



 ESMAP

RAPPORT TECHNIQUE 014/19

DES MINI-RÉSEAUX POUR UN DEMI-MILLIARD DE PERSONNES

Perspectives du marché et guide pour les décideurs

RÉSUMÉ ANALYTIQUE

LA MISSION D'ESMAP

Le programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique (ESMAP) est un programme mondial d'assistance technique et de transfert des connaissances administré par la Banque mondiale. Il propose des services analytiques et de conseil à l'intention des pays à faible et moyen revenu dans le but de développer leur savoir-faire et leur capacité institutionnelle afin de mettre en œuvre des solutions énergétiques durables sur le plan environnemental, pour la réduction de la pauvreté et pour la croissance économique. ESMAP est financé par l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, le Canada, le Danemark, la Commission européenne, la Finlande, la France, l'Islande, l'Italie, le Japon, la Lituanie, le Luxembourg, les Pays-Bas, la Norvège, la Fondation Rockefeller, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse, ainsi que par la Banque mondiale.

Copyright © Juin 2019

La Banque internationale pour la reconstruction et le développement / LE GROUPE DE LA BANQUE MONDIALE
Programme d'appui à la gestion du secteur énergétique
1818 H Street, NW | Washington DC 20433 | États-Unis

Les rapports du Programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique (ESMAP) sont publiés afin de communiquer les résultats des travaux d'ESMAP à la communauté travaillant pour le développement. Certaines sources citées dans cet ouvrage peuvent provenir de documents non officiels qui ne sont pas encore disponibles.

Ce document est l'œuvre des services de la Banque mondiale en collaboration avec des contributeurs externes. Les constatations, interprétations et conclusions exprimées dans cet ouvrage ne reflètent pas forcément les points de vue de la Banque mondiale, ni de ses organisations affiliées, ni des membres de son conseil d'administration pour les pays qu'ils représentent, ni d'ESMAP. La Banque mondiale et ESMAP ne garantissent pas l'exactitude des informations contenues dans cette publication et déclinent toute responsabilité relativement à toute conséquence de leur utilisation. Les frontières, couleurs, dénominations et autres informations figurant sur toute carte de ce rapport n'impliquent aucun jugement de la part du Groupe de la Banque mondiale à l'égard du statut légal de tout territoire ou de l'acceptation desdites frontières.

Tout ou partie du texte de cette publication peut être reproduit intégralement ou partiellement et sous toute forme dans un but éducatif ou non lucratif, sans autorisation spéciale, à condition qu'une citation de la source soit faite. Les demandes d'autorisation de reproduire des parties dans le but de les revendre ou de les commercialiser doivent être soumises au directeur d'ESMAP, à l'adresse indiquée ci-dessus. L'ESMAP encourage la diffusion de ses travaux et, en règle générale, accorde rapidement son autorisation. Le directeur d'ESMAP apprécierait de recevoir une copie de la publication utilisant le présent document comme source, envoyée à l'adresse ci-dessus.

Toutes les illustrations demeurent la propriété exclusive de leur source. Elles ne peuvent pas être utilisées pour quelque but que ce soit sans l'autorisation écrite de ladite source.

Photo de couverture : Soudeur au Kenya travaillant avec du matériel alimenté par de l'électricité et provenant d'un mini-réseau. Autorisation nécessaire pour toute autre utilisation.

Attribution | ESMAP. 2019. Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers. Résumé analytique. Programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique (ESMAP) - Rapport technique 14/19. Washington, DC : Banque mondiale.

TABLE DES MATIÈRES

LES MINI-RÉSEAUX EN CHIFFRES	2
PRINCIPALES CONSTATATIONS	3
LE NOUVEAU PAYSAGE DE L'ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ	13
LA PLACE DES MINI-RÉSEAUX DANS LE SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ	18
Le système de mini-réseau	18
Coût d'un système de mini-réseau	19
Situation et perspectives des dépenses en capital et des dépenses d'exploitation	25
<i>Coûts en capital</i>	25
<i>Coûts d'exploitation, de remplacement et de développement de projet</i>	26
<i>Réductions potentielles de coûts</i>	29
INTENSIFICATION DE LA PRESTATION DE SERVICES D'ÉLECTRICITÉ PAR LE SECTEUR PRIVÉ ET LES SOCIÉTÉS PUBLIQUES D'ÉLECTRICITÉ	31
CRÉER L'ENVIRONNEMENT PROPICE À L'ESSOR DE PORTEFEUILLES DE MINI-RÉSEAUX	36
Utilisation d'analyses géospatiales dans la planification des portefeuilles de mini-réseaux et pour les plans nationaux d'électrification	36
Régulation du secteur et création d'un environnement propice aux affaires	38
Renforcement du modèle et du cadre institutionnels	44
Renforcement du capital humain et de la participation de la communauté	45
ACCROÎTRE L'ACCÈS AU FINANCEMENT	49
INSTANTANÉ DU MARCHÉ MONDIAL ET SES PERSPECTIVES JUSQU'EN 2030	55
PASSER AUX ACTES	60
Objectifs et buts globaux du secteur	60
Soutien des parties prenantes	62
Domaines nécessitant des recherches supplémentaires	63
REMERCIEMENTS	64
ANNEXE A. INTRODUCTION D'UN ENSEMBLE COMPLET DE CONNAISSANCES POUR LES 10 ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS INDISPENSABLES À L'INTENSIFICATION DU DÉPLOIEMENT DE MINI-RÉSEAUX	65
BIBLIOGRAPHIE	67
NOTES	69

LES MINI-RÉSEAUX EN CHIFFRES

La situation aujourd'hui

47 millions de personnes connectées à **19 000 mini-réseaux**, fonctionnant surtout à l'hydroélectricité et au diesel, moyennant **28 milliards de dollars** d'investissement. Plus : **7 500 mini-réseaux planifiés**, principalement en Afrique, surtout solaires hybrides et connectant plus de 27 millions de personnes, moyennant un coût d'investissement de 12 milliards de dollars.

La position à atteindre pour parvenir à l'accès universel d'ici à 2030

490 millions de personnes desservies au moindre coût par **210 000 mini-réseaux**, surtout solaires hybrides, nécessitant un investissement de **220 milliards de dollars**.

10 éléments constitutifs doivent être en place dans les pays pour intensifier à grande échelle le déploiement des mini-réseaux : (i) la technologie solaire-hybride et l'établissement de repères de coûts, (ii) la planification géospatiale du portefeuille de mini-réseaux, (iii) des utilisations de l'électricité à usage productif, (iv) la participation communautaire, (v) le secteur industriel local et international, (vi) l'accès à des financements, (vii) la formation et le renforcement des compétences, (viii) le cadre institutionnel, (ix) une régulation réaliste et (x) un environnement favorable aux affaires.

Tendances régionales ressortant de la base de données ESMAP et recensant plus de 26 000 projets de mini-réseau dans 134 pays

INSTALLÉS

(Surtout des mini-réseaux de la 1^{re} et de la 2^e génération)ⁱ

1 500 Afrique
6 900 Asie de l'Est et Pacifique
1 100 OCDE et Asie centrale
9 300 Asie du Sud
300 Autres

PLANIFIÉS

(Surtout des mini-réseaux de la 3^e génération)ⁱ

4,000 Afrique
900 Asie de l'Est et Pacifique
200 OCDE et Asie centrale
2 200 Asie du Sud
200 Autres

5 premiers pays...

INSTALLÉS

(Surtout des mini-réseaux de la 1^{re} et de la 2^e génération)

4 980 Afghanistan
3 988 Myanmar
2 800 Inde
1 519 Népal
1 184 Chine

PLANIFIÉS

(Surtout des mini-réseaux de la 3^e génération)

1 905 Inde
1 217 Sénégal
879 Nigeria
506 Indonésie
301 Tanzanie

Financement actuel

28 milliards de dollars—Investissements mondiaux cumulés dans les mini-réseaux jusqu'à ce jour

5 milliards de dollars—Investissements mondiaux cumulés dans les mini-réseaux jusqu'à ce jour en Afrique et en Asie du Sud

1,3 milliards de dollars—Partenaires du développement engagés, dont l'AFD, la BAD, le DfiD, la Banque islamique de développement, GIZ et la Banque mondiale

660 milliards de dollars—Engagement de la Banque mondiale vis-à-vis des mini-réseaux dans 33 pays jusqu'en 2025

259 milliards de dollars—Investissements du secteur privé dans les développeurs de mini-réseaux dans les pays à faible revenu depuis 2013

25 %—Part moyenne de la Banque mondiale du total des investissements dans les mini-réseaux (gouvernements, partenaires du développement et secteur privé) dans les pays clients

3 premiers développeurs du secteur privé par nombre de mini-réseaux

1. **PowerGen** (7 pays en Afrique) > 100 mini-réseaux
2. **OMC** (Inde) 99
3. **Husk Power** (Inde) 45

3 premières sociétés publiques d'électricité par nombre de mini-réseaux

1. **NPC-SPUG** (Philippines) 750
2. **RAO** (Russie) 500
3. **JIRAMA** (Madagascar) 96

Perspectives du secteur privé

\$3.3 billion Potentiel de bénéfice annuel pour les développeurs pour les mini-réseaux déployés entre 2019 et 2030

4,7 milliards de dollars de potentiel de bénéfice net pour tous les fournisseurs de composants et de services de mini-réseaux rien qu'en 2030

i. Une discussion détaillée sur les mini-réseaux de la 1^{re}, 2^e et 3^e génération de mini-réseaux figure à la section « La place des mini-réseaux dans le secteur de l'électricité ». Les sources et l'analyse sous-jacente pour les chiffres ci-dessus sont présentées tout au long de cet ouvrage.

LES MINI-RÉSEAUX EN CHIFFRES, suite

Coût d'un mini-réseau solaire hybride aujourd'hui...	... et d'ici à 2030
3 908 dollars/kW Total des charges immobilisées	<3 000 dollars/kW
690 dollars/kWp Module solaire PV	140 dollars/kWp
598 dollars/kWh Batteries lithium-ion	62 dollars/kWh
264 dollars/kW Onduleur photovoltaïque	58 dollars/KW

Coût de l'électricité de mini-réseaux solaires hybrides non subventionnés (LCOE)...	... Par rapport aux sociétés publiques d'électricité en Afrique
0,55 dollar/kWh Base de comparaison aujourd'hui	0,27 dollar/kWh en moyenne dans 39 sociétés publiques d'électricité
0,42 dollar/kWh avec des appareils à usage productif pour atteindre 40 % de facteur de charge	2 sur 39 des sociétés publiques d'électricité pratiquant des tarifs couvrant leurs coûts
0,22 dollar/kWh avec des appareils à usage productif et les coûts attendus en 2030	

Appareils à usage productif

12 mois de période de rentabilisation pour plus de 30 appareils et d'autres appareils à usage productif en vente actuellement

1,3 milliard de dollars de microfinancement pour

1,1 million d'appareils et autres appareils connectés à des mini-réseaux de la 3^e génération en 2030

Service de mini-réseau de la 3^e génération...

97 % de temps pour un niveau d'accès

Accès de **Niveau 4-5**

84 % de taux de satisfaction client

... Par rapport à des sociétés publiques d'électricité types

40 % à 50 % de temps pour un niveau d'accès

Accès de **Niveau 3-4**

41 % de taux de satisfaction client

Impact sur l'environnement d'ici à 2030

10 à 15 GW de capacité solaire photovoltaïque installée d'ici à 2030

Batteries de 50 à 110 GWh au lithium-ion pour la plupart

60 % d'économies d'énergie à partir d'appareils à haut rendement énergétique

1,5 milliard de tonnes d'émissions de CO₂ évitées

Mini-réseau de la 3^e génération type

0,5 à 1,0 million de dollars d'investissements

200 à 800 clients connectés

800 à 4 000 personnes recevant de l'électricité pour la première fois

50 à 100 kWp de solaire photovoltaïque installés

Batteries de 200 à 500 kWh installées

Définition d'un mini-réseau

Les mini-réseaux sont des systèmes de production et de distribution d'énergie électrique, qui fournissent de l'électricité à un nombre restreint de clients dans une zone d'habitat reculée ou à des centaines de milliers de clients dans une ville, petite ou grande. Ils peuvent être entièrement isolés du réseau principal ou y être connectés, tout en étant capables de s'en isoler intentionnellement (« îlot »). Les mini-réseaux alimentent en électricité des ménages, des entreprises, des institutions publiques ainsi que des clients clés, comme des tours de télécommunications et de grandes installations de transformation des produits agricoles. Ils sont conçus pour fournir de l'électricité de haute qualité et fiable. Une nouvelle « troisième génération » de mini-réseaux, qui eux sont solaires hybrides, est apparue récemment : ceux-ci incorporent les toutes dernières technologies telles que des compteurs intelligents et des systèmes de surveillance à distance, et sont généralement conçus pour s'interconnecter au réseau principal. La section « La place des mini-réseaux dans le secteur de l'électricité » décrit dans le détail les mini-réseaux de la 3^e génération.

Dans notre analyse pour le présent rapport, seuls sont inclus les mini-réseaux desservant plusieurs clients. Par conséquent, les systèmes d'électricité qui desservent uniquement un hôpital, un établissement industriel, une base militaire, un campus universitaire, une mine ou toute autre entité prise de manière isolée n'ont donc pas été considérés comme étant des mini-réseaux. Par ailleurs, nous ne définissons pas les mini-réseaux en termes de capacité, bien que dans notre analyse détaillée des coûts des mini-réseaux et dans notre base de données qui regroupe plus de 26 000 projets de mini-réseaux, l'immense majorité d'entre eux (plus de 99 %) variaient de quelques kW à plusieurs MW de capacité installée.

PRINCIPALES CONSTATATIONS

Selon la dernière version du rapport intitulé *Tracking SDG7: The Energy Progress Report*, les progrès réalisés vers l'accès universel à l'électricité sont prometteurs (Banque mondiale et autres 2019). En 2017, le taux d'électrification mondial a atteint 89 % et le nombre de personnes sans accès a baissé à près de 840 millions de personnes, par rapport à environ 1 milliard d'entre elles en 2016 et de 1,2 milliard en 2010. En dépit de ces progrès réalisés, si les politiques actuelles se maintiennent à leur rythme, on estime qu'en 2030 il restera 650 millions de personnes dépourvues d'accès à l'électricité, soit 8 % de la population mondiale, 9 sur 10 d'entre elles habitant en Afrique subsaharienne.

Pour atteindre les populations non ou mal desservies, notamment celles connectées à des réseaux urbains fragiles et surchargés, les personnes déplacées et celles qui habitent dans des endroits difficiles d'accès, il faudra de solides politiques, davantage de financements privés et un plan d'électrification intégré. *Le rapport Tracking SDG7: The Energy Progress Report* montre que les pays ayant adopté une approche de planification intégrée (qui se compose d'extensions du réseau principal, de mini-réseaux et de systèmes solaires individuels à usage domestique) sont ceux qui ont enregistré les résultats les plus rapides en matière d'accès à l'électricité (Banque mondiale et autres 2019). Parmi les pays affichant les progrès d'électrification les plus rapides entre 2010 et 2018, on compte le Bangladesh, le Cambodge, l'Inde, le Kenya, le Myanmar, le Népal, le Rwanda et la Tanzanie.

Par rapport au réseau principal et à des systèmes solaires à usage domestique, les mini-réseaux représentent une solution plus viable pour les zones hors réseau à forte densité de population et à forte demande. Dans la plupart des cas, il est bien trop coûteux d'envisager l'extension du réseau principal pour desservir les communautés isolées qui consomment un nombre limité de kilowatts-heures (kWh) par mois. En revanche, les systèmes solaires à usage domestique constituent la solution idéale pour les régions à faible densité de population et à faible demande. En règle générale, un mini-réseau représente l'option la plus viable sur le plan économique lorsqu'il s'agit de desservir des régions trop coûteuses à atteindre par le réseau principal en temps utile mais qui présentent un niveau de demande et de densité démographique suffisamment élevé pour en assurer la viabilité commerciale.

Parallèlement à cela, les mini-réseaux se sont développés, passant d'une solution niche à leur déploiement à grande échelle. Le Programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique (ESMAP) de la Banque mondiale a élaboré une base de données de plus de 26 000 projets de mini-réseaux installés et planifiés partout dans le monde. À l'échelle mondiale, au moins 19 000 mini-réseaux sont déjà installés dans 134 pays et territoires, ce qui représente un investissement total de 28 milliards de dollars, fournissant de l'électricité à près de 47 millions de personnes. La plupart de ces mini-réseaux fonctionnent au diesel, suivis de ceux qui fonctionnent à l'hydroélectricité et au solaire hybride. Entre 2014 et 2018, deux fois plus de mini-réseaux solaires hybrides ont été construits par rapport à la période entre 2009 et 2013. Toutefois, si l'on considère uniquement l'Afrique et l'Asie du Sud, les investissements ne s'élèvent qu'à 5 milliards de dollars pour 11 000 mini-réseaux desservant 31 millions d'habitants. Il est prévu de mettre en service plus de 7 500 mini-réseaux supplémentaires d'ici deux ans, surtout en Afrique, connectant plus de 27 millions de personnes pour un coût

d'investissement de 12 milliards de dollars. Ces systèmes prévus affichent une évolution marquée, abandonnant le diesel en faveur de systèmes solaires hybrides utilisant les toutes dernières technologies.

L'Asie est la région qui compte le plus de mini-réseaux installés, mais c'est en Afrique que le plus de mini-réseaux sont planifiés. La base de données ESMAP des projets de mini-réseaux partout dans le monde indique que l'Asie (y compris l'Asie du Sud, l'Asie de l'Est et le Pacifique) a un total combiné de plus de 16 000 mini-réseaux installés, soit 85 % du total mondial. La majorité (61 %) des mini-réseaux installés en Asie se trouve dans trois pays seulement : l'Afghanistan (4 980), le Myanmar (3 988) et l'Inde (2 800). Les estimations montrent toutefois que c'est en Afrique que le déploiement de mini-réseaux s'intensifiera le plus. À l'heure actuelle, il est prévu de développer plus de 4 000 mini-réseaux en Afrique, soit plus de la moitié (54 %) du total des 7 507 mini-réseaux planifiés à l'échelle mondiale. Plus de la moitié des mini-réseaux planifiés en Afrique seront développés au Sénégal (1 217) et au Nigeria (879).¹

Depuis 10 ans, le coût en capital des mini-réseaux recule, tendance qui devrait se poursuivre jusqu'en 2030. Dans le même temps, la qualité du service a augmenté de façon spectaculaire. Le coût des principaux composants des mini-réseaux (panneaux solaires, onduleurs, batteries et compteurs intelligents) a diminué de 62 %-85 % suite aux innovations et aux économies d'échelle réalisées dans le cadre de projets solaires à l'échelle de sociétés publiques d'électricité, grâce aussi à l'essor des systèmes solaires de toiture et à celui du marché des véhicules électriques. Une enquête détaillée d'ESMAP sur les mini-réseaux en Afrique et en Asie présentée dans cet ouvrage montre comment cette évolution a fait baisser le coût en capital, passant de plus de 8 000 dollars par kilowatt de sortie de puissance stable (kW_{stable})ⁱⁱ en 2010 à 3 900 dollars/ kW_{stable} en 2018. L'analyse d'ESMAP révèle par ailleurs que si les coûts continuent de diminuer (comme le montrent des hypothèses optimistes qui restent réalistes), le coût des investissements initiaux de mini-réseaux solaires et solaires hybrides pourrait tomber sous la barre des 3 000 dollars/ kW_{stable} d'ici à 2030. Le coût d'autres mini-réseaux fonctionnant aux énergies renouvelables a lui aussi baissé, quoique de façon moins spectaculaire que celui des systèmes solaires basés sur batterie. En outre, dans la mesure où le potentiel du marché pour ces systèmes solaires est considérablement moins limité par l'emplacement des ressources disponibles (comme avec des projets d'hydroélectricité ou éoliens), on s'attend à ce que la plupart des nouveaux mini-réseaux fonctionnent au solaire.

Suite à la baisse du coût en capital et à l'accroissement du facteur de charge, le coût par kWh de l'électricité produite par des mini-réseaux devrait diminuer de deux tiers d'ici à 2030. La modélisation d'ESMAP présentée dans cet ouvrage fait apparaître que le coût actualisé de l'énergie (LCOE) d'un mini-réseau hybride bien conçu fonctionnant à base de batterie solaire et au diesel desservant plus de 1 500 personnes est d'environ 0,55 dollar/kWh lorsqu'il dessert des clients résidentiels, ce qui lui donne un facteur de charge d'environ 22 %. À mesure que baissera le coût des machines et des appareils de haut rendement à usage productif et que les développeurs augmenteront la demande d'utilisation de l'électricité à usage productif pendant la journée, il est possible que les mini-réseaux augmentent leur facteur de charge de plus de 40 %. Si l'on ajoute à cela la réduction des coûts accessoires grâce à l'utilisation de systèmes de gestion contrôlés à distance et de compteurs intelligents, ainsi qu'à des outils de planification géospatiale du portefeuille qui réduisent les coûts préalables de préparation du terrain de l'ordre d'environ 30 000 dollars par site à 2 300 dollars, il est possible d'envisager jusqu'à 25 % de réduction du LCOE de ces mini-réseaux de la « troisième génération » (0,41 dollar/kWh) d'ici à 2020. Si la baisse du coût des composants se produit comme prévu, l'analyse d'ESMAP suggère que le LCOE pourrait baisser de 60 % à 70 % pour s'élever à environ 0,20 dollar/kWh d'ici à 2030.

ii. La sortie de puissance stable signifie que le mini-réseau est capable de fournir la charge de crête pour laquelle le système a été conçu à chaque seconde de la journée tout au long de l'année. Dans les mini-réseaux solaires hybrides, la sortie de puissance stable correspond à la capacité en kW du générateur, ajoutée à celle de l'onduleur de batterie. Pour obtenir une description plus détaillée de cette mesure et la justification de son utilisation, veuillez vous reporter au chapitre 3 de l'ouvrage principal.

Les grands développeurs tirent parti des technologies transformatrices et des tendances économiques actuelles pour construire des mini-réseaux de la troisième génération, capables de fournir de l'électricité de haute qualité à un prix abordable et à une échelle sans précédent. Un mini-réseau de la troisième génération est généralement constitué d'un système de production solaire hybride comprenant des panneaux solaires, des batteries, des régulateurs de charge, des onduleurs et des générateurs au diesel de secours. Ces mini-réseaux utilisent généralement des compteurs d'électricité intelligents contrôlés à distance, qui permettent aux clients de payer leur électricité à l'avance selon une méthode de paiement avant consommation (PAYG). Ils utilisent des systèmes de contrôle à distance pour gérer, de loin, l'état du système en temps réel. Ces développeurs ont également intégré des programmes de partenariat tout au long du cycle de vie du mini-réseau qui stimulent le développement économique local de leurs clients, et cela en collaboration avec des fournisseurs d'appareils à haut rendement ainsi que des fournisseurs de microcrédit. Les études montrent que le temps pour un niveau d'accès des mini-réseaux de la troisième génération est souvent supérieur à 97 %, soit moins de 2 semaines de maintenance programmée par an. Cette performance est nettement supérieure à celle des mini-réseaux des générations précédentes et de la plupart des sociétés publiques d'électricité à travers l'Afrique subsaharienne.

La combinaison de baisse des coûts, de nouvelles technologies et d'un environnement porteur fait des mini-réseaux de la troisième génération une option réaliste pour connecter 490 millions de personnes, s'ajoutant en complément à l'extension du réseau principal et à des systèmes solaires à usage domestique, en vue d'atteindre l'électrification universelle d'ici à 2030. En tenant compte de l'actuel déficit de 840 millions de personnes sans accès à l'électricité, de la croissance démographique et des approches actuelles en matière d'électrification, on estime qu'il reste quelque 1,2 milliard de personnes à connecter à l'électricité d'ici à 2030. S'appuyant sur les estimations du rapport de 2019 *Tracking SDG7: the Energy Progress Report* (Banque mondiale et autres 2019) et de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2017), l'analyse d'ESMAP montre qu'il serait possible de connecter à des mini-réseaux 490 millions de personnes d'ici à 2030. La même analyse fait apparaître que cette connectivité est complétée par des extensions du réseau principal et des systèmes solaires à usage domestique.

Les mini-réseaux de la troisième génération peuvent être un moyen de favoriser la croissance inclusive dans les zones rurales isolées en permettant des utilisations de l'électricité à usage productif propices au soutien de l'activité économique. Les mini-réseaux modernes sont conçus pour parvenir à des périodes de rentabilisation de moins de 12 mois pour plus d'une trentaine de machines et autres types d'appareils à usage productif qui sont actuellement commercialisés. À ce titre, ils induisent des situations où chacun s'y retrouve, où la viabilité financière des développeurs est améliorée tout en créant des emplois et en renforçant les moyens de subsistance dans les communautés. Il n'en demeure pas moins qu'il faut prévoir environ 1,3 milliard de dollars de microcrédits pour l'achat d'1,1 million d'appareils, en supposant cinq appareils à usage productif par mini-réseau pour 210 000 mini-réseaux à un coût moyen de 1 200 dollars par appareil.

Les mini-réseaux de la troisième génération permettent aussi l'utilisation de cuisinières électriques, application souvent oubliée qui permet pourtant aussi de capter les dépenses déjà existantes des ménages. Les ménages qui adoptent la cuisson électrique alimentée à partir d'un mini-réseau économisent de l'argent par rapport aux méthodes traditionnelles : les cuisinières à induction fonctionnant sur mini-réseau coûtent entre 0,18 et 0,98 dollar par personne et par jour, ce qui en fait une option souvent moins chère que des cuisinières classiques fonctionnant au bois (qui peuvent coûter jusqu'à 0,37 dollar) et au charbon (jusqu'à 0,45 dollar) par personne et par jour (Couture et autres 2016). La cuisson électrique présente aussi aux développeurs une chance précieuse d'accroître leur facteur de charge et de stimuler leurs recettes. Si certes la charge de pointe est un enjeu majeur pour la cuisson électrique sur les mini-réseaux, tout un éventail de techniques de décalage dans le temps permet de découpler la demande d'électricité de l'approvisionnement, notamment sous la forme de stockage sur batterie domestique. ESMAP collabore avec l'université

de Loughborough et ses partenaires à un nouveau programme de services de cuisson à base d'énergies modernes financé par le Département britannique pour le développement international (DFID) qui vise à tirer parti des possibilités offertes par la cuisson électrique fonctionnant sur mini-réseau et à remédier à ses problèmes.

Les mini-réseaux solaires de la troisième génération peuvent avoir d'importants effets bénéfiques sur l'environnement. On estime que d'ici à 2030, il devrait être possible d'installer 10 à 15 gigawatts (GW) de puissance photovoltaïque solaire à l'aide de batteries de 50 à 110 gigawatts-heures (GWh), la plupart étant au lithium-ion. Par ailleurs, ces systèmes sont conçus en se basant sur l'hypothèse d'introduire des appareils à faible consommation énergétique lors de l'acquisition par l'utilisateur final de ses premiers appareils électriques, qui consomment 60 % d'énergie en moins par rapport aux mêmes appareils d'il y a cinq ans. Ces efforts combinés permettraient d'éviter l'émission de 1,5 milliard de tonnes de dioxyde de carbone (CO₂).

Le fait de connecter un demi-milliard de personnes à des mini-réseaux d'ici à 2030 nécessitera plus de 210 000 mini-réseaux et près de 220 milliards de dollars d'investissement.

Le fait de connecter 490 millions de personnes à des mini-réseaux d'ici à 2030 nécessitera plus de 210 000 mini-réseaux et près de 220 milliards de dollars d'investissement. Malgré l'augmentation des investissements dans les mini-réseaux depuis une dizaine d'années, ceux-ci ne suffisent pas pour induire une intensification de leur déploiement permettant de combler le déficit d'accès à l'électricité d'ici à 2030. Les études d'ESMAP présentées dans cet ouvrage font

apparaître que pour parvenir à l'accès universel à l'électricité, il faudra multiplier par un facteur à deux chiffres le nombre de mini-réseaux déployés dans chacun des 20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité, par pays et par année : pour passer du niveau actuel de déploiement de 10 à 50 mini-réseaux par an à plus de 1 500 dans chacun de ces pays d'ici à 2030.

Le secteur des mini-réseaux présente un gros potentiel de bénéfice pour les développeurs de mini-réseau et leurs fournisseurs. Dans les marchés bien établis où des fonds tant privés que publics sont disponibles, l'analyse d'ESMAP présentée dans cet ouvrage fait apparaître qu'au cours des dix prochaines années, le potentiel de bénéfice pour les entreprises du secteur privé dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement des mini-réseaux de la troisième génération devrait monter en flèche, pour frôler les 25 milliards de dollars de bénéfices cumulés d'ici à 2030 d'après les marges d'exploitation actuelles, les plus grosses parts revenant aux fournisseurs d'énergie solaire et de stockage. Cette estimation de la marge bénéficiaire a été calculée en analysant les prévisions du coût des composants données par des cabinets d'études de marché très reconnus, estimant le total des dépenses d'équipement pour le nombre prévu de mini-réseaux, ainsi qu'en reprenant les données des états financiers vérifiés d'une demi-douzaine de sociétés de mini-réseaux. Le bénéfice estimé semble indiquer que les montants pourraient être encore plus élevés, dans la mesure où les entreprises profiteront des économies d'échelle induites par l'expansion du secteur des mini-réseaux pour réduire leurs coûts. Pour les développeurs, ESMAP anticipe un bénéfice annuel de plus de 3 milliards de dollars d'ici à 2030, qui a été calculé en évaluant les tarifs actuels et prévus et les coûts actualisés de l'électricité, ainsi qu'en analysant les états financiers vérifiés. Pour que le secteur privé accélère ses investissements dans les mini-réseaux, il faut qu'il existe une marge bénéficiaire suffisante tout au long de la chaîne de valeur.

Au regard du potentiel de bénéfice pour les développeurs de mini-réseaux et leurs fournisseurs, d'excellentes possibilités de partenariats entre entreprises locales et internationales se dessinent sur l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur des mini-réseaux. Les entités locales sont les mieux placées pour se concentrer sur les aspects de la chaîne de valeur qui nécessitent une connaissance des règles et de la régulation locales ou qui requièrent des efforts de coordination avec les clients desservis par le mini-réseau ; les entreprises internationales, quant à elles, sont les mieux à même de s'acquitter de tâches qui peuvent être transposées au-delà des frontières nationales. Les partenariats entre entreprises locales et inter-

nationales peuvent être un moyen de stimuler la création de valeur, comme en témoignent les récents accords de partenariat conclus entre Caterpillar et PowerHive en Afrique, ABB et Husk Power en Inde, Mitsui et OMC en Inde, ENGIE et Mandalay Yoma Energy au Myanmar, ainsi que Schneider Electric avec à la fois EM-ONE et GVE au Nigeria.

Dans le même temps, l'expérience montre que, pour atteindre l'accès universel, la mobilisation de fonds publics (même dans le cadre de programmes dirigés par le secteur privé) est indispensable pour combler l'écart entre le coût pour atteindre les zones reculées et le niveau d'accessibilité financière des clients. Les gouvernements et les partenaires de développement en sont bien conscients et élaborent des mesures d'aide complètes qui comprennent des subventions destinées à attirer l'investissement privé. Ces mesures représentent une incitation à fournir des services d'électricité à l'utilisateur final, tout en permettant de dégager suffisamment de marge bénéficiaire pour que le secteur privé y voie un intérêt à pénétrer le marché.

Souvent, les subventions basées sur la performance octroyées aux mini-réseaux sont d'un montant moins élevé que les subventions implicites ou explicites accordées au réseau principal. Une subvention basée sur la performance équivalente à 40 % des coûts de raccordement d'un développeur permettrait à celui-ci de facturer aux clients un tarif qui serait de 11 % à 22 % inférieur à celui de son LCOE non subventionné. En attendant, une enquête réalisée auprès de 39 sociétés nationales d'électricité en Afrique a montré que les subventions explicites ou implicites qu'elles reçoivent leur permettent de vendre l'électricité à des prix qui étaient en moyenne de 41 % (et jusqu'à 80 %) inférieurs au LCOE non subventionné des sociétés publiques d'électricité (Trimble et autres, 2014 ; Kojima et Trimble, 2016). Cela indiquerait que beaucoup de sociétés nationales d'électricité en Afrique touchent des subventions implicites qui correspondent à plus de 40 % de leurs coûts de raccordement. Alors que les coûts de raccordement des sociétés nationales d'électricité dépassent souvent 2 000 dollars dans les régions rurales (Trimble et autres 2014 ; Blimpo et Cos-

Souvent, les subventions basées sur la performance octroyées aux mini-réseaux sont d'un montant moins élevé que les subventions implicites ou explicites accordées au réseau principal.

grove-Davies 2019), la subvention implicite qu'elles touchent se chiffrerait donc à plus de 800 dollars par raccordement. En attendant, les travaux de recherche d'ESMAP ont révélé que la fourchette des coûts de raccordement à un mini-réseau était comprise entre 1 000 dollars, voire moins, et juste un peu plus de 2 100 dollars. Par conséquent, une subvention basée sur la performance équivalant à 40 % du coût de raccordement représenterait entre 400 et 900 dollars par raccordement.

Dans le cadre de leur appui au déploiement des mini-réseaux comme étant l'une de leurs principales stratégies pour parvenir à l'accès universel à l'électricité, les partenaires de développement, y compris la Banque mondiale, se sont engagés à consacrer aux mini-réseaux plus de 1,3 milliard de dollars au cours des années à venir. Ces investissements sont exclusivement destinés aux mini-réseaux et ne comprennent pas les financements pour de l'assistance technique et des travaux de recherche. Six organisations se sont engagées à investir dans les mini-réseaux moyennant un montant total de plus de 100 millions de dollars : l'Agence Française de Développement (AFD), la Banque africaine de développement (BAD), DFID, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ); la Banque islamique de développement et la Banque mondiale.

La Banque mondiale s'est engagée à investir dans 37 projets de mini-réseaux répartis dans 33 pays, engagements qui se chiffrent au total à plus de 660 millions de dollars. Sur ces projets, 29 ont d'ores et déjà été approuvés par le Conseil des Administrateurs de la Banque mondiale, pour un total de 636 millions de dollars dans 25 pays. Ces investissements devraient permettre de mobiliser un cofinancement supplémentaire de 1,1 milliard de dollars provenant du secteur privé, de gouvernements et de partenaires du développement et de stimuler l'intensification du développement des mini-réseaux à grande échelle. En plus de cela, dans chacun des 33 pays compris dans son portefeuille, l'engagement financier de la Banque mondiale

dans les mini-réseaux représente en moyenne 25 % de la totalité des investissements actuels et prévus dans les mini-réseaux par les gouvernements, les partenaires du développement et le secteur privé. ESMAP a également créé une facilité mondiale relative aux mini-réseaux (GFMG), dont le principal soutien provient du gouvernement du Royaume-Uni, en vue de promouvoir ce portefeuille et de généraliser les programmes de mini-réseaux dans les opérations de la Banque mondiale et les programmes d'électrification nationaux, ainsi que pour appuyer le développement et la diffusion des savoirs et apprentissages concernant les mini-réseaux. La GFMG organise également tous les ans des activités d'apprentissage « actif » pour partager et échanger les récents développements survenus au sein du secteur.

Les sociétés nationales d'électricité ont tout à gagner des mini-réseaux de la troisième génération comme moyens d'accroître la viabilité financière de l'extension future de leur réseau. Les mini-réseaux de la troisième génération sont généralement conçus pour se raccorder au réseau principal, ce qui les rend utiles pour équilibrer la charge ainsi que comme appui au transport et à la distribution en bout de ligne. Ils favorisent aussi des utilisations de l'électricité à des fins productives ainsi que le développement économique local. Ainsi, à l'arrivée du réseau principal, il existera d'ores et déjà une importante demande d'électricité et les clients seront mieux à même de la payer, autant d'atouts pour accroître la rentabilité économique de l'extension du réseau principal. Les nouvelles régulations donnent des options aux développeurs sur ce à quoi s'attendre à l'arrivée du réseau principal. En attendant, ils profitent de la baisse des coûts des composants des

Les sociétés nationales d'électricité ont tout à gagner des mini-réseaux de la troisième génération comme moyens d'accroître la viabilité financière de l'extension future de leur réseau.

mini-réseaux pour construire des systèmes prêts à être raccordés au réseau principal tout en maintenant les tarifs à des niveaux abordables. Même si cette régulation existe, jusqu'à présent elle n'est adoptée que dans un faible nombre de pays. Le Nigeria est l'un des pays précurseurs en la matière : le régulateur a adopté l'un des ensembles de régulation les plus complets en Afrique relatifs aux mini-réseaux, couvrant des aspects tels que l'octroi de licences, l'établissement des tarifs au détail et les perspectives à attendre à l'arrivée du réseau principal.

L'hybridation par les sociétés nationales d'électricité ou le secteur privé des mini-réseaux existants qui fonctionnent au diesel représente un marché de plusieurs milliards de dollars supplémentaires. ESMAP estime que la capacité installée du marché théorique des mini-réseaux au diesel se situe entre 1,6 GW et 4,6 GW. En reprenant des coûts d'investissement estimés de 5 100 dollars/kW pour l'hybridation des mini-réseaux au diesel, basés sur les coûts réels d'hybridation de mini-réseaux au diesel au Kenya (Carbon Africa Limited et autres 2015), le potentiel du marché mondial de l'hybridation des mini-réseaux au diesel se chiffre entre 8 et 23 milliards de dollars.

Les mini-réseaux de la troisième génération peuvent aussi favoriser la résilience face à l'augmentation des perturbations provoquées par le changement climatique et les catastrophes naturelles en fournissant une source d'électricité fiable aux infrastructures essentielles ainsi qu'aux ménages et aux sociétés. À Porto Rico, par exemple, les hôpitaux, les écoles et les bâtiments municipaux comme les commissariats de police, ainsi que 1,5 million de personnes, ont été coupés d'électricité pendant des mois d'affilée suite au passage de l'ouragan Maria. Les autorités portoricaines n'ont pas tardé à élaborer une stratégie d'implantation de mini-réseaux solaires partout dans le pays afin de réapprovisionner en électricité les infrastructures essentielles, mais aussi pour mettre en place un secteur de l'énergie plus résilient. Le nouveau plan de ressources intégrées (IRP) de l'île divise en huit mini-réseaux le réseau principal jusque-là centralisé. Ceux-ci produiront près de 1,4 GW de capacité solaire et 920 mégawatts (MW) de stockage sur batterie entre 2019 et 2022. Ce plan IRP énonce spécifiquement la justification commerciale du passage aux mini-réseaux, affirmant qu'il s'agit là du moyen au moindre coût pour parvenir à une résilience contre les ouragans, atteindre les objectifs visés en matière d'énergie renouvelable et fournir un service de haute qualité aux clients (Walton 2019). À

l'échelle mondiale, ESMAP estime que le marché des mini-réseaux développés comme moyens d'accroître la résilience pourrait dépasser 5 000 mini-réseaux installés et programmés, surtout dans les îles et les pays à revenu élevé, connectant à l'électricité plus de 10 millions de personnes moyennant un coût d'investissement d'environ 10 milliards de dollars.

Pour que les pays appuient le développement du secteur des mini-réseaux, 10 éléments constitutifs doivent être en place pour favoriser les cinq grands moteurs du marché. Dans la mesure où la situation de chaque pays lui est propre, les 10 éléments constitutifs doivent lui être adaptés spécifiquement. L'expérience que la Banque mondiale a acquise au cours des 10 dernières années à travailler aux côtés de développeurs de mini-réseaux, de responsables gouvernementaux, d'investisseurs, d'experts et de partenaires bailleurs de fonds, lui a permis d'identifier ces 10 éléments constitutifs : (i) la technologie solaire-hybride et l'établissement de repère de coûts, (ii) la planification géospatiale du portefeuille de mini-réseaux, (iii) des utilisations de l'électricité à des fins productives, (iv) la participation communautaire, (v) le secteur industriel local et international, (vi) l'accès à des financements, (vii) la formation et le renforcement des compétences, (viii) le cadre institutionnel, (ix) une régulation réaliste et (x) un environnement favorable aux affaires. Ces 10 éléments constitutifs doivent obligatoirement être en place pour appuyer les cinq grands moteurs du marché propices à l'expansion du secteur, qui sont : (i) accroître l'allure du déploiement des mini-réseaux par l'adoption d'une approche de portefeuille ; (ii) fournir un service d'excellente qualité ; (iii) utiliser l'effet de levier des fonds de partenaires du développement et du gouvernement pour mobiliser le financement par le secteur privé ; (iv) créer un environnement favorable aux affaires dans les principaux pays en déficit d'accès et (v) réduire le coût des mini-réseaux solaires hybrides. Chacun de ces 10 éléments constitutifs est examiné plus en détail dans chaque chapitre du rapport complet pour aider les décideurs et les parties prenantes à chaque étape de la chaîne du secteur des mini-réseaux à élaborer les solutions appropriées.

Ce rapport préconise que des progrès soient faits pour chacun des cinq moteurs du marché. En consultation avec le secteur des mini-réseaux, des partenaires du développement et d'autres parties prenantes, des indicateurs de progrès ont été formulés, dont voici les principaux :

1. accroître l'allure du déploiement des mini-réseaux par l'adoption d'une approche de portefeuille, se chiffrant à quelque 1 500 projets par grand pays en déficit d'accès d'ici à 2030, tout en visant à réduire à cinq semaines le temps de construction d'un mini-réseau d'ici à 2030
2. fournir un service d'excellente qualité, de 97 % de temps pour un niveau d'accès d'ici à 2020, ainsi que porter à 45 % dans tout le secteur le facteur de charge moyen des mini-réseaux de la troisième génération
3. créer un environnement favorable aux affaires pour les mini-réseaux dans les principaux pays en déficit d'accès, dans le but de rehausser à 80 sur 100² le score RISE moyen (indicateurs réglementaires pour une énergie durable) dans les 20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité
4. utiliser l'effet de levier des fonds de partenaires du développement pour mobiliser le financement par le secteur privé, en attirant près de 220 milliards de dollars d'investissements provenant de bailleurs de fonds, de gouvernements et du secteur privé entre 2019 et 2030
5. réduire le coût des mini-réseaux solaires hybrides (soutenus aussi par les quatre autres moteurs du marché) à 0,20 dollar/kWh d'ici à 2030

Le rapport reconnaît également les niveaux sans précédent d'engagement requis de la part des gouvernements, des partenaires du développement, du secteur des mini-réseaux et des régulateurs pour

atteindre ces objectifs. Il préconise la mobilisation de chacun de ces groupes de parties prenantes, ainsi que des partenariats établis depuis peu, comme l'African Mini-grid Developers Association (AMDA) et l'initiative Green

Un objectif clé est de faire baisser le coût des mini-réseaux solaires hybrides à 0,20 dollar/kWh d'ici à 2030.

Mini Grid gérée et mise en œuvre par le DfID, la Banque africaine de développement et la Banque mondiale. Les principales recommandations sont les suivantes :

- faire en sorte que les décideurs tirent parti des dernières avancées de la technologie d'analyse géospatiale en vue d'élaborer des plans d'électrification nationaux capables d'orienter les investissements vers les mini-réseaux, l'extension du réseau principal et les systèmes solaires à usage domestique, ainsi que des initiatives qui favorisent des utilisations productives de l'électricité et consolident le capital humain
- amener les partenaires de développement à travailler avec leurs homologues gouvernementaux et le secteur privé en vue de créer un environnement propice au développement de mini-réseaux au moyen d'investissements dans des portefeuilles de projets réels et d'assistance technique pour l'élaboration d'une régulation réaliste et le renforcement des institutions
- inciter les régulateurs à adopter une approche souple et évolutive vis-à-vis d'un secteur des mini-réseaux mûrissant, en offrant à chaque stade de développement des conseils clairs en matière d'entrée sur le marché, de tarifs au détail, de normes de service, de normes techniques et de l'arrivée du réseau principal
- faire en sorte que le secteur des mini-réseaux et ses associations œuvrent en vue d'accélérer l'allure du déploiement, de maintenir l'excellente qualité de la prestation de services des mini-réseaux de la troisième génération et de réduire le coût de ces systèmes en ayant recours à des innovations afin que la valeur qu'ils apportent est d'un coût abordable pour les utilisateurs finaux
- amener les sociétés nationales d'électricité à se montrer ouvertes à la possibilité de conclure des partenariats avec le secteur des mini-réseaux de la troisième génération dès lors qu'il s'agit de systèmes prêts à être intégrés au réseau principal, capables de leur fournir des programmes d'extension du réseau principal qui leur sont financièrement rentables à long terme

LE NOUVEAU PAYSAGE DE L'ACCÈS À L'ÉLECTRICITÉ

Pour beaucoup de pays, l'accès universel à l'électricité relève d'une priorité. C'est bien ce qui explique les grands progrès réalisés ces dix dernières années qui vont dans ce sens. Les gouvernements de 17 des 20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité se sont fixés des objectifs précis à atteindre pour parvenir à l'accès universel d'ici à 2030 ou s'en approcher. Entre 2000 et 2017, le nombre de personnes sans accès à l'électricité a baissé, passant de plus de 1,4 milliard de personnes à moins de 900 millions, de sorte qu'aujourd'hui plus de 89 % de la population mondiale a accès à un certain niveau de service d'électricité (Banque mondiale et autres 2019).³ L'allure de l'électrification s'est elle aussi accélérée, passant de 100 millions de personnes par an en 2000-2010 à plus de 150 millions de personnes par an en 2015-2017. Entre 2010 et 2017, 45 pays ont atteint l'accès universel à l'électrification (Banque mondiale et autres 2019). En Afrique, pour la première fois dans l'histoire, l'accès à l'électricité est plus rapide que la croissance démographique, même si ces progrès ont été très inégaux dans la région, à la fois d'un pays à l'autre et entre zones urbaines et zones rurales (Banque mondiale et autres 2019).⁴

Les pays qui adoptent une approche intégrée vis-à-vis de l'électrification, en envisageant à la fois l'extension du réseau principal, les mini-réseaux et les systèmes solaires à usage domestique, sont ceux qui réalisent les gains les plus rapides. Dans la plupart des pays ayant enregistré les gains en électrification les plus rapides entre 2010 et 2018 (Bangladesh, Cambodge, Kenya, Myanmar, Népal, Rwanda et Tanzanie), les stratégies nationales d'électrification ont su mettre à profit une combinaison d'investissements à la fois dans le réseau principal, les mini-réseaux et les systèmes solaires à usage domestique. Le Nigeria est un autre exemple récent de pays à avoir mis au point une stratégie et un plan de mise en œuvre intégrés d'électrification nationale.

Cette approche intégrée est le seul moyen de raccorder le 1,2 milliard de personnes qui restent sans accès à l'électricité d'ici à 2030. Si le rythme de l'électrification à l'échelle mondiale, les politiques en vigueur et les tendances démographiques se maintiennent, près de 570 millions de personnes obtiendront accès à l'électricité d'ici à 2030, laissant jusqu'à 650 millions de personnes sans accès à la moindre source d'électricité. On estime donc à 1,22 milliard le nombre total de personnes nécessitant l'accès à l'électricité d'ici à 2030 (Banque mondiale et autres 2019).

Parallèlement à cela, des gouvernements et des partenaires du développement sont en train de définir des montages financiers pour accompagner leur approche intégrée vis-à-vis de l'électrification. Historiquement, les efforts d'électrification universelle dans les pays à revenu élevé ont nécessité des fonds publics. Il en ira de même pour les pays qui sont aujourd'hui en déficit d'accès à l'électricité, d'autant que la plupart des personnes dépourvues d'accès ont peu de revenu disponible et vivent en milieu rural. Pour y remédier, des gouvernements et des partenaires du développement sont en train d'élaborer des montages financiers pour les trois filières d'électrification : extension du réseau principal, systèmes solaires à usage domestique et mini-réseaux. Les mesures d'aide complètes destinées aux mini-réseaux se composent de subventions (qui, de plus en plus, sont basées sur les performances), ainsi que de mécanismes de facilitation du crédit et de partage de risques, qui s'ajoutent à des crédits et des prises de participation du secteur privé. L'objectif de ces

mesures d'aide est d'accroître l'accessibilité financière des mini-réseaux d'électricité et de stimuler les investissements du secteur privé, tout en veillant à ce que les fonds publics soient déployés à bon escient et de manière efficace. Par exemple, les développeurs et les investisseurs du secteur privé privilégient de plus en plus les subventions basées sur les performances. L'analyse d'ESMAP présentée dans ce rapport montre que, si certes ces subventions peuvent réduire de près de 50 % le coût de l'électricité, elles peuvent néanmoins atténuer aussi l'effet des programmes d'utilisation productive et exercer une pression supplémentaire sur les développeurs pour qu'ils obtiennent un financement initial important.

Les mini-réseaux n'ont rien d'un phénomène nouveau : la quasi-totalité des systèmes centralisés actuels de réseau principal ont vu le jour sous forme de mini-réseaux isolés, qui se sont progressivement interconnectés. Ces premiers mini-réseaux ont été essentiels au développement et à l'industrialisation précoces de la plupart des économies modernes, dont celles du Brésil, de la Chine, du Danemark, d'Italie, des Pays-Bas, d'Espagne, de Suède, du Royaume-Uni et des États-Unis. On peut décrire ces systèmes à base de mini-réseaux mis en service à la fin du 19^e et au début du 20^e siècles comme formant la première génération de mini-réseaux. Ils furent jadis confrontés à un grand nombre des mêmes difficultés politiques, réglementaires et opérationnelles que celles auxquelles se butent aujourd'hui les mini-réseaux dans les pays en développement d'Asie et d'Afrique subsaharienne.

Pour en savoir plus sur le rôle historique des mini-réseaux dans les réseaux électriques nationaux, voir le chapitre 1 de l'ouvrage (« Why Mini Grids, and Why Now ») et « Retrospective Analysis of the Role of Isolated and Mini Grids in Power System Development » au volume 3 (études de cas par pays).

Les mini-réseaux de la deuxième génération sont largement répandus dans de nombreux pays à faible revenu aujourd'hui. Il s'agit généralement de systèmes isolés et de petite capacité, fonctionnant au diesel ou à l'hydroélectricité et construits par la communauté ou des entrepreneurs locaux pour apporter l'électricité aux ménages, habitant principalement en milieu rural et pas encore desservis par le réseau principal. Des dizaines de milliers de ces systèmes ont été construits à partir des années 1980, connaissant un véritable essor dans les années 1990 jusqu'au début des années 2000. La deuxième génération de mini-réseaux a fourni de précieux enseignements sur la conception technique, les utilisations productives, les économies d'échelle, la viabilité financière et les cadres réglementaires, qui ont été pris en compte dans la troisième génération de mini-réseaux solaires hybrides qui sont détenus et exploités par le secteur privé. La deuxième génération de mini-réseaux a également fourni des leçons sur l'importance des utilisations productives pour garantir la viabilité financière et sur la nécessité de réduire le risque d'actifs inexploitable à l'arrivée du réseau principal (pour un compte rendu détaillé de ce qui s'est passé à l'arrivée du réseau principal au Cambodge, en Indonésie et au Sri Lanka, voir Tenenbaum, Greacen et Vaghela 2018).

Une troisième génération de mini-réseaux émerge depuis quelques années. Ces mini-réseaux (surtout des hybrides solaires photovoltaïques) sont détenus et exploités par des sociétés privées qui tirent parti de technologies transformatrices et de stratégies innovantes pour construire des portefeuilles de mini-réseaux au lieu de projets isolés. Le mini-réseau type de la troisième génération est prêt à être raccordé au réseau principal, il est doté de systèmes de gestion à distance, de compteurs intelligents à paiement avant consommation et des toutes dernières technologies solaires hybrides, et il incorpore dans son modèle de fonctionnement des appareils électroménagers à haut rendement énergétique pour des utilisations productives de l'électricité. Les mini-réseaux de la troisième génération opèrent dans un environnement commercial plus favorable, bénéficiant des réductions de coûts que procurent les dernières technologies de composants des mini-réseaux et des réglementations élaborées spécifiquement pour des investissements par le secteur privé. Les développeurs de mini-réseaux de la troisième génération rejoignent des organisations sectorielles pour parler d'une seule voix et préconiser des politiques et une régulation qui favorisent les investissements par le secteur privé.

L'expérience des 50 dernières années parmi les pays en déficit d'accès à l'électricité montre qu'en général, le réseau principal n'est pas fiable. Dans toute l'Afrique subsaharienne, plus de la moitié des ménages raccordés au réseau principal disent recevoir de l'électricité moins de la moitié du temps (Blimpo et Cosgrove-Davies 2019). Dans la plupart des pays en déficit d'accès à l'électricité, le réseau principal ne fournit que de l'électricité de Niveau 3 ou de Niveau 4.⁵ Cette absence de fiabilité dans la région tient principalement aux déficiences des réseaux nationaux de transport et de distribution plutôt qu'aux systèmes de production. Étant donné la superficie de la région et une densité démographique souvent très faible, dans bien des pays la connexion des pôles économiques ruraux à des réseaux centralisés s'avère être d'un coût prohibitif en raison des distances phénoménales qui les séparent.

De surcroît, les études montrent que la plupart des sociétés publiques d'électricité en Afrique ne sont pas viables financièrement. La plupart des sociétés publiques d'électricité d'Afrique subsaharienne vendent leur électricité à perte, dans la mesure où le coût total de connecter des clients résidentiels (de l'ordre de 800 à 2 000 dollars, mais souvent nettement plus en milieu rural) est trop élevé pour la plupart des ménages (Trimble et autres 2014), et que ce coût est souvent subventionné par le gouvernement national. S'ajoute à cela le fait que le seuil de recouvrement des coûts pour les sociétés nationales d'électricité est généralement hors de prix pour les populations les plus pauvres vivant en milieu rural recule. Bien souvent, les tarifs facturés à ces segments de clients bénéficient de subventions indirectes parmi la grande clientèle des sociétés publiques d'électricité. La moyenne du tarif qui reflète entièrement les coûts pour 39 sociétés publiques d'électricité à travers l'Afrique subsaharienne est de 0,27 dollar/kWh. Pour 25 % d'entre elles, ce tarif est supérieur à 0,40 dollar/kWh, pour la moitié environ, il est compris entre 0,20 et 0,40 dollar/kWh, et pour les 25 % restants il est inférieur à 0,20 dollar/kWh. Sur les 39 sociétés publiques d'électricité, seulement deux (Seychelles et Ouganda) facturaient des tarifs leur permettant de recouvrer leurs coûts (Trimble et autres 2014, Kojima et Trimble 2016). Les mini-réseaux sont, par conséquent, souvent la solution la meilleure et la moins coûteuse pour raccorder les communautés là où le coût de l'extension du réseau principal est tout simplement trop élevé.

Depuis 20 ans, la pénétration de l'énergie solaire hors réseau (y compris les lanternes solaires, les systèmes pico-PV et les systèmes solaires à usage domestique) est en plein essor, avec plus de 100 millions de systèmes vendus rien qu'en Afrique. Cette croissance du marché est due à la hausse de la demande de la part des consommateurs de services d'électricité à domicile, ainsi qu'à l'allure soutenue des innovations survenues dans le secteur des télécommunications, qui ont favorisé l'essor du modèle PAYG pour l'accès à l'électricité. Les données de consommation importantes disponibles depuis la révolution de l'argent mobile et de PAYG ont rassuré les établissements de prêt et les investisseurs quant au risque de crédit des utilisateurs finaux, ce qui leur a permis de lever davantage de capitaux et par effet de ricochet, d'élargir leurs services. Aujourd'hui, ces systèmes solaires à usage domestique coûtent généralement entre 30 et 200 dollars en fonction de leur capacité et fournissent un service d'électricité aux Niveaux 1 et 2. Certains systèmes de plus grosse capacité à base de composants sont également utilisés (GOGLA 2019).

Les mini-réseaux partagent des caractéristiques propres aux sociétés publiques d'électricité et aux sociétés de systèmes solaires à usage domestique, ce qui pose à la fois des difficultés et des opportunités pour leur déploiement à grande échelle. Comme avec le réseau principal, les mini-réseaux ont des actifs à fonds perdus, ils sont soumis à des contrôles réglementaires et ils offrent la possibilité de fournir de l'électricité en 24/7 et de prendre en charge des charges productives. Les mini-réseaux présentent aussi des caractéristiques du secteur des systèmes solaires à usage domestique, dans la mesure où ils permettent une extension très rapide dès lors que la valeur qu'ils apportent est adaptée au marché. Les sociétés publiques d'électricité tout comme celles de systèmes solaires à usage domestique pénètrent le marché des mini-réseaux pour des raisons économiques, en employant des moyens qui correspondent aux modèles de fonctionnement qui leur sont propres : les mini-réseaux des sociétés publiques d'électricité sont exploités sous la forme de réseaux de distribution en milieu rural, tandis que les sociétés de systèmes solaires à usage

domestique assurent l'interconnexion de systèmes autonomes individuels. On peut s'attendre à ce que cette tendance entraîne une croissance modeste des déploiements de mini-réseaux, dans la mesure où pour ces secteurs, le développement des mini-réseaux se fait en marge de leurs marchés cibles actuels. Si, toutefois, profitant de leur position unique, les mini-réseaux parviennent à s'appuyer sur les forces des deux secteurs (à savoir la disponibilité d'électricité en 24/7 offerte par les sociétés publiques d'électricité, et la souplesse ainsi que le service clientèle apportés par les sociétés de systèmes solaires à usage domestique), les mini-réseaux peuvent devenir la solution pour apporter un accès financièrement abordable à un service d'électricité de haute qualité à des millions de personnes, et ce à un rythme accéléré.

L'essor des mini-réseaux ne signifie pas pour autant le repli du réseau principal. Au contraire, les mini-réseaux de la troisième génération accentuent la rentabilité économique de l'extension du réseau principal. Les mini-réseaux au diesel de la deuxième génération étaient coûteux, très peu performants, polluants et dangereux, et en plus ils n'étaient pas gérés à des fins commerciales. Pourtant, leur simple existence prouvait bien le consentement de certains clients à payer pour avoir de l'électricité et laissait entrevoir une possible hausse de la demande à l'arrivée du réseau principal. Toutefois, la plupart des clients consommaient très peu d'électricité, ce qui signifiait que le réseau principal aurait subi des pertes financières constantes une fois qu'il aurait eu atteint la zone de desserte du mini-réseau. Or justement, la donne est complètement différente avec les mini-réseaux de la troisième génération. En concevant dès le début l'interconnexion du système au réseau principal et en faisant la promotion d'utilisations de l'électricité à usage productif par des actions de sensibilisation et de formation au sein de la communauté, les mini-réseaux de la troisième génération peuvent déclencher une croissance économique précoce pour qu'il existe ainsi une charge suffisamment importante à l'arrivée du réseau principal et que les clients soient mieux à même de payer. Les nouveaux cadres réglementaires donnent aux développeurs des options viables au moment où le réseau principal est installé et la baisse du coût des composants leur permet de construire des systèmes prêts à être raccordés au réseau principal tout en maintenant les tarifs à des prix abordables.

Le soutien aux mini-réseaux de la troisième génération va donc de pair avec le renforcement du secteur des sociétés publiques. Dès lors que la stratégie nationale d'électrification prévoit une planification et une exécution rigoureuses de l'interconnexion au réseau principal des mini-réseaux de la troisième génération, il y a là matière à accroître la diversité des ressources, ainsi que la résilience et l'efficacité globales du réseau électrique. Il n'en reste pas moins qu'une telle démarche pose un défi opérationnel, qui oblige les sociétés publiques d'électricité à être en mesure d'introduire les fonctions techniques pratiques nécessaires pour soutenir la planification et l'exploitation du réseau électrique avec une multitude de mini-réseaux raccordés au réseau de distribution. Tout cela nécessite des prévisions à court et à long terme ainsi que d'autres procédures complexes. C'est donc dire que le développement de mini-réseaux, en tant que stratégie viable pour contribuer à parvenir à l'accès universel à l'électricité, doit s'accompagner d'un renforcement considérable du secteur des sociétés publiques, pour faire en sorte qu'il soit capable d'assurer l'interconnexion des mini-réseaux au réseau principal. Toutefois, beaucoup de pays en déficit d'accès à l'électricité manquent de procédures claires pour intégrer les mini-réseaux dans la planification et l'exploitation du réseau de la société publique d'électricité. Il sera donc important que les plans d'électrification nationale prévoient des hypothèses où un grand nombre, ou du moins une partie, des mini-réseaux resteront isolés du réseau principal ou ne seront raccordés qu'à d'autres mini-réseaux.

Dans le même temps, les mini-réseaux de la troisième génération remettent en question l'actuelle approche centralisée de la prestation de services d'électricité. Au cours des 10 années à venir, on s'attend à un très net recul du coût de l'électricité provenant de mini-réseaux, jusqu'à atteindre des niveaux qui la rendront compétitive avec l'électricité provenant du réseau principal dans un grand nombre de pays en déficit d'accès à l'électricité (la section suivante revient plus longuement sur ce point). De surcroît, les mini-réseaux de la troisième génération fournissent un service de meilleure qualité (en matière de fiabilité, de disponibilité

et de service à la clientèle) que celui de bon nombre de sociétés nationales d'électricité dans les pays à faible revenu. À mesure que les développeurs de mini-réseaux conforteront leur réputation dans leurs pays d'exploitation respectifs, la demande de leurs services dans les zones urbaines et péri-urbaines est susceptible d'augmenter, ce qui les incitera à viser également ces clients. Face à cela, les sociétés nationales d'électricité se verront contraintes d'évoluer et d'améliorer leur offre de services.

En vue de mettre à profit les perspectives qu'offrent les mini-réseaux de la troisième génération et de contribuer à l'accélération de leur déploiement comme stratégie pour parvenir à l'accès universel à l'électricité d'ici à 2030, ESMAP a créé la facilité GFMG. Abrisée au sein d'ESMAP, la facilité GFMG repose sur deux piliers : d'une part apporter un soutien opérationnel aux projets de la Banque mondiale qui ont une composante 'mini-réseaux', et d'autre part produire et diffuser des connaissances concrètes sur les mini-réseaux destinées à l'ensemble du secteur des mini-réseaux partout dans le monde. Le présent rapport fait partie des activités de développement des savoirs de la facilité GFMG. Celles-ci comprennent l'organisation d'événements d'apprentissage annuels qui rassemblent des centaines de parties prenantes du secteur des mini-réseaux, ainsi que la réalisation d'études de cas et la publication de rapports de recherche exploratoire. Plusieurs de ces rapports et de ces études de cas ont éclairé les chapitres du présent ouvrage, dont les six études de cas de pays, qui figurent au volume 3 de l'ouvrage (études de cas par pays).

L'ouvrage synthétisé dans le présent résumé analytique fait le point sur les connaissances que la Banque mondiale a acquises dans le cadre des étroites collaborations qu'elle entretient depuis une dizaine d'années avec des développeurs de mini-réseaux, des régulateurs de l'électricité, des investisseurs, des décideurs politiques, des ministères, des organismes d'électrification rurale, des experts et des partenaires bailleurs de fonds. Il sert de guide de référence aux décideurs politiques, à consulter lorsqu'il faut prendre des décisions importantes au sujet des mini-réseaux au niveau du projet, du portefeuille ou du programme.

Le présent résumé analytique récapitule les thèmes abordés dans l'ouvrage. Il répond aux deux questions fondamentales qui se posent aux particuliers, aux gouvernements et aux organisations lorsqu'ils prennent des décisions au sujet de stratégies, d'investissements, de politiques et de règlements en matière d'électrification :

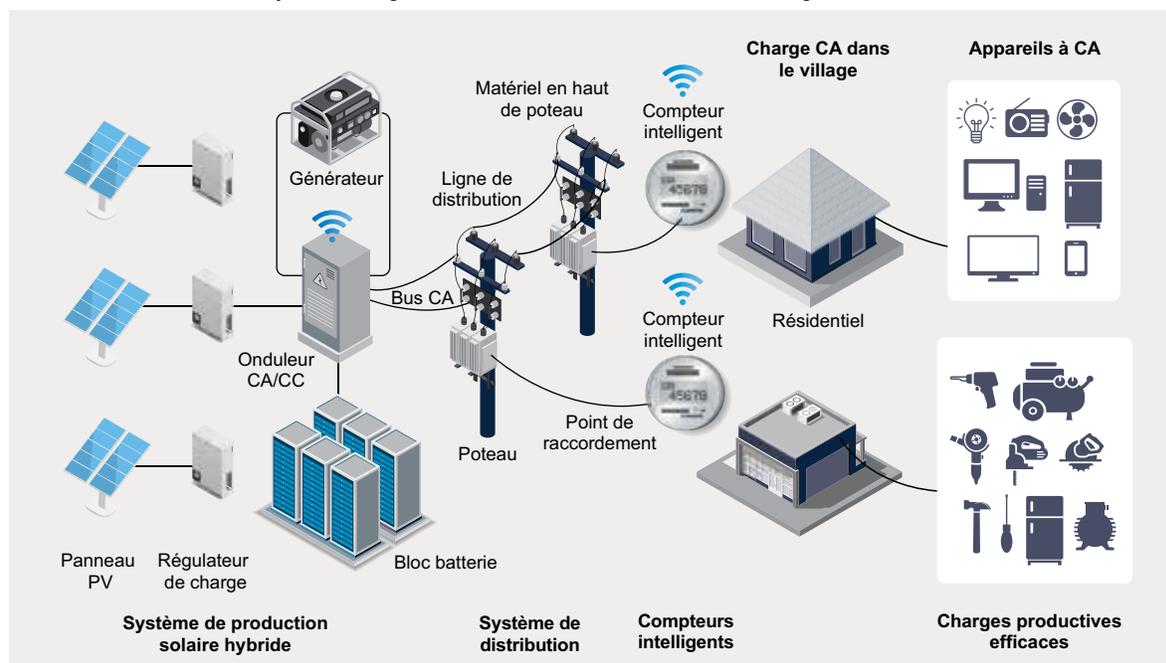
- Pourquoi des mini-réseaux, et pourquoi maintenant ?
- Comment faire pour intensifier le déploiement des mini-réseaux afin de connecter un demi-milliard de personnes d'ici à 2030 ?

LA PLACE DES MINI-RÉSEAUX DANS LE SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ

LE SYSTÈME DE MINI-RÉSEAU

Les mini-réseaux de la troisième génération sont constitués de composants spécialisés pour la production, la distribution, le comptage et la consommation d'électricité. Un mini-réseau de la troisième génération est généralement constitué d'un système de production solaire hybride comprenant des panneaux solaires, des batteries, des régulateurs de charge, des onduleurs et des générateurs au diesel de secours. Les réseaux de distribution consistent en des poteaux et des câbles basse tension ; les mini-réseaux de plus grande capacité sont parfois aussi dotés de systèmes à moyenne tension. Les mini-réseaux de la troisième génération utilisent souvent des compteurs intelligents qui fournissent à la fois des options de paiement prépayé pour les consommateurs, ainsi que des informations détaillées en temps réel sur les modèles de la consommation énergétique et les performances du système. Ils utilisent également des systèmes de contrôle à distance, qui permettent aux opérateurs de repérer des problèmes techniques avant qu'ils ne se répercutent sur les services énergétiques, et de les rectifier rapidement et à peu de frais, améliorant ainsi la qualité du service à la clientèle. De nombreux développeurs de mini-réseaux de la troisième génération encouragent et incitent les clients à utiliser des appareils économes en énergie à des fins ménagères ainsi que pour leurs activités à usage productif (Figure ES.1), et ils leur fournissent ou facilitent l'accès à des options de financement pour les aider à surmonter les éventuels obstacles posés par les coûts initiaux.

FIGURE ES.1 Caractéristiques d'un système de mini-réseau de la troisième génération



Source : Analyse d'ESMAP.

Note : CA = courant alternatif, CC = courant direct; PV = photovoltaïque.

Les systèmes de mini-réseaux de la troisième génération englobent un ensemble complet des toutes dernières technologies en matière de matériel et de logiciel. Ils tirent parti de technologies transformatrices afin de fournir de l'électricité de haute qualité à un prix abordable et une croissance spectaculaire. Ces systèmes

- emploient les toutes dernières technologies en matière de composants pour mini-réseaux, dont le coût est en constant recul
- inaugurent et encouragent l'utilisation d'appareils électroménagers écoénergétiques, ce qui peut réduire de 60 % voire plus la capacité installée requise d'un mini-réseau
- permettent des utilisations productives de l'électricité, ce qui réduit le coût unitaire du kWh, augmente la rentabilité et favorise le développement économique local
- fournissent un service de qualité de premier ordre, souvent de plus de 97 % de disponibilité, pour satisfaire la demande des clients et consolider la crédibilité du produit et du secteur
- utilisent des systèmes de gestion de l'énergie commandés à distance, des plateformes de données basées sur Internet, ainsi que des compteurs intelligents prépayés afin de réduire les coûts d'exploitation et d'augmenter le recouvrement des recettes
- utilisent des solutions novatrices, tels que des pôles d'échange vidéo, pour sensibiliser sans tarder des communautés qui sont dispersées géographiquement afin d'accélérer leur consommation d'électricité et d'obtenir leur adhésion à la stratégie de tarification de l'électricité
- observent les conceptions normalisées pour les composants et les procédés afin d'abaisser les coûts de fabrication, d'installation et d'exploitation
- sont généralement conçus pour se raccorder au réseau principal, afin d'atténuer le risque d'investissement à l'arrivée du réseau principal
- sont construits comme faisant partie du portefeuille d'un développeur, plutôt que comme projets isolés, aidés par des analyses géospatiales, afin de réaliser des économies d'échelle et d'attirer les investissements

Même si les mini-réseaux de la troisième génération ne sont pas forcément construits selon les mêmes normes que le réseau principal, les constats de ce rapport montrent qu'on s'attend à ce que la majorité des futurs mini-réseaux soient conçus pour pouvoir s'interconnecter au réseau principal, afin d'être plus étroitement en cohérence avec les priorités d'extension de la société publique d'électricité et au niveau du pays, et de s'inscrire dans le cadre d'un plan d'électrification nationale intégré.

Pour en savoir plus sur les caractéristiques des systèmes de réseaux de la troisième génération, voir le chapitre 1 de l'ouvrage (« Why Mini Grids, and Why Now? »).

COÛT D'UN SYSTÈME DE MINI-RÉSEAU

ESMAP a analysé les caractéristiques détaillées de plusieurs mini-réseaux solaires et solaires hybrides en Afrique et en Asie, afin d'étudier le coût de l'électricité provenant de mini-réseaux selon différentes hypothèses. Le coût actualisé de l'énergie (LCOE) combine le coût en capital et le coût d'exploitation d'un coût unique par unité d'énergie.⁶ Il tient compte des coûts initiaux (comme les coûts du matériel et d'installation), des coûts d'exploitation (tels que les coûts du personnel et les coûts de carburant), et du remplacement du matériel pendant toute la durée de vie du mini-réseau. Le LCOE est l'équivalent du tarif moyen minimum auquel il faut vendre l'électricité pour couvrir les coûts d'un projet. Il est généralement exprimé en monnaie par kWh. Il est important de reconnaître ici que des parties prenantes peuvent adopter différentes approches au calcul du LCOE (par exemple, dans le taux d'actualisation, le type de coûts à inclure au poste d'exploitation et entretien (O&M), et les taux d'intérêt). Quoi qu'il en soit, le LCOE fournit un précieux point de repère approprié pour évaluer le coût de l'électricité provenant de mini-réseaux.

Pour les mini-réseaux analysés, le LCOE était compris entre 0,55 et 0,85 dollar par kWh, avec un coût médian de 0,66 dollar, en utilisant un facteur de charge de 22 %. Le mini-réseau qui présente le LCOE estimé le plus faible est installé au Bangladesh ; il s'agit de l'un des plus gros de l'échantillon, tant au niveau du nombre de clients (1 099) que pour sa sortie de courant alternatif (CA) stable (294 kW_{stable}). Au cours des prochaines années, on s'attend à un formidable essor de ces types de systèmes, et de systèmes d'une capacité nettement plus importante, qui fourniront de l'électricité à de grands villages et à des villes entières.

TABLEAU ES.1 Coût de l'électricité actualisé estimé et potentiel, 2018 et 2030

Facteur de charge (en pourcentage)	Coût actualisé de l'électricité (\$/kWh)	
	2018	2030
22 %	0,55	0,33
40 %	0,42	0,22
80 %	0,35	0,23 ⁷

Source: Analyse d'ESMAP.

Note: Les chiffres LCOE se rapportent à un mini-réseau solaire hybride bien conçu de 294 kW_{stable} au Bangladesh desservant plus d'un millier de clients (plus de 5 000 personnes). Une description détaillée de l'analyse sous-jacente figure au chapitre 3 de l'ouvrage principal. kWh = kilowattheure.

L'accroissement des utilisations de l'électricité à des fins productives peut faire baisser le LCOE de 25 %, voire plus. Le facteur de charge de base pour les mini-réseaux de 22 % reflète les faibles niveaux d'utilisations de l'électricité à usage productif (tableau Es.1).ⁱⁱⁱ Les charges à usage productif (par ex. la mouture agricole) se produisent généralement pendant les heures de la journée, ce qui ajoute de la diversité aux charges résidentielles qui, elles, surviennent principale-

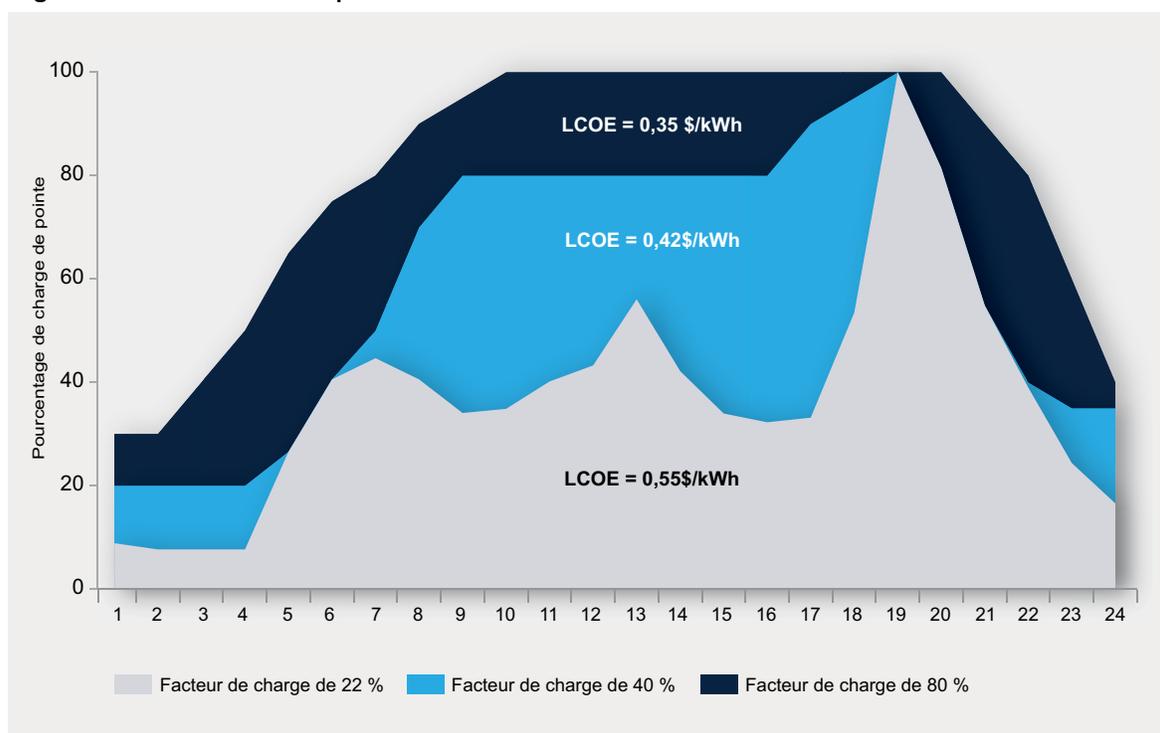
ment en soirée. Les mini-réseaux dans cette analyse ont affiché des baisses importantes du LCOE après ajout de la charge aux heures creuses, augmentant ainsi l'énergie consommée mais pas la charge de pointe. Lorsqu'un facteur de charge de 40 % a été atteint suite à une importante consommation de jour par les entreprises locales et les clients commerciaux, le LCOE a baissé de 25 % par rapport à l'hypothèse de base. Pour un facteur de charge de 80 % (obtenu après ajout d'une pompe à eau avec réservoir de stockage et une charge d'ancrage, comme une tour de télécommunications, par exemple), la réduction du LCOE a atteint 37 %.

L'analyse d'ESMAP indique que des utilisations productives accrues combinées à la baisse du coût des composants, découlant des économies d'échelle et des tendances de baisse des coûts technologiques relevées dans l'ensemble du secteur, peuvent faire baisser le LCOE des mini-réseaux à 0,22 dollar/kWh d'ici à 2030. L'augmentation du facteur de charge à elle seule signifie généralement qu'un mini-réseau hybride finit par consommer davantage de diesel. Si la conception du mini-réseau peut être optimisée pour permettre des charges plus importantes pour des utilisations productives pendant la journée et une baisse future du coût des composants, il est alors possible d'envisager d'autres réductions du LCOE. La combinaison d'une part des réductions attendues du coût des composants dues à une échelle accrue et d'autre part du facteur de charge passant de 22 % à 40 % par des charges d'utilisations productives, pourrait aboutir à une réduction des coûts allant jusqu'à 60 % par rapport aux LCOE calculés dans les hypothèses de coûts actuelles de dépenses en capitaux (CAPEX)/dépenses d'exploitation (OPEX) et les hypothèses résidentielles de charge de base. Ces changements font baisser le LCOE de 0,55 dollar/kWh à 0,22 dollar/kWh pour le même mini-réseau que celui de l'exemple du Bangladesh.

L'accroissement des utilisations productives d'électricité provenant de mini-réseaux crée un scénario quadruplement gagnant : pour les développeurs de mini-réseaux, pour les entrepreneurs ruraux, pour les communautés et, à terme, pour les sociétés nationales d'électricité. Il réduit le LCOE, ce qui a pour effet d'accroître les marges du développeur de mini-réseau et par conséquent sa viabilité financière. Les entrepreneurs et les petites entreprises bénéficient de l'abandon de générateurs au diesel coûteux en faveur d'une

iii. Le facteur de charge est défini comme étant la charge moyenne divisée par la charge de pointe sur une période donnée. Dans ce rapport, nous définissons le facteur de charge sur le cours d'une année complète (8 760 heures), à l'instar de l'approche par défaut adoptée par le logiciel HOMER Pro. En raison de l'écart aléatoire des charges quotidiennes au cours d'une année, la charge de pointe annuelle est nettement plus élevée que celle observée d'après le profil de charge quotidien moyen. Par exemple, un profil de charge quotidien moyen présentant un facteur de charge de 38 % est calculé comme ayant un facteur de charge annuel de 22 %, en supposant une variabilité de charge aléatoire d'un jour à l'autre de 10 % et une variabilité d'une heure à l'autre de 20 %.

FIGURE ES.2 Changement du profil de charge quotidien et du coût actualisé de l'électricité dû à des augmentations de l'utilisation productive de l'électricité



Source : Analyse ESMAP
 Note : kWh = kilowatt-heure

électricité produite par le mini-réseau à un prix abordable. Les communautés, quant à elles, tirent parti de la création de nouveaux emplois et de l'essor de l'activité économique. La croissance des économies rurales bénéficie également aux sociétés nationales d'électricité au moment d'envisager l'interconnexion au réseau principal, dans la mesure où les clients se trouvent mieux à même de payer des tarifs plus élevés. La figure ES.2 illustre à quoi ressemblent des utilisations productives accrues en ce qui concerne la demande d'électricité provenant de mini-réseaux.

Pour les entrepreneurs, le passage à de l'électricité provenant de mini-réseaux se justifie commercialement : les pannes d'électricité et l'absence de fiabilité de l'approvisionnement peuvent avoir des répercussions tangibles sur les revenus d'une entreprise. Une évaluation récente a révélé qu'en Afrique subsaharienne, les pannes de courant peuvent créer aux entreprises jusqu'à 31 % de manque à gagner. Dans quelques-uns des plus grands pays de la région, comme le Nigeria, le Ghana et l'Angola, plus de 25 % des entreprises affichent un manque à gagner de plus de 10 % dû à des pannes d'électricité, certaines firmes individuelles accusant jusqu'à 70 % de pertes. Les entreprises les plus en difficulté sont confrontées à plus de 200 heures de pannes d'électricité par mois, alors que même celles qui reçoivent les services d'électricité les plus fiables rendent compte malgré tout de plus de 10 heures par mois sans électricité (Ramachandran, Shah et Moss 2018).

L'utilisation de l'électricité fournie par les mini-réseaux peut être très propice à l'essor d'activités commerciales : pour plus de 30 appareils à usage productif qui sont en vente sur le marché aujourd'hui, la période de rentabilisation est inférieure à 12 mois. Dans le cadre de l'une des plus des évaluations les plus exhaustives des appareils et du matériel à usage productif à ce jour, ESMAP a relevé les coûts d'investissement initiaux, la consommation énergétique et la période de rentabilisation pour 37 machines et autres appareils à usage productif. Pour 32 d'entre eux, la période de rentabilisation était de moins de 12 mois. Le

coût d'investissement initial type variait de 500 dollars à 1 500 dollars, la moyenne se situant aux alentours de 1 200 dollars. Sur la liste des appareils fonctionnant sur courant alternatif d'un bon rendement énergétique figurent des machines pour le soudage, la mouture, le décorticage du riz, la fabrication de glace et l'incubation d'œufs, ainsi que des réfrigérateurs et des téléviseurs. Par les gains en efficacité qu'ils procurent, ces machines et appareils sont financièrement et technologiquement plus attrayants tant pour les entrepreneurs que pour les développeurs. Les progrès réalisés en matière de techniques de réfrigération, par exemple, ont réduit la consommation énergétique d'un réfrigérateur de 100 litres, pour passer d'environ 100 watts (W) il y a plusieurs années de cela à moins de 40 W aujourd'hui. En offrant ces appareils (avec éventuellement des options de financement), les développeurs de mini-réseaux peuvent fournir davantage de services à leurs clients moyennant un coût d'électricité inchangé. Dans le même temps, il est important que les développeurs évaluent et incorporent les projections pour l'utilisation prévue de ces appareils économes au moment d'évaluer la capacité adaptée du système de mini-réseau à installer, afin d'éviter de le surdimensionner et d'optimiser les économies potentielles sur les coûts d'investissement. Le Tableau ES.2 donne un aperçu d'un petit échantillon de ce type d'appareils économes en énergie destinés à des fins agricoles, de fabrication et commerciales, ainsi que leur consommation énergétique, leur coût moyen et leur période de rentabilisation moyenne. Le chapitre 5 de l'ouvrage principal comprend une version plus complète de ce tableau.

Des machines et des appareils à usage productif raccordés à des mini-réseaux contribuent aussi au développement économique local. Parmi les 37 appareils à usage productif, beaucoup requièrent plus d'une personne pour fonctionner, ce qui sous-entend des chances de création d'emplois dans les communautés locales. Des observations empiriques au Nigeria laissent apparaître que les entrepreneurs ayant acheté un appareil générateur de revenu avaient embauché un employé supplémentaire au cours de la première année après l'achat. Il y a lieu de souligner que des utilisations de l'électricité à usage productif peuvent aider les femmes, surtout, à améliorer leurs revenus et leur qualité de vie grâce à l'éclairage et à du matériel électrique pour se livrer à des activités artisanales (de céramique ou autres) (voir l'encadré ES.1).

TABLEAU ES.2 Besoins en puissance, coût et période de rentabilisation à titre indicatif de quelques appareils à usage productif⁸

Secteur	Activités / Appareils	Puissance requise (kW)	Coût auprès du fournisseur (\$)	Période de rentabilisation (mois)
Secteur primaire (agriculture, pêche)	Incubateur d'œufs	80 à 160 W	50 \$ à 100 \$	1 à 3
	Broyeur pour légumineuses et haricots	5,2 kW	1 500 \$ à 4 000 \$	6 à 12
	Pompe d'irrigation à l'eau	3,7 à 22,4 kW	200 \$ à 1 000 \$	3 à 6
	Stérilisateur (pour le traitement des produits laitiers)	3 à 6 kW	600 \$ à 2 000 \$	1 à 3
	Emballuseuse	250 W à 3 kW	500 \$ à 1 000 \$	6 à 12
Industrie légère	Machine à souder électronique	3 à 7,5 kW	200 \$ à 300 \$	6 à 12
	Scie sauteuse	400 W	100 \$	3 à 6
	Perceuse électrique	400 W	20 \$ à 50 \$	3 à 6
	Machine à popcorn	1,5 à 2,1 kW	50\$	1 à 3
Activités commerciales et de vente au détail	Ordinateur	15 à 100 W	250 \$ à 800 \$	3 à 6
	Imprimante/scanner pour la papeterie	0,5 à 2 kW	150 \$ à 250 \$	3 à 6
	Machine à coudre	200 W	30 \$ à 100 \$	3 à 6
	Télévision pour salles de cinéma locales et bars (y compris le décodeur)	50 à 200 W	100 \$ à 200 \$	1 à 3

Sources : ESMAP, Alibaba, Inensus.

Note : Le chapitre 5 du rapport principal présente le tableau complet des 37 machines et autres appareils à usage productif. kW = Kilowatts, W = watt.

ENCADRÉ ES.1

Attirer les femmes comme clientes de mini-réseaux à usage productif

Les femmes sont d'importantes clientes de mini-réseaux à usage productif en raison de leur grand esprit d'entreprise dans de nombreux pays à faible revenu. Des stratégies de mobilisation communautaire inclusive aident à repérer et à mettre en lien des entreprises appartenant à des femmes.

En Inde, par exemple, des développeurs de mini-réseaux accordent des prêts à des femmes entrepreneurs pour financer l'investissement initial dans du matériel à usage productif. Ceux-ci ont pour effet d'accroître la rigueur des processus de gouvernance et la valeur nette d'emprunt des mini-réseaux appartenant à la communauté (Katre, Tozzi, et Bhattacharyya 2019). De telles initiatives aboutissent à des mini-réseaux mieux gérés, aux facteurs de charge plus élevés et de rentabilité accrue.

Pour en savoir plus sur la manière de promouvoir des utilisations productives de l'électricité, voir le chapitre 5 de l'ouvrage (« Promoting Productive Uses of Electricity »).

La cuisson électrique est une application souvent oubliée de l'électricité provenant de mini-réseaux, qui offre également une possibilité de capter les dépenses déjà existantes des ménages. Les ménages qui adoptent la cuisson électrique alimentée à partir d'un mini-réseau économisent de l'argent par rapport aux méthodes traditionnelles : les cuisinières à induction fonctionnant sur mini-réseau coûtent entre 0,18 et 0,98 dollar par personne et par jour, ce qui en fait une option souvent moins chère que des cuisinières classiques fonctionnant au bois (qui peuvent coûter jusqu'à 0,37 dollar) et au charbon (jusqu'à 0,45 dollar) par personne et par jour (Couture et autres 2016). La cuisson électrique présente aussi aux développeurs une chance précieuse d'accroître leur facteur de charge et de stimuler leurs recettes. Si certes la charge de pointe est un enjeu majeur pour la cuisson électrique sur les mini-réseaux, tout un éventail de techniques de décalage dans le temps permet de découpler la demande d'électricité de l'approvisionnement, notamment sous la forme de stockage sur batterie domestique. ESMAP collabore avec l'université de Loughborough et ses partenaires à un nouveau programme de services de cuisson à base d'énergies modernes financé par le Département britannique pour le développement international (le DFID) qui vise à tirer parti des possibilités offertes par la cuisson électrique fonctionnant sur mini-réseau et à remédier à ses problèmes.

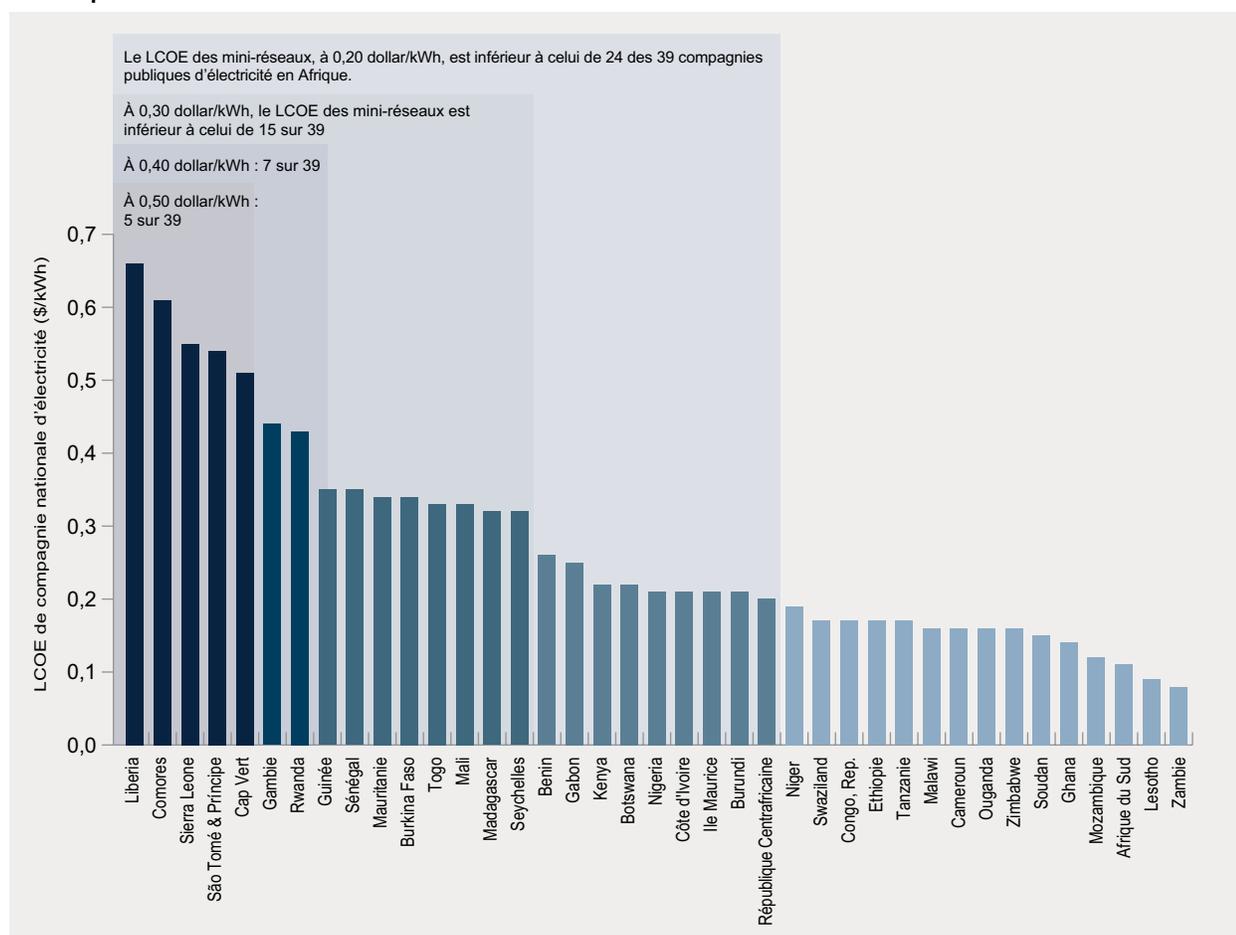
L'accroissement des utilisations productives de l'électricité peut doubler ou tripler la demande d'un service de mini-réseau. La société Infrastructure Development Company Limited (IDCOL) au Bangladesh a lancé une initiative intégrée visant 26 mini-réseaux solaires dans des régions isolées du pays. Cette initiative comprend des activités destinées à accroître les utilisations productives de l'électricité (des appareils et machines à usage productif), au moyen de mesures telles que la formation à l'utilisation des appareils, le perfectionnement des compétences en gestion, la stimulation de la charge de jour et la promotion de modalités de prêts plus souples. Jusqu'à présent, cette approche a aidé quelques-uns de ces mini-réseaux à atteindre leur taux d'utilisation cible plus tôt que prévu. Le mini-réseau Suro Bangla sur l'île de Paratoli en est un parfait exemple : il est parvenu à atteindre sa pleine adoption projetée de plus de 17 000 kWh en l'espace de 18 mois au lieu des deux ans prévus à l'origine. Dès lors que ces mini-réseaux fonctionnent à pleine capacité ou presque, ils produisent un rendement des capitaux investis plus élevé pour les développeurs.

Pour assurer l'adoption accrue de matériel à usage productif, il faudra avoir accès à plus d'1 milliard de dollars de crédits à la consommation à des prix abordables. En supposant un coût initial moyen de 1 200 dollars et de cinq appareils par mini-réseau, près d'1,3 milliard de dollars de microcrédits seront néces-

saires pour l'achat d'1,1 million d'appareils à usage productif d'ici à 2030. En dépit de leur coût initial relativement élevé, la plupart des appareils et matériel à usage productif présentent des possibilités de générer ou d'augmenter des revenus. Un bon moyen d'accroître les utilisations productives de l'électricité provenant de mini-réseaux consiste à assurer le financement du coût d'achat initial des appareils, que celui-ci soit offert par l'opérateur du mini-réseau, avec paiement du prêt à la facture, ou par un tiers, comme une institution de micro-finance. Ces deux voies de financement ont des avantages et des inconvénients pour l'opérateur de mini-réseau et l'une comme l'autre l'obligent à développer de nouvelles capacités de modèle de fonctionnement.

En conséquence de la baisse du LCOE et de l'augmentation des utilisations de l'électricité à usage productif, les mini-réseaux de la troisième génération peuvent avoir des effets transformationnels sur les secteurs de l'énergie. Ils sont sur la bonne voie pour fournir de l'électricité à des coûts inférieurs à ceux de nombreuses sociétés publiques d'électricité d'ici à 2030 (figure ES.3). Les mini-réseaux deviendront la solution au moindre coût pour fournir de l'électricité de la même qualité que celle du réseau principal à plus de 60 % de la population en Afrique, en supposant que les sociétés nationales d'électricité ne modifieront pas radicalement leurs opérations, ce qui s'accompagnera d'importantes implications pour l'attribution des fonds d'investissement tant publics que privés.

FIGURE ES.3 Comparaison du coût actualisé de l'énergie des mini-réseaux et des sociétés publiques d'électricité en Afrique



Source : D'après Kojima & Trimble 2016.

Note : kWh = kilowatt-heure, LCOE = Coût actualisé de l'énergie.

Les mini-réseaux fournissent aussi un service dont le niveau de qualité est systématiquement supérieur à celui du réseau principal. Les développeurs sont en train de créer des systèmes capables de fournir l'électricité en 24/7. Les technologies de surveillance à distance et les compteurs intelligents améliorent la qualité du service à la clientèle, de même que la fiabilité des mini-réseaux. Le temps pour un niveau d'accès moyen des mini-réseaux détenus et exploités par des membres d'AMDA dépasse les 97 %, soit moins de deux semaines de coupure de courant prévues sur l'ensemble de l'année. Partout en Afrique subsaharienne, le réseau principal est nettement moins fiable : il est fréquent que les ménages et les petites entreprises subissent plusieurs heures de coupures de courant par jour. Dans certains pays (dont le Burundi, le Ghana, la Guinée, le Liberia, le Nigeria et le Zimbabwe), plus de la moitié des ménages raccordés au réseau principal disent recevoir de l'électricité moins de la moitié du temps (Blimpo et Cosgrove-Davies 2019). Par ailleurs, les données désagrégées provenant des rapports d'enquête diagnostique réalisés par ESMAP dans un éventail de pays s'appuyant sur le cadre multi-niveaux apportent une preuve supplémentaire du manque de fiabilité, tant dans la région subsaharienne qu'au-delà. Le rapport sur le Rwanda indique que 97 % des ménages raccordés au réseau principal subissent plus de quatre coupures de courant par semaine (ESMAP 2018c). Le rapport sur l'Éthiopie montre que 57,6 % des ménages raccordés au réseau principal doivent s'attendre à entre 4 et 14 coupures de courant par semaine, et 2,8 % d'entre eux à plus de 14 coupures par semaine (ESMAP 2018b). Le rapport sur le Cambodge révèle que 69,3 % des ménages raccordés au réseau principal subissent fréquemment des coupures de courant imprévisibles, et 9,9 % de l'ensemble des clients connectés au réseau reçoivent moins de 4 heures de service par jour (ESMAP 2018a).

SITUATION ET PERSPECTIVES DES DÉPENSES EN CAPITAL ET DES DÉPENSES D'EXPLOITATION

COÛTS EN CAPITAL

Les mini-réseaux solaires hybrides coûtent environ 3 900 \$/kW_{stable}. Dans l'enquête ESMAP sur 53 mini-réseaux, le coût par unité de sortie de puissance stable (kW_{stable}) est compris entre 1 420 dollars et 22 689 dollars/kW_{stable}. Le coût moyen du kW_{stable} était de 6 193 dollars et le coût médian de 4 849 dollars. Quand on élimine les projets dont les valeurs aberrantes dépassent les 8 000 dollars/kW_{stable}, le coût moyen par kW_{stable} tombe à 4 298 dollars, le coût médian s'élevant à 3 908 dollars. Les composants utilisés pour la production d'électricité représentaient 54 % du total des coûts en capital. Les composants présentant la plus grande part des dépenses d'investissement globales étaient les batteries (15 %), les réseaux de distribution (14 %), les modules photovoltaïques (11 %), les onduleurs (5 % à 9 %), les centrales (7 %), et les compteurs (4 %).

Les coûts des composants varient considérablement entre les pays et les régions. Le Tableau ES.3 met en lumière certains exemples de la variation du coût moyen des composants clés en Afrique et en Asie. Les bâtis photovoltaïques, par exemple, coûtent à peu près quatre fois plus au Myanmar qu'au Bangladesh ; les onduleurs de batterie coûtent plus de deux fois plus chers au Ghana qu'au Kenya ; et les générateurs au Ghana sont près de quatre fois plus chers qu'au Bangladesh. L'analyse d'ESMAP suggère que l'écart entre les coûts des composants de mini-réseaux s'explique en grande partie par une combinaison de taxes et de droits, de différences de marges facturées par les grossistes et les distributeurs, et des autres frais engagés pour faire des affaires qui varient d'un pays à l'autre. Si c'est le cas, il y a peut-être lieu d'être optimiste que les coûts pour les pays aux valeurs aberrantes baisseront à mesure que les marchés s'élargiront.

Les coûts en capital des mini-réseaux solaires baissent. Les coûts des principaux composants des mini-réseaux ont accusé une baisse comprise entre 62 % et 85 % entre 2010 et 2018 (tableau ES.4), en partie du fait des économies d'échelle réalisées en dehors du secteur des mini-réseaux. Pour les systèmes solaires photovoltaïques, l'installation de parcs solaires photovoltaïques à l'échelle de la société publique d'électricité

TABLEAU ES.3 Coûts moyens de composants clés de mini-réseaux dans quelques pays

Composant	Unité	Bangladesh	Myanmar	Ghana	Kenya	Delta
Module PV	\$/kWp	683	664	915	994	50%
Bâti PV	\$/kWp	254	927	484	283	265%
Régulateur PV/Onduleur PV	\$/kWp	784	279	—	265	195%
Batterie acide-plomb	\$/kWh	218	282	237	167	69%
Onduleur de batterie	\$/kVA	720	506	1 121	503	123%
Générateur	\$/kVA	219	378	897	773	310%
Réseau de distribution	\$/client	277	259	164	160	73%

Source : Analyse d'ESMAP.

Note : Delta est la différence en pourcentage entre le coût le plus bas et le coût le plus élevé ; — = non disponible, kVA = Kilovolt-ampère, kWp = kilowatts crête, PV = photovoltaïque

et le déploiement de systèmes solaires domestiques sur les toits ont fait baisser les coûts de 85 %. Le coût des batteries lithium-ion a lui aussi diminué de 85 %, grâce à l'utilisation accrue de batteries dans les véhicules électriques et à des projets de stockage à l'échelle d'une société publique d'électricité. La réduction du coût des systèmes de gestion de l'énergie capables de contrôler à distance des systèmes hybrides complexes dotés de systèmes d'énergie solaire variable découle de l'utilisation de ce type de systèmes dans des projets à l'échelle d'une société publique d'électricité, de l'augmentation constante de la puissance de calcul de l'électronique de puissance et des puces, et de la diminution de leur coût. La baisse du coût des compteurs à prépaiement contrôlés à distance s'explique par leur utilisation à l'échelle d'une société publique d'électricité et par la diminution du coût des composants électroniques. Le dernier facteur à faire baisser les coûts d'un système de mini-réseau solaire est l'introduction d'appareils électroménagers économes en énergie. En introduisant dès le premier jour des appareils électroménagers à faible consommation énergétique, le système de mini-réseau peut être conçu en étant nettement plus petit, ce qui se traduit par une réduction de plus de 50 % des dépenses d'investissement par rapport à il y a seulement trois ans de cela. Les tendances à la baisse des coûts des composants ont fait reculer le coût de l'investissement initial de mini-réseaux solaires et solaires hybrides, passant d'environ 8 000 à 10 000 dollars/kW_{stable} en 2010 à 3 900 dollars/kW_{stable} en 2018.

COÛTS D'EXPLOITATION, DE REMPLACEMENT ET DE DÉVELOPPEMENT DE PROJET

Les dépenses d'exploitation des mini-réseaux qu'ESMAP a étudiées variaient sensiblement, passant de 8 dollars à 263 dollars par client par année, la moyenne se situant aux alentours de 80 dollars par client et par an. Les dépenses d'exploitation comprennent tous les coûts associés à l'exploitation et à la maintenance du matériel du mini-réseau, y compris le carburant, l'entretien, les réparations, le recouvrement des paiements et la sécurité. Le montant des dépenses d'exploitation a été obtenu pour 18 systèmes (7 en Asie et 11 en Afrique). Parmi les 18 mini-réseaux ayant fait état de leurs coûts d'exploitation, les frais de personnel représentent en moyenne 76 % des coûts d'exploitation. Les frais de personnel comprennent les salaires et les dépenses connexes pour les opérateurs locaux qui d'opérations au quotidien et accomplissent des tâches d'entretien de base, dans le cadre d'un emploi soit à temps plein, soit à temps partiel. Les tâches de dépannage et les réparations plus complexes sont généralement effectuées par des techniciens qui se chargent du contrôle et de l'entretien de plusieurs mini-réseaux à la fois. Les compteurs intelligents et d'autres appareils de comptage qui envoient sur Internet des données en temps réel peuvent aider les techniciens à distance à travailler avec le personnel local par téléphone pour résoudre un grand nombre de problèmes sans engager les frais de détacher le technicien sur place.

Les coûts du carburant ne représentaient que 4,3 % des coûts d'exploitation en moyenne. Les opérateurs qui ont rendu compte de leurs coûts de carburant font part d'une moyenne de seulement 8,30 dollars par client et par an, ce qui suggère qu'à ce stade précoce, les mini-réseaux s'en remettent très peu aux généra-

TABLEAU ES.4 Coûts repères et prévisions de prix pour les composants de mini-réseau⁹

Composant	Unité	Pourcentage du total du coût en capital	Coût médian dans l'enquête d'ESMAP	Coût minimum dans l'enquête d'ESMAP	Coût repère du secteur global en 2010	Coût repère du secteur global en 2018 (variation en pourcentage depuis 2010)	Coûts estimatifs d'ici à 2020	Coûts estimatifs d'ici à 2030 (Variation en pourcentage depuis 2018)
Module PV	\$/kWp	11 %	690	497	1 589	230 (-85 %)	220	140 (-39 %)
Onduleur photo-voltaïque	\$/kWp	5 %	264	176	320	115 (-64 %)	80	58 (-50 %)
Batterie	\$/kWh	15%	214	126	—	147 (s.o.)	127	118 (-20 %)
Batterie (Li-ion)	\$/kWh	15 %	598	461	1 160	176 (-85 %)	139	62 (-64 %)
Onduleur de batterie	\$/kVA	9 %	649	311	565	203 (-64 %)	142	102 (-50 %)
Compteurs intelligents	\$/client	4%	83	50	106	40 (-62 %)	35	30 (-25 %)

Sources : Analyse d'ESMAP ; Bases de données Bloomberg New Energy Finance ; Fu et autres 2017. Les références complètes sont indiquées au chapitre 3 de l'ouvrage.

Note : Les données médianes, minimum et repères pour 2010 sont libellées exprimés en dollars indexés. Les prix futurs sont indiqués en fonction de la source. — = non disponible, kVA = Kilovolt-ampère, kWh = kilowattheure, kWp = kilowatts crête, PV = photovoltaïque.

teurs diesel et sont capables de répondre à la demande des clients en grande partie par la production d'énergie solaire. Ceci dit, les mini-réseaux de cet ensemble de données sont tous récents et généralement, les générateurs diesel ont tendance à être plus sollicités pour produire de l'électricité, à mesure que les ménages achètent plus de lampes et d'appareils et que davantage de petits commerces se raccordent au mini-réseau. Alors que les charges augmenteront, un moyen de réduire les frais de fonctionnement de générateurs diesel consistera à appliquer des tarifs en fonction de l'heure de la consommation ou des charges « dispatchables » qui encouragent la consommation à des heures où le mini-réseau est susceptible de recevoir un surplus d'électricité à partir de panneaux solaires.

Les coûts « Autres O&M » représentaient près de 20 % des coûts d'exploitation. Il est nécessaire d'approfondir les recherches pour comprendre ce que les participants à l'enquête ont classé sous cette catégorie. Quoi qu'il en soit, ces coûts comprennent généralement les réparations et l'entretien, tels que le remplacement de l'huile moteur, ou les coûts de transport et des réunions communautaires associées à la participation de la communauté, catégorie qui, pour certains développeurs, s'avère être plus importante et plus coûteuse que ce qu'ils avaient prévu.

L'introduction de compteurs intelligents à prépaiement contrôlés à distance réduit très sensiblement le coût de main-d'œuvre. Le suivi des clients en retard ou en défaut de paiement peut désormais se faire à distance. Les modèles de consommation peuvent eux aussi être suivis et analysés à distance. Les compteurs intelligents et la collecte de données en temps réel auprès des opérateurs de téléphonie mobile permettent d'assurer le suivi détaillé des paramètres du système. Lorsque ceux-ci dépassent des seuils programmables, des alarmes avertissent les techniciens de problèmes qu'il est bien plus facile de régler avant qu'ils ne prennent de l'ampleur et n'entraînent par ricochet des pannes de matériel coûteuses et des interruptions prolongées. Qui plus est, grâce aux compteurs intelligents, les développeurs peuvent facilement collecter et analyser leurs données de performance, qu'ils peuvent agréger et anonymiser afin de les communiquer à des partenaires de développement, des associations sectorielles, des investisseurs et d'autres parties prenantes.

Les coûts de remplacement ont baissé. Les bancs de batteries utilisés par la plupart des systèmes doivent être remplacés au bout de 3 à 10 ans, selon le type de batterie. L'utilisation croissante de batteries lithium-ion (grâce à leur rapide adoption dans les véhicules électriques) permettra de faire reculer encore plus les coûts de remplacement : en effet, les batteries lithium-ion sont capables de près du double du nombre de cycles de charge avant de tomber en panne par rapport aux batteries classiques acide-plomb et elles présentent des coûts par cycle qui sont compétitifs. Il serait judicieux que les développeurs qui construisent actuellement des mini-réseaux dotés de batteries acide-plomb choisissent des onduleurs à batterie (et des chargeurs de batterie s'ils prévoient de les raccorder à des systèmes en courant continu (CC)) qui sont compatibles avec des batteries lithium-ion, pour pouvoir les remplacer par celles-ci à l'avenir si les coûts sont intéressants. Les coûts de remplacement des composants électroniques, tels que les onduleurs photovoltaïques et les onduleurs à batterie, baissent eux aussi à mesure qu'ils sont fabriqués à des échelles de plus en plus grandes.

Les coûts de planification et de préparation ont diminué. Par le passé, des équipes multidisciplinaires se chargeaient d'établir les plans d'électrification, de repérer les sites et de réaliser des études de préfaisabilité, le tout à un coût considérable. Dorénavant, la plupart de ce travail, jusqu'à l'analyse de faisabilité (y compris la compilation de devis quantitatifs, de soumissions ou de commandes d'achat) peut se faire depuis un bureau, grâce aux facteurs suivants :

- la disponibilité du big data qui fournit des points d'intérêt géolocalisés pouvant servir à établir une évaluation détaillée de la demande d'éventuels centres de charge
- le coût abordable d'images satellites de haute résolution
- des logiciels très puissants mais faciles d'utilisation, capables de concevoir des systèmes de production hybride ainsi que le réseau de distribution
- des plateformes axées sur les données basées sur Internet, qui compilent d'importants volumes de renseignements sur le marché géolocalisés et configurables de différentes façons pour être utiles à des développeurs de mini-réseaux, des établissements financiers et des organismes publics.

Il reste alors à faire des visites sur le terrain à l'étape de la préparation pour solliciter la participation des communautés lors des discussions sur les accords (des conditions d'achat ou de prise à bail de terrains, par exemple, et pour vérifier les données de l'analyse géospatiale), qui peuvent être réalisées par une équipe nettement réduite.

L'introduction des données géospatiales et d'autres technologies numériques a fait considérablement chuter les coûts de préparation et de planification. Par le passé, le coût unitaire de chaque site était plus ou moins le même, quel que soit le nombre de sites (environ 30 000 dollars par site), chacun nécessitant un grand nombre d'analyses sur place. Aujourd'hui, d'après l'expérience récente de la Banque mondiale au Nigeria, des portefeuilles de mini-réseaux peuvent être préparés jusqu'au stade où ils sont prêts à faire l'objet d'une pleine évaluation de faisabilité et de solliciter la participation communautaire à un coût d'environ 2 300 dollars par site. Les plus grosses composantes de ce coût par site sont les enquêtes socio-économiques et les audits énergétiques pour estimer la demande d'électricité, ainsi que la volonté et la capacité de payer. Ces composantes représentent 58 % du coût total par site et leurs coûts sont principalement linéaires dans la mesure où ils se composent principalement des coûts de main-d'œuvre. Il ne faut pas s'attendre à ce que le temps requis pour effectuer une enquête auprès d'un ménage change beaucoup à mesure que l'exercice prendra de l'ampleur, même si l'on peut envisager d'éventuelles économies dans les frais de déplacement. En revanche, les technologies peuvent être utiles pour accélérer la réalisation de toutes ces tâches exigeantes en main-d'œuvre : citons ainsi le recours à des drones pour cartographier un village et programmer efficacement le déroulement de visites chez les ménages par des agents recenseurs, ou encore l'utilisation de logiciels basés sur tablettes pour saisir rapidement et avec plus de précision les données de l'enquête.

D'autres coûts sont engagés pour obtenir licences, homologations et permis. Ces coûts dépendent de l'environnement favorable ou non qui existe dans le pays. Plusieurs gouvernements ont incorporé les mini-réseaux dans le cadre de leur politique énergétique, donnant ainsi une place aux systèmes et à cette filière au sein du secteur de l'énergie. Certains pays ont adopté une régulation des mini-réseaux qui prévoit une approche « légère ». Dans quelques-uns, les services d'administration en ligne ont rationalisé le processus d'obtention de permis d'implantation et de permis de construire. Même si ces coûts sont importants, il ne faut pas s'attendre à ce qu'ils changent considérablement dans les pays en fort déficit énergétique d'ici les 10 années à venir, à moins d'y entreprendre de vrais efforts pour faciliter les échanges commerciaux.

Pour en savoir plus sur les caractéristiques des systèmes de réseaux de la troisième génération, voir le chapitre 3 de l'ouvrage (« Mini Grid Costs and Technology Innovations »).

RÉDUCTIONS POTENTIELLES DE COÛTS

D'autres réductions de coûts sont à prévoir dès lors que le développement des systèmes de mini-réseaux se fera en adoptant une approche de portefeuille par opposition à des projets isolés, pour induire ainsi un effet de normalisation et d'économies d'échelle. Ces économies d'échelle auront aussi de fortes retombées sur les coûts de planification et de préparation.

Plusieurs facteurs entraîneront d'importantes réductions des coûts :

- 1. Les diminutions prévues du coût des composants par l'adoption des bonnes pratiques actuelles peuvent faire tomber les coûts d'investissement initial à moins de 3 000 dollars/kW_{stable}.** Les travaux de recherche d'ESMAP, corroborés par l'analyse de Bloomberg New Energy Finance (BNEF), suggèrent que le cours au comptant mondial des modules photovoltaïques solaires passera de 230 dollars/kW en 2018 à 140 dollars/kW en 2030 (BNEF 2018). Alors que les véhicules électriques se généraliseront, le cours au comptant des packs batteries lithium-ion reculera, passant de 176 dollars/kWh à 62 dollars/kWh. Il est bien possible que les prix d'usine pour les onduleurs photovoltaïques chutent à moins de 58 dollars/kW en 2030, par rapport à 115 dollars/kW en 2018. Si les prix que paient les développeurs de mini-réseaux rien que pour ces composants baissent dans les mêmes proportions d'ici à 2030, le coût en capital initial d'un mini-réseau solaire hybride devrait diminuer de près de 22 %. Si les développeurs de mini-réseaux sont en mesure d'acheter ces trois composants aux cours au comptant mondiaux en 2030, le coût en capital initial d'un mini-réseau solaire hybride baisserait de plus de 26 %. Par exemple, le solaire photovoltaïque représente généralement environ 11 % du total des dépenses en capital pour les mini-réseaux, de sorte qu'une réduction de 39 % de ses coûts d'ici à 2030 (ce qui correspond à la baisse attendue des cours au comptant mondiaux) entraînerait une baisse de 4,3 % du total des coûts d'investissement initiaux. Dans le même temps, si les développeurs sont en mesure d'acheter du photovoltaïque solaire aux cours au comptant mondiaux en 2030 (140 dollars/kW), cela correspond à une baisse de 80 % par rapport à leurs coûts de 2018, si bien que le coût d'investissement total diminuerait de 8,8 %. Il est important de noter qu'il s'agit là d'une estimation prudente, dans la mesure où elle ne tient compte que de la baisse de coût des trois principaux composants des mini-réseaux solaires hybrides. Les autres estimations pour les coûts en capital pour le même type de mini-réseaux sont nettement plus basses.
- 2. Les économies d'échelle et les baisses de coûts généralisées des composants de mini-réseaux feront baisser encore plus le LCOE des mini-réseaux.** À mesure que les développeurs construiront des portefeuilles de mini-réseaux au lieu de projets isolés, ils bénéficieront de plus grandes économies d'échelle, principalement attribuables à des achats en gros des composants et à des gains d'efficacité par l'adoption de processus normalisés et un plus grand savoir-faire. L'analyse des données recueillies dans l'enquête d'ESMAP sur les mini-réseaux en Afrique et en Asie indique que les économies d'échelle réduisent considérablement les coûts en capital. En moyenne, pour chaque centaine de clients supplémen-

taires desservis par un mini-réseau, le coût par client baisse d'environ 68 dollars ; pour chaque mini-réseau de plus dans le portefeuille d'un développeur, les coûts en capital baissent d'environ 100 dollars/kW. Les baisses de coûts issues d'économies d'échelle accompagnent le recul des coûts induit par l'accroissement des utilisations productives de l'électricité.

3. Le recours aux données géospatiales et à d'autres outils numériques pour développer des portefeuilles de mini-réseaux est un moyen supplémentaire de réduire les coûts. Les analyses géospatiales permettent aux développeurs d'évaluer des sites de mini-réseaux moyennant une fraction du coût des activités traditionnelles de ce type. Plusieurs développeurs de mini-réseaux bien implantés en Afrique subsaharienne utilisent des logiciels d'analyse géospatiale et d'autres logiciels analytiques pour planifier leurs portefeuilles à distance. Ils recensent les sites pour le développement de mini-réseaux et se servent de procédés rendus possibles par les technologies pour en estimer la demande et leur permettre ainsi d'optimiser la conception du système dans l'ensemble de leur portefeuille de mini-réseaux. Lorsque des organismes publics ou des bailleurs de fonds procèdent à une analyse au niveau des portefeuilles, ils peuvent ainsi en analyser les données et les diffuser aux développeurs sur une plate-forme web comme Odyssey Energy Solutions.

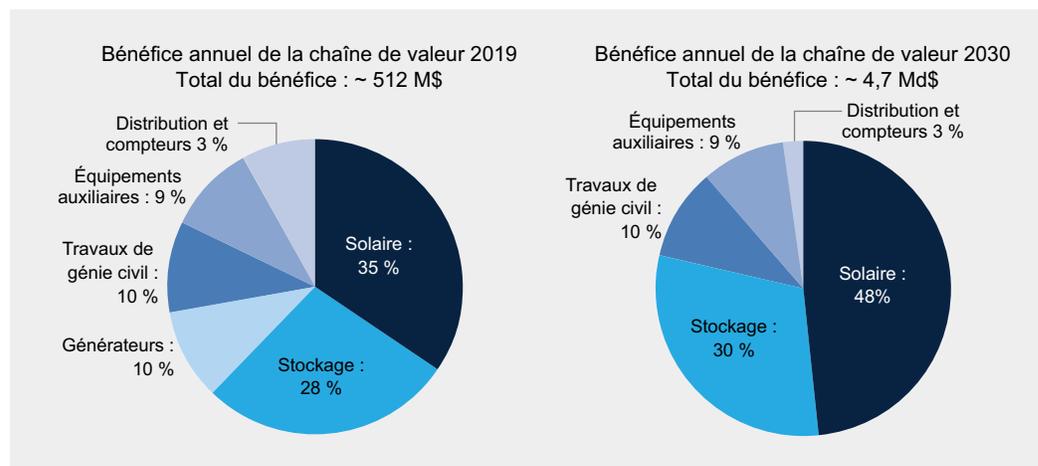
Pour en savoir plus sur l'utilisation d'analyses de données géospatiales dans la planification de portefeuilles de mini-réseaux au niveau national et au niveau de projets, voir le chapitre 4 de l'ouvrage (« Outils géospatiaux et numériques pour la planification de l'électrification et des portefeuilles »).

INTENSIFICATION DE LA PRESTATION DE SERVICES D'ÉLECTRICITÉ PAR LE SECTEUR PRIVÉ ET LES SOCIÉTÉS PUBLIQUES D'ÉLECTRICITÉ

Même si aujourd'hui, quelques-uns des plus grands développeurs de mini-réseaux sont des sociétés nationales d'électricité, c'est bien le secteur privé qui sera le moteur du formidable essor de ce secteur, d'autant que beaucoup de sociétés publiques dans les pays en déficit d'accès à l'électricité connaissent des difficultés financières.^{iv}

Le secteur des mini-réseaux offre de belles perspectives de bénéfices aux fournisseurs de matériel et de services du secteur privé, surtout dans les domaines du photovoltaïque solaire, des batteries et de l'électronique de puissance. D'après les prévisions de l'analyse d'ESMAP, le potentiel de bénéfice annuel¹⁰ dans l'ensemble de la chaîne de valeur des mini-réseaux frôlera les 4,7 milliards de dollars d'ici à 2030 (figure ES.4). Pour en arriver à ce chiffre, ESMAP a utilisé les prévisions des coûts des composants provenant de nombreuses sources, y compris BNEF et des données réelles de soumissions pour des projets. Ces coûts ont ensuite été soumis à une analyse HOMER afin de déterminer la configuration du système pour un village

FIGURE ES.4. Potentiel de profit dans l'ensemble de la chaîne de valeur des mini-réseaux, 2019 et 2030



Source: Analyse d'ESMAP

Note: Les chiffres supposent 19 163 mini-réseaux en 2018 et 213 000 en 2030. Ces chiffres ne comprennent pas le transport, les taxes et le financement. Les équipements auxiliaires comprennent des composants tels que des onduleurs et des disjoncteurs ainsi que l'intégration du système. Les estimations du coût du service découlent d'une analyse HOMER d'un mini-réseau qui dessert 150 clients résidentiels et 30 clients commerciaux. Le niveau de crête d'un ménage est supposé être de 200 watt-crête (Wp) en 2018 et de 300 Wp en 2030 ; pour les clients commerciaux, elle s'élève à 300 Wp en 2018 et à 400 Wp en 2030.

iv. RAO Energy en Russie, TANESCO en Tanzanie, JIRAMA à Madagascar et KPLC au Kenya sont des sociétés publiques d'électricité qui exploitent des douzaines de mini-réseaux sur l'ensemble du territoire national. Ces mini-réseaux sont généralement alimentés au diesel (ou, dans le cas de JIRAMA, à l'hydroélectricité). Ils ont tendance à être de grosse capacité, généralement de l'ordre de plusieurs centaines de kilowatts jusqu'à quelques mégawatts. Certaines sociétés publiques d'électricité (au Niger, par exemple) ont commencé à hybrider leurs systèmes diesel avec des panneaux photovoltaïques solaires.

type. Une fois combinées aux prévisions de déploiements de mini-réseaux, on a estimé le chiffre d'affaires total attendu pour les différents fournisseurs de composants. Pour déterminer la marge bénéficiaire attendue de chaque fournisseur de composants, ESMAP a analysé les récents états financiers vérifiés ; cette marge a ensuite été appliquée au chiffre d'affaires total calculé plus tôt. Les plus gros centres de profit seront le photovoltaïque solaire, le stockage sur batterie et l'électronique de puissance. À mesure que les coûts du photovoltaïque solaire et du stockage sur batterie continueront de tomber, on s'attend à ce que le potentiel de bénéfice pour les générateurs au diesel chute à zéro au cours des 10 années à venir.

Le potentiel de bénéfice pour les opérateurs de mini-réseaux devrait augmenter de manière spectaculaire au cours des 10 prochaines années, même avec la baisse des tarifs. Le tableau ES.5 souligne le potentiel de bénéfice des opérateurs de mini-réseaux de la troisième génération, étant donné les tarifs et les coûts supposés du service. Cette analyse indique un potentiel de bénéfice qui pourrait dépasser les 3,3 milliards de dollars par an pour tous les mini-réseaux de la troisième génération déployés entre aujourd'hui et 2030. Ces tarifs reflètent le bas de la fourchette des tarifs actuels des mini-réseaux, d'où la prudence de cette estimation de bénéfices. Il y a lieu de noter que des mesures d'aide financière, y compris des subventions de la part de gouvernements et de partenaires de développement, seront nécessaires pour débloquer ce bénéfice potentiel, surtout dans les années qui viennent, afin de mettre le marché sur la voie d'une expansion rapide. Ce sont des fonds publics qui ont permis aux pays à revenu élevé de parvenir à l'accès universel à l'électricité ; il en ira de même pour les pays qui aujourd'hui sont en déficit d'accès à l'électricité.

La participation du secteur privé dans les mini-réseaux s'intensifie à mesure que les perspectives de rentabilité des mini-réseaux s'embellissent. De plus en plus d'entreprises privées se taillent une place à tous les stades de la chaîne de valeur des mini-réseaux (tableau ES.6). Les fabricants de technologies d'énergie renouvelable (en particulier dans les domaines du solaire et des batteries) voient dans le marché des mini-réseaux un créneau rentable. De grandes sociétés d'énergie, comme Engie, investissent directement dans les mini-réseaux. D'autres gros fournisseurs, comme SMA, concluent des accords avec des développeurs de mini-réseaux. Pour autant, le climat commercial n'attire toujours pas suffisamment de financement adéquat de façon généralisée : seule une poignée de grandes sociétés opèrent sur le marché et, selon BNEF, 259 millions de dollars ont été investis dans les développeurs du secteur privé depuis 2013, bien loin des milliards de dollars d'investissement dont le secteur privé aura besoin d'ici à 2030 (BNEF 2019).

Par chaîne de valeur des mini-réseaux, on fait référence aux différentes étapes nécessaires pour mener à bien un projet de mini-réseau. Elle englobe la fabrication des composants, l'évaluation des sites, la passation de marchés, l'installation, l'exploitation et la maintenance, ainsi que les services après-vente. Le secteur privé peut être classé en deux grandes catégories : les opérateurs et les facilitateurs. Ce sont les opérateurs qui assument la responsabilité principale du cycle de vie du mini-réseau, qui échangent avec la communauté qu'il dessert, et plus généralement qui se chargent de son exploitation et d'en recouvrer le paiement auprès des clients. Parmi les types de sociétés d'opérateurs, on compte des sociétés de services énergétiques de mini-réseaux, comme des développeurs de mini-réseaux, et des sociétés publiques d'élec-

TABLEAU ES.5 Tarifs, coûts et bénéfices actuels et prévus des opérateurs de mini-réseaux, 2019 et 2030

Description	2019	2030
Tarif moyen (\$/kWh)	0,45	0,26
Coût du service (\$/kWh)	0,43	0,21
Bénéfice sur les mini-réseaux déployés (millions de dollars)	28	608
Bénéfice cumulé sur tous les mini-réseaux déployés (millions de dollars)	153	3 343

Source : Analyse d'ESMAP.

Note : kWh = kilowattheure.

TABLEAU ES.6 Des exemples d'entreprises du secteur privé participant à la chaîne de valeur des mini-réseaux

Société	Siège	Description
Développeurs de mini-réseaux		
MLinda	Inde	MLinda a installé un système de 48 kWp pour alimenter en électricité un grand marché dans l'Ouest du Bengal. Avant l'introduction du mini-réseau, le marché fonctionnait au diesel. Dans certaines installations, ce marché fait fonction de client clé et le surplus d'électricité est exporté vers des maisons dans un rayon d'1 km
Redavia	Tanzanie	Redavia utilise une structure sous forme de bail pour déployer des systèmes capables d'être intégrés à des générateurs diesel. Les unités containerisées réduisent le risque pris par les investisseurs, dans la mesure où elles peuvent être redéployées ailleurs. L'entreprise a obtenu plus de 20 millions de dollars en investissements.
Sigora	Haïti	Sigora a achevé le mini-réseau du Môle-Saint-Nicolas en 2017. Celui-ci produit 200 kW au diesel et 200 kW au solaire, assurant l'alimentation en électricité de 5 500 clients. Les plans d'expansion comprennent l'ajout de capacité en énergie solaire et éolienne.
Entreprises d'ingénierie, de passations de marché et de construction (EPC)		
Clarke Energy	Royaume-Uni	En 2018, Clarke a mis au point et installé un mini-réseau hybride au Nigeria qui utilisait 4 MW de moteurs fonctionnant au gaz naturel avec 250 kVA de stockage d'énergie. Il est capable de fonctionner soit raccordé au réseau principal, soit de manière autonome. Clarke a intégré des moteurs GE à un système de stockage d'énergie FLEXGEN.
Hatch	Canada	Près de 300 communautés isolées au Canada n'ont pas accès au réseau électrique. La plupart d'entre elles utilisent des générateurs diesel. Hatch, une entreprise EPC mondiale, a élaboré son propre régulateur de micro-réseau (HµGrid), qui intègre les énergies renouvelables à des générateurs diesel pour améliorer la qualité et la fiabilité de l'approvisionnement en électricité et son coût modique (attribuable à la baisse de la consommation de diesel) (Sedighy 2016).
Sterling and Wilson	Inde	Sterling and Wilson est une entreprise EPC qui réalise des projets dans plus d'une quarantaine de pays dans toutes sortes de domaines, notamment l'énergie solaire, la cogénération et la production à base de générateurs diesel. En 2018, l'entreprise a créé une antenne commerciale consacrée au développement de systèmes hybrides. Celle-ci a remporté un marché de trois systèmes hybrides, dont un avec 17 MWh de stockage d'énergie, répartis sur trois sites en Afrique de l'Ouest (Kenning 2018).
Fabricants de composants de mini-réseaux		
Exide	États-Unis	Exide est un grand fabricant de batteries acide-plomb qui existe depuis 1888. Il opère dans plus d'une trentaine de pays.
SMA	Allemagne	SMA, fabricant de pointe d'onduleurs solaires et de stockage, développe des produits qui peuvent être intégrés à des mini-réseaux d'une capacité allant jusqu'à 300 kW.
Yingli Solar	Chine	Yingli, grand fabricant de panneaux solaires, a expédié plus de 20 GW de panneaux dans plus de 90 pays. Il a une capacité de fabrication annuelle de 4 GW.
Entreprises d'intégration de systèmes		
Nayo Tropical Technology	Nigeria	Nayo Tropical Technology vend des composants de mini-réseaux et les intègre dans des systèmes containerisés. En 2019, l'entreprise a remporté un marché d'environ 260 000 dollars pour assurer l'alimentation en électricité des communautés de Kare et de Dadin Kowa au moyen d'un système de 90 kW (Okafor 2019).
Tiger Power	Belgique	En 2018, Tiger Power a signé un accord avec l'agence ougandaise d'électrification rurale en vue de développer trois mini-réseaux à l'aide de son système solaire et de stockage containerisé, avec le secours d'un générateur à l'hydrogène, pour fournir de l'électricité à 3 000 ménages (Alliance for Rural Electrification 2018).
Winch Energy	Royaume-Uni	En 2016, Winch Energy a installé 17 kW et 30 kW de systèmes solaires et de stockage containerisés dans le village de Nimjat, en Mauritanie, pour alimenter en électricité une école, un dispensaire, une mosquée, des lampadaires et 70 ménages.
Investisseurs		
Acumen	Royaume-Uni et États-Unis	Créé en 2001, Acumen cherche à fournir des capitaux à long terme qui comblent le fossé entre des approches fondées sur le marché et des actes de pure philanthropie. Elle fait des investissements d'amorçage et de démarrage dans des entreprises sociales.
Bamboo Capital Partners	Luxembourg	Lancé en 2007, Bamboo a prouvé que des capitaux privés peuvent être déployés de manière rentable pour servir d'outil pour le changement. L'entreprise gère quelque 290 millions de dollars et compte un portefeuille de 33 sociétés dans plus de 20 pays.
Shell Foundation	Royaume-Uni	Shell Foundation a été établie en 1997 par Royal Dutch Shell à titre d'initiative d'investissement social. Elle utilise des subventions et d'autres instruments financiers pour soutenir des entreprises sociales à un stade précoce, dont des opérateurs et des fournisseurs de technologies pour les mini-réseaux.

Sources : Alliance for Rural Electrification 2018, BNEF 2018 et 2019, recherches d'ESMAP, Kenning 2018, Okafor 2019 et Sedighy 2016.

Note : GW = gigawatt, kVA = kilovolt-ampère, kW = kilowatts, kWp = kilowatts-crête, MW = mégawatt, MWh = mégawatt-heure.

tricité. Les facilitateurs, quant à eux, sont des entreprises privées qui aident les opérateurs de mini-réseaux à concevoir, à construire et à gérer des mini-réseaux, mais qui n'assument pas la responsabilité principale de se mettre en lien avec la communauté et de vendre de l'électricité. Parmi ces entreprises de facilitation, on compte les fabricants de composants de mini-réseaux, les entreprises d'ingénierie, d'achat et de construction qui aident à la conception et à l'installation du système, les intégrateurs de système, qui assemblent les divers composants des mini-réseaux pour en faire des systèmes complets, et les investisseurs.

Même dans les pays où le gouvernement est le chef de file du développement des mini-réseaux, le secteur privé est un partenaire clé des initiatives de mini-réseaux. Les partenariats public-privé sont souvent un moyen efficace de se répartir les responsabilités en vue d'optimiser les capacités des pouvoirs publics et celles du secteur privé. Ils permettent aux opérateurs de mini-réseaux qui ne disposent pas de gros moyens financiers de pénétrer le marché. Les deux modèles courants sont le modèle de gestion et le modèle de répartition des actifs :

- Dans le modèle de gestion, un organisme public planifie, finance et met en œuvre un mini-réseau jusqu'au stade de sa mise en service, pour ensuite passer le relais à l'opérateur privé qui en assume la responsabilité. L'opérateur gère, entretient et exploite le mini-réseau sous tous ses aspects, notamment la production et la distribution, et il perçoit les paiements auprès des clients du mini-réseau. Plusieurs options contractuelles sont envisageables pour que l'opérateur assume la responsabilité que lui confie l'organisme public : accord d'autorisation, service sous contrat, contrat de crédit-bail et transfert de propriété (EUEI PDF 2014). Un exemple récent de ce modèle est le projet d'énergie renouvelable rurale mis en œuvre par le Dfid en Sierra Leone avec l'aide du Bureau des Nations Unies pour les services d'appui aux projets.
- Dans le cadre d'un modèle à répartition d'actifs, c'est une institution gouvernementale qui achète et qui détient les actifs de distribution du mini-réseau, alors que le développeur est propriétaire des actifs de production, ce qui réduit les coûts d'investissement pour le développeur. C'est ce modèle qui a été adopté dans le cadre d'un projet de GIZ au Nigeria.

Les possibilités de partenariat foisonnent entre entreprises locales et internationales dans l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur des mini-réseaux. Les entités locales sont les mieux placées pour se concentrer sur les aspects de la chaîne de valeur qui nécessitent une connaissance des règles et de la régulation locales ou qui requièrent des efforts de coordination avec les clients desservis par le mini-réseau ; les entreprises internationales, quant à elles, sont les mieux à même de s'acquitter de tâches transposables au-delà des frontières nationales. Les partenariats entre entreprises locales et internationales peuvent être un moyen de stimuler la création de valeur, comme en témoignent les récents accords de partenariat conclus entre Caterpillar et PowerHive en Afrique, ABB et Husk Power en Inde, Mitsui et OMC en Inde, ENGIE et Mandalay Yoma Energy au Myanmar, ainsi que Schneider Electric avec à la fois EM-ONE et GVE au Nigeria.

Les associations du secteur peuvent faciliter la collaboration et la conclusion de marchés entre des entités locales et internationales. L'AMDA comprend 27 développeurs, chacun exploitant un portefeuille de mini-réseaux commercialement viables en Afrique subsaharienne. L'AMDA aide ses membres à montrer un front unifié et facilite les marchés entre développeurs et fournisseurs. En recueillant des données auprès de leurs membres, les associations peuvent présenter aux investisseurs ainsi qu'aux fournisseurs de produits et de services spécialisés des débouchés commerciaux fondés sur des données.

Les acteurs du secteur privé commencent aussi à se concentrer sur des segments distincts de la chaîne de valeur. Souvent, les opérateurs de mini-réseaux de la première et de la deuxième générations se chargeaient de chaque étape du cycle de vie du projet de mini-réseau, depuis le repérage des sites et de l'appréciation du profil de la demande, en passant par la conception du système, l'approvisionnement des divers composants et leur installation, jusqu'à la gestion de l'exploitation du système et le recouvrement des paiements. Avec les mini-réseaux de la troisième génération, on constate une tendance accrue chez les

acteurs du secteur privé à se spécialiser dans des aspects spécifiques de la chaîne de valeur des mini-réseaux, et la reproductibilité qu'ils en dérivent leur procure une plus grande capacité d'échelle. Ainsi, Sparkmeter fabrique des compteurs intelligents pour le marché des mini-réseaux, ESRI crée des logiciels géospatiaux pour les développeurs de mini-réseaux et les responsables nationaux des plans d'électrification, Odyssey Energy Solutions fournit une plate-forme web de marché d'échange axée sur les données pour les portefeuilles de mini-réseaux, et AMMP développe des logiciels de surveillance des mini-réseaux. Cette tendance suit une voie semblable à celle empruntée par le secteur du solaire hors réseau, déjà relativement plus ancien et plus mûr. Pendant quelques années après leur émergence au sein du secteur, les entreprises qui vendaient des systèmes PAYG étaient à forte intégration verticale, en grande partie en raison du caractère embryonnaire du marché et de l'absence de partenaires business-to-business présentant suffisamment de potentiel. Toutefois, récemment, plusieurs de ces entreprises, aussi bien des fabricants de panneaux solaires que des distributeurs locaux et des intermédiaires financiers, commencent à rompre la chaîne de valeur en formant des partenariats fructueux (Waldron 2017).

Dans le même temps, les mini-réseaux qui naissent sous l'impulsion du secteur privé peuvent ouvrir la voie à une extension future financièrement plus rentable du réseau principal. Les mini-réseaux nés sous l'impulsion du secteur privé sont généralement conçus pour se raccorder au réseau principal, ce qui les rend utiles pour équilibrer la charge ainsi que comme appui au transport et à la distribution en bout de ligne. Ils favorisent aussi des utilisations de l'électricité à usage productif ainsi que le développement économique local. Ainsi, à l'arrivée du réseau principal, il existera d'ores et déjà une importante demande d'électricité et les clients seront mieux à même de la payer, autant d'atouts pour accroître la rentabilité économique de l'extension du réseau principal. Les nouvelles régulations donnent des options aux développeurs sur ce à quoi s'attendre à l'arrivée du réseau principal. En attendant, ils profitent de la baisse des coûts des composants des mini-réseaux pour construire des systèmes prêts à être raccordés au réseau principal tout en maintenant les tarifs à des niveaux abordables. Ces régulations ont beau déjà exister, elles ne sont toujours pas adoptées de manière généralisée.

Pour en savoir sur la participation du secteur privé dans la chaîne de valeur du secteur des mini-réseaux tant par des entreprises locales qu'internationales, ainsi que les résultats d'enquêtes nationales représentatives auprès d'opérateurs de mini-réseaux au Cambodge, au Myanmar et au Népal, voir le chapitre 7 de l'ouvrage (« Local and International Industry »).

CRÉER L'ENVIRONNEMENT PROPICE À L'ESSOR DE PORTEFEUILLES DE MINI-RÉSEAUX

Pour pouvoir connecter 490 millions de personnes d'ici à 2030, les sociétés publiques d'électricité et les sociétés privées devront développer et exploiter plus de 210 000 mini-réseaux. Les sociétés nationales d'électricité au Kenya, à Madagascar, aux Philippines, en Russie et dans bien d'autres pays sont déjà d'importants développeurs de mini-réseaux. Les développeurs du secteur privé (dont PowerGen, OMC, GVE et Husk Power) sont en train de développer de vastes portefeuilles de mini-réseaux. Dans un marché bien établi, les initiatives provenant du secteur privé ont plus de chance de connaître une croissance exponentielle, et c'est bien ce type de croissance qu'il faudra pour atteindre l'accès universel d'ici à 2030. Les sociétés nationales d'électricité sont conscientes aussi du rôle croissant des mini-réseaux, confirmé par leur analyse de coûts-avantages.

Plusieurs changements importants de l'écosystème des mini-réseaux permettront aux sociétés publiques d'électricité et au secteur privé d'élargir leurs portefeuilles. Citons les suivants :

- l'utilisation d'analyses géospatiales pour créer des stratégies nationales d'électrification et des portefeuilles de mini-réseaux à des fins d'investissements
- une régulation réaliste relative aux mini-réseaux et un environnement favorable aux affaires pour que les sociétés de mini-réseaux puissent prospérer
- un cadre institutionnel renforcé
- l'accès accru au financement provenant d'investisseurs et de partenaires du développement
- des initiatives de formation et de renforcement des compétences, ainsi que des stratégies efficaces de mobilisation des communautés.

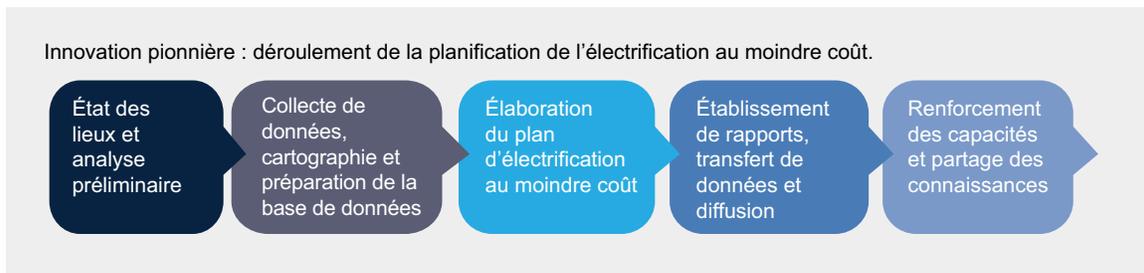
La présente section revient sur chacun de ces domaines.

UTILISATION D'ANALYSES GÉOSPATIALES DANS LA PLANIFICATION DES PORTEFEUILLES DE MINI-RÉSEAUX ET POUR LES PLANS NATIONAUX D'ÉLECTRIFICATION

Les nouvelles technologies d'analyse géospatiale généralisent l'adoption d'une approche de portefeuille pour le développement des mini-réseaux, tant au sein du secteur des mini-réseaux que dans les plans nationaux d'électrification. Les logiciels SIG (système d'information géographique) et les données géospatiales sont en train de devenir des outils essentiels des plans nationaux d'électrification et pour les évaluations rapides de sites. Les facteurs suivants sont propices à cette adoption généralisée des outils numériques :

- les progrès technologiques et les réductions de coût des images satellites et de l'apprentissage machine (« machine learning »)

FIGURE ES.5 Modalités de l'utilisation d'analyses géospatiales dans l'élaboration de plans d'électrification au moindre coût au niveau national



Pour en savoir plus sur l'utilisation de l'analyse géospatiale à l'élaboration de plans nationaux d'électrification, voir le chapitre 4 de l'ouvrage (« *Geospatial and Digital Tools for Electrification and Portfolio Planning* »).

- le perfectionnement croissant des algorithmes et logiciels analytiques
- la prolifération de dispositifs GPS (système de positionnement mondial) et de technologies basées sur Internet et mobiles
- la disponibilité de logiciels libres et ouverts (« open source ») de grande qualité
- l'accessibilité du big data et du cloud computing.

Les pays se servent d'analyses géospatiales pour élaborer des plans nationaux d'électrification qui délimitent clairement les zones d'implantation des mini-réseaux (figure ES.5). En adoptant une démarche géospatiale pour la planification nationale de l'électrification, le réseau principal existant est cartographié et ses attributs numérisés. L'offre et la demande d'électricité sont géolocalisées et superposées à des données pertinentes, qu'elles soient démographiques (densité de population et modes de croissance), sur les infrastructures sociales (écoles, centres de santé, églises, bureaux administratifs) et économiques (revenus des ménages, pauvreté, activités commerciales, disposition à payer). Cette modélisation spatiale permet d'établir un plan au moindre coût qui identifie la technologie optimale en réseau et hors réseau, qui est techniquement réalisable et économiquement viable en fonction des circonstances locales. Même si pour la toute première fois, ces plans nationaux comprennent toutes les options en matière d'électrification (extension du réseau, mini-réseaux et hors réseau), il n'en reste pas moins qu'ils dépendent toujours dans une certaine mesure des hypothèses de départ, qui peuvent privilégier davantage une solution par rapport à une autre. Lors de l'établissement de ces plans, il est important de veiller à consulter les différentes parties concernées pour qu'elles soient les plus nombreuses à adhérer au résultat recherché. L'Éthiopie, le Kenya, le Myanmar, le Nigeria et le Rwanda font partie des pays qui se servent d'analyses géospatiales avancées pour élaborer des plans nationaux d'électrification.

Les analyses géospatiales peuvent aussi s'inscrire dans le cadre d'une approche de planification de portefeuilles pour le développement de mini-réseaux, en venant étayer un cadre national intégré de planification de l'électrification au moindre coût, qui prévoit peu ou prou d'extension du réseau pour toutes sortes de raisons (situation politique, insolvabilité des sociétés de distribution, etc.). Déjà utilisée par un certain nombre de sociétés de mini-réseaux bien établies en Afrique subsaharienne, la planification géospatiale des portefeuilles réduit très nettement les coûts de préinvestissement associés à la préparation des sites au développement de mini-réseaux par rapport à des approches traditionnelles, qui reposent lourdement sur le déploiement d'équipes multidisciplinaires complètes dans les villages pour déterminer l'envergure de l'électrification du mini-réseau.

En ayant une image plus précise de l'emplacement et des caractéristiques des communautés qui peuvent être envisagées à l'échelle d'un portefeuille, les développeurs de mini-réseaux seront mieux à

même de tirer parti des économies d'échelle et de préparer plus rapidement et de manière plus rentable leurs plans de déploiement et leurs plans pour l'entretien et la maintenance. À une échelle plus restreinte, des outils géospatiaux peuvent être utilisés pour déterminer la capacité de production du mini-réseau et planifier le réseau de distribution. Certains de ces outils peuvent accélérer le repérage de sites potentiels pour les mini-réseaux, la collecte, l'estimation et l'analyse des données client, l'optimisation de la conception du système de mini-réseau ainsi que la recherche/sélection de développeurs et d'investisseurs, en utilisant les innovations les plus récentes à titre d'exemples. Parmi les exemples les plus novateurs, on peut citer ces développeurs privés qui se servent des technologies géospatiales et d'autres technologies numériques pour améliorer l'établissement de leurs portefeuilles de projets de mini-réseaux, ou encore ces programmes du secteur public qui mettent à profit ce type de technologies révolutionnaires pour faciliter la mise en œuvre de projets de mini-réseaux.

Les gouvernements peuvent également utiliser les données géospatiales et d'autres outils numériques pour stimuler le déploiement de mini-réseaux sous l'impulsion du secteur privé afin d'assurer la fourniture d'électricité à des communautés hors-réseau. Par exemple, l'agence d'électrification rurale du Nigeria organise des appels d'offres à subvention minimale pour les portefeuilles de sites de mini-réseaux prometteurs qu'elle a repérés et pour lesquels elle a recueilli des renseignements sur le marché. Avec l'appui de la Banque mondiale, l'agence a établi un protocole innovant pour le repérage, l'examen systématique et l'analyse de sites de mini-réseaux en ayant recours à des outils géospatiaux (y compris une méthodologie de planification géospatiale du portefeuille pour évaluer et sélectionner les communautés à inclure dans les appels d'offres à subvention minimale), dans le but de mettre sur pied des portefeuilles de projets de mini-réseaux et d'en mobiliser le cofinancement par le secteur privé.

RÉGULATION DU SECTEUR ET CRÉATION D'UN ENVIRONNEMENT PROPICE AUX AFFAIRES

En matière de régulation, il n'existe pas d'approche unique qui convienne à tous les contextes, et les avantages qu'elle procure s'accompagnent forcément de coûts. ESMAP a élaboré une série d'arbres de décision qui présentent les options de régulation des mini-réseaux et les conditions dans lesquelles chacune d'entre elles s'applique. Ces arbres de décision n'ont rien de prescriptif. Ils peuvent fournir des conseils pour aider les régulateurs et les décideurs à prendre des décisions éclairées dans cinq domaines de régulation, à savoir : l'entrée sur le marché, les tarifs, les spécifications techniques, les normes de service, et ce qui se passe à l'arrivée du réseau principal dans la zone de desserte d'un mini-réseau. Cette section présente l'arbre de décision pour les options à l'arrivée du réseau principal ; le chapitre 11 du rapport principal présente, quant à lui, les arbres de décision pour les quatre autres domaines réglementaires. Le tableau ES.7 récapitule l'axe d'action de chacun de ces arbres de décision.

Toute régulation devrait relever d'une approche souple et légère qui repose sur les principes suivants (Tenenbaum et autres 2014) :

- Réduire au minimum la quantité d'informations requises par le régulateur.
- Limiter le nombre de formalités et de décisions réglementaires distinctes.
- Utiliser des documents et des formulaires normalisés.
- Prendre acte de décisions connexes prises par d'autres organismes publics ou communautaires et s'appuyer dessus.

Toute régulation devra évoluer à mesure que le marché des mini-réseaux mûrira. À mesure que le marché se développera, les mini-réseaux cesseront d'être les nouveaux acteurs du marché à la viabilité marginale pour devenir d'éventuels fournisseurs monopolistiques de services essentiels. Dans un premier temps, une

TABLEAU ES.7 Aperçu des arbres de décision d'ESMAP concernant les options de régulation des mini-réseaux

Sujet de l'arbre de décision	Aperçu
Arrivée du réseau principal (voir la figure ES.6)	Cet arbre de décision fournit des options lors de l'installation du réseau principal dans la zone de desserte d'un mini-réseau, notamment son exploitation en tant que petit distributeur d'électricité (PDE) ou petit producteur d'électricité (PPE).
Entrée sur le marché	Cet arbre de décision fournit les quatre options pour régler l'entrée sur le marché de développeurs de mini-réseaux et il précise dans quelles conditions chacune d'entre elles convient le mieux (enregistrement, autorisation, octroi de licence ou absence de régulation d'entrée). Les premières branches de l'arbre précisent les obligations légales d'une exploitation en tant qu'entreprise de mini-réseau et le degré de contrôle que le régulateur souhaite exercer vis-à-vis de tout nouvel acteur sur le marché.
Tarifs au détail	Les options présentées dans cet arbre de décision dépendent de la disponibilité et du type de subventions et de l'imposition ou non d'un tarif national uniforme. Les cinq options prévoient des régimes d'établissement de tarifs entre acheteur consentant et vendeur consentant, le plafonnement efficace des prix pour les nouveaux arrivants sur le marché, des limites de tarifs individualisées basées sur les coûts, des tarifs de soumission, et des tarifs nationaux uniformes.
Normes de service	Les premières branches de cet arbre de décision précisent le degré de maturité du marché de mini-réseaux (des normes de service moins rigoureuses peuvent être plus acceptables dans des marchés émergents) et la disponibilité de subventions. Les options en matière de régulation des normes de service varient, partant de l'absence de normes de service, à des normes pour l'établissement de rapports, des normes différenciées, des normes uniformes spécifiques au mini-réseau jusqu'à des normes au niveau du réseau principal.
Normes techniques	Cet arbre de décision présente les options pour régler les normes techniques. Les premières branches de l'arbre précisent si l'on s'attend ou non à l'intégration future des mini-réseaux au réseau principal du pays. Les options pour les normes techniques vont de normes de sécurité uniquement, à des normes spécifiques aux mini-réseaux, des normes optionnelles compatibles au réseau principal, des normes obligatoires compatibles au réseau principal et des normes du réseau principal.

Source : Analyse d'ESMAP.

régulation excessivement rigoureuse risque de ralentir la croissance du secteur, alors que plus tard, une régulation plus stricte est généralement nécessaire pour protéger les clients. Le régulateur peut adapter l'évolution réglementaire requise de ce secteur en en définissant les phases de croissance et en stipulant, à l'avance, les règles qui s'appliqueront à chaque étape.

Plusieurs pays sont en train d'élaborer un cadre réglementaire spécifique aux mini-réseaux et propice aux investissements du secteur privé. À travers l'Asie et l'Afrique, des pays comme le Bangladesh, le Cambodge, l'Inde, le Kenya, le Nigeria, le Rwanda, la Tanzanie¹¹ et la Zambie ont élaboré des cadres réglementaires pour les mini-réseaux qui traitent de questions clés.

Il n'est pas nécessaire qu'un organisme de réglementation officiel soit en place pour prendre ces décisions. On peut envisager que les décisions réglementaires soient énoncées dans un contrat juridique entre le développeur et l'instance publique chargée du contrôle du mini-réseau. C'est cette approche qu'ont adoptée le Bangladesh et le Myanmar.

Dans les pays qui ont créé un organisme de réglementation officiel, celui-ci peut jouer un rôle important à orienter le développement futur du secteur des mini-réseaux. Par exemple, au Cambodge, l'Autorité de l'électricité du Cambodge (l'EAC) a joué un rôle important à chaque étape du cycle de vie du secteur des mini-réseaux. Elle a imposé une régulation très légère lors de la phase initiale jusqu'à l'obligation pour les développeurs de s'enregistrer auprès de l'EAC, après quoi elle s'est montrée beaucoup plus normative une fois que le secteur est devenu bien établi, par exemple en imposant un tarif universel. L'EAC a veillé à rétablir l'équilibre de ce régime à bas tarif par des montants de compensation suffisants provenant du Fonds d'Électrification Rurale.

En règle générale, il existe quatre options pour réglementer la façon dont les mini-réseaux peuvent entrer sur le marché :

- Décider de ne pas réglementer l'entrée sur le marché.
- Obliger les mini-réseaux à s'inscrire auprès de l'instance publique concernée.
- Obliger les mini-réseaux à obtenir un permis d'exploitation, généralement accordé par le régulateur.
- Obliger les mini-réseaux à obtenir une licence d'exploitation, généralement accordée par le régulateur.

Le chapitre 11 du rapport principal fournit des exemples de ces options spécifiques par pays, mais en règle générale, l'enregistrement, la délivrance de permis et l'octroi de licences exigent des niveaux croissants d'informations de la part du développeur et leur examen par le régulateur. Dans certains pays, les exigences d'entrée sur le marché des mini-réseaux varient en fonction de leur capacité (par exemple, il suffit aux mini-réseaux de petite capacité de s'enregistrer, tandis que les mini-réseaux de plus grosse capacité sont tenus d'obtenir un permis ou une licence).

L'analyse du cadre réglementaire relatif aux mini-réseaux dans différents pays a fait apparaître cinq approches en matière de régulation des tarifs au détail des mini-réseaux :

- Acheteur consentant/vendeur consentant
- Plafonnement efficace des prix pour les nouveaux arrivants sur le marché
- Tarif de soumission
- Limites de tarifs individualisées basées sur les coûts
- Tarif national uniforme.

L'option d'un tarif national uniforme n'est envisageable que s'il existe un niveau suffisant et viable de subventions disponibles. Pour cela, le gouvernement doit s'engager à garantir la mise à disposition des fonds aux partenaires de mise en œuvre d'une manière transparente et prévisible. Le Ghana est l'un de ces pays qui obligent les mini-réseaux à adhérer au tarif national uniforme. Le choix entre les quatre autres options, chacune permettant en théorie aux développeurs de mini-réseaux de recouvrer leurs coûts, dépend de la capacité de l'agence de régulation et de l'importance que le gouvernement accorde à réduire le risque d'établissement de prix de monopole, par rapport à l'accent que le gouvernement met pour stimuler l'expansion rapide en réduisant au minimum les formalités administratives et en permettant des retours sur l'investissement attractifs. Par exemple, le Nigeria a adopté une approche acheteur consentant/vendeur consentant en matière de régulation des tarifs pour les mini-réseaux de moins de 100 kW, en partie en vue de stimuler la croissance rapide du marché émergent des mini-réseaux.

Quelle que soit l'option de régulation tarifaire adoptée, il appartient aux autorités réglementaires de respecter le principe général suivant de prise en compte des subventions dans leur régulation des tarifs au détail : Si une subvention est autorisée, imposée, prévue ou autorisée par le gouvernement, le régulateur doit s'abstenir de prendre toutes les mesures susceptibles d'annuler la subvention ou d'en réduire les effets. Il faut, au contraire, que le régulateur prenne des mesures réglementaires visant à assurer que la subvention est octroyée à son bénéficiaire visé d'une manière aussi efficiente que possible. Il n'en demeure pas moins que le régulateur doit informer périodiquement le gouvernement des coûts et des avantages de la subvention (Tenenbaum et autres 2014, 122).

En ce qui concerne les normes de service, les autorités réglementaires adoptent généralement l'une des approches suivantes :

- Se contenter d'obliger les développeurs de rendre compte de leurs niveaux de service.

- Élaborer et faire appliquer des normes qui sont spécifiques à un mini-réseau donné ou à un portefeuille de mini-réseaux.
- Élaborer et faire appliquer des normes qui sont uniformes pour tous les mini-réseaux.
- Obliger les mini-réseaux à respecter les mêmes normes que celles du réseau principal.

Généralement, l'obligation de respect des normes qui s'appliquent au réseau principal n'est possible qu'à condition que des subventions soient disponibles. Le choix parmi les autres options dépend en partie du degré de capacité administrative de l'agence de régulation. Le Nigeria et le Pérou sont deux pays qui justement ont établi des normes de service distinctes en fonction des types de mini-réseaux. Au Nigeria, les mini-réseaux de moins de 100 kW peuvent choisir d'adhérer aux normes de service recommandées, tandis que les réseaux de plus grosse capacité sont soumis à des normes plus rigoureuses. Au Pérou, des normes de service différentes s'appliquent aux mini-réseaux selon qu'ils desservent des zones rurales ou des zones urbaines.

En plus d'établir des normes de service, les régulateurs établissent aussi des normes techniques pour les mini-réseaux, qui présentent généralement les options suivantes :

- Établir des normes de sécurité minimales, et pas plus.
- Établir des normes spécifiques au mini-réseau.
- Établir des normes optionnelles compatibles avec le réseau principal.
- Établir des normes obligatoires compatibles avec le réseau principal.
- Établir les normes du réseau principal.

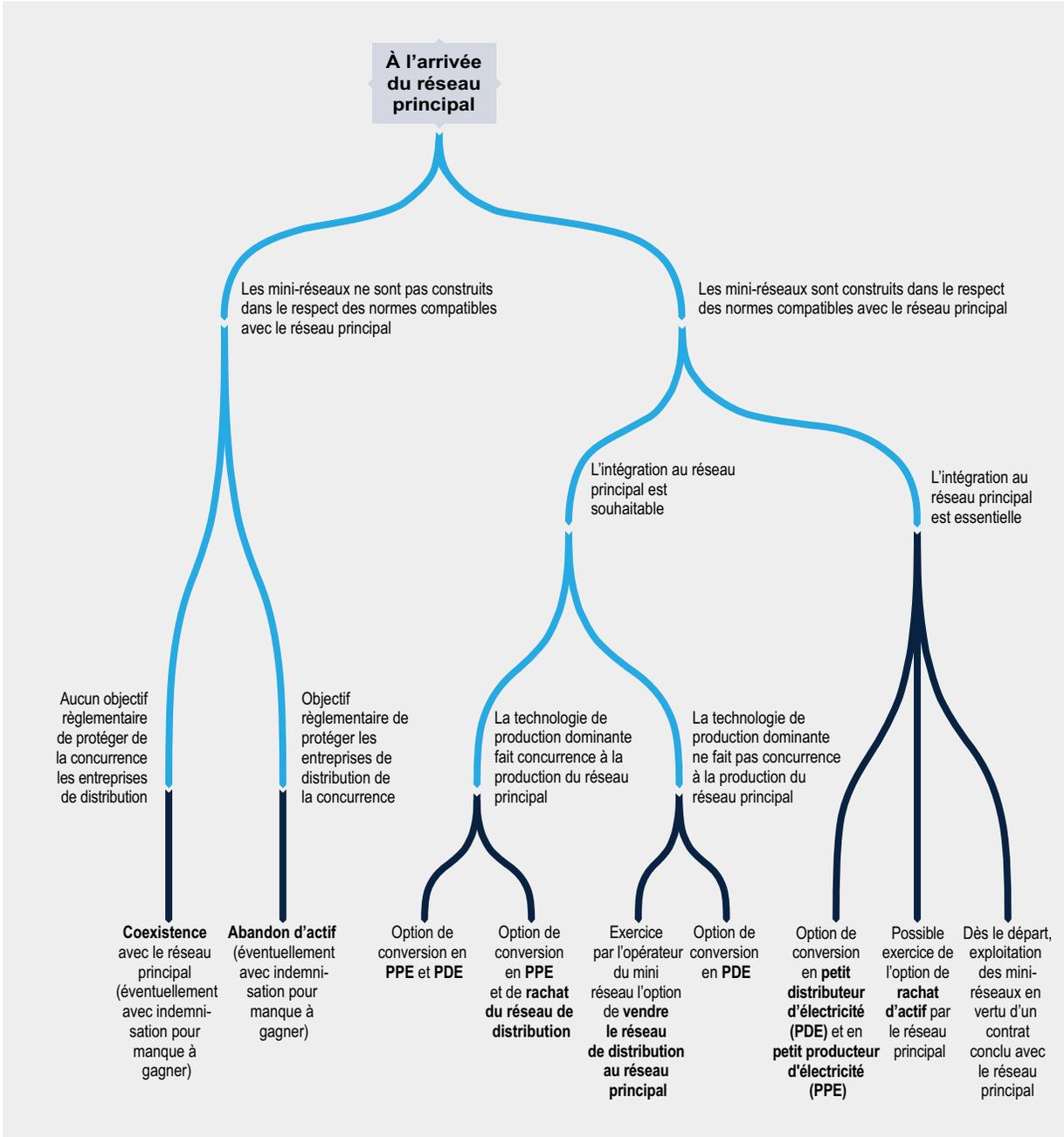
Le choix de l'option dépend de la disponibilité de subventions (des normes plus strictes requièrent généralement des subventions) et des modalités prévues à l'arrivée du réseau principal (des normes compatibles avec le réseau principal sont le minimum indispensable pour permettre l'interconnexion des mini-réseaux à celui-ci). Un nombre croissant de pays exige que les mini-réseaux adhèrent aux normes compatibles avec le réseau principal. Le Bangladesh, le Cambodge, le Kenya, le Nigeria, le Sri Lanka et la Tanzanie exigent tous qu'au moins certains types de mini-réseaux (souvent ceux supérieurs à une capacité donnée) soient techniquement compatibles avec le réseau principal ou qu'ils observent les normes techniques du réseau principal.

L'arrivée du réseau principal est l'un des plus grands risques auxquels sont confrontés les développeurs privés de mini-réseaux. La régulation relative aux mini-réseaux devrait stipuler explicitement les options de ce qui se produira à l'arrivée du réseau principal et énoncer le plus clairement possible les modalités de mise en œuvre de chacune (figure ES.6). Six options se présentent à l'arrivée du réseau principal dans la zone de desserte d'un mini-réseau :

- Laisser le mini-réseau fonctionner comme un petit distributeur d'électricité (PDE).
- Laisser le mini-réseau fonctionner comme un petit producteur d'électricité (PPE).
- Laisser le mini-réseau fonctionner comme un PDE et un PPE.
- Autoriser le développeur de mini-réseaux à vendre ses actifs éligibles à la société publique d'électricité.
- Laisser le mini-réseau coexister avec le réseau principal.
- Obliger le mini-réseau à mettre ses actifs hors service et à les retirer.

Pour que les options PPE, PDE et PPE + PDE soient envisageables, il faut que le mini-réseau ait été construit pour être au moins compatible au réseau principal. L'option de rachat des actifs nécessite un mécanisme de compensation crédible pour qu'il puisse être envisageable par les développeurs de mini-réseaux du secteur privé. De plus en plus de pays adoptent une régulation qui précise les options à l'arrivée du réseau principal

FIGURE ES.6 Arbre de décision pour déterminer le futur des mini-réseaux à l'arrivée du réseau principal



Source : Analyse d'ESMAR.

Pour en savoir plus sur la régulation des mini-réseaux et la réduction des formalités administratives, voir les chapitres 11 et 12 de l'ouvrage (« Workable Mini Grid Regulations » et « Enabling Business Environment »).

dans la zone de desserte de mini-réseaux, dont le Bangladesh, le Cambodge, l'Inde (Uttar Pradesh), le Nigeria, le Rwanda, la Tanzanie et la Zambie.

La compatibilité avec le réseau principal et l'interconnexion à celui-ci dépendent de la capacité des sociétés publiques d'électricité à bien comprendre, exploiter et intégrer l'utilité des mini-réseaux. Pour connecter un demi-milliard de personnes à des mini-réseaux d'ici à 2030, il faudra que les régulations relatives aux mini-réseaux et aux sociétés publiques d'électricité envisagent les mini-réseaux comme une ressource complémentaire pour les services de ces dernières ; pour cela, des exigences techniques devront être imposées tant aux sociétés publiques d'électricité qu'aux mini-réseaux pour permettre leur interconnexion. De leur côté, les régulateurs doivent bien se rendre compte de la possibilité que les sociétés publiques d'électricité voient les mini-réseaux comme une source de concurrence indésirable. D'où l'importance de faire en sorte que la régulation évite de donner aux sociétés publiques d'électricité le rôle de gardien de l'accès au marché, comme en leur accordant le pouvoir exclusif de définir les zones de desserte des mini-réseaux ; la régulation doit aussi énoncer le plus clairement possible les modalités prévues de mise en œuvre de l'interconnexion.

Deux innovations réglementaires peuvent stimuler encore plus les investissements du secteur privé dans les mini-réseaux:

- la régulation par contrat, où les règles relatives aux mini-réseaux sont incorporées dans un contrat juridique
- un mécanisme d'appel sous forme d'arbitrage, en vertu duquel il peut être demandé à un organe indépendant ou à un tribunal d'examiner les décisions d'un régulateur, et doté du pouvoir de les infirmer.

L'objectif de tout cadre réglementaire régissant les mini-réseaux devrait être de promouvoir un service de bonne qualité aux tarifs de recouvrement des coûts les plus bas. Pour poursuivre cet objectif à chaque étape du développement des mini-réseaux d'un pays (en tenant compte des subventions et de la stratégie d'électrification nationale globale), le cadre réglementaire doit être prévisible tout en restant suffisamment souple pour évoluer en même temps que le marché.

Des solutions innovantes qui réduisent les formalités administratives simplifient l'environnement commercial des développeurs de mini-réseaux. En voici quelques-unes :

- Plusieurs pays ont élaboré des modèles normalisés pour les principales formalités administratives qui concernent les mini-réseaux, notamment des accords d'achat d'électricité normalisés, qui définissent les modalités selon lesquelles les développeurs de mini-réseaux vendent de l'électricité au réseau principal, ainsi que des systèmes normalisés de gestion environnementale et sociale qui précisent à quel moment les développeurs de mini-réseaux obtiennent des agréments environnementaux.
- Des plateformes technologiques font leur apparition pour mettre en relation des développeurs avec des investisseurs et pour organiser des appels d'offres de grande envergure portant sur des mini-réseaux. Ces plateformes sont propices à de très nets gains d'efficacité du marché.
- Dans les pays où l'absence de régulateur officiel accroît le risque de soumettre les développeurs de mini-réseaux à une multitude d'échelons de contrôle public, le gouvernement peut déléguer son pouvoir de surveillance à une instance unique ; il s'agit généralement de l'administration publique locale ou d'un organisme public qui accorde des dons ou des subventions aux développeurs de mini-réseaux (une agence d'électrification rurale, par exemple).
- La mise en place de services d'administration publique sur Internet peut être un moyen de réduire le coût indirect de l'enregistrement des entreprises, des permis d'implantation et des permis de construire, ainsi que celui des agréments environnementaux. Les rapports Doing Business de la Banque mondiale donnent une bonne idée du niveau de formalités administratives que l'on peut attendre d'un pays.

RENFORCEMENT DU MODÈLE ET DU CADRE INSTITUTIONNELS

Des institutions au niveau national appuient l'expansion des mini-réseaux comme volet clé de leurs stratégies d'électrification. Le ministère des Travaux publics d'Haïti a créé une unité spéciale : la cellule énergétique, chargée de la mise en œuvre d'un projet financé par la Banque mondiale pour déployer des mini-réseaux dans plus de 50 localités. L'Agence d'électrification rurale du Nigeria porte à exécution le plus vaste programme de mini-réseaux en Afrique, visant l'installation de 850 mini-réseaux d'ici à 2025, sur un marché potentiel estimé de 10 000 sites. Les régulateurs en Haïti, au Nigeria, au Rwanda, en Zambie et dans plusieurs autres pays ont désigné des équipes dédiées aux mini-réseaux. Des ministères, des sociétés nationales d'électricité et des agences d'électrification rurale collaborent à l'élaboration de plans nationaux d'électrification, comme dans les cas du Kenya, du Nigeria, du Myanmar et du Rwanda évoqués plus haut.

Des politiques d'électrification nationale stipulent spécifiquement le lien entre l'égalité hommes-femmes et l'adoption de solutions hors-réseau. Des pays comme l'Éthiopie reconnaissent dans leur politique d'électrification nationale les difficultés pour les femmes de participer au secteur hors réseau et prévoient un soutien intégré aux femmes entrepreneuses, grossistes et distributrices, ainsi qu'aux utilisatrices, au moyen de formations, de campagnes de communication et de l'octroi de crédits.

Les études d'ESMAP ont relevé les quatre caractéristiques que doit présenter un cadre institutionnel pour appuyer les mini-réseaux, étant donné la diversité de leurs possibles modèles de prestation. Les modèles de prestation les plus courants sont les suivants : les modèles « build-own-operate » (construction-possession-exploitation), les partenariats public-privé, les concessions, les modèles d'utilité publique avec et sans la participation du secteur privé, et les modèles coopératifs. Un cadre institutionnel solide, capable de faire face à la diversité des modèles de prestation, présente les caractéristiques suivantes :

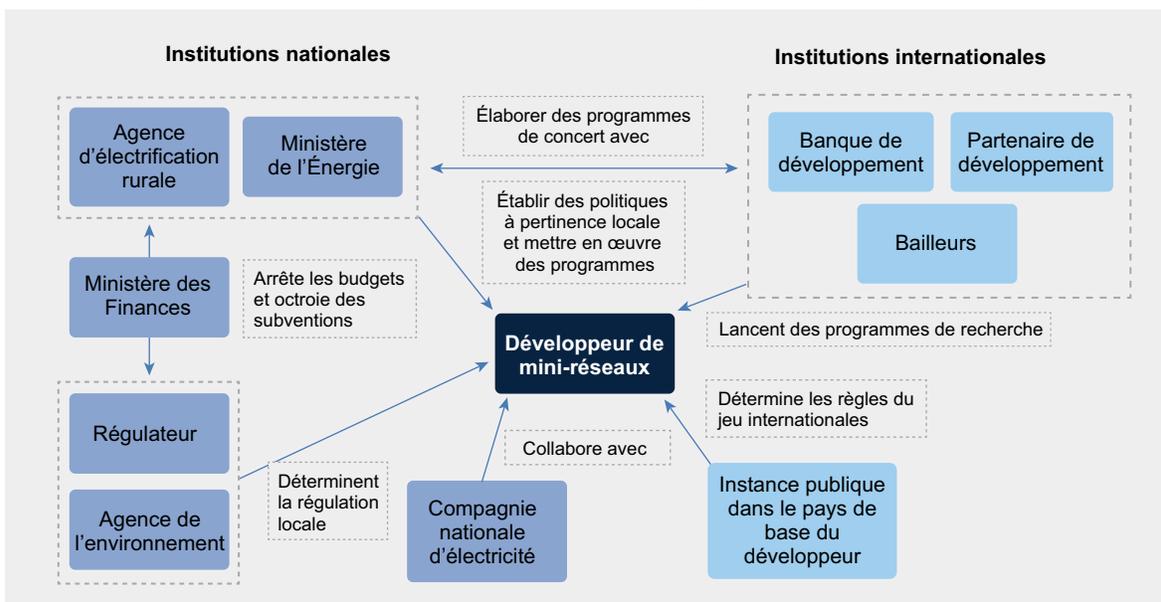
- Le gouvernement reconnaît la place des mini-réseaux comme option d'électrification viable et souhaitable.
- Les institutions publiques apportent leur appui au développement des mini-réseaux par leurs actions et leurs décisions.
- Le cadre institutionnel est suffisamment souple dans son principe pour prendre en charge tout un éventail de modèles de prestation de mini-réseaux.
- Le cadre minimise le risque de dédoublement des fonctions de contrôle et de rôles conflictuels.

De nombreuses entités font partie du cadre institutionnel qui se répercute sur les mini-réseaux. On compte parmi elles les ministères de l'énergie, du travail, des finances et de l'environnement ; la société nationale d'électricité ; le régulateur du secteur de l'énergie ; l'agence d'électrification rurale (ou de l'énergie) ; l'agence pour l'environnement ; le bureau des normes ; les associations de l'énergie ; les banques et les institutions financières de développement local ; les organismes sociaux et les organisations non gouvernementales (ONG) ; les autorités douanières ; les banques de développement et les partenaires du développement au niveau international. La figure ES.7 donne un exemple de l'écosystème des institutions qui affectent généralement les développeurs de mini-réseaux.

Les organismes publics sont bien placés pour accroître les utilisations productives de l'électricité dans les secteurs agricole, industriel et tertiaire. Au Bangladesh, IDCOL a amélioré la rentabilité des mini-réseaux par des efforts de promotion de la charge, qui prévoient notamment des messages éducatifs prônant les avantages de remplacer des moteurs diesel par des moteurs électriques pour la mouture agricole. La régulation relative aux mini-réseaux en Tanzanie autorise les développeurs de mini-réseaux à financer l'acquisition par les clients de matériel à usage productif avec paiement du prêt intégré à la facture.

L'adoption d'une approche multipartite intégrée peut accroître l'impact des efforts déployés par le gouvernement pour promouvoir des utilisations productives de l'électricité. Comme exemples d'initiatives

FIGURE ES.7 Exemple de cadre institutionnel touchant les développeurs de mini-réseaux



Source : Analyse d'ESMAP.

Pour en savoir plus sur les cadres institutionnels qui ont une incidence sur les mini-réseaux et les modèles de prestation des mini-réseaux, voir le chapitre 10 de l'ouvrage (« Institutional Framework »).

publiques, on peut citer le renforcement des connaissances et des compétences des petites et micro-entreprises à l'utilisation de puissance électrique et motrice nouvellement acquise à des fins d'activités commerciales rentables, le renforcement des capacités de gestion technique et financière d'entreprises dirigées par des femmes, le renforcement de l'accès aux marchés, la création de liens et l'accès à des produits et services financiers, et le renforcement de services de vulgarisation ou de développement commercial. L'impact combiné de ces efforts dépasse celui de toute initiative isolée ou de tout axe prioritaire indépendant. Il est possible de solliciter la participation d'une multitude de parties prenantes et de partenaires notamment d'ONG et d'institutions de microfinance locales.

Les partenaires du développement peuvent apporter leur soutien à des cadres institutionnels qui sont propices à des approches de la part du secteur privé au développement de mini-réseaux. Les partenaires du développement peuvent remplir toutes sortes de fonctions d'appui et notamment agir en tant que « courtiers de connaissances » des meilleures pratiques, aider les administrations nationales ou régionales à renforcer les capacités de tous les organismes concernés, et faciliter l'élaboration et la mise en œuvre de programmes de suivi et d'évaluation pour assurer le suivi du déploiement des mini-réseaux.

RENFORCEMENT DU CAPITAL HUMAIN ET DE LA PARTICIPATION DE LA COMMUNAUTÉ

L'intensification du déploiement des mini-réseaux ne sera possible que si le capital humain évolue au même rythme que le capital financier. Des technologies et des initiatives innovantes se sont fait jour pour former les parties prenantes nécessaires qui accompagneront l'essor du secteur des mini-réseaux. ESMAP a recensé près d'une cinquantaine de programmes de formation destinés aux groupes de parties prenantes

clés dans l'écosystème des mini-réseaux, qui comptent les développeurs, les établissements financiers, les décideurs et les régulateurs. Bon nombre de ces cours ont recours aux nouvelles technologies (CASE ES.2). Par exemple, la formation à distance de LED Safari basée sur Internet, au cursus flexible, permet aux développeurs et aux gouvernements d'élaborer des programmes de certification de grande qualité et dignes de confiance. Des programmes complets de formation, qui suivent une approche de formation du formateur, comme le programme de formation complète d'IEEE Smart Village, peuvent ainsi dispenser une formation à des milliers de personnes. Ces programmes visent à créer un écosystème de connaissances et de compétences pour les parties prenantes, afin d'accompagner l'expansion rapide des mini-réseaux.

Les évaluations des besoins de capacité constituent une première étape critique dans la conception d'initiatives de formation et de renforcement des compétences. Elles révèlent les carences qui existent dans des domaines clés, que ce soit en matière d'expertise technique, de compétences en gestion, de capacité institutionnelle, de cadres politiques, de partenariats, de connaissances ou de savoir-faire de mise en œuvre. Le déroulement des évaluations des besoins se fait généralement en quatre étapes : repérer les principaux acteurs, déterminer les besoins de capacités du projet ou du portefeuille, évaluer la capacité existante et cerner les manques de capacité. Ces évaluations peuvent être effectuées en adoptant une approche à méthodes mixtes en utilisant les données existantes ou celles collectées lors d'entretiens avec des informateurs clés, des groupes de discussion et des enquêtes.

On constate des manques de connaissances et de compétences parmi tous les groupes de parties prenantes de l'écosystème des mini-réseaux. Des formations sont donc nécessaires au niveau national, des projets, des portefeuilles et de la communauté. Les formations au niveau national peuvent se concentrer sur les politiques et la régulation, la planification, la surveillance et les certifications techniques qui sont pertinentes pour la construction, l'exploitation et la maintenance de mini-réseaux. Les formations au niveau des projets et des portefeuilles peuvent renforcer les capacités des développeurs à réaliser des évaluations de site, des études de faisabilité, ainsi qu'en matière de construction, d'exploitation et de maintenance. Les formations au niveau de la communauté peuvent aider à prendre connaissance des services procurés par les mini-réseaux et à mieux les comprendre, à accroître l'adoption et l'utilisation d'appareils à usage productif et à prioriser le renforcement des capacités des femmes.

Parallèlement à cela, des stratégies de participation communautaire peuvent aider à accroître les utilisations productives de l'électricité et à stimuler la demande de services de mini-réseaux. Deux innovations ont le potentiel de réduire les coûts et d'améliorer l'efficacité des initiatives de participation communautaire :

- ESMAP a travaillé avec Quicksand Design Studio à tester une application sur smartphone et sa plateforme en ligne de style YouTube, intitulée « Mini Grid Stories ». Avec cette plateforme d'application et ce site Internet, les développeurs échangent avec les communautés à très faible coût. En suivant des instructions simples à l'écran, les clients de mini-réseaux et le personnel des entreprises de mini-réseau utilisent l'application gratuite sur smartphone pour créer des vidéos de courte durée (par exemple, sur la manière dont une cliente utilise de l'électricité dans sa petite entreprise) et les mettre à la rubrique des vidéos « Mini Grid Stories », pour qu'elles puissent être consultées, partagées et téléchargées. Cette approche s'est inspirée du succès de la plateforme agricole sur Internet, Digital Green, qui utilise des vidéos à des fins de vulgarisation agricole. Des études ont révélé que Digital Green a permis d'atteindre 24 % d'agriculteurs de plus que les approches de vulgarisation agricole traditionnelles, ce qui a entraîné une hausse de 35 % de l'adoption des pratiques préconisées, tout en augmentant de 20 % à 25 % l'accès des femmes à des informations de vulgarisation ; force est de constater que, sur la base du coût par adoption, cette méthode s'est révélée 10 fois plus rentable que des services classiques de mobilisation communautaire (Abate et autres 2018).

- La Fondation Rockefeller a lancé Smart Power India (SPI), une initiative de participation communautaire intégrée, qui vise à apporter l'électricité à un millier de villages et un million d'Indiens (Muther 2016). Cette organisation basée en Inde et dirigée par des Indiens sert d'intermédiaire entre les parties prenantes clés (y compris les développeurs, les administrations publiques nationales et locales) et des organisations communautaires (Rockefeller Foundation 2017). L'initiative de SPI s'intitule « Participation communautaire, acquisition de charge et développement de micro-entreprises » (CELAMeD). Avec l'appui de SPI, des développeurs ont élaboré des stratégies de communication et de marketing pour informer les consommateurs des avantages que présentent les énergies renouvelables et mobiliser l'essor des entreprises en milieu rural (Smart Power India 2017). SPI a apporté son soutien à l'installation de plus d'une centaine de mini-réseaux, touchant ainsi plus de 40 000 personnes (Rockefeller Foundation 2017). Un développeur travaillant avec SPI a formé plus de 140 entrepreneurs potentiels et existants, dont 30 % étaient des femmes, 40 % ont créé de nouvelles entreprises et 20 % ont élargi leurs entreprises existantes (Smart Power India 2016).

L'expérience des succès remportés par des développeurs de mini-réseaux montre que la participation de la communauté commence par des efforts de sensibilisation, avant de progresser vers l'adoption, l'exploitation productive et le marketing de bouche-à-oreille. La participation communautaire nécessite d'adopter une approche souple, de bien comprendre les caractéristiques socioéconomiques et culturelles locales et d'adapter les outils, matériels et canaux promotionnels en conséquence.¹² Le tableau ES.8 résume les principales activités de participation communautaire pour chaque phase du cycle de projet de mini-réseaux classique.

Il existe des avantages indéniables à donner la priorité aux ménages et aux petites entreprises dirigés par des femmes et à accroître la participation des femmes à des postes de direction dans les entreprises de mini-réseaux. Les mini-réseaux peuvent augmenter considérablement la productivité des femmes, surtout dans le domaine des activités agricoles et de transformation des aliments à forte intensité de main-d'œuvre et à dominante féminine. Les femmes sont entre 9 % et 23 % plus susceptibles de trouver un emploi hors du foyer suite à l'électrification (Smith 2000). L'électrification peut faire baisser les niveaux de fécondité, par une plus grande exposition à des messages télévisés (Buckley 2012). L'électrification des cliniques de santé pour l'éclairage et la réfrigération des médicaments ont un impact particulièrement bénéfique sur la santé maternelle. Les projets de mini-réseaux peuvent créer des emplois pour les femmes, tout en influant sur les modèles de prise de décisions et de leadership communautaires en nommant des femmes à des postes de direction.

ENCADRÉ ES.2

Élaborer une base de données de 50 formations destinées aux parties prenantes des mini-réseaux

ESMAP a élaboré une base de données de plus d'une cinquantaine de formations et d'établissements qui fournissent des formations pertinentes pour le secteur des mini-réseaux. Ces programmes de formation sont disponibles dans le monde entier et beaucoup peuvent être suivis à distance. Ils ciblent les décideurs et les régulateurs, les développeurs, les ingénieurs et les opérateurs. La plupart des programmes de formation délivrent un certificat officiel sanctionnant l'achèvement satisfaisant du cours.

Pour en savoir plus sur la formation et le renforcement des compétences des parties prenantes du secteur des mini-réseaux, voir le chapitre 9 de l'ouvrage (« Training & Skill Development »). Pour avoir des éclairages sur la façon de solliciter la participation de la communauté, voir le chapitre 6 (« Community Engagement »).

TABLEAU ES.8 Principales activités de participation communautaire à chaque phase d'un projet de mini-réseau

	Conception et planification	Promotion et information	Financement et passation des marchés.	Mise en œuvre et construction	Enregistrement et connexion	Exploitation et entretien
Objectifs	<p>Obtenir des renseignements sur les usagers éventuels et sur la situation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Attentes du client • Utilisation actuelle d'électricité • Conditions géographiques <p>Concevoir un mini-réseau qui est :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Socialement inclusif (structure tarifaire, satisfait aux attentes) • Techniquement solide (distribution de la charge et demande future probable) • Financièrement viable (tarif couvrant les coûts) 	<p>Renforcer la sensibilisation de la communauté aux problèmes d'accès à l'électricité</p> <p>Fournir des informations pertinentes (par ex. utilisations productives potentielles) et éveiller l'intérêt pour une adoption et une adhésion précoces</p> <p>Aider les clients potentiels dans leur décision d'enregistrement en leur fournissant des informations spécifiques détaillées (adhésion, tarif, méthodes de paiement, etc.)</p>	<p>Établir un modèle financier clair pour déterminer le montant idéal des investissements du secteur public/privé</p> <p>Établir un descriptif du projet montrant sa structure financière, l'évaluation et l'atténuation des risques, les partenaires de financement, le respect des questions réglementaires</p> <p>Procéder à la passation des marchés en s'appuyant sur des documents d'appel d'offres appropriés et une procédure transparente</p>	<p>Construire un mini-réseau solide, de la bonne capacité et évolutif</p> <p>Prévoir des dispositions pour une éventuelle expansion future (par ex. construction modulaire)</p> <p>Installer des systèmes de commande simples pour gérer les niveaux de la demande</p>	<p>Se doter d'une clientèle viable d'un facteur de charge (relativement) garanti</p> <p>Identifier à l'avance les clients clés et en assurer le raccordement</p>	<p>Assurer la fiabilité des services, en optimisant les avantages de l'investissement</p> <p>Assurer la fonctionnalité ainsi que les avantages domestiques et productifs (en offrant éventuellement des appareils ménagers et/ou à usage productif à la vente ou à la location)</p> <p>Renforcer et stimuler la capacité de service locale</p> <p>Stipuler un programme de maintenance rentable, avec des prestataires de services locaux engagés</p>
Groupes cibles	<p>Communauté</p> <p>Dirigeants locaux et autorités locales</p> <p>Institutions financières</p> <p>Organismes publics locaux et nationaux</p>	<p>Membres de la communauté</p> <p>Utilisateurs productifs</p>	<p>Institutions financières, investisseurs, organismes publics locaux et nationaux</p>	<p>Prestataires de services chevronnés</p> <p>Entreprises et main-d'œuvre locales</p>	<p>Ménages</p> <p>Entreprises et start-ups locales</p> <p>Sociétés d'exploitation</p>	<p>Ménages</p> <p>Entreprises et start-ups locales</p> <p>Sociétés d'exploitation</p>
Voies	<p>Réunions avec des institutions, des parties prenantes et la communauté locales</p>	<p>Campagne : Radio locale, presse, réseaux sociaux, brochures</p> <p>Réunions communautaires</p> <p>CSC</p>	<p>Réunions avec des institutions financières locales et nationales et l'administration locale</p>	<p>Réunions communautaires</p>	<p>Les TIC pour les connexions</p> <p>Réseaux sociaux, vidéos modes d'emploi</p> <p>CSC</p>	<p>Les TIC pour les connexions Bureau ESE</p> <p>CSC</p>
Acteurs	<p>Développeur de projet, personnel de l'ESE, chef et équipe PC</p> <p>Administrations locales, chefs communautaires</p>	<p>Développeur de projet, directeur de l'ESE, équipe PC</p> <p>Médias locaux</p>	<p>Développeur de projet, directeur de l'ESE, banques locales</p>	<p>Développeur de projet, directeur de l'ESE, techniciens et ouvriers locaux</p>	<p>Directeur et personnel de l'ESE, chef et équipe PC</p>	<p>Directeur de l'ESE et personnel technique</p> <p>Directeur PC</p>
Participation communautaire	<p>Procéder à une analyse de la communauté afin d'évaluer le consentement/ la capacité à payer et les attentes des clients potentiels, surtout en cas d'adoption de l'approche ABC</p> <p>Veiller à la participation des femmes dans toutes les activités de conception et de planification</p> <p>En solliciter la participation autour des permis et des autorisations</p> <p>Élaborer un portefeuille de clients (segmentation ABC)</p> <p>Inventaire des RH locales</p> <p>En solliciter la participation autour de l'acquisition de terres ou du droit d'utilisation</p>	<p>Réaliser une campagne de promotion et d'information portant sur les services des mini-réseaux</p> <p>Renforcer « l'éducation énergétique » des consommateurs, notamment pour comprendre les factures, l'entretien, le traitement des réclamations, les aspects liés à la sécurité, les avantages pour la santé</p> <p>Achever la segmentation de la clientèle</p> <p>Organiser éventuellement la projection de vidéos d'impact</p> <p>Attirer, organiser et inclure les femmes dans les activités de promotion et de vente</p> <p>Mobiliser les réseaux de femmes pour diffuser des informations sur les mini-réseaux</p>	<p>Achever les évaluations de consentement/ capacité à payer</p> <p>Achever la segmentation du marché (clients ABC)</p> <p>Achever la structure tarifaire</p> <p>Mobiliser des réseaux de financement de femmes pour mettre à disposition des fonds d'investissement à des ménages et entreprises dirigés par une femme</p>	<p>Recruter des RH locales</p> <p>Nouer le dialogue avec les parties prenantes futures (Clients ABC, administrations locales)</p> <p>Dispenser aux usagers une formation différenciée selon le genre aux possibilités O&M et d'utilisation productive</p>	<p>Continuer le dialogue communautaire pour favoriser l'inclusion</p> <p>Dresser l'inventaire des UPE</p> <p>Dresser l'inventaire de services d'utilité publique</p>	<p>Continuer le dialogue avec la communauté pour vérifier la satisfaction de la clientèle</p> <p>Promouvoir l'élargissement des UPE</p> <p>Préparer et partager des documents sur les impacts (y compris vidéo)</p> <p>Dispenser une formation O&M</p> <p>Au besoin, présente les conflits à une médiation</p>

Source : Analyse d'ESMAP.

Note: ABC = « Anchor-Business-Community » (que l'on peut traduire Client clé, Entreprise, Communauté) ; PC = participation communautaire ; CSC = centre de services communautaires ; ESE = entreprise de services énergétiques ; RH = ressources humaines ; TIC = technologies de l'information et des communications ; O&M = Exploitation et entretien ; UPE = utilisations productives de l'énergie.

ACCROÎTRE L'ACCÈS AU FINANCEMENT

Des investisseurs privés, tant nationaux qu'internationaux, financent des mini-réseaux de la troisième génération et stimulent des innovations dans le domaine des mécanismes de financement. Entre 2013 et 2018, des établissements financiers privés ont investi 259 millions de dollars dans des développeurs construisant des mini-réseaux dans des pays à faible revenu, principalement sous forme de capitaux propres (BNEF 2019). Des investisseurs d'impact et des investisseurs commerciaux, ainsi que des banques locales et nationales, ont mis sur pied des options de financement par participation, par endettement et mixtes pour aider les développeurs à intensifier leurs activités dans le domaine des mini-réseaux. Acumen, Bamboo Capital Partners, Crossboundary Energy, InfraCo Africa et Shell Foundation ne sont que quelques-uns des nombreux exemples d'investisseurs récents dans les mini-réseaux.

Le financement dans les mini-réseaux par les partenaires du développement, y compris la Banque mondiale, est monté en flèche, passant de millions de dollars dans les années 2000 pour se chiffrer à des milliards de dollars en 2018. Un groupe de 15 grands donateurs internationaux et partenaires du développement, dont fait partie la Banque mondiale, a pris l'engagement collectif d'investir plus de 1,3 milliard de dollars exclusivement dans les mini-réseaux (c'est-à-dire sans compter le financement pour l'assistance technique et la recherche). Six organisations se sont engagées à investir dans les mini-réseaux moyennant un montant total de plus de 100 millions de dollars : l'AFD, la Banque africaine de développement, le DFID, GIZ, la Banque islamique de développement et la Banque mondiale. Il n'en reste pas moins que le passage du stade d'engagements à celui de décaissements et d'investissements nécessitera des efforts soutenus et une collaboration étroite avec les gouvernements et le secteur privé. Le soutien des bailleurs de fonds aux mini-réseaux représente un peu plus de 10 % des 12,4 milliards de dollars du total des investissements dans les mini-réseaux prévus à l'échelle mondiale, selon l'analyse d'ESMAP des engagements de financement des bailleurs de fonds et des partenaires du développement.

La Banque mondiale s'est engagée à consacrer plus de 660 millions de dollars aux mini-réseaux au cours des cinq à sept années à venir. En juin 2019, son portefeuille de mini-réseaux comportait 37 projets dans 33 pays (29 approuvés par le Conseil des Administrateurs de la Banque mondiale et 8 à l'étude). Les plans d'investissement de ce portefeuille prévoient le déploiement de 2 200 mini-réseaux d'ici à 2025, dans la perspective d'assurer l'électrification de près de 6 millions de personnes. La mobilisation attendue du développement et des investissements du secteur privé est encore plus importante que l'impact direct, dans la mesure où elle devrait permettre d'attirer 1,1 milliard de dollars de cofinancement auprès du secteur privé, de gouvernements et de partenaires du développement.

Dans les 33 pays de son portefeuille de mini-réseaux, les engagements d'investissement de la Banque mondiale représentent en moyenne 25 % environ du total des investissements nécessaires dans les mini-réseaux dans chacun de ces pays de la part des gouvernements, du secteur privé et des partenaires du développement. Dès lors qu'on lui en fera la demande, la Banque mondiale continuera d'apporter son appui à de nouveaux projets d'accès à l'énergie bien conçus qui comportent des investissements dans

les mini-réseaux. Dans un contexte plus large, pour susciter l'effet de levier propice à la croissance exponentielle de la participation du secteur privé dans ce secteur, l'intensification des financements requerra au cours des cinq prochaines années la participation de la Banque mondiale, des partenaires du développement et des gouvernements, à un niveau d'engagement au moins similaire à celui d'aujourd'hui. À plus long terme, la proportion des fonds publics par rapport à la totalité des investissements devrait réduire progressivement à mesure que les investissements du secteur privé prendront de l'ampleur.

Les développeurs de mini-réseaux privés sont généralement confrontés à cinq grands obstacles à l'accès au financement :

- De nombreux établissements financiers privés potentiels n'ont pas d'expérience à octroyer des prêts à des mini-réseaux, ni même à des projets d'infrastructure de petite échelle, si bien qu'ils considèrent les mini-réseaux comme étant trop risqués. Par exemple, ils ne sont pas au courant des méthodes qui permettent un meilleur recouvrement des recettes, comme quand les développeurs utilisent des compteurs à prépaiement contrôlés à distance.
- Souvent, les développeurs ne sont pas en mesure de facturer les tarifs qui couvrent la totalité de leurs coûts, que ce soit parce que les consommateurs potentiels sont nombreux à ne pas avoir les moyens de payer l'entièreté des coûts de l'électricité provenant de mini-réseaux, ou parce que certains cadres réglementaires obligent les mini-réseaux à respecter le même tarif national uniforme que celui du réseau principal.
- Il est courant que les développeurs locaux à but lucratif et communautaire ne disposent pas des ressources financières nécessaires pour répondre aux obligations de capitaux propres imposées par les prêteurs conventionnels.
- Il est fréquent que des établissements locaux de financement par emprunt ne soient pas en mesure de consentir des prêts à long terme car leur modèle de fonctionnement repose sur des dépôts et des prêts à court terme.¹³
- Les incertitudes qui entourent la situation macro-économique future (en particulier, celles tenant aux risques réglementaires, aux taux de change, aux taux d'intérêt et au taux de croissance de l'économie) ont un effet dissuasif sur les décisions d'investissement.

Des gouvernements et des partenaires du développement sont en train de mettre sur pied des montages financiers destinés à permettre aux développeurs de mini-réseaux de surmonter ces obstacles et à financer l'intensification du déploiement des mini-réseaux. Les montages financiers varient (consistant en différentes combinaisons de prise de participation, de crédits, de subventions et de mécanismes de partage des risques) selon le type de développeurs de mini-réseaux auquel ils s'adressent. Les grandes entreprises internationales et locales ont tendance à avoir largement accès à des prises de participation et des crédits, ce qui n'est pas le cas pour celles de plus petite taille, généralement locales. Il est possible que les entreprises dirigées par des femmes et les développeurs de projet requièrent un montage de soutien élargi, dans la mesure où souvent, les femmes sont confrontées à encore plus d'obstacles à l'accès au financement.

Trois innovations en matière d'investissements sous forme de *prise de participation* pour les mini-réseaux se font jour :

- l'« equity crowdfunding », cette forme de financement participatif où les développeurs offrent de petits titres de participation à un très grand nombre d'investisseurs par le biais d'une plate-forme en ligne
- le financement mezzanine (comme des obligations convertibles), où le prêteur a le droit de convertir son prêt en une participation en actions dans l'entreprise
- la prise de participation à vocation sociale, où les investisseurs prennent une participation dans une entreprise, mais acceptent un rendement financier moindre en contrepartie d'impacts sociaux mesurables.

Une ligne de crédit initiale constitue une intervention courante de facilitation de crédits dans le cadre de projets recevant l'appui de donateurs. Dans le cadre de ce mécanisme de prêt multiniveaux, le gouvernement reçoit des fonds de partenaires du développement, comme la Banque mondiale, sélectionne des institutions financières participantes qualifiées (IFP) intéressées à l'idée de financer des mini-réseaux et rétrocède les fonds des partenaires du développement aux IFP dans la monnaie locale en ayant recours à des prêts de longue durée et à des taux d'intérêt conformes à ceux du marché. Les IFP se chargent alors de consentir à des développeurs de mini-réseaux des prêts libellés et remboursés dans la monnaie locale, à des taux d'intérêt conformes au marché et pour des durées plus longues que celles ordinaires. Les IFP assument le risque commercial du prêt, dans la mesure où elles remboursent le gouvernement même en cas de défaut du développeur de mini-réseau à rembourser son prêt, sauf dans les cas où le prêt s'accompagne d'un mécanisme de garantie, qui peut aussi être une option. L'encadré ES.3 présente un exemple de facilité de crédit soutenue par le gouvernement au Bangladesh.

Deux innovations de financement de la dette sont récemment apparues pour les mini-réseaux du secteur privé :

- Dans le cadre d'une obligation convertible, un prêt peut être converti en actions à des conditions qui sont favorables au prêteur, réduisant ainsi le taux d'intérêt du prêt.
- Dans le cadre de prêts de pair à pair, le développeur de mini-réseaux emprunte, sans sûreté, auprès d'un groupe d'individus ou d'organismes prêteurs, par l'intermédiaire d'une plate-forme de prêt en ligne.

Quatre types de subventions peuvent aider les développeurs et les clients de mini-réseaux à financer leurs coûts :

- des subventions de pré-investissement, comme des études de marché et des évaluations de ressources, des études de planification géospatiale, de pré-faisabilité et de faisabilité, et l'assistance technique
- des subventions du coût en capital, fixées à l'avance comme constituant une part « raisonnable » du coût en capital ou reposant sur les offres de subventions les moins élevées.
- des subventions du coût de raccordement, versées soit au développeur soit à ses clients, sous forme soit de dons, soit de prêts à des conditions de faveur
- des subventions à l'utilisation, y compris des subventions comprises dans la structure tarifaire, comme des tarifs minimaux, et des subventions versées aux clients pour l'achat d'appareils électroménagers et de matériel électromécanique à haut rendement énergétique.

Chacune de ces subventions présente ses avantages et ses inconvénients et chacune s'accompagne d'objectifs qui lui sont propres, qu'il appartient aux gouvernements et aux partenaires du développement d'évaluer au moment de décider de celle à mettre en œuvre, le cas échéant. Le chapitre 8 de l'ouvrage fournit une analyse détaillée des avantages et des inconvénients et des différences entre les objectifs de chaque mécanisme de subvention. Les développeurs cherchent aussi à obtenir des subventions de démarrage, telles que celles fournies à l'issue d'un processus de mise en concurrence de plans d'affaires, pour les aider à mettre au point et à démontrer des innovations en matière de technologies et de modèles de fonctionnement.

Des subventions basées sur les performances peuvent réduire considérablement le coût de l'électricité provenant de mini-réseaux et rendre ainsi les services de mini-réseaux d'un coût abordable pour un plus grand groupe d'utilisateurs finaux. Selon l'analyse d'ESMAP, une subvention de 40 % du coût en capital fait baisser le coût actualisé de l'énergie (LCOE) de 0,55 dollar/kWh à 0,43 dollar/kWh dans un scénario avec de très faibles utilisations productives de l'électricité (tableau ES.9). Dans un scénario où les utilisations productives augmentent de 40 % le facteur de charge, la même subvention de 40 % du coût en capital fait baisser le LCOE de 0,42 dollar/kWh à 0,34 dollar/kWh.

TABLEAU ES.9 Incidence des subventions basées sur la performance des dépenses en immobilisations sur le coût actualisé de l'électricité, 2018 et 2030

Facteur de charge (en pourcentage)	Part des subventions basées sur la performance des CAPEX (en pourcentage)	2018 (dollar/kWh)	2030 (dollar/kWh)
22	0	0,55	0,33
22	40	0,43	0,23
22	60	0,37	0,19
40	0	0,42	0,22
40	40	0,34	0,15
40	60	0,31	0,12
80	0	0,35	0,23
80	40	0,31	0,19
80	60	0,29	0,17

Source : Analyse d'ESMAP.

Note: Les données pour le coût actualisé de l'électricité sont celles pour un mini-réseau solaire hybride bien conçu de 294 kilowatts de puissance de sortie stable desservant plus de 5 000 personnes. Une description détaillée de l'analyse sous-jacente figure au chapitre 8 de l'ouvrage principal. CAPEX = dépenses d'investissement ; kWh = kilowatt-heure.

Les subventions basées sur les performances pour les mini-réseaux, qui reposent sur un pourcentage des coûts du raccordement de nouveaux clients pour le développeur, sont souvent inférieures à la subvention implicite ou explicite versée au réseau principal pour chaque nouveau raccordement.

Comme le tableau ES.9 le montre, une subvention basée sur la performance équivalente à 40 % des coûts de raccordement d'un développeur permettrait à celui-ci de facturer aux clients un tarif qui serait de 11 % à 22 % inférieur à celui de son LCOE non subventionné. En attendant, une enquête réalisée auprès de 39 sociétés nationales d'électricité en Afrique a montré que les subventions explicites ou implicites qu'elles reçoivent leur permettent de vendre l'électricité à des prix qui étaient en moyenne de 41 % (jusqu'à 80 %) inférieurs au LCOE non subventionné des sociétés publiques d'électricité (Trimble et autres, 2014 ; Kojima et Trimble, 2016). Cela indiquerait que beaucoup de sociétés nationales d'électricité en Afrique touchent des subventions implicites qui correspondent à plus de 40 % de leurs coûts de raccordement. Dans la mesure où le coût de raccordement de la société nationale d'électricité dépasse souvent 2 000 dollars dans les régions rurales (Trimble et autres 2014; Blimpo et Cosgrove-Davies 2019), il est donc probable que beaucoup de sociétés nationales d'électricité en Afrique reçoivent des subventions de coûts implicites d'un montant supérieur à 800 dollars par raccordement. Pour mettre ce chiffre en perspective, dans l'étude détaillée qu'a réalisée ESMAP sur les coûts de 53 mini-réseaux opérationnels en Afrique et en Asie, le coût moyen par raccordement était de 1 988 dollars, et pour 12 d'entre eux, celui-ci était inférieur ou égal à 1 000 dollars environ. Dans la base de données ESMAP, plus de 7 500 mini-réseaux planifiés, le coût de raccordement moyen s'élevait à 2 175 dollars. Par conséquent, une subvention basée sur la performance équivalente à 40 % des coûts de raccordement d'un développeur de mini-réseaux représenterait environ 400 à 900 dollars par raccordement.

Le financement basé sur la performance peut aider les développeurs de mini-réseaux à pallier le déficit de viabilité, mais il doit tenir compte des questions d'équité entre hommes et femmes.

Ces dernières années, de nombreux gouvernements ont accordé des subventions basées sur la production ou sur les résultats. Certains octroient des subventions pour chaque raccordement, en versant aux développeurs un montant fixe pour chaque nouveau raccordement qu'ils effectuent dans un délai minimum (par exemple, l'Agence d'électrification rurale au Nigeria y a recours dans le cadre du projet d'électrification du Nigeria qui reçoit le soutien de la Banque mondiale - voir l'encadré ES.3). Des subventions pour chaque raccordement peuvent aussi s'accompagner de mesures d'aide pour raccorder les clients à utilisation productive (ce qu'a l'intention de faire le ministère des Travaux publics d'Haïti dans le cadre du projet soutenu par la Banque mondiale

« Énergies Renouvelables pour Tous », et du programme d'intensification des énergies renouvelables). Néanmoins, il est indispensable que les mécanismes d'appui au raccordement prennent en considération les questions d'équité liées au genre. Si les coûts de raccordement sont trop élevés pour les ménages dirigés par des femmes, ou si la connexion au mini-réseau nécessite un titre foncier ou une preuve de garantie, les avantages pour les clients de l'électricité provenant de mini-réseaux afficheront des disparités entre hommes et femmes.

Il convient toutefois d'appliquer avec prudence les subventions basées sur la performance, car les développeurs auront du mal à financer le coût en capital initial s'ils doivent compter exclusivement sur la production finale. Il est par conséquent raisonnable de fixer des résultats intermédiaires (comme des commandes d'achat ou l'arrivée de marchandises sur le site) comme base de déclenchement des premiers versements de la subvention. Les subventions du coût en capital peuvent aussi avoir pour effet d'atténuer les avantages de l'essor des utilisations productives de l'électricité. Bien que l'impact combiné sur le LCOE des subventions et des utilisations productives soit généralement supérieur aux unes ou aux autres prises séparément, leur effet cumulé peut augmenter le LCOE lorsque les dépenses de fonctionnement sont élevées par rapport aux dépenses d'investissement.¹⁴

Il est important que tout régime de subvention s'accompagne d'une politique de sortie/de retrait progressif. Le besoin de subventions devrait diminuer au fil du temps, sous l'effet des trois facteurs suivants, si ce n'est plus :

- L'expérience acquise devrait permettre aux établissements financiers d'évaluer les risques de façon plus précise et d'atténuer leur perception des risques. Ainsi, on peut s'attendre à une hausse de la disponibilité de financement par des emprunts ou des prises de participation.
- La nécessité de subventions de pré-investissement devrait reculer à mesure que les développeurs de mini-réseaux deviendront plus actifs sur des marchés donnés.
- Les coûts sont susceptibles de diminuer à mesure que les entreprises acquerront de l'expérience et que le secteur prendra de l'ampleur.

Toutefois, en même temps que les mini-réseaux s'implanteront dans les zones plus reculées et plus pauvres, on peut s'attendre à une accessibilité financière encore plus limitée, réduisant ainsi la possible disparition progressive des subventions.

Les interventions visant à atténuer les risques constituent le quatrième élément constitutif d'un montage financier réussi pour accompagner l'expansion des mini-réseaux. On recense trois interventions pour y parvenir :

- des mécanismes de partage des risques, comme des garanties de première perte, *pari passu*, et de dernière perte
- des garanties des risques politiques ou des régimes d'assurance
- des instruments financiers qui réduisent les risques de change, comme des couvertures de change complètes ou partielles (où le taux de change est bloqué pour tout ou partie de la durée de l'investissement) ou des instruments d'assurance couvrant ces risques

L'expérience de ces interventions est limitée au secteur de mini-réseaux. Elles seraient pourtant très utiles pour planifier le développement de mini-réseaux à grande échelle.

ENCADRÉ ES.3

Innovation pionnière : Le financement basé sur les résultats au Nigeria et le financement par emprunt soutenu par le gouvernement au Bangladesh

Au Bangladesh, les mini-réseaux du secteur privé peuvent s'adresser à une institution financière qui appartient à l'État : Infrastructure Development Company Limited (IDCOL), qui a reçu un soutien financier de la Banque mondiale, pour faire la demande de subventions et de financement par emprunt. Lorsqu'il soumet une proposition à un contrôle diligent, IDCOL consulte le conseil d'électrification rurale pour déterminer à quelle date il est probable que le réseau principal desserve le site proposé. IDCOL examine également d'autres facteurs qui influent sur la viabilité du projet, notamment le possible consentement à payer des clients et le caractère raisonnable des estimations de coûts. Si une proposition est approuvée, IDCOL accorde une subvention de 50 % du coût en capital. L'institution peut aussi consentir des prêts qui correspondent à 30 % du coût en capital. Les prêts sont consentis pour 10 ans, avec une période de grâce de deux ans et un taux d'intérêt annuel de 6 % (inférieur au taux du marché). IDCOL a déboursé 27 millions de dollars à l'appui de 29 mini-réseaux d'une capacité totale de 5,03 mégawatts. Vingt mini-réseaux sont en exploitation, le restant devant entrer en service d'ici la fin de 2019.

Près de 80 millions de personnes au Nigeria n'ont pas accès à l'électricité. Pour y remédier, l'Agence d'électrification rurale du Nigeria (REA) met en œuvre le projet d'électrification du Nigeria (NEP) soutenu par la Banque mondiale, qui vise à accroître les investissements dans des solutions à base de mini-réseaux et hors réseau. Le 15 avril 2019, la REA a lancé les composantes mini-réseau et systèmes solaires à usage domestique du projet NEP. La composante mini-réseau vise à élargir des services d'électricité à 300 000 ménages et à 30 000 entreprises dans les zones rurales d'ici à 2023. Cette composante pilotée par le secteur privé accorde aux développeurs de mini-réseaux des subventions compensatoires (dites « viability gap subsidies »), pour combler le déficit de viabilité. Le premier guichet distribuera des subventions compensatoires à 250 sites choisies par la REA à l'issue d'un appel d'offres de subventions minimales pour contribuer au démarrage de l'expansion à grande échelle du secteur. Au titre du deuxième guichet, les développeurs peuvent postuler à des subventions basées sur la performance de 350 dollars par raccordement pour les sites de leur choix sur une base glissante.

Pour en savoir plus sur les options de financement pour les mini-réseaux, voir le chapitre 8 de l'ouvrage (« Access to Finance »).

APERÇU DU MARCHÉ MONDIAL ET SES PERSPECTIVES JUSQU'EN 2030

Le marché mondial des mini-réseaux consiste en plus de 26 000 mini-réseaux installés et planifiés, répartis dans plus de 130 pays du monde entier. ESMAP a recensé 19 163 mini-réseaux dans 134 pays et territoires, desservant près de 47 millions de personnes (tableau ES.10). La plupart de ces mini-réseaux sont des mini-réseaux de première et deuxième générations et près de la moitié de la capacité installée provient de générateurs alimentés au diesel et à d'autres combustibles, 20 % étant issus de l'énergie hydroélectrique et 13 % de l'énergie solaire. On compte 7 507 autres mini-réseaux dont le développement est planifié dans 57 pays et territoires ; la plupart d'entre eux sont des mini-réseaux de troisième génération.¹⁵ Ces chiffres sont nettement plus élevés que les estimations précédentes données par de grands cabinets d'études de marché. On s'attend à ce qu'une plus grande part de la capacité de production à base des énergies renouvelables provienne des mini-réseaux planifiés, les modèles hydroélectriques représentant 46 % de la capacité planifiée et les modèles solaires 40 %.

Deux fois plus de mini-réseaux à système solaire photovoltaïque ont été construits entre 2014 et 2018 qu'au cours de la période entre 2009 et 2013. Sur ces mêmes périodes, quasiment le même nombre de

Tableau ES.10 Données sur les projets de mini-réseaux installés, par région

Région	Nombre de mini-réseaux	Nombre de raccordements (millions)	Nombre de personnes (millions)	Nombre de développeurs recensés	Coût en capital médian (\$/kW)	Total de la capacité (MW)	Total des investissements (millions de dollars)
Asie du Sud	9 339	2,9	16,2	537	1 850	298	632
Asie de l'Est et Pacifique	6 905	2,9	12,1	4 158	4 379	1 721	8 236
Afrique	1 465	3,0	14,9	479	6 668	783	3 966
Europe et Asie centrale	594	0,1	0,3	56	5 015	1 007	5 050
Etats-Unis et Canada	519	0,2	0,6	246	3 973	2 152	8 551
Amérique latine et Caraïbes	283	0,7	2,7	188	3 800	456	1 632
Moyen-Orient et Afrique du Nord	31	0,1	0,1	17	3 387	32	110
Autres territoires insulaires	27	> 0,1	> 0,1	9	3 986	31	125
Total dans le monde	19 163	10,1	46,9	5 690	4 410	6 481	28 302

Source : Analyse ESMAP.

Note : Il existe peu de données pour les régions Europe et Asie centrale, Amérique latine et Caraïbes, et Moyen-Orient et Afrique du Nord, où le nombre de mini-réseaux risque d'être considérablement plus élevé que ceux indiqués dans le tableau. Une description détaillée des sources des données et de leur analyse figure au chapitre 2 de l'ouvrage principal. KW = kilowatt; MW = mégawatt.

mini-réseaux fonctionnait en tout ou en partie au diesel. L'augmentation des projets solaires s'explique par la baisse du coût des composants pour les mini-réseaux solaires hybrides, surtout celui des panneaux solaires et des batteries, qui a incité les développeurs à inclure le solaire photovoltaïque dans leur mix de production. À l'avenir, plus de 85 % de la capacité des mini-réseaux planifiés proviendront de l'énergie solaire et hydroélectrique.

L'hybridation des mini-réseaux existants fonctionnant au diesel représente un marché de plusieurs milliards de dollars. ESMAP estime que la capacité installée du marché théorique des mini-réseaux au diesel se situe entre 1,6 GW et 4,6 GW. En reprenant des coûts d'investissement estimés de 5 100 dollars/kW pour l'hybridation des mini-réseaux au diesel, basés sur les coûts réels d'hybridation de mini-réseaux au diesel au Kenya (Carbon Africa Limited et autres 2015), le potentiel du marché mondial de l'hybridation des mini-réseaux au diesel se chiffre entre 8 et 23 milliards de dollars.

Dans la base de données, cinq pays comptent plus d'un millier de mini-réseaux installés : l'Afghanistan, le Myanmar, l'Inde, le Népal et la Chine. Comme le tableau ES.11 le montre, avec près de 5 000 mini-réseaux installés, l'Afghanistan compte le plus grand nombre de mini-réseaux de n'importe quel pays dans la base de données. Si certes les 10 premiers pays représentent 89 % de la totalité des mini-réseaux installés, les deux premiers pays représentent près de la moitié (47 %) de la totalité des mini-réseaux installés.

Tableau ES.11 Classement des pays pour les indicateurs clés de mini-réseaux installés

N°	Nombre de mini-réseaux	Nombre de personnes (millions, et % de la population)	Coût en capital médian (\$/kW)	Total de la capacité (MW)	Total des investissements (millions de dollars)	Nombre de développeurs	Portefeuilles de développeurs (mini-réseaux par portefeuille, et pays)
1	Afghanistan (4 980)	Afghanistan (8, 21 %)	Mexique (1 456 \$)	États-Unis (1 594)	États-Unis (6 332 \$)	Myanmar (3 986)	NPC-SPUG (750, Philippines)
2	Myanmar (3 988)	Philippines (7, 7 %)	Chili (1 667 \$)	Russie (671)	Russie (3 364 \$)	Népal (440)	ONU-HABITAT (646, Afghanistan)
3	Inde (2 800)	Inde (6, <1 %)	Afghanistan (1 850 \$)	Canada (558)	Canada (2 219 \$)	États-Unis (217)	Réseau de développement Aga Khan (551, Afghanistan)
4	Népal (1 519)	Madagascar (4, 14 %)	Kenya (2 102 \$)	Chine (472)	Chine (2 068 \$)	Mali (124)	CARE International (543, Afghanistan)
5	Chine (1 184)	Tanzanie (3, 5 %)	RDC (2 320 \$)	Philippines (397)	Philippines (2 035 \$)	Pérou (96)	RAO Energy (500, Russie)
6	Philippines (896)	D. R. Tanzanie (3, 3 %)	Ouganda (2 435 \$)	Australie (287)	Madagascar (1 167 \$)	Burkina Faso (93)	BRAC (422, Afghanistan)
7	Indonésie (583)	Népal (2, 6 %)	Tanzanie (2 680 \$)	Japon (219)	Australie (1 092 \$)	Cambodge (50)	Afghan Aid (344, Afghanistan)
8	Russie (501)	Myanmar (1, 3 %)	Myanmar (2 707 \$)	Madagascar (175)	Corée du Sud (1 072 \$)	Tanzanie (47)	Comité international de secours (344, Afghanistan)
9	États-Unis (391)	Pérou (0,9, 3 %)	Cambodge (2 986 \$)	Tanzanie (158)	Japon (958 \$)	Afghanistan (42)	Comité suédois pour l'Afghanistan (312, Afghanistan)
10	Sénégal (272)	Chine (0,8, <1 %)	Indonésie (3 000 \$)	Inde (138)	Espagne (487)	Haïti (36)	People in Need (221, Afghanistan)
Total (% du total mondial)	17 114 89 %	35,0 75 %	s.o.	4 668 72 %	20 794 73 %	5 131 90 %	4 633 mini-réseaux (24 %)

Source : Analyse d'ESMAP

Note : kW = kilowatts; MW = mégawatts; s.o. = sans objet.

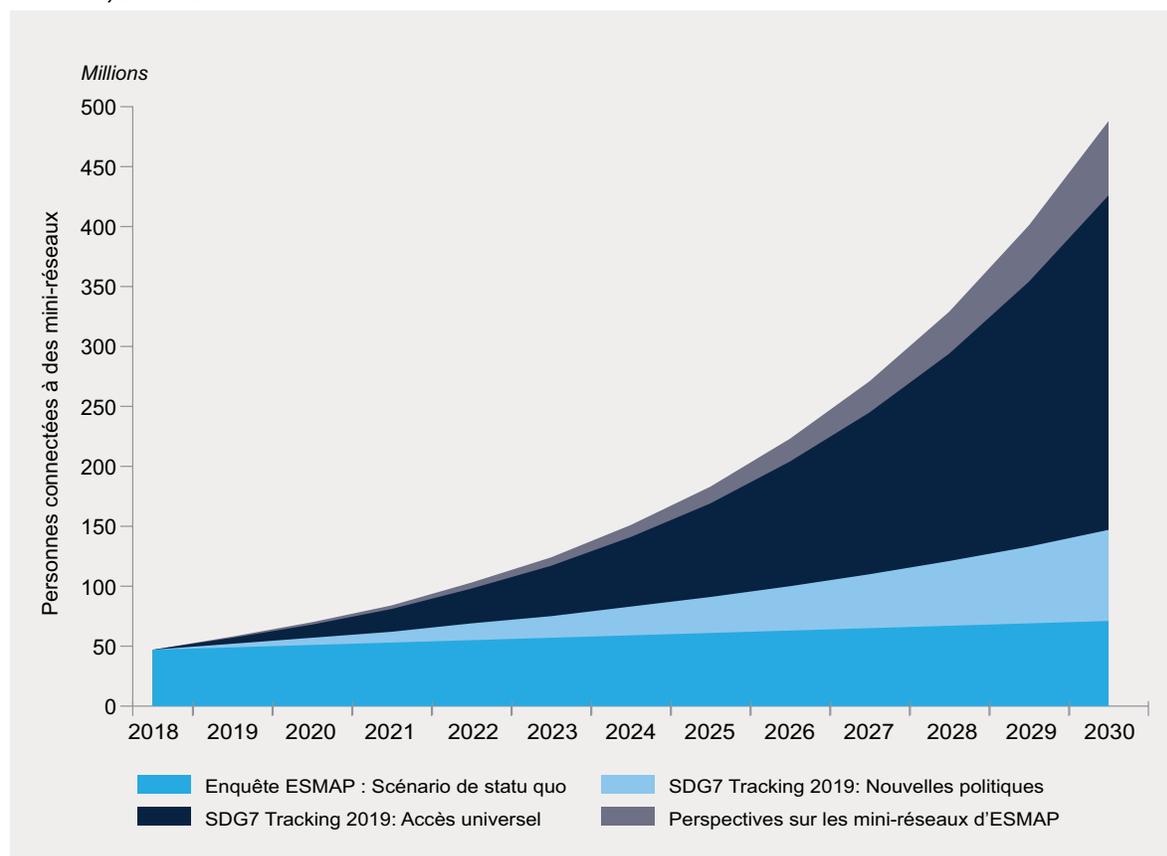
En Afghanistan, où des ONG ont développé des centaines de petits mini-réseaux, la taille médiane de la capacité installée des mini-réseaux est de 11 kW, desservant 152 raccordements ; au Myanmar, la capacité médiane des mini-réseaux est de 15 kW, desservant 79 raccordements ; et en Inde, la capacité installée médiane des mini-réseaux est de 32 kW et dessert 123 raccordements (ici encore, en utilisant les valeurs médianes des données ESMAP).

En dépit de ces tendances positives, la réalisation de l'accès universel à l'électricité nécessitera de construire plus de 210 000 mini-réseaux d'ici à 2030, pour raccorder 490 millions de personnes, à un coût en capital de près de 220 millions de dollars. En attendant, d'après l'analyse d'ESMAP des projets de mini-réseaux qui figurent dans sa base de données, l'allure actuelle du développement des mini-réseaux devrait permettre de créer 31 143 mini-réseaux desservant 71,5 millions de personnes, moyennant un coût d'investissement total de 47 milliards de dollars d'ici à 2030 (figure ES.8). Ce scénario de statu quo suppose que le développement en 2018-2030 suive la même trajectoire de croissance que les données pour la période 2007-2017 issues de la base de données d'ESMAP.

Les scénarios sur les perspectives de marché sont informés par les travaux de recherche les plus récents provenant de l'initiative de suivi de l'ODD7. ESMAP a élaboré les scénarios d'accès universel pour le marché des mini-réseaux entre 2018 et 2030 en utilisant les prévisions mondiales qui figurent dans le rapport de 2019 *Tracking SDG7* (Banque mondiale et autres 2019), ainsi que les données de sa propre base de données de plus de 26 000 mini-réseaux installés et planifiés, et celles de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2017). Les principales hypothèses pour les trois scénarios au-delà du scénario de statu quo d'ESMAP sont les suivantes :

- Le scénario « *SDG7 Tracking 2019: New Policies* » suit le scénario « New Policies » du tout dernier rapport *SDG7 Tracking* qui prévoit la poursuite des actuelles politiques d'électrification nationale et la mise en œuvre des politiques planifiées jusqu'en 2030, se soldant par l'accès à l'électricité sous toutes ses sources pour 570 millions personnes en plus partout dans le monde, ce qui devrait se traduire par un taux d'électrification mondial de 92 %. Il reprend aussi les estimations de l'AIE que 26 % des personnes ainsi connectées le seront par le biais de mini-réseaux à un coût de plus de 3 500 dollars par raccordement¹⁶ (AIE 2017). Ce scénario envisage 147 millions de personnes connectées à 64 000 mini-réseaux à un coût en capital total de 105 milliards de dollars d'ici à 2030.
- Le scénario « *SDG7 Tracking 2019: Universal Access* » reprend les toutes dernières estimations de suivi de l'ODD7 qui indiquent que, pour parvenir à l'accès universel, il faudra que 1,2 milliard de personnes gagnent accès à l'électricité entre 2019 et 2030. Il utilise l'estimation de l'AIE que 35 % de ces personnes obtiendront l'accès à l'électricité par le biais de mini-réseaux à un coût de plus de 3 300 dollars par raccordement (AIE, 2017). Ce scénario envisage presque 430 millions de personnes connectées à plus de 185 000 mini-réseaux à un coût d'investissement de plus de 280 milliards de dollars.
- Le scénario « *Perspectives sur les mini-réseaux d'ESMAP* », quant à lui, utilise lui aussi les dernières estimations du suivi de l'ODD7 selon lesquelles, pour parvenir à l'accès universel, il faudra assurer l'électrification de 1,2 milliard de personnes entre 2019 et 2030. Ce scénario repose toutefois sur l'analyse des coûts présentée dans le présent rapport, qui prévoit d'importantes réductions des coûts pour les mini-réseaux d'ici à 2030. C'est ce qui explique que ce scénario utilise un coût par raccordement de 2 175 dollars, qui correspond à la moyenne pour l'ensemble des 7 500 mini-réseaux planifiés dans la base de données ESMAP et est plus proche du coût par raccordement que BNEF utilise dans son scénario d'accès universel (autour de 1 500 dollars) que des actuelles projections du coût de raccordement de l'AIE (BNEF 2018). Suite à la baisse des coûts prévue, le scénario des « Perspectives sur les mini-réseaux d'ESMAP » suppose que les mini-réseaux constituent l'option la moins coûteuse pour 40 % des 1,2 milliard de personnes qui devront

FIGURE ES.8 Nombre de personnes connectées à des mini-réseaux dans le scénario de statu quo et celui d'accès universel, 2018-2030



Source : Analyse d'ESMAP.

Note : Une description détaillée de l'analyse sous-jacente figure au chapitre 2 de l'ouvrage principal. ESMAP = Programme d'assistance à la gestion du secteur énergétique ; ODD7 = Objectif de développement durable n° 7.

obtenir l'accès à l'électricité d'ici à 2030. Ce scénario envisage 488 millions de personnes connectées à 213 000 mini-réseaux à un coût d'investissement de 217 milliards de dollars.

L'écart entre le scénario de statu quo et le scénario d'accès universel d'ESMAP est considérable. Le scénario des « Perspectives sur les mini-réseaux d'ESMAP » suggère que pour atteindre l'accès universel, il faudra raccorder 420 millions de personnes supplémentaires, moyennant un investissement supplémentaire de 170 milliards de dollars, et construire 180 000 mini-réseaux de plus que les chiffres indiqués dans le scénario « Enquête ESMAP : Scénario de statu quo ». Les mini-réseaux ne sont que l'une des trois principales solutions pour parvenir à l'accès universel à l'électricité d'ici à 2030, les deux autres étant les extensions du réseau principal et les systèmes solaires à usage domestique. L'écart entre les coûts d'investissement et le nombre de mini-réseaux indiqué concerne les personnes qui sont mieux desservies par des mini-réseaux plutôt que par l'extension du réseau principal et des systèmes solaires à usage domestique.

La réalisation de l'accès universel à l'électricité exigera une augmentation phénoménale du nombre annuel de déploiements de mini-réseaux. L'expansion requise passe de quelques dizaines à des centaines de milliers de mini-réseaux par an (tableau ES.12) dans le cadre du scénario « Perspectives sur les mini-réseaux d'ESMAP ».

TABLEAU ES.12 Objectifs du nombre de mini-réseaux à construire d'ici à 2030 envisagés dans les Perspectives sur les mini-réseaux d'ESMAP

Année	Nombre cumulé de mini-réseaux dans le monde	Nombre annuel de mini-réseaux nécessaires à l'échelle mondiale ^a	Nombre annuel de mini-réseaux requis dans chacun des 20 pays affichant le plus grand déficit d'accès à l'électricité ^b
Point de référence 2018	19 163	Environ 1 000	10 à 50
D'ici à 2020	28 600	5 200	> 200
D'ici à 2025	78 000	14 200	> 500
D'ici à 2030	212 700	38 700	> 1 500

Source : Analyse d'ESMAP.

Note :

- a. Nombre de mini-réseaux à l'année cible moins le nombre de mini-réseaux de l'année précédente dans les Perspectives sur les mini-réseaux d'ESMAP.
- b. Sur la base de l'affectation de 80 % du nombre annuel de mini-réseaux ajoutés partout dans le monde aux -20 premiers pays ayant le plus grand déficit d'accès à l'électricité qui, à eux tous, représentent environ 80 % de la population mondiale non électrifiée.

Pour en savoir plus sur l'actuel marché des mini-réseaux et ses perspectives jusqu'en 2030, voir le chapitre 2 de l'ouvrage (« Mini Grids Today: Where We Are, Where We Are Headed, and Where We Need to Go »).

PASSER AUX ACTES

OBJECTIFS ET BUTS GLOBAUX DU SECTEUR

En adoptant un processus itératif collaboratif, ESMAP et des chefs de file du secteur des mini-réseaux (dont l'AMDA et des partenaires du développement) ont recensé conjointement cinq moteurs du marché qui permettront au secteur d'atteindre ses objectifs d'électrification universelle :

- réduire le coût des mini-réseaux solaires hybrides (ce que soutiennent aussi les quatre autres moteurs du marché) ;
- accroître l'allure du déploiement grâce à une approche de portefeuille pour le développement des mini-réseaux ;
- fournir un service d'excellente qualité ;
- utiliser comme effet de levier le financement des partenaires du développement et les investissements des gouvernements pour mobiliser les financements du secteur privé ;
- créer un environnement commercial favorable aux mini-réseaux dans les principaux pays en déficit d'accès.

Les gouvernements peuvent soutenir le secteur, avec l'aide de partenaires du développement, y compris ESMAP, en vue de réaliser des objectifs clairs et mesurables pour chacun des cinq moteurs du marché qui lui permettront de connecter 490 millions de personnes d'ici à 2030. Les objectifs pour 2030 sont les suivants :

- réduire le LCOE de l'électricité provenant de mini-réseaux à 0,20 dollar/kWh
- construire environ 1 500 projets dans chaque grand pays en déficit d'accès d'ici à 2030 et ramener à cinq semaines le temps qu'il faut pour construire un mini-réseau
- fournir un service d'excellente qualité, avec plus de 97 % de temps pour un niveau d'accès d'ici à 2030, et augmenter le facteur de charge moyen de 45 % dans l'ensemble du secteur
- attirer près de 220 milliards de dollars d'investissement de la part des partenaires de développement, des gouvernements et du secteur privé
- rehausser le score RISE moyen dans les 20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité à 80 sur 100

Le tableau ES.13 présente les objectifs pour 2020, 2025 et 2030. Ces objectifs ne sont pas à prendre au pied de la lettre pour chaque pays et chaque développeur de mini-réseaux. Il s'agit plutôt de buts qui sont certes ambitieux mais réalisables, qui ont reçu l'appui d'une multitude de parties prenantes et qui, s'ils sont atteints, pourraient aider concrètement le secteur à atteindre l'échelle nécessaire pour connecter un demi-milliard de personnes d'ici à 2030.

Pour plus d'informations sur les objectifs de l'ensemble du secteur, voir l'introduction de la partie II de l'ouvrage.

TABLEAU ES.13 Objectifs à atteindre par le secteur des mini-réseaux d'ici à 2020, 2025 et 2030

Objectif/indicateur	Ce qui est mesuré	Point de référence 2018	Objectif		
			2020	2025	2030
1. Accroître l'allure du déploiement des mini-réseaux					
Délai entre le bon de commande et la mise en service (semaines)	Cohorte de développeurs leaders du secteur privé	6–12	7	6	5
Délai entre l'arrivée des marchandises sur le site et la mise en service (semaines)	Cohorte de développeurs leaders du secteur privé	6–12	5	4	3
Mini-réseaux par portefeuille par an	Portefeuilles d'agences d'électrification rurale, de compagnies publiques d'électricité, de développeurs privés ou d'associations du secteur	10–50	> 100	> 250	> 750
2. Fournir un service d'excellente qualité					
Normes sectorielles pour des spécifications techniques minimales	Associations du secteur	À l'étude	Élaborée pour les mini-réseaux solaires hybrides	Élaborée pour les mini-réseaux solaires hybrides et hydroélectriques	Élaborée pour les mini-réseaux de toutes les énergies renouvelables
Normes sectorielles pour la fiabilité de l'approvisionnement en électricité	Échantillon représentatif de développeurs de mini-réseaux	90 à 97 % de temps de disponibilité	97 % de temps de disponibilité lors des heures de disponibilité promises	97 % de temps de disponibilité de l'électricité en 24/7	99 % de temps de disponibilité de l'électricité en 24/7y
Satisfaction de la clientèle (en pourcentage)	Échantillon représentatif de clients de mini-réseaux	82–84	85	88	90
Facteur de charge moyen dans l'ensemble du secteur (pourcentage)	Échantillon représentatif de développeurs de mini-réseaux	22	25	35	45
3. Créer un environnement commercial favorable aux mini-réseaux dans les principaux pays en déficit d'accès					
Score RISE moyen pour le cadre des mini-réseaux dans les 20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité	20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité	59	60	70	80
Score moyen Doing Business dans les 20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité	20 premiers pays en déficit d'accès à l'électricité	52	55	65	75
4. Mobiliser le financement des gouvernements et du secteur privé					
Ratio du financement gouvernemental et privé par rapport au financement par les bailleurs de fonds	Cohorte des plus grands partenaires du développement	1,7/1	2/1	5/1	10/1
Ratio des investissements des développeurs par rapport au financement par les bailleurs de fonds	Cohorte de développeurs leaders du secteur privé	7/1	8/1	9/1	10/1
Milliards de dollars investis	Somme de tous les financements pour les mini-réseaux dans un pays	28	40	93	217
5. Réduire les coûts de l'énergie solaire hybride					
Coût actualisé de l'énergie (\$/kWh)	Moyenne parmi une cohorte de grands développeurs de mini-réseaux	0.55	0.30	0.25	0.20

Source : Analyse d'ESMAP.

Note : Une discussion détaillée de l'analyse sous-jacente pour chaque objectif est présentée dans l'introduction à la partie II de l'ouvrage principal. kWh = kilowattheure, RISE = Indicateurs réglementaires pour une énergie durable.

Les objectifs présentés au tableau ES.13 sont certes ambitieux, mais ils sont réalisables si les développeurs de mini-réseaux, les gouvernements, les partenaires du développement et d'autres parties prenantes travaillent ensemble à l'expansion des mini-réseaux. Pour accroître le rythme du déploiement, il faut des innovations entrepreneuriales, comme la création de portefeuilles de mini-réseaux, ainsi que des efforts concertés de la part des gouvernements pour qu'il soit plus facile pour les développeurs de planifier, de configurer et d'exploiter des entreprises de mini-réseaux. Les développeurs de mini-réseaux peuvent mettre tout en œuvre pour fournir un service d'excellente qualité, mais il leur faudra de toute façon le soutien des partenaires du développement et des gouvernements, surtout pour accroître l'adoption d'appareils à usage productif. Les partenaires du développement et les gouvernements devront mobiliser les investissements du secteur privé et créer un environnement commercial favorable aux mini-réseaux dans les principaux pays en déficit d'accès. Ces efforts combinés peuvent faire baisser le coût de l'électricité provenant de mini-réseaux à 0,25 dollar/kWh d'ici à 2025 et à 0,20 dollar/kWh d'ici 2030.

SOUTIEN DES PARTIES PRENANTES

Le raccordement d'un demi-milliard de personnes à des mini-réseaux d'ici à 2030 représente une tâche monumentale qui nécessite un effort sans précédent tant en matière d'investissements, d'innovations que d'engagement de la part des partenaires du développement, des gouvernements ainsi que de l'ensemble du secteur des mini-réseaux. Chaque partie prenante a son rôle à jouer :

- *Les décideurs politiques* peuvent reconnaître le rôle important que rempliront les mini-réseaux pour aider les pays à réaliser leurs objectifs d'électrification. Comme CrossBoundary Energy l'a souligné récemment, le secteur privé mérite une chance de faire partie des concurrents du marché de l'électrification des zones hors réseau où historiquement, les progrès ont été lents (Davies, Tillard et Shaw 2018). Les décideurs politiques peuvent tirer parti des dernières avancées de la technologie d'analyse géospatiale en vue d'élaborer des plans d'électrification nationaux capables d'orienter les investissements vers les mini-réseaux, l'extension du réseau principal et les systèmes solaires à usage domestique, tout en mettant sur pied des initiatives qui favorisent des utilisations productives de l'électricité, consolident le capital humain et diminuent les formalités administratives pour les développeurs de mini-réseaux.
- *Les régulateurs* peuvent adopter une approche souple et légère et fournir des directives claires dans cinq domaines : l'entrée sur le marché, les tarifs au détail, les normes de service, les spécifications techniques et l'arrivée du réseau principal.
- *Les partenaires du développement* peuvent améliorer la coordination autour de la conception et du financement d'interventions stratégiques visant à mobiliser les investissements du secteur privé. Par ailleurs, ils peuvent travailler avec leurs homologues des gouvernements pour créer un environnement favorable aux mini-réseaux. Il incombe à la Banque mondiale un rôle important à cet égard de mettre à profit son initiative RISE et son expertise de longue date en matière de politique économique pour évaluer et améliorer les politiques et la régulation qui se répercutent sur les développeurs de mini-réseaux et les investisseurs. Enfin, les partenaires du développement peuvent aider à relayer au reste du secteur les enseignements tirés des nouvelles connaissances acquises par leur expérience.
- *Les développeurs de mini-réseaux* peuvent travailler individuellement et avec d'autres développeurs en vue d'atteindre deux principaux indicateurs clés de performance qui contribueront à l'essor spectaculaire du secteur : accélérer l'allure du déploiement en adoptant une approche de portefeuille au développement des mini-réseaux, et fournir un service d'excellente qualité. L'appui apporté par les partenaires du développement et d'autres parties prenantes en vue d'une part de mobiliser le financement par le secteur privé et le gouvernement, et d'autre part de créer un environnement commercial favorable aux mini-réseaux dans

les principaux pays en déficit d'accès s'accompagnant d'innovations entrepreneuriales, peut faire baisser le coût de l'électricité provenant de mini-réseaux à 0,25 dollar/kWh d'ici à 2025 et à 0,20 dollar/kWh d'ici à 2030.

- *Les associations du secteur* peuvent demander des comptes à leurs membres et aux parties prenantes, en suivant les progrès réalisés d'après les indicateurs clés de performance qu'ils auront établis et qui sont directement rattachés à l'essor spectaculaire du secteur des mini-réseaux. Cette approche guidée par les données peut permettre de déployer des actions de plaidoyer efficaces auprès des ministères, des régulateurs, des fournisseurs et des établissements financiers.
- *Les investisseurs* peuvent élaborer des mécanismes de financement (crédits, prise de participation, instruments de partage de risques et obligations convertibles) qui orientent les investissements d'investisseurs grands et petits vers des portefeuilles de mini-réseaux. Les institutions de microfinance peuvent élaborer des instruments de prêt qui ciblent des utilisations productives de l'électricité.
- *Les fournisseurs* peuvent envisager le secteur des mini-réseaux à un horizon à plus long terme que les incitations formulées dans des rapports trimestriels. Ils peuvent se préparer dès maintenant, alors que le marché n'en est encore qu'à ses balbutiements, à 2025, lorsque le marché sera rapide en expansion. Les fournisseurs d'appareils et de machines à la fois pour la consommation des ménages et pour une utilisation productive peuvent nouer des partenariats avec les développeurs de mini-réseaux.
- *Les chercheurs* peuvent effectuer des recherches qualitatives et quantitatives pour combler les lacunes de connaissances et déterminer les relations causales statistiquement significatives qui peuvent éclairer les décisions en matière d'investissement dans les mini-réseaux.

DOMAINES NÉCESSITANT DES RECHERCHES SUPPLÉMENTAIRES

Six domaines doivent faire l'objet de recherches supplémentaires :

- évaluer et comparer les retombées des différentes politiques publiques (surtout des politiques économiques et d'électrification) sur le développement des mini-réseaux et les investissements dans ce domaine. Ces travaux peuvent s'appuyer sur l'initiative RISE de la Banque mondiale et son expertise de longue date en matière de recherches en politique économique
- collecter des données sur les mini-réseaux installés et planifiés pour informer et améliorer les analyses du marché mondial des mini-réseaux et de leurs coûts détaillés
- repérer les possibilités de combiner les mini-réseaux à des extensions du réseau principal et/ou à des systèmes solaires à usage domestique pour mettre au point de nouveaux modèles de fonctionnement qui tirent parti des combinaisons de ces technologies
- repérer les techniques et stratégies commerciales à succès qui permettront d'améliorer la rentabilité des mini-réseaux et d'attirer des investissements
- évaluer et améliorer les politiques et l'environnement commercial général qui se répercutent sur les mini-réseaux
- cerner des moyens prouvés d'accroître l'adoption d'appareils et de matériel à usage productif qui sont alimentés par un mini-réseau électrique

REMERCIEMENTS

Partenariat et financement.

Ce résumé analytique fait partie d'un ensemble complet de connaissances de bien plus grande envergure qui a été financé par la Banque mondiale/ESMAP et le DFID comme étant l'un des principaux bailleurs de fonds d'ESMAP. Cet ensemble complet de connaissances est le résultat de la collaboration d'ESMAP avec un vaste éventail de parties prenantes du secteur des mini-réseaux, y compris des développeurs de mini-réseaux, des régulateurs et d'autres hauts fonctionnaires, des établissements financiers, des fournisseurs de technologie, des chercheurs, des partenaires de mise en œuvre de projets, des partenaires du développement et des experts reconnus. Nous sommes particulièrement reconnaissants aux chefs de file du secteur des mini-réseaux suivants qui non seulement nous ont accordés de leur temps, mais qui nous ont aussi aidés à faire en sorte que notre travail rende compte fidèlement des réalités sur le terrain et des innovations révolutionnaires : AMDA, Engie, Havenhill, HOMER Energy, INENSUS, Odyssey Energy Solutions, Power Corner, PowerGen, PowerHive, Techno Hill et Trama TecnoAmbiental.

Auteurs et gestion du projet.

Cet ouvrage a été préparé par l'équipe GFMG sous la direction générale du directeur de programme d'ESMAP, Rohit Khanna. Jon Exel, Tatia Lemondzhava et Dr James Knuckles ont géré le projet et supervisé le développement de l'ouvrage, de sa conception à sa publication. Les principaux auteurs du livre, par ordre alphabétique, sont Juliette Besnard, Ricky Buch, Sunita Dubey, Dr. Chris Greacen, Dr. James Knuckles, Tatia Lemondzhava, Dr. Subodh Mathur, Ashish Shrestha, et des collègues de Castalia, INENSUS et SNV Netherlands Development Organization. En outre, nos collègues de la Banque mondiale Inka Schomer et Mary Dominic ont grandement contribué tout au long de cet ouvrage aux aspects liés au genre des mini-réseaux, qu'ils portent (entre autres) sur les thèmes de l'accès au financement, des utilisations productives, de la participation communautaire et du renforcement des compétences.

Révision et consultation.

Nous sommes particulièrement reconnaissants du temps, de l'expertise et des commentaires réfléchis que nos pairs nous ont accordé : Gabriela Azuela, Dana Rysankova, Michael Toman et Bernard Tenenbaum, ainsi qu'à nos collègues de la Banque africaine de développement, de l'AMDA, de Castalia, du DfID, d'INENSUS, de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers, du Rocky Mountain Institute, de Trama TecnoAmbiental et du United States National Renewable Energy Laboratory. Leurs commentaires ont contribué à affûter les messages tout au long de l'ouvrage et à améliorer sensiblement la qualité du produit final. Nous avons eu la chance d'avoir eu Barbara Karni et Joan O'Callaghan comme éditeurs. Debra Naylor s'est chargée de la mise en page de ce rapport et de la réalisation de tous les graphiques et figures qu'il comporte. La qualité et la cohérence des informations présentées dans ce rapport sont attribuables à l'expertise de Barbara, de Debra et de Joan. L'équipe GFMG tient aussi à exprimer sa gratitude à l'équipe de communication d'ESMAP et plus particulièrement à Nansia Constantinou, Anita Rozowska et Janice Tuten pour leur aide à faire la synthèse et à adapter les grands messages de ce rapport et pour leur aide générale à l'établir et le diffuser.

Participation des parties prenantes.

Au cours des trois dernières années, ESMAP a coorganisé des événements et des ateliers sur les mini-réseaux au Ghana, au Kenya, au Myanmar, au Nigeria, en Tanzanie, au Royaume-Uni et aux États-Unis. Nous sommes particulièrement reconnaissants aux gouvernements hôtes de ces pays ainsi qu'aux quelques 2 000 participants à ces événements représentant tous les groupes de parties prenantes des mini-réseaux et originaires de plus de 60 pays pour leurs commentaires, leurs débats et la validation des connaissances qu'ils ont apportés au présent rapport.

Aucune des nombreuses personnes que nous avons interviewées ou qui ont révisé ce rapport, et qui ont donné si gracieusement de leur temps, ne devrait être tenue pour responsable de toute erreur de fait ou d'interprétation qui y subsiste. Elles se sont montrées remarquablement patientes et conciliantes pour traiter de nos demandes dans des délais serrés, ce dont nous leur sommes sincèrement reconnaissants.

ANNEXE A.

INTRODUCTION D'UN ENSEMBLE COMPLET DE CONNAISSANCES POUR LES 10 ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS INDISPENSABLES À L'INTENSIFICATION DU DÉPLOIEMENT DE MINI-RÉSEAUX

Une décennie d'expérience à travailler avec des développeurs de mini-réseaux, de hauts fonctionnaires, des investisseurs, des experts et des partenaires bailleurs de fonds a aidé la Banque mondiale à cerner les 10 éléments constitutifs qui doivent être en place pour exploiter le plein potentiel du développement des mini-réseaux dans chaque pays. Chaque élément constitutif contribue à l'un des cinq moteurs du marché relevés à la figure ES A.1. À eux tous, les éléments constitutifs représentent les fondements de la réussite de programmes de mini-réseaux nationaux.

La facilité mondiale d'ESMAP sur les mini-réseaux a produit un ensemble de connaissances complet axé autour de ces 10 éléments constitutifs. Cet ensemble se compose des outils d'information suivants :

- un ouvrage de 500 pages intitulé *Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers*, qui comprend le présent résumé analytique sommaire et qui est la publication sur les mini-réseaux de la Banque mondiale la plus complète à ce jour
- un volume d'annexes aux chapitres de l'ouvrage principal, qui présente des compléments d'analyses détaillées, de méthodologies et de discussions approfondies

TABLEAU ES A.1 Matrice des moteurs du marché et des éléments constitutifs à l'appui de la très forte intensification du développement des mini-réseaux

Éléments de base à l'appui de l'intensification du développement des mini-réseaux	Établissement du coût de la technologie solaire-hybride	Planification géospatiale du portefeuille	Utilisations de l'électricité à des fins lucratives	Participation communautaire	Secteur local et international	Accès au financement	Formation et perfectionnement des compétences	Cadre institutionnel	Régulation praticable	Environnement commercial favorable
Moteurs du marché de l'ampleur des changements à l'échelle										
Réduire les coûts	■					■				
Accroître l'allure du déploiement	■	■			■			■		
Fournir un service d'excellente qualité			■	■						
Mobiliser le financement du gouvernement et du secteur privé					■	■			■	■
Créer un environnement favorable dans les principaux pays							■	■	■	■

Source: The Analyse d'ESMAP.

Note : Plus l'ombre est foncée, plus on s'attend à ce que l'impact direct soit fort sur un moteur de marché.

- un volume d'études de cas sur l'historique des mini-réseaux dans les systèmes d'alimentation électrique, ainsi que sur la régulation et les subventions présentes au Bangladesh, au Cambodge, en Inde, au Kenya, au Nigeria et en Tanzanie
- plus d'une douzaine de présentations PowerPoint faisant ressortir les grands constats du rapport principal
- des animations, infographies et vidéos pour présenter des conclusions de haut niveau à un large public
- les publications LiveWires qui peuvent servir de guides de référence rapide aux équipes d'opérations de la Banque mondiale et à d'autres partenaires de mise en œuvre du projet
- des bases de données des coûts détaillés des composants et des frais de fonctionnement des mini-réseaux, des projets de mini-réseaux installés et planifiés, et de suivi du secteur par rapport à des indicateurs clés de performance
- un fichier d'experts capables d'intervenir rapidement à l'appui de la mise en œuvre du projet

L'objectif de cet ensemble complet de connaissances est de présenter des options qui ont fait leurs preuves et des exemples d'innovations révolutionnaires dans le développement de mini-réseaux à l'égard de chacun des 10 éléments constitutifs, que les décideurs peuvent modifier et mettre en œuvre à leur guise en vue d'intensifier le déploiement des mini-réseaux. Cet ensemble de connaissances fournit des réponses concrètes et pratiques à la question : comment faire pour intensifier à grande échelle le déploiement des mini-réseaux afin de connecter un demi-milliard de personnes d'ici à 2030 ? En prenant acte des différentes approches adoptées au niveau national vis-à-vis des mini-réseaux tout en tenant compte de la situation spécifique à chaque contexte pour leur mise en œuvre, il présente une approche adaptative afin d'aider les pays à atteindre leurs objectifs d'électrification.

BIBLIOGRAPHIE

- Abate, G., T. Bernard, S. Makhija, et D. Spielman. 2018. "Accelerating Technical Change through Video-Mediated Agricultural Extension: Evidence from Ethiopia." Document de travail, Cornell University, Ithaca, NY. http://barrettdyson.cornell.edu/NEUDC/paper_421.pdf.
- Alliance for Rural Electrification. 2018. "ARE Member Tiger Power Seals Deal to Run World's First, Solar-Hydrogen Powered Mini-grids in Uganda." <https://www.ruralelec.org/news-from-are/are-member-tiger-power-seals-deal-run-worlds-first-solar-hydrogen-powered-mini-grids>.
- Blimpo, M., et M. Cosgrove-Davies. 2019. *Electricity Access in Sub-Saharan Africa: Uptake, Reliability, and Complementary Factors for Economic Impact*. Forum pour le développement de l'Afrique. Washington, DC : Banque mondiale.
- BNEF (Bloomberg New Energy Finance). 2018. "Powering the Last Billion."
———. 2019. "1Q 2019 Frontier Power Market Outlook."
- Buckley, A. 2012. "Best Practice Community Engagement for Infrastructure Projects: Building Community Ties That Dig Deeper." *Public Infrastructure Bulletin* 1 (8). <https://core.ac.uk/download/pdf/46935681.pdf>.
- Carbon Africa Limited, Trama TecnoAmbiental S.L., Research Solutions Africa Limited et Energy Research Centre of the Netherlands. 2015. *Kenya Market Assessment for Off-Grid Electrification: Final Report*. Nairobi, Kenya: Energy Regulatory Commission.
- Couture, T., D. Jacobs, S. Schurig, E. Matser, A. Leidreiter, et I. Garcia. 2016. *Beyond Fire: How to Achieve Sustainable Cooking*. Hambourg et La Haye : World Future Council et Hivos.
- Davies, G., M. Tilleard, et L. Shaw. 2018. *Private Mini-Grid Firms Deserve a Chance to Compete against Slow Utilities in Africa: A Faster Path to Rural Electrification*. GreenTechMedia. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/a-faster-path-to-rural-electrification#gs.d8qrrt>.
- EUEI PDF (Initiative de l'Union européenne pour l'énergie, Facilité de dialogue et de partenariat). 2014. *Mini-grid Policy Toolkit: Policy and Business Frameworks for Successful Mini-grid Roll-outs*.
- ESMAP (Programme d'appui à la gestion du secteur énergétique) 2018a. *Cambodia—Beyond Connections: Energy Access Diagnostic Report Based on the Multi-Tier Framework*. Washington, DC : Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29512>.
- . 2018b. *Ethiopia—Beyond Connections: Energy Access Diagnostic Report Based on the Multi-Tier Framework*. Washington, DC : Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30102>.
- . 2018c. *Rwanda—Beyond Connections: Energy Access Diagnostic Report Based on the Multi-Tier Framework*. Washington, DC : Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30101>.
- Fu, R., D. Feldman, R. Margolis, M. Woodhouse, et K. Ardani. 2017. "U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017." Rapport technique NREL/TP-6A20-68925. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- GOGLA. 2019. *Providing Energy Access through Off-Grid Solar: Guidance for Governments*. Utrecht: GOGLA. https://www.gogla.org/sites/default/files/resource_docs/energy_access_through_off-grid_solar_-_guidance_for_govts.pdf.
- AIE (Agence internationale de l'énergie). 2017. *Energy Access Outlook 2017: From Poverty to Prosperity*. Paris: AIE.
- Agence internationale de l'énergie (AIE), Agence internationale des énergies renouvelables, Division de statistique des Nations Unies, Banque mondiale et Organisation mondiale de la Santé. 2019. *Tracking SDG7: The Energy Progress Report*. Washington, DC. <http://documents.worldbank.org/curated/en/517781558037625254/Tracking-SDG-7-The-Energy-Progress-Report-2019>.
- Katre, A., A. Tozzi, et S. Bhattacharyya. 2019. "Sustainability of Community-Owned Mini-Grids: Evidence from India." *Energy, Sustainability and Society* 9: 2. <https://link.springer.com/article/10.1186/s13705-018-0185-9>.
- Kenning, T. 2018. "Sterling and Wilson to Build 'Largest' Battery Energy Storage Project in Africa." *Energy Storage News*. <https://www.energy-storage.news/news/sterling-and-wilson-to-build-largest-battery-energy-storage-project-in-afri>.
- Kojima, M., et C. Trimble. 2016. *Making Power Affordable for Africa and Viable for Its Utilities*. Washington, DC : Banque mondiale.
- Muther, K. 2016. *Smart Power for Rural Development. Creating a Sustainable Market Solution to Energy Poverty*. Shared Value Initiative. New York, NY: Rockefeller Foundation.

- Okafor, C. 2019. "43000 Rural Homes, Businesses to Benefit from N1.95bn REF." This Day Live. 22 janvier. <https://www.thisdaylive.com/index.php/2019/01/22/43000-rural-homes-businesses-to-benefit-from-n1-95bn-ref/>.
- Ramachandran, V., M. Shah, et T. Moss. 2018. "How Do African Firms Respond to Unreliable Power? Exploring Firm Heterogeneity Using K-Means Clustering." Document de travail du CGD n° 493, Center for Global Development, Washington, DC. <https://www.cgdev.org/sites/default/files/how-do-african-firms-respond-unreliable-power-exploring-firm-heterogeneity-using-k-means.pdf>.
- Rockefeller Foundation. 2017. "Smart Power for Rural Development: Transforming Lives through Energy Access." <https://www.rockefellerfoundation.org/report/smart-power-rural-development-brochure/>.
- Sedighy, M. 2016. "Powering Remote Communities and Industrial Facilities." Hatch. <https://www.hatch.com/en/About-Us/Publications/Blogs/2016/11/Powering-remote-communities-and-industrial-facilities>.
- Smart Power India. 2016. *Smart Power Connect Magazine* 1 (1). http://www.smartpowerindia.org/media/1136/smartpowerindia_magazine_july_2016.pdf.
- . 2017. *Smart Power Connect Magazine* 2 (1). http://www.smartpowerindia.org/media/1140/smartpowerindia_magazine_may_2017.pdf.
- Smith, J. 2000. *Solar-Based Rural Electrification and Microenterprise Development in Latin America: A Gender Analysis*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28995.pdf>.
- Tenenbaum B., C. Greacen, T. Siyambalapatiya, et J. Knuckles. 2014. *From the Bottom Up: How Small Power Producers and Mini-Grids Can Deliver Electrification and Renewable Energy in Africa*. Washington, DC : Banque mondiale. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/16571>.
- Tenenbaum, B., C. Greacen, et D. Vaghela. 2018. *Mini Grids and the Arrival of the Main Grid: Lessons from Cambodia, Sri Lanka, and Indonesia*. Rapport technique 013/18 d'ESMAP, Banque mondiale, Washington, DC.
- Trimble, C., M. Kojima, I. Perez Arroyo, et F. Mohammadzadeh. 2014. "Financial Viability of Electricity Sectors in Sub-Saharan Africa: Quasi-Fiscal Deficits and Hidden Costs." Rapport de recherches sur les politiques 7788, Banque mondiale, Washington, DC. <http://documents.worldbank.org/curated/en/182071470748085038/pdf/WPS7788.pdf>.
- Waldron, D. 2017. "Solar Energy: A New Frontier for Microfinance." CGAP. Avril 17. <https://www.cgap.org/blog/solar-energy-new-frontier-microfinance>.
- Walton, R. 2019. "Puerto Rico Energy Plan Introduces MiniGrids to Avoid Repeat of Hurricane Maria." *Utility Drive*.

NOTES

1. L'Agence d'électrification rurale du Nigeria a recensé un marché potentiel de 10 000 mini-réseaux d'ici à 2030. Les 879 mini-réseaux planifiés auxquels il est fait référence ici sont ceux bénéficiant déjà d'affectation de fonds spécifiques ou dont des précisions pour chaque projet sont disponibles dans la base de données de ESMAP qui comprend plus de 26 000 mini-réseaux installés ou planifiés.
2. L'initiative RISE de la Banque mondiale suit les politiques et les régulations relatives à l'accès à l'énergie. Pour les mini-réseaux, RISE suit les indicateurs suivants : l'existence d'un programme national, le cadre juridique pour l'exploitation des mini-réseaux, la capacité à facturer des tarifs qui reflètent les coûts, les incitations financières, ainsi que les normes et la qualité. Le dernier rapport RISE et les données qui l'accompagnent sont disponibles à <http://rise.worldbank.org/>.
3. Ce rapport définit l'accès à l'électricité en accord avec le cadre multiniveaux, énoncé au chapitre 1 de l'ouvrage, (« Why Mini Grids, and Why Now? »).
4. Le Ghana et le Kenya se distinguent par les succès qu'ils ont remportés tant au niveau de l'allure que du taux d'accès à l'électricité en Afrique subsaharienne. D'après les prévisions, tous deux devraient atteindre l'accès universel à l'électricité avant 2030. Dans le même temps, la région abrite les 20 pays aux plus faibles taux d'électrification au monde, le Burundi, le Tchad, le Malawi, la République démocratique du Congo affichant un taux d'électrification inférieur à 1 % par an entre 2010 et 2017. D'autre part, si les tendances et les politiques actuelles persistent, d'ici à 2030, 80 % des personnes demeurant dépourvues d'accès à l'électricité en l'Afrique subsaharienne devraient habiter en milieu rural (alors que la population rurale représente environ 50 % de la population totale) (Banque mondiale et autres 2019).
5. Le cadre multi-niveaux de la Banque mondiale définit l'accès à l'électricité en termes de niveaux de service, partant des Niveaux 0 à 5. Les niveaux sont basés sur sept attributs de service d'électricité, à savoir la capacité, les heures de service, la fiabilité, la qualité ou les variations de tension, l'accessibilité financière, la légalité et la sécurité. Sur la base de ces sept attributs, le cadre multi-niveaux attribue à tout ménage donné l'un des cinq niveaux, où le Niveau 0 correspond à l'absence d'accès véritable à l'électricité, le Niveau 1 correspond à des fonctions élémentaires d'éclairage et de charge, le Niveau 2 correspond à la capacité de faire fonctionner plusieurs appareils de petite taille, le Niveau 3 correspond à un raccordement officiel au réseau principal en recevant un service limité, le Niveau 4 correspond à un service capable de prendre en charge des besoins de réfrigération, et le Niveau 5 correspond à un service continu sans restrictions.
6. Lors du calcul du LCOE, nous avons utilisé HOMER Pro ainsi que les données réelles de 12 mini-réseaux. Nous avons inclus un certain nombre d'hypothèses fondées sur des recherches antérieures et l'expérience passée, y compris une durée de vie de 20 ans pour le mini-réseau, un taux d'actualisation de 9,6 % (compatible avec l'analyse d'une variété de sources), un taux d'inflation de 3 % et un prix du diesel de 1 dollar le litre. Dans l'ensemble de données d'ESMAP, le montant des dépenses d'exploitation a été ventilé en frais de carburant, coûts du personnel et autres O&M. Les coûts du carburant ont été indiqués pour 7 des 9 mini-réseaux qui disposaient de générateurs ; pour ces 7-là, les coûts du carburant ne représentaient que 12,7 % des dépenses d'exploitation. Les coûts du personnel ont été indiqués pour 17 des 18 mini-réseaux ; pour ces 17-là, les coûts du personnel représentaient 76,5 % des dépenses d'exploitation. Les coûts du personnel varient énormément, partant de 1 008 dollars à plus de 75 000 dollars par an. Autres coûts O&E comprennent les autres dépenses engagées pour exploiter et entretenir le système.
7. La légère augmentation du LCOE à mesure que le facteur de charge augmentera pour passer de 40 % à 80 % en 2030 est une conséquence de l'importance de la charge qui coïncide avec la ressource solaire. Le seul moyen d'atteindre un facteur de charge de 80 % consiste à ajouter de la charge au milieu de la nuit. Or pour cela, il faut que davantage d'électricité passe par une batterie, ce qui engendre des coûts accrus, non seulement en termes d'investissements pour accroître le stockage, mais aussi en raison des pertes électriques inhérentes au fait de charger et de décharger une batterie. C'est-à-dire, pour les mini-réseaux solaires hybrides qui produisent de l'électricité à bas coût (comme ce sera le cas surtout pour les mini-réseaux en 2030 lorsque le prix des panneaux solaires aura nettement baissé tandis que le prix du diesel demeurera relativement inchangé), il peut être plus important d'optimiser la coïncidence de la charge avec les ressources solaires plutôt que d'optimiser le facteur de charge.
8. Il y a lieu de noter que les coûts indiqués ici sont des prix départ usine. Les prix réels dans le pays peuvent varier et dépendent des droits d'importation, de la taxe sur la valeur ajoutée, des coûts d'expédition et d'autres frais de dédouanement. Les périodes de rentabilisation ont été calculées en supposant un tarif de 0,75 dollar/kWh et en tenant compte d'hypothèses prudentes en matière de rendement des machines et de production.
9. Il est probable qu'à l'avenir, beaucoup de mini-réseaux opteront pour des batteries lithium-ion en raison de leurs faibles coûts sur leur durée de vie, de leur cycle de vie plus long, de leur plus grande résistance à une décharge profonde, et de leurs performances par temps chaud. Module photovoltaïque : Aux coûts actualisés compétitifs

avec ceux des centrales électriques conventionnelles, la demande de parcs solaires à zéro émission demeurera forte, ce qui stimulera la demande et fera baisser les coûts sous l'effet des économies d'échelle. Onduleurs photovoltaïques : Utilisés dans les mini-réseaux, ils sont similaires (et très souvent identiques) à ceux utilisés dans les installations raccordées au réseau principal commercial, qui augmentent d'environ 40 % par an. Onduleurs à batterie : Les synergies qui existent avec le secteur des moteurs de véhicules électriques et d'autres composants d'électronique de puissance auront pour effet d'abaisser les coûts. Batteries acide-plomb : La technologie est en grande partie mise au point, quoique le secteur l'améliore un peu plus tous les ans. Par exemple, le carbone ajouté à l'électrode négative réduira la sulfatation et augmentera les taux de charge. Compteurs intelligents : La concurrence qui se joue entre fabricants de compteurs à prépaiement et dans un contexte d'intensification du déploiement permettra de répartir les coûts de développement entre un plus large éventail de produits.

10. Plutôt que de donner un chiffre définitif, cette analyse est conçue pour comprendre le potentiel de bénéfice relatif entre Une telle analyse peut être utilisée pour déterminer la viabilité de créer des métiers axés sur le marché des mini-réseaux. Les données reflètent le potentiel de bénéfices, déduction faite de tous les coûts variables de production et de fabrication. Le détail des hypothèses adoptées sur les marges de coût et de fabrication figure à l'annexe du chapitre 7 de l'ouvrage principal.
11. Bien que la régulation en Tanzanie figure parmi les plus avancées d'Afrique, les problèmes de mise en œuvre et de mise en application, ainsi que des éléments de la régulation à proprement parler, ont récemment limité les investissements du secteur privé dans les mini-réseaux.
12. L'importance d'adapter l'approche de participation communautaire au contexte local a été soulignée dans une interview avec Havenhill Synergy Ltd., un développeur de mini-réseaux nigérian exploitant plusieurs mini-réseaux solaires hybrides dans les administrations locales de Kwali et Kuje au Nigeria.
13. Les banques locales se procurent généralement leurs fonds auprès de dépôts à court terme, de sorte que le consentement de prêts à long terme (l'actif d'une banque) à des développeurs alors que leurs dépôts (son passif) portent sur des périodes plus courtes aurait pour effet de créer une disparité inacceptable entre actif et passif.
14. En moyenne, les dépenses d'investissement représentaient environ 65 % et les dépenses d'exploitation environ 35 % du tarif permettant le recouvrement complet des coûts.
15. ESMAP a collecté ses données à partir d'ensembles de données propriétaires auprès de trois grands cabinets d'études de marché : Navigant Research, Bloomberg New Energy Finance et Infinergia, ainsi qu'à partir des études de la Banque mondiale sur les opérateurs de mini-réseaux. ESMAP a également effectué un très grand nombre de recherches documentaires et d'entretiens.
16. Dans tous les scénarios, le coût par raccordement suppose de 4,9 personnes vivent par raccordement, ce qui correspond au nombre moyen de personnes par raccordement pour les 7 500 mini-réseaux planifiés dans la base de données d'ESMAP.



Programme d'Assistance a la Gestion du Secteur de l'Energie
La Banque mondiale

1818 H Street, N.W.
Washington, DC 20433 USA
esmap.org | esmap@worldbank.org