

LE STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ ADAPTÉ AUX MINI-RÉSEAUX

Étude collaborative sur la filière des batteries
en Afrique Subsaharienne

LE STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ ADAPTÉ AUX MINI-RÉSEAUX

Étude collaborative sur la filière des batteries
en Afrique Subsaharienne



Le stockage d'électricité adapté aux mini-réseaux

TABLE DES MATIÈRES



GLOSSAIRE ET ACRONYMES

INTRODUCTION

- 10 Présentation des acteurs
- 11 Contexte de l'étude
- 12 Objectifs de l'étude
- 12 Approche méthodologique

L'IMPORTANCE DES BATTERIES POUR LES MINI-RÉSEAUX DANS LE CONTEXTE DE L'ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

- 16 Le déficit d'accès à l'énergie en Afrique Subsaharienne
- 17 Définition et rôle des mini-réseaux
- 17 L'importance des mini-réseaux dans l'accès à l'électricité en Afrique subsaharienne
- 18 Le rôle stratégique du stockage dans le développement des mini-réseaux
- 19 Plusieurs cas d'usage selon les configurations de mini-réseaux
- 20 Tableau de synthèse du stockage d'énergie selon la configuration de mini-réseau
- 20 Avantages et limites du stockage par batterie

TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE

23	Batteries au plomb-acide
25	Batteries lithium-ion
27	Technologies émergentes
28	Comparaison des technologies : coûts, performances, durée de vie

ACTEURS DU SECTEUR ET MODÈLES D'AFFAIRES

32	Constructeurs de batteries pour du stockage stationnaire
35	Stratégies de distribution et d'exploitation
38	Processus et acteurs de la fin de vie des batteries

ANALYSE DES DÉFIS ET OPPORTUNITÉS SPÉCIFIQUES À L'AFRIQUE SUBSAHARIENNE

42	Enjeux techniques et opérationnels
44	Barrières économiques et réglementation
48	Fin de vie des batteries

ETUDES DE CAS : LES PROJET DU GROUPE CŒUR EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

52	Camp de réfugiés de Mahama, Rwanda – Vittoria Technology
53	Projet So-Cool, Nigeria – PAM Africa
53	Plateforme « Pam-AI », Nigéria – PAM Africa
54	Centrale solaire en Côte d'Ivoire – Saft
54	Production d'énergie par mini-réseaux au Bénin – Engie Energy Access



54	Micro-grids et réseaux de distribution au Tchad – John Cockerill
55	Systèmes de stockage d'énergie pour mini-réseaux au Ghana – CEGASA
55	Batteries de seconde vie et mini-réseaux en Zambie – SLS Energy
56	Reconditionnement et production de nouveaux packs de batterie en Afrique de l'Ouest - Lagazel

SOLUTIONS ET RECOMMANDATIONS

58	Points clefs de l'étude
59	Conseils techniques pour le choix et la gestion des batteries
61	Les solutions innovantes dans le secteur
61	Recommandations issues des discussions avec le groupe cœur

ANNEXES

64	Liste des entreprises et contacts
65	Bibliographie

GLOSSAIRE ET ACRONYMES

AFD : Agence Française de Développement

AIE : Agence Internationale de l'Energie

AMP : Africa Minigrids Program

BAD : Banque Africaine de Développement

BESS (Battery Energy Storage System) : Désigne non seulement les batteries BES (Battery Energy Storage) mais également l'ensemble des systèmes nécessaires au fonctionnement, tels que les convertisseurs, les systèmes de gestion de batteries (BMS), les dispositifs de sécurité, et l'infrastructure logicielle pour la gestion intelligente du stockage.

BM : Banque Mondiale

BMS (Battery Management System) : un système électronique intégré qui assure la gestion, la protection et l'optimisation des batteries dans un système de stockage d'énergie.

CAPEX : Capital Expenditure ou coût d'investissement

CEI : Commission Electronique Internationale

DEEE : Déchets d'équipements électriques et électroniques

Densité énergétique : Quantité d'énergie stockée par unité de volume ou de poids ; critère important pour le transport ou les espaces restreints.

EMS (Energy Management System) : plateforme logicielle et matérielle qui permet de superviser, contrôler et optimiser la production, la consommation et le stockage d'énergie dans une installation (résidentielle, industrielle ou à grande échelle).

EPC (Engineering Procurement and Construction) : forme d'entente contractuelle utilisée entre deux parties, l'industrie et le contractant. Le contractant s'occupe de l'ensemble du projet, de l'installation, des matériaux nécessaires puis de la réalisation soit directement soit en sous-traitant une partie des travaux. Il porte la responsabilité du projet.

ESMAP : Programme d'Assistance à la Gestion du Secteur Énergétique

FEM : Fonds pour l'Environnement Mondial

Ilotage : Capacité d'un mini-réseau à fonctionner de manière autonome lorsqu'il est déconnecté du réseau principal.

IRENA : Agence Internationale pour les Energies Renouvelables

LCOS (Levelized Cost of Storage) : Coût actualisé du stockage de l'énergie (€/kWh stocké), utilisé pour évaluer la rentabilité des technologies de stockage.

LFP : Lithium-Fer-Phosphate

M2M : Machine to Machine

Mini-réseau interconnecté : Mini-réseau pouvant être connecté au réseau national, avec capacité de basculer entre mode autonome et mode connecté.

Metro-grid : Mini-réseau déployé en zone urbaine, connecté mais capable de fonctionner en îlotage en cas de défaillance du réseau national.

NAS : Batteries sodium-soufre

NiCD : Batteries nickel-cadmium

NiMH : Batteries nickel-hydrure métallique

NiZn : Batteries nickel-zinc

OPEX : Operational Expenditure ou coût d'exploitation

PAYG : Pay As You Go

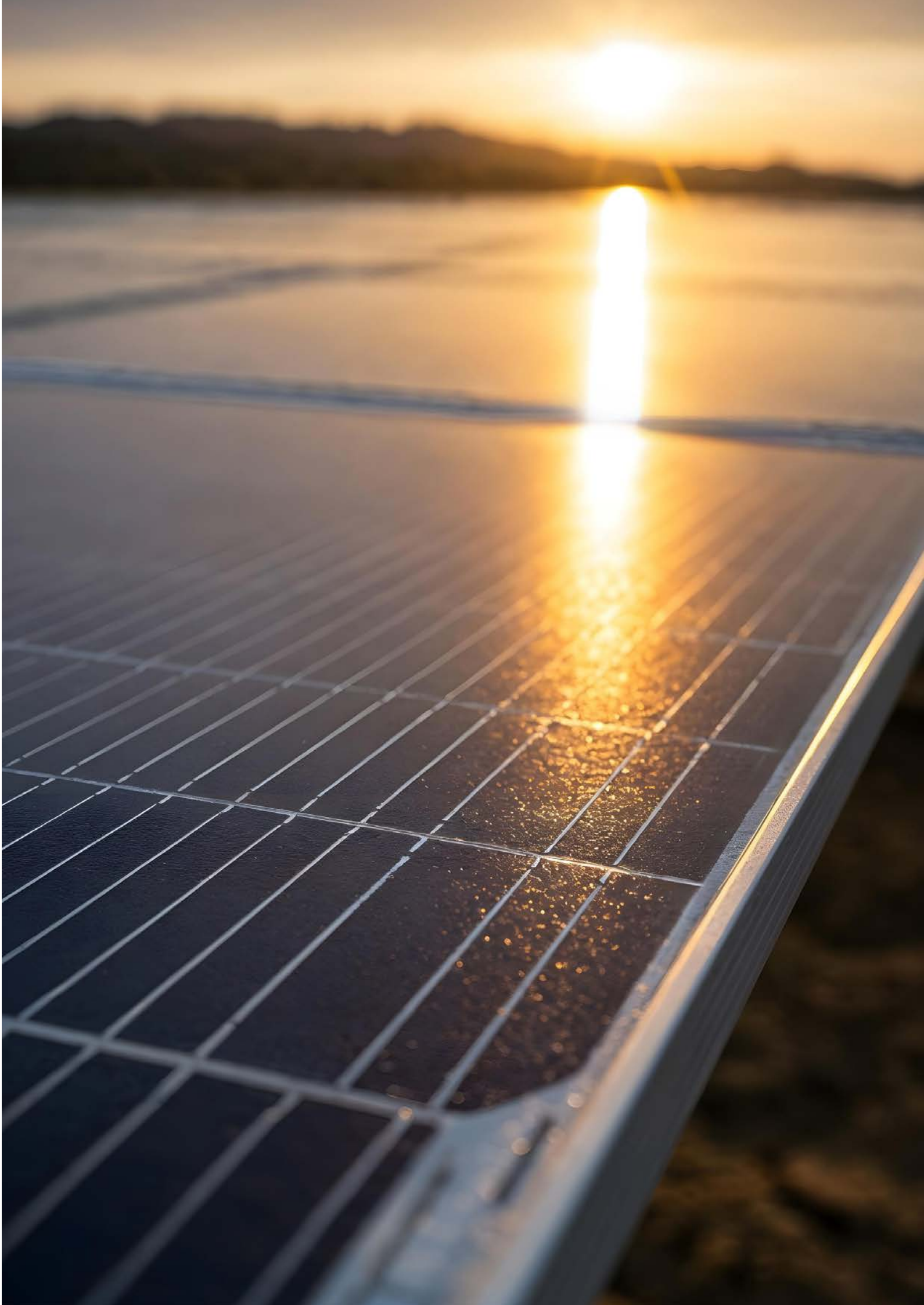
PBG : Performance Based Grant

PPP : Partenariat Public - Privé

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

REP : Responsabilité Etendue du Producteur

UE : Union Européenne



INTRODUCTION



PRÉSENTATION DES ACTEURS

L'Agence Française de Développement (AFD) est un acteur de la politique de développement et de solidarité de la France à l'échelle internationale. En tant qu'établissement public financier, elle soutient les projets qui contribuent à améliorer les conditions de vie, renforcer la cohésion sociale et répondre aux enjeux climatiques. Son mode de management repose sur une gouvernance stratégique articulée autour d'objectifs de transition écologique et sociale, tout en promouvant des partenariats durables avec les acteurs publics, privés et de la société civile dans les pays partenaires. L'AFD s'appuie sur des directions géographiques et sectorielles, ainsi que sur un réseau de représentations locales.

Le cluster MEDEE fédère un écosystème de recherche, d'industriels et d'institutionnels autour des technologies électriques et de la transition énergétique. En tant que catalyseur d'innovation, MEDEE accompagne les projets de R&D collaboratifs à forte valeur ajoutée dans les domaines de l'efficacité énergétique, de la décarbonation des usages et du développement de solutions industrielles sobres en carbone. Ces dernières années, MEDEE a également initié ou soutenu plusieurs projets de coopération technologique en Afrique, notamment

autour de l'accès à l'énergie, de l'intégration des énergies renouvelables et du renforcement des compétences locales.

Bureau d'études et d'ingénierie au service de la transition énergétique et environnementale, **Setec énergie environnement** intervient en appui aux territoires, aux industriels et aux bailleurs de fonds pour concevoir et mettre en œuvre des projets durables. Grâce à une équipe pluridisciplinaire, Setec accompagne des missions complexes dans les domaines de la décarbonation industrielle, de la gestion des déchets, du développement des énergies renouvelables. Le groupe Setec est présent dans plusieurs pays africains, et contribue activement à des projets d'accès à l'énergie en lien étroit avec les acteurs locaux et les partenaires techniques et financiers.

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Digital Energy est un programme de l'Agence Française de Développement (AFD) qui finance l'innovation et l'entrepreneuriat dans le secteur de l'énergie en Afrique financé par l'Union Européenne (UE). Digital Energy soutient les opérateurs énergétiques et les start-ups dans leur processus de digitalisation à travers le financement de projets d'assistance technique, l'organisation d'appels à projets ou encore l'animation d'une communauté d'acteurs.

La présente étude lancée en juillet 2024 s'inscrit dans ce cadre et se concentre sur le stockage d'énergie stationnaire en Afrique subsaharienne et plus particulièrement le stockage d'énergie pour des applications de type mini-réseaux. Celle-ci a été élaborée de manière collaborative avec la contribution d'une dizaine d'entreprises du secteur.

Setec énergie environnement et le pôle MEDEE ont été mandatés pour la conduite de cette étude, en partenariat avec l'AFD et Onepoint, dans le cadre de la mission d'animation de la communauté Digital Energy confiée à cette dernière.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

En Afrique subsaharienne, l'électrification demeure un défi majeur : malgré une population en forte croissance et une demande énergétique en augmentation, le taux d'accès à l'électricité reste faible, particulièrement en zone rurale où il ne s'élevait qu'à 30,7 % en 2023, contre plus de 80 % dans les zones urbaines d'après les statistiques de la Banque Mondiale. Pour répondre à ces besoins, le

Le taux d'accès à l'électricité reste faible, particulièrement en zone rurale où il ne s'élevait qu'à 30,7 % en 2023

développement des mini-réseaux constitue un levier majeur. En effet l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) estime que pour garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, durables et modernes à un coût abordable d'ici 2030, 30 % des nouvelles connexions électriques devront être assurées par des mini-réseaux. Le développement des mini-réseaux doit aller de pair avec celui des énergies renouvelables afin de constituer une solution durable pour répondre aux besoins énergétiques tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre.

Toutefois, la production d'électricité renouvelable dans les mini-réseaux demeure variable et ces derniers ne sont généralement pas raccordés aux réseaux nationaux. Il est alors nécessaire d'emmagasiner l'énergie produite pendant les périodes de faible demande afin de la restituer lors des pics de consommation, assurant ainsi un approvisionnement continu dans les zones isolées. C'est le rôle que remplissent les solutions de stockage stationnaire qui sont l'objet de cette étude.

Ce travail collaboratif passe en revue les technologies dominantes et émergentes en analysant leurs pertinences dans le contexte de l'Afrique subsaharienne. Il cherche également à cartographier les principaux défis ainsi que les freins au déploiement du stockage stationnaire tout en mettant l'accent sur les solutions pouvant y répondre. Enfin, cette étude a pour vocation de servir d'outil à la mobilisation d'une communauté d'acteurs en facilitant les échanges et la mise en relation. À ce titre, elle contient un annuaire des parties prenantes ayant été impliquées dans sa réalisation.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'étude repose d'une part sur une analyse bibliographique d'études déjà existantes sur le stockage stationnaire pour les mini-réseaux. D'autre part, et c'est ce qui fait son originalité, le contenu de ce document s'appuie sur un ensemble de sessions de travail avec un « groupe cœur » d'acteurs de la filière, dont il reflète les expériences, positions et préoccupations issues de l'expérience du terrain.

Ce « groupe cœur » est composé d'une dizaine d'entreprises travaillant en Afrique et couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries, de la fabrication au réemploi, en passant par l'exploitation. Ces entreprises, parmi lesquelles des acteurs clés du secteur, ont été consultées pour partager leur expertise et leurs problématiques vécues – qu'il s'agisse de difficultés logistiques, de contraintes économiques ou de défis techniques dans des environnements parfois complexes.

Elles se sont réunies quatre fois tout au long de la réalisation de l'étude entre octobre 2024 et janvier 2025. Les membres du « groupe cœur » n'ont pas seulement été consultés, comme c'est le cas dans d'autres études, ils ont joué un rôle fondamental dans le cadrage et le pilotage des travaux. La présente étude n'est donc pas un document seulement théorique, mais véritablement pratique et directement utile aux acteurs de la filière.

Entreprises membres du groupe de travail

Nom entreprise	Zone géographique d'intervention	Nature de l'activité	Origine entreprise
SLS Energy	Rwanda	Constructeur et prestataire de service	Rwanda
Lagazel	Sénégal, Mali, Burkina, Bénin, Niger	Constructeur, distributeur et recycleur	France
PAM Africa	Rwanda, Kenya, Burundi, RDC, Tanzanie, Ouganda	Exploitant	Nigeria
Aress	Sénégal, Bénin, Togo, Burkina Faso	Constructeur et exploitant	Bénin
Engie energy access	Afrique de l'est principalement, et quelques pays à l'ouest	Exploitant	France
CEGASA	Bénin, Éthiopie..	Constructeur	Espagne
John Cockerill	Tchad, Burundi, RDC...	Exploitant	Belgique
Catalyst Energy	Mozambique, Afrique du Sud, Malawi, Zambie, Zimbabwe, Namibie et Botswana.	Prestataire de services	Mozambique
Exide Technologies	Afrique Subsaharienne	Constructeur	France
SAFT - filiale TotalEnergies	Afrique du Sud, Côte d'Ivoire, Kenya	Constructeur (utility scale)	France
Evolve BGS	Afrique du Sud	Prestataire de services	Afrique du Sud
Vittoria Technology	Afrique du Sud	Prestataire de services	Afrique du Sud

Entretiens complémentaires réalisés avec des entreprises hors du groupe cœur

Nom entreprise	Zone géographique d'intervention	Nature de l'activité	Origine entreprise
Schneider	Afrique du Sud, Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale, etc.	Fournisseur de technologies, intégrateur de systèmes	France
Zembo	Ouganda	Mobilité électrique	Ouganda

La publication a donc vocation à nourrir la réflexion, alimenter les initiatives existantes et inspirer de futures actions concrètes. Des ateliers de présentation des résultats, des temps d'échange avec les parties prenantes ainsi que des événements thématiques pourront être organisés pour prolonger la discussion et favoriser l'appropriation des enseignements.



L'IMPORTANCE DES BATTERIES POUR LES MINI-RÉSEAUX DANS LE CONTEXTE DE L'ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE



La Banque Africaine de Développement et la Banque Mondiale s'engagent par ailleurs lors du Sommet africain de l'énergie tenu à Dar Es Salaam (Tanzanie) en janvier 2025, dans une collaboration sans précédent dans le cadre de la « Mission 300 », dont l'objectif est de connecter en Afrique 300 millions de personnes à l'électricité d'ici 2030.

Les deux leviers d'action de ce programme sont l'expansion du réseau électrique et le développement des connexions dans des zones mal desservies, ainsi que le déploiement de mini-réseaux et de solutions solaires autonomes pour fournir de l'électricité aux communautés vivant dans des zones reculées et hors réseau.

LE DÉFICIT D'ACCÈS À L'ÉNERGIE EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Selon la Banque Mondiale, entre 1996 et 2020, le taux d'accès à l'électricité a augmenté mondialement, passant de 73,4 % à 90,5 %. Cependant, la pandémie de COVID-19 a ralenti les programmes d'électrification en 2020 et 2021, entraînant un retard potentiel des objectifs d'accès universel à l'électricité pour 2030 dans plusieurs pays en développement. En suivant le scénario actuel, environ 800 millions de personnes devraient obtenir l'électricité entre 2021 et 2030, laissant encore 560 millions sans accès. Pour atteindre cette électrification universelle d'ici 2030, environ 1,3 milliards de foyers doivent être électrifiés dont 800 millions de foyers en milieu rural, ce qui nécessite une croissance annuelle de l'électrification de 6,5 %.

La part de la population en Afrique subsaharienne ayant accès à l'électricité était de 48 % en 2020 (Banque mondiale 2020b). Cependant, ces chiffres masquent d'importantes disparités entre les pays : alors que certains, comme le Niger, le Tchad ou la République démocratique du Congo, affichent des taux d'électrification inférieurs à 20 %, d'autres – tels que l'Éthiopie, le Ghana, le Kenya, le Nigeria, le Rwanda ou encore le Sénégal – se sont dotés de plans nationaux ambitieux visant à atteindre un accès universel à l'électricité d'ici 2030.

La part de la population en Afrique subsaharienne ayant accès à l'électricité était de 48 % en 2020

Ce déficit d'accès à l'électricité s'explique par une combinaison de facteurs structurels et économiques. Dans de nombreuses zones rurales, la faible densité de population et l'isolement géographique des villages rendent les extensions de réseau coûteuses et complexes. Par ailleurs, la santé financière souvent fragile des entreprises publiques d'électricité limite leur capacité à investir dans de nouvelles infrastructures. À cela s'ajoute la difficulté, pour une partie des ménages, de dégager une part de leur budget pour accéder à un service électrique. Enfin, le secteur souffre d'un manque d'investissement en capital, freinant le développement de solutions alternatives comme les mini-réseaux ou les systèmes solaires décentralisés. Pour combler le déficit d'accès à l'électricité, les politiques actuelles doivent donc encourager à la fois les projets d'extension des réseaux nationaux mais aussi le développement de solutions décentralisées, comme les mini-réseaux.

DÉFINITION ET RÔLE DES MINI-RÉSEAUX

Un mini-réseau (ou mini-grid) est un système électrique décentralisé alimenté par des sources d'énergie, renouvelables ou non et souvent couplées à des systèmes de stockage. Il fonctionne de manière indépendante du réseau principal et représente une alternative moins onéreuse pour la l'accès à l'électricité des communautés rurales ou isolées. Les mini-grids présentent par ailleurs des avantages par rapport à d'autres solutions décentralisées comme les kits solaires, notamment une fourniture de meilleure qualité et un soutien plus fort aux usages productifs.

Cette étude se concentre sur l'utilisation des batteries dans le cadre du développement des mini-réseaux et de l'électrification rurale, sans prétendre couvrir de manière exhaustive les marchés existants des batteries et les évolutions technologiques associées.

Dans le cas géographique d'Afrique Subsaharienne et bien que la majorité des mini-réseaux desservent des zones isolées et ne pourront être raccordés, certains mini-réseaux pourraient à l'avenir être raccordés au réseau national. Le développement d'une « troisième génération » de mini-réseaux confirme cette tendance : ils sont solaires-hybrides, incorporent des nouvelles technologies comme des compteurs intelligents et des systèmes de surveillance à distance, et sont généralement conçus pour s'interconnecter au réseau principal¹.

¹ Définition d'un mini-réseau, Mini-grids for half a billion people, executive summary - Sector Management Assistance Program (ESMAP)

L'IMPORTANCE DES MINI-RÉSEAUX DANS L'ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Les mini-réseaux font l'objet d'initiatives internationales et nationales visant à accélérer leur déploiement en Afrique subsaharienne. Leur importance stratégique est reconnue par la Mission 300 (voir encadré) dont l'objectif est le raccordement de 300 millions d'Africains à l'électricité d'ici 2030. Mission 300 entend mobiliser plus de 90 milliards de dollars pour atteindre ses objectifs d'électrification, incluant un soutien massif aux solutions décentralisées. Cinq leviers favorisant l'expansion des mini-grids sont identifiés par l'ESMAP dans sa publication Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers :

1. Réduire le coût de l'électricité des mini-réseaux solaires hybrides à 0,20 \$/kWh d'ici 2030
2. Accélérer le rythme de déploiement à 2 000 mini-réseaux par pays chaque année
3. Fournir un service électrique fiable aux clients et aux communautés
4. Mobiliser les financements de partenaires au développement et les investissements publics pour "attirer" des financements privés.
5. Mettre en place des environnements commerciaux favorables aux mini-réseaux dans les principaux pays où l'accès est limité



Liam Murphy (COO de Vittoria Technology) mentionne que l'Alliance pour l'électrification rurale travaille sur des lignes directrices pour la gestion de la fin de vie des équipements, mais que leur mise en œuvre dépend largement du pays d'opération en raison des grandes variations.

Les défis rencontrés par les start-ups pour passer des financements par subventions (de 100 000 à 300 000 euros) à des montants plus importants (environ 500 000 euros) restent importants, car il existe peu de financeurs dans cette tranche. Des fondations comme celle d'AKUO ou des fonds philanthropiques se trouvent dans cet espace de financement intermédiaire.

La Banque Mondiale développe également depuis 2022 la plateforme DARES (Distributed Access through Renewable Energy Scale-Up) qui appelle à une collaboration entre États, investisseurs privés et organisations de développement afin de développer dans le même temps des solutions décentralisées qui pourront être transposées à l'international. Cette initiative majeure se fonde sur l'énergie solaire hors réseau, les mini-réseaux et d'autres solutions pour promouvoir un accès universel à l'électricité grâce à la décentralisation de la production électrique à partir d'énergie renouvelable.

On peut également citer l'Africa Minigrids Program (AMP), un programme d'assistance technique de 50 millions de dollars dirigé par les pays et conçu pour stimuler le marché des mini-réseaux solaires avec stockage par batteries afin d'améliorer l'accès à l'électricité dans 21 pays, ou encore le véhicule d'investissement ElectriFI de l'UE qui vise à accélérer le développement d'entreprises offrant un accès à l'énergie propre.

De manière générale, les mini-réseaux représentent une part significative des investissements internationaux dans l'énergie en Afrique subsaharienne. Sur les cinq dernières années, l'Africa Mini Grid Developers Association indique que 9 milliards de dollar de capitaux concessionnels ont été engagés pour le secteur des mini-réseaux. A titre de comparaison, la base de données « Tracking SDG7 » tenue par l'AIE et la Banque Mondiale indique les investissements internationaux dans les énergies renouvelables en Afrique subsaharienne représentent 20 milliards de dollars entre 2019 et 2023.

LE RÔLE STRATÉGIQUE DU STOCKAGE DANS LE DÉVELOPPEMENT DES MINI-RÉSEAUX

Les mini-réseaux doivent garantir un accès continu à l'électricité pour les populations, mais étant autonomes et fonctionnant grâce à des énergies renouvelables, il est nécessaire de recourir à des systèmes permettant de pallier l'intermittence. Pour compenser l'intermittence de la production, ils doivent être complétés par des générateurs diesel d'appoint ou par des systèmes de stockage d'énergie par batteries.

En 2023, environ 21 500 mini-réseaux étaient opérationnels dans le monde, desservant plus de 48 millions de personnes. Par ailleurs, 29 400 mini-réseaux supplémentaires sont actuellement planifiés, dont 95 % sont situés en Afrique et en Asie du Sud. Ces derniers ont le potentiel de connecter 35 millions de personnes. (AIE et BM, 2025).

Trois scénarios de développement de l'électrification et des batteries sont envisagés pour 2022–2030, d'après le rapport « Energy Storage for Mini-Grids, status and projections of battery deployment²»:

- **Scénario optimiste** : La part des électrifications rurales par mini-réseaux passe de 30 % à 50 % de 2022 à 2025, puis reste à 50 % jusqu'en 2030. Dans ce scénario, la demande annuelle de batteries pour mini-réseaux devrait passer d'environ 180 MWh en 2020 à plus de 3 600 MWh en 2030.
- **Scénario de base** : La pénétration des mini-réseaux reste stable à 30 %, et la demande annuelle de stockage dépasserait les 2 200 MWh.
- **Scénario pessimiste** : La pénétration des mini-réseaux chute à 20 %, avec une augmentation des autres méthodes d'accès à l'électricité comme l'extension du réseau et les systèmes d'éclairage solaire. La demande annuelle serait autour de 1 500 MWh.

D'ici 2030, la demande en systèmes de stockage d'énergie devrait donc, en fonction des scénarii, être multiplié par 8 dans le scénario le plus pessimiste et jusque par 200 dans un scénario de déploiement optimiste des solutions d'électrification par mini-réseau. Ces scénarii évoquant une démultiplication des systèmes de stockage sont confirmés par le rapport « Mini-grid partnership » (2024) qui stipule qu'en Afrique subsaharienne, le nombre de connexions installées a presque doublé entre 2019 et 2021, passant de 40 700 à plus de 78 000. Les principaux pays leaders en termes de MW installés sont le Nigéria, la Sierra Leone et le Sénégal. Cependant, d'autres pays, dont l'Ouganda et l'Éthiopie, développent également plusieurs projets en cours.

²ESMAP RPT_Energy Storage for Mini Grids_WEB.pdf

PLUSIEURS CAS D'USAGE SELON LES CONFIGURATIONS DE MINI-RÉSEAUX

Il existe différentes configurations de mini-réseaux selon leur source d'énergie connexion ou non au réseau national. Parmi celles-ci, la configuration autonome est la plus répandue en Afrique subsaharienne, car elle permet d'alimenter des zones rurales isolées non raccordées au réseau principal. À chacune de ces configurations, décrites ci-dessous, correspond un cas d'usage de stockage d'énergie spécifique :

Mini-réseaux solaires autonomes (off-grid)

Entièrement indépendants du réseau national, les mini-réseaux solaires autonomes reposent sur une production locale à partir de panneaux photovoltaïques et intègrent systématiquement des systèmes de stockage par batteries. En effet, ces dernières permettent d'accumuler l'énergie excédentaire produite en journée pour la restituer aux heures de forte demande. Malgré un coût initial élevé (infrastructures PV et dispositifs de stockage), cette configuration demeure la plus adaptée aux zones rurales non électrifiées, offrant une solution fiable, écologique et durable.

Mini-réseaux hybrides autonomes (solaire + diesel, parfois éolien)

Dans les mini-réseaux hybrides, le stockage par batteries reste nécessaire, mais il est dimensionné différemment. Ces systèmes combinent généralement le solaire photovoltaïque avec un générateur diesel (et parfois une composante éolienne) afin d'assurer la continuité de l'alimentation sans surdimensionner le stockage (voir figure 1). Les batteries servent ici principalement de tampon énergétique, stabilisant le système, lissant les pics de demande et réduisant la consommation de carburant. Cette configuration optimise les coûts : elle présente un CAPEX plus faible qu'un système 100 % renouvelable et un OPEX inférieur à celui d'un réseau diesel pur. L'hybridation peut être mise en place dès la conception du projet ou par conversion d'un mini-réseau diesel existant. Elle permet de maximiser l'usage des énergies renouvelables tout en maintenant la fiabilité d'alimentation.

Mini-réseaux interconnectés (reliés au réseau national)

Les mini-réseaux interconnectés, encore rares en Afrique, représentent une configuration émergente qui combine autonomie locale et interaction avec le réseau national. Dans ce modèle, le recours au stockage n'est pas systématique : il peut être réduit, mutualisé ou ciblé sur des usages spécifiques. En effet, le mini-réseau peut injecter l'excédent d'énergie dans le réseau principal ou, inversement, tirer de l'électricité en cas de déficit de production, ce qui limite le besoin de grandes capacités de batteries. Lorsque le stockage est présent, il est utilisé pour assurer la continuité locale en cas de panne du réseau (mode îloté) ou pour fournir des services auxiliaires (régulation de fréquence, réserve, gestion de charge). Ce type de configuration, plus complexe à mettre en œuvre, est adapté aux zones semi-rurales ou urbaines mal desservies et ouvre la voie à de nouveaux modèles économiques intégrant le stockage comme outil de flexibilité du système électrique. Elle est notamment promue dans le cadre du programme DARES.

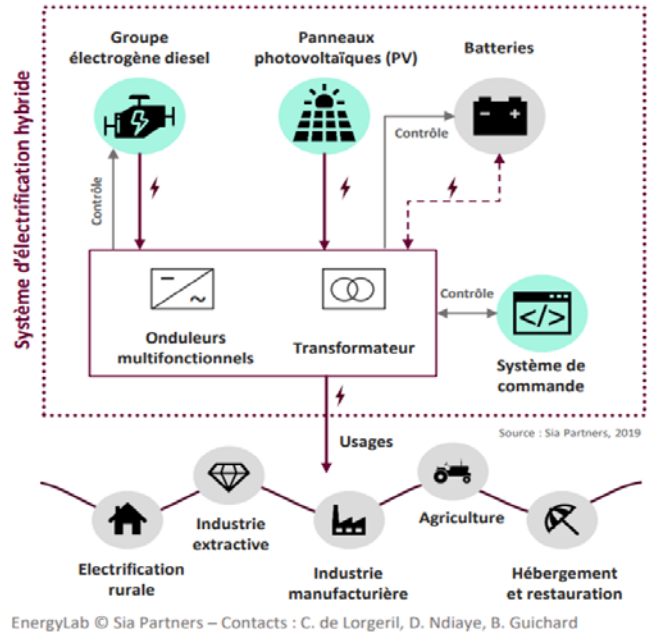


Figure 1 - Plan schématique d'un système hybride

EnergyLab © Sia Partners – Contacts : C. de Lorgier, D. Ndiaye, B. Guichard

TABEAU DE SYNTHÈSE DU STOCKAGE D'ÉNERGIE SELON LA CONFIGURATION DE MINI-RESEAU

Mini-réseau	Stockage par batteries requis / non	Commentaire
Mini-réseau solaire autonome	Oui	
Mini-réseau hybride autonome	Oui mais dimensionné différemment	Stockage réduit car le diesel peut couvrir les pics
Mini-réseaux interconnectés	Parfois mutualisé / Non obligatoire	Encore rare en Afrique subsaharienne

Enfin, il existe des mini-réseaux alimentés exclusivement par des groupes électrogènes diesel représentant une solution de transition, historiquement la plus simple à déployer dans les zones isolées. Ne nécessitant pas de stockage par batteries, ils présentent une forte dépendance aux coûts du carburant et à la logistique d'approvisionnement, souvent contraignante en milieu rural. Leur rendement diminue rapidement lorsqu'ils fonctionnent à faible charge, entraînant une

surconsommation et un vieillissement prématuré des équipements. Bien que leur maintenance soit perçue comme simple et maîtrisée, ces mini-réseaux souffrent d'une faible durabilité économique et environnementale, ce qui pousse progressivement à leur hybridation avec des sources renouvelables et à l'intégration de solutions de stockage pour réduire leur impact et leurs coûts d'exploitation.

AVANTAGES ET LIMITES DU STOCKAGE PAR BATTERIE

L'avantage du stockage par batterie au sein des mini-réseaux peut être apprécié en comparaison de mini-réseaux alimentés exclusivement par des groupes électrogènes diesel et ne nécessitant donc pas de stockage par batterie :

- **Réactivité immédiate** : Les batteries offrent un temps de réponse extrêmement rapide, ce qui les rend particulièrement efficaces pour la stabilisation de la tension et de la fréquence du réseau.
- **Exigences de maintenance plus faibles** : contrairement aux groupes électrogènes diesel, les batteries ne comportent pas de pièces mécaniques en mouvement, ce qui limite les besoins d'entretien (vidanges, filtres, pièces d'usure) et réduit significativement les coûts opérationnels.
- **Fonctionnement silencieux** : les systèmes de batteries sont dépourvus de nuisances sonores, ce qui est un atout dans les environnements urbains denses ou résidentiels, où la pollution sonore est un enjeu.
- **Réduction des émissions** : Les batteries n'émettent pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques locaux (NO_x, particules), contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de l'air et à la lutte contre le changement climatique.
- **Simplicité logistique** : L'absence de carburant réduit les besoins en logistique, en stockage et en transport, ce qui est particulièrement avantageux dans les zones enclavées ou peu sécurisées.

Malgré ces atouts, le stockage par batterie présente plusieurs contraintes techniques et économiques :

- **Coût élevé du stockage** : le système de stockage par batterie peut représenter jusqu'à 50% du coût total du système énergétique comme illustré par le cas comparatif théorique basé sur nos estimations (cf. tableau ci-dessous). Cela est d'autant plus vrai qu'on recherche du stockage longue durée (plusieurs jours d'autonomie).
- **Autonomie limitée** : ces systèmes sont généralement conçus pour fournir quelques heures d'électricité. En cas de faible production durant une période prolongée, ils ne permettent pas de garantir l'alimentation continue à moins d'être fortement surdimensionnés.
- **Contraintes réglementaires et de sécurité** : dans certains pays, les infrastructures critiques (hôpitaux, centres de données, stations de pompage) doivent assurer une alimentation électrique autonome sur plusieurs jours. Les batteries seules sont rarement suffisantes pour répondre à ces exigences sans support thermique.
- **Viabilité économique en milieu rural** : Dans les zones rurales africaines, en l'absence de mécanismes de soutien public (subventions CAPEX, tarifs subventionnés, facilités de paiement), les projets sont souvent jugés non rentables.



Élément	Scénario 1 : Sans stockage	Scénario 2 : Solaire + batterie	Scénario 3 : Solaire + diesel
Capacité PV	500 kWc	500 kWc	500 kWc
Capacité de stockage	—	2 MWh Li-ion	250 kVA groupe (back-up)
CAPEX PV (500 kWc, 700 \$/kW)	350 000 \$	350 000 \$	350 000 \$
Batterie Li-ion (250 \$/kWh installée)	—	500 000 \$	—
Groupe électrogène (250 \$/kVA)	—	—	62 500 \$
Réseau local BT/MT (lignes, poteaux)	200 000 \$	200 000 \$	200 000 \$
Onduleurs / convertisseurs	50 000 \$	100 000 \$	70 000 \$
Balance of System (BOS, IT, sécurité...)	50 000 \$	70 000 \$	60 000 \$
TOTAL	650 000 \$	1 220 000 \$	742 500 \$
Delta avec système sans stockage	0%	88%	14%

Source : calculs internes basés sur les données de coûts présentées dans l'étude.

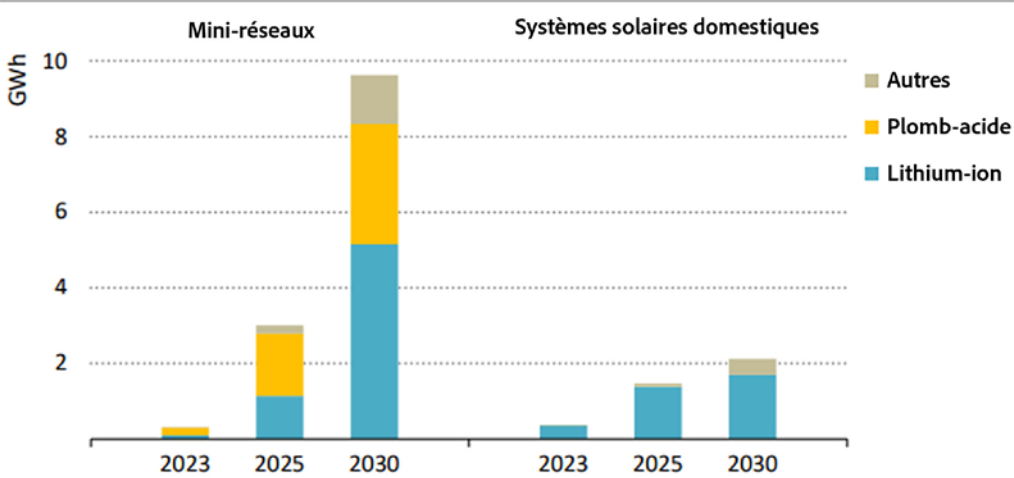
TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE

Le stockage d'énergie par batterie repose sur différentes solutions technologiques : batteries au plomb-acide, batteries lithium-ion, batteries nickel-hydrure métallique (NiMH), batteries nickel-cadmium (NiCD), batteries nickel-zinc (NiZn), batteries à flux, batteries sodium-soufre (NAS).

Les principales technologies employées aujourd'hui en Afrique subsaharienne, a fortiori dans les mini-réseaux

(cf. graphique) sont les batteries au plomb et au lithium. Les tendances et échanges avec les acteurs du marché ne permettent pour l'instant pas de conclure à l'émergence de solutions qui viendront remplacer à grande échelle ces deux technologies. La technologie lithium-ion étant amené à dominer le marché en 2030 d'après les analyses de l'AIE.

Figure 2.28 ► Stockage par type de batterie pour le nouvel accès à l'électricité dans des systèmes décentralisés dans le scénario NZE, 2023, 2025 et 2030



Les batteries lithium-ion dominent dans les systèmes décentralisés, bien que les batteries plomb-acide continuent de jouer un rôle dans les mini-réseaux, et que la part des autres types de batteries augmente.

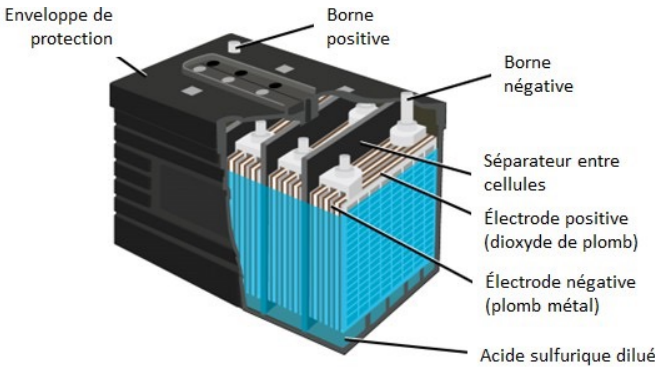
Notes : Les « autres » incluent les batteries sodium-ion, les batteries à flux et d'autres chimies/technologies de batteries. Le mix technologique peut varier fortement selon l'évolution du marché. Sources : Analyse de l'AIE basée sur la base de données et le modèle d'accès de l'AIE, ainsi que ESMAP (2023) et GOGLA (2023).

BATTERIES AU PLOMB-ACIDE

Principe de fonctionnement

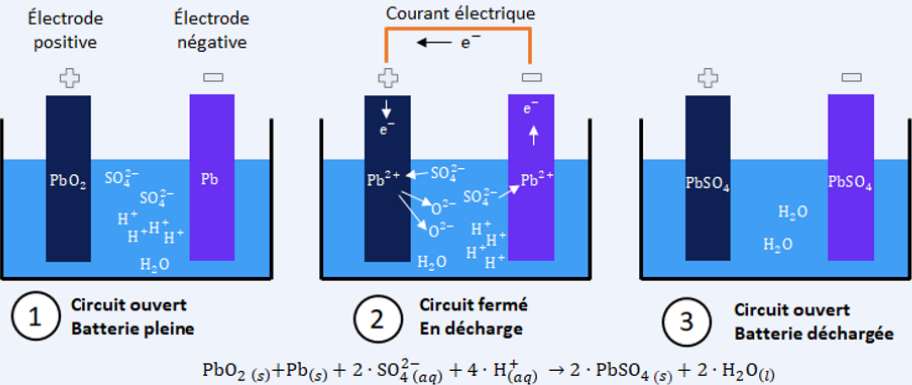
Un accumulateur batterie plomb-acide stocke l'électricité sous une forme chimique, ce qui signifie que le processus de charge / décharge va mettre en jeu des réactions chimiques conduisant plusieurs éléments à interagir entre eux : hydrogène (H), oxygène (O), plomb (Pb) et soufre (S). De ce fait, une batterie plomb-acide entre dans la catégorie dite des « accumulateurs électrochimiques », laquelle regroupe la très grande majorité des systèmes de stockage d'électricité.

Lors de la décharge de la batterie, cette dernière est une source d'énergie, les réactions chimiques sont donc spontanées. Pour ce faire, il faut connecter l'électrode positive avec l'électrode négative par un circuit électrique extérieur, relié aux appareils que l'on cherche à alimenter en électricité. Les ions contenus dans l'électrolyte permettent de transmettre le courant à l'intérieur de la batterie. Le circuit électrique global est donc fermé, permettant la circulation du courant (cf. schéma ci-dessous).

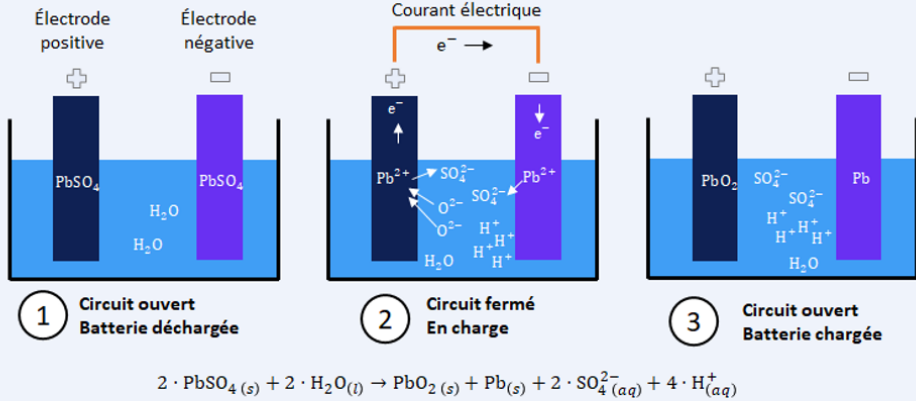


PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR PLOMB-ACIDE

Fonctionnement en décharge

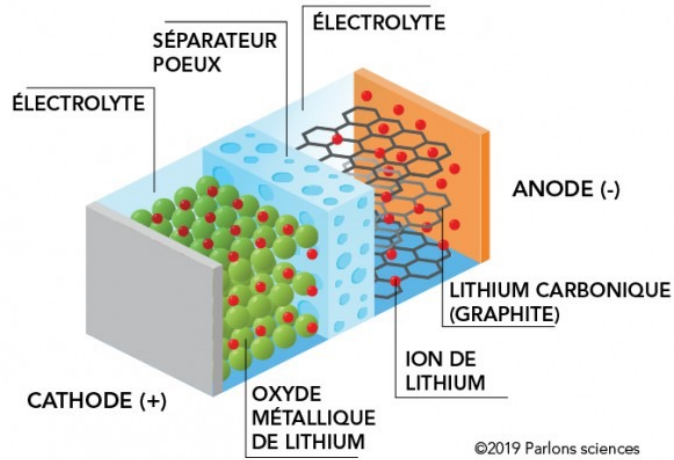


Fonctionnement en charge



e⁻ : électrons

COMPOSANTS D'UNE BATTERIE LITHIUM-ION



Durée de vie et coût d'investissement

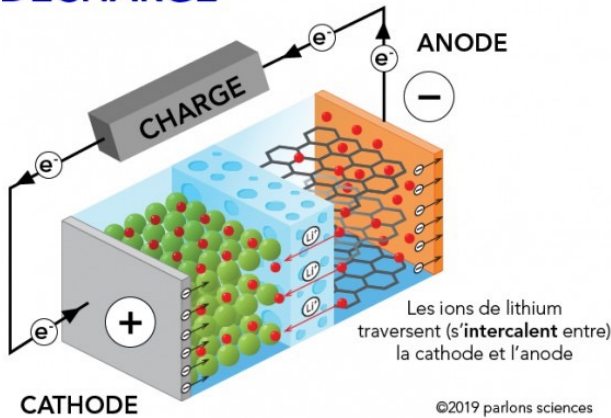
La durée de vie, appelée nombre de cycles, d'une batterie plomb-acide est directement liée à son taux de décharge : plus la profondeur de décharge augmente, plus sa « durée de vie » diminue. En d'autres termes, plus la batterie est déchargée en profondeur à chaque cycle, plus elle s'use rapidement, et moins elle pourra effectuer de cycles au total. L'autre facteur important pour ce type de batteries est la température extérieure, qui est généralement recommandée inférieure à 20°C.

Les estimations courantes donnent une durée de vie pour les batteries au plomb comprise entre 300 et 1500 cycles. Cependant, elles ont une durée de vie relativement courte en Afrique, notamment dû aux conditions climatiques. La gestion thermique est un aspect crucial de l'entretien des batteries. Une installation bien ventilée et, si possible, climatisée peut considérablement prolonger la durée de vie des accumulateurs.

Selon l'étude de l'ESMAP en 2022, le coût d'investissement initial de ces batteries, qui dépend de sa puissance de sortie et sa capacité énergétique, est d'environ 70 à 100\$/kWh.

Les estimations courantes donnent une durée de vie pour les batteries au plomb comprise entre 300 et 1500 cycles.

DÉCHARGE



BATTERIES LITHIUM-ION

Principe de fonctionnement

De la même manière que pour les systèmes de stockage plomb-acide, les batteries lithium-ion entrent dans la catégorie dite des « accumulateurs électrochimiques ». Le processus de charge / décharge va donc mettre en jeu des réactions chimiques conduisant plusieurs éléments à interagir : lithium (Li), cobalt (Co), oxygène (O) et carbone (C).

Les batteries Li-ion sont composées d'un ensemble de cellules encloses dans une enveloppe de protection. Chaque cellule contient un accumulateur, qui est le composant même où est stockée l'énergie. Un accumulateur est constitué d'une électrode positive et d'une électrode négative entre lesquelles est intercalé un séparateur, dont la fonction est d'éviter les courts-circuits entre les deux électrodes. L'ensemble est immergé dans un électrolyte.

La fabrication de ces batteries nécessite l'utilisation de matériaux solides et structurellement stables qui peuvent absorber et libérer du lithium dans les électrodes positives et négatives.

- **Boîtes** : aluminium/acier
- **Anode** : graphite
- **Cathode** : mélange de différents métaux - cobalt, nickel, manganèse, lithium, fer, aluminium (le matériau varie souvent et son choix a une grande

influence sur les performances caractéristiques de la batterie)

Les cellules (anode, cathode, séparateur) représentent 50% du poids des batteries et 90% de sa valeur.

Les principaux avantages de ces batteries sont une densité énergétique élevée et une durée de vie plus longue par rapport aux batteries traditionnelles au plomb-acide, pour un entretien minimal.

Durée de vie et coût d'investissement

Les estimations courantes donnent aujourd'hui une durée de vie pour les batteries lithium qui peut aller de 3000 à 6000 cycles, d'après les retours des entreprises du groupe cœur. Cependant, ces chiffres sont très variables selon les conditions d'utilisation de ces batteries, la qualité de fabrication, etc.

Selon la même étude de l'ESMAP, le coût d'investissement des batteries au lithium était en moyenne de 250\$/kWh en 2021. En interrogeant les entreprises participantes à l'étude, celles-ci nous ont indiqué qu'en 2025 le prix est déjà descendu autour de 200\$/kWh, notamment grâce à la production massive de batteries pour répondre à la demande de véhicules électriques, ce qui entraîne des économies d'échelle.



M. Saint-Sernin, co-fondateur de la start-up Zembo, partage les quatre éléments permettant de maximiser la durée de vie d'une batterie :

- **Évaluer correctement le besoin énergétique et choisir la technologie de batterie en fonction**
- **Sélectionner un fournisseur fiable, respectant des standards de qualité et offrant une traçabilité sur la fabrication**
- **Adapter l'utilisation de la batterie :**
 - **Surveillance des cycles : éviter une charge / décharge complète trop fréquemment, maintenir la batterie dans une plage de charge idéale (20-80%)**
 - **Contrôle de la température, les batteries lithium étant sensibles aux températures extrêmes. Comme mentionné plus haut, l'exposition à une chaleur excessive accélère l'usure de la batterie**
 - **Privilégier une charge lente pour limiter le stress sur les cellules**
- **Utiliser un système de gestion de batterie (BMS) intégrant des capteurs pour surveiller en temps réel les paramètres clés (température, cycles de charge, profondeur de décharge), qui permet d'ajuster les conditions d'utilisation.**



Les batteries lithium-ion dans les mini-réseaux

Le recours à ce type de batterie pour du stockage stationnaire connaît une importante augmentation de sa popularité depuis plusieurs années. En 2019, 29% des batteries utilisées en Afrique subsaharienne fonctionnaient au lithium-ion.

Dans le secteur des mini-réseaux, alors que les batteries au plomb étaient dominantes avant 2018 car la technologie était mature et peu coûteuse, elles sont aujourd'hui en déclin au profit des batteries lithium. Une enquête de l'ESMAP portant sur 211 mini-réseaux en construction ou mis en service en 2020 et 2021 a en effet révélé que 69 % d'entre eux utilisaient des batteries lithium-ion et 31 % des batteries plomb-acide (ESMAP 2022) témoignant de la transition de l'appétence du marché des batteries au plomb vers les batteries lithium.

Leur part de marché devrait atteindre 70 % d'ici 2030, contre 55 % en 2021 selon l'analyse du Customized Energy Solutions (CES, une société de conseil spécialisée dans les marchés de l'énergie) citée dans le rapport.

Les batteries Li-ion sont aussi largement répandues dans d'autres domaines et leur possible réutilisation dans le secteur des mini-réseaux constitue un avantage supplémentaire. C'est particulièrement le cas pour le secteur de la mobilité électrique. On associe ainsi un « état de santé » aux batteries des véhicules électriques pour suivre leur vieillissement au fil du temps. Lorsqu'il est autour de 80%, les batteries ne peuvent plus être utilisées dans les véhicules mais fonctionnent toujours (la puissance de sortie et l'autonomie du véhicule diminuent). Elles restent toutefois suffisamment performantes pour être utilisées comme système de stockage d'énergies renouvelables. En effet, pour une application de stockage d'énergie, les batteries lithium peuvent être employées jusqu'à un état de santé de 50% avant de devoir être recyclées.

TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

Batteries à flux

Les batteries à flux redox (Redox Flow Batteries, ou VRFB) sont un type de batteries rechargeables qui stockent l'énergie électrochimiquement dans deux électrolytes liquides séparés, souvent appelés solutions d'électrolytes. Ces solutions sont contenues dans des réservoirs externes et sont pompées à travers une cellule électrochimique qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. La restitution de l'énergie s'effectue en réalisant la réaction inverse.

Bien que cette technologie présente un intérêt technique, elle reste encore très rare en pratique, avec seulement une dizaine de cas d'usage recensés à ce jour.

Parmi les points favorables à cette technologie pour une utilisation en mini-réseaux, on peut noter :

- Des performances robustes dans diverses températures.
- Une longue durée de vie (jusqu'à 20 ans et 10 000 cycles), une capacité à décharger complètement et un fonctionnement pendant six heures ou plus.
- Les composants vanadium et zinc sont relativement faciles à recycler ce qui rend ces batteries intéressantes au niveau environnemental.

Cependant, leur coût initial est élevé, entre 350 et 450 \$/kWh et ces batteries présentent une faible densité énergétique (20-40 Wh/kg, contre 150-250 Wh/kg pour les batteries lithium), ainsi qu'une maintenance plus complexe. Leur coût d'investissement initial est également plus important dû à la complexité et à la taille des systèmes, comparé aux batteries au plomb-acide et lithium-ion.

Les principaux fabricants sont⁴:

- RedFlow Ltd (Australie) ;
- Primus Power Corporation (Etats-Unis) ;
- VRB Energy (Canada) ;
- Invinity Energy Systems Plc. (Fusion de RedT Energy, basée au Royaume-Uni et Avalon Battery, basée en Amérique du Nord) ;
- ESS Tech Inc. (Etats-Unis)

⁴ Source : Marché des batteries Flow - Taille, part et croissance

Batteries nickel-cadmium (NiCD)

Bien que représentant une part minime des installations, cette technologie a été mentionnée par M. LIPPERT - Directeur Innovations et Solutions pour l'Energie, chez SAFT. Selon lui, cette technologie est particulièrement adaptée aux conditions météorologiques sur le continent africain.

Les batteries nickel-cadmium conviennent à des systèmes photovoltaïques autonomes de petite taille, notamment dans les régions aux climats chauds. Ces batteries se distinguent par leur capacité à stocker plusieurs jours de consommation énergétique, offrant ainsi une alimentation de secours fiable pour des équipements critiques tels que des pompes ou des systèmes électroniques, même en l'absence prolongée d'énergie solaire.

Leur coût relativement faible, leur durée de vie assez importante (1500-2000 cycles) ainsi que la facilité du stockage indépendamment du niveau de charge en font un assez bon allié dans les environnements reculés.

Cependant, elles contiennent des substances dangereuses, notamment le cadmium (métal lourd et toxique) et doivent donc être collectées en fin de vie pour être recyclées, ce qui reste une contrainte majeure.

Autres technologies

- **Les batteries sodium-ion** développée par l'entreprise britannique Faradion, comme une alternative plus économique aux batteries lithium-ion. Ces batteries sont moins coûteuses et les matériaux sont plus abondants.
- **Les batteries fer-air**, encore en phase de développement, promettent une grande capacité de stockage à moindre coût, adaptées aux besoins des mini-grids en Afrique.
- **Les systèmes de stockage par volant d'inertie** offrent une solution robuste et durable pour le stockage d'énergie, bien que leur coût initial soit plus élevé. Ils sont particulièrement utiles pour les applications nécessitant des cycles fréquents de charge et de décharge.

Selon l'étude de l'ESMAP, Energy Storage for Mini Grids Status and Projections of Battery Deployment, ces technologies sont utilisées dans moins de 0,5 % des installations de mini réseaux. Leur part de marché d'ici 2030 devrait rester inférieure à 1 % des installations annuelles.

COMPARAISON DES TECHNOLOGIES : COÛTS, PERFORMANCES, DURÉE DE VIE

Nous nous concentrerons dans cette étude sur les principales technologies qui sont le plomb et le lithium. Nous évoquerons également les batteries nickel-cadmium qui présentent un intérêt particulier dans les conditions climatiques sur le continent africain tout en prenant en compte les difficultés de recyclage propres à cette technologie⁵.

Coûts du stockage

Le CAPEX (coût d'investissement amont) est souvent l'outil le plus souvent utilisé pour déterminer financièrement quelle technologie de stockage est plus avantageuse qu'une autre.

Cependant, utiliser principalement le CAPEX ne permet pas de prendre en compte d'autres facteurs comme la durée de vie du projet, l'efficacité, ou le coût opérationnel et de maintenance. Ces paramètres sont intégrés dans le calcul d'un autre indicateur : le coût nivelé du stockage (Levelized Cost of Storage ou LCOS). Ce dernier désigne le coût total du stockage sur l'ensemble de la durée de vie d'un système de stockage d'énergie et prend en considération différents éléments de coût et leur échelonnement dans le temps, la valeur temporelle de l'argent et le coût d'opportunité du capital investi. Le LCOS permet également la prise en compte du coût de la gestion de la fin de vie d'un système :

$$LCOS = \frac{CAPEX + OPEX - \text{Valeur résiduelle nette}}{\text{Énergie stockée sur la durée de vie}}$$

Où les paramètres suivants sont considérés :

- **CAPEX** : le coût d'investissement du système de stockage
- **OPEX** : le coût d'exploitation, maintenance et remplacement du système de stockage
- **Valeur résiduelle nette** : la valeur monétaire du système de stockage en fin d'utilisation – le coût de gestion de la fin de vie (i. collecte, recyclage, etc...)
- **Énergie stockée sur la durée de vie** : le fruit de l'équation suivante : nombre de cycle X capacité de stockage X Efficacité aller – retour

Le LCOS permettrait donc une comparaison plus complète des coûts des différents systèmes de stockage et de dépasser la seule prise en compte du CAPEX. A titre illustratif, une comparaison entre stockage par batterie lithium et plomb-acide est présentée ci-après pour un système fictif de 1 MW / 4 MWh avec les paramètres suivants :

⁵L'usage des batteries nickel-cadmium est par exemple réglementé en Europe : <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=O-J.L:2006:266:0001:0014:fr:PDF>

Élément	Lithium-ion	Plomb-acide
PARAMÈTRES DE BASE		
CAPEX	250 \$/kWh × 4 000 kWh = 1 000 000 \$	100 \$/kWh × 4 000 kWh = 400 000 \$
OPEX annuel	2 % × CAPEX = 20 000 \$	4 % × CAPEX = 16 000 \$
Durée de vie (années)	10	5
Cycles/an	300	300
Profondeur de décharge	90 %	60 %
Rendement	92 %	75 %
Énergie stockée sur la durée de vie	9 936 MWh	2 700 MWh
VALEUR RÉSIDUELLE NETTE		
Valeur résiduelle brute	200 000 \$	40 000 \$
Coût de la fin de vie	150 000 \$	10 000 \$
Valeur résiduelle nette	50 000 \$	30 000 \$

Source : calculs internes basés sur les données de coûts présentées dans l'étude.

On obtient alors :

$$LCOS_{Li} = \frac{(1000000 + (20000 * 10) - 50000)}{9936} = 115.7\$/MwH$$

$$LCOS_{Pb} = \frac{(400000 + (16000 * 5) - 30000)}{2700} = 166.7\$/MwH$$

Cette simulation explicite l'intérêt de l'usage du LCOS pour mesurer le coût réel d'un système de stockage sur l'ensemble de sa durée de vie et révèle que les batteries lithium sont aujourd'hui 30% moins chères que les batteries au plomb si l'on va au-delà du coût immédiat d'investissement et que l'on considère le coût complet du système.

Toutefois, des acteurs du marché comme SAFT ou SLS Energy soulignent que le LCOS n'est pas encore un indicateur opérationnel courant dans les appels d'offres ou les décisions commerciales de court terme. En effet, le caractère extrêmement volatile de la durée de vie

des batteries dans le contexte d'Afrique subsaharienne, notamment au regard des enjeux de maintenance et de pratiques d'utilisation (charge et décharge profonde), rend le calcul du LCOS et sa prise en compte dans les business model des acteurs délicats.

Le LCOS est plutôt utilisé en analyse macroéconomique, pour comparer les technologies dans les études d'investissement, les politiques publiques ou les feuilles de route énergétiques et est pertinent dans le cas de systèmes de stockage autonomes à grande échelle.

Pour permettre le calcul du LCOS, ces acteurs suggèrent donc que pour chaque technologie et chaque usage il soit fixé par des instances indépendantes un « standard » de nombre de cycles de charge sur lequel ils pourraient se fonder.

Performances des batteries

Au-delà du CAPEX, les facteurs suivants sont pris en compte par les investisseurs :

- **Durée de vie des batteries (ou nombre de cycles)** : Une durée de vie plus longue réduit les coûts de remplacement, qui incluent main-d'œuvre et batterie.
- **Profondeur de décharge** : Les batteries avec une meilleure profondeur de décharge offrent plus d'énergie disponible, réduisant les coûts de stockage.
- **Type de charge** : Les batteries au plomb ne conviennent pas aux charges inductives élevées qui peuvent les endommager.
- **Densité énergétique** : Les batteries à haute densité sont préférables pour leur capacité énergétique et leur facilité de transport.
- **C-rating** : Le C-rating est une mesure du courant maximum qu'une batterie peut charger ou décharger. La plupart des mini-réseaux utilisent des batteries plomb-acide dont le C-rating est de C/10, ce qui signifie qu'en cas de décharge, la batterie peut fournir un niveau de courant qui la déchargerait complètement en 10 heures. Ces batteries ne sont pas destinées à des applications lourdes nécessitant un courant de décharge élevé. Lorsqu'elles sont utilisées pour de telles applications, elles se déchargent rapidement. Les batteries lithium-ion et les batteries à flux redox ont souvent des indices C plus élevés.
- **Maintenance** : Les batteries nécessitant moins d'entretien, comme les lithium-ion, sont préférables. Les batteries au plomb et redox flow nécessitent plus de maintenance.
- **Service après-vente** : Essentiel pour le dépannage, surtout dans les zones éloignées.
- **Solution intégrée** : Les systèmes intégrés peuvent réduire les coûts fiscaux grâce à des droits d'importation plus bas par rapport aux composants individuels dans certaines régions africaines.
- **Maturité** : Les technologies de stockage matures sont perçues comme plus fiables, avec des chaînes d'approvisionnement et un service après-vente bien développés.
- **Coût d'investissement et opérationnel** : Les développeurs peuvent privilégier le coût initial plutôt que le coût total de possession.
- **Dégradation des batteries** : Les technologies avec des taux de dégradation plus élevés entraînent des coûts de remplacement plus fréquents et plus élevés.

TABLE 3.2: Pugh Matrix Ranking of Storage Technologies in Mini Grid Applications

Parameter	Weight (Percent)	Li-Ion	Lead Acid	Advanced Lead Acid	VRFB	Zn-Br	Nickel Sodium Chloride
Battery life	25	8	5	7	9	8	9
Heavy-duty usage (higher C-rate)	15	9	5	7	7	7	7
Maintenance	10	9	6	8	7	7	6
After-sales service	15	8	9	8	6	6	5
Maturity of technology	10	8	10	6	7	7	6
Cost	25	9	10	8	6	6	5
Weighted-average score		8.5	7.5	7.4	7.1	6.9	6.5

Source: CES.



Ce tableau de comparaison des technologies de stockage permet de formuler des recommandations concernant ces technologies. Chaque paramètre est noté sur une échelle de 1 à 10, et est également pondéré : certains critères comptent plus que d'autres dans le score final. Dans le tableau, les deux critères principaux sont la durée de vie de la batterie et son coût, respectivement pour garantir la durabilité du stockage et la viabilité économique.

La capacité de la batterie à supporter des cycles intensifs, la maintenance, le SAV ainsi que la maturité de la technologie ont également été pris en compte.

Un score total d'efficacité est calculé (dernière ligne du tableau) en effectuant une somme pondérée.

Les conclusions de cette comparaison sont les suivantes :

- Le Lithium-ion reste la solution optimale pour la plupart des mini-réseaux car elle combine longévité, fiabilité et coûts raisonnables.
- Les batteries au plomb restent abordables, au moins lors de l'investissement initial qui est moins coûteux. En revanche, leur durée de vie est moindre.
- Les technologies émergentes comme les batteries au Zinc-Bromine et celles à flux redox de vanadium sont en cours de développement et semblent prometteuses, mais à l'heure actuelle leur utilisation dépendrait uniquement de subventions étant donné leurs coûts trop élevés pour être déployé à grande échelle.

ACTEURS DU SECTEUR ET MODÈLES D'AFFAIRES

On présente ici les principaux acteurs du secteur. Ces listes ne sont pas exhaustives mais dresse un panorama des acteurs et identifie les solutions les plus représentatives sur le territoire. Les entreprises indiquées **en bleu** font partie du groupe cœur de cette étude.

CONSTRUCTEURS DE BATTERIES POUR DU STOCKAGE STATIONNAIRE

Présentation des principaux constructeurs et fournisseurs

Batteries lithium

- **Panasonic Corporation:** L'entreprise est non seulement spécialisée dans la fabrication de batteries pour véhicules électriques, mais fournit des systèmes à grande échelle, aussi bien pour les habitations que pour les réseaux.
- **LG Energy Solution (LGES):** deuxième producteur mondial de batteries lithium-ion, avec une part du marché mondial d'environ 20 %. Elle fournit certains des plus grands constructeurs de voitures électriques, mais a également des intérêts importants dans les principaux systèmes de stockage d'énergie par batterie, qui fournissent des applications résidentielles et à l'échelle du réseau.
- **Samsung SDI:** Solutions pour des clients à l'échelle résidentielle et à l'échelle du réseau
- **Pylontech:** cette entreprise chinoise est un fournisseur de systèmes de stockage d'énergie spécialisés, qui regroupe des compétences en électrochimie, en électronique de puissance et en intégration de systèmes. Elle propose des systèmes solaires commerciaux et industriels, ainsi que des systèmes solaires résidentiels à énergie de batterie (BESS).

- **Solar MD :** Solar MD est spécialisé dans le stockage par batterie lithium-ion pour les applications résidentielles et commerciales. Elle conçoit des systèmes intelligents de gestion des batteries, permettant la surveillance, la protection et le contrôle au niveau des cellules. Les solutions sont fabriquées dans une usine au Cap, en Afrique du Sud.
- **CEGASA:** CEGASA est une entreprise européenne avec 90 ans d'expérience dans le stockage d'énergie. Elle se concentre sur l'assemblage local de batteries à base de cellules Lithium-Fer-Phosphate (LFP) importées de Chine, en intégrant sa propre gestion des systèmes de batteries (BMS) et de l'énergie (EMS).
- **SAFT:** Filiale de TotalEnergies depuis 2016, est un leader mondial dans la conception et la fabrication de batteries. L'entreprise propose des solutions de stockage d'énergie pour les secteurs de l'industrie, du transport, de l'énergie et de la défense. SAFT développe notamment les batteries lithium-ion et nickel-cadmium.

Batteries plomb-acide

- **Exide Technologies:** l'un des principaux fabricants mondiaux de batteries plomb-acide. Outre les batteries automobiles, ils fabriquent également des volumes considérables de batteries industrielles. Ces batteries sont utilisées dans les systèmes de sauvegarde et d'autres solutions miniatures de stockage d'énergie.
- Pour garantir la durabilité des systèmes, Exide recueille auprès de ses clients un maximum d'informations sur les conditions d'utilisation prévues des batteries (température, profil de charge, usage, etc.) afin de dimensionner les équipements au plus près des besoins réels. L'entreprise propose également des formations techniques destinées à prévenir une fin de vie prématurée des batteries, considérant qu'il relève de la responsabilité du constructeur de transmettre aux utilisateurs les connaissances nécessaires à une utilisation optimale.

Blackridge Research & Consulting et Grand View Research cite également les acteurs suivants :

- **Clarios** (USA, anciennement Johnson Controls) : spécialisés dans les batteries à usage des véhicules électriques
- **GS Yuasa** (Japon) : diverses applications, notamment les batteries automobiles, les batteries industrielles et les batteries à haute performance pour la recherche en haute mer et le développement spatial
- **East Penn** (USA): notamment spécialisé dans les usages pour l'industrie automobile
- **EnerSys** (USA): spécialisé dans les solutions de stockage d'énergie stationnaire, pour les télécoms, data centers, systèmes de secours, ainsi que les applications industrielles lourdes.
- **Leoch International Technology Ltd** : (Chine) : batteries pour les secteurs des télécoms, de l'énergie solaire hors réseau, des systèmes UPS, et de l'automobile, avec une forte présence dans les marchés émergents



Filières de fournisseurs – exemple des entreprises du groupe cœur

L'approvisionnement en batteries pour les systèmes énergétiques déployés en Afrique repose sur une chaîne logistique largement internationalisée, marquée par une forte dépendance à l'Asie pour les composants lithium, une prédominance européenne pour les batteries au plomb, et une émergence progressive de filières locales de seconde vie. L'analyse des entreprises du groupe cœur montre que la structuration de ces filières dépend non seulement de la technologie utilisée, mais également du modèle économique, des capacités de fabrication locales et du degré d'intégration souhaité par les opérateurs.

Batteries lithium neuves – la filière de Chine demeure majoritaire

PAM africa, qui assemble certains de ses systèmes au Nigéria, s'approvisionne principalement en Chine pour les composants critiques. Malgré quelques tentatives de localiser l'assemblage, les économies d'échelle limitées et le manque d'infrastructure freinent l'industrialisation sur le continent.

Dans le cas d'**Engie Energy Access**, la stratégie diffère selon les segments. Pour les systèmes solaires domestiques (SHS), la chaîne d'approvisionnement est entièrement basée en Chine, tandis que pour les mini-réseaux, Engie collabore avec le fabricant sud-africain Solar MD, indiquant une volonté de favoriser des partenaires africains lorsqu'ils sont disponibles.

L'entreprise **ARESS**, quant à elle, importe directement ses batteries LFP (lithium-fer-phosphate) de Chine, à l'instar de la majorité des intégrateurs. **Evolve BGS** n'intervient pas dans la sélection initiale des batteries mais constate que la majorité des équipements de ses clients sont d'origine chinoise, parfois italienne ou allemande.

Enfin, l'entreprise, **Cegasa** illustre une filière hybride : bien que ses cellules lithium soient également importées de Chine, tout l'assemblage et le développement des systèmes de gestion (BMS et EMS) sont effectués dans ses usines et laboratoires en Europe, assurant ainsi un contrôle qualité renforcé. En effet, l'entreprise dispose de ses propres laboratoires, ce qui leur permet de réaliser des tests approfondis à chaque étape de la fabrication : des cellules aux modules, jusqu'au système complet. Ils possèdent des laboratoires spécialisés dans la caractérisation des cellules et leur évaluation dans des conditions extrêmement exigeantes. De plus, leurs laboratoires dédiés à l'approbation et à la sécurité assurent une qualité et une fiabilité optimales, aussi bien au niveau des cellules que des modules. Chaque système complet est finalement testé rigoureusement avant d'être envoyé sur son lieu d'installation.

Batteries plomb-acide : un ancrage européen

Contrairement aux batteries lithium, la filière plomb en Afrique subsaharienne repose encore largement sur une production européenne. **Exide** illustre ce modèle industriel : toutes ses batteries au plomb sont fabriquées en Allemagne, en France ou au Portugal, puis expédiées vers les projets africains à la demande des clients (intégrateurs ou développeurs).

ARESS complète son portefeuille avec des batteries au plomb provenant d'Allemagne et du Japon, notamment de la marque **Okaya**, ce qui montre que cette technologie reste une solution recherchée pour certains usages, souvent pour des raisons de coût ou de compatibilité avec des systèmes existants.

Batteries de seconde vie : de l'innovation pour davantage de circularité

SLS Energy se distingue par une stratégie d'approvisionnement circulaire, en récupérant des composants issus de déchets électroniques ou de batteries usagées, souvent d'origine chinoise. Le principal défi réside dans l'hétérogénéité des cellules, qui nécessite des systèmes de gestion des batteries (BMS) adaptés, principalement sourcé en Chine également.

Pour contourner l'absence de BMS standardisés pour les batteries reconditionnées (ils sont conçus pour des batteries neuves), SLS Energy collabore avec des partenaires européens sur des plateformes open source, notamment en Allemagne afin d'améliorer la traçabilité des chaînes d'approvisionnement et la personnalisation des BMS. L'entreprise s'appuie également sur des partenaires techniques pour le diagnostic et le tri des batteries récupérées, condition indispensable à leur réutilisation.

STRATÉGIES DE DISTRIBUTION ET D'EXPLOITATION

Les développeurs ont de plus en plus tendance à choisir des zones où un certain niveau d'activité économique ou anchor load est présent au sein des communautés rurales, permettant de faire fonctionner les mini-réseaux au maximum de leur potentiel. Par anchor load, il est fait référence à une charge ou un client dont la demande en énergie est stable, prévisible et de puissance suffisante pour servir de base économique et technique pour le développement et la viabilité du mini-réseau. Il s'agit du client dont la demande assure la viabilité économique minimale du système. Les mini-réseaux sont ainsi de moins en moins destinés à alimenter uniquement les ménages, mais également d'autres activités économiques.

Ces différentes stratégies sont au cœur de la viabilisation des systèmes d'accès à l'énergie avec stockage.

consommations de gaz ou d'électricité via internet ou un point de rechargement. Il permet donc de consommer de l'énergie selon le montant rechargé sur le compteur individuel.

Ce système d'achat à l'avance d'un crédit d'électricité viabilise le système de stockage d'énergie en réduisant le risque lié au coût initial d'investissement de deux manières :

- En réduisant le risque de pertes commerciales et d'impayés ce qui favorise la génération de revenus stables et anticipés
- En rendant les usagers plus attentifs à leur consommation, ce qui réduit notamment les cas de décharge profonde, augmente la durée de vie des batteries et donc leur rentabilité

Prépaiement

Ce modèle d'affaires est basé sur l'installation et l'utilisation d'un compteur communicant. Ce dernier fonctionne avec un système de prépaiement des



Au Bénin, c'est le modèle d'affaire déployé par Engie Energy Access. A l'heure actuelle, une centrale d'une capacité de 134 kW est installée, et des mini-réseaux de capacités de 50, 75 ou 100 kW sont également mis en place. L'énergie est stockée à l'aide de batteries au lithium pour la nuit. Un réseau de distribution basse tension a été installé dans les villages alentours, ainsi que des compteurs individuels destinés aux individus, fonctionnant avec le système de prépaiement. Les consommateurs peuvent acheter autant d'unités qu'ils le souhaitent, une unité correspondant à 1 kWh.

Les deux types de consommateurs visés sont les ménages et les petits commerces.

La totalité des installations appartiennent à Engie, qui ne vend que l'énergie aux consommateurs. Ce modèle est à ce jour une réussite au Bénin pour Engie, qui devrait mettre en service 20 nouveaux sites de production d'ici janvier 2025.

Pay-as-you-go

Contrairement au modèle de compteur prépayé, dans lequel l'utilisateur achète à l'avance un crédit fixe d'électricité (en kWh ou en monnaie) qu'il consomme jusqu'à épuisement, le modèle pay-as-you-go (PAYG) repose sur un système de paiements progressifs et flexibles, effectués au fur et à mesure de l'usage, généralement via des plateformes de paiement mobile. Il s'agit donc d'un modèle plus dynamique, qui combine des outils numériques (puces GSM, communication M2M, plateformes de paiement en ligne) pour activer ou désactiver à distance l'accès à l'électricité en fonction des paiements effectués.

Ce modèle commercial innovant constitue aujourd'hui l'un des leviers les plus prometteurs pour répondre à la demande énergétique croissante des ménages ruraux africains, en facilitant le financement de l'accès à l'énergie. Il cible principalement les zones couvertes par les réseaux mobiles mais non raccordées au réseau électrique, permettant de fournir d'abord des services énergétiques de base à faible coût, avant de monter en gamme vers des usages plus puissants (appareils électroménagers, pompes, réfrigération, etc.).

Concrètement, le système PAYG repose sur la communication entre le consommateur, la plateforme de paiement et le fournisseur d'électricité. Les équipements solaires sont équipés de puces GSM et de modules

Machine-to-Machine (M2M), permettant au fournisseur de surveiller à distance la performance du système et de déverrouiller le service dès réception d'un paiement. Les données transmises par le réseau mobile permettent un suivi en temps réel de l'usage et de l'état des batteries, améliorant ainsi la gestion technique et commerciale du parc installé.

Comme le modèle prépayé, le PAYG renforce la viabilité économique des systèmes avec stockage par batteries en :

- permettant aux utilisateurs de payer par petites sommes, élargissant ainsi la base de clients ;
- garantissant des revenus récurrents et plus prévisibles pour l'opérateur ;
- facilitant le pilotage à distance du stockage, tout en favorisant un comportement plus économe et responsable des utilisateurs, ce qui contribue à prolonger la durée de vie des batteries.

Enfin, plusieurs acteurs du secteur expriment leur souhait de voir évoluer ce modèle vers des solutions plus souples encore, permettant à terme le paiement après usage, aujourd'hui limité par les contraintes techniques et contractuelles.



ARESS fut la première entreprise à mettre en place un tel système au Bénin, jusqu'ici plus de 8000 kits solaires ont été distribués en Pay-as-You-Go.

Le projet So-Cool de PAM Africa repose sur le stockage d'énergie par batteries lithium-ion LifePO4 afin de fournir en énergie plusieurs petits commerces dans des villages au Nigeria. Pour résoudre la question du coût de la batterie, l'entreprise utilise également le système PAYG, permettant aux consommateurs de payer uniquement ce dont ils ont besoin et ainsi de rendre cette technologie plus accessible.

Le modèle ABC

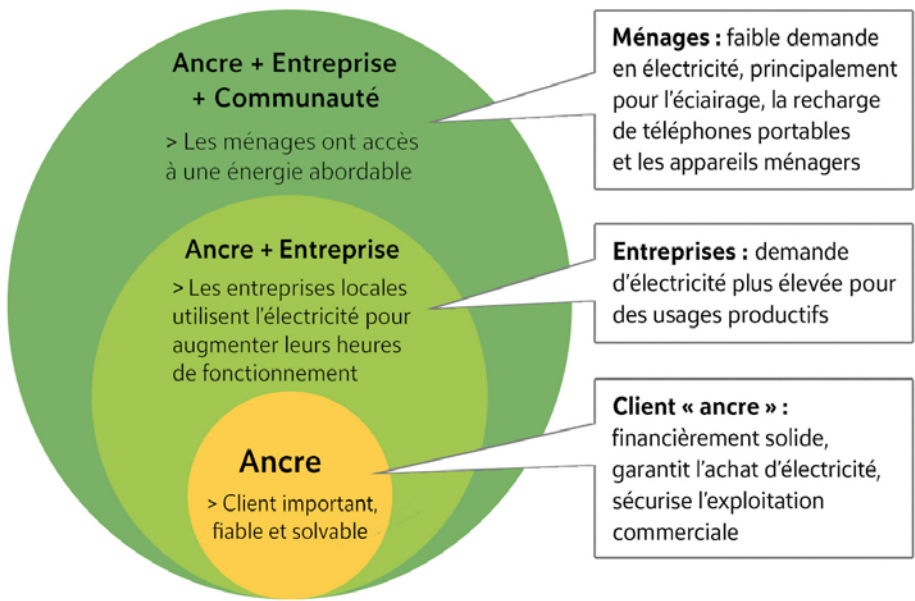
Pour pallier la faible rentabilité des mini-réseaux reposant uniquement sur l'alimentation des populations rurales, et répondre à la demande croissante des bailleurs de prouver la viabilité économique des projets après leur mise en service, un nouveau modèle – l'Anchor-Business-Community (ABC) – émerge en Afrique.

Dans ce modèle, l'installation de production d'énergie est d'abord conçue pour répondre aux besoins d'un acteur productif local dont la consommation est prévisible et capable de payer le prix du marché (par exemple, une petite unité de transformation agricole ou une pisciculture). Ce client, appelé « client ancre », assure la

stabilité économique du projet.

Une fois que le client ancre est alimenté de manière fiable, l'aire de distribution de l'installation s'élargit progressivement. Elle peut d'abord desservir d'autres petits acteurs économiques locaux, comme des commerces, avant d'étendre l'accès à la population via un mini-réseau progressivement déployé.

Ce modèle peut être synthétisé graphiquement comme suit :



Source : « Le modèle ABC : les clients "ancre" comme clients principaux des mini-réseaux dans les économies émergentes », GIZ



Au Cameroun, le modèle ABC se déploie à travers le projet de "communes de production", porté par l'association des communes (CVUC). Plusieurs collectivités locales souhaitent ainsi se doter d'une infrastructure communale de production d'énergie destinée à :

- **alimenter en priorité les petits acteurs économiques locaux,**
- **stimuler la création de nouvelles activités grâce à un approvisionnement fiable,**
- **puis étendre progressivement la fourniture d'électricité à la population.**

À Madagascar, l'entreprise Anka développe également plusieurs projets d'électrification par mini-réseaux avec stockage, fondés sur ce même modèle ABC.

Concernant la viabilisation des systèmes de production d'énergie et de stockage par batterie, le modèle ABC présente des avantages propres par rapport au prépaiement et au PAYG en :

- Favorisant l'amortissement du coût d'investissement des batteries grâce à un client ayant une consommation régulière et de grande ampleur
- Réduisant le risque financier, les clients privés présentant un risque moindre d'impayé
- Réduisant le risque de décharge profonde et le besoin de surdimensionnement grâce à une demande stable assurée par le client ancre qui évite la sollicitation des batteries en journée et une répartition de la demande permettant le lissage des pics (les clients ancres et business consommant en journée et les ménages « consumers » le soir).



SLS Energy

SLS Energy est une entreprise rwandaise innovante spécialisée dans l'optimisation et la réutilisation des batteries, notamment celles issues des véhicules électriques et des déchets électroniques. L'entreprise se distingue par sa capacité à prolonger la durée de vie des batteries en les réutilisant jusqu'à ce qu'elles atteignent la fin de leur vie utile.

Elle développe des systèmes de stockage d'énergie à la demande en utilisant des batteries de seconde vie. Ces systèmes sont conçus pour optimiser la configuration, estimer l'état et protéger les batteries, grâce à un contrôle à distance via des capteurs IoT et une technologie cloud. Cette approche garantit la sécurité et permet une analyse prédictive des performances des batteries.

Vittoria Technology

Cette entreprise sud-africaine est active dans la réutilisation des batteries par le biais de son initiative innovante Battery Bank Africa. Cette plateforme numérique permet de louer des batteries usagées pour les mini-réseaux électriques, ce qui offre une solution efficace pour prolonger la durée de vie des batteries.

PROCESSUS ET ACTEURS DE LA FIN DE VIE DES BATTERIES

Selon l'étude de la GIZ « Exploration of Market Potentials in Battery Recycling and Refurbishment in Africa », plusieurs options existent pour le traitement des batteries en fin de vie : elles peuvent être réutilisées, reconditionnées ou recyclées.

Réutilisation des batteries

Tout d'abord, les batteries peuvent être simplement réutilisées. C'est par exemple le cas des batteries usagées de véhicules électriques (ce processus est déjà développé en Europe). La batterie est ainsi utilisée telle quelle, sans la démonter ou la modifier mais dans une application différente de celle d'origine et ce, même s'il ne lui reste plus que 80% de sa capacité.

Des batteries inutilisables pour les véhicules électriques alors peuvent encore être utiles pour des applications stationnaires, telles que le stockage d'énergie pour les systèmes de secours ou le soutien des énergies renouvelables. Cela peut nécessiter des modifications du système de gestion des batteries (BMS) ou la réparation des cellules endommagées.

Reconditionnement

La batterie est ici démontée afin de tester, réparer ou remplacer certains composants (comme des modules ou cellules défectueuses), puis elle est remontée.

Afin de réduire l'impact de la fin de vie des systèmes de stockage et considérant qu'une batterie arrive régulièrement en fin de vie du fait de l'usure d'une seule ou de quelques cellules, plusieurs entreprises développent ainsi des solutions de stockage par batterie permettant le reconditionnement. On voit ainsi émerger des solutions « modulaires » à l'image de la société française Tyva Energie avec sa solution « Tyva Refill ». Selon ce modèle la batterie est conçue pour permettre le retrait, le test, et le remplacement individuel des cellules défectueuses ou usées au sein du pack d'origine.



Cas de l'entreprise Lagazel

L'entreprise met en place des partenariats pour la collecte de batteries lithium usagées provenant d'équipements solaires domestiques et de dispositifs de mobilité électrique. Les batteries sont ensuite triées selon leur état de santé, en utilisant des tests spécifiques pour évaluer leur capacité résiduelle et leur sécurité. Les cellules présentant un état de santé satisfaisant sont réassemblées en nouveaux packs batteries destinés à des usages stationnaires.

Le modèle économique de Lagazel autour de la fin de vie des batteries Li-ion est encore en cours de définition. L'une des options privilégiées repose sur un positionnement en tant que fournisseur de services, exclusivement centré sur la réparation et la réutilisation de batteries usagées, sans en être propriétaire : Lagazel n'achète ni ne revend les batteries prises en charge. L'entreprise intervient également dans l'assemblage de cellules, et peut proposer à la vente des batteries neuves ou issues de seconde vie.

En implantant des ateliers de fabrication et de remise en état de batteries directement sur le continent africain, Lagazel favorise la création d'emplois locaux et soutient le développement industriel régional, tout en limitant les coûts liés à l'importation de nouveaux équipements. L'entreprise dispose également d'une unité de démantèlement dédiée au reconditionnement local des batteries, renforçant ainsi son ancrage dans une logique d'économie circulaire de proximité.

Recyclage

Enfin, la troisième option intervenant à la toute fin de la chaîne est le **recyclage** : la batterie est complètement démontée pour extraire les matériaux (lithium, nickel, cobalt, cuivre, etc.), qui seront ensuite réutilisés pour fabriquer de nouvelles batteries ou d'autres produits.

Recyclage par pyrométallurgie

Basé sur la chaleur et la fonte des matériaux, ce traitement permet de séparer les métaux utilisés dans les batteries pour ensuite les récupérer et les valoriser. Grâce à cette technique, un mélange de cuivre, nickel et cobalt peut être récupéré, il sera ensuite traité pour pouvoir être réutilisé dans de futures batteries.

Points positifs	Points négatifs
• Pas besoin de main d'œuvre de démantèlement • Coûts faibles • Procédure de transformation des métaux déjà courante en Afrique	• Nécessaire de développer le génie chimique et le génie des procédés pour être plus efficace • Méthode énergivore • Le lithium et l'aluminium se perdent dans les déchets et ne peuvent donc pas être recyclés

Recyclage par hydrométallurgie

La batterie est d'abord démantelée et déchiquetée, la cathode est alors séparée chimiquement des autres matériaux. Le produit obtenu est appelé BAMB (mélange de matériaux actifs pour batteries), les métaux contenus dans celui-ci sont dissouts avec l'utilisation d'acides puis cristallisés. Les matériaux peuvent alors être réutilisés dans de nouvelles batteries.

Il faut compter 3000 à 5000 € pour recycler une tonne de batterie lithium-ion (comprend le stockage, le tri et le traitement).

Points positifs	Points négatifs
• Presque tout le processus est automatisé • Le procédé chimique est déjà utilisé en Afrique	• Besoin de démanteler les batteries • Nécessaire de développer le génie chimique, le génie mécanique et le génie des procédés pour être plus efficace • Viable uniquement à grande échelle

Recyclage direct

Après le broyage physique de la batterie et la séparation des matériaux, les composants peuvent être réutilisés directement dans la production. Le traitement consiste en une relithiation (remplacer les ions lithium manquants dans la structure).

Pour l'instant, cette méthode a été uniquement testée en laboratoire, ce qui la rend compliquée à déployer à grande échelle.

Points positifs	Points négatifs
• Réutilisation de certains matériaux • Automatisation du processus • Peu énergivore	• Nécessaire de développer le génie chimique et le génie des procédés pour être plus efficace • Existant uniquement en phase laboratoire



Quelques entreprises opérant en Afrique subsaharienne

En Afrique subsaharienne, la filière de recyclage des batteries est encore émergente et peu structurée dans la plupart des régions, notamment dû à l'absence d'approvisionnement local en batteries usagées et de systèmes de collecte des déchets électroniques organisé. En revanche, dans les années à venir le continent devrait connaître une augmentation de la quantité de batteries usagées, qui aujourd'hui sont en cours d'utilisation et qui arriveront en fin de vie. Le secteur informel est à l'heure actuelle encore très présent, notamment au niveau de la collecte des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). De ce fait, peu d'entreprises ont des activités conséquentes dans ce secteur. La liste des acteurs impliqués dans le recyclage des batteries en Afrique ci-dessous est donc indicative et non exhaustive, avec des initiatives qui varient selon les pays et les contextes locaux.

Cwenga Technologies

Cwenga Technologies est une entreprise sud-africaine qui a pour objectif de récupérer une partie des composants des batteries en utilisant une technique de séparation chromatographique des métaux de batterie par lixiviation en utilisant des réactifs réutilisables et peu coûteux, à température ambiante et à pression atmosphérique. Cela permet de réduire les besoins en énergie électrique associés aux procédés pyrométallurgiques qui sont coûteux et énergivores. Le recycleur fournit des résines échangeuses d'ions et du charbon actif, avec des matériaux d'entrée fournis par les partenaires industriels Lanxess et Chemviro.

L'objectif est de récupérer et de séparer les métaux contenus dans les batteries à un niveau de qualité leur permettant de réintégrer le marché en tant que matières premières.

Enviroserve

Fondée aux Emirats Arabes Unis, Enviroserve est un acteur majeur dans le domaine de la gestion des déchets électroniques et du recyclage des matériaux. Aujourd'hui, ayant étendu ses activités au Rwanda notamment, Enviroserve collabore avec diverses entreprises solaires et le gouvernement pour collecter, tester, reconditionner et recycler les batteries usagées. Les batteries récupérées sont testées, rechargées, reconditionnées et réintroduites sur le marché pour une seconde vie.

Cette entreprise se concentre sur le test et la réutilisation des cellules fonctionnelles pour réduire la quantité de batteries à recycler. Ils soutiennent les entrepreneurs locaux et collaborent avec des partenaires pour la reconstitution de batteries adaptées à différents besoins énergétiques.

Hinckley Recycling

Entreprise pionnière dans le recyclage des déchets électroniques (e-déchets) au Nigeria et premier recycleur d'e-déchets enregistré dans le pays. Ils collaborent étroitement avec le ministère de l'Environnement, la National Environmental Standards and Regulations Enforcement Agency (NESREA) et la Lagos State Environmental Protection Agency (LASEPA) pour assurer une gestion responsable des e-déchets. Hinckley Recycling propose des solutions de collecte et de recyclage des équipements électriques et électroniques, garantissant la destruction sécurisée des données confidentielles et dépassant les objectifs de réutilisation, de recyclage et de valorisation.

ANALYSE DES DÉFIS ET OPPORTUNITÉS SPÉCIFIQUES À L'AFRIQUE SUBSAHARIENNE

Cette partie de l'étude résulte majoritairement des sessions de travail réalisées avec les entreprises du groupe cœur, qui ont permis d'alimenter les analyses en les enrichissant avec leurs expériences, les problématiques qu'ils ont rencontrées sur le continent ainsi que les solutions déployées.

DÉFIS ENJEUX TECHNIQUES ET OPÉRATIONNELS

Fiabilité et Durabilité

Conditions climatiques

Les conditions climatiques extrêmes et l'infrastructure limitée en Afrique subsaharienne posent des défis pour la durabilité et la maintenance des systèmes de stockage d'énergie.



M. LIPPERT - Directeur Innovations et Solutions pour l'Energie, chez SAFT, estime qu'en Afrique, la température élevée est un facteur de 1er ordre dans la dégradation des batteries, notamment celles au plomb. Augmenter la température de 10 degrés divise la durée de vie de la batterie par deux. Une batterie conçue pour durer 10 ans à 25°C ne durera en moyenne que 5 ans si elle est utilisée à 35°C.

Afin de pallier cette difficulté et de s'adapter aux conditions climatiques du continent, l'entreprise a développé un système de container climatisé, dans lequel se trouve les batteries, afin d'optimiser leur durée de vie.

Maintenance et appropriation locale

Afin de permettre aux systèmes d'atteindre leur durée de vie maximale prévue, il est important de s'assurer de leur bonne utilisation au travers de formations adaptées pour les opérateurs locaux sur site, en ligne ou dans les usines des fabricants. C'est le cas des entreprises Exide, Cegasa, Aress ou encore Lagazel.

- **Exide:** organisation de formations sur mesure pour optimiser la durée de vie des batteries.
- **Lagazel:** formation de techniciens locaux, bien que les infrastructures limitent la mise en œuvre. Le contexte au Burkina Faso rend la formation des équipes complexes, ne pouvant pas se déplacer dans le pays. Lagazel forme donc des étudiants Africains en France qui rentrent ensuite au Burkina Faso pour former les équipes sur place.

En ce qui concerne la formation des acteurs locaux, l'entreprise **Schneider Electric** a développé un programme ambitieux : **EcoXpert**. Ce programme est une initiative mondiale visant à former et certifier des partenaires dans différents domaines liés à l'énergie et notamment aux mini-réseaux via le segment **"New Energy Landscape & Grid"**. Avec environ 4 500 partenaires certifiés à travers le monde, ce programme permet à Schneider Electric d'accompagner ses partenaires pour assurer leur montée en compétence. Il repose sur trois leviers pour garantir la qualification des partenaires : (i) la formation, (ii) un accompagnement sur les projets et (iii) une évaluation basée sur le nombre de projets exécutés.

Rôle du numérique

Le numérique joue un rôle central dans l'amélioration de la gestion des batteries. Les stratégies numériques déployées par les entreprises du groupe cœur révèlent une convergence vers une gestion fine, dynamique et prédictive des parcs de batteries. L'utilisation du cloud, de l'IoT, de la data science et de l'IA permet non seulement d'augmenter la performance des systèmes, mais aussi d'en améliorer la résilience, tout en accompagnant les utilisateurs vers une consommation plus durable.

Surveillance intelligente & analyse de données

Les systèmes numériques permettent une surveillance proactive et granulaire des batteries. En collectant des données (température, cycles de charge/décharge, tension, courant, etc.), les entreprises peuvent :

- Détecter les usages non optimaux,
- Adapter le fonctionnement du système (via des boucles de rétroaction automatiques),
- Proposer des actions correctives à distance.

Chez **Engie**, les systèmes de batterie sont par exemple équipés de systèmes de gestion de batteries (BMS), permettant des mises à jour logicielles et un suivi à distance de l'utilisation de leurs batteries (notamment le niveau de charge/décharge). Ces informations permettent de mieux optimiser l'utilisation de l'énergie qu'Engie produit par le biais du mini-réseau.

Plateformes de gestion énergétique centralisées et dynamiques

PAM Africa a développé une plateforme numérique polyvalente qui collecte et analyse en temps réel les données de consommation énergétique des utilisateurs. Ce traitement des informations permet de segmenter les profils clients en fonction de leurs habitudes de consommation, de leur capacité de paiement et de leur niveau de dépendance énergétique. Une interface d'administration énergétique ajuste dynamiquement les tarifs appliqués en tenant compte des profils de consommation individuels, influençant ainsi le comportement des utilisateurs. Avec cette tarification dynamique, la plateforme encourage une utilisation plus rationnelle de l'énergie, ce qui contribue en retour à prolonger la durée de vie des batteries des systèmes électriques.

Modélisation prédictive et jumeaux numériques

SLS Energy adopte une approche innovante via le développement d'un jumeau numérique de ses batteries, c'est-à-dire une réplique virtuelle modélisée en temps réel par les données issues des batteries physiques. Cette architecture permet de surveiller les batteries à l'échelle de la cellule, et non seulement du pack comme c'est le cas actuellement.

Ils peuvent ainsi s'appuyer sur les données recueillies pour prédire le comportement futur de la batterie : les performances, son vieillissement, les risques et la maintenance nécessaire. Ces analyses sont cruciales pour la minimisation des coûts de maintenance, centrale dans le modèle « battery-as-a-service » adopté par SLS Energy.

Algorithmes d'optimisation et formation utilisateurs

ARESS met en œuvre une approche hybride, en combinant divers éléments :

- Utilisation d'un algorithme pour surveiller l'utilisation de la batterie et garantir le respect des plages d'utilisation. La durabilité des batteries est assurée différemment en fonction de leur utilisation (système autonome, système solaire domestique ou mini-réseau).
- Un suivi via capteurs et plateforme numérique des batteries qu'elle opère
- Lorsqu'ils ne sont pas opérateurs du système, ARESS s'emploie à la formation des équipes locales pour optimiser l'utilisation de la batterie. Les systèmes opérés par ARESS sont donc suivis par des personnes formées en interne
- Enfin, ils assurent une maîtrise des conditions environnementales en installant les batteries dans des locaux techniques dont la température est contrôlée, pour éviter d'endommager les systèmes.

EMS cloud & intelligence temps réel

Schneider Electric propose désormais le déploiement d'une couche EMS (Energy Management System) basée sur le cloud, offrant une gestion intelligente et prédictive des réseaux électriques.

Cette solution analyse et modélise le réseau toutes les 15 minutes, permettant une adaptation en temps réel aux variations de production et de consommation. L'EMS s'appuie sur une base de données des six semaines précédentes, combinée à des prévisions météorologiques sur deux jours, afin d'anticiper et d'optimiser la gestion énergétique. Cette approche proactive assure une meilleure stabilité du réseau, une intégration optimale des énergies renouvelables et une réduction des coûts énergétiques pour les utilisateurs.

BARRIÈRES ÉCONOMIQUES ET RÉGLEMENTATION

Coût des technologies de stockage

Le coût initial élevé des technologies de stockage reste un obstacle majeur. Face à cet enjeu, certains acteurs du secteur ont ainsi entamé des négociations avec les autorités locales afin d'ajuster les modèles financiers aujourd'hui en place. **PAM Africa** souhaite porter à l'attention des autorités locales le poids du coût du système de stockage dans le coût total du système, qui reste le premier poste d'investissement.

Cependant, des modèles de financement innovants, comme le microfinancement et le paiement à l'usage, peuvent aider à surmonter cette barrière. En effet, la microfinance permet de fournir une gamme de services financiers à des personnes travaillant avec de trop petites sommes d'argent pour avoir accès à ces services par l'intermédiaire des banques traditionnelles.

Renforcer les cadres réglementaires pour soutenir les mini-réseaux

Le développement des mini-réseaux reste freiné par des cadres réglementaires instables ou incomplets et par le manque de capacités institutionnelles des autorités publiques. L'absence de réglementation claire crée une incertitude pour les investisseurs, tandis que la faiblesse des compétences techniques limite l'efficacité des partenariats public-privé. Conscients de ces enjeux, les bailleurs de fonds soutiennent désormais des programmes d'assistance technique visant à renforcer la gouvernance et à structurer durablement le secteur.



Au Bénin, le gouvernement a développé une réglementation favorable au développement des mini-réseaux, dans le but de permettre un accès à l'énergie au plus grand nombre. Le Cadre National Directeur de l'Électrification du pays a d'ailleurs défini des villages prioritaires pour l'installation de centrales de production, en se basant sur les villages n'ayant pas profité de projets d'électrification depuis 15 ou 20 ans.

Également, le prix du kWh est défini par l'Agence de Régulation de l'Electricité du Bénin. Pour définir ce prix, l'Agence analyse le niveau de vie de la population, ainsi que le coût d'investissement et d'exploitation des centrales.

Enfin, l'Etat et Engie ont signé un agrément de concession, signifiant qu'Engie a le mandat d'exploitation de la centrale et de distribution d'énergie sur 20 ans.

Normes et qualité : comment contrôler la qualité des batteries ?

Les échanges avec l'entreprise **CEGASA** ont confirmé que les batteries exportées d'Europe suivent toutes différentes normes, qui diffèrent selon leur utilisation (stockage, utilisation pour du photovoltaïque...) :

- **Règlement (UE) 2023/1542** du Parlement européen et du Conseil du 12 juillet 2023 relatif aux piles et aux déchets de piles, articles 6 / 7 / 8 / 9 / 10 / 12 / 13 / 14. Ce règlement vise à garantir qu'à l'avenir, les batteries auront une faible empreinte carbone, utiliseront un minimum de substances nocives, nécessiteront moins de matières premières provenant de pays non-membres de l'Union européenne (UE) et seront collectées, réutilisées et recyclées dans une large mesure au sein de l'UE.
- **Normes EMS:**
 - **EN 61000-6-2** : normes génériques - exigences d'immunité en matière de compatibilité électromagnétique s'applique aux appareils électriques et électroniques destinés à être utilisés dans des environnements industriels.
 - **EN 61000-6-3** : norme concernant l'émission des appareils électriques et électroniques destinés à être utilisés dans des environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère
- **Directives européennes :**
 - **2014/30/EU Directive (EMC, Electromagnetic Compatibility)** : vise à garantir que les équipements électriques et électroniques respectent un niveau adéquat de compatibilité électromagnétique dans l'Union européenne.
 - **2011/65/EU Directive (ROHS, Restriction of Hazardous Substances)** : renforce les règles existantes concernant l'utilisation de substances dangereuses, telles que le plomb, le mercure et le cadmium, dans les équipements électriques et électroniques (EEE) afin de protéger la santé humaine et l'environnement, notamment en permettant une récupération et un traitement des déchets des EEE respectueux de l'environnement.
 - **2014/35/EU Directive (LVD, Low Voltage Directive)** : crée des conditions uniformes dans l'UE pour la vente de matériel électrique destiné à être utilisé dans certaines limites de tension. Elle s'applique au matériel électrique conçu pour être utilisé à une tension comprise entre 50 et 1 000 V pour le courant alternatif et entre 75 et 1 500 V pour le courant continu.

- **UN 38.3 (Règlement pour le transport des batteries li-ion)** : norme des Nations Unies à laquelle les batteries au lithium doivent se conformer pour être certifiées comme transportables en toute sécurité.
- **IEC 62619 : 2022 Ed. 2022-05 (Sécurité des batteries)** : spécifie les exigences et les essais pour le fonctionnement en toute sécurité des accumulateurs au lithium utilisés dans des applications industrielles, y compris les applications stationnaires.
- **IEC 62620 : 2014 Ed. 2014-01 Norme (Exigences techniques des batteries)** : spécifie le marquage, les essais et les exigences pour les éléments et les batteries d'accumulateurs au lithium utilisés dans les applications industrielles, y compris les applications stationnaires.

Process mis en place pour le contrôle de la qualité

Plusieurs participants disposent de laboratoires internes pour tester les batteries selon les normes IEC et UN 38.3. Cela garantit la conformité, notamment pour les projets en Afrique de l'Ouest.

En tant que fournisseur de batteries de seconde vie, **SLS Energy** met en place des tests individuels, en faisant varier divers paramètres pour connaître la qualité des batteries. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats fournis par le constructeur lors de la sortie d'usine. L'état de la batterie de seconde vie est déterminé de cette façon mais la dégradation et le vieillissement de la batterie ne peuvent pas être anticipés via ces résultats. Pour prédire le comportement des batteries, il est nécessaire d'avoir de la visibilité sur sa première vie et la façon dont elle a été dégradée. Afin d'y parvenir plus facilement, **SLS Energy** fait appel à des sociétés de gestion américaines qui collectent des systèmes solaires domestiques et de l'électronique grand public. Ces sociétés ont parfois des accords nationaux leurs permettant de déterminer l'utilisation précédente notamment grâce

au suivi des numéros de série. En revanche, l'obtention d'une certification concernant la qualité de la batterie réutilisée en seconde vie, comme pourrait avoir SLS Energy, reste complexe du fait des modèles de batteries utilisés constamment renouvelés. A l'heure actuelle, les

En revanche, l'obtention d'une certification concernant la qualité de la batterie réutilisée en seconde vie (...) reste complexe du fait des modèles de batteries utilisés constamment renouvelés.

certifications portent directement sur les batteries comme produit fini. Une des solutions pour laquelle SLS Energy œuvre, est l'obtention d'une certification qui porterait sur le process de réhabilitation des batteries plutôt que sur le modèle de batterie en lui-même, ce qui leur permettrait de

ne pas avoir besoin de renouveler leurs demandes de certifications à chaque nouvelle version de batterie.

Chez **Exide Technologies**, les batteries sont testées avant export afin de respecter les normes de la Commission Electronique Internationale (CEI). La difficulté rencontrée concerne les demandes différentes selon les clients : les batteries peuvent parfois être considérées non-conformes car elles doivent répondre à toutes les normes en même temps, parfois incompatibles.

Lagazel, quant à eux, travaillent avec le CEA qui les accompagne pour concevoir un processus de test en utilisant des équipements peu coûteux tout en ayant un maximum de sécurité. Les batteries sont testées dans leur laboratoire, pour détecter les cellules défectueuses.



Challenges liés à l'approvisionnement :

Selon M. Saint Sernin (Zembo), le sourcing des batteries constitue un défi majeur pour les acteurs africains du stockage d'énergie. Si les fournisseurs chinois dominent le marché grâce à leurs prix compétitifs, la qualité réelle des batteries reste incertaine, les données techniques ne reflétant pas les conditions locales d'utilisation (chaleur, surcharges, décharges profondes). Faute d'outils de test et de bases de données fiables, les opérateurs africains peinent à évaluer les produits. La mise en place de protocoles de qualification et de tests standardisés apparaît donc essentielle pour garantir la durabilité et la fiabilité des installations.

Traçabilité

La traçabilité joue un rôle crucial dans le contrôle qualité des batteries, permettant de suivre chaque batterie depuis sa fabrication jusqu'à son utilisation finale, garantissant la conformité aux normes de sécurité et de performance. Cette transparence est essentielle pour repérer les sources potentielles de défaillance rapidement, et faciliter les rappels si besoin.

Une solution évoquée par **Cegasa** pour améliorer la traçabilité inclut un passeport numérique contenant des données sur l'état de santé, la durée de vie restante et l'empreinte carbone (dont l'extraction des matières premières) de chaque batterie.

De même il existe des certifications européennes garantissant la bonne conformité du transport des batteries au lithium.



Une difficulté rencontrée par les entreprises du groupe cœur en termes de respect des normes concernant les batteries dans les appels d'offre internationaux à destination des pays africains concerne certaines exigences à propos de la fin de vie ou le respect de normes strictes. Si ces exigences sont réalistes dans des contextes européens, elles peuvent être difficiles à atteindre en Afrique à l'heure actuelle, faute de moyens et d'infrastructures dans les pays concernés.

FIN DE VIE DES BATTERIES

Selon un rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) intitulé « EV Battery Supply Chain Sustainability », la demande mondiale de batteries lithium-ion devrait être multipliée par 4 d'ici 2030 et par 7 d'ici 2035, principalement en raison de l'augmentation des ventes de véhicules électriques. Le recyclage jouera un rôle crucial pour sécuriser l'approvisionnement en métaux des batteries, en particulier dans les régions à faible production de métaux primaires.

Accès au financement

L'accès au financement reste un défi pour le secteur. Les investissements nécessaires pour mettre en place des technologies de recyclage efficaces sont élevés. Cependant, les risques perçus et la rentabilité à court terme du recyclage des batteries rendent le financement difficile à obtenir.

La rentabilité incertaine du recyclage des batteries est aussi un facteur dissuasif. Les coûts de traitement des batteries, par rapport aux faibles marges dégagées sur les matières recyclées, rendent le secteur moins attractif pour les investisseurs. De plus, les prix des matières premières recyclées, comme le plomb et le lithium, peuvent fluctuer, créant un climat d'incertitude qui freine les investissements à long terme.

Afin de viabiliser les filières de traitement des batteries en fin de vie, une réflexion sur la mise en place de mécanismes tarifaires et fiscaux émerge dans plusieurs pays. Ces mécanismes pourraient prendre trois formes :

- La mise en place d'un système de Responsabilité Étendue du Producteur (REP) sur les batteries ; systèmes en vertu duquel les metteurs sur le marché sont responsables de l'ensemble du cycle de vie des batteries, de la conception à la fin de vie. Selon ce système, les metteurs sur le marché s'acquitterait de leur responsabilité soit collectivement en mettant en place des structures à but non lucratifs chargé de la gestion de la fin de vie (des éco-organismes) ou individuellement par la mise en place de leur propre système de récupération et de traitement des batteries en fin de vie
- La mise en place d'une éco-contribution sur la vente des batteries faisant contribuer financièrement à la couverture du coût de traitement les metteurs sur le marché.
- La mise en place, au regard du fait que la quasi-totalité des batteries est importée, d'un droit d'accise spéciale sur les batteries dont les revenus serviraient à financer la filière de traitement



Au Togo, l'ONG **Moi Jeu Tri** bénéficie d'un financement FISONG de l'AFD pour mettre en place un système de gestion et de traitement local de la fin de vie des DEEE issu de la filière solaire. La viabilisation post subvention de la filière repose, selon le projet, sur la mise en place par les autorités togolaises d'une Responsabilité Elargie du Producteur (REP). Ce principe implique que les acteurs économiques soient responsables de l'ensemble du cycle de vie des produits qu'ils mettent sur le marché, de leur éco-conception jusqu'à leur fin de vie.

Moi Jeu Tri collabore avec les autorités nationales dans le cadre du projet pour définir les conditions de mise en place de cette REP.

Défis sanitaires

Les manières actuelles de traiter les déchets électroniques en Afrique (décharge à ciel ouvert, combustion, enfouissement) peuvent être dangereuses pour l'écosystème et la santé des hommes lorsqu'il s'agit de batteries. Cela est principalement dû aux métaux lourds qu'elles contiennent.

Le secteur du recyclage des batteries fait également face à la **concurrence des acteurs informels**. Dans certains pays africains, des réseaux informels de récupération et de traitement des batteries existent, bien que souvent dans des conditions dangereuses pour la santé et l'environnement. Cette concurrence peut rendre difficile l'entrée des entreprises formelles sur le marché, qui doivent se conformer à des normes strictes de sécurité et d'environnement.

Contraintes opérationnelles et économiques

Lagazel souligne la difficulté de travailler sur la fin de vie des batteries avec des volumes faibles de batteries usagées : cela complique les efforts de collecte, transport et traitement. En effet, il est plus difficile de justifier des coûts associés à la mise en place d'infrastructures de recyclage efficaces, si les volumes ne sont pas assez conséquents. Le traitement de petites quantités de batteries étant moins rentable, et donc désincitatif pour gérer correctement la fin de vie des batteries usagées. Le transport est également coûteux, en raison d'infrastructures routières peu entretenues. L'objectif pour l'entreprise est donc pour l'instant de prolonger la durée de vie des cellules de lithium grâce au reconditionnement et au réemploi, afin de repousser le moment où elles devront être traitées en fin de vie.

Un manque de collaboration entre pays limite les possibilités de développement, en particulier pour la gestion de fin de vie des batteries. Le partage des bonnes pratiques et des différentes technologies de recyclage est freiné, mais c'est principalement l'absence de mutualisation entre les pays qui pose difficulté. Le paiement des droits de douanes, taxes et autres frais associés au transport transfrontalier sont dissuasifs pour les acteurs du secteur. La mutualisation pourrait prendre deux formes différentes, à savoir (i) celle des batteries usagées provenant de différents pays frontaliers, qui pourraient être acheminées vers un seul centre de recyclage, et (ii) la mutualisation des investissements nécessaires pour développer des infrastructures adéquates.



C'est le parti pris de Lagazel, pour lequel les volumes des batteries en fin de vie sont trop faibles. Ils ajoutent donc leurs déchets à ceux d'autres organismes pour avoir un volume suffisant de déchets à traiter. Les batteries sont alors transportées vers l'Europe, car aucune usine de traitement n'existe à l'heure actuelle sur le continent africain.

SLS Energy travaille avec des instituts de recherche, dont le Massachusetts Institute of Technology (MIT), l'université du Rwanda et l'université Carnegie Mellon, pour déterminer les niveaux de recyclage possibles, en mettant l'accent sur le recyclage direct. Bien qu'il existe de nombreuses technologies de recyclage, leur viabilité économique, en particulier pour les faibles volumes, reste un problème majeur. SLS Energy se concentre sur un double objectif : (i) la validation du volume d'approvisionnement et des projections des besoins en stockage d'énergie qui rendraient les efforts de recyclage viables et (ii) sur la manière dont l'infrastructure de batteries en tant que service de l'entreprise contribuera à atteindre les économies d'échelle nécessaires pour rester compétitif en termes de coûts, tout en évitant les contraintes liées aux investissements initiaux.

Une autre interrogation concerne les volumes projetés, tant du côté de l'offre (disponibilité des déchets) que de la demande (besoins en matériaux et produits recyclés sur les marchés). Cette analyse est essentielle pour évaluer le potentiel de mise à l'échelle des opérations dans le futur. La question clé est de savoir si ces activités peuvent être rentables sur les marchés locaux. Une piste pourrait être de mutualiser les flux de déchets sur un ensemble de territoires plus étendus.

Cela permettrait de faire évoluer des infrastructures aujourd'hui encore limitées. Le **recyclage des batteries** requiert en effet des installations **sophistiquées et coûteuses**, capables de traiter en toute sécurité les différents composants — notamment le **plomb** et le **lithium**.

En Afrique, ces infrastructures spécialisées demeurent rares, entraînant souvent **l'exportation des batteries usagées** vers des pays disposant de moyens de traitement adéquats.

Dans ce contexte, des **initiatives innovantes** émergent pour améliorer la gestion du cycle de vie des batteries. C'est le cas de **Vittoria Technology**, une entreprise à vocation sociale qui développe la plateforme numérique **Battery Bank Africa**. Celle-ci propose un **service de location de batteries pour les mini-réseaux**, intégrant l'optimisation du stockage, l'approvisionnement, le suivi des performances et la réutilisation des batteries. Ce type de solution contribue à **prolonger la durée de vie utile des batteries** tout en **réduisant les coûts et les déchets associés** au remplacement prématuré.



L'entreprise Hinckley Recycling a annoncé en septembre 2024 un investissement de 5 millions de dollars pour établir la première usine de recyclage et de traitement de batteries lithium-ion et au plomb en Afrique, située dans l'État d'Ogun, au Nigeria.

Défi réglementaire

Le manque de cadre réglementaire et de politique environnementale est l'un des principaux obstacles. En effet, de nombreux pays africains ne disposent pas de réglementations strictes sur la collecte, le recyclage et la gestion des déchets électroniques, y compris les batteries. L'absence de normes environnementales et d'incitations fiscales rend les investissements dans ce secteur moins attractifs.

Le recyclage des batteries implique la collecte et le transport des dispositifs usagés, ce qui est rendu complexe par un réseau logistique fragmenté et des coûts élevés liés au transport, notamment en raison de la toxicité des matériaux.

La législation sur le transport des batteries reste floue, notamment à travers les frontières, car les batteries usagées sont souvent considérées comme des déchets dits « dangereux ». Cette classification signifie que celles-ci sont soumises à une réglementation concernant leur transport. Cependant, il n'existe pas de réglementation unique en Afrique pour permettre le transport d'un pays à l'autre : certaines sont très strictes, quand elles peuvent être inexistantes dans d'autres pays.

Par exemple, au Mali, l'arrêté n°2016-2637/MEADD-SG du 22 juillet 2016 encadre strictement la gestion des batteries usagées et d'autres sources contenant du plomb, alors que le Cameroun ne dispose pas de réglementation spécifique qui encadre l'industrie du recyclage des batteries au plomb usagées. Face à l'essor des batteries au lithium ces dernières années, remplaçant celles au plomb, de nouvelles réglementations seront nécessaires pour encadrer la fin de vie de celles-ci d'ici quelques années.

L'Alliance pour l'électrification rurale a élaboré un guide de « bonnes pratiques » pour la fin de vie et la circularité des batteries, qui pourrait contribuer à leur standardisation.

Ces lignes directrices s'articulent autour de 4 points clés :

- **Qualité et durabilité**
- **Garanties, entretien et réparation**
- **Reprise**
- **Gestion de la fin de vie**

Le document complet est disponible ici:

<https://www.ruralelec.org/wp-content/uploads/2024/09/ProBaMet-Circularity-Guidelines.pdf>

Il n'existe pas encore sur le continent de règle stricte sur la structure responsable du recyclage de la batterie. De plus, les points de collecte accessibles restent insuffisants, limitant l'efficacité de la gestion des déchets de batteries.

Selon **Exide**, le recyclage du lithium est sur le point de démarrer en Europe, mais il n'est pas complètement maîtrisé pour le moment. Il souligne que les fabricants ne sont pas responsables une fois que leurs batteries sont vendues, mais ils peuvent tout de même contribuer à trouver des solutions avec l'exploitant. C'est aux États de se charger de la législation autour du recyclage pour faciliter celui-ci.

Cet élément est confirmé par l'entreprise **CEGASA**, pour qui il faudrait que l'exploitant des batteries soit responsable du recyclage de celle-ci, le fabricant étant là pour s'assurer du bon dimensionnement du système de stockage ainsi que de la formation.

Des synergies entre les entreprises du secteur existent et doivent être développées.

Au Bénin, **Engie** se pose d'ores et déjà la question du recyclage des batteries. Ayant 20 sites dont l'exploitation va débuter en décembre 2024, la problématique de la fin de vie se posera d'ici 5 ans environ, et l'entreprise est en recherche active de solutions d'ici là.

Du point de vue de **Vittoria Technology** une des solutions à ce problème global consiste à s'engager avec les acteurs de la seconde vie, pour créer un marché et à détourner une partie du flux de déchets.

ETUDES DE CAS : LES PROJET DU GROUPE CŒUR EN AFRIQUE SUBSAHARIENNE

CAMP DE RÉFUGIÉS DE MAHAMA, RWANDA – VITTORIA TECHNOLOGY

Ce projet vise à améliorer l'accès à l'électricité pour les 58 000 personnes. En collaboration avec MeshPower, 33 kWh de batteries lithium-ion de seconde vie ont été installés en novembre 2023 sur un mini-réseau solaire existant, initialement déployé en 2019 pour alimenter une clinique de santé et des installations communautaires. Il permet d'introduire plusieurs innovations :

- Un modèle de location de stockage d'énergie, qui réduit les coûts pour les opérateurs en finançant les nouvelles capacités de batterie.
- L'utilisation de batteries lithium-ion de seconde vie, fournies par AceleAfrica au Kenya, illustrant leur potentiel pour les marchés hors réseau.
- Une architecture hybride de banque de batteries, combinant des batteries lithium-ion avec des systèmes au plomb-acide existants, grâce à la



collaboration avec l'équipe Ferntech d'Odyssey Energy Solutions. Cette approche double la capacité tout en optimisant les performances et réduisant les coûts.

Les impacts attendus incluent une réduction de l'utilisation de diesel, des économies grâce au modèle de location et une diminution des déchets électroniques. En conséquence, le camp bénéficiera d'une électricité plus verte et plus abordable pour les services, les entreprises et les résidents.

LE PLUS :
Un modèle innovant de location de stockage d'énergie

PROJET SO-COOL, NIGERIA – PAM AFRICA

Le projet So-Cool vise à installer des kiosques solaires au Nigeria pour fournir aux commerçants locaux de l'électricité, du froid et des solutions de stockage, améliorant ainsi la conservation des produits agricoles et réduisant les pertes post-récolte. Cette production d'électricité hors réseau est permise grâce au stockage d'énergie par des batteries lithium LifePO4, d'une capacité de 2,56 kWh et une durée de vie de 2500 cycles.

Les commerçants paieront mensuellement pour ces services, les rendant accessibles et abordables.

Ce projet est porté par la start-up nigériane PAM Africa, en collaboration avec l'école d'ingénieurs Junia et JiroFrance, filiale de la société malgache Jirogasy spécialisée dans les solutions solaires.

Ils ont 260 systèmes allant de 1kW à 2,4 kW. A l'heure actuelle, plus de 100 batteries So-Cool ont été déployées.

LE PLUS :
PAM Africa est fournisseur de produit et de solution d'alimentation pour le faire fonctionner. Solution clef en main

PLATEFORME « PAM-AI », NIGÉRIA – PAM AFRICA

PAM-Ai est une plateforme innovante développée par PAM Africa, pilotée par l'IA et conçue pour améliorer la performance des batteries et la rentabilité. PAM-Ai a été intégré au système de mini-réseau dans une communauté rurale pour surveiller la production, le stockage et la consommation d'énergie. La plateforme a utilisé les données en temps réel pour :

- Programmer la charge des batteries pendant les heures de pointe de la production solaire
- Optimiser les schémas de décharge pour donner la priorité aux charges critiques pendant les périodes de forte demande.
- Aligner l'utilisation de l'énergie sur la tarification dynamique, ce qui permet une distribution rentable de l'énergie aux utilisateurs finaux.

ont pu prolonger leur durée de vie et réduire les coûts d'exploitation. Les habitants et les entreprises ont bénéficié d'un accès à l'énergie plus fiable, en particulier le soir, lorsque la demande est la plus forte. La capacité du système à ajuster les tarifs de l'énergie en fonction des données en temps réel a encouragé les utilisateurs à modifier leur comportement de consommation, ce qui a permis d'améliorer encore l'efficacité énergétique.

Le succès du projet de mini-réseau a démontré le potentiel de PAM-Ai pour permettre aux installateurs et aux opérateurs de réseaux locaux de disposer d'outils avancés de gestion de l'énergie. Cette approche a non seulement amélioré la durabilité du mini-réseau, mais a également mis en évidence l'évolutivité de PAM-Ai pour des projets d'énergie renouvelable similaires dans toute la région.

La mise en œuvre de PAM-Ai a transformé le fonctionnement du mini-réseau. En optimisant les cycles de charge et de décharge des batteries, les opérateurs

LE PLUS :
L'utilisation de l'intelligence artificielle permettant une plus grande performance des batteries.



CENTRALE SOLAIRE EN CÔTE D’IVOIRE – SAFT

En 2022, Saft a remporté un contrat auprès d’Eiffage Energie Systèmes pour la livraison d’un système de stockage d’énergie de 10MW, dans l’objectif de faciliter l’intégration de la centrale solaire photovoltaïque de Boundali, au réseau.

La centrale de 37,5 MWc est le premier projet solaire à grande échelle en Côte d’Ivoire. Elle utilisera un stockage lithium-ion pur stabiliser et garantir une alimentation électrique locale, permettant une utilisation optimale d’une énergie décarbonée. Le système inclut 6 conteneurs Saft Intensium Max pour une capacité totale de 13,8 MWh.

Le système de stockage charge et décharge rapidement les batteries lithium pour s’adapter à la production intermittente de la centrale solaire. Cela permet de fournir un profil de production régulier qui équivaut à la production moyenne de la centrale sur 30 minutes, et

peut être facilement accepté par le réseau d’électricité local.

Cette solution permet de pallier l’intermittence de la production solaire, et est adaptée aux conditions climatiques semi-arides de la région.

L’exploitant Côte d’Ivoire Energies prévoit également de tester le système de stockage dans d’autres options de soutien au réseau telles que le contrôle de la montée en puissance de la production solaire, le maintien de la fréquence et de la puissance réactive, et le démarrage autonome. Cela fournira des données utiles sur le vieillissement de la batterie dans différents scénarios de configuration en fonctionnement.

 **LE PLUS :**
Un exemple de stockage d’énergie par batterie lithium pour une application en réseau.

PRODUCTION D’ÉNERGIE PAR MINI-RÉSEAUX AU BÉNIN – ENGIE ENERGY ACCESS

La solution proposée par Engie est composée de panneaux photovoltaïques combinés à des batteries au lithium. Des compteurs intelligents ont été mis en place pour connecter leurs clients et permettre l’accès à l’énergie. Le système est hybride avec un générateur diesel qui prend le relai en cas de panne du système principal.

Le modèle économique consiste en un partenariat entre acteurs publics et privés. Des partenariats sont établis avec le gouvernement et les organisations internationales, ce qui leur facilite l’accès aux prêts.

2 projets sont en cours de construction ou de modernisation, pour un total de 21 sites

- 1 projet en phase de construction (OCEF) : 1,2 MW et 68 km de réseau qui alimentera près de 5900 ménages, et le scénario retenu compte 5 personnes par ménage. Pour ce faire, Engie a travaillé avec différents EPC : Sagemcom, Butec et Volta United.
- 1 en phase de modernisation (Dohouè) : 135 kW d’énergie et une longueur de réseau de 1,8 km est en cours, pour alimenter environ 280 personnes. L’EPC est Sustain Solar, ainsi qu’une entreprise locale nommée Ego Technologie.

L’un de ces projets est financé par le Millennium Challenge Account et complété par des fonds privés et propres. Six sites sont déjà opérationnels, 14 devraient commencer leur activité en janvier 2025.

 **LE PLUS :**
La mise en place de partenariats publics-privés pour assurer une pérennité au projet.

MICRO-GRIDS ET RESEAUX DE DISTRIBUTION AU TCHAD – JOHN COCKERILL

Les projets de stockage électrique à Ati et à Mongo, au Tchad, est une initiative importante visant à améliorer l’accès à l’énergie dans la région. Ces projets, financés par la Banque de Développement des États de l’Afrique Centrale (BDEAC), prévoit la construction de deux Micro-grids et des réseaux de distribution dans les villes de Mongo et Ati. Concrètement, le projet inclut la construction et la maintenance de centrales solaires hybrides photovoltaïques-groupes électrogènes (PV-GE) avec une capacité de 2,5 MW pour le champ photovoltaïque, 1,5 MW pour la source d’appoint, et une unité de stockage par batterie de 1,5 MWh.

John Cockerill a fourni les différents équipements (Batteries NAS, Batteries Li-ion, PCS…) ainsi que l’automation de l’ensemble.

Ce projet vise à soutenir le développement économique et social des villes concernées, tout en réduisant l’empreinte carbone grâce à l’utilisation de l’énergie solaire. Ces projets visent à fournir de l’énergie à plus de 3 000 ménages, ainsi qu’aux industries et services administratifs locaux. En plus de réduire le déficit énergétique chronique du Tchad, ce projet contribuera à améliorer la qualité des soins de santé et de l’éducation grâce à une fourniture continue d’énergie.

 **LE PLUS :**
l’emploi de solutions hybrides énergie renouvelable et groupe électrogène, pour une meilleure stabilité.

SYSTÈMES DE STOCKAGE D’ÉNERGIE POUR MINI-RÉSEAUX AU GHANA – CEGASA

Le défi auquel l’entreprise a répondu consistait à fournir de l’électricité à trois régions rurales où l’expansion du réseau électrique n’était pas possible en raison des conditions orographiques.

Le projet fut la construction de trois centrales photovoltaïques avec stockage d’énergie pour le Ghana Energy Development and Access Project (GEDAP), appartenant au ministère ghanéen de l’énergie et du pétrole, afin de fournir de l’électricité à trois îles situées sur la rivière Volta dans la région d’Accra, au Ghana. La fourniture d’électricité a été répartie comme dans le tableau ci-dessous.

La technologie utilisée a été le Cegasa LFP Système de stockage d’énergie par batterie au lithium (48 VDC) intégré avec des onduleurs STUDER, pour la création des

trois micro-réseaux. Ceux-ci ont permis une amélioration significative de l’activité économique de la zone et des conditions de vie de ses habitants qui ont eu accès à l’électricité là où elle n’arrivait pas auparavant.

Le projet a été financé par la Confédération suisse, par l’intermédiaire du Secrétariat d’État à l’économie (SECO), en consortium avec STUDERINNOTECH, Suisse, et NEW ENERGY, Ghana.

 **LE PLUS :**
Projet réalisé dans le cadre d’un programme du gouvernement, marquant l’implication de l’Etat dans le développement des batteries.

	Aflive	Azizakpe	Alorkpem
Photovoltaic Capacity (kWp)	110	73	73
tStorage (kWh)	737	496	496
Distribution Network Users	295	187	127

BATTERIES DE SECONDE VIE ET MINI-RÉSEAUX EN ZAMBIE – SLS ENERGY

SLS Energy travaille à l’intégration de batteries de seconde vie dans des mini-réseaux en Zambie, en partenariat avec ENGIE Energy Access. Le projet, qui pourrait être lancé au deuxième trimestre de l’année prochaine, comprend un système de 120 kWh pour augmenter la capacité des mini-réseaux. Ce modèle permet de surmonter les difficultés financières liées au remplacement des batteries usagées, qui ne sont souvent pas évoquées dans les budgets initiaux. Ces initiatives reposent sur un modèle de « batterie en tant que service », dans lequel la propriété et la maintenance des batteries restent sous le contrôle de SLS Energy, ce qui permet d’optimiser leurs performances, leur sécurité et leur durée de vie. Ce projet vise également à valider la manière dont le modèle SLS Energy peut améliorer la viabilité financière des mini-réseaux solaires en réduisant leurs dépenses

d’investissement jusqu’à 40 % et en gérant les risques techniques, opérationnels et de sécurité des actifs de la batterie grâce à l’intégration du logiciel d’optimisation de la batterie de la société.

En outre, l’entreprise met en œuvre des solutions de stockage d’énergie mobile pour fournir des services dans les zones reculées en vue d’une utilisation productive de l’énergie, en partenariat avec One Acre Fund, sans nécessiter de lignes de transmission, ce qui convient particulièrement à une utilisation saisonnière ou décentralisée.

 **LE PLUS :**
Reconditionnement de batteries de seconde vie et modèle de « Battery as-a-service »

RECONDITIONNEMENT ET PRODUCTION DE NOUVEAUX PACKS DE BATTERIE EN AFRIQUE DE L'OUEST - LAGAZEL

Lagazel met en place un projet innovant visant à réduire les déchets dans le secteur solaire en Afrique de l'Ouest. Avec des installations au Burkina Faso, au Bénin et au Sénégal, l'entreprise se concentre sur le reconditionnement, la réparation et la production de nouveaux packs de batteries, en utilisant principalement des batteries lithium-ion cylindriques de seconde vie.

Ce projet, développé en partenariat avec le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) en France, valide la faisabilité de l'intégration des batteries de seconde vie grâce à des outils de test simples, adaptés au contexte africain. Lagazel forme également des partenaires locaux, comme au Togo, pour reproduire ce modèle et prévoit d'étendre ses activités à d'autres pays de la région via des franchises ou des partenariats. Cependant, le projet doit relever plusieurs défis :

- L'accès limité aux batteries usagées, en raison de la nature récente des installations solaires en Afrique.
- Les coûts élevés de collecte et les contraintes liées au transport international des batteries, très réglementé.
- La nécessité de réduire les coûts pour rendre les batteries de seconde vie compétitives face aux batteries importées, souvent moins chères.

Avec ce projet, Lagazel ambitionne de créer une économie circulaire durable pour les batteries solaires tout en renforçant les capacités locales.

**LE PLUS**

Solution de reconditionnement local, créateur de valeur ajoutée aux déchets



SOLUTIONS ET RECOMMANDATIONS

Comment cette étude peut-elle être utile aux entrepreneurs en Afrique ?

POINTS CLEFS DE L'ÉTUDE

1. Le lithium est actuellement la technologie privilégiée pour le stockage d'énergie par batterie dans le développement de nouveaux mini-réseaux électriques. Pourquoi ?

- Cette technologie est très mature, et son coût diminue régulièrement grâce une production industrielle à la hausse.
- Les batteries au lithium résistent mieux aux températures élevées que celles au plomb, élément crucial sur le continent africain. De plus, leur durée de vie est supérieure.
- Les financements internationaux privilégient aujourd’hui les projets de mini-réseaux alimentés par des batteries au lithium, plus efficaces et répondant davantage aux objectifs de transition énergétique.

2. Les modèles économiques les plus développés sont les méthodes de pay-as-you-go (PAYG) et de prépaiement. Pourquoi sont-ils les plus adaptés aux réalités du terrain en Afrique subsaharienne ?

- Les coûts d’investissements initiaux étant importants, les mini-réseaux sont installés par des opérateurs, et le PAYG permet un paiement par les consommateurs en fonction de la consommation réelle, et offre une flexibilité selon les besoins.
- Ces deux modèles permettent une flexibilité aux utilisateurs, car sont souvent gérés grâce à des solutions numériques (paiement via Orange Money, par exemple) qui permettent aux utilisateurs des paiements par les téléphones portables et sont donc adaptés aux pratiques actuelles. De plus, ces méthodes sont déjà utilisées dans d’autres secteurs comme les communications mobiles, ce qui favorise l’acceptabilité sociale.
- Le prépaiement réduit également le risque financier pour les opérateurs, garantissant un paiement avant consommation.

CONSEILS TECHNIQUES POUR LE CHOIX ET LA GESTION DES BATTERIES

Le choix de la technologie de stockage est un enjeu central dans la conception d’un mini-réseau. Il conditionne la performance du système, sa fiabilité, ses coûts à court et long terme, ainsi que son acceptabilité sociale. Dans cette section, seules les deux technologies principales de stockage seront comparées, à savoir les batteries au plomb et les batteries lithium-ion.

Quels critères pour faire son choix ?

- **Profil du site (taille, usage, température, accès routier)**

Les conditions locales influencent fortement les performances des batteries. Par exemple, dans une zone chaude et isolée, les batteries au lithium (type LFP) sont préférables : elles tolèrent mieux la chaleur que les batteries au plomb, tout en nécessitant moins d’entretien. De plus, si le site est difficile d’accès, transporter des batteries lourdes ou devoir en assurer une maintenance fréquente peut s’avérer complexe.

- **Modèle économique (vente d’énergie, service public, autoconsommation, etc.)**

Si l’entreprise prévoit de vendre l’électricité selon un modèle de type pay-as-you-go, il est essentiel d’assurer une continuité de service pour garantir la satisfaction des clients. Les batteries au lithium, plus fiables, peuvent ici faire la différence. À l’inverse, dans un modèle d’autoconsommation avec peu de variabilité dans les usages, des batteries plomb-acide bien dimensionnées peuvent suffire, avec des coûts initiaux plus faibles.

- **Capacité de maintenance locale**

Les batteries plomb-acide, par exemple, sont généralement mieux connues des techniciens dans les zones rurales car historiquement plus utilisées et plus faciles à dépanner sans matériel sophistiqué. À l’inverse, les systèmes au lithium ou les batteries reconditionnées nécessitent souvent une électronique de gestion plus complexe (BMS), la disponibilité rapide des pièces de rechange ainsi qu’une formation des acteurs locaux sont donc indispensables.

- **Durée de vie souhaitée du système**

Si le projet est pensé sur le long terme (10–15 ans), mieux vaut choisir une batterie à longue durée de vie, même si elle est plus chère au départ. Le lithium prend ici l’avantage. Mais si le projet est plus court (phase pilote, démonstrateur, ou zone en transition), une technologie plus accessible comme le plomb, ou une batterie de seconde vie bien contrôlée, peut être suffisante.

- **Filière de recyclage ou de fin de vie**

Les batteries usagées sont des déchets dangereux, et leur gestion en fin de vie pose de vrais défis. Dans certaines régions, les batteries plomb-acide sont déjà relativement collectées, même si la filière reste très informelle. Pour les batteries lithium, la filière de recyclage est encore en construction dans de nombreux pays, ce qui complique leur valorisation.

Panorama des principales technologies disponibles

Batteries au lithium (principalement LFP – Lithium Fer Phosphate)

Cas d’usage typique : mini-réseaux de taille moyenne à grande, pour zones rurales ou périurbaines avec une charge importante (petit commerce, industrie légère, écoles, santé, usage domestique étendu).

- **Avantages :**
 - Longue durée de vie (jusqu’à 10-15 ans selon les conditions)
 - Bonne tolérance thermique (jusqu’à 45°C)
 - Profondeur de décharge élevée (>90 %)
 - Relativement peu de maintenance
 - Taille/poids optimisés -> coût de transport réduit
- **Limites :**
 - Coût initial plus élevé que le plomb
 - Technologies souvent importées (surtout Chine), complexité douanière
 - Sensibilité au dimensionnement : surcharge ou sous-charge peut accélérer le vieillissement

Conseil pratique : choisir des fournisseurs qui proposent une garantie de performance (nombre de cycles, température maximale), et s’assurer que le BMS (Battery Management System) est adapté aux conditions d’exploitation.



Batteries au plomb

Cas d'usage typique : petits mini-réseaux avec faible consommation, sites isolés ou en contexte humanitaire, projets avec budget restreint.

- **Avantages :**
 - Technologie bien connue, facilement disponible
 - Coût d'achat plus faible
 - Recyclage mieux organisé localement dans certains pays
 - Maintenance relativement simple
- **Limites :**
 - Durée de vie plus courte (2 à 5 ans)
 - Sensibles aux températures élevées → réduction de performance
 - Poids important → logistique plus coûteuse
 - Moins adaptées aux charges variables et aux décharges profondes fréquentes

Conseil pratique : prévoir une ventilation adéquate du local batterie, limiter la profondeur de décharge (60 % max) pour prolonger la durée de vie, et prévoir un remplacement régulier.

Batteries de seconde vie (principalement lithium)

Cas d'usage typique : projets pilotes et de petite capacité, zones urbaines ou périurbaines, installations avec besoin de flexibilité, partenaires techniques expérimentés.

- **Avantages :**
 - Coût réduit (jusqu'à 50 % moins cher que le neuf)
 - Réduction de l'empreinte environnementale
 - Potentiel de valorisation locale (diagnostic, assemblage, reconditionnement)
- **Limites :**
 - Performance incertaine si le reconditionnement n'est pas rigoureux
 - Difficulté à obtenir des garanties bancables
 - Problèmes potentiels de compatibilité avec les onduleurs/EMS
 - Cadres réglementaires peu adaptés aujourd'hui

Conseil pratique : travailler avec des partenaires spécialisés disposant d'une plateforme de diagnostic et de suivi en temps réel (**Vittoria Technology, SLS Energy...**). Bien dimensionner les systèmes pour compenser les performances hétérogènes des cellules reconditionnées.

LES SOLUTIONS INNOVANTES DANS LE SECTEUR

- Pour surmonter le défi de la fin de vie des batteries dans le stockage, certaines entreprises ont opté pour de nouveaux modèles, notamment le « **stockage comme service** » qui permet aux clients de bénéficier de services de stockage sans investir dans les équipements eux-mêmes. C'est notamment le cas de **Vittoria Technology**, qui propose des solutions de stockage clé en main utilisant des batteries de seconde vie. L'entreprise permet aux opérateurs de réseaux d'accéder à une capacité de stockage flexible et optimisée pour la gestion de l'énergie intermittente, sans avoir à acquérir directement des capacités de stockage.
- C'est également le modèle proposé par **SLS Energy**, qui reconditionne et déploie des batteries de seconde vie pour des solutions de stockage d'énergie performantes et modulaires. L'entreprise propose une plateforme intégrée qui optimise l'utilisation de ces batteries tout en facilitant un accès à l'énergie fiable, durable et rentable pour ses clients.
- Utilisation de l'intelligence artificielle pour de meilleures performances. L'entreprise **PAM Africa** a développé PAM-Ai, une plateforme innovante pilotée par l'IA et conçue pour améliorer la performance des batteries et la rentabilité. Cette plateforme tire parti de l'intelligence artificielle pour optimiser l'utilisation de la batterie, en se concentrant spécifiquement sur l'influence du comportement des clients grâce à des tarifs énergétiques dynamiques.

- En restant dans le domaine de la gestion prédictive, Schneider Electric propose un système de gestion de l'énergie (EMS) basé sur le cloud, conçu pour offrir une gestion intelligente et prédictive des réseaux électriques. Ce système analyse et modélise le réseau à intervalles réguliers, permettant une adaptation en temps réel aux variations de production et de consommation. L'EMS s'appuie sur des données historiques et des prévisions météorologiques pour anticiper et optimiser la gestion énergétique.

RECOMMANDATIONS ISSUES DES DISCUSSIONS AVEC LE GROUPE CŒUR

- Aujourd'hui, les certifications concernent directement les batteries en tant que produit fini. Une solution plus optimale consisterait à obtenir une certification axée sur le processus de réhabilitation des batteries (réutilisation, reconditionnement ou recyclage) plutôt que sur chaque modèle spécifique. Cela éviterait la nécessité de renouveler les demandes de certification à chaque nouvelle version de batterie.
- Dans le prolongement du cadre réglementaire, des réflexions ont également émergé autour d'une meilleure coordination des politiques entre les pays, notamment concernant la gestion de la fin de vie des batteries.

En effet, l'absence de coordination actuelle empêche la mutualisation des gisements, car le transport des batteries usagées, considérées comme des déchets, demeure très complexe.

Cela entraîne une conséquence directe : chaque pays dispose d'un volume de batteries trop faible pour permettre un recyclage ou une valorisation rentable, les coûts logistiques restant bien supérieurs aux recettes potentielles.



LISTE DES ENTREPRISES ET CONTACTS

Entreprises membres du groupe de travail :

Nom entreprise	Zone géographique d'intervention	Nature de l'activité	Origine entreprise
SLS Energy	Rwanda	Constructeur et prestataire de service	Rwanda
Lagazel	Sénégal, Mali, Burkina, Bénin, Niger	Constructeur, distributeur et recycleur	France
PAM Africa	Rwanda, Kenya, Burundi, RDC, Tanzanie, Ouganda	Exploitant	Nigeria
Aress	Sénégal, Bénin, Togo, Burkina Faso	Constructeur et exploitant	Bénin
Engie energy access	Afrique de l'est principalement, et quelques pays à l'ouest	Exploitant	France
CEGASA	Bénin, Éthiopie...	Constructeur	Espagne
John Cockerill	Tchad, Burundi, RDC...	Exploitant	Belgique
Catalyst Energy	Mozambique, Afrique du Sud, Malawi, Zambie, Zimbabwe, Namibie et Botswana.	Prestataire de services	Mozambique
Exide Technologies	Afrique subsaharienne	Constructeur	France
SAFT - filiale TotalEnergies	Afrique du Sud, Côte d'Ivoire, Kenya	Constructeur (utility scale)	France
Evolve BGS	Afrique du Sud	Prestataire de services	Afrique du Sud
Vittoria Technology	Afrique du Sud	Prestataire de services	Afrique du Sud

Entretiens complémentaires réalisés avec des entreprises hors du groupe cœur

Nom entreprise	Zone géographique d'intervention	Nature de l'activité	Origine entreprise
Schneider	Afrique du Sud, Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale, etc.	Fournisseur de technologies	France
Zembo	Ouganda	Mobilité électrique	Ouganda

BIBLIOGRAPHIE

Batteries and Secure Energy Transitions,
World Energy Outlook Special Report, 2023
International Energy Agency (IEA)

Energy Storage for Mini Grids – Status and Projections of Battery Deployment,
Energy Storage Partnership Report, 2023
Sector Management Assistance Program (ESMAP)

Energies renouvelables en Afrique : enjeux, défis et opportunités
Rim Berahab, 2019
Policy Center for the New South

How are innovative financing approaches contributing to wider electricity access in Kenya?
Rim Berahab, 2020
Policy Center for the New South

Annual increase in population with electricity access by technology in sub-Saharan Africa, 2015-2022,
IEA 2023, Paris
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-increase-in-population-with-electricity-access-by-technology-in-sub-saharan-africa-2015-2022>,
Licence: CC BY 4.0

Exploration of Market Potentials in Battery Recycling and Refurbishment in Africa, December 2023
GLZ

Mini-réseaux hybrides PV-diesel pour l'électrification rurale,
Rapport de l'Agence Internationale de l'Energie, 2013

L'hybride diesel-EnR dans le marché de l'électrification
(2019)
SiaPartners

Africa's Competitiveness in Global Battery Supply Chains, (October 2024)
Manufacturing Africa, Ayrton fund

Mini-grids for half a billion people,
executive summary (2019)
Sector Management Assistance Program (ESMAP)

A review of renewable off-grid mini-grids in Sub-Saharan Africa, published 16/01/2023, "Frontiers"

Analyse du marché des énergies renouvelables : l'Afrique et ses sous-régions, 2022
Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) et Banque Africaine de Développement (BAD)

Rapport sur l'état du marché mondial des mini-réseaux en 2020
Mini-grids partnership, BloombergNEF

Etat du marché mondial des mini-réseaux, 2024
Mini-grids partnership

Closing the loop on energy access in Africa, may 2021
World Economic Forum

Mini-grids on the trajectory of rural electrification in Africa,
John Kidenda, 2019
Africa Minigrid Development Association (AMDA)

Accelerating mini-grid deployment in Sub-Saharan Africa, 2017
World Resources Institute

Mentions légales

Titre de l'étude : *Le stockage d'électricité adapté aux mini-réseaux*
Étude collaborative sur la filière des batteries en Afrique subsaharienne

Commanditaires : Agence Française de Développement (AFD) et SETEC Énergie Environnement
Réalisation : Onepoint
Impression : PixartPrinting, Italie
Date d'impression : Novembre 2025

Tous droits réservés, y compris la reproduction, la traduction et l'adaptation..

© Agence Française de Développement (AFD), SETEC Énergie Environnement et Onepoint – 2025

