, les infrastructures et le capital humain. Le rapport a également identifié les forces existantes en Afrique, tout en soulignant les domaines de préoccupation et en suggérant des approches possibles pour surmonter les défis potentiels. L'hypothèse est que la disponibilité du marché est basée sur les niveaux extrêmement bas d'électrification, car ce défi de l'électrification a déjà été évoqué dans ce rapport.

9.1 Cadre institutionnel

L'ensemble du programme rassemble une grande diversité d'acteurs issus des gouvernements des États membres, des industries, des universités et des institutions de recherche. En particulier, l'APET privilégie une forme institutionnelle de cadre, qui est axée sur la mission et peut coordonner efficacement toutes les composantes et tous les acteurs hétérogènes pour les conduire vers une vision partagée avec succès. Comme nous le verrons dans la section suivante, l'APET suggère une triple hélice, avec la contextualisation appropriée, comme modèle de référence adéquat pour le développement du cadre institutionnel.[116]

9.1.1 Modèle

Pour gérer et mettre en œuvre l'ensemble du programme exposé dans ce rapport, l'APET propose que la première étape consiste à créer une institution à part entière. Cependant, il est essentiel que le conseil d'administration de cette organisation soit composé des principaux décideurs des gouvernements, des industries, des universités et des institutions de recherche des États membres. Pour les besoins de référence tout au long de ce rapport, cette nouvelle institution a été désignée sous le nom de Conseil africain pour l'innovation dans les batteries (ABIC). L'ABIC aura un mandat clair pour remplir toutes les fonctions prescrites ou impliquées par ce rapport, en créant et en administrant une infrastructure institutionnelle appropriée pour réaliser la vision et les objectifs de ce rapport. En conséquence, la Commission de l'UA veillera à ce que l'ABIC soit dûment et rapidement constitué et mis en service, et qu'il dispose des ressources et des pouvoirs adéquats pour remplir ses fonctions. La nouvelle infrastructure institutionnelle complète, dont l'ABIC est le niveau le plus élevé, est envisagée dans le cadre bien établi de la triple hélice pour les systèmes d'innovation, comme le montre la figure 19. La triple hélice est une forme institutionnelle qui résulte de la réunion du monde universitaire,

[116] Y. Cai, What contextual factors shape 'innovation in innovation'? Integration of insights from the Triple Helix and the institutional logics perspective, Social Science Informa- tion (2015) 1–28: DOI: 10.1177/0539018415583527.
[117] https://doi.org/10.4324/9781315620183

de l'industrie et des acteurs publics pour former une interface trilatérale d'un réseau de partenaires égaux qui collaborent étroitement.[117] Il existe de nombreuses preuves du succès de cette forme institutionnelle dans la conduite de systèmes d'innovation à grande échelle. Les exemples proviennent d'économies développées telles que le Japon, l'Europe et l'Amérique du Nord.[118] Ce modèle a également été observé dans des pays en développement tels que la Chine et le Pakistan, qui sont les meilleurs témoins de ce succès. En outre, il existe des études qui ont démontré la mise en œuvre réussie d'un tel modèle dans le cas spécifique de la technologie des batteries lithium-ion dans le cas du Joint Centre for Energy Storage Research aux États-Unis d'Amérique.[119]

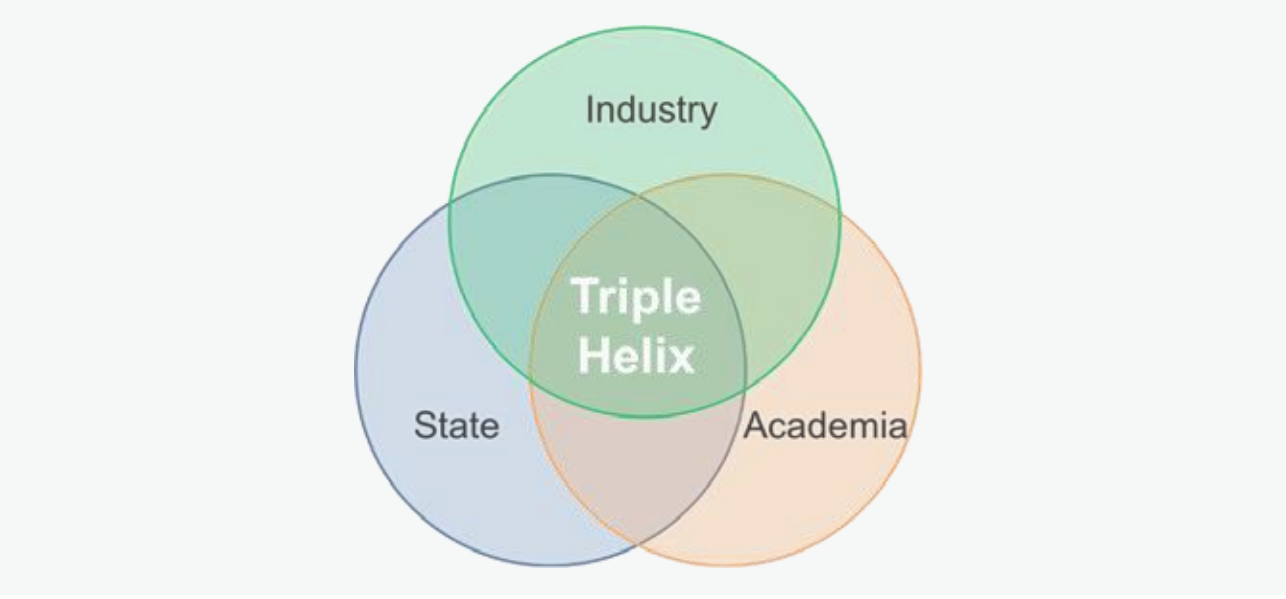


Figure 19. La "Triple hélice", l'espace hybride transversal composé d'acteurs de l'État, de l'industrie et des institutions académiques qui collaborent étroitement pour co-créer des produits et services innovants. Il a été démontré qu'il s'agit du point de convergence des systèmes d'innovation performants et qu'il intègre à la fois l'offre et la demande d'innovation.

Au sein de la triple hélice se trouvent des espaces d'innovation intégrés, tels qu'un modèle similaire à la Materials Innovation Factory de l'université de Liverpool.[120] Dans ce cas particulier, des universitaires, des chercheurs, des start-ups et des entreprises mondiales de premier plan, ainsi que des robots sur mesure et des capacités numériques, sont réunis sous un même toit.[121] Il est essentiel que ces espaces d'innovation soient dotés d'une capacité intégrée à agir comme un écosystème de transfert de technologie qui facilite le développement, la commercialisation et l'adoption de produits. Pour cela, l'APET suggère la création d'un Centre africain de transfert de technologie (ATTC) sous l'égide de l'ABIC en tant qu'institution qui soutient directement les innovateurs et les entrepreneurs. Ce centre fournira également l'infrastructure du marché de la propriété intellectuelle pour gérer l'ensemble du processus de brevetage qui implique le dépôt de demandes, l'octroi de licences et les transferts, et encourager la déclaration des brevets sur une base internationale. ATTC peut également faciliter l'établissement et la normalisation de processus et de produits techniques pertinents. Pour ce faire, il existe de nombreux modèles appropriés qui peuvent être adaptés pour la création de cette entité. Citons par exemple le Robert C. Byrd National Technology Transfer Centre (États-Unis), le China International Technology Transfer Centre et le Cercle des offices européens de transfert de technologie. En outre, il est également nécessaire que le ATTC établisse des alliances synergiques avec des initiatives d'innovation existantes telles que le Sommet de l'innovation en Afrique. Dans ce cadre institutionnel à triple hélice,

118 https://doi.org/10.5367/ihe.2013.0165
119 M.A. Shapiro, The Triple Helix within the lithium-ion battery research network: a case study of JCESR, Translational Materials Research (2018) 5 044001: DOI: https://doi. org/10.1088/2053-1613/aae860.
120 https://www.liverpool.ac.uk/materials-innovation-factory/
121 https://www.unilever.com/news/news-and-features/Feature-article/2018/fast-tracking-discovery-at-the-materials-innovation-factory.html
122 https://doi.org/10.1007/978-3-319-91301-8, https://doi.org/10.1007/978-3-030-11735-1

il convient également de souligner la proposition de Société africaine de capital-innovation (AICC), abordée dans la section "Politique d'investissement" du chapitre 8. Il s'agit d'une institution essentielle conçue pour surmonter les barrières financières bien connues pour l'investissement dans le secteur énergétique africain.[122] Outre la structure à triple hélice, une deuxième considération clé dans l'organisation de la recherche, du développement et de l'innovation est de minimiser ou de contourner les énormes barrières découlant de la construction d'infrastructures physiques et d'installations de recherche. À cet égard, l'ABIC, après avoir déterminé les priorités de recherche pour l'ensemble de la chaîne de valeur, entreprendra une enquête détaillée sur les infrastructures à travers le continent. L'objectif de cette enquête est de déterminer où les installations et les compétences de recherche existent déjà ou peuvent être améliorées avec des ressources minimales et, parmi d'autres considérations stratégiques, de les faire correspondre aux priorités de recherche. Les considérations stratégiques pourraient inclure l'opportunité de co-localiser une priorité de recherche avec une zone stratégique pour un élément spécifique de la chaîne de valeur. Par conséquent, le programme de recherche, de développement et d'innovation de l'ABIC devrait être réparti sur tout le continent, comme indiqué au chapitre 7. En profitant des installations et des compétences existantes, l'ABIC peut lancer son programme de recherche plus rapidement et avec des coûts initiaux nettement inférieurs. Des modèles similaires existent déjà ailleurs, comme la Faraday Institution (Royaume-Uni) et le Joint Centre for Energy Storage Research (États-Unis d'Amérique). L'ensemble de l'infrastructure des centres de fabrication et des pôles d'innovation peut être mis en réseau par l'intermédiaire de l'ABIC afin de garantir une diffusion efficace des connaissances et la création continue d'opportunités de collaboration.[123]

9.1.2 Justification

Bien qu'il soit possible et encouragé pour les pays et régions individuels de mettre en œuvre le cadre institutionnel et politique proposé, la valeur optimale réelle de ce programme ne peut être réalisée que par une stratégie à l'échelle du continent. Il y a plusieurs raisons de plaider en faveur de cette approche. Premièrement, le fondement du programme proposé est l'avantage stratégique évident de l'Afrique en matière d'abondance de ressources minérales en batterie. Toutefois, aucun État membre de l'UA ne possède à lui seul tous les principaux minéraux nécessaires à la technologie de pointe des batteries lithium-ion. Ainsi, le plein avantage concurrentiel ne peut être atteint que par une consolidation judicieuse des avantages complémentaires des différents pays. Deuxièmement, la fabrication de batteries lithium-ion n'est pas une activité neutre en termes d'échelle et il faut donc atteindre une "masse critique". Sans aucun doute, la formule gagnante est le modèle de giga-échelle maintenant largement mis en œuvre dans le monde entier.

Il est à noter que les fabricants africains, qui font partie du marché mondial en pleine évolution, devront concurrencer ces producteurs mondiaux à grande échelle. Cela est pratiquement impossible sans tirer la véritable valeur de la technologie qui réside dans les économies d'échelle. Les tentatives de fabrication à la mauvaise échelle pourraient complètement anéantir notre avantage concurrentiel fondamental face à une concurrence mondiale intense. En tant que référence industrielle, une capacité de production de 10 GWh/an est considérée comme la limite inférieure pour atteindre les effets d'échelle nécessaires à une production compétitive en termes de coûts [Boston Consulting Group]. Ceci est cohérent avec les conclusions d'un rapport récent de McKinsey selon lequel les usines de plus de 8 GWh/an sont deux fois plus productives par dollar que les usines plus petites.[124] Pour le cas spécifique de la chimie NCA, un modèle récent a donné des résultats assez similaires, comme le montre la Figure 20.

[123] K. Palage, R. Lundmark, P. Söderholm, The innovation effects of renewable energy policies and their interaction: the case of solar photovoltaics, Environmental Economics and Policy Studies, 21 (2019) 217-254: DOI: 10.1007/s10018-018-0228-7.

[124] https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/recharging-economies-the-ev-battery-manufacturing-outlook-for-europe.

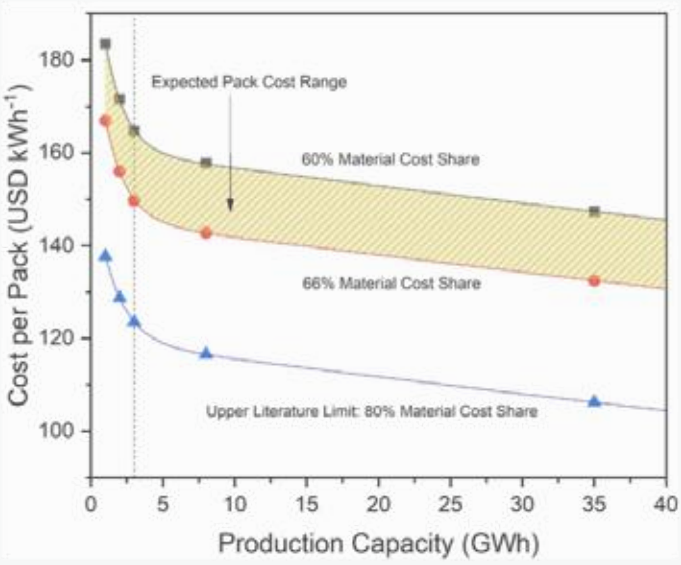


Figure 20. Coût par pack de batteries pour les batteries basées sur la chimie des cellules NCA/Gr en fonction de la capacité de production de l'usine, les courbes représentant respectivement une part de 60 %, 66 % et 88 % du coût des matériaux. La ligne en pointillé indique 3 GWh, le point auquel les effets d'économie d'échelle basés sur le processus atteignent leur maximum.[125,126]

Une stratégie à l'échelle du continent pourrait offrir une voie vers l'utilisation la plus efficace des budgets maigres de l'Afrique grâce à l'agrégation, la cohésion et la synergie au lieu d'une multiplicité de programmes disparates sous-financés. En outre, une institution unique chargée de la supervision stratégique de l'ensemble du programme peut assurer la rationalisation en évitant la fragmentation et la duplication des efforts. Cela peut également permettre une agilité stratégique impérative pour la préparation technologique dans un environnement mondial en évolution rapide. En outre, les premières phases du programme d'industrialisation proposé reposent largement sur l'investissement direct étranger (IDE), principalement en raison de la nécessité inéluctable de trouver des partenaires technologiques. Il s'agit notamment d'investissements importants qui ne peuvent être récupérés que sur de longues périodes et la sécurité des investissements doit être garantie.

La réalité est que les États membres de l'UA continuent d'entrer et de sortir de la tourmente. Par conséquent, l'Afrique obtient des résultats médiocres sur la plupart des paramètres standard d'attractivité des IDE, tels que résumés dans l'indice mondial d'attractivité des IDE. Dans une telle situation, un programme économique soutenu par l'appareil de l'UA et capable de protéger son infrastructure économique critique contre l'instabilité, préservant et garantissant ainsi la sécurité des investissements, peut être attrayant pour les IDE. Il va sans dire que la stratégie à l'échelle du continent donnera un nouvel élan au mouvement actuel vers l'établissement de la Zone de libre-échange continentale africaine (ZLECA), qui devrait entrer dans sa phase opérationnelle. En outre, le "Cadre d'action provisoire" de la Vision minière africaine souligne que l'Afrique ne pourra atteindre son objectif ultime d'industrialisation et de développement qu'en agissant collectivement. Il est également nécessaire de reconnaître l'importance du développement des ressources humaines et de la recherche et du développement visant à développer les capacités locales pour soutenir son effort d'industrialisation.[127]

[125] M. Wentker, M. Greenwood, J. Leker, A bottom-up approach to lithium-ion battery cost modelling with a focus on cathode active materials, Energies 12 (2019) 504: https:// doi.org/10.3390/en12030504.
[126] https://seekingalpha.com/article/4352962-why-tesla-should-be-aware-of-new-holy-grail-in-lithium-batteries.
[127] https://au.int/sites/default/files/documents/30984-doc-africa_mining_vision_english.pdf.

Si une stratégie à l'échelle du continent au niveau de l'UA s'avère irréalisable, une stratégie alternative pourrait consister à former un Groupe africain des batteries composé de tous les États membres de l'UA qui ont des avantages concurrentiels certains dans le domaine des batteries lithium-ion. Cette formation peut alors mettre en œuvre le programme proposé avec un modèle approprié de notre cadre institutionnel proposé. Dans tous les cas, l'APET prévoit qu'il y aura une recherche considérable et un brainstorming public pour générer des idées pratiques et créatives sur la façon dont ce cadre institutionnel peut être concrétisé avec succès.

9.2 Infrastructure: Industrialisation immédiate

Actuellement, il n'y a pas d'usine de batteries lithium-ion en Afrique. L'installation à l'échelle du laboratoire de l'Université de Western Cape est ce qui se rapproche le plus d'une usine de batteries au lithium-ion en Afrique. Une partie de l'infrastructure requise pour une industrialisation immédiate est une usine pilote (d'une capacité de 300 MWh) basée sur des technologies de fabrication de pointe. Elle peut être utilisée pour la recherche et la formation tout en produisant un produit commercial. La décision concernant l'usine pilote doit être prise en consultation avec les partenaires industriels. Par conséquent, l'une des premières priorités de l'ABIC est d'établir un partenariat avec l'industrie pour construire un consortium dirigé par l'industrie qui conduira l'investissement dans l'usine pilote. Par conséquent, l'APET suggère que l'ABIC investisse environ 30 % dans l'usine pilote. Le principal intérêt d'ABIC pour l'usine pilote est de mener un programme de recherche sur les technologies de fabrication de batteries afin de développer des plateformes réalistes pour les approches de l'usine du futur qui seront nécessaires pour une production locale à grande échelle. Les techniques de fabrication avancées peuvent réduire considérablement les coûts de production, permettant à l'industrie africaine de résister à une concurrence mondiale agressive.

9.2.1 Avantage des matières premières

Comme nous l'avons déjà vu au Chapitre 7, la mesure la plus importante de la capacité de l'Afrique à prendre le contrôle de la chaîne de valeur des batteries lithium-ion est sa possession des cinq principaux minéraux pour batteries Ces minéraux sont le lithium, le cobalt, le nickel, le manganèse et le graphite. Comme nous l'avons décrit, l'état de production de ces minéraux en Afrique comprend la production commerciale de cobalt, de cuivre et de manganèse. Il implique également une échelle pilote ou de laboratoire comme le lithium et les projets actuels de nickel et de graphite.

La production commerciale comprend Eurasian Resources Group (ERG) et la Manganese Metal Company d'Afrique du Sud. La filiale d'ERG, Chambishi Metals Plc, exploite une raffinerie produisant à la fois du cobalt prêt pour les batteries (6 800 tpa) et du cuivre (55 000 tpa) en Zambie. D'autre part, Manganese Metal Company est le seul producteur mondial non chinois (30 000 tpa) de manganèse électrolytique. Toutefois, 95 % du manganèse est exporté[128]. Cependant, il n'existe qu'une seule usine pilote/laboratoire signalée produisant du matériau de qualité batterie. En 2018, la société Prospect Mineral Resources a mis en service une petite usine pilote de carbonate de lithium (1 200 kg/an) pour produire un matériau de qualité batterie (pureté de 99,9 %) dans le cadre du projet Acardia Lithium au Zimbabwe.[129] Néanmoins, il est encourageant de constater que certaines initiatives de valorisation des minéraux ciblant la chaîne de valeur des batteries lithium-ion ont déjà lieu. Par exemple, Thakadu Battery Materials en Afrique du Sud est en train de construire une raffinerie de nickel pour produire 25 000 tpa de sulfate de nickel de haute pureté prêt pour les batteries à partir d'un flux brut fourni par Sibanye-Stillwater (anciennement connu sous le nom de Lonmin).[130]

En outre, plusieurs projets récents sont en cours pour le graphite. Citons par exemple le projet Epanko Graphite de Kibaran Resources, qui vise à produire 60 000 tpa de graphite prêt pour les batteries en Tanzanie,[131] le projet Mahenge Liandu Graphite d'Armadale Capital (Tanzanie), et le projet Montepuez Graphite de Battery Minerals au Mozambique.[132] L'exploration minière pour les batteries est également active dans une grande partie de l'Afrique. Par exemple, African Battery Minerals a des programmes d'exploration actifs en République démocratique du Congo, au Cameroun et en Côte d'Ivoire.[133] Montero Mining and Exploration prospecte activement le lithium en Namibie.[134]

[128] https://www.mmc.co.za/
[129] https://www.mining-technology.com/projects/arcadia-lithium-project-harare/
[130] http://thakadugroup.com/in-the-press/
[131] https://www.kibaranresources.com/projects/epanko-graphite-project-knl-100/
[132] https://www.batteryminerals.com
[133] https://www.abmplc.com
[134] https://monteromining.com/projects/exploration-and-development-focus/

En outre, comme prévu, la production de matériaux de qualité batterie en Afrique est actuellement axée sur le marché mondial et, dans de nombreux cas, des accords d'écoulement à long terme sont déjà en place. Bien que ces accords puissent initialement limiter la capacité des producteurs à approvisionner le marché africain, il est intéressant de noter que cette infrastructure existe déjà et qu'elle pourrait être améliorée rapidement pour répondre à la demande locale.

9.2.2 Avantage de la technologie de fabrication

L'inexistence d'une usine de batteries lithium-ion en Afrique présente une opportunité de faire un bond en avant dans la technologie de fabrication. L'usine pilote proposée devrait être utilisée comme un banc d'essai pour les concepts d'usine du futur afin de développer des technologies de fabrication avancées locales nécessaires pour prendre le contrôle total de la chaîne de valeur des batteries.

9.2.3 Avantage logistique

L'expédition de matières premières de l'Afrique vers la Chine, leur traitement et leur transformation en batteries qui sont ensuite renvoyées en Afrique représentent un coût important. La logistique représente au moins 10% du coût au débarquement des batteries. Ce coût représente un avantage concurrentiel distinct pour la production de lithium-ion sur le continent africain. La production initiale de batteries en Afrique est destinée à la consommation intérieure. Il s'agit notamment de la principale stratégie commerciale initialement adoptée par l'industrie chinoise.

9.3 Infrastructure: Recherche, développement et innovation

9.3.1 Installations à grande échelle pour la recherche sur les matériaux

La découverte des matériaux est au cœur des technologies de batteries de la prochaine génération. Par conséquent, les installations à grande échelle pour la caractérisation des matériaux, à savoir les sources de rayonnement synchrotron et les réacteurs nucléaires de recherche (en tant que sources de neutrons), sont essentielles à la réussite d'un programme de découverte des matériaux. Or, ces installations ne sont actuellement pas disponibles en Afrique. Il existe un mouvement fort appelé The African Light Source135 qui promeut l'établissement d'une installation synchrotron continentale. Ces efforts doivent être soutenus au plus haut niveau de l'UA.

Actuellement, huit pays africains disposent de réacteurs nucléaires de recherche. Ces pays sont l'Afrique du Sud, la République démocratique du Congo, l'Égypte, l'Algérie, le Maroc, le Nigeria, le Ghana et la Libye. Parmi ceux-ci, seul le NECSA en Afrique du Sud dispose d'une instrumentation limitée pour soutenir certains des processus de caractérisation requis. Par conséquent, la majeure partie de la caractérisation des matériaux avancés (synchrotron et neutrons) devra initialement être effectuée dans des installations internationales Par exemple, elles peuvent être effectuées à l'ILL (France), à ISIS (Royaume-Uni) et à OPAL (Australie). Cependant, une étude est nécessaire pour déterminer la disponibilité et la répartition des installations nationales de taille moyenne au sein des universités et des centres de recherche qui fournissent la diffraction des rayons X, la microscopie électronique (microscopie électronique à balayage à haute résolution et microscopie électronique à transmission), la résonance magnétique des noyaux et la spectrométrie de masse. La plupart de ces instruments sont disponibles dans les universités et les instituts de recherche en Afrique du Sud, au Botswana et dans plusieurs autres pays. On s'attend à ce qu'il y ait suffisamment d'installations à petite échelle (groupes de recherche individuels) qui fournissent des méthodes optiques, de l'électrochimie, et plus encore. Elles devraient être identifiées et renforcées si nécessaire.

9.3.2 Infrastructure de calcul à haute performance

Les méthodes de calcul basées sur la mécanique quantique sont devenues un élément indispensable de la boîte à outils de la découverte de matériaux avancés. Il est intéressant de noter qu'il existe une infrastructure croissante dans le domaine du calcul à haute performance (HPC), à partir du Centre for High- Performance Computing (CHPC) lancé en 2007 au Cap. Des déploiements sont en cours en Namibie, au Ghana, en Zambie, au Kenya, au Mozambique et à Madagascar. Si l'expansion de l'infrastructure HPC en Afrique est en grande partie motivée par la demande de données volumineuses

135 http://www.africanlightsource.org

du Square Kilometre Array (SKA). En outre, la recherche en science des matériaux dispose généralement d'une capacité raisonnable sur laquelle elle peut s'appuyer. La charge de calcul totale sera répartie entre les différents sites HPC nationaux, mais on peut estimer qu'une capacité combinée dédiée d'au moins 300 téraflops. Ces 300 téraflops seront nécessaires pour prendre en charge les méthodes standard et avancées à haut débit et d'apprentissage automatique requises. Toutefois, une évaluation est nécessaire pour vérifier la disponibilité de cette capacité à partir des ressources disponibles. Parallèlement à cette infrastructure de calcul haute performance, l'Afrique dispose d'une base de compétences croissante dans le domaine de la science computationnelle des matériaux, sous l'impulsion de l'African School on Electronic Structure Methods and Applications (ASESMA), qui existe depuis 2008. Ce programme, qui devrait se poursuivre au moins jusqu'à l'année prochaine, a permis de former des centaines d'étudiants et d'universitaires africains à la science computationnelle des matériaux, une ressource précieuse pour ce projet. Ce projet devrait faciliter l'extension du programme ASESMA au-delà de 2020.

9.4 Le capital humain

La Banque mondiale (2014) a indiqué que le développement sur une décennie de la qualité de la recherche en sciences, technologies, ingénierie et mathématiques (STEM) en Afrique subsaharienne est resté assez faible, à environ 32% en dessous de la moyenne mondiale.[136] Cette tendance s'est caractérisée par seulement 29% de la production totale de recherche de la région. En comparaison, la production de recherche STEM s'est avérée être de 68% en Malaisie et au Vietnam, sur la même période que l'Afrique. Notamment, ce rapport a formulé trois observations et recommandations clés pertinentes pour le programme que nous proposons, comme suit :

- La qualité et la quantité de la recherche sont affectées par la fragmentation des efforts qui se reflète dans les niveaux extrêmement bas (2%) des collaborations intra-africaines. Il est donc essentiel d'étendre et d'approfondir les collaborations intra-africaines de manière substantielle. Cela peut se faire en développant les programmes régionaux de recherche et d'éducation basés sur la recherche existants. Il s'agit notamment de programmes tels que l'Institut africain des sciences mathématiques, les centres d'excellence africains, l'initiative régionale pour l'enseignement des sciences, l'université panafricaine, les instituts Nelson Mandela pour la science et la technologie et le FORUM de l'université de Rhodes. La stratégie à l'échelle du continent préconisée dans ce rapport pourrait offrir la meilleure plate-forme pour tirer parti de ces institutions existantes afin de stimuler et de soutenir la collaboration intra-africaine.
- Le transfert de connaissances et la collaboration entre les universités impliquées dans la recherche STEM et le secteur privé sont limités en Afrique. Par conséquent, le programme de recherche proposé, axé sur l'industrie et situé au cœur de la triple hélice, rassemble toutes les parties prenantes concernées pour entreprendre des recherches ciblées ayant une utilité technologique directe et bien définie.
- Même si la qualité de la recherche menée par les membres de la diaspora de retour au pays est exceptionnellement élevée, elle ne représente qu'environ 3 % de la production totale de la recherche. Le rapport a conclu que cette constatation empirique corrobore la croyance répandue selon laquelle la diaspora scientifique africaine, nombreuse et bien formée, en Europe, en Amérique du Nord et ailleurs, devrait être davantage exploitée pour augmenter la quantité et la qualité de la recherche en SSA. L'APET est convaincue que des liens plus forts peuvent être établis avec la diaspora scientifique africaine. Cela ne peut se faire uniquement par le biais de leur implication intellectuelle dans l'entreprise de recherche africaine, mais aussi (et surtout) en investissant financièrement dans la recherche africaine. Cet investissement peut être réalisé dans des cadres tels que les obligations de la diaspora proposées dans ce rapport. En outre, étant donné que les preuves ont démontré une compétence claire en matière de recherche pour les rapatriés de la diaspora, il est important d'identifier et d'exploiter pleinement cette ressource précieuse pour le programme, le bénéfice et le renforcement des capacités proposées par l'Afrique.

D'autres initiatives devraient également être envisagées pour le développement du capital humain nécessaire au soutien de l'ensemble de la technologie des batteries lithium-ion. Par exemple, il convient de rechercher une expertise internationale pour former et développer les talents de l'Afrique. Cela peut se faire par le biais d'une coopération avec des universités et des institutions de classe mondiale afin d'établir des antennes pour la recherche et la formation dans les pôles d'innovation de la technologie des batteries en Afrique. La promotion de la découverte et de l'innovation menant à des résultats technologiques profonds peut également être réalisée par le biais d'incitations telles que les prix du grand défi. Parmi les exemples en Europe, citons le prix Horizon EIC de 10 millions d'euros pour des batteries innovantes pour les véhicules électriques, administré par le Conseil européen de l'innovation.

[136] https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/23142/9781464807008.pdf?sequence=1.

Notamment, la création et le développement d'un écosystème d'innovation nécessitent de réunir périodiquement toutes les parties prenantes clés afin d'articuler un récit inspirant et un sens clair de la mission. Cela peut prendre la forme de conférences et d'expositions annuelles servant de plates-formes pour la communication technique, la présentation des percées et le développement et le renforcement des collaborations multisectorielles. Par ailleurs, il existe également des programmes de formation en Afrique qui pourraient avoir besoin d'être renforcés et développés. Citons par exemple l'African Energy Leadership Centre de l'Université de Witwatersrand en Afrique du Sud.[137]

9.5 Conclusion

L'Afrique doit améliorer sa recherche et son innovation dans de nombreux domaines tels que le stockage de l'énergie par une approche coordonnée. Cela peut considérablement intégrer le développement et la commercialisation des NGB en Afrique. Cela rendra l'Afrique plus compétitive, augmentera son potentiel à l'échelle mondiale et générera d'urgence des revenus. En particulier, la volonté de l'Afrique de participer à la mise en œuvre des NGB repose principalement sur son avantage stratégique en termes de ressources. L'aptitude de l'Afrique à mettre en œuvre les technologies NGB doit se concentrer sur les cadres institutionnels, le développement des infrastructures et un capital humain solide. En outre, l'Afrique doit identifier ses forces existantes, tout en identifiant les domaines préoccupants qui doivent être traités de toute urgence. De cette manière, l'Afrique pourrait formuler des approches stratégiques pour surmonter les défis potentiels. Notamment, la création et le développement d'un écosystème d'innovation nécessitent de réunir périodiquement toutes les parties prenantes clés afin d'articuler un récit inspirant et un sens clair de la mission.

10

Recommandations

10.1 Ressources minérales et cadres réglementaires : recommandations aux États membres

Les recommandations que l'APET fournit aux États membres de l'Union africaine afin d'exploiter au mieux les batteries de nouvelle génération pour améliorer la capacité de stockage d'énergie sont résumées comme suit :

- Les dirigeants africains sont encouragés à modifier leur état d'esprit concernant la valeur des ressources. On peut notamment reconnaître que des gains monétaires beaucoup plus rapides peuvent être réalisés par la vente directe de ressources minérales. Toutefois, la valeur de ces ressources minérales est bien meilleure lorsqu'une partie importante de la chaîne de valeur est conservée à l'intérieur des frontières du continent. Les États membres sont encouragés à investir dans des usines locales pour le raffinage et l'enrichissement des ressources naturelles locales. Cette valorisation des minéraux locaux peut conduire à la production de précurseurs utiles pour les matériaux de base des batteries. Suivre cette suggestion permettra non seulement aux Africains de bénéficier de l'importante valeur ajoutée des matériaux en termes de rendement, mais aussi de stimuler la création d'emplois. Elle stimulera également la chaîne d'approvisionnement locale, ce qui créera d'innombrables opportunités de croissance économique locale.
- Un cadre réglementaire permettant de contrôler ces activités en Afrique doit être élaboré, mis en œuvre et appliqué. Cela permettra de protéger l'exploitation étrangère des ressources africaines. Cela concerne spécifiquement les ressources minérales qui sont essentielles à la production de NGB, y compris les batteries Li-ion actuellement disponibles dans le commerce. Les ressources africaines doivent être exploitées au profit de l'Afrique d'abord.
- Ces cadres réglementaires comprennent des conditions concernant :
  - — Attribution de droits d'exploitation minière : Aucun droit d'exploitation minière ne doit être accordé à un investisseur sans un plan clair de valorisation des matériaux locaux. Les nouveaux accords miniers doivent inclure des clauses interdisant l'exportation de matières premières sans un raffinage local substantiel.
  - — Si la raffinerie locale, les précurseurs ou la production de composants de batteries sont exploités par un investisseur étranger, une partie prédéterminée du produit, y compris les sels de Li, Co, Mn, Ni, ainsi que les précurseurs NMC, le graphite, l'oxyde de lithium-titane TiO2, LPF6, LFP et les feuilles de cuivre, doit être allouée à une usine locale d'assemblage de batteries.
- Il est nécessaire de développer une base de données autour des activités d'exploitation sur le continent africain. Cette base de données peut indiquer le type de matériau, les quantités et le niveau de raffinage en fonction de ce que les États membres ont convenu avec les sociétés minières. Par conséquent, cette base de données facilitera la coordination et l'allocation efficaces des ressources locales pour la production locale de piles.
- Les États membres sont encouragés à donner la priorité aux infrastructures élémentaires pour les installations qui raffinent et produisent des matières premières pour les NGB. Ces infrastructures comprennent les ports, les routes et les chemins de fer, l'approvisionnement en eau et en électricité.
- Dans le cadre du plan visant à produire des installations d'assemblage de batteries Li-ion de pointe, y compris une chaîne d'approvisionnement en composants de batteries basée sur les ressources africaines, ces installations doivent être encouragées par la création de zones économiques spéciales. Une partie prédéterminée des NGB produits localement doit être incorporée dans un nombre substantiel de micro-réseaux qui répondront aux avantages décrits dans un autre rapport de l'APET intitulé : Micro-Grid ; Empowering communities and enabling transformation in Africa.

137 https://www.wbs.ac.za/academic-programmes/masters-of-management/mm-in-the-field-of-energy-leadership/.

- Pour soutenir l'initiative soutenue par les cadres réglementaires, les compétences nécessaires doivent être développées et exploitées sur le continent. Il est suggéré que les principales institutions africaines puissent être soutenues pour offrir des formations et des cours visant spécifiquement à répondre aux besoins immédiats et à long terme du continent en matière de production de batteries.

10.2 Améliorer les compétences, la fabrication et les centres de recherche sur le continent

Voici les recommandations pour les gouvernements sur la façon d'accueillir les différents hubs sur le continent :

- Les États membres sont encouragés à adopter un modèle dans lequel les gouvernements se portent candidats pour accueillir les différents centres de recherche et de développement, d'innovation et de fabrication sur le continent, en fonction des matériaux et
- de l'expertise disponibles.
- Il est nécessaire d'établir une analyse de rentabilité pour une chaîne de valeur complète pour les technologies LIB en Afrique. Les plus grands fabricants de batteries rechargeables au lithium-ion sont tous basés dans l'hémisphère nord et ne disposent d'aucune installation de production commerciale à grande échelle dans l'hémisphère sud, en particulier en Afrique subsaharienne. Ceci à l'exception de quelques laboratoires expérimentaux en Afrique. Par conséquent, ces grands fabricants sont encouragés à investir des milliards de dollars dans leur recherche et développement, leurs brevets de propriété intellectuelle, le développement de leurs ressources humaines, leurs installations et équipements, et leurs contrats de chaîne d'approvisionnement en Afrique.
- Ces grandes entreprises manufacturières sont encouragées à intensifier leurs efforts pour employer dans leur main-d'œuvre africaine de nombreux scientifiques, ingénieurs et techniciens titulaires d'un doctorat dans leurs domaines respectifs. Cela permettra d'améliorer la recherche et le développement et de renforcer la formation des ressources humaines en Afrique. En effet, cet investissement peut permettre des avancées technologiques et améliorer l'efficacité globale.

10.3 Résumé des éléments structurels et institutionnels requis pour un calendrier technologique réaliste de la prochaine génération de batteries

Le programme d'action pour les batteries de prochaine génération présenté dans ce rapport est le suivant :

- Le premier programme consiste à créer une institution qui pilotera tous les aspects de la révolution des batteries en Afrique. Pour des raisons de référence dans ce rapport, nous nous référons à cette institution comme le Conseil Africain d'Innovation des Batteries (ABIC). L'ABIC doit être doté de ressources suffisantes et d'instruments politiques appropriés pour formuler et mettre en œuvre la stratégie continentale en matière de batteries.
- Ce rapport a identifié les deux principales composantes de la stratégie, à savoir :
  - Industrialisation immédiate: Le programme d'industrialisation immédiate consiste en un ensemble substantiel de politiques à l'échelle du continent qui peuvent être utilisées pour attirer les investissements dans le domaine des batteries lithium-ion. En outre, une usine pilote soutenue par l'ABIC (d'une capacité d'environ 1 GW) doit être construite et mise en service afin de stimuler la recherche et la formation tout en produisant des batteries commerciales en même temps est proposée.
  - Recherche, développement et innovation La composante recherche, développement et innovation est un programme complet, géré par l'ABIC. Ce programme vise à développer des compétences essentielles dans l'ensemble de la chaîne de valeur de la technologie des batteries lithium-ion. En outre, pour minimiser les coûts initiaux du lancement du programme, l'ABIC évitera autant que possible de construire de nouvelles infrastructures physiques et des installations de recherche. Cela peut être réalisé en capitalisant sur toutes les ressources existantes sur le continent. L'objectif global de ce programme est de développer des technologies de batteries locales qui répondent le mieux aux exigences de nos propres environnements d'application.

Dans les deux principales composantes de cette stratégie, l'ABIC, en consultation avec les gouvernements nationaux et d'autres groupes de réflexion, formulera et mettra en œuvre des portefeuilles de politiques appropriées. Ceci peut être réalisé pour atteindre une intégration continentale efficace et synergique de l'ensemble de la chaîne de valeur de la technologie des batteries lithium-ion. Ainsi, ce rapport décrit certaines des politiques pertinentes pour aborder différents aspects de la chaîne de valeur tels que les minéraux, l'approvisionnement, le marché, le recyclage et la réutilisation, et l'investissement. En outre, l'ABIC développera d'autres infrastructures institutionnelles telles que la création de nouvelles organisations pour mettre en œuvre les différents aspects de l'ensemble du programme. Par exemple, le présent rapport a identifié la nécessité de créer un centre africain de transfert de technologie (ATTC) ainsi qu'une société africaine de capital-innovation (AICC).

La fonction première du ATTC est de réunir l'industrie, les jeunes entreprises, les universités et les instituts de recherche pour créer des écosystèmes de transfert de technologie qui facilitent le développement de produits, la commercialisation et l'adoption de technologies. D'autre part, l'AICC est un véhicule d'investissement en capital-risque sous la supervision directe de la Commission de l'UA. Ce véhicule permettra à l'UA de canaliser divers fonds d'investissement afin de développer et de soutenir un écosystème de capital-risque viable pour les technologies émergentes. Aucune de ces organisations n'est créée à perpétuité. Au contraire, ces institutions ont un mandat limité de 5 ans, généralement renouvelable, basé sur des résultats spécifiques et les objectifs généraux de l'ensemble du programme ABIC.

Outre les nombreuses externalités positives, les principaux avantages du programme proposé comprennent l'accélération de l'adoption d'un avenir énergétique propre et évolutif qui améliorera la santé et l'économie du continent. Pour y parvenir, le programme soutiendra l'avancement de l'énergie solaire de prochaine génération et des matériaux et dispositifs de batterie. Il soutiendra également l'intégration des batteries de nouvelle génération avec les systèmes et le micro-réseau. Le programme créera également des idées pour la recherche, le développement et l'innovation. Il permettra également d'éduquer et de créer des programmes de formation aux approches et écosystèmes innovants pour les Africains. Cela permettra de générer des innovations et de faciliter leur mise sur le marché. Par conséquent, cela permet à l'Afrique de concourir sur la scène mondiale en tant que pair important et respectable parmi les leaders de classe mondiale de la révolution énergétique. Cela permettra également de relever les défis technologiques auxquels l'Afrique est confrontée et, en définitive, d'améliorer les perspectives économiques du continent L'Afrique doit réaliser ce programme gigantesque, dont l'ampleur et le rythme sont sans précédent sur ce continent, car l'Afrique doit s'éclairer !

10.4 Conclusion

Dans le paysage actuel des technologies de batteries avancées avec des fabricants de pointe, l'Afrique n'a pas à réinventer la roue. En outre, l'Afrique ne peut certainement pas se permettre à ce stade de faire des investissements similaires à grande échelle pour découvrir la prochaine percée dans la technologie des batteries. L'Afrique devrait plutôt s'efforcer de tirer parti des dernières technologies de batteries commercialisées grâce à des partenariats stratégiques avec des acteurs de premier plan. Simultanément, les gouvernements africains sont encouragés à investir les fonds disponibles dans des pôles technologiques régionaux afin de développer les ressources humaines locales. Ces pôles technologiques peuvent également orienter leurs efforts vers l'amélioration de la qualité du traitement des matières premières essentielles extraites du sol africain, ainsi que vers des expériences visant à améliorer la qualité globale et la durée de vie des principaux composants des batteries. De cette manière, l'Afrique peut répondre aux besoins criants du continent en matière de stockage de l'énergie, tout en contribuant à la prochaine génération de batteries en restant à la pointe de la technologie.

11

Bibliographie

A. Ahmadian, M. Sedghi, A. Elkamel, M. Fowler, M. Aliakbar Golkar, Plug-in electric vehicle batteries degradation modelling for smart grid studies: Review, assessment, and conceptual framework, Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018) 2609- 2624: DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.067.

A. Conde, J.J.T.C. Wright, U. Ibusuki, Battery global value chain and its technological challenges for electric vehicle mobility, RAI Revista de Administração e Inovação 14 (2017) 333-338: https://doi.org/10.1016/j.rai.2017.07.001.
A. Mourant, Next generation batteries will power up the energy storage industry, Renewable Energy Focus 17 (2016) 41-43, ISSN 1755-0084, https://doi.org/10.1016/j.ref.2015.11.004.

A.K. Worku, D.W. Ayele, N.G. Habtu, Recent advances and future perspectives in engineering of bifunctional electrocatalysts for rechargeable zinc-air batteries, Materials Today Advances 9 (2021) 100116.

Accelerating SDG 7 Achievement, Policy Briefs in Support of the First SDG 7 Review at the UN High-Level Political Forum 2018, Developed by United Nations Economic Commission for Africa (UNECA) in collaboration with The African Development Bank, ENERGIA, UNCTAD, UNESCWA, RCREEE, SACREEE, ECREEE, EACREEE, FIA Foundation, IRENA, UNIDO and IEA: https://
sustainabledevelopment.un.org/content/documents/17565PB18.pdf.

Africa: Switching on Smart Power for COVID-19 Recovery and Renewal, 10th July 2020:
https://www.bakermckenzie.com/en/ insight/publications/2020/07/africa-smart-power-covid19-recovery.

APET Report: Micro-Grids Empowering Communities and Enabling Transformation in Africa.
B. Ackers, Ethical considerations of corporate social responsibility -A South African perspective, South African Journal of Business Management 46(2015) 11-21.

Benchmarking of Technology, Trends and Technology Developments Department of Trade and Industry (2004): https://www.westerncape.gov.za/text/2004/11/technologydevelopmenttrends.pdf.

Climate Finance Update: Major Emerging Market Green Bond Fund Launched (May 2017): https://sdg.iisd.org/news/climate-finance-update-major-emerging-market-green-bond-fund-launched/

CSIR Shareholder's Compact, Cycle commencing 1 April 2020: https://www.csir.co.za/sites/default/files/Documents/Shareholder%20Compact_2020_21_%283%29.pdf.

D.B. Agusdinata, W. Liu, H. Eakin, H. Romero, Socio-environmental impacts of lithium mineral extraction: towards a research agenda, Environmental Research Letters 13 (2018) 123001: https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae9b1

E. Mossali, N. Picone, L. Gentilini, O. Rodrìguez, J.M. Pérez, M. Colledani, Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments, Journal of Environmental Management 264 (2020) 110500, ISSN 0301-4797: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110500.

E.A. Olivetti, G. Ceder, G.G. Gaustad, X. Fu, Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals Joule 1 (2017) 229-243: https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019.

Energy Storage Partnership (ESP) targets developing countries expansion, Green Building Africa – Net carbon zero building cities, May 30, 2019: https://www.greenbuildingafrica.co.za/energy-storage-partnership-esp-targets-developing-countries-expansion/.

European Commission - Horizon 2020 - Work Programme 2018-2020 Cross-cutting activities. Call: Building a Low-Carbon, Climate Resilient Future: Next-Generation Batteries H2020-LC-BAT-2019-2020. European Commission Decision C (2020) 6320 of 17 September 2020: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2018-2020/main/h2020-wp1820-cc-activities_en.pdf.

F. Moreno-Brieva, R. Marín, Technology generation and international collaboration in the Global Value Chain of Lithium Batteries, Resources, Conservation and Recycling 146 (2019) 232-243, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.026.
F. Moreno-Brieva, R. Marín, Technology generation and international collaboration in the Global Value Chain of Lithium

F. Pan, Q. Wang, Redox Species of Redox Flow Batteries: A Review, Molecules, 20 (2015) 20499–20517: doi: 10.3390/ molecules201119711.

F. Wu, J. Maier, Y. Yu, Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries, Chemical Society Review 49 (2020) 1569-1614: https://doi.org/10.1039/C7CS00863E.

G. Hao, Q. Lai, H. Zhang, Nanostructured Mn-based oxides as high-performance cathodes for next generation Li-ion batteries, Journal of Energy Chemistry (2020) ISSN 2095-4956, https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.11.035.

G. Reid, J. Julve, Second Life-Batteries as Flexible Storage for Renewables Energies, Kurzstudie Im Auftrag Des Bundesverbandes Erneuerbare Energie E.V. Und Der Hannover Messe (2016): https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/201604_ Second_Life-Batterien_als_flexible_Speicher.pdf.

G. Zubi, R.S. Adhikari, N.E. Sanchez, W. Acuna-Bravo, Lithium-ion battery-packs for solar home systems: Layout, cost and implementation perspectives, Journal of Energy Storage 32 (2020) 101985: https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101985.

G.A. Mill, The financial performance of a socially responsible investment over time and a possible link with corporate social responsibility, Journal of Business Ethics 63 (2006) 131-148.

H Jalilian, J Weiss, De-industrialisation in sub-Saharan Africa: myth or crisis? Journal of African Economies, Volume 9, Issue 1, March 2000, Pages 24–43, https://doi.org/10.1093/jae/9.1.24

H. Pang, G. Zhang, X. Xiao, H. Xue, Brief Overview of Next-Generation Batteries. In: One-dimensional Transition Metal Oxides and Their Analogues for Batteries. Springer Briefs in Materials, Springer, Singapore. (2020) https://doi.org/10.1007/978-981-15- 5066-9_3.

Hopes of a West Australian 'Lithium Valley' threatened, 18 July, 2018, International Mining: https://im-mining.com/2018/07/18/ hopes-west-australian-lithium-valley-threatened/.

https://au.int/sites/default/files/newsevents/workingdocuments/33178-wd-stisa-english_-_final.pdf.
I. Kinash, U. Andrusiv, O. Golovnia, I. Popadynets, Aspects of the formation and development of innovation infrastructure in Ukraine, Management Science Letters 9 (2019) 2403–2414: doi: 10.5267/j.msl.2019.7.015.

IEA, IRENA, UNSD, WB, WHO (2019), Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019, Washington DC.
Industrial Policy Action Plan (2018/19 – 2020/21, Economic sectors, employment, and infrastructure, Department of Trade and Industry, Republic of South Africa: https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201805/industrial-policy-action-plan.pdf.

Investment in renewable energy generates jobs. Supply of skilled workforce needs to catch up, Research brief, Renewable Energy (ILO, 2011): https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---

J. Drábek, S. Lorincová, J. Javorčíková, Investing in Human Capital as a Key Factor for the Development of Enterprises, Issues of Human Resource Management (2017): DOI: 10.5772/67741: https://www.intechopen.com/books/issues-of-human-resource-management/investing-in-human-capital-as-a-key-factor-for-the-development-of-enterprises.

J. Schiffera, R. Ortegab, A. Astolfic, J¨org Raischa, T. Sezie, Conditions for Stability of Droop–Controlled Inverter–Based Microgrids, Automatica, 50 (2014) 2457-2469. ISSN: 0005-1098: https://doi.org/10.1016/j.automatica.2014.08.009.

J.-P. Yaacou, H. Noura, O. Salman, A. Chehab, Security analysis of drones' systems: Attacks, limitations, and recommendations, Internet of Things (2020): doi: 10.1016/j.iot.2020.100218.

K. Baes, M. Kolk, F. Carlot, A. Merhaba, Y. Ito, Future of batteries, Winner takes all? Arthur D. Little Luxembourg S.A. 2018: https:// www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/adl_future_of_batteries-min.pdf.

K. Ehsanul, K. Pawan, K. Sandeep, A. Adedeji, K. Ki-Hyun, Solar energy: Potential and future prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 894-900: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094

L.I. Farfan-Cabrera, M. Tapia-Gaspar, J. Pérez-González, Tribology of Polymer Matrix Composites Within the Automotive Industry, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (2021): DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724- 0.00029-X.

M. Barry, P. Fitzgerald, South Africa: The Sustainable Development Challenge, Third World Quarterly, vol. 15, no. 2, 1994, pp. 227–242. JSTOR, www.jstor.org/stable/3993144. Accessed 13 Dec. 2020.

M. Killera, M. Farrokhseresht, N.G. Paterakis, Implementation of large-scale Li-ion battery energy storage systems within the EMEA region, Applied Energy 260 (2020) 114166.

M. Motyka, A. Slaugther, S. Sanborn, K. Sharma, D.V. Shah, Supercharged: Challenges and opportunities in global battery storage markets, Deloitte Center for Energy Solutions, 2018: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/bg/Documents/energy- resources/gx-er-challenges-opportunities-global-battery-storage-markets.pdf.

M.A. Hannan, AliQ. Al-Shetwi, R.A. Begum, S.E. Young, M.M. Hoque, Pin Jern Ker, M. Mansur, Khaled Alzaareer, Review The value of thermal management control strategies for battery energy storage in grid decarbonization: Issues and recommendations, Journal of Cleaner Production 276 (2020) 124223: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124223.

M.A. Shapiro, Next-generation battery research and development: Non-politicized science at the Joint Center for Energy Storage Research, Energy Policy 145 (2020) 111771, ISSN 0301-4215, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111771.

M.M. Elkadragy, M. Alici, A. Alsersy, A. Opal, J. Nathwani, J. Knebel, M. Hiller, Off-grid and decentralized hybrid renewable electricity systems data analysis platform (OSDAP): A building block of a comprehensive techno-economic approach based on contrastive case studies in Sub-Saharan Africa and Canada, Journal of Energy Storage (2020) 101965 In Press: https://doi.org/10.1016/j. est.2020.101965.

N. Okonjo-Iweala, Africa can play a leading role in the fight against climate change, Combatting Climate Change, An urgent call for comprehensive global and local action, Foresight Africa: https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2020/01/ForesightAfrica2020_Chapter4_20200110.pdf.

N.S. Pillay, A.C. Brent, J.K. Musango, Affordability of battery electric vehicles based on disposable income and the impact on provincial residential electricity requirements in South Africa, Energy 171 (2019) 1077-1087.

New International Partnership Established to Increase the Use of Energy Storage in Developing Countries, May 28, 2019: https:// www.worldbank.org/en/news/press-release/2019/05/28/new-international-partnership-established-to-increase-the-use-of- energy-storage-in-developing-countries.

P.P. Ganzera, C. Chais, P.M. Olea, Product, process, marketing, and organizational innovation in industries of the flat knitting sector, RAI Revista de Administração e Inovação, 14 (2017) 321-332: https://doi.org/10.1016/j.rai.2017.07.002.

R. Abbas, K. Michael, M.G. Michael, The regulatory considerations, and ethical dilemmas of location-based services (LBS): A literature review, Information Technology and People, (2014) 2-20: https://doi.org/10.1108/ITP-12-2012-0156: ISSN: 0959-3845.

R. Grabowski. Deindustrialization in Africa, International Journal of African Development 3 (2015) 51-67, Southern Illinois University: https://scholarworks.wmich.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1041&context=ijad.

R. Konidenaa, V. Bhandari, A. Mburu, Best practices from International experiences for Eastern Africa countries regarding ancillary services markets, The Electricity Journal 33 (2020) 106800: https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106800.

S. Batchelora, E. Brown, J. Learya, N. Scotta, A. Alsop, M. Leach, Solar electric cooking in Africa: Where will the transition happen first? Energy Research & Social Science 40 (2018) 257-272: https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.019.

S. Bräuer, F. Plenter, B. Klör, M. Monhof, D. Beverungen, J. Becker, Transactions for trading used electric vehicle batteries: theoretical underpinning and information systems design principles, Business Research 13 (2020) 311–342. https://doi.org/10.1007/s40685-019-0091-9.

S. Nanda, A. Bhargav, A. Manthiram, Anode-free, Lean-Electrolyte Lithium-Sulfur Batteries Enabled by Tellurium-Stabilized Lithium Deposition, Joule, 2020; DOI: 10.1016/j.joule.2020.03.020.

Scale-up of Solar and Wind Puts Existing Coal, Gas at Risk, April 28, 2020, Bloomberg NEF (BNEF): https://about.bnef.com/blog/ scale-up-of-solar-and-wind-puts-existing-coal-gas-at-risk/.

Science, Technology, and Innovation Strategy for Africa 2024: https://au.int/sites/default/files/documents/38756-doc-stisa_science_tech_innovation_strategy.pdf

Shaping Europe's digital future, 10 September 2020, Europe invests in research on the batteries of the future: https://ec.europa. eu/digital-single-market/en/news/europe-invests-research-batteries-future.

Technologies for producing battery raw materials: https://www.outotec.com/products-and-services/commodities/battery-metals/technologies-for-producing-battery-raw-materials/.

Technology and Innovation for the Future of Production: Accelerating Value Creation, March 2017, in collaboration with A.T. Kearney: http://www3.weforum.org/docs/WEF_White_Paper_Technology_Innovation_Future_of_Production_2017.pdf.

The road ahead for lithium-ion batteries, February 26th, 2019, Africa's Power Journal: https://www.esi-africa.com/industry-sectors/future-energy/the-road-ahead-for-lithium-ion-batteries/.

The Sustainable Development Goals Report, 2019, United Nations: https://brasilnaagenda2030.files.wordpress.com/2019/09/the-sustainable-development-goals-report-2019.pdf.

The World Bank Treasury, What are green bonds? Public-Private Infrastructure Advisory Facility (PPIAF), Enabling Infrastructure Investment, 2015 International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington D.C., United States of America

UN Policy Briefs in Support of the First SDG7 Review at the UN High-Level Political Forum

UNEP (2017), Atlas of Africa Energy Resources, United Nations Environment Programme, PO Box 30552, Nairobi 00100, Kenya. Varvara Sharova, Paul Wolff, Benedikt Konersmann, Ferdinand Ferstl, Robert Stanek and Markus Hackmann, Evaluation of Lithium-Ion Battery Cell Value Chain, (2020) Working Paper Forschungsförderung, No. 168, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf: https://www.econstor.eu/bitstream/10419/217243/1/hbs-fofoe-wp-168-2020.pdf.

Venture capital, The Innovation Policy Platform:
http://www.innovationpolicyplatform.org/www.innovationpolicyplatform.org/ content/venture-capital/index.html.

W. Park, D. Lippoldt, Technology Transfer and the Economic Implications of the Strengthening of Intellectual Property Rights in Developing Countries, (2008)

X.-Q. Zhang, C.-Z. Zhao, J.-Q. Huang, Q. Zhang, Recent Advances in Energy Chemical Engineering of Next-Generation Lithium Batteries, Engineering 4 (2018) 831-847, ISSN 2095-8099, https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.10.008.

Y. Huang, J. Duan, X. Zheng, J. Wen, Y. Dai, Z. Wang, W. Luo, Y. Huang, Lithium Metal-Based Composite: An Emerging Material for Next-Generation Batteries, Matter 3 (2020) 1009-1030, ISSN 2590-2385,

Z. Chen, W. Zhang, Z. Yang, A review on cathode materials for advanced lithium-ion batteries: microstructure designs and performance regulations, Nanotechnology 31 (2019): DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab4447.

Notes

Notes

AUDA-NEPAD
230 15th Road Midrand South
Africa
Téléphone +27-0-11-2563600
E-mail: info@nepad.org www.nepad.org

AUDA-NEPAD
AFRICAN UNION DEVELOPMENT AGENCY