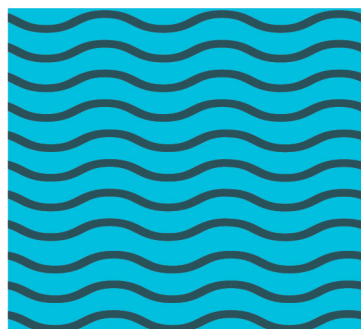


Du réseau électrique à l'Internet large bande: des solutions énergétiques durables et innovantes pour la connectivité rurale



**Du réseau électrique à
l'Internet large bande: des
solutions énergétiques
durables et innovantes
pour la connectivité rurale**

2023



Remerciements

Le présent Rapport a été élaboré pour l'Union internationale des télécommunications (UIT) par des experts externes, M. Donald Browne-Marke et Mme Charlotte Aubin, avec une contribution écrite substantielle de MM. Désiré Karyabwite et István Bozsóki (aujourd'hui retraité) du Bureau de développement des télécommunications (BDT) de l'UIT.



Avant d'imprimer ce rapport, pensez à l'environnement.

© ITU 2023

Certains droits réservés. Le présent ouvrage est publié sous une licence Creative Commons Attribution Non-Commercial-Share Alike 3.0 IGO (CC BY-NC-SA 3.0 IGO).

Aux termes de cette licence, vous êtes autorisé(e)s à copier, redistribuer et adapter le contenu de la publication à des fins non commerciales, sous réserve de citer les travaux de manière appropriée. Dans le cadre de toute utilisation de ces travaux, il ne doit, en aucun cas, être suggéré que l'UIT cautionne une organisation, un produit ou un service donnés. L'utilisation non autorisée du nom ou logo de l'UIT est proscrite. Si vous adaptez le contenu de la présente publication, vous devez publier vos travaux sous une licence Creative Commons analogue ou équivalente. Si vous effectuez une traduction du contenu de la présente publication, il convient d'associer l'avertissement ci-après à la traduction proposée: "La présente traduction n'a pas été effectuée par l'Union internationale des télécommunications (UIT). L'UIT n'est pas responsable du contenu ou de l'exactitude de cette traduction. Seule la version originale en anglais est authentique et a un caractère contraignant". On trouvera de plus amples informations sur le site: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/>.

Déni de responsabilité

Les appellations employées dans la présente publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'UIT, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les références faites à certaines sociétés ou aux produits de certains fabricants n'impliquent pas que l'UIT approuve ou recommande ces sociétés ou ces produits de préférence à d'autres de nature similaire, mais dont il n'est pas fait mention. Sauf erreur ou omission, les noms des produits propriétaires sont reproduits avec une lettre majuscule initiale.

L'UIT a pris toutes les précautions raisonnables pour vérifier les informations contenues dans la présente publication. Cependant, le document est distribué sans garantie d'aucune sorte, ni expresse ni implicite, et son interprétation et son utilisation relèvent de la responsabilité du lecteur.

Les avis, résultats et conclusions reproduits dans la présente publication ne reflètent pas nécessairement la position de l'UIT ou de ses membres.

ISBN

978-92-61-35962-1 (version électronique)

978-92-61-35972-0 (version EPUB)

978-92-61-35982-9 (version MOBI)

Table des matières

Remerciements	ii
Avant-propos	x
Résumé analytique	xii
1 Contexte	1
2 Introduction.....	3
3 Statut de l'accès au large bande dans les zones rurales	5
3.1 Urbanisation - migration de la population de zones rurales.....	5
3.2 Infrastructure dans les zones rurales	7
3.3 Écart entre les zones urbaines et rurales en matière d'accès à l'Internet - la population non connectée dans les pays en développement	7
3.4 Parvenir à une connectivité universelle.....	9
3.5 Infrastructure large bande rurale	9
3.5.1 Réseaux d'accès hertzien	10
3.5.2 Couverture cellulaire mobile.....	11
3.5.3 Infrastructure d'accès au large bande en milieu rural.....	12
3.5.4 Réseaux cellulaires mobiles.....	12
3.5.5 Futurs réseaux 5G - services innovants.....	15
3.5.6 Satellites en orbite terrestre basse - zones rurales mal desservies.....	17
3.5.7 Systèmes utilisant des plates-formes à haute altitude	18
3.5.8 Solution d'énergie renouvelable pour les stations de base 5G	18
4 Manque d'accès à l'électricité	20
4.1 Les problèmes liés à l'énergie limitent l'expansion du large bande.....	20
4.2 Énergie durable pour tous.....	22
4.3 Déficit d'électricité en milieu rural dans les pays en développement	23
4.4 Transition vers une infrastructure d'énergies renouvelables	25
4.5 Améliorer l'efficacité énergétique - optimiser la consommation.....	26
5 Sources d'énergie renouvelables pour l'électrification rurale	27
5.1 Les énergies renouvelables sont plus compétitives que les sources d'énergie fossiles	27
5.2 Énergie solaire.....	30

5.2.1	Aperçu de la technologie solaire.....	32
5.2.2	Dispositions des panneaux solaires	33
5.3	Considérations relatives au dimensionnement des installations solaires photovoltaïques	33
5.3.1	Onduleurs solaires - convertisseurs de tension.....	35
5.3.2	Avantages de l'énergie solaire par rapport aux groupes électrogènes diesel	35
5.4	Energie éolienne.....	36
5.5	Piles à combustible	37
5.6	Biomasse	37
5.7	Microsystèmes hydroélectriques	38
5.8	Comparaison des sources d'énergie renouvelables - résumé	39
5.9	Énergie renouvelable hors réseau.....	41
5.9.1	Mini-réseaux	43
5.9.2	Systèmes autonomes.....	46
5.9.3	Comparaison des sources d'énergie renouvelables et fossiles pour les applications de mini-réseau	48
5.10	Composants de base d'une installation de mini-réseau:	49
5.11	Réseau rural large bande alimenté par l'énergie solaire - Hopscotch Scotland.....	51
5.12	Systèmes électriques hybrides.....	54
5.12.1	Mini-réseau hybride à courant alternatif.....	56
5.12.2	Système hybride de mini-réseau à courant continu.....	57
5.13	Production hybride solaire et diesel.....	58
5.14	Solaire PV groupe électrogène diesel.....	60
5.15	Solutions de stockage	63
5.15.1	Batteries au plomb.....	64
5.15.2	Batteries au lithium	64
5.15.3	Batteries à flux redox	66
5.15.4	Volants d'inertie	66
5.15.5	Batteries solides	66
5.15.6	Supercondensateurs	66
5.16	Transmission d'énergie sans fil	67
5.16.1	Accès à l'énergie par transmission sans fil de l'énergie par faisceau de radiofréquences	68
5.16.2	Accès à l'énergie par transmission sans fil avec d'autres technologies.....	70

6	Mécanismes financiers pour les investissements dans les énergies renouvelables	74
6.1	Financement des infrastructures rurales d'énergie renouvelable.....	74
6.2	Fonds pour le service universel.....	75
6.3	Financement externe.....	76
6.3.1	Vente de carbone	77
6.3.2	Mécanisme pour un développement propre (MDP).....	77
6.3.3	Bourse africaine du crédit carbone (ACCE).....	78
6.3.4	Bourse du carbone (CTX).....	78
6.3.5	Fonds africain pour les énergies renouvelables (AREF)	79
6.3.6	Power Africa, Beyond the Grid.....	80
6.3.7	Fonds pour l'énergie durable en Afrique (SEFA)	80
6.3.8	Fonds OPEP pour le développement international (OFID).....	81
6.3.9	Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA)	82
6.3.10	Partenariat pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (REEEP)	83
6.3.11	Fonds Impact du ministère du développement international (DFID), Royaume-Uni	84
6.3.12	Énergie durable pour le développement économique (SEED).....	85
6.3.13	Plate-forme de performance des énergies renouvelables (REPP)	86
6.3.14	Synthèse des catégories de financement.....	88
6.3.15	Financement des infrastructures large bande pour réduire au minimum les risques pour les investisseurs privés	88
6.3.16	Les télécommunications et l'énergie au service du développement durable	89
7	Mécanismes politiques et recommandations	90
7.1	Introduction	90
7.2	Politiques numériques.....	92
7.3	Considérations relatives aux politiques numériques	92
7.4	Recommandations de politique opérationnelle en matière de mini-réseaux	97
7.5	Politiques propres aux solutions hors réseau.....	97
8	Conclusion.....	99
9	Annexes et études de cas	100
9.1	Entreprises de services énergétiques	100
9.2	Solutions financières, contractuelles et opérationnelles classiques.....	102
9.3	Communautés écologiques intelligentes.....	104
9.3.1	Les communautés intelligentes.....	104

9.3.2	Modèle commercial.....	105
9.3.3	Services essentiels	106
9.3.4	Responsabilité sociale des entreprises (RSE).....	107
9.4	Liens utiles:	108
	Sigles.....	109

Liste des figures, encadrés et tableaux

Figures

Figure 1: Personnes utilisant l'Internet, 2005-2022	4
Figure 2: Pourcentage de personnes utilisant l'Internet, 2022	4
Figure 3: Part de la population vivant en zone urbaine	5
Figure 4: Part de la population vivant en zone urbaine	6
Figure 5: Pourcentage d'internautes dans les zones urbaines rurales, 2022	8
Figure 6: Architecture du réseau de télécommunication	10
Figure 7: Population desservie par un réseau de téléphonie mobile, par type de réseau, 2015-2022	12
Figure 8: Architecture du réseau mobile	14
Figure 9: Système d'entrée de sources d'énergie multiples pour station de base 5G, y compris l'énergie renouvelable	19
Figure 10: Le large bande reste coûteux dans les PMA	20
Figure 11: Population rurale sans accès à l'électricité	24
Figure 12: Population ayant accès à l'électricité (urbaine et rurale) en%	25
Figure 13: Croissance de la capacité en énergies renouvelables entre 2019 et 2024 par technologie (GW)	28
Figure 14: Capacité de production d'électricité installée et projetée par source 2000-2040	29
Figure 15: Coûts de production de l'énergie renouvelable en 2018	30
Figure 16: Réduction du prix de l'énergie solaire photovoltaïque	31
Figure 17: Enchères les plus basses pour l'énergie solaire en 2018	32
Figure 18: Profil de charge journalier habituel dans une zone rurale	34
Figure 19: Irradiation solaire moyenne mondiale	35
Figure 20: Puissance de l'éolienne en fonction de la hauteur du mât	37
Figure 21: Segment mini-réseaux (rôle croissant des mini-réseaux et des énergies renouvelables)	42
Figure 22: Fonctionnalités des mini-réseaux	50
Figure 23: Mini-réseau hybride couplé en courant alternatif	58
Figure 24: Réseau hybride à courant continu - éolien et solaire PV	58
Figure 25: Illustration des différents modes de fonctionnement des systèmes hybrides	60
Figure 26: Enquête sur le prix des batteries lithium-ion: répartition des blocs et des cellules	65
Figure 27: Scénario type de transmission d'énergie sans fil	68
Figure 28: Représentation d'un système WPT point à point	69
Figure 29: Expérience d'acheminement d'énergie sur 1,6 km par un système MPT point à point. On a employé une antenne parabolique de 26 m et un émetteur Klystron de 450 kW fonctionnant dans la bande des 2,388	

GHz, ainsi qu'un réseau d'antennes redresseuses de 3,4 × 7,2 m comme récepteur	69
Figure 30: Schéma fonctionnel traditionnel d'un système WPT par induction magnétique	71
Figure 31: Schéma fonctionnel traditionnel d'un système WPT par résonance magnétique	72
Figure 32: Exemple de dispositifs WPT fixes	73
Figure 33: Économies annuelles pour le secteur grâce à la transition vers des solutions énergétiques vertes (milliards USD)	89
Figure 34: Solutions énergétiques ESCO en Afrique	101
Figure 35: Exemple de solutions contractuelles et techniques pour les entreprises de télécommunication	102
Figure 36: Exemple de solution technique fiable	103
Figure 37: Exemple de village écologique intelligent.....	104
Figure 38: Les communautés écologiques intelligentes et les ODD.....	107

Encadrés

Encadré 1: L'anatomie d'un réseau mobile	14
Encadré 2: Huawei - approche spectre multicouches	16

Tableaux

Tableau 1: Comparaison du débit type pour le service large bande fixe	11
Tableau 2: Évolution des réseaux mobiles.....	13
Tableau 3: Avantages des sources d'énergie renouvelable	39
Tableau 4: SE4ALL des Nations Unies - Cadre de suivi mondial 11	44
Tableau 5: Interventions en matière d'accès à l'énergie et bénéfices indicatifs en matière d'efficacité énergétique - la possibilité AE+EE dans son contexte	45
Tableau 6: Mini-réseaux et hors-réseaux renouvelables, caractéristiques 2012/13	48
Tableau 7: Classification des politiques.....	94

Avant-propos



Les technologies de l'information et de la communication (TIC) jouent un rôle essentiel dans la réalisation du Programme 2030 pour le développement durable.

La disponibilité de l'énergie est indispensable au secteur des TIC, à ses services et à ses applications. L'électricité est nécessaire pour la plupart des TIC, pour recharger les appareils, alimenter les stations de base mobiles, faire fonctionner les centres de données et les réseaux, pour ne citer que quelques exemples. L'accès à une alimentation électrique fiable et abordable reste une contrainte majeure, en particulier dans les pays les moins avancés (PMA), les pays en développement sans littoral (PDSL) et les petits États insulaires en développement (PEID), ainsi que dans les zones rurales et reculées, où les populations pourraient tirer le meilleur parti du pouvoir de transformation des TIC, mais où l'accès au réseau électrique est très limité et les revenus faibles.

Il existe une relation symbiotique entre l'énergie et la connectivité à Internet dans les endroits qui ne sont pas encore connectés, notamment parce que les modèles commerciaux hors réseau reposent sur la connectivité pour la gestion à distance. En outre, les modèles commerciaux de connectivité bénéficient de l'utilisation accrue des services mobiles, notamment des services financiers.

Les réseaux électriques peuvent également être exploités pour étendre les réseaux dorsaux nationaux et ruraux large bande. Le partage et la réutilisation des infrastructures peuvent constituer un outil important pour réduire les coûts et étendre les services, ce qui souligne l'importance de la coopération et de la coordination entre les secteurs des TIC et de l'énergie pour connecter les zones rurales.

Bien qu'il existe un large éventail de sources d'énergie renouvelables, la fourniture de cette énergie par des méthodes traditionnelles peut se révéler coûteuse. Le coût prohibitif de l'installation et de l'entretien des lignes et des câbles électriques laisse souvent de nombreuses personnes dans les zones rurales sans source d'énergie fiable. Dans de telles situations, l'espace et les nouvelles technologies large bande par satellite ainsi que des solutions innovantes comme les systèmes de transmission d'énergie sans fil peuvent offrir une voie vers une connectivité Internet économique.

L'UIT s'engage à collaborer avec les parties prenantes pour améliorer la connectivité Internet large bande, trouver des moyens novateurs de fournir de l'énergie propre de manière sûre et efficace aux zones rurales et isolées et atteindre les objectifs climatiques fixés dans l'Accord de Paris en 2015.

Nous appelons les gouvernements, les décideurs et les régulateurs à réexaminer leurs plans nationaux en matière de large bande en conséquence. Les lignes directrices contenues dans le présent document sont conçues pour aider les États Membres, les régulateurs et les parties prenantes du secteur privé à moderniser leurs réseaux et à intégrer l'utilisation appropriée de réseaux modernes et plus économes en énergie, notamment l'électricité sans fil (transport de l'énergie électrique sans fil) et les télécommunications à courant porteur. Ces lignes directrices

seront notamment utiles pour le Programme Connect 2030 de l'UIT, qui vise à connecter à l'Internet chaque école, chaque hôpital, chaque administration, chaque entreprise et chaque institution communautaire, et pour aider les pays à se préparer à développer des TIC plus écologiques, des communautés vertes intelligentes et des réseaux intelligents qui peuvent servir à mettre en place des systèmes énergétiques plus efficaces et sur lesquels on dispose d'un meilleur contrôle.



Dr. Cosmas Luckyson Zavazava
Directeur, Bureau de développement des télécommunications (BDT)
Union internationale des télécommunications (UIT)

Résumé analytique

L'accès à l'électricité est essentiel pour réduire la fracture numérique dans les zones rurales et développer une société de l'information pour tous. Le manque de disponibilité d'une alimentation électrique fiable et abordable reste un obstacle majeur, notamment dans les pays les moins avancés (PMA), les pays en développement sans littoral (PDSL) et les petits États insulaires en développement (PEID) du monde, et en particulier dans les zones rurales et isolées. L'accès à l'électricité et la connectivité large bande, y compris les services et les applications fondés sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), jouent un rôle important dans les efforts visant à atteindre les Objectifs de développement durable (ODD) et à connecter les 2,7 milliards de personnes dans le monde qui n'ont actuellement pas accès à l'Internet.

Sans électricité, les individus ne peuvent pas accéder à l'Internet et ainsi bénéficier de la transformation numérique de l'économie moderne, notamment dans les secteurs de l'éducation, de la santé, de l'agriculture et du commerce.

Le présent Rapport traite des difficultés liées à l'accès à l'électricité, qui est essentiel pour connecter les zones rurales à l'Internet.

Le manque d'accès à l'électricité dans les zones rurales – un défi majeur

- L'accès au réseau électrique est:
 - indisponible;
 - peu fiable;
 - inabordable.
- L'extension du réseau dans les zones rurales et isolées n'est pas économiquement viable en raison des facteurs suivants:
 - réseaux de transmission et de distribution coûteux et étendus;
 - faible densité de population, population dispersée – habitations dispersées;
 - population pauvre – tarifs bas;
 - faible retour sur investissement;
 - manque d'investissements dans les infrastructures et de financement de celles-ci.

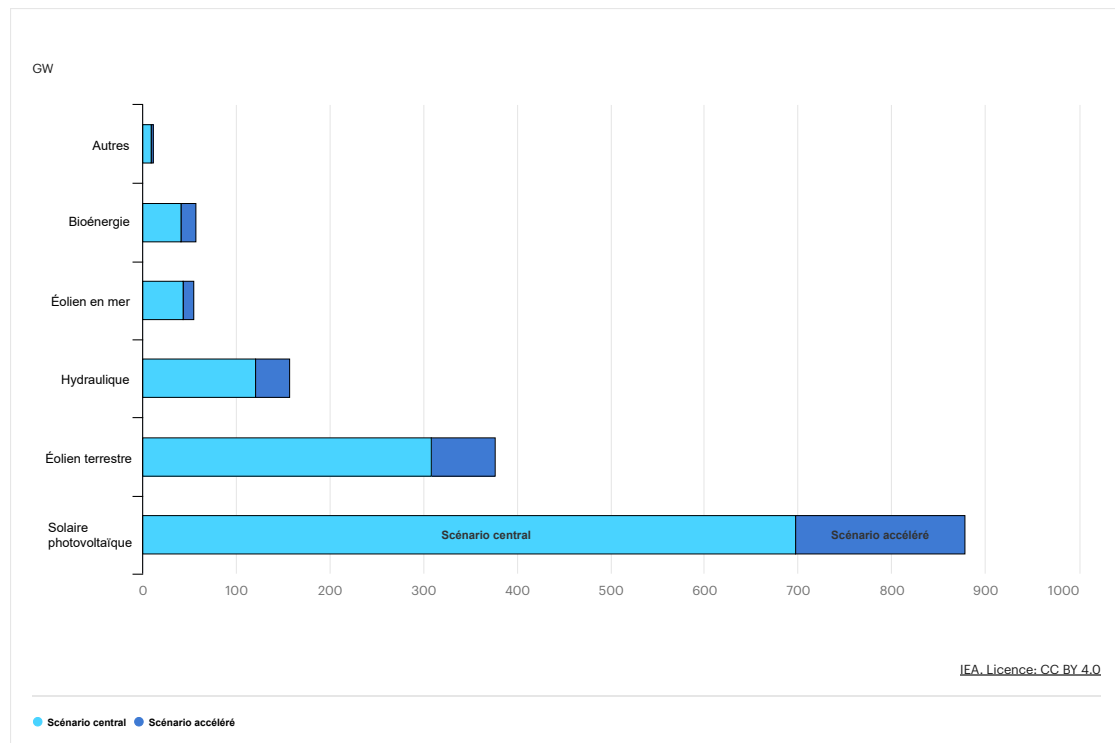
Difficultés dans le domaine des infrastructures pour l'électrification rurale

- Géographie et topographie difficiles avec des zones isolées.
- Manque d'infrastructures adjacentes fiables, abordables et sûres, telles que le réseau électrique.
- Absence de couverture Internet mobile ou de réseaux d'accès hertziens fixes à large bande et absence d'accès à la bande passante internationale.
- Lieux de recharge électrique limités et éloignés pour les appareils mobiles et les dispositifs TIC Internet.
- Solutions limitées en matière d'alimentation électrique hors réseau – approvisionnement peu fiable en groupes électrogènes diesel et solutions d'énergie renouvelable intermittentes.

Obstacles à l'extension du réseau électrique dans les zones rurales

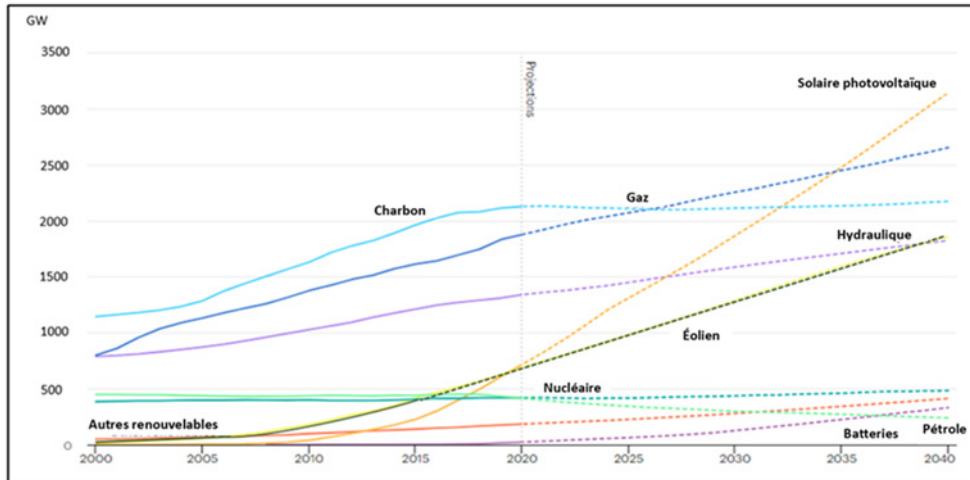
- Le réseau électrique national ne peut être étendu que dans les zones densément peuplées.
- La demande potentielle doit être suffisante pour justifier les coûts d'investissement élevés des lignes de transmission et de distribution.
- Tarifs de détail de l'électricité en fonction du réseau - tarifs subventionnés et non subventionnés.

Pour améliorer l'accès à l'électricité, il faut des solutions durables et innovantes pour la connectivité rurale, qui mettent l'accent sur les sources d'énergie renouvelables pour l'électrification rurale, les sources les moins coûteuses comme l'énergie solaire (cellules photovoltaïques) et l'énergie éolienne, ainsi que d'autres sources d'énergie propre (énergie hydroélectrique, énergie géothermique et biomasse). Le graphique ci-dessous présente les projections de la croissance de la capacité des énergies renouvelables dans le monde entre 2019 et 2024.



Source: AIE, Croissance de la capacité en énergies renouvelables entre 2019 et 2024 par technologie.

Capacité de production d'électricité installée et projetée, par source, 2000-2040



Dans ce contexte, une nouvelle technologie telle que la transmission d'énergie sans fil (WPT) peut être envisagée pour fournir un accès à l'Internet à moindre coût. Les normes de l'UIT relatives aux solutions énergétiques intelligentes, comme la Recommandation UIT-T L.1380, portent sur les solutions intelligentes en matière d'énergie pour les sites de télécommunication, en particulier la performance, la sécurité, l'efficacité énergétique et l'impact environnemental de systèmes alimentés par différents types d'énergie tels que l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne, les piles à combustible et le réseau électrique. La Recommandation aborde également la question de la gestion intelligente de l'énergie. Par exemple, si le réseau électrique est hors service, comment gérer les flux d'énergie pour obtenir une meilleure efficacité énergétique et obtenir des énergies vertes.

La Recommandation UIT-T L.1210 définit des solutions d'alimentation électrique pour les équipements et réseaux d'accès 5G filaire et sans fil combinés, en prenant en considération les exigences accrues concernant la disponibilité et la fiabilité des services et les nouveaux scénarios de déploiement, ainsi que l'impact environnemental des solutions proposées. Cette Recommandation s'applique à l'alimentation des éléments des réseaux d'accès mobiles et fixes, en particulier des équipements qui ont des configurations et des besoins similaires.

L'objectif de la Recommandation UIT-T L.1382 est d'accélérer le déploiement des réseaux, de réduire les dépenses en capital (CAPEX) et les dépenses d'exploitation (OPEX), d'optimiser la rentabilité des investissements et de guider la transformation et l'optimisation du secteur des TIC. La nouvelle architecture de réseau, les nouvelles technologies d'alimentation électrique et les spécifications de la Recommandation contribueront en outre à faire évoluer les technologies du secteur.

Enfin, il est possible de connecter plusieurs sources d'énergie (panneaux photovoltaïques, éolien, piles à combustible, réseau électrique, générateurs et batteries) à un seul système. La Recommandation UIT-T L.1381 examine comment contrôler ces différents apports en énergie de manière intelligente afin d'accroître l'efficacité énergétique et de réduire les émissions de carbone. En outre, pour les systèmes de refroidissement intelligents, la Recommandation examine comment utiliser l'air froid extérieur et optimiser l'utilisation du refroidissement pour les technologies de l'information et de la communication (TIC), par exemple le refroidissement des baies TIC, les méthodes de refroidissement par rangée et le refroidissement par liquide.

1 Contexte

La Conférence mondiale de développement des télécommunications 2022 (CMDT-22), qui s'est tenue à Kigali (Rwanda), a adopté la "connectivité abordable" comme priorité absolue du Secteur du développement des télécommunications de l'UIT (UIT-D). Cette priorité vise essentiellement à utiliser une connectivité moderne, disponible, sûre, accessible et financièrement abordable par le déploiement d'une infrastructure et de services de télécommunication/TIC pour réduire la fracture numérique. Elle a pour but de promouvoir le développement de l'infrastructure et des services en utilisant les services et les technologies de télécommunication/TIC existants, nouveaux ou émergents, ainsi que de nouveaux modèles économiques. Dans le cadre de ce processus, une assistance est fournie aux États Membres pour accroître et renforcer la confiance et la sécurité dans l'utilisation des télécommunications/TIC.

Alors que le monde accueillait son 8 milliardième habitant le 15 novembre 2022, on estime que 5,3 milliards de personnes – soit environ 66% de la population mondiale – utilisaient déjà l'Internet. Mais cela laisse quelque 2,7 milliards de personnes non connectées dans le monde, la connectivité universelle restant une perspective lointaine dans les pays les moins avancés et les pays en développement sans littoral, où, en moyenne, seuls 36% de la population sont en ligne, selon l'édition 2022 de Faits et Chiffres de l'UIT, publiée le 30 novembre 2022.

Si les données montrent une croissance lente mais régulière des abonnements au haut débit fixe, le mobile continue de dominer en tant que plate-forme de choix pour l'accès en ligne, en particulier dans les pays à faible revenu où les connexions filaires peuvent être rares et coûteuses, notamment pour les personnes qui vivent en dehors des grands centres urbains¹.

La connectivité est gourmande en énergie et ne se développera pas sans l'accès à l'électricité, en particulier à des sources d'énergie abordables, fiables et évolutives. Selon les Nations Unies², le monde continue de progresser vers des objectifs d'énergie durable. Mais le rythme actuel des progrès est insuffisant pour atteindre l'objectif 7 des Objectifs de développement durable (ODD 7), qui vise à garantir l'accès à une énergie abordable, fiable, durable et moderne pour tous d'ici à 2030. Une impulsion majeure est donc nécessaire.

La cible 7.1 de l'ODD 7 vise à assurer l'accès universel à des services énergétiques abordables, fiables et modernes; l'indicateur 7.1.1 porte sur la proportion de la population ayant accès à l'électricité. La cible 7.2 vise à accroître sensiblement la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique mondial. La cible 7.3 vise à doubler le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique d'ici à 2030.

Un effort mondial concerté sera nécessaire pour atteindre l'objectif d'une connectivité universelle abordable, en particulier dans les pays en développement. Le monde se concentre désormais sur les efforts visant à promouvoir une "connectivité universelle efficace", qui cherche à promouvoir les avantages de la participation en ligne tout en atténuant les inconvénients potentiels de la connectivité numérique. Dans son Rapport de 2019, la Commission des Nations Unies sur le haut débit pour le développement durable a reconnu que l'accès au haut débit était essentiel aux efforts déployés pour atteindre les ODD. En plus d'être simplement disponible,

¹ UIT, Mesurer le développement numérique: faits et chiffres 2022.

² Nations Unies, Rapport sur les objectifs de développement durable 2022.

L'accès au haut débit doit être accessible, pertinent et abordable et doit également être sûr, fiable, assurer l'autonomisation des utilisateurs et permettre d'obtenir des résultats positifs³.

L'adoption des services large bande est principalement limitée par le fait que la plupart des populations non connectées vivent dans des zones rurales et isolées sans accès au réseau électrique, qui fournirait une source d'énergie abordable pour les stations de base mobiles. L'UIT a établi que l'expansion des services de télécommunication numérique dans les zones rurales et isolées est principalement motivée par des considérations technologiques et économiques liées à la fourniture de services mobiles.

En outre, au-delà des considérations économiques et technologiques, l'expansion de la pénétration du numérique est essentielle à la réalisation de plusieurs des ODD, tels que ceux relatifs à l'éducation, la santé, la financiarisation, l'autonomisation des femmes, l'accès aux connaissances, aux services et aux biens. L'innovation technologique dans les domaines des technologies de l'information et des technologies propres vise à réduire la fracture numérique.

³ UIT/ONU, UIT/UNESCO La situation du large bande - Le large bande en tant que fondement du développement durable, UIT/UNESCO, 2019.

2 Introduction

L'accès à l'Internet large bande peut transformer des vies et donner lieu à des possibilités, avec des répercussions économiques et sociales positives sur les communautés et les familles^{4, 5}. La transmission de données à haut débit et de haute qualité peut favoriser les changements structurels dans des secteurs vitaux de l'économie. Il ne s'agit pas seulement d'une commodité: l'accès au large bande peut permettre aux communautés mal desservies ou non desservies d'accéder à des informations et à des services essentiels et offrir des possibilités qui sont bénéfiques aux entreprises, à l'éducation, à la santé et aux conditions de vie de la population.

La Commission sur le large bande au service du développement durable considère que le large bande est fondamental pour relever les défis mondiaux mis en évidence dans les ODD. La Commission considère que le large bande est l'un des outils les plus puissants et les plus efficaces pour mettre en œuvre des solutions novatrices afin de promouvoir le développement durable, d'examiner les questions d'égalité hommes-femmes et de favoriser une économie à faible empreinte carbone.

L'UIT estime que 66% de la population mondiale, soit 5,3 milliards de personnes, utilisaient l'Internet en 2022⁶ (voir la Figure 1). Au niveau régional, dans les pays d'Europe, de la Communauté des États indépendants (CEI) et des Amériques, entre 80 et 90% de la population utilise l'Internet. Dans les pays des États arabes et de la région Asie-Pacifique, environ deux tiers de la population (soit 70 et 64% respectivement) utilisent l'Internet, tandis que la moyenne pour l'Afrique n'est que de 40% de la population.

Lorsque l'on regroupe les pays en fonction de leur niveau de développement, la connectivité universelle reste une perspective lointaine dans les PMA et les PDSL, où seulement 36% de la population est actuellement en ligne (voir la Figure 2). Les inégalités d'accès aux connexions fixes entre les pays sont bien plus importantes que pour la connectivité mobile. Alors que les connexions fixes sont courantes dans les ménages des pays à revenu intermédiaire (tranche supérieure) et à revenu élevé, elles sont quasiment inexistantes dans les pays à faible revenu, en raison des prix élevés et du manque d'infrastructures.

Les gouvernements, les entreprises et les communautés reconnaissent que le manque d'accès abordable à l'électricité constitue un obstacle majeur à la pénétration des services large bande dans les zones rurales et isolées des pays en développement⁷. En conséquence, l'accès à une énergie abordable dans ces communautés mal desservies et/ou non desservies est une étape cruciale pour garantir l'accès universel aux services large bande.

La croissance du secteur des énergies renouvelables présente d'énormes possibilités pour mettre en œuvre des solutions énergétiques propres, hors réseau et d'origine locale, utilisant l'énergie solaire, éolienne et d'autres sources renouvelables. L'accès à ces formes d'énergie fiables et abordables permet non seulement de réduire les coûts d'exploitation des sites de télécommunication et des installations TIC, mais aussi de contribuer à la réduction de la pauvreté et de promouvoir le développement social et économique des communautés rurales.

⁴ OCDE, *Le large bande et l'économie, Rapport de support pour la réunion ministérielle DSTI/ICCP/IE(2007)3/FINAL*.

⁵ Banque mondiale, *Se connecter pour l'inclusion: L'accès au large bande pour tous*, 18 septembre, 2015.

⁶ UIT, *Mesurer le développement numérique: faits et chiffres 2022*.

⁷ http://broadbandcommission.org/Documents/ITU_discussion-paper_Davos2017.pdf.

Figure 1: Personnes utilisant l'Internet, 2005-2022

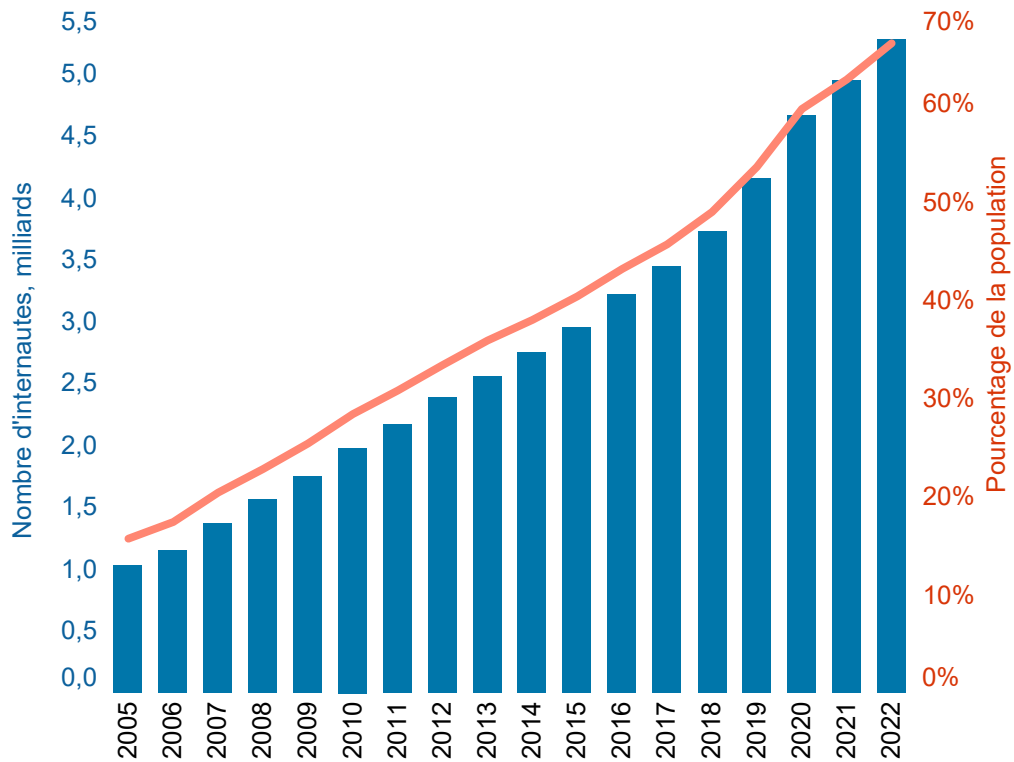
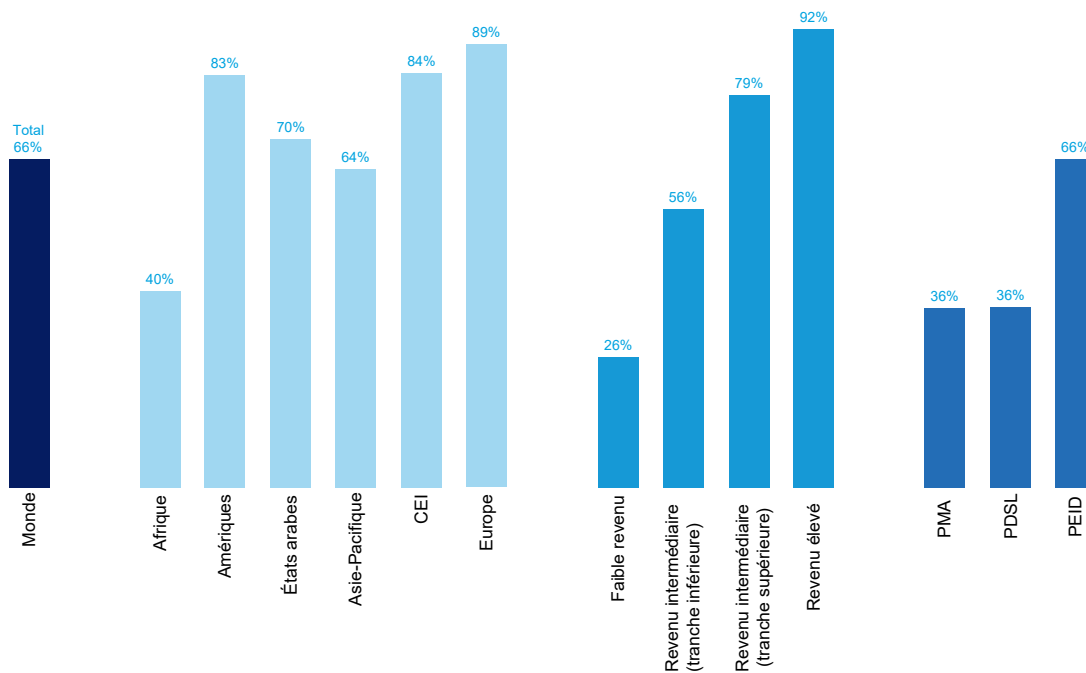


Figure 2: Pourcentage de personnes utilisant l'Internet, 2022



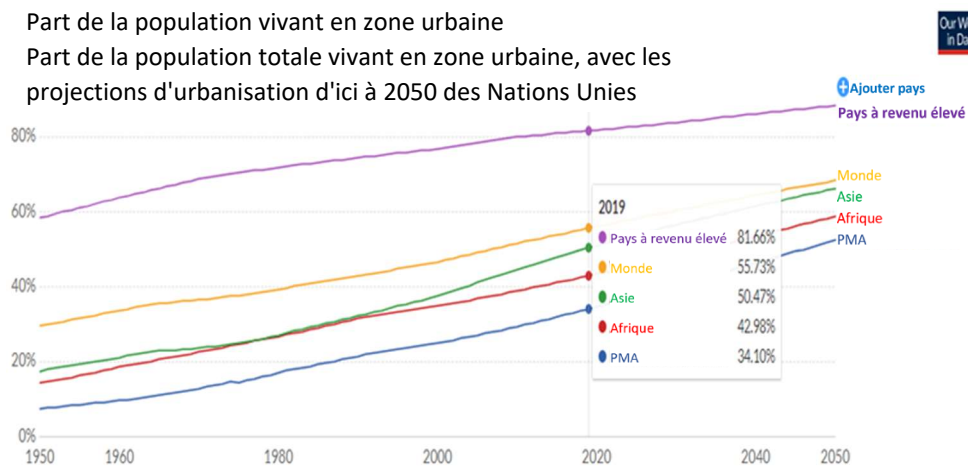
3 Statut de l'accès au large bande dans les zones rurales

3.1 Urbanisation - migration de la population de zones rurales

Selon les statistiques des Nations Unies, 4,2 milliards de personnes, soit 55% de la population mondiale, vivaient dans des zones urbaines en 2018. Le niveau d'urbanisation en Asie s'élevait à environ 50%, tandis que l'Afrique reste principalement rurale, avec 43% de sa population vivant dans des zones urbaines (voir la Figure3).

Les projections des Nations Unies annoncent un transfert progressif de la population des zones rurales vers les zones urbaines, ce qui pourrait se traduire par le déplacement de 2,5 milliards de personnes supplémentaires vers les zones urbaines d'ici 2050. La plus grande partie de cette augmentation (estimée à 90%) devrait avoir lieu en Asie et en Afrique. À l'échelle mondiale, la population rurale a augmenté pour atteindre 3,4 milliards en 2018; après plusieurs années supplémentaires de croissance - comme le montre la Figure 4 - elle devrait diminuer pour atteindre 3,1 milliards en 2050.

Figure 3: Part de la population vivant en zone urbaine

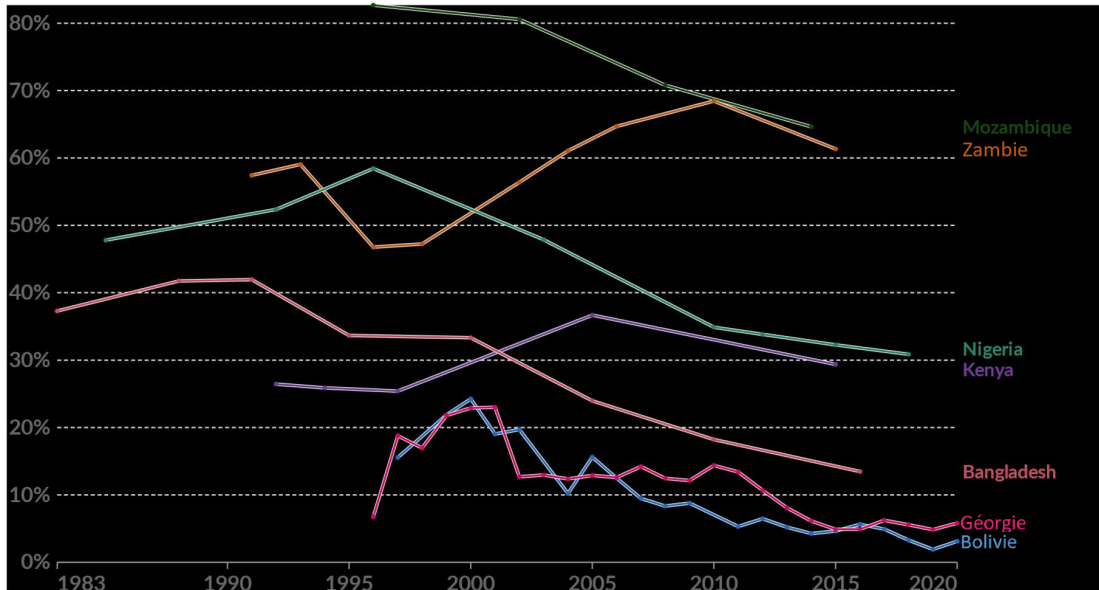


Source: [Our World in Data \(https://ourworldindata.org/\)](https://ourworldindata.org/)

Part de la population vivant dans l'extrême pauvreté, 1983-2020

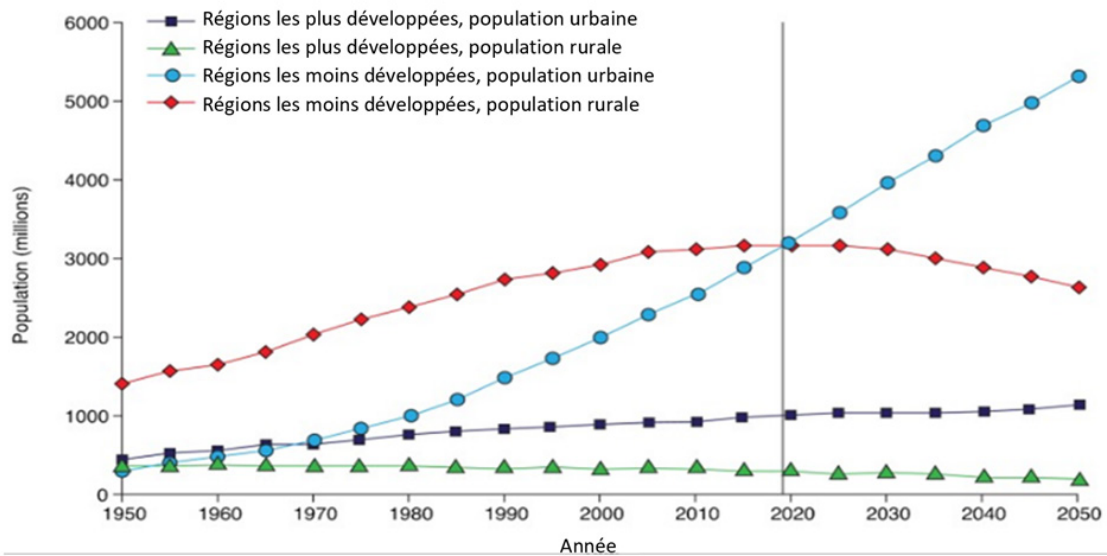


L'extrême pauvreté est définie comme le fait de vivre en dessous du seuil de pauvreté international de 2,15 USD par jour. Ces données sont ajustées pour tenir compte de l'inflation et des différences de coût de la vie entre les pays.



Source: Plate-forme sur la pauvreté et les inégalités de la Banque mondiale.
 Note: Ces données sont mesurées en USD internationaux aux prix de 2017. Elles concernent le revenu disponible ou les dépenses par habitant (les définitions exactes varient).

Figure 4: Part de la population vivant en zone urbaine



Source: Our World in Data, sur la base des Perspectives d'urbanisation mondiale 2018 de l'ONU et de sources historiques. Les zones urbaines sont établies selon les définitions nationales.

3.2 Infrastructure dans les zones rurales

Les investissements dans les infrastructures jouent un rôle majeur dans le développement économique: les routes, la production et la fourniture d'électricité, les autres services collectifs, les communications et les infrastructures numériques large bande sont autant d'éléments qui sous-tendent les efforts de développement durable et la transformation économique des économies émergentes. Pour favoriser une prospérité partagée, il est essentiel que les avantages sociaux et économiques dont bénéficient les citoyens soient équitablement partagés avec la population rurale afin d'atténuer l'exode rural. Pour que les avantages du développement économique et de la société numérique soient accessibles à tous les citoyens, qu'ils vivent dans des communautés urbaines, rurales ou insulaires isolées, il est crucial de développer une infrastructure urbaine-rurale interconnectée et intégrée qui réduit l'écart entre une population urbaine aux revenus élevés et des communautés rurales pauvres.

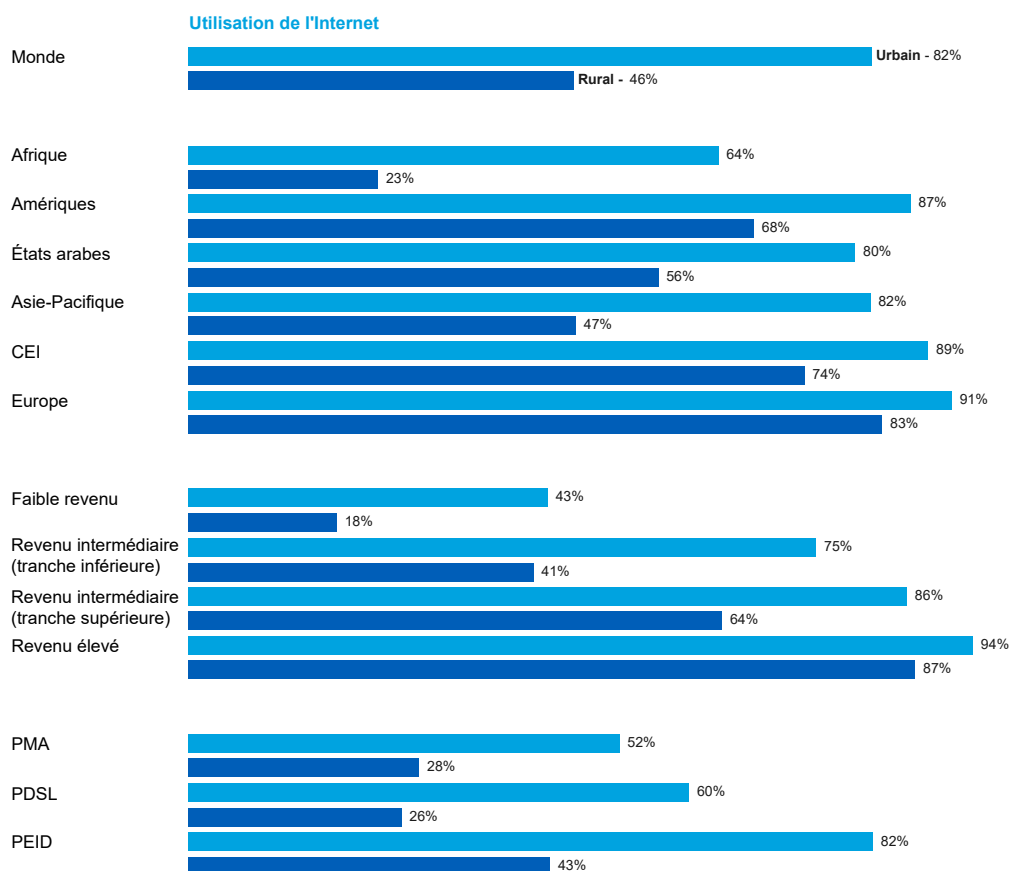
Le manque d'accès à l'électricité dans les zones rurales a des répercussions négatives sur le développement économique et social, ce qui se traduit par un manque de perspectives. L'accès à une électricité abordable et à une infrastructure large bande permettra aux communautés rurales, isolées et insulaires de bénéficier du pouvoir de transformation de l'économie numérique.

À titre d'exemple, 620 personnes sur un total de 900 millions en Afrique n'ont actuellement pas accès à l'électricité. Cela se traduit par une perte de deux points de pourcentage de croissance chaque année et des milliards de dollars dépensés en combustibles fossiles pour alimenter des groupes électrogènes polluants. L'expansion nécessaire des réseaux électriques en Afrique coûterait 63 milliards de dollars par an jusqu'en 2030. Or, seuls 8 milliards de dollars sont dépensés chaque année. Sans la mise en œuvre progressive de solutions énergétiques innovantes, il y aura bientôt 300 000 pylônes en Afrique qui dépendront du gazole.

3.3 Écart entre les zones urbaines et rurales en matière d'accès à l'Internet - la population non connectée dans les pays en développement

En 2022, deux tiers de la population mondiale avaient accès à l'Internet, ce qui leur permettait de participer à l'économie numérique mondiale et de bénéficier des possibilités sociales et économiques de transformation de l'écosystème numérique. Cependant, un tiers de la population mondiale n'est toujours pas connecté à l'Internet et est privée des avantages de l'ère numérique.

Figure 5: Pourcentage d'internautes dans les zones urbaines rurales, 2022



L'accès aux services numériques large bande dans les communautés mal desservies atténuera certains des désavantages économiques et sociaux dont souffrent les populations non connectées. Les entreprises rurales et les industries artisanales vont se développer: elles seront en mesure d'accéder à un large éventail de services et de les fournir de manière plus efficace, ce qui les rendra mieux armées pour affronter la concurrence sur le marché au sens large.

L'extension de la couverture des réseaux mobiles dans le monde entier a entraîné une forte progression des services de données sur Internet, grâce à la disponibilité d'appareils abordables, à des forfaits de données moins chers et à une augmentation de l'utilisation de l'Internet par une classe moyenne croissante qui peut utiliser et se permettre les services proposés⁸. Réduire la fracture numérique entre les villes et les campagnes en connectant les personnes non connectées est une priorité de la Commission sur le large bande au service du développement durable.

⁸ McKinsey&Company, 2014, offline-and-falling-behind-barriers-to-internet-adoption.

3.4 Parvenir à une connectivité universelle

La Commission "Le large bande au service du développement durable" prévoit qu'il faudra bien plus de deux décennies pour généraliser l'adoption de l'Internet. Au cours de cette période, un "Internet des objets" à grande échelle sera mis au point et préfigurera ce que Klaus Schwab a décrit comme la quatrième révolution industrielle, où une gamme de technologies nouvelles font converger les sphères physique, numérique et biologique, ce qui a des incidences sur toutes les disciplines, économies et secteurs d'activité⁹. Ces progrès dépendront largement de l'expansion du réseau Internet pour garantir un accès universel.

Le large bande est devenu la pierre angulaire des infrastructures intelligentes et les gouvernements nationaux se fixent des objectifs pour assurer un accès universel aux services large bande.

3.5 Infrastructure large bande rurale

Des stratégies et des politiques efficaces sont nécessaires pour réduire les écarts en matière d'utilisation dans les régions en développement du monde, en particulier dans les zones rurales. Les solutions éprouvées peuvent être reproduites et étendues pour améliorer à moindre coût la connectivité des nombreux habitants des zones rurales qui ne sont pas connectés.

Les principaux défis à relever pour fournir des services de télécommunication dans les zones rurales sont liés à des considérations technologiques et économiques. Les principales technologies de transmission pour les services Internet large bande sont les suivantes: systèmes à fibres optiques, réseaux DSL à fil de cuivre (xDSL)/à câbles coaxiaux, réseaux large bande mobiles cellulaires de Terre, réseaux de Terre à hyperfréquences - réseaux d'accès hertzien fixe et réseaux à satellites. Chacune de ces technologies présente des atouts et des limites qui lui sont propres et qui, associés à l'environnement réglementaire, aux objectifs commerciaux et au régime de financement, déterminent le lieu où leur déploiement est le plus pertinent.

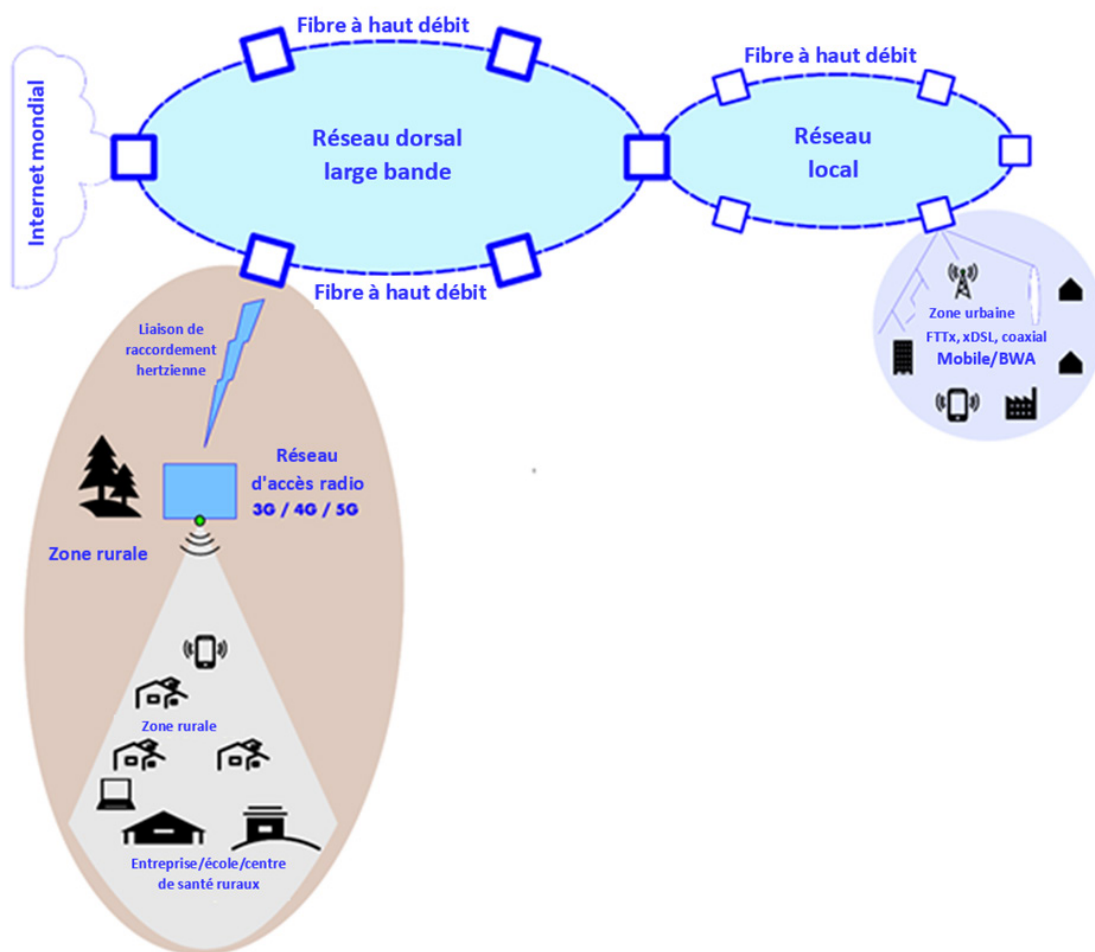
Dans les zones urbaines, les solutions d'infrastructure câblées comme la fibre optique, le câble coaxial et le DSL à fil de cuivre sont les technologies large bande les plus souvent choisies pour fournir des services Internet aux foyers et aux locaux professionnels.

Dans les zones rurales, les technologies hertziennes, notamment les réseaux mobiles cellulaires, les réseaux d'accès hertzien fixes et les technologies à satellites, sont souvent plus économiques et permettent le déploiement plus rapide de services d'accès large bande plus abordables¹⁰. Les solutions de connectivité de raccordement, qui utilisent des technologies hertziennes et des technologies radioélectriques en ondes millimétriques, sont les plus rentables et les plus efficaces pour connecter les communautés rurales et isolées au réseau central (voir la Figure 6). Les liaisons de raccordement relient plusieurs nœuds d'accès géographiquement dispersés, regroupant le trafic local ou rural vers le réseau central.

⁹ <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab>.

¹⁰ Page web de l'UIT-D sur les initiatives rurales: <http://www.itu.int/en/ITU-D/Technology/Pages/RuralCommunications.aspx>.

Figure 6: Architecture du réseau de télécommunication



Bien que la technologie de la fibre optique offre la plus grande capacité sur de longues distances, les coûts d'installation élevés (creusement de tranchées, planification et permis, etc.) et les longs délais qu'elle exige la rendent peu pratique comme solution d'infrastructure rurale abordable. Cependant, la technologie de la fibre optique peut être utilisée pour étendre une infrastructure large bande partagée de très grande capacité, du réseau central – sur une distance importante – aux centres régionaux et aux points d'intégration dans le pays. Elle est souvent utilisée pour les réseaux dorsaux afin de connecter les différentes sections principales, les municipalités et les zones régionales.

3.5.1 Réseaux d'accès hertzien

Les avantages de l'utilisation de l'accès hertzien fixe et des technologies mobiles dans les zones rurales sont les suivants:

- mise sur le marché rapide – le déploiement étant moins complexe et moins coûteux que celui des réseaux filaires, les abonnés peuvent être raccordés au réseau plus rapidement qu'avec la technologie à fibres optiques et les réseaux hertziens peuvent offrir un retour sur investissement rapide;
- facilité de déploiement – l'accès hertzien convient aux zones peu peuplées ou isolées, ainsi qu'aux environnements urbains et suburbains, et peut être utilisé dans divers scénarios de déploiement;

- prêt à fonctionner – les terminaux d'accès hertzien fixes sont simples à installer;
- faible coût – les antennes-relais existantes peuvent être adaptées pour offrir à la fois un accès hertzien fixe et des antennes de terminaux.

Tableau 1: Comparaison du débit type pour le service large bande fixe

Technologie	Débit de crête	Débit d'utilisateur moyen
VDSL2	200 Mbit/s	30 Mbit/s
LTE FWA	600 Mbit/s	50 Mbit/s
Fibre (FTTH)	1 Gbit/s	100 Mbit/s

Source: Ovum

3.5.2 Couverture cellulaire mobile

Le large bande mobile (3G ou plus) est le principal moyen – et souvent le seul – de se connecter à l'internet dans la plupart des pays en développement. Aujourd'hui, 95% de la population mondiale est couverte par un réseau 3G ou plus.

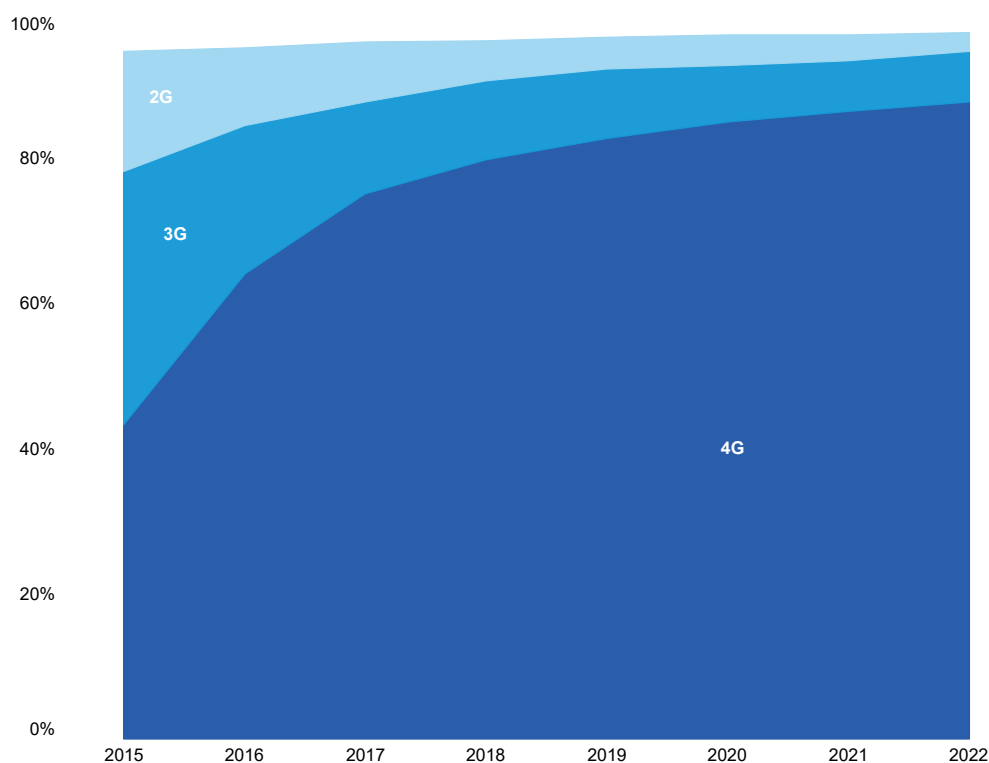
Entre 2015 et 2022, la couverture des réseaux 4G a doublé pour atteindre 88% de la population mondiale (voir la Figure 7). Au niveau régional, la technologie 4G est désormais accessible à plus de 90% de la population dans la région Amériques, en Asie-Pacifique, dans la CEI et en Europe. Dans les États arabes, un quart de la population n'a toujours pas accès à un réseau 4G, tandis qu'en Afrique, c'est le cas de la moitié de la population.

Dans de nombreux pays d'Europe et de la région Asie-Pacifique, les réseaux d'ancienne génération sont désactivés au profit de réseaux permettant le développement d'un écosystème numérique compatible avec la 5G. C'est notamment le cas de la 3G, qui est souvent désactivée, tout en conservant la 2G pour les anciens appareils.

La tendance est moins claire dans d'autres régions du monde, principalement parce que les réseaux 2G et 3G conservent une présence importante.

Presque toutes les zones urbaines du monde sont couvertes par un réseau mobile large bande. Toutefois, de nombreuses lacunes persistent dans les zones rurales. Dans la région Amériques, par exemple, 22% de la population rurale n'est couverte par aucun signal mobile, tandis que 5% supplémentaires n'ont accès qu'à un réseau 2G, ce qui signifie que 27% ne peuvent pas accéder à l'Internet. En Afrique, ces chiffres sont de 15% (pas de couverture du tout) et de 14% (2G uniquement).

Figure 7: Population desservie par un réseau de téléphonie mobile, par type de réseau, 2015-2022



Source: UIT, Mesurer le développement numérique: faits et chiffres 2022.

3.5.3 Infrastructure d'accès au large bande en milieu rural

Les zones rurales et isolées faiblement peuplées n'ont pas accès à des réseaux large bande abordables. Le coût élevé de l'extension de l'infrastructure large bande, le faible retour sur investissement et le manque d'accès au réseau électrique sont des obstacles majeurs au développement d'une infrastructure large bande en milieu rural.

Le défi que représente l'introduction de services Internet large bande dans les zones rurales sans accès au réseau électrique peut être mieux compris en examinant l'architecture des réseaux d'accès au large bande desservant ces zones.

Les infrastructures filaires (câbles en cuivre et à fibre optique) et les infrastructures fixes hertziennes haut débit sont largement utilisées dans les grands centres urbains pour fournir des services large bande aux entreprises et aux particuliers, tandis que les réseaux mobiles fournissent facilement des services large bande aux particuliers dans les zones urbaines et rurales.

3.5.4 Réseaux cellulaires mobiles

La plupart des personnes dans les pays en développement se connectent à l'Internet en utilisant des réseaux cellulaires mobiles; les opérateurs acquièrent des licences pour l'utilisation du spectre mobile, utilisent des réseaux de stations de base/antennes-relais et vendent des services prépayés de voix et de données principalement.

Dans les régions rurales faiblement peuplées, ce sont les réseaux mobiles cellulaires qui sont principalement utilisés pour l'accès au large bande, fonctionnant sur un spectre large bande bien établi à l'aide des technologies 3G, 4G LTE et, dans quelques cas, des technologies émergentes 5G (voir la Figure 8).

Tableau 2: Évolution des réseaux mobiles

	1G	2G	3G	4G	5G
Date approximative de déploiement	Années 1980	Années 1990	Années 2000	Années 2010	Années 2020
Débit théorique de téléchargement	2 kbit/s	384 kbit/s	56 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
Latence	Sans objet	629 ms	212 ms	60-98 ms	< 1 ms

Source: UIT – Poser les jalons de la 5G: perspectives et difficultés, 2018.

D'un point de vue commercial, l'extension de la couverture large bande dans les régions rurales est difficile en raison des dépenses d'investissement (CAPEX) et des dépenses d'exploitation (OPEX) élevées associées à la mise en place et à l'exploitation des stations de base, y compris la fourniture d'énergie, dans les zones reculées qui n'ont pas accès au réseau électrique ou dont l'accès est instable. Les fournisseurs de services large bande doivent produire leur propre énergie localement pour faire fonctionner les stations de répéteurs et les sous-stations éloignées¹¹.

Selon un Rapport de 2016 de la GSM Association (GSMA), par rapport aux sites cellulaires urbains, les sites de stations de base/antennes-relais ruraux et isolés pouvaient coûter jusqu'à 30% de plus en CAPEX et jusqu'à 100% de plus en OPEX (découlant des coûts d'énergie et de raccordement), tout en desservant 80% d'utilisateurs en moins par site, et donc en générant moins de revenus¹².

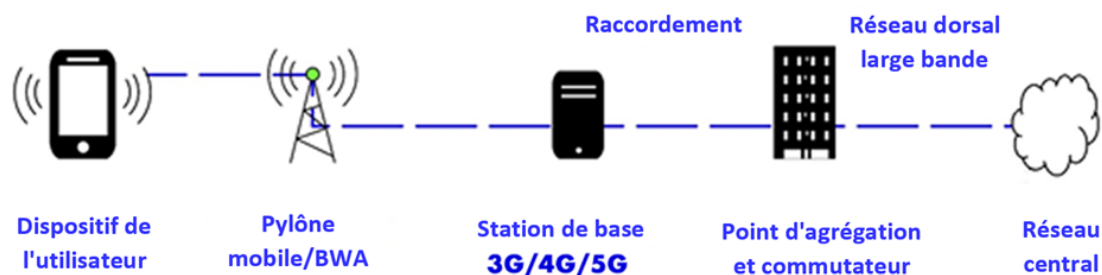
Les technologies d'accès hertzien fixe (FWA) sont également utilisées pour offrir une meilleure qualité de service, sur la base de normes internationales telles que WiFi, WiMAX/IEEE et d'autres technologies propriétaires d'accès hertzien fixe large bande. Dans les pays en développement, des technologies hertziennes et des technologies radioélectriques en ondes millimétriques de grande capacité sont généralement fournies comme liaisons de raccordement, reliant les communautés rurales au réseau central. Les solutions à satellites sont de plus en plus utilisées pour fournir un accès large bande dans les communautés éloignées et isolées.

La mise en œuvre de solutions d'accès hertzien à haute capacité, utilisant plus efficacement le spectre et l'énergie, et alimentées par des énergies renouvelables, accélérera le déploiement de services large bande abordables dans les zones rurales et isolées.

¹¹ Situation du large bande dans les zones rurales et isolées, UIT-D Document technologique communications rurales, https://www.google.com/search?q=rural+areas+suffer+lack+from+affordable+broadband&rlz=1C1GCEU_en-GB_GB862&oq=rural+areas+suffer+lack+from+affordable+broadband&aqs=chrome..69i57j19862j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8.

¹² GSMA. Unlocking Rural Coverage: Enablers for commercially sustainable mobile network expansion. <http://www.gsma.com/mobilefordevelopment/programme/connected-society/unlocking-rural-coverage-enablers-commercially-sustainable-mobile-network-expansion>. July 2016.

Figure 8: Architecture du réseau mobile



Source: adapté d'un document de l'UIT.

Encadré 1: L'anatomie d'un réseau mobile

En général, les réseaux de téléphonie mobile et d'Internet comportent des parties centrales, des parties de raccordement et des parties du dernier kilomètre.

Les réseaux centraux (y compris la dorsale nationale et la connectivité internationale) englobent l'infrastructure à fibres optiques de grande capacité qui achemine le trafic vers et depuis les points d'intégration (par exemple, les points d'échange Internet et les points IXP), les points de connexion d'homologue à homologue entre les fournisseurs de services de premier palier et les stations d'atterrissement des câbles sous-marins pour la connectivité internationale.

La technologie de liaisons de raccordement (ou kilomètre intermédiaire) désigne l'infrastructure qui achemine le trafic vocal et de données du réseau central d'un opérateur vers un site d'agrégation, tel qu'une station de base. La liaison de raccordement est souvent le principal obstacle à la fourniture d'une couverture, en particulier dans les zones faiblement peuplées ou celles dont la topographie est difficile, comme les îles ou les zones rurales.

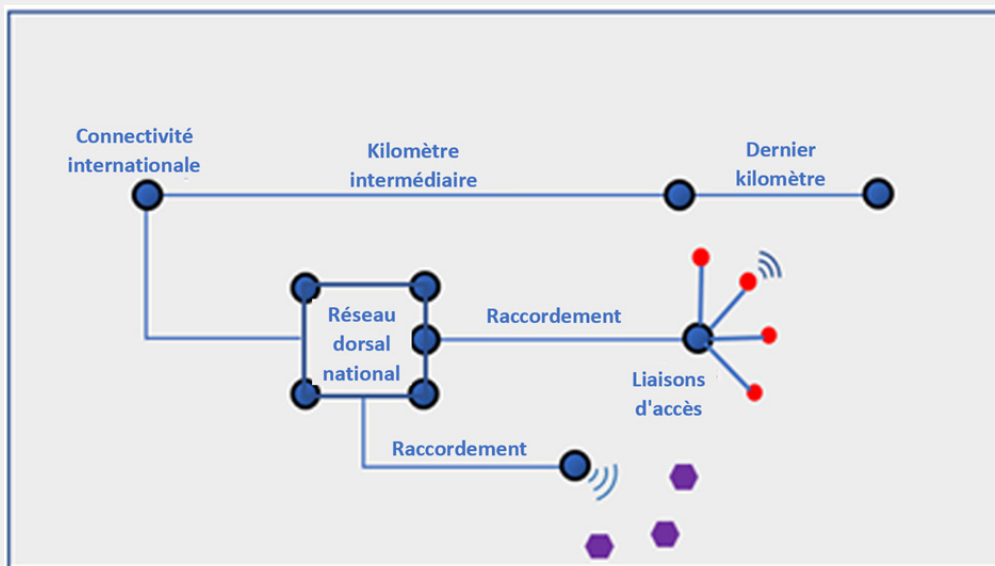
La fibre optique est la forme la plus courante de liaison de raccordement, offrant la plus grande capacité et la meilleure qualité de service. Toutefois, son coût est souvent prohibitif dans les zones rurales ou topographiquement difficiles, en raison des frais liés à l'obtention des droits de passage et des permis de construire.

La technologie des hyperfréquences est souvent utilisée dans les zones où la fibre optique est trop coûteuse ou peu pratique. Cependant, elle nécessite une visibilité directe entre les émetteurs, et son coût peut donc être prohibitif dans les zones très isolées.

La technologie de raccordement par satellite permet de surmonter les difficultés liées à la distance et à la topographie en milieu rural, mais ses coûts d'exploitation sont élevés et la qualité du service est souvent inférieure à celle de la fibre optique traditionnelle.

Encadré 1: L'anatomie d'un réseau mobile (suite)

Infrastructure du réseau



3.5.5 Futurs réseaux 5G – services innovants

La technologie de réseau de cinquième génération (5G) évolue en tant que plate-forme de fourniture de services de communication évolués pour permettre aux pouvoirs publics et aux décideurs de transformer leur infrastructure nationale afin de fournir des services numériques améliorés qui soutiennent et autonomisent les citoyens, les communautés et les entreprises.

La 5G offrira une meilleure expérience à l'utilisateur final, des performances améliorées, une faible latence et une grande fiabilité; à terme, il est envisagé que les réseaux 5G offrent des vitesses de l'ordre du gigabit. La demande de ces services sera la plus forte dans les zones urbaines à forte densité de population. Comme la fourniture de ces services améliorés dans les zones rurales ne sera pas économiquement viable, un service 5G de moindre capacité pourrait être plus approprié dans ces zones.

L'adoption de la 5G, à l'aide de réseaux de Terre ou à satellites, facilitera le déploiement d'une nouvelle gamme de services innovants, notamment un Internet des objets à grande échelle et des applications, comme la fabrication à distance, qui nécessite une commande des processus avec un facteur temps critique et l'automatisation, la robotique qui englobe la santé en ligne et la médication intelligente, le transport automatisé avec navigation et commande des véhicules, la surveillance des réseaux intelligents et les expériences immersives de réalité virtuelle, notamment dans les domaines de l'éducation et de la télémédecine.

Les réseaux 5G peuvent faciliter l'expansion des services large bande dans les zones rurales et éloignées grâce à l'utilisation du spectre de fréquences en-dessous de 1 GHz (les bandes d'ondes décimétriques à 450-800 MHz) et permettront aux fournisseurs de services de couvrir de vastes zones à moindre coût¹³.

Les systèmes de radiocommunication 5G sont conçus pour être plus économes en énergie que la 3G et la 4G, afin de pouvoir être alimentés par de petits systèmes d'énergie renouvelable. Les caractéristiques de propagation de la bande d'ondes décimétriques permettent aux liaisons de fonctionner sur de plus longues distances, avec une meilleure pénétration des obstacles géophysiques que les systèmes actuels dans les bandes de fréquences 3-6 GHz et plus et les bandes d'ondes millimétriques. Les stations de base 5G peuvent donc être situées plus près des sources d'énergie renouvelables et fournir une couverture plus large pour atteindre plus efficacement les populations isolées, à moindre coût. Les bandes de fréquences moyennes sont nécessaires pour prendre en charge le fonctionnement efficace des réseaux mobiles 5G. La plupart de ces fréquences sont actuellement utilisées pour la 2G et la 3G, ce qui pousse les opérateurs à envisager un réaménagement afin de libérer des fréquences pour les services 4G et 5G (par exemple, 1 800 MHz, 2,1 GHz, 2,3 GHz et 2,6 GHz). Cependant, la disponibilité du spectre augmente à l'échelle mondiale, dans les bandes 3 300-4 200 MHz et 4 400 MHz utilisées pour les services mobiles, et les services par satellites peuvent être intégrés pour augmenter la capacité des services 5G afin de relever certains des défis majeurs que représentent la fourniture de services multimédias, la couverture ubiquitaire, la communication de machine à machine et les missions de télécommunications essentielles dans tout le pays.

Encadré 2: Huawei - approche spectre multicouches

- Couche de couverture - exploite le spectre au-dessous de 2 GHz (par exemple 700 MHz), ce qui permet d'obtenir une couverture dans les bâtiments profonde et étendue.
- Couche de couverture et de capacité - s'appuie sur le spectre dans la gamme 2-6 GHz pour offrir le meilleur compromis entre capacité et couverture.
- Couche de super données - s'appuie sur le spectre au-dessus de 6 GHz et les bandes d'ondes millimétriques pour répondre à des cas d'utilisation particulières nécessitant des débits de données extrêmement élevés.

Source: <https://www.huawei.com/en/public-policy/5g-spectrum>.

Amélioration de l'efficacité énergétique de la 5G par regroupement des porteuses 5G

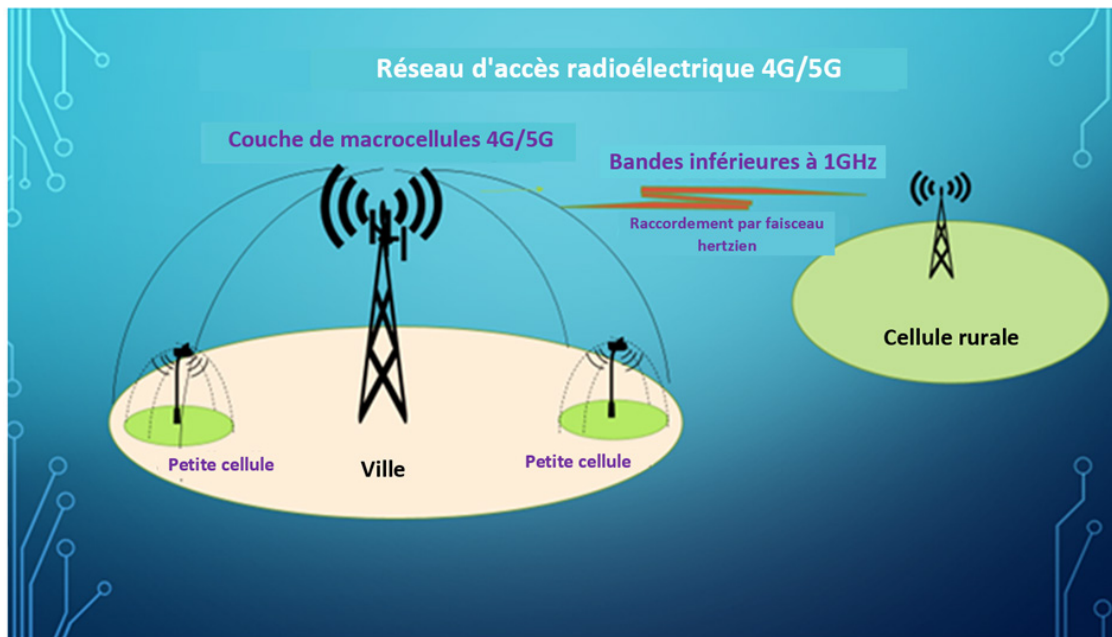
La disponibilité du spectre pour les IMT (télécommunications mobiles internationales) dans les gammes 3 300-4 200 MHz et 4 400-5 000 MHz augmente dans le monde entier. La bande de fréquences 3 400-3 600 MHz est attribuée au service mobile à titre primaire dans presque tous les pays.

Les bandes inférieures à 6 GHz sont essentielles pour prendre en charge la plupart des scénarios d'utilisation de la 5G dans une zone géographique étendue. Les gammes de fréquences 3 300-4 200 et 4 400-5 000 MHz permettent d'obtenir le meilleur compromis entre une couverture étendue et une bonne capacité.

¹³ McGuire et autres EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2012, 2012:112 <http://jwcn.urasipjournals.com/content/2012/1/112>.

L'accès dynamique au spectre (DSA) utilise une base de données pour identifier le spectre inutilisé à tout moment et en tout lieu par le titulaire de la licence, en vue de le mettre à la disposition d'autres utilisateurs sans causer de brouillage aux services existants. Le DSA peut fournir un accès opportuniste au spectre pour les utilisateurs existants et nouveaux en mettant à disposition le spectre 5G inutilisé, lorsque cela est possible, tout en donnant la priorité au titulaire principal de la licence. Les techniques DSA sont parfois utilisées dans les bandes d'ondes décimétriques des espaces blancs de la télévision.

Principales conclusions: les décideurs peuvent envisager de mettre à disposition différentes portions des plages 3 300-4 200 MHz et 4 400-5 000 MHz pour construire de grands blocs contigus tout en mettant également à disposition des fréquences dans la bande 700/800 MHz pour fournir des services large bande mobile dans les zones rurales.



3.5.6 Satellites en orbite terrestre basse - zones rurales mal desservies

Une nouvelle génération de technologies à satellites en orbite terrestre basse (LEO) pourrait révolutionner l'extension du large bande dans les zones rurales mal desservies.

Les satellites de communication sont souvent placés en orbite géosynchrone ou géostationnaire, à environ 36 000 km au-dessus de l'équateur, pour tourner autour de la Terre en 24 heures dans une position stationnaire. Cependant, ces satellites sont très coûteux à concevoir, construire, tester, lancer et déployer. De plus, le trajet aller-retour depuis le sol des signaux émis par ces satellites prend plus d'une demi-seconde.

Les satellites en orbite terrestre basse sont plus petits, orbitent plus rapidement et combinent des capacités plus puissantes avec des coûts de lancement et d'exploitation plus faibles. Ces satellites offrent des périodes de latence Internet d'environ 35 millisecondes, comparables à celles de nombreux systèmes câble et DSL desservant les particuliers, les petites entreprises et les communautés rurales.

Plusieurs entreprises mettent au point et prévoient de lancer des satellites en orbite terrestre basse au cours de la période 2020-2030. SpaceX a commencé à lancer sa nouvelle constellation de satellites Starlink. Le projet Starlink doit comprendre environ 12 000 satellites fonctionnant à une altitude d'environ 1 000 km, avec un rayon de couverture d'environ 1 000 km, ce qui nécessite un vaste réseau de satellites.

3.5.7 Systèmes utilisant des plates-formes à haute altitude

Les stations placées sur des plates-formes à haute altitude (HAPS), remplies d'hélium et fonctionnant dans la stratosphère à des altitudes d'environ 20 km, et les systèmes à satellite (y compris les constellations non géostationnaires) peuvent potentiellement fournir des débits de données très élevés (100 Mbit/s à 1 Gbit/s ou plus) pour compléter les réseaux de raccordement hertziens fixes ou de Terre en dehors des grandes zones urbaines et suburbaines. Les systèmes HAPS et à satellites peuvent fournir une transmission vidéo aux systèmes de Terre fixes dans les zones rurales et très isolées, comme les îles. Ils peuvent être intégrés à d'autres réseaux, tels que les solutions d'accès hertzien fixes et mobiles, augmentant ainsi les capacités des services 5G, afin de relever les grands défis liés à la croissance du trafic multimédia, à la couverture ubiquitaire, à l'Internet des objets, à la communication de machine à machine et aux missions de télécommunications essentielles¹⁴.

Les fréquences inférieures à 1 GHz seront plus adaptées aux applications HAPS à longue portée et à faible bande passante pour offrir une large couverture dans les zones rurales, notamment dans les pays en développement, y compris en Afrique, afin d'améliorer la couverture 4G et 5G. Cette approche doit être examinée par la Conférence mondiale des radiocommunications en 2023 (CMR-23), en envisageant l'utilisation de stations placées sur des plates-formes à haute altitude comme stations de base IMT dans le service mobile dans certaines bandes de fréquences inférieures à 2,7 GHz déjà identifiées pour les IMT.

Principales conclusions: les décideurs peuvent envisager de mettre à disposition des fréquences basses (par exemple dans la bande 700 MHz) pour garantir l'accès au large bande mobile dans les zones rurales.

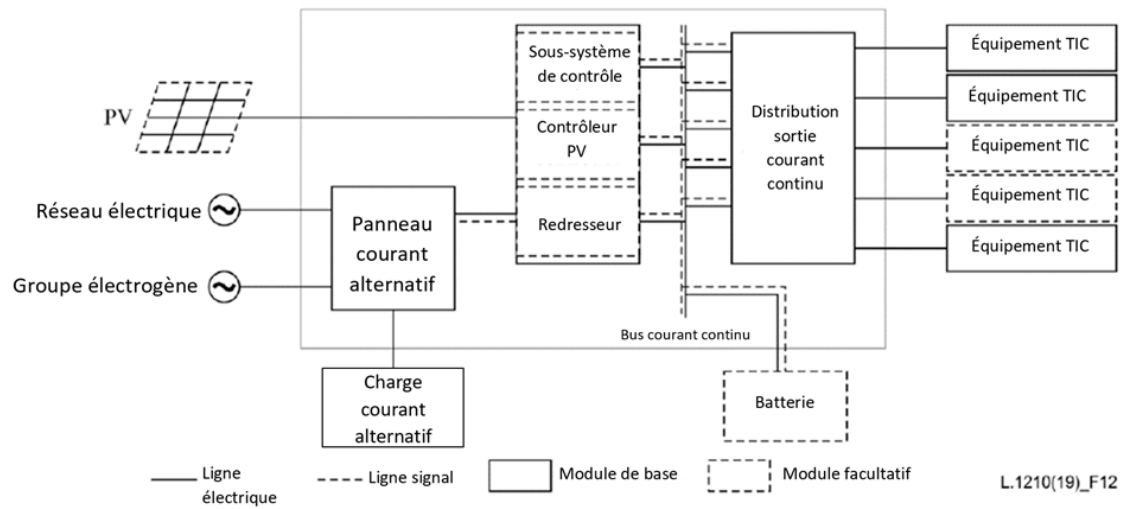
On peut s'attendre à ce que les bandes 3,3-3,8 GHz puissent servir de base à une gamme de services 5G initiaux.

3.5.8 Solution d'énergie renouvelable pour les stations de base 5G

Cette solution consiste à connecter différentes sources d'énergie, telles que le réseau électrique, l'énergie renouvelable et les groupes électrogènes, aux panneaux d'alimentation des stations de base. Afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie renouvelable, le système applique une technologie intelligente pour utiliser l'énergie renouvelable de manière préférentielle, et sélectionne autrement le réseau électrique, un système de stockage sur batterie ou un groupe électrogène en fonction du coût d'exploitation dans différentes conditions. On trouvera ci-dessous un exemple de la structure de base du système.

¹⁴ UIT: Systèmes utilisant des plates-formes à haute altitude, <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx>.

Figure 9: Système d'entrée de sources d'énergie multiples pour station de base 5G, y compris l'énergie renouvelable



Lorsque la capacité du réseau est insuffisante en raison des besoins croissants en énergie de la station de base 5G, l'énergie renouvelable provenant de cellules solaires photovoltaïques (PV), d'éoliennes et de piles à combustible pourrait être un très bon choix pour augmenter la capacité d'alimentation disponible, afin de garantir que l'ensemble du système continue de fonctionner sans problème et sans interruption. Cette solution est décrite dans la recommandation UIT-T L.1210 sur les solutions durables d'alimentation électrique pour les réseaux 5G.

4 Manque d'accès à l'électricité

4.1 Les problèmes liés à l'énergie limitent l'expansion du large bande

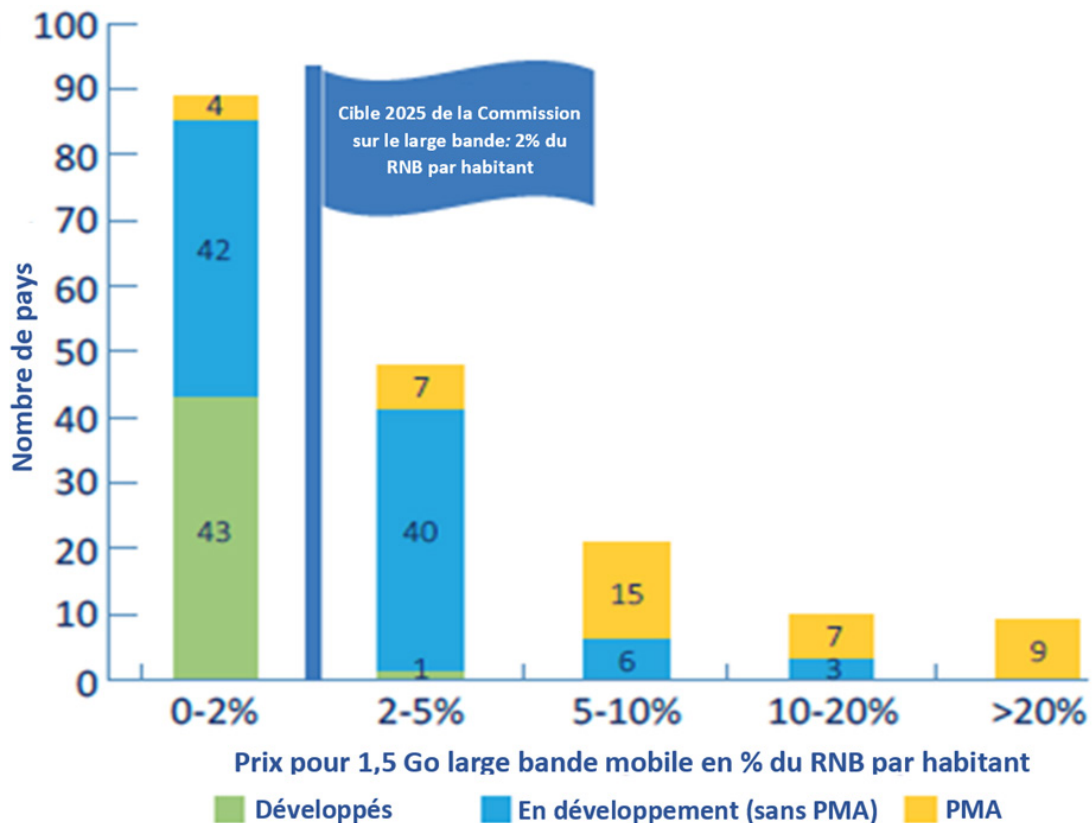
L'accès à une électricité fiable et abordable est une condition préalable au développement d'une infrastructure d'accès au large bande dans les zones rurales. Sans cela, les avantages sociaux et économiques qui conduiront à une prospérité partagée et transformeront la vie des familles à faible revenu dans les communautés rurales ne pourront être pleinement réalisés.

L'écosystème mondial des TIC consomme une quantité importante d'énergie, estimée à environ 10% de toute l'électricité produite dans le monde chaque année, pour alimenter les centres de données et de l'informatique en nuage, l'infrastructure Internet large bande, les réseaux/logiciels informatiques et les appareils des utilisateurs finals. Si un accès abordable au réseau électrique n'est pas disponible, l'infrastructure large bande dans les zones rurales doit avoir accès à des sources hors réseau fiables.

L'absence de réseau électrique constitue un défi majeur pour les opérateurs de télécommunications, qui doivent fournir leurs propres solutions d'alimentation pour étendre l'infrastructure large bande hertzienne cellulaire ou fixe dans les zones rurales.

Bien que des progrès considérables aient été réalisés ces dernières années, l'accessibilité financière reste un problème majeur dans de nombreux pays en développement, notamment dans les PMA, comme le montre la Figure 10.

Figure 10: Le large bande reste coûteux dans les PMA



Afin de rendre les forfaits de données large bande d'entrée de gamme (1,5 Go) abordables dans les pays en développement, la Commission sur le large bande au service du développement durable a fixé comme objectif que les prix du large bande ne dépassent pas deux pour cent du revenu national brut (RNB) mensuel par habitant d'ici à 2025.

L'absence d'une infrastructure de réseau électrique dans les zones rurales augmente le coût de la construction de réseaux Internet large bande pour desservir les communautés isolées, ce qui peut représenter une proportion importante de l'investissement nécessaire pour établir et exploiter une infrastructure large bande (systèmes de raccordement, systèmes de stations de base mobiles ou connexions fixes d'accès hertzien du dernier kilomètre).

Les solutions d'alimentation diesel autonomes, lorsqu'elles sont utilisées comme source d'énergie primaire dans les zones rurales, supposent des coûts d'investissement et d'exploitation élevés. Le retour sur investissement pour les opérateurs est faible, en raison du coût élevé de la maintenance, de la sécurité et du carburant pour les groupes électrogènes diesel dans les zones rurales et souvent isolées.

En conséquence, les solutions innovantes en matière d'énergie pour les zones rurales doivent comprendre des mesures visant à améliorer la disponibilité et la fiabilité de l'approvisionnement en électricité pour les composants actifs de l'infrastructure des réseaux de télécommunications ruraux, ainsi que pour l'accès aux équipements de terminaison (par exemple les équipements des locaux d'abonnés, les dispositifs, les ordinateurs, les téléphones et les téléviseurs intelligents) pour les utilisateurs finals, les services communautaires et les clients commerciaux locaux.

Dans les communautés rurales dépourvues d'électricité, les habitants doivent se rendre aux points de charge de batterie les plus proches, qui peuvent se trouver à plusieurs kilomètres, pour recharger leurs appareils portables ou autres appareils TIC fonctionnant sur batterie. Il en résulte des coûts supplémentaires et des interruptions de service, ce qui réduit encore la demande de services Internet et l'adoption des TIC parmi les populations rurales pauvres. D'une manière générale, sans accès à l'électricité, les équipements et installations TIC ne seront pas déployés dans les zones rurales et les îles isolées, à l'exception des appareils portatifs. Dans certaines situations, une alimentation de secours temporaire peut être fournie par des batteries.

Le premier des obstacles susmentionnés peut être décrit comme le "déficit d'offre de large bande", à savoir l'absence de service large bande dans une zone où les gens vivent et travaillent. Le deuxième obstacle, le "déficit de demande de large bande", est compris comme la proportion de la population nationale qui pourrait potentiellement avoir accès au large bande, mais qui n'acquiert pas ce service.

Le déficit d'offre en large bande est particulièrement aigu dans les zones rurales et isolées, où la densité de population est nettement inférieure à celle des zones urbaines et périurbaines. Les principaux obstacles au déploiement des services large bande dans les zones rurales et les communautés insulaires des pays en développement sont les suivants:

- difficultés et isolement liés à la géographie et à la topographie;
- accès insuffisant à des infrastructures fiables, abordables et sûres, notamment au réseau électrique et aux routes;
- absence de couverture de l'Internet mobile ou de réseaux d'accès hertzien fixes large bande et absence de moyens d'accès à la bande passante internationale;
- absence de moyens TIC;

- lieux de recharge électrique limités et éloignés pour les appareils mobiles et les dispositifs TIC Internet;
- solutions d'alimentation hors réseau limitées - l'approvisionnement en groupes électrogènes diesel est irrégulier, tandis que les énergies renouvelables sont intermittentes.

Ces dernières années, les opérateurs de réseaux mobiles et de services large bande hertzien fixe ont été pénalisés pour n'avoir pas atteint les objectifs de performance convenus avec les régulateurs en raison d'une détérioration de la qualité du service et pour avoir manqué les objectifs de disponibilité. Malheureusement, l'une des raisons les plus courantes des pannes de réseau et des temps d'arrêt est l'absence d'une alimentation électrique fiable. Même en tant que source de secours (sans parler de la source principale), un groupe électrogène diesel est un piètre substitut à l'accès au réseau national.

4.2 Énergie durable pour tous

Le marché de l'électricité connaît actuellement un processus de transformation, alors que les technologies des énergies renouvelables commencent à remplacer les combustibles fossiles et que les secteurs traditionnels de l'électricité et du large bande - auparavant dominés par les opérateurs historiques - sont perturbés par des modèles économiques plus décentralisés et innovants.

La réalisation de l'objectif de l'énergie durable pour tous est l'un des ODD. Dans le cadre des stratégies visant à atteindre cet objectif, la Commission sur le large bande au service du développement durable a fixé une série d'objectifs à atteindre d'ici à 2030, visant à:

- garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable;
- accroître nettement la part d'énergie renouvelable dans le bouquet énergétique mondial;
- multiplier par deux le taux mondial d'amélioration de l'efficacité énergétique;
- renforcer la coopération internationale en vue de faciliter l'accès aux sciences et technologies de l'énergie propre, notamment les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les nouvelles technologies de combustion propre des combustibles fossiles, et encourager l'investissement dans l'infrastructure énergétique et les technologies propres dans le domaine de l'énergie;
- développer l'infrastructure et améliorer la technologie afin d'approvisionner en services énergétiques modernes et durables tous les habitants des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés, des petits États insulaires en développement et des pays en développement sans littoral, dans le respect des programmes d'aide qui les concernent.

L'objectif 7 des Objectifs de développement durable invite aussi les États membres à "garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables et modernes, à un coût abordable".

La baisse rapide du coût des technologies fondées sur des énergies renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, associée à des mesures visant à améliorer l'efficacité et à des mécanismes innovants de fourniture de services énergétiques, devrait accélérer les initiatives stratégiques visant à atteindre les objectifs d'accès universel à l'électricité.

Les infrastructures représentent une part importante du coût de l'accès à l'électricité. Les populations urbaines ont généralement accès à l'électricité via les réseaux électriques nationaux. Dans les pays en développement, cependant, l'acheminement de l'électricité vers les régions rurales et isolées par le biais d'une vaste infrastructure de transmission et de distribution

nécessite un investissement substantiel qui est prohibitif pour de nombreuses compagnies d'électricité en place et qui génère des rendements très faibles. La production d'électricité hors réseau à l'aide d'architectures de mini-réseaux et de micro-réseaux, combinée à des sources d'énergie renouvelables moins coûteuses et plus propres disponibles localement, peut offrir une alimentation électrique fiable et abordable aux installations rurales et isolées¹⁵.

4.3 Déficit d'électricité en milieu rural dans les pays en développement

L'accès peu fiable et inéquitable à l'électricité est l'un des principaux obstacles au développement de l'activité économique et à l'extension de l'infrastructure large bande dans les zones rurales. Il s'agit d'un facteur dissuasif majeur pour l'investissement privé¹⁶.

En 2017, 14% de la population mondiale (environ 1 milliard de personnes) n'avait toujours pas accès à l'électricité. Ce chiffre a fortement diminué, sauf en Afrique subsaharienne (voir la Figure 11). L'Asie et l'Afrique représentaient 95% des personnes n'ayant pas accès à l'électricité, dont 84% vivaient dans des zones rurales (voir la Figure 12).

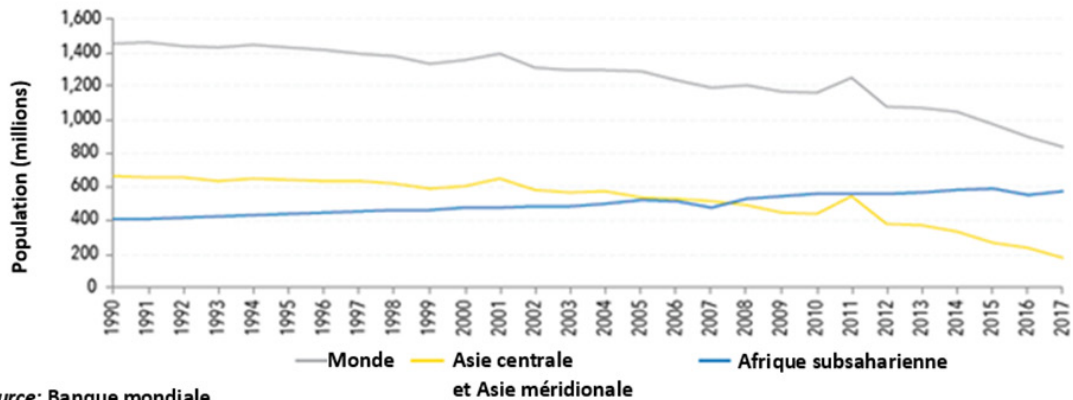
La capacité mondiale de production d'énergie électrique a augmenté de 4% en 2018, les énergies renouvelables représentant 45% de cette augmentation. En 2017, au niveau mondial, le taux d'accès à l'électricité s'élevait à 79% dans les zones rurales, loin derrière le taux d'accès urbain de 97%. Les populations rurales non desservies représentent 87% du déficit d'accès mondial. En 2017, 66% de la population rurale mondiale sans accès à l'électricité vivait en Afrique subsaharienne, comme le montre la Figure 11.

¹⁵ CNUCED - RAPPORT 2017 SUR LES PAYS LES MOINS AVANCÉS - Potentiel de transformation de l'accès à l'énergie, <https://unctad.org/en/pages/PublicationWebflyer.aspx?publicationid=1902>.

¹⁶ Le Pacte du G-20 avec l'Afrique. Un rapport conjoint de la BAD, du FMI et du WBG. Réunion des ministres des Finances et des gouverneurs des banques centrales du G-20, 17-18 mars 2017, Baden-Baden, Allemagne.

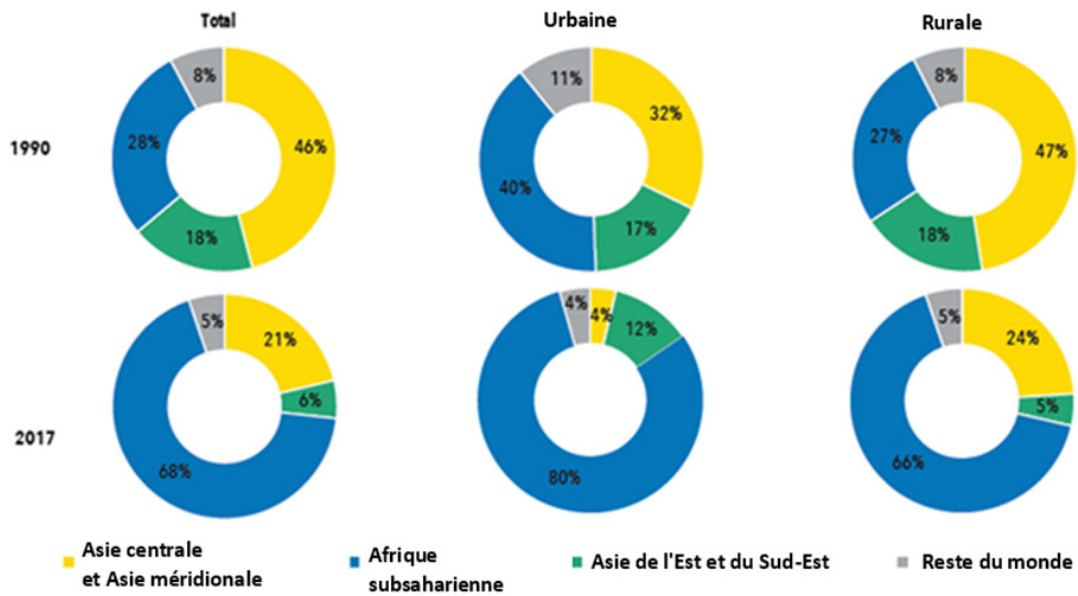
Figure 11: Population rurale sans accès à l'électricité

Évolution du déficit d'accès à l'électricité (en millions de personnes), 1990-2017



Source: Banque mondiale.

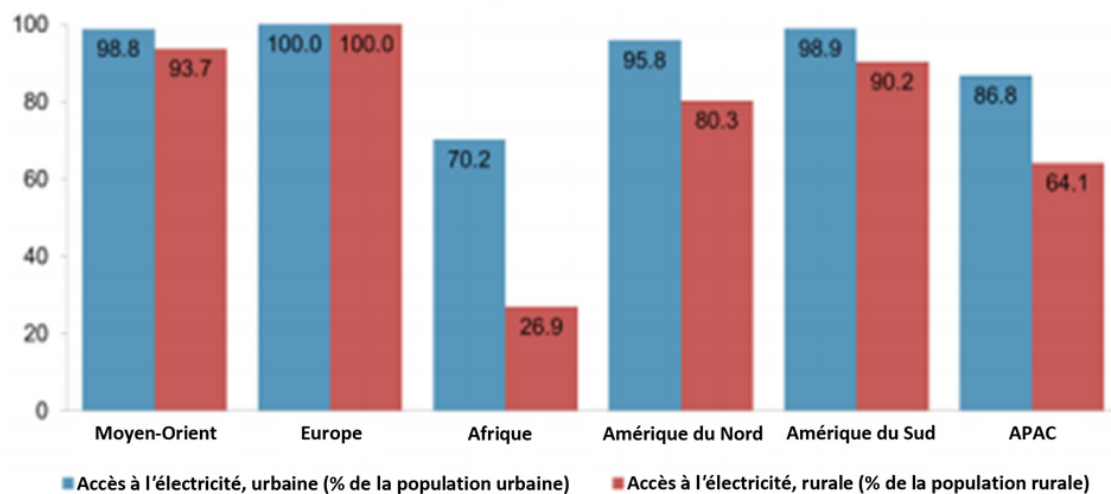
Parts régionales du déficit mondial d'accès à l'électricité, au total et selon l'écart urbain-rural, 1990 et 2017



Source: Banque mondiale.

Note: sur la base de la population sans accès à l'électricité

Figure 12: Population ayant accès à l'électricité (urbaine et rurale) en%



Source: Banque mondiale (2017)

Sans une énergie abordable, il est difficile de favoriser la croissance économique, de vaincre la pauvreté, d'offrir une éducation de qualité, de stimuler les entreprises locales, de développer les possibilités d'emploi et de soutenir la santé et le développement humains.

Des infrastructures inadéquates, notamment en matière d'accès à l'électricité, limitent le déploiement et l'accessibilité financière des services large bande, contribuant ainsi à l'accroissement des inégalités.

Les progrès technologiques et la baisse du coût des énergies renouvelables et des technologies numériques ont créé des possibilités de transition d'un monde à forte teneur en carbone et dépendant des combustibles fossiles vers une économie durable et à faible teneur en carbone. Selon des études consacrées aux politiques menées dans le monde, l'énergie éolienne et solaire photovoltaïque fournira plus de la moitié de la capacité de production d'électricité supplémentaire à mettre en service d'ici à 2040.

4.4 Transition vers une infrastructure d'énergies renouvelables

Le modèle traditionnel de distribution d'électricité par réseau – qui repose sur l'extension par les fournisseurs d'électricité historiques de leurs réseaux nationaux de distribution sur de longues distances jusqu'aux zones rurales – a échoué, étant donné que la plupart des populations rurales des régions en développement d'Afrique et d'Asie n'ont pas accès au réseau.

Les énergies renouvelables ont permis aux populations de passer rapidement des combustibles fossiles à une énergie propre et abordable, contribuant ainsi à l'effort mondial de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour protéger l'environnement. Grâce à l'innovation technologique, le modèle le plus fiable pour accroître l'offre d'électricité abordable repose sur des solutions énergétiques décarbonées, numérisées et décentralisées.

Au cours de la dernière décennie, le coût des énergies renouvelables a chuté de manière spectaculaire. Une étude réalisée en 2019 par l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) a conclu que le prix de l'énergie solaire et éolienne renouvelable était tombé à un niveau égal, voire inférieur, à celui du charbon et d'autres combustibles fossiles.

Les fournisseurs de services large bande peuvent surmonter les problèmes liés à l'énergie et les obstacles à l'investissement dans l'infrastructure rurale large bande en produisant leur propre énergie à partir de sources renouvelables, propres et moins chères, ou en collaborant avec des projets communautaires de développement des technologies énergétiques. Un secteur d'activité est également en train de se créer autour de la fourniture de solutions de stockage, qui sont essentielles pour favoriser la pénétration des énergies renouvelables. En outre, l'innovation informatique joue également un rôle clé dans l'optimisation de la production et de la consommation d'électricité.

4.5 Améliorer l'efficacité énergétique - optimiser la consommation

"Les appareils à haut rendement énergétique contribueront à réduire les coûts d'investissement énergétique nécessaires pour stimuler les programmes d'accès à l'électricité. En réduisant la puissance d'un seul watt de la charge d'un appareil hors réseau, cela permettrait de réduire les coûts initiaux des systèmes solaires, d'améliorer le service, ou les deux." (Van Buskirk, 2015). De même, l'efficacité énergétique peut rendre les installations solaires hors réseau plus abordables.

Selon l'analyse effectuée par Van Buskirk en 2015, "le coût initial d'un système énergétique hors réseau habituel peut être réduit de 50% si l'on utilise des appareils à haut rendement et des systèmes photovoltaïques et des batteries de taille adéquate, tout en fournissant un service énergétique équivalent ou supérieur". Des gains d'efficacité peuvent être obtenus en repensant l'équipement radioélectrique des stations de base (le module de traitement des signaux numériques, les amplificateurs de puissance des émetteurs-récepteurs, les fréquences radioélectriques et les fils de connexion). L'optimisation de la consommation d'énergie des systèmes de stations d'émission-réception de base (BTS) et des processeurs de signaux numériques est réalisée en utilisant des architectures de circuits intégrés telles que ASIC, FPGA ou DSP, qui sont combinées pour obtenir une meilleure efficacité¹⁷.

La consommation d'énergie peut être encore optimisée en:

- désactivant des systèmes à certains moments pour s'adapter à la charge¹⁸;
- gérant les ressources du réseau de façon dynamique;
- partageant des ressources de la station de base mobile, de l'émetteur-récepteur sans fil et de la station de répéteur entre différents opérateurs.

En outre, l'extension de la plage de températures de fonctionnement permet d'éliminer ou de réduire les besoins en énergie de climatisation. Il en résulte une réduction significative de la demande et des coûts énergétiques sur les sites isolés.

¹⁷ S. Zoican, "The role of programmable digital signal processors (dsp) for 3G mobile communication systems", *Acta Technica Napocensis*, vol. 49, pp. 49-56, 2008.

¹⁸ L. M. Correia, D. Zeller, O. Blume et autres, "Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, N° 11, pp. 66-72, 2010. Voir sur: [Publisher Site](#) | [Google Scholar](#)

5 Sources d'énergie renouvelables pour l'électrification rurale

Les solutions d'énergie renouvelable sont aujourd'hui la source la moins coûteuse de production d'électricité dans toutes les régions du monde. Au cours de la dernière décennie, le coût de l'électricité produite à partir de l'énergie solaire photovoltaïque, de l'énergie éolienne, de l'énergie hydraulique, de l'énergie géothermique et de la biomasse a considérablement diminué, au point de se situer dans la fourchette de coût de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles¹⁹.

5.1 Les énergies renouvelables sont plus compétitives que les sources d'énergie fossiles

Le coût de l'électricité produite par les grands projets solaires photovoltaïques récents est tombé en dessous du prix de l'électricité produite par les centrales à combustible fossile (IRENA 2018). La baisse des coûts de l'énergie éolienne terrestre et de l'énergie solaire thermodynamique a également entraîné une augmentation de la compétitivité des autres sources renouvelables par rapport à la production d'électricité à partir de charbon ou d'autres combustibles fossiles.

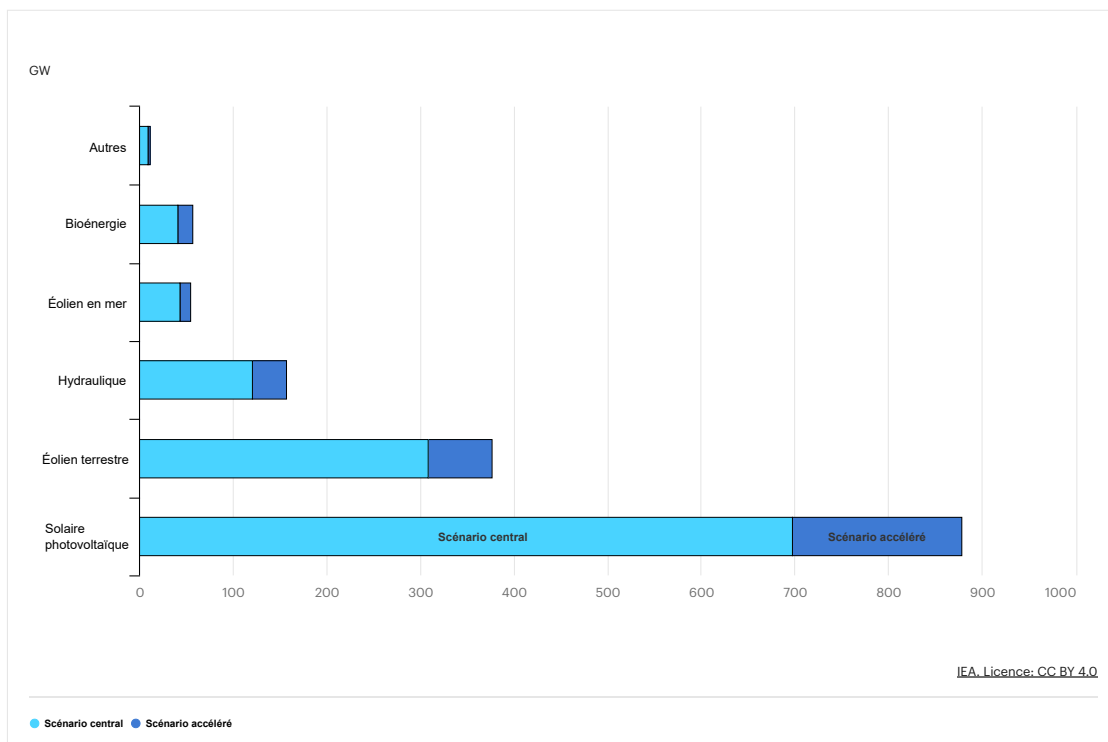
Les solutions d'énergie renouvelable peuvent être utilisées dans diverses configurations, des réseaux connectés au réseau électrique jusqu'aux réseaux hors réseau électrique et aux solutions domestiques autonomes.

Dans les zones rurales dépourvues d'accès au réseau électrique, les réseaux énergétiques hors réseau électrique s'imposeront comme le réseau de choix pour alimenter les composants de l'infrastructure large bande et pour fournir de l'électricité à l'économie rurale, en offrant des avantages en matière d'évolutivité, de flexibilité et de modularité.

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la capacité de production à partir de sources d'énergie renouvelables devrait augmenter de 50% (soit une augmentation de 1 200 gigawatts) entre 2019 et 2024 (voir les Figures 13 et 14).

¹⁹ IRENA LES COÛTS DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE RENOUVELABLE EN 2018. <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>.

Figure 13: Croissance de la capacité en énergies renouvelables entre 2019 et 2024 par technologie (GW)



Source: AIE, Croissance de la capacité en énergies renouvelables entre 2019 et 2024 par technologie.

Les énergies renouvelables sont devenues la technologie privilégiée. D'ici à 2040, elles représenteront environ 66% (deux tiers) de toutes les nouvelles capacités de production d'électricité dans le monde et leur part dans la production totale d'électricité atteindra plus de 40% (voir la Figure 14).

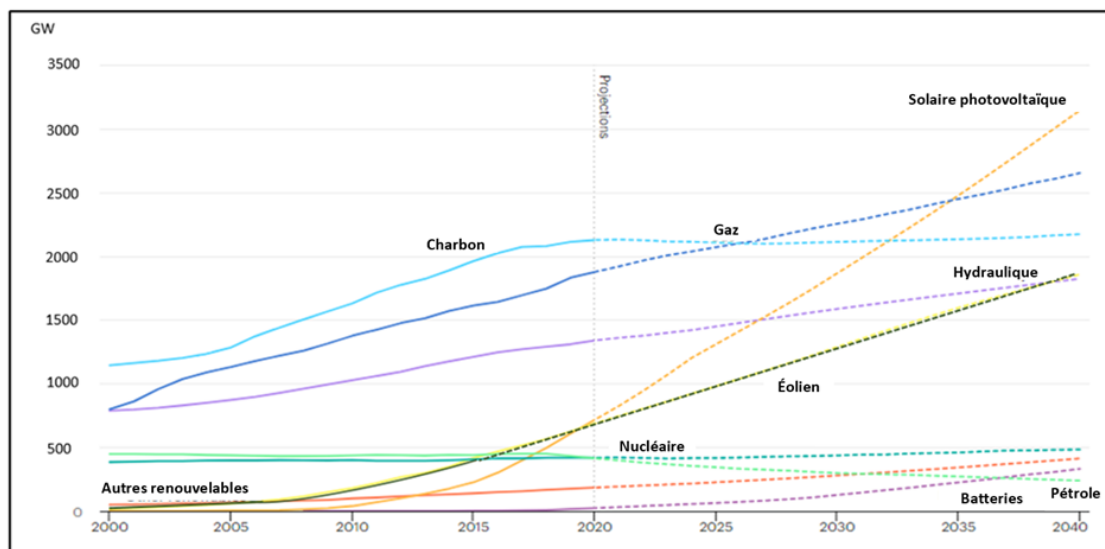
Les solutions renouvelables en mini-réseau et micro-réseau qui ne sont pas connectées au réseau primaire doivent utiliser des configurations hybrides qui combinent des systèmes solaires ou éoliens avec des solutions de stockage d'énergie pour gérer la variabilité et l'intermittence de ces types de sources d'énergie. Cela permet d'assurer une disponibilité et une fiabilité élevées de l'électricité distribuée sur le mini-réseau ou le micro-réseau.

Le cas échéant, les mini-réseaux hybrides peuvent utiliser une source d'énergie renouvelable combinée à des groupes électrogènes diesel de secours, une option intéressante pour les opérateurs qui possèdent déjà des parcs de ces groupes électrogènes anciens. Ces solutions peuvent être optimisées pour réduire au minimum la durée et la fréquence d'utilisation des groupes électrogènes diesel, ce qui permet de réaliser des économies significatives sur la consommation de carburant, la maintenance et les coûts d'exploitation.

Les progrès considérables réalisés dans le domaine des solutions de stockage de l'énergie ont eu des incidences positives sur la fiabilité de l'approvisionnement en énergie et ont conduit à une utilisation accrue des solutions d'énergie renouvelable dans les zones rurales. Dans les systèmes solaires photovoltaïques, les solutions de stockage de l'énergie sont principalement utilisées pour répondre aux pics de consommation du soir et pour réguler et lisser l'énergie fournie par le mini-réseau. Lorsque le mini-réseau est connecté au réseau principal, l'énergie

excédentaire peut être vendue à l'opérateur du réseau, ce qui contribue à réduire les émissions de dioxyde de carbone.

Figure 14: Capacité de production d'électricité installée et projetée par source 2000-2040



(Capacité de production d'électricité installée par source dans le scénario des nouvelles politiques, 2000-2040)

Source: AIE Perspectives énergétiques mondiales 2019 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.

Des progrès considérables ont été réalisés en matière d'accès à l'énergie ces dernières années, le taux d'électrification mondial atteignant 89% en 2017. Toutefois, les PMA n'ont pas bénéficié de cette évolution, en particulier l'Afrique subsaharienne, où 580 millions de personnes, vivant principalement dans les zones rurales, n'ont toujours pas accès à l'électricité.

L'AIE prévoit que la capacité combinée de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire photovoltaïque dépassera 38% de l'ensemble des sources d'énergie d'ici à 2040, contre 18% environ en 2018. Les zones rurales d'Afrique et d'Asie, qui disposent de ressources en rayonnement solaire parmi les plus riches au monde, ont ainsi la possibilité de déployer des solutions solaires photovoltaïques comme source d'électricité la moins chère.

Le coût de l'énergie renouvelable a chuté de 77% pour atteindre un peu moins de 0,03 USD/kWh, rendant l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables plus compétitive par rapport aux sources d'énergie fossiles (voir la Figure 15)²⁰.

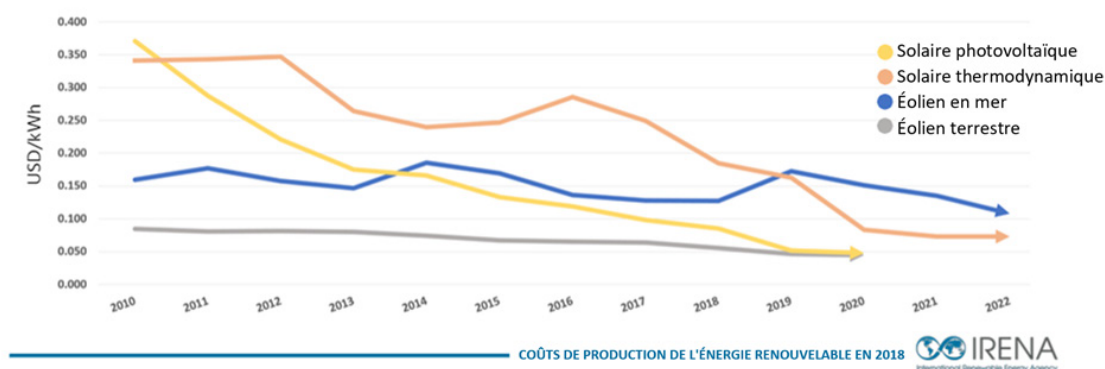
La compétitivité des énergies renouvelables offre de vastes possibilités aux entreprises privées et aux sociétés du secteur de l'énergie de s'engager dans de nouveaux modèles commerciaux pour mettre en œuvre des solutions innovantes en matière d'énergies renouvelables afin de combler l'écart en matière d'accès à l'électricité entre les zones rurales et urbaines, de limiter l'utilisation des combustibles fossiles et de réduire ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

²⁰ IRENA (2019) - L'avenir du solaire photovoltaïque, <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>.

"L'électrification sur la base d'énergies renouvelables compétitives en matière de coûts est la base de la transformation énergétique et une solution clé de décarbonation à faible coût à l'appui des objectifs climatiques énoncés dans l'accord de Paris" (IRENA 2019)²¹.

Les progrès en matière d'énergies renouvelables et les innovations dans le domaine des technologies numériques, soutenus par un engagement politique national fort en faveur des initiatives pour l'accès à l'énergie, associés au financement et à l'esprit d'entreprise local, peuvent accélérer considérablement l'expansion de l'accès à l'électricité dans les zones rurales.

Figure 15: Coûts de production de l'énergie renouvelable en 2018



Source: <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2019/May/Falling-Renewable-Power-Costs-Open-Door-to-Greater-Climate-Ambition>.

Les taux d'électrification dans les zones rurales, où vivent la plupart des personnes qui n'ont pas accès à l'électricité, ont augmenté rapidement et, en 2018, ils étaient estimés à environ 76%, selon les données du Groupe de la Banque mondiale²².

5.2 Énergie solaire

L'énergie solaire est la source d'énergie propre la plus répandue et la plus adaptée à l'alimentation distribuée des installations de télécommunications rurales, en raison de la modularité de la technologie: elle peut facilement être adaptée aux besoins en énergie.

L'accélération du déploiement des solutions d'énergie renouvelable, en particulier des technologies solaires, permettra de réduire considérablement les émissions de dioxyde de carbone. La capacité installée de cellules photovoltaïques devrait être multipliée par six au cours de la prochaine décennie, et les prix devraient baisser d'environ 0,08/kWh (coûts installés) d'ici à 2030²³. Les avancées technologiques dans le domaine de l'énergie solaire, la compétitivité de l'énergie solaire et les investissements ciblés dans les projets d'électrification rurale, soutenus par des mesures judicieuses, apporteront des avantages socio-économiques considérables aux populations urbaines et rurales.

²¹ La baisse des coûts de l'énergie renouvelable ouvre la voie à une plus grande ambition climatique <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2019/May/Falling-Renewable-Power-Costs-Open-Door-to-Greater-Climate-Ambition>.

²² IRENA, Solutions d'énergie renouvelable hors réseau pour élargir l'accès à l'électricité; https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf.

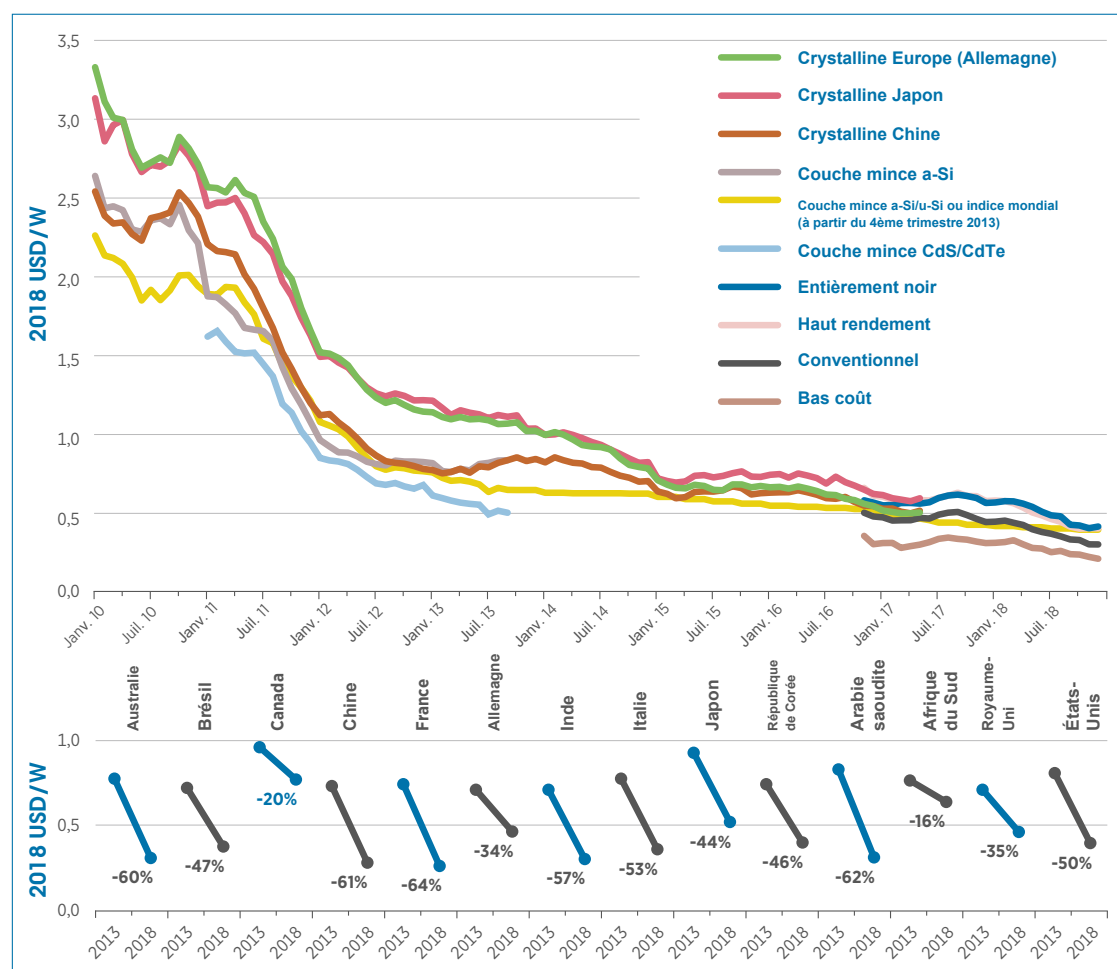
²³ IRENA 2019: L'avenir du solaire photovoltaïque, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf.

L'énergie solaire photovoltaïque a connu une croissance plus rapide que toute autre source d'énergie en 2016, principalement en raison du déploiement réussi de l'énergie solaire photovoltaïque en Chine. L'augmentation des volumes et l'amélioration des économies d'échelle ont entraîné une baisse importante des coûts. Les énergies renouvelables représentent désormais près des deux tiers des nouvelles capacités nettes de production d'électricité en 2016, avec près de 165 gigawatts (GW) mis en service (voir la Figure 14). Le coût de l'électricité produite par l'énergie solaire photovoltaïque à grande échelle a connu une baisse spectaculaire et soutenue: il a chuté de plus de 77% entre 2010 et 2018 (moyenne mondiale pondérée, "coût normalisé de l'électricité" - publié par l'IRENA en 2019). Cette réduction significative des prix de l'énergie solaire a été observée dans toutes les régions du monde (voir les Figures 16 et 17).

Dans les pays en développement, en particulier en Afrique et en Asie, l'AIE prévoit une multiplication par trois des programmes d'électrification solaire photovoltaïque hors réseau, pour atteindre 3 000 MW, grâce aux investissements du secteur privé et à d'autres programmes de financement. Cependant, la principale contrainte technique qui pèse sur le déploiement des cellules solaires est l'espace physique requis, qui est inversement lié à l'efficacité des panneaux. Plus l'efficacité du panneau est élevée, moins il nécessite d'espace.

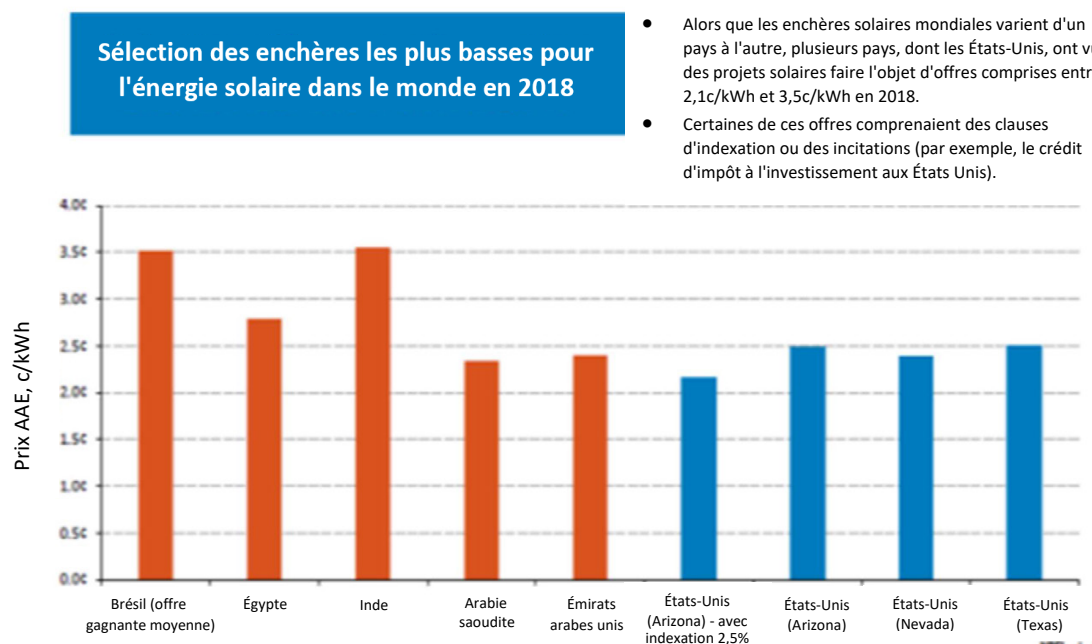
Figure 16: Réduction du prix de l'énergie solaire photovoltaïque

Prix moyens des modules par type et par marché de 2013 à 2018



Sources: sur la base de GlobalData, 2018; IRENA Renewable Cost Database, 2019; Photon Consulting, 2018; et pvXchange, 2019.

Figure 17: Enchères les plus basses pour l'énergie solaire en 2018



Note: AAE = Accord d'achat d'électricité.

Source: Solar Power Europe - "Global Market Outlook for Solar Power, 2019-2023".

5.2.1 Aperçu de la technologie solaire

Un module photovoltaïque est l'élément de base d'un système d'énergie solaire, composé de plusieurs petites cellules photovoltaïques reliées électriquement. Il utilise une technologie à base de semi-conducteurs qui convertit la lumière du soleil en courant continu. Les modules photovoltaïques sont conçus pour une puissance électrique allant de quelques watts à 100 watts.

Les panneaux en silicium cristallin (c-Si) sont des panneaux solaires photovoltaïques de première génération, mais ils détiennent encore 95% des parts du marché mondial de la production photovoltaïque (Fraunhofer ISE, 2019). Les économies d'échelle les rendent plus abordables que les autres technologies. Les panneaux cristallins ont un rendement élevé, jusqu'à 17% pour les panneaux photovoltaïques multicristallins et 18% pour les panneaux photovoltaïques monocristallins. De nouvelles améliorations en matière de coûts, de pureté des matériaux et de rendement sont attendues au cours des prochaines années (GlobalData, 2019).

Les technologies photovoltaïques à couches minces de deuxième génération sont moins chères à produire, mais leur rendement est généralement plus faible. D'autres dispositifs prometteurs font l'objet de recherches, tels que les cellules pérovskites, qui présentent des rendements élevés allant jusqu'à 24,4%, mais qui ne sont pas encore prêtes à être commercialisées.

Une nouvelle technologie cellulaire est fondée sur l'utilisation de cellules à émetteur et contact arrière passivés (PERC). Celles-ci présentent une architecture de cellule en silicium avancée, dont la construction est similaire à celle des cellules photovoltaïques monocristallines conventionnelles. Les PERC sont en train de devenir la nouvelle norme industrielle pour les cellules monocristallines, grâce à l'amélioration de la fiabilité, des performances et du rendement des outils de production.

Le choix de la technologie solaire photovoltaïque qui conviendrait à une installation donnée est donc déterminé par le compromis entre le coût d'investissement du panneau, l'efficacité du module, la disponibilité de l'espace et les facteurs locaux.

5.2.2 Dispositions des panneaux solaires

Les panneaux fixes sont conçus de manière à ce que les modules solaires montés soient orientés vers les rayons du soleil (en direction de l'équateur) afin de fournir un profil de production d'énergie annuel optimal. L'autre solution consiste à utiliser un système capable de suivre le soleil, comme les systèmes de suivi à deux axes, qui sont toutefois beaucoup plus coûteux. L'inclinaison optimale, pour maximiser l'intensité du rayonnement direct, dépend des caractéristiques climatiques et topographiques locales et doit être prise en compte dans les coûts d'installation.

La performance des modules photovoltaïques est influencée par les conditions de température. Lorsqu'ils sont associés à des régulateurs de charge modernes utilisant le suivi du point de puissance maximale, les performances des panneaux solaires sont améliorées par temps froid, alors que les régulateurs de charge traditionnels transfèrent le courant de la cellule solaire directement à la batterie sans tenir compte de la variation des performances de la cellule solaire due aux conditions ambiantes²⁴. Les régulateurs de charge équipés d'un système de suivi du point de puissance maximale peuvent optimiser le transfert de courant, ce qui se traduit par des améliorations significatives des performances globales.

Les modules solaires photovoltaïques peuvent être montés au sol, sur un bâtiment/toit ou sur un pylône, avec des systèmes de suivi solaire à inclinaison fixe ou à axe unique/double.

5.3 Considérations relatives au dimensionnement des installations solaires photovoltaïques

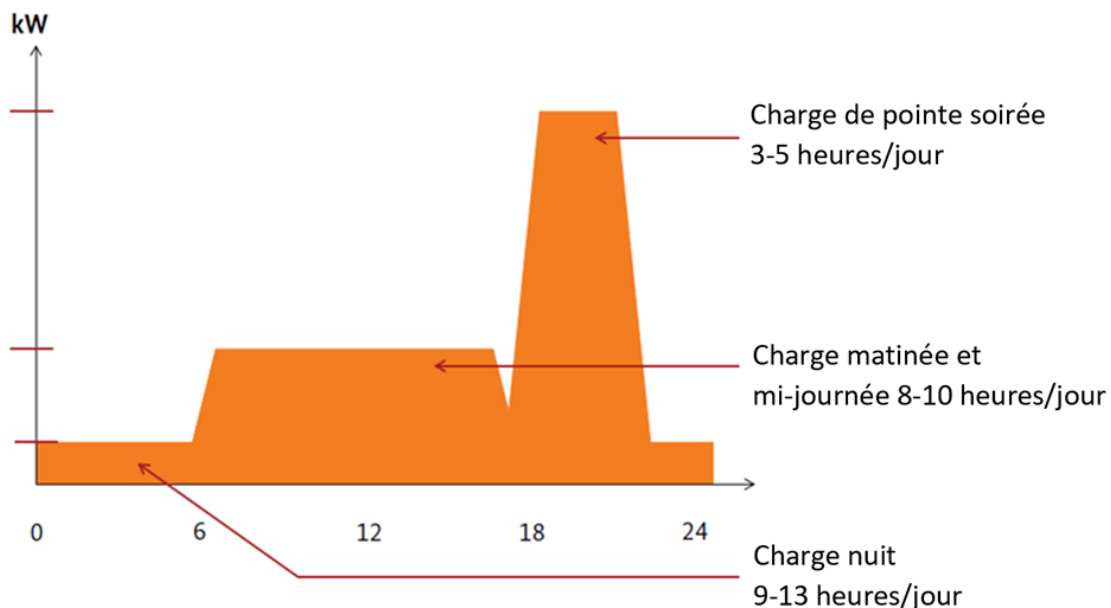
La première étape du calcul des besoins d'un système hors réseau, après avoir effectué une étude complète du site et estimé les besoins, consiste à prévoir la demande, qui doit prendre en compte les augmentations futures anticipées.

Un profil de charge type est généré, pour donner la demande de charge horaire moyenne sur une période de 24 heures, ainsi que la période de planification la plus défavorable sur une année, qui peut être déterminée par la couverture nuageuse et les précipitations dans les zones tropicales, ou par les chutes de neige dans les régions tempérées.

Un exemple de profil de charge est présenté dans la Figure 18.

²⁴ Pour un exposé technique sur le MPPT, voir Home Power Magazines, numéro 72, septembre 1999. <http://www.homepower.com>.

Figure 18: Profil de charge journalier habituel dans une zone rurale



Source: Profil de charge journalier habituel dans une zone rurale (IEA 2013).

Après avoir calculé la demande de charge horaire, on calcule la charge de pointe en kW. Elle doit inclure l'énergie nécessaire pour charger les batteries de secours, ainsi que la demande d'électricité prévue. La demande de pointe totale est évaluée en tenant compte du "coefficient de déclassement", des pertes ou des inefficacités de tous les sous-systèmes. Ces composants du système sont les suivants:

Régulateur de charge solaire - régule la tension et le courant provenant des panneaux photovoltaïques qui alimentent les batteries. Il empêche les batteries de se surcharger et prolonge leur durée de vie.

Onduleur - convertit le courant continu des panneaux photovoltaïques en un courant alternatif propre pour un bus alternatif ou pour alimenter des appareils à courant alternatif.

Batterie ou stockage d'énergie - stocke l'énergie, qui est ensuite fournie aux appareils électriques en cas de demande.

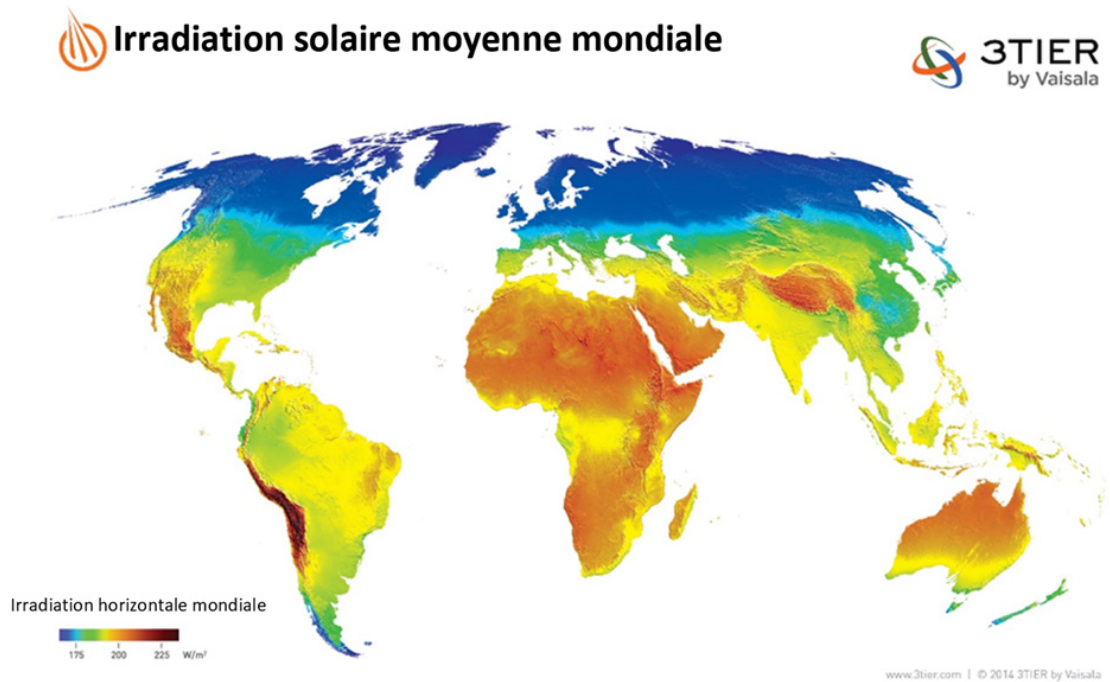
Charge - combinaison de tous les appareils électriques connectés au système solaire photovoltaïque, tels que l'éclairage, la radio, la télévision, l'ordinateur, le réfrigérateur, etc.

Sources d'énergie auxiliaires - il peut s'agir d'un groupe électrogène diesel ou d'une autre source d'énergie renouvelable.

Données d'irradiation

Les données climatiques appropriées pour la localité concernée sont obtenues, ce qui permet d'obtenir les valeurs moyennes de l'irradiation solaire quotidienne à partir de cartes (voir la Figure 19) ou d'autres sources de données mesurées et évaluées avec précision.

Figure 19: Irradiation solaire moyenne mondiale



https://www.researchgate.net/figure/Global-mean-solar-irradiance-10_fig3_275922125

5.3.1 Onduleurs solaires – convertisseurs de tension

Plusieurs panneaux solaires photovoltaïques sont connectés en série pour former un réseau. Le réseau est ensuite connecté à un onduleur centralisé qui convertit le courant continu généré par le réseau en courant alternatif. La puissance nominale de la sortie en courant continu est d'environ 300 à 600 volts, qui est convertie en courant alternatif approprié au territoire (la tension standard pour l'Europe est de 220-240 V courant alternatif à 50 Hz, tandis que pour l'Amérique du Nord, elle est de 120V courant alternatif à 60 Hz).

5.3.2 Avantages de l'énergie solaire par rapport aux groupes électrogènes diesel

Bien que les coûts initiaux des systèmes solaires soient nettement plus élevés que ceux d'un groupe électrogène diesel, l'énergie solaire est une option plus économique à long terme, car les groupes électrogènes diesel doivent être alimentés et entretenus régulièrement.

Pour les installations de télécommunications rurales situées loin du réseau national, l'approche traditionnelle consiste à fournir de l'électricité à l'aide de groupes électrogènes autonomes. L'énergie solaire est une alternative viable.

Les installations solaires ont des coûts d'exploitation très faibles pour les applications de télécommunication rurale, avec des périodes de garantie supérieures à 15 ans, mais les fabricants offrent souvent des garanties à vie de 20 à 25 ans, avec une diminution prévue de la production à environ 80% du rendement initial à la fin de cette période.

5.4 Energie éolienne

Les petites éoliennes ont une capacité de production inférieure à 100 kW et peuvent constituer une excellente solution pour l'électrification rurale et l'alimentation des installations de télécommunication. Les turbines ont communément un diamètre compris entre 7 et 15 m, avec une puissance généralement inférieure à 50 kW.

Une éolienne type peut produire de l'électricité à une vitesse de vent de 3 à 5 mètres par seconde, atteignant sa puissance maximale à environ 15 m/s et s'arrêtant généralement à environ 25 m/s (en fonction de la conception).

Conception et éléments d'une éolienne

La conception à axe horizontal est la plus courante pour les éoliennes, offrant une efficacité et une fiabilité accrues par rapport aux conceptions à axe vertical.

- Conception des pales - 1 à 3 pales intégrées montées sur un mât.
- Pour les très petites installations, par exemple pour un ménage, les éoliennes auront un diamètre inférieur à 2 m et une puissance d'environ 1 kW.
- Une vitesse moyenne du vent de 5 m/s ou plus peut permettre la production annuelle d'environ 300 kWh par mètre carré de surface de rotor.
- Une surface balayée de 20 m par deux rotors génère environ 6 000 kWh, qui passent à 8 500 kWh avec une vitesse de vent de 6 m/s.

Les pales doivent être montées à une hauteur supérieure à 15 m, à l'abri des turbulences du sol.

- Les éoliennes peuvent être à vitesse fixe ou variable.
- Les poteaux, mâts ou tours basculants sont très répandus dans les pays en développement car ils sont faciles à installer et offrent un accès aisé pour l'entretien et les réparations.
- La plupart des petites éoliennes sont dotées d'un générateur à aimant permanent (pas besoin de boîte de vitesses).

Le générateur produit un courant alternatif, qui est redressé en courant continu par un pont redresseur pour produire une sortie similaire à celle des systèmes photovoltaïques.

Le régulateur de charge pour les systèmes de charge dans la batterie empêche la surcharge, protège la batterie et empêche l'éolienne de prendre une vitesse excessive.

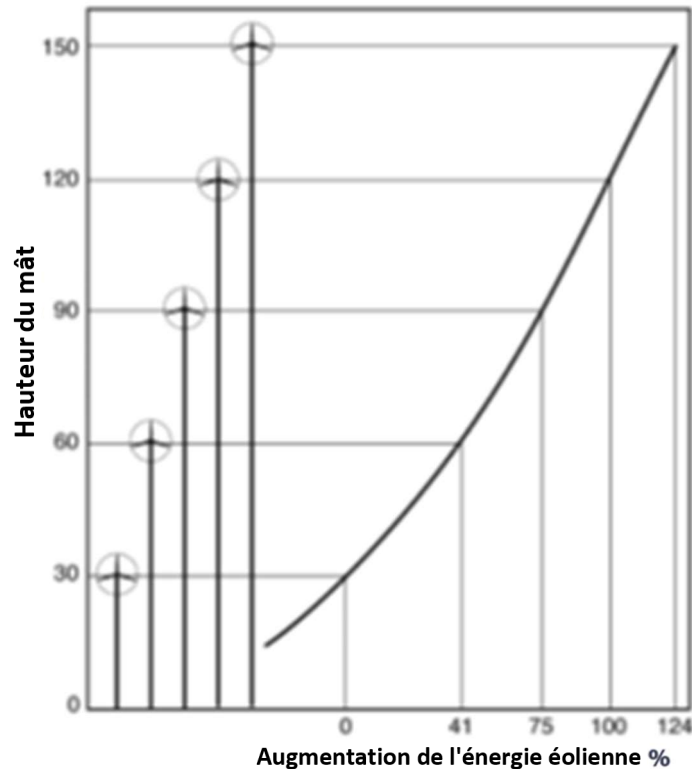
Lorsque les données locales ne sont pas disponibles, il est nécessaire d'effectuer des mesures approfondies du vent sur une longue période avant l'installation, car l'emplacement spécifique de l'éolienne est très important et doit être étudié avec soin pour éviter les interférences dues au vent.

L'énergie éolienne présente les inconvénients suivants:

- production instable, fortement dépendante de la topographie et de la géographie locales;
- des données fiables sur la vitesse du vent étant rarement disponibles pour tous les sites candidats, des outils spéciaux sont nécessaires pour identifier la meilleure position dans une zone donnée;
- exigences structurelles plus élevées dans la conception des pylônes et coûts plus élevés que les pylônes de télécommunication traditionnelles, qui n'ont pas besoin de supporter les mêmes charges élevées que les éoliennes;
- Plus la puissance requise est élevée, plus la conception du pylône est complexe, afin de répondre aux exigences structurelles.

La variation de la puissance produite en fonction de la hauteur des mâts est illustrée à la Figure 20.

Figure 20: Puissance de l'éolienne en fonction de la hauteur du mât



Note: Figure indicative pour illustrer l'impact de la hauteur de du mât sur la puissance de l'éolienne.

5.5 Piles à combustible

Des progrès considérables ont été réalisés récemment dans le développement de la technologie des piles à combustible en ce qui concerne les types de combustibles et la technologie de production.

Les piles à combustible qui utilisent l'hydrogène comme combustible sont les plus répandues. L'hydrogène est le combustible le plus propre en raison de ses caractéristiques d'oxydation à 100%. Ainsi, il n'émet aucune pollution (il ne produit que de l'eau). Toutefois, l'adoption des piles à combustible est freinée par l'investissement initial élevé, le coût de remplacement élevé du combustible et le manque d'infrastructure pour prendre en charge l'écosystème de la chaîne d'approvisionnement pour le combustible.

5.6 Biomasse

La biomasse est une autre forme intéressante de technologie verte, idéale pour la production d'énergie distribuée à petite échelle. Le combustible est largement disponible dans les zones rurales des pays en développement et la technologie a été de plus en plus largement adoptée pour les applications communautaires de mini-réseau électrique.

Dans les applications de télécommunication, cependant, la biomasse présente de nombreuses difficultés en matière d'évolutivité, de complexité opérationnelle, de fiabilité de la chaîne d'approvisionnement et de durabilité. Toute fluctuation de la disponibilité de la source de

biomasse (copeaux de bois, déchets agricoles, etc.) affectera la viabilité et la durabilité à long terme de la centrale électrique.

5.7 Microsystèmes hydroélectriques

Les systèmes hydroélectriques produisent de l'électricité selon les mêmes principes que les éoliennes. La force de l'écoulement de l'eau fait tourner une hélice ou une roue hydraulique qui est reliée à un générateur. Celui-ci produit un courant électrique.

- Les microsystèmes hydroélectriques produisent moins de 100 kilowatts (kW) d'électricité.
- Les picocentrales hydroélectriques produisent moins de 1 kW.

Les coûts d'investissement des microsystèmes hydroélectriques sont influencés par le choix du site et la configuration de base.

La configuration du système est conçue en fonction de la hauteur de chute disponible.

La plupart des microcentrales hydroélectriques sont de type "au fil de l'eau".

- Elles ne possèdent pas de réservoir de grande taille.
- Elles produisent de l'électricité uniquement lorsqu'il y a suffisamment d'eau dans la rivière.
- La production d'électricité cesse lorsque le niveau de l'eau est bas ou que le débit est insuffisant.
- L'impact sur l'environnement est minime.
- La micro-hydroélectricité peut être une source d'électricité à moindre coût lorsque la hauteur de chute du plan d'eau est suffisante et que le débit est disponible.
- Elle dessert les mini-réseaux communautaires et les installations individuelles.

Les microsystèmes hydroélectriques présentent d'autres avantages, notamment:

- investissement sûr et sécurisé sur plusieurs décennies;
- potentiel de propriété individuelle, coopérative ou communautaire;
- ne nécessitent qu'une main-d'œuvre semi-qualifiée et une administration coopérative pour l'entretien et la construction;
- déploiement rapide si des matériaux et des compétences locales sont disponibles;
- souplesse d'adaptation aux variations rapides de charge;
- longue durée de vie (décennies).

Les microsystèmes hydroélectriques peuvent être utilisés là où il y a des rivières ou des chutes d'eau et dans les zones rurales qui ne peuvent pas facilement accueillir des systèmes d'énergie solaire ou éolienne. Ils sont relativement simples à entretenir et leur déploiement est moins coûteux que celui des systèmes solaires ou éoliens. Les microsystèmes hydroélectriques représentent une option intéressante pour l'alimentation des systèmes de télécommunication ruraux.

Installation et maintenance des microsystèmes hydroélectriques

Les microsystèmes hydroélectriques ne sont pas techniquement complexes et peuvent être mis en œuvre et gérés par la communauté locale.

- Ils nécessitent une maintenance plus fréquente que les systèmes éoliens ou photovoltaïques comparables.

- Les roulements et les balais des générateurs doivent être entretenus et remplacés régulièrement.
- La turbine doit être protégée des débris.
- L'énergie est générée en permanence, les batteries sont donc constamment rechargées, ce qui permet de les utiliser avec des batteries à cycle court, telles que les batteries automobiles, sans contraintes excessives en matière de rendement. Les batteries à décharge profonde offrent des performances similaires. La longueur et le diamètre du tuyau d'alimentation doivent être définis en fonction de la situation de l'eau et de la turbine, sinon l'installation sera inefficace.

Principales difficultés:

- disponibilité d'un plan d'eau approprié à proximité du site du pylône de télécommunication;
- incertitude de l'approvisionnement (débit d'eau, hauteur de chute) à différentes périodes de l'année.

Recommandation: plutôt que de fournir leur propre minisystème hydroélectrique, les fournisseurs de services large bande peuvent envisager un modèle de service fondé sur l'achat d'électricité auprès de fournisseurs d'énergie hydroélectrique sur la base d'un modèle commercial convenu, tel qu'un accord d'achat d'électricité (AAE) ou à coût fixe.

5.8 Comparaison des sources d'énergie renouvelables - résumé

Les principaux avantages et inconvénients des différentes sources d'énergie renouvelables qui conviennent aux installations rurales et isolées hors réseau électrique sont présentés dans le Tableau 3. L'énergie produite à partir de ces sources servira principalement aux systèmes large bande et à leurs services auxiliaires, mais elle peut être améliorée pour fournir des services d'électrification aux communautés voisines.

Tableau 3: Avantages des sources d'énergie renouvelable

	Avantages	Inconvénients
Solaire	<p>Ressource solaire renouvelable et durable, disponible partout.</p> <p>Très adaptable grâce à sa technologie modulaire - applications à l'échelle commerciale ou à très petite échelle.</p> <p>Adaptée à la production d'électricité décentralisée.</p> <p>Aucun coût d'entretien des panneaux solaires, à l'exception d'une main-d'œuvre occasionnelle non qualifiée pour nettoyer les panneaux.</p> <p>Coût compétitif par rapport aux autres technologies vertes. Prix de l'électricité stables.</p> <p>Durée de vie de 20 à 25 ans sans émissions.</p>	<p>Grandes exigences en matière d'espace pour les déploiements de grande capacité.</p> <p>Intermittente car dépendante du soleil, mais prévisible.</p> <p>Coût d'investissement initial élevé par rapport aux solutions traditionnelles reposant sur l'emploi de gazole.</p> <p>Vol et vandalisme des panneaux entraînant un risque élevé pour l'investissement (clôture).</p> <p>Faible densité de puissance par rapport aux fossiles.</p> <p>Retour sur investissement à long terme.</p>

Tableau 3: Avantages des sources d'énergie renouvelable (suite)

	Avantages	Inconvénients
Éolienne	<p>Adaptée à la production d'électricité décentralisée à petite échelle.</p> <p>Encombrement nettement inférieur à celui de l'énergie solaire.</p> <p>Faibles coûts d'entretien.</p> <p>Coût avantageux par rapport aux combustibles fossiles, mais moins par rapport à l'énergie solaire.</p> <p>Les prix de l'électricité sont plus stables que ceux des combustibles fossiles.</p>	<p>Faible fiabilité - en raison de la variabilité de la vitesse du vent, imprévisible et intermittente.</p> <p>Coûts initiaux élevés. Le seuil de rentabilité est atteint au bout de 10 à 20 ans.</p> <p>Faible modularité et investissements élevés.</p> <p>Il faut des pylônes de 20 à 40 m de haut pour une production d'électricité optimale.</p> <p>La fiabilité des équipements éoliens est très variable.</p> <p>Fonctionnement bruyant.</p> <p>Coûts d'entretien réguliers élevés.</p> <p>Peut être dangereuse pour les oiseaux en vol.</p>
Micro-hydro-électrique	<p>Efficace et fiable lorsque la ressource en eau est disponible et que le débit est stable, en particulier pendant les saisons des pluies ou d'hiver (s'il n'y a pas de gel).</p> <p>Des débits ou hauteurs de chute (ou de charge) faibles permettent de produire de l'électricité.</p> <p>Faibles coûts d'investissement pour les systèmes à petite échelle.</p> <p>Fonctionne au fil de l'eau - un barrage n'est pas nécessaire.</p> <p>Faibles coûts d'entretien.</p> <p>Polyvalence pour la production dans les pays en développement.</p>	<p>L'emplacement du site et la disponibilité de cours d'eau appropriés peuvent être éloignés de la communauté à desservir.</p> <p>Pas facilement extensible, la taille et le débit du cours d'eau peuvent limiter l'expansion.</p> <p>Puissance réduite pendant la saison sèche et les mois d'été.</p> <p>Les structures de génie civil et les détournements de cours d'eau peuvent poser problème.</p>
Piles à combustible	<p>Technologie fiable.</p> <p>Système compact et peu encombrant.</p> <p>Adaptée aux toits et aux environnements urbains.</p> <p>Peu d'entretien.</p> <p>Peu d'émissions et peu de bruit.</p> <p>Moins de risques de vol et de vandalisme.</p>	<p>L'investissement initial élevé et le coût de la technologie en font un choix écologique moins rentable.</p> <p>Forte dépendance à l'égard de l'écosystème d'approvisionnement en combustible et de la logistique. Nécessité de construire des usines de reformage de combustible et une chaîne d'approvisionnement fiable.</p> <p>Faible gamme de capacités pour la production distribuée.</p>

Tableau 3: Avantages des sources d'énergie renouvelable (suite)

	Avantages	Inconvénients
Biomasse	<ul style="list-style-type: none">Potentiel de biomasse abondant.Large éventail de capacités d'installations.Une grande fiabilité peut être obtenue grâce à une forte intégration de la chaîne d'approvisionnement.La technologie est largement disponible.	<ul style="list-style-type: none">Complexité d'exploitation.Coûts élevés des ressources et de l'exploitation.Difficultés liées à l'approvisionnement en biomasse et dépendance à l'égard d'un écosystème de chaîne d'approvisionnement peu fiable.Sensible au coût des intrants en raison de la fluctuation des prix de l'approvisionnement.

Source: adapté de GSMA, Green Power for Mobile.

5.9 Énergie renouvelable hors réseau

Les investissements nécessaires pour un programme visant à étendre l'accès au large bande aux zones rurales sont élevés, tandis que les recettes éventuelles sont insuffisantes pour couvrir les coûts sans subventions ou autres formes de soutien financier.

L'extension de l'accès à l'électricité d'une infrastructure de réseau électrique classique dans des zones rurales peu peuplées ne serait pas rentable, car elle nécessiterait des coûts d'investissement élevés pour étendre les lignes de transmission à haute tension et les réseaux de distribution dans les zones reculées.

Selon l'IRENA²⁵, les solutions d'énergie renouvelable hors réseau, y compris les systèmes autonomes, les micro-réseaux et les mini-réseaux en tant que solutions d'électrification viables, se sont imposées comme des options courantes et concurrentielles pour étendre l'accès à l'électricité aux communautés non desservies ou mal desservies. Les systèmes hors réseau fonctionnent indépendamment du réseau électrique national et sont gérés par des entreprises privées, parfois en partenariat avec des groupes communautaires locaux ou en collaboration avec les opérateurs nationaux en place.

La Figure 21 illustre la segmentation des réseaux et des mini-réseaux, montrant que les mini-réseaux sont les plus appropriés pour les solutions d'électrification rurale à faible densité de population. Dans ce segment, les mini-réseaux offrent le prix de détail de l'électricité non subventionné le plus bas par rapport à l'extension du réseau.

Alors que les zones urbaines ont été desservies avec plus ou moins de succès dans les pays en développement par le réseau électrique national, la grande majorité des clients des zones rurales des PMA, en particulier, sont continuellement confrontés à des problèmes de capacité et de couverture.

Les solutions hors réseau sont déployées pour produire de l'électricité dans les communautés non desservies qui n'ont pas accès au réseau national, ou dans les zones mal desservies où l'alimentation du réseau électrique n'est pas fiable ou inabordable. Les réseaux électriques

²⁵ Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf.

hors réseau permettent l'électrification des ménages, mais la plus grande partie de la capacité est dédiée à des utilisations commerciales (par exemple l'alimentation des infrastructures de télécommunication), à des utilisations finales industrielles (par exemple la cogénération), à des services publics (par exemple l'éclairage public, l'éducation, les centres de soins de santé, le pompage de l'eau) et à des moyens de subsistance (par exemple la pêche, l'agriculture).

Le déploiement régional de ces systèmes devrait être fondé sur des facteurs économiques, géographiques et sociaux locaux²⁶.

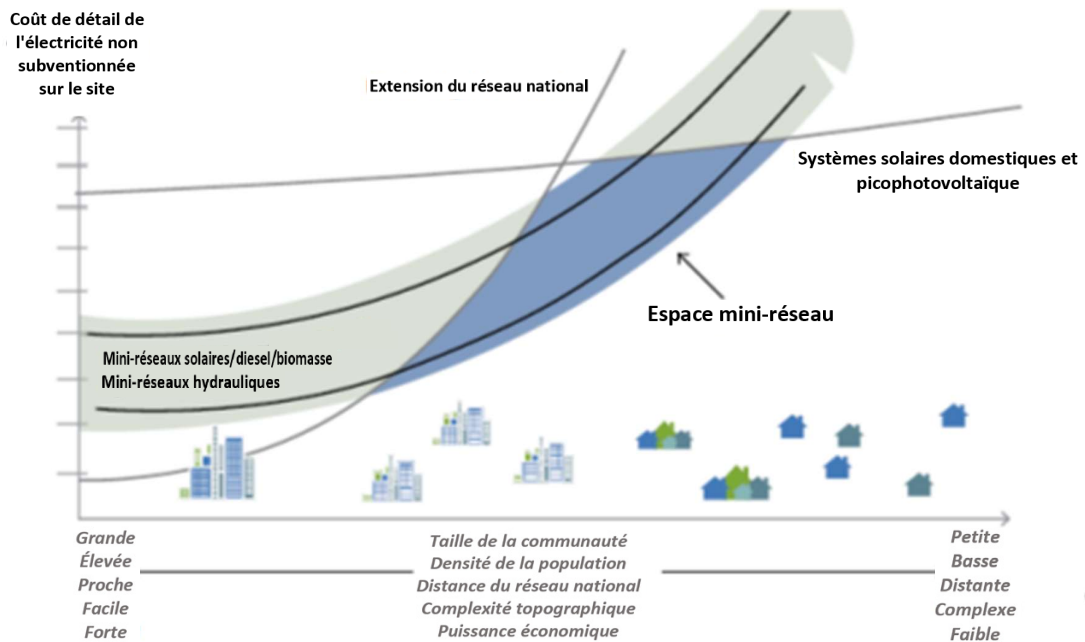
Les solutions hors réseau sont adaptables aux conditions locales, évolutives, durables sur le plan environnemental et peuvent renforcer les communautés rurales et soutenir les services publics numériques dans les domaines de l'éducation, des soins de santé, etc.

Selon l'AIE²⁷, la fourniture d'électricité pour tous d'ici à 2030 nécessiterait des investissements annuels de 52 milliards d'USD par an. Une modélisation géospatiale détaillée indique que les systèmes décentralisés, menés par le photovoltaïque solaire dans des mini-réseaux autonomes, sont la solution la moins coûteuse pour les trois quarts des connexions supplémentaires nécessaires en Afrique subsaharienne.

Figure 21: Segment mini-réseaux (rôle croissant des mini-réseaux et des énergies renouvelables)

Illustration de la fenêtre dans laquelle les mini-réseaux constituent la solution d'électrification rurale la plus adaptée.

(Perspectives pour l'extension du réseau, les mini-réseaux et les systèmes d'énergie renouvelable décentralisés)



Source: EUEI PDF/REN21 2014

²⁶ https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/MGT/MinigridPolicyToolkit_Sep2014_EN.pdf.

²⁷ Perspectives d'accès à l'énergie 2017, www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2017.

5.9.1 Mini-réseaux

Un mini-réseau est un réseau de distribution d'électricité qui peut fonctionner indépendamment des réseaux nationaux de transport d'électricité pour offrir une production d'électricité à petite échelle, généralement entre 10 kW et 10 MW, à un nombre limité de consommateurs via un réseau de distribution local²⁸. Les mini-réseaux sont l'option la plus appropriée pour alimenter les installations isolées et les communautés rurales pour lesquelles le coût de la connexion au réseau est prohibitif.

Les micro-réseaux ressemblent aux mini-réseaux, mais en plus petit, avec une capacité de production comprise entre 1 kW et 10 kW. Les micro-réseaux peuvent être adaptés plus facilement pour desservir des communautés dispersées avec des bâtiments isolés ou des groupes de bâtiments plus petits.

Les mini-réseaux peuvent être conçus pour fournir de manière plus économique de l'électricité à des localités concentrées, y compris des locaux domestiques, des industries artisanales, des entreprises, des institutions, des opérateurs de télécommunication et des sites de services collectifs éloignés, avec une alimentation électrique d'une qualité égale ou supérieure à celle du réseau. Les mini-réseaux peuvent être exploités par des opérateurs de télécommunications, des services collectifs, d'autres entreprises privées spécialisées, des organisations communautaires ou une combinaison de ces entités.

Dans de nombreuses régions du monde, les mini-réseaux utilisent encore le gazole pour produire de l'électricité; cependant, l'utilisation de solutions d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, la biomasse ou l'énergie éolienne permet de réduire les coûts, d'accroître la sécurité énergétique et de réduire la pollution de l'environnement.

Dans les zones rurales éloignées du réseau électrique national, les opérateurs de mini-réseaux peuvent vendre de l'électricité à des clients de référence comme les opérateurs de télécommunications et les industries locales, et peuvent obtenir des revenus supplémentaires en distribuant également de l'électricité aux consommateurs des communautés locales. Les sociétés d'exploitation de pylônes (towercos) qui produisent de l'électricité et fournissent des services aux principaux clients des opérateurs de télécommunications peuvent également fournir des services à la communauté locale, augmentant ainsi le retour sur investissement.

Le Tableau 4 présente l'application et la classification des mini-réseaux ainsi que les caractéristiques techniques de chaque type de réseau. Le système de niveaux SE4ALL des Nations unies est un système de mesure et d'évaluation de l'accès à l'électricité utilisé pour les comparaisons mondiales.

L'évaluation des solutions d'électrification peut être classée en fonction d'un certain nombre d'applications et de mesures de la qualité, comme le montre le Tableau 4.

²⁸ Programme de coopération Afrique-UE dans le secteur des énergies renouvelables (RECP). Mini-grid Policy Toolkit <http://www.minigridpolicytoolkit.eu/en/pdf.org/policy-toolkit>.

Tableau 4: SE4ALL des Nations Unies - Cadre de suivi mondial 11

Accès à l'énergie selon le cadre de suivi mondial de SE4ALL	Non	Basique	Avancé			
			Niveau-0	Niveau-1	Niveau-2	Niveau-3
Attributs		Lampe de poche et chargeur de téléphone	Éclairage général, télévision et ventilateur	Appareils de niveau 2 et tous les appareils de faible puissance	Appareils de niveau 3 et tous les appareils de moyenne puissance	Appareils de niveau 4 et de toute puissance supérieure
Capacité maximale disponible 12 (watts)	-	> 1 W	> 20 W/50 W	>200 W/ 500 W	> 2 000 W	> 2 000 W
Durée (heures)	-	> 4 heures	> 4 heures	> 8 heures	> 16 heures	> 22 heures
Approvisionnement en soirée (heures)	-	> 2 heures	> 2 heures	> 2 heures	> 4 heures	> 4 heures
Accessibilité financière	-		√	√	√	√
Formalité (légalité)				√	√	√
Technologie mini-male indiquée		Nano-réseaux/ micro-réseaux, pico-PV/ lanterne solaire	Micro-réseaux/ mini-réseaux, batteries rechargeables, systèmes solaires domestiques	Micro-réseaux, mini-réseaux, systèmes domestiques	Mini-réseaux et réseau	Mini-réseaux et réseau

Source: Adapté de la Banque mondiale, 2014.

Les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, la biomasse et les piles à combustible sont utilisées dans les mini-réseaux d'énergie propre (CEMG) avec une batterie de secours pour équilibrer la demande et l'offre tout au long de la journée. Les groupes électrogènes diesel peuvent également être utilisés dans les mini-réseaux comme source d'énergie de secours.

Voici quelques-uns des avantages de la mise en place de réseaux de mini-réseaux ou de micro-réseaux:

- énergie de qualité réseau;
- déploiement rapide du service dans les installations de télécommunication et les communautés (quelques semaines ou quelques mois, pas des années);
- peut être adapté aux demandes locales, modulable et flexible;
- plus proche de la communauté desservie, d'où une réduction des coûts de transmission;
- dans le cas des micro-réseaux, les possibilités de partenariats entre le secteur privé et la communauté pour desservir la communauté hors réseau - opérateurs, ménages et entreprises - à partir de sources locales via des lignes de distribution à basse tension.

Les mini-réseaux sont particulièrement appropriés et rentables pour les stations de base éloignées et pour les communautés de moyenne densité avec des populations dispersées qui sont situées loin du réseau national, ou qui résident dans des zones où l'alimentation électrique n'est pas fiable, ou encore où l'électricité du réseau est inabordable.

Les systèmes solaires domestiques autonomes conviennent lorsque la population locale est dispersée et que les ménages sont éloignés du réseau et ont besoin de quantités modestes d'électricité.

Les technologies solaires et éoliennes alimentent principalement les installations de télécommunication dans les zones rurales et isolées. Elles devraient représenter plus de 80% de la croissance de la capacité mondiale de production d'énergie renouvelable au cours des cinq prochaines années.

Tableau 5: Interventions en matière d'accès à l'énergie et bénéfices indicatifs en matière d'efficacité énergétique - la possibilité AE+EE dans son contexte

Niveau d'accès	Technologie ou mode de distribution	La valeur ajoutée de l'efficacité énergétique
Niveau 1	Lanternes solaires portables/ Pico PV	Les diodes électroluminescentes (LED) à haut rendement énergétique réduisent radicalement la taille et le coût des systèmes photovoltaïques et des batteries nécessaires à la fourniture de services, rendant ces technologies abordables pour de vastes nouveaux segments de marché.
Niveaux 2, 3, 4	Systèmes hors réseau	Les appareils à haut rendement énergétique réduisent radicalement les besoins en énergie, ce qui permet à un système hors réseau de taille donnée de fournir un service plus important et à des systèmes plus petits et plus abordables de fournir un service équivalent.
	Micro- réseaux et mini-réseau	Les appareils et dispositifs à haut rendement énergétique peuvent augmenter le nombre de connexions qu'un mini-réseau peut prendre en charge et réduire les coûts d'investissement d'un système, ce qui peut améliorer sa viabilité financière.

Tableau 5: Interventions en matière d'accès à l'énergie et bénéfiques indicatifs en matière d'efficacité énergétique - la possibilité AE+EE dans son contexte (suite)

Niveau d'accès	Technologie ou mode de distribution	La valeur ajoutée de l'efficacité énergétique
	Utilisations industrielles/ communautaires	L'efficacité énergétique permet de réduire les coûts énergétiques et/ou de prolonger la durée de fonctionnement des produits motorisés tels que les moulins, les broyeurs et les pompes. Des lampadaires solaires LED efficaces augmentent la sécurité publique et facilitent le commerce après la tombée de la nuit. Les systèmes de pompage solaire efficaces pour l'irrigation se sont avérés plus rentables que les pompes électriques ordinaires. Les applications médicales efficaces fonctionnent de manière plus fiable dans les cliniques rurales sous-électrifiées ou nécessitent des systèmes énergétiques hors réseau plus petits et plus abordables.
Niveau 5	Électrification du réseau/réforme du secteur de l'électricité	Les améliorations de l'efficacité du côté de l'offre et de la demande peuvent renforcer la fiabilité et la performance financière du secteur de l'électricité, en réduisant les prix pour les consommateurs et en augmentant la probabilité que les factures d'énergie soient payées. Dans les secteurs où les tarifs sont subventionnés, l'efficacité peut réduire les coûts pour le gouvernement.

Note: SE4All a développé un cadre à plusieurs niveaux pour le suivi mondial de l'accès à l'énergie. Le niveau 1 représente un service à très faible consommation d'énergie et le niveau 5 comprend une connectivité totale au réseau avec des appareils de plus grande puissance.

Source: <https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2014/11/Africa-Market-Report-GPM-final.pdf>.

5.9.2 Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont des systèmes électriques à petite échelle qui comprennent les systèmes solaires domestiques et les systèmes pico-PV qui ne sont pas connectés à un réseau de distribution d'électricité. Un système autonome peut répondre aux besoins de clients individuels, d'une maison, d'une petite industrie artisanale ou d'une unité commerciale dans des zones peu peuplées et où la demande potentielle est faible. Les systèmes solaires domestiques d'une puissance maximale de 150 W peuvent être utilisés pour alimenter des lampes solaires, l'éclairage d'une pièce, la recharge d'un téléphone portable, des ordinateurs et de petits appareils. Les systèmes pico-PV fournissent jusqu'à 10 W d'énergie pour des articles tels que les lampes solaires, les radios et la recharge des téléphones.

Les systèmes autonomes hors réseau utilisent les ressources énergétiques renouvelables disponibles localement, notamment la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et l'énergie solaire. Ces systèmes comprennent souvent des systèmes de stockage qui sont généralement des batteries qui permettent d'alimenter directement les appareils à basse tension à partir de la batterie ou de les utiliser pour l'éclairage et les petits appareils à courant continu. Le courant alternatif basse tension peut être produit à l'aide d'un onduleur pour alimenter des appareils à courant alternatif standard²⁹.

Les systèmes autonomes sont plus appropriés pour les communautés où les maisons sont dispersées et éloignées du réseau et où la demande d'électricité est modeste.

Catégories de systèmes solaires autonomes

Systèmes pico-PV

- Petit système solaire domestique - puissance de 1 à 10 W
 - Principalement utilisé pour l'éclairage, les chargeurs de téléphones portables, les petits appareils informatiques, la radio.
- Petit panneau solaire avec batterie et lampe. Le panneau photovoltaïque peut être fixé sur le produit lui-même (par exemple, les lanternes solaires).
- Facile à installer (prêt à fonctionner), application conviviale, faible coût d'investissement, peu d'entretien, haut degré d'extensibilité et souplesse d'utilisation.

Systèmes solaires domestiques classiques

- Système solaire domestique classique - puissance de crête jusqu'à 250 W.
- Composé de plusieurs éléments indépendants:
 - Modules, régulateur de charge, batterie et charges.
- La gestion de l'énergie est assurée par le contrôleur de charge.
- Les avantages des systèmes solaires domestiques classiques sont les charges en courant continu:
 - Lampes, radios, téléviseurs et réfrigérateurs à économie d'énergie alimentés en courant continu.

Les systèmes solaires domestiques sont des systèmes très efficaces sur le plan énergétique, sans pertes de conversion.

Systèmes solaires résidentiels

- Systèmes photovoltaïques autonomes de plus grande taille:
 - Pour les pico-systèmes solaires, puissance de crête de 2 à 10 W.
 - Idéaux pour les applications rurales ou domestiques.
- Électricité pour les grandes installations individuelles telles que les hôtels, les hôpitaux, les écoles, les usines, etc.
- Faciles à utiliser et à entretenir.
- Applications hors réseau.

²⁹ Rashid Al Badwawi et autres A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23080477.2015.11665647?needAccess=true>.

- Les éléments classiques d'un système photovoltaïque autonome sont le module solaire, le régulateur de charge, la batterie au plomb/le stockage au lithium, les onduleurs et les charges (appareils).

Des solutions de kits solaires avec connectivité combinée voient le jour, offrant à un coût minimal une double solution.

5.9.3 Comparaison des sources d'énergie renouvelables et fossiles pour les applications de mini-réseau

Grâce à leur modularité, les technologies liées aux énergies renouvelables peuvent être rapidement déployées et adaptées pour répondre à la demande énergétique en utilisant les ressources et les capacités disponibles au niveau local.

Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) liées à l'énergie et provenant de sources fossiles peuvent être immédiatement et considérablement réduites en passant à l'électrification à partir de sources renouvelables. Non seulement les niveaux de pollution atmosphérique seront abaissés, ce qui aura des effets bénéfiques sur la santé publique, mais des avantages socio-économiques considérables seront également possibles grâce au développement d'une économie interconnectée et numérisée.

Le Tableau 6 décrit les caractéristiques techniques de diverses solutions fondées sur les énergies renouvelables et les combustibles fossiles qui peuvent être utilisées dans les systèmes hors réseau et connectés au réseau.

Tableau 6: Mini-réseaux et hors-réseaux renouvelables, caractéristiques 2012/13

	Connecté au réseau	Mini-réseau < 50MW/consommation propre	Systèmes auto-nomes/systèmes d'électrification individuels	Utilisation productive
Gaz	~ 1 500 GW			> 1 GW Systèmes de cogénération au gaz
Diesel		5-10 GW 50 000-100 000 systèmes		
Hydroélectrique	Grand > 10 MW 10 000-50 000 systèmes >1 000 GW	Petit < 10 MW 100 000-150 000 systèmes 75 GW	Micro-hydro 0,1-1 MW Pico-hydro < 0,1 MW	
Éolien	310 GW 250 000 turbines	Hybride diesel-éolien < 1 000 village/systèmes miniers	Petites éoliennes 0-250 kW 806 000 turbines	Pompes à vent > 500 000

Tableau 6: Mini-réseaux et hors-réseaux renouvelables, caractéristiques 2012/13 (suite)

	Connecté au réseau	Mini-réseau < 50MW/consommation propre	Systèmes autonomes/systèmes d'électrification individuels	Utilisation productive
Solaire photovoltaïque	50 GW/0,5 million grands systèmes > 50 kW 80 GW/ 10-20 millions systèmes pour toiture 1-50 kW	Hybride diesel-PV < 10 000 systèmes pour villages	Systèmes domestiques classiques < 1 kW 5-10 millions systèmes	Éclairage solaire 5 millions; pylônes télécommunication 10 000; pompes solaires; réfrigérateurs/réfrigération PV; éclairage public; panneaux de signalisation; stations de charge pour téléphones
Biogaz/biogazole	14 GW 30 000-40 000 systèmes	< 100 kW installations biogaz > 1 million systèmes biogaz Systèmes gazéification/écorces de riz etc. 1 000-2 000		Exploitations d'élevage Groupes électrogènes d'appoint au biogazole
Cogénération biomasse	20 GW pulpe, sucre/éthanol 1 000-2 000 systèmes 20-30 GW cycles vapeur/CH 1 000-2 000 systèmes 5-10 GW centrale à charbon à combustion mixte 250-500 systèmes			

Source: IRENA: Systèmes d'énergie renouvelable hors réseau

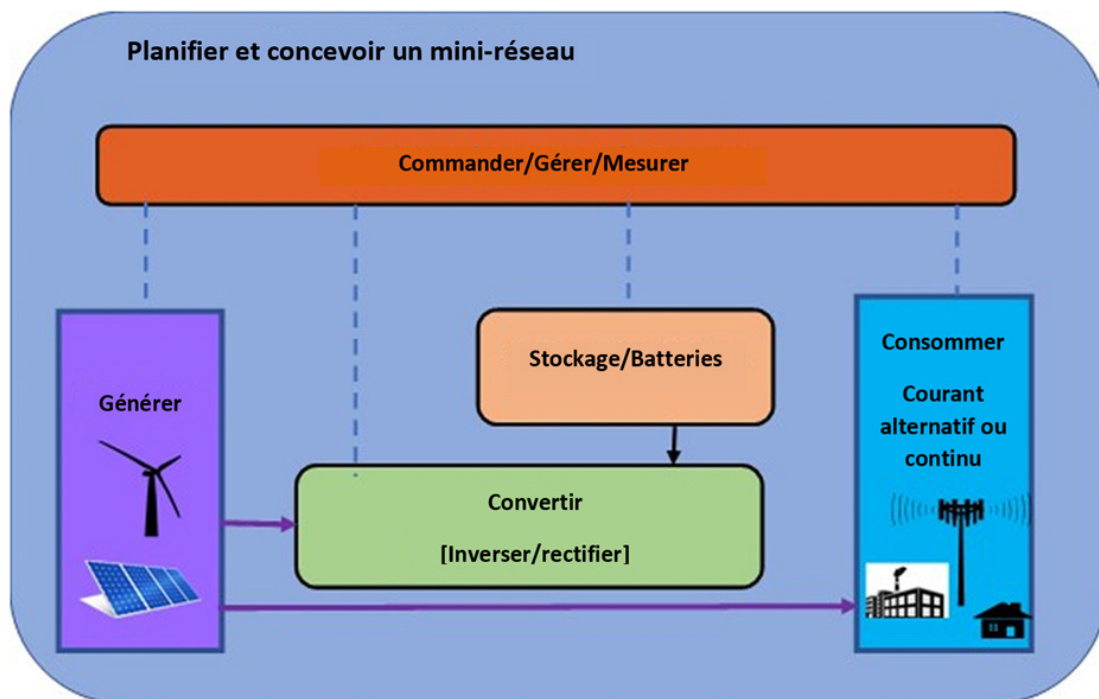
5.10 Composants de base d'une installation de mini-réseau:

Un mini-réseau d'électricité renouvelable présente plusieurs caractéristiques de base, comme le montre la Figure 22.

- 1) Générateurs/sources d'énergie renouvelable:
L'électricité peut être produite à partir des sources suivantes: modules solaires photovoltaïques, turbines éoliennes, mini-turbines hydroélectriques alimentées par les cours d'eau ou les rivières avoisinantes et conditionneurs d'énergie à base de biomasse.
- 2) Onduleurs:
Les onduleurs de courant continu à courant alternatif sont utilisés pour convertir la puissance des panneaux solaires en courant alternatif afin d'alimenter les appareils en courant alternatif sur le site. Des onduleurs de branche ou des micro-onduleurs sont aussi une possibilité; les convertisseurs courant continu/courant continu adaptent la tension de sortie en courant continu des panneaux solaires au niveau requis par les équipements et les appareils.

- 3) Redresseurs:
Ils convertissent la tension alternative provenant des éoliennes, des turbines hydroélectriques, etc. en tension continue pour les équipements qui le nécessitent.
- 4) Stockage de l'énergie - batteries et systèmes de stockage de plus grande capacité:
Les mini-réseaux utilisant des énergies renouvelables (solaire et éolienne) qui fournissent une énergie variable tout au long de la journée nécessiteront un stockage en batterie de taille optimale pour fournir de l'électricité en continu. L'électricité excédentaire produite par ces systèmes sera stockée et livrée en cas de besoin, compensant ainsi les fluctuations de disponibilité. Dans les mini-réseaux de petite taille (c'est-à-dire de moins de 300 kW), on utilise généralement des groupes de batteries, tandis que les systèmes plus importants font appel à d'autres formes de systèmes de stockage tels que les batteries au lithium.
- 5) Réseau de distribution:
Le type de système de distribution utilisé dépend du service à fournir sur le réseau et des types d'appareils qui seront utilisés. Le réseau peut être conçu comme un bus à courant continu ou un bus à courant alternatif monophasé ou triphasé, en fonction des caractéristiques du système ou du réseau. Pour les réseaux qui fournissent des services à des particuliers, à des entreprises ou à des industries, la consommation doit être mesurée et enregistrée à des fins de facturation.
- 6) Sous-système utilisateur/application:
Pour les opérateurs fournissant des services aux utilisateurs finals, il peut s'agir de l'équipement situé du côté du client, y compris le câblage interne, les compteurs, la mise à la terre, l'équipement TIC et les appareils électriques.
- 7) Systèmes de gestion intelligente:
Effectuer des tâches comme la commande du système, la gestion et l'optimisation du réseau, la collecte des tarifs, l'amélioration des mesures d'efficacité énergétique du réseau et l'éventuelle connexion au réseau. Les TIC peuvent également être utilisées pour les compteurs intelligents et l'automatisation de la facturation/du paiement par téléphone mobile.

Figure 22: Fonctionnalités des mini-réseaux



Les fonctions de commande des mini-réseaux comprennent les stratégies de protection et la prise de décision intelligente. L'intelligence artificielle (IA) peut être utilisée pour optimiser les performances des technologies d'énergie renouvelable et maximiser l'efficacité énergétique du mini-réseau. L'intelligence artificielle peut faciliter la prévision précise des conditions météorologiques futures et de la demande de charge, en activant les commandes pour améliorer les performances du système et réduire au minimum les coûts d'exploitation globaux.

Les fonctions de communication de données consistent à saisir les données recueillies par les capteurs, à les transmettre aux contrôleurs, puis à transmettre les commandes générées par les contrôleurs aux actionneurs des systèmes automatisés³⁰.

La fonction de conversion d'un mini-réseau renouvelable permet de convertir l'énergie produite à partir des sources renouvelables et de l'adapter aux caractéristiques des systèmes de charge et de stockage du mini-réseau. Ces systèmes peuvent être classés en fonction des tensions d'entrée et de sortie:

- Les convertisseurs permettent l'adaptation de courant continu à courant continu et de courant alternatif à courant alternatif.
- Les redresseurs convertissent le courant continu en courant alternatif (par exemple, de l'énergie solaire en courant continu pour alimenter une charge en courant alternatif).
- Les onduleurs convertissent le courant alternatif en courant continu (par exemple, à partir d'un groupe électrogène diesel à courant alternatif pour charger des batteries à courant continu ou un système de stockage d'énergie).

Un mini-réseau ou un micro-réseau peut être conçu comme un réseau à courant alternatif ou à courant continu, en fonction de la charge principale à desservir.

Les onduleurs de formation de réseau sont capables de créer un réseau à courant alternatif dans les mini-réseaux renouvelables autonomes.

5.11 Réseau rural large bande alimenté par l'énergie solaire - Hopscotch Scotland

Hopscotch est un réseau large bande alimenté par l'énergie solaire spécialement conçu pour la connectivité rurale

Étude de cas - Réseau de station de base Hopscotch en Écosse

HopScotch est une installation de réseau large bande testée dans les hautes terres et les îles isolées et peu peuplées de la côte ouest de l'Écosse. Cet essai a été réalisé dans une région rurale éloignée du point d'échange Internet le plus proche et dépourvue d'accès au réseau électrique. La mise en place d'une infrastructure large bande capable de couvrir une vaste zone rurale à l'aide d'une station de base mobile alimentée par des groupes électrogènes diesel nécessiterait des investissements considérables dans des régions où le réseau électrique n'est pas disponible ou peu fiable. Outre le coût élevé et toujours croissant du carburant, les dépenses supplémentaires liées au transport du carburant et à l'entretien, les moteurs diesel sont bruyants et émettent du CO₂.

³⁰ https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Minigrids_2016.pdf.

Réseau hertzien

Les installations d'essai des stations de base HopScotch sont des systèmes radioélectriques fonctionnant dans les bandes 5 GHz WiFi et d'ondes décimétriques des espaces blancs vers des communautés éclairées utilisant:

- des systèmes d'accès hertzien point à multipoint (PTMP) de faible puissance (similaires au WiFi), connectés à;
- des liaisons de raccordement point à point (PTP) reliant la station de base au réseau central ou, s'il est disponible, la station de base peut être directement connectée à un cœur de réseau IP;
- la station de base est alimentée par WindFi, une énergie renouvelable hybride hors réseau - panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes et batteries de stockage.

Ces systèmes radioélectriques sont conçus pour réduire au minimum la consommation et sont entièrement alimentés par des sources d'énergie renouvelables, et non par des stations de base cellulaires classiques dotées de systèmes de refroidissement qui requièrent une puissance considérable.

Prototype de station de base "WindFi" sur l'île de Bute - 2010



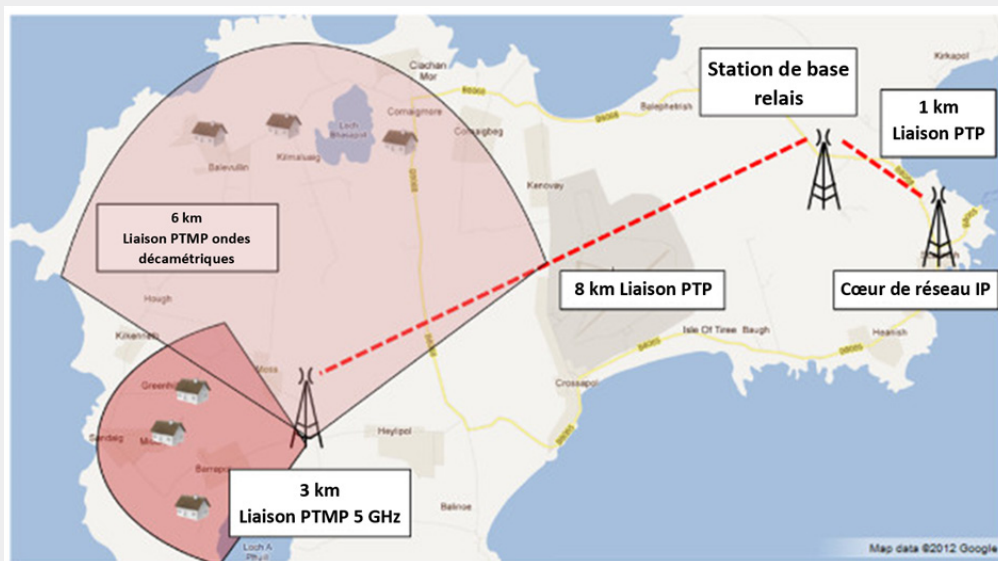
Prototype de station de base "WindFi" sur l'île de Bute, en Écosse. La base contient des panneaux solaires et des batteries, au-dessus desquels un mât de 10 m porte l'éolienne avec les antennes et l'équipement radioélectrique directement sous le mât.

Source: <https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-112/figures/4>.

Caractéristiques du système radioélectrique HopScotch

- La variante PTP point à point de la bande C de 5 GHz (5,725-5,850 GHz) est utilisée pour fournir une connectivité de raccordement
 - p.i.r.e. maximale de 4 W - radios fondées sur la norme IEEE 802;
 - spectre total de 125 MHz - deux canaux turbo de 40 MHz de large qui ne se chevauchent pas;
 - deux flux spatiaux indépendants de 300 Mbit/s sur les polarisations verticale et horizontale.

Exemple de réseau HopScotch reliant une communauté distante à un cœur de réseau IP



HopScotch: un réseau de station de base à faible consommation d'énergie renouvelable pour l'accès rural au large bande

Source: <https://jwcn-eurasiapjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-112/figures/1>.

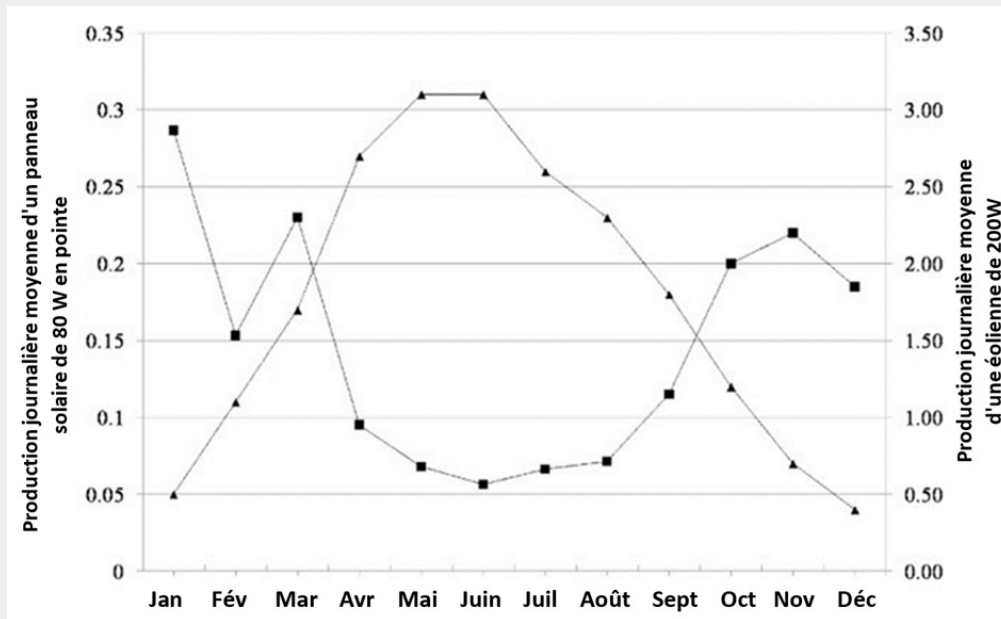
- Le point à multipoint fonctionnant dans la bande de fréquences des 5 GHz est utilisé pour desservir les clients situés à proximité (3 km) de la station de base
 - Nombre variable de secteurs par site (2 à 6 secteurs) en fonction de la taille de la communauté
 - Communauté de taille moyenne - 4 secteurs
 - Bande sans licence B (5.470-5.725 GHz). Canaux 11 × 20 MHz ou 6 × 40 MHz ne se chevauchant pas
 - 8 à 10 utilisateurs large bande sur 65 Mbit/s (échelonné selon les besoins)
 - p.i.r.e. maximale 1 W
- Système dans les bandes d'ondes décimétriques
 - La bande d'ondes décimétrique des espaces blancs de la télévision superposée, en raison de ses caractéristiques de propagation, est utilisée pour étendre la couverture à 6 km, mais au détriment du débit
 - Espaces blancs de télévision dans la bande de fréquence 400 MHz
- Mât de 10 m (équipé d'éoliennes, de panneaux solaires photovoltaïques, d'équipements radioélectriques et de batteries)

Solution d'énergie renouvelable

WindFi est une station de base à très faible consommation d'énergie qui, pour un site spécifique (voir la figure), utilise:

- éoliennes (200 W) et
- modules solaires PV (80 W) avec système de suivi;
- l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont des sources d'énergie renouvelables complémentaires en Écosse, comme le montre la figure;
- station de base alimentée 24 heures sur 24, 365 jours par an;
- batteries de secours - fonctionnement continu - 3 jours de secours;
- la profondeur de décharge" de la batterie ne doit pas dépasser 50%.

Production quotidienne d'électricité à partir de sources éoliennes et solaires



Production quotidienne moyenne d'électricité à partir d'un seul module photovoltaïque de 80 W (▲) et d'une éolienne de 200 W (■) sur l'île de Tiree, en Écosse, sur la base des données d'irradiation solaire prévues par le système d'information géographique sur le photovoltaïque et des vitesses moyennes du vent mesurées à l'aéroport de Tiree, l'éolienne étant utilisée comme station de base "WindFi".

Source: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-112/figures/5>.

Dimensionnement des systèmes renouvelables

La charge totale du système radioélectrique, des systèmes d'accès et de la gestion est calculée. Le parc de batteries est alors dimensionné pour la charge de pointe et à 50% DoD, avec trois jours de réserve. Les panneaux solaires sont dimensionnés pour répondre aux charges de pointe en tenant compte des données d'irradiation provenant du système d'information géographique sur l'énergie photovoltaïque et des données sur la vitesse moyenne du vent provenant d'un aéroport voisin.

5.12 Systèmes électriques hybrides

Les systèmes électriques hybrides utilisent à la fois des énergies renouvelables et des techniques de production ou de stockage d'électricité à partir de combustibles fossiles. Les systèmes de production d'électricité décentralisés, mini-hybrides et micro-hybrides, hors réseau, peuvent fournir une électrification accessible, rentable et fiable aux installations et communautés rurales qui sont éloignées du réseau électrique principal et qui ont peu de chances d'y être raccordées.

Les systèmes électriques hybrides peuvent combiner un système d'énergie renouvelable – généralement de la production photovoltaïque ou éolienne – avec des batteries ou des systèmes de stockage d'énergie et, le cas échéant, un groupe électrogène alimenté par du diesel ou un autre combustible fossile. D'autres sous-systèmes sont fournis, tels que des onduleurs, des redresseurs et d'autres systèmes de commande, de gestion et de conditionnement.

Les petits systèmes hybrides alimentés par des énergies renouvelables sont des solutions adaptées pour fournir des services électriques de base fiables aux installations isolées et aux institutions locales telles que les centres d'exploitation des télécommunications et des TIC, les centres de santé, les organisations commerciales, les petites industries, les services commerciaux/bureaux, les agences gouvernementales et les ateliers/établissements de formation professionnelle.

Étude de cas: TELE Greenland

TELE Greenland a mis au point un système d'alimentation hybride commandé par ordinateur utilisé pour alimenter des sites de répéteurs de relais radio de 1,5 kW non habités au Groenland pendant cinq ans. Ce système utilisait des panneaux solaires d'une puissance de sortie de 4 800 watts chacun, des batteries d'une capacité de 4 500 Ah et un petit groupe électrogène diesel. Il comprenait un tableau de distribution d'énergie et un équipement de supervision. Les batteries fournissaient l'alimentation principale pour l'équipement de télécommunication chargé par les cellules solaires. TELE Greenland fait état d'une économie de carburant de 80% par rapport à un groupe électrogène diesel fonctionnant en permanence, et d'une réduction des interventions de maintenance à une fois par an.

Les facteurs déterminants pour les mini-réseaux hybrides sont les suivants:

- nécessité d'un accès fiable et abordable à l'électrification;
- économies de carburant, dépendance à l'égard du diesel ou élimination de celui-ci;
- réduction des émissions de CO₂.

Il existe une grande variété d'applications et de configurations pour les mini-réseaux hybrides renouvelables destinés aux sites ruraux et isolés. Associés au stockage, ils peuvent atténuer et gérer la variabilité de la production d'énergie renouvelable pour répondre à la demande tout au long de la journée.

Les mini-réseaux sont souvent utilisés dans les cas suivants:

- Installations de services collectifs comme pylônes de télécommunication, stations d'eau, etc.
- Services communautaires – foyers, agences gouvernementales, établissements d'enseignement, hôpitaux.
- Entreprises locales et établissements sur les campus, etc.

Les systèmes micro-hybrides qui produisent moins de 5 kWp peuvent être utilisés pour répondre aux besoins d'électrification des petites communautés villageoises rurales, des stations de base de télécommunication éloignées (sites de faible capacité) et, en association avec des groupes

électrogènes diesel, peuvent très efficacement réduire la consommation de carburant tout en offrant une grande fiabilité.

Les petits systèmes photovoltaïques hybrides décentralisés, d'une puissance de 5 à 30 kWp, conviennent aux petits sites de répéteurs d'accès hertzien pour les zones isolées/rurales et aux stations de base mobiles, ainsi qu'à l'éclairage des ménages et aux systèmes autonomes des centres de santé locaux, des centres de formation, des industries artisanales et d'autres services communautaires.

Les systèmes hybrides de taille moyenne, d'une puissance de 30 à 100 kWp, nécessitent des capacités d'électrification plus avancées et conviennent aux communautés ayant des activités hautement productives, pour alimenter les grandes installations de télécommunication, les petites industries locales, etc.

Les systèmes électriques hybrides peuvent se présenter sous différentes configurations:

- Solutions de mini-réseau/micro-réseau solaire PV avec groupe électrogène diesel;
 - adaptées aux réseaux qui dépendent historiquement de groupes électrogènes diesel et de sources primaires ou dont le réseau est peu fiable, les énergies renouvelables peuvent être déployées pour diminuer la consommation de carburant, réduire au minimum les coûts d'exploitation et d'entretien et réduire les émissions de gaz à effet de serre;
 - où il n'y a pas suffisamment d'espace pour construire des installations solaires à grande échelle;
 - pour améliorer la fiabilité et permettre une conception plus modulaire du réseau.
- Énergie solaire photovoltaïque et éolienne.
- Énergie solaire photovoltaïque, éolienne et groupe électrogène diesel.

5.12.1 Mini-réseau hybride à courant alternatif

En règle générale, un système de réseau hybride à courant alternatif alimente directement le réseau à partir d'une source de courant alternatif, tandis que l'énergie provenant d'une source de courant continu renouvelable, telle que l'énergie solaire photovoltaïque, utilise des onduleurs pour convertir son énergie en vue d'alimenter le réseau à courant alternatif. L'énergie provenant du réseau à courant alternatif sera redressée pour charger les batteries de secours ou les systèmes de stockage d'énergie. Lorsque la source de courant alternatif n'est pas disponible, le courant continu est tiré de la source renouvelable ou des batteries en convertissant leur courant continu en courant alternatif pour alimenter la charge.

La conception de l'adaptation à la demande de pointe doit tenir compte du fait que, pour les projets communautaires, les charges de pointe peuvent fluctuer considérablement au cours de la journée. La charge de pointe de la journée provient principalement de l'activité des bureaux, des entreprises et des utilisateurs commerciaux, des centres, des écoles, des établissements de santé et d'autres institutions. Les charges de soirée sont dominées par les demandes résidentielles: éclairage, réfrigération, appareils ménagers et systèmes de divertissement.

Dans les réseaux hybrides, un groupe électrogène diesel, lorsqu'il est utilisé, prend en charge les charges de pointe, afin d'accroître la fiabilité et de garantir que les batteries et les systèmes de stockage d'énergie sont chargés de manière optimale. Les systèmes hybrides doivent être

conçus de manière à réduire au minimum les coûts d'investissement et à optimiser les dépenses d'investissement et d'exploitation du système.

La Figure 23 illustre un système couplé en courant alternatif fonctionnant à partir de sources solaires et éoliennes avec des onduleurs, incorporant un groupe électrogène diesel qui alimente la charge en courant alternatif directement via des systèmes de stabilisation de la tension. La conception du système garantit que les batteries sont chargées de manière optimale afin de lisser la demande et de servir de source de secours pendant les périodes où les principales sources d'énergie ne sont pas disponibles.

5.12.2 Système hybride de mini-réseau à courant continu

Les réseaux de télécommunications sont généralement alimentés par des systèmes à courant continu de 48 volts avec des batteries de secours/de réserve pour maintenir une grande fiabilité et assurer une disponibilité permanente, alors que les équipements IP sont conçus pour fonctionner principalement en courant alternatif car ils nécessitent une puissance élevée.

La distribution en mini-réseau à courant continu peut offrir une plus grande efficacité énergétique et une meilleure durabilité pour l'alimentation des charges à courant continu, sans les inefficacités liées à la conversion continu-alternatif-continu nécessaire sur les réseaux à courant alternatif (EMerge Alliance, 2015)³¹, car la conversion peut réduire l'efficacité de 3% ou plus (Willems et autres, 2013)³². L'efficacité peut être considérablement améliorée en utilisant des appareils alimentés en courant continu, qui sont plus efficaces et plus économiques à utiliser, comme les ampoules LED de 12 volts alimentées directement par le photovoltaïque, qui permettent d'économiser jusqu'à 30% de la consommation d'électricité sans avoir besoin d'onduleurs (Graillot, 2013)³³.

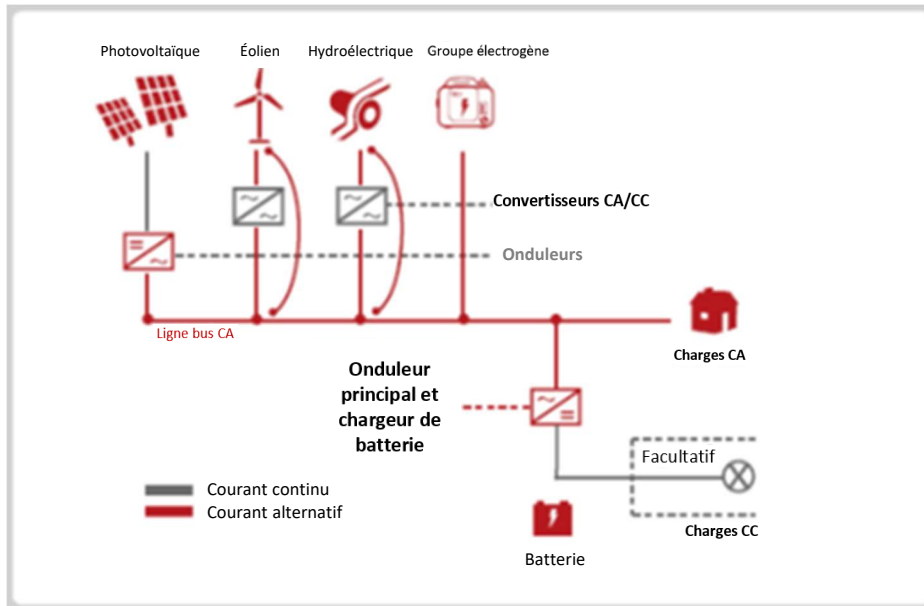
La Figure 24 illustre un mini-réseau hybride à courant continu utilisant des panneaux solaires photovoltaïques, une éolienne et un système de batterie de secours pour alimenter une station de base de télécommunication distante avec uniquement des charges à courant continu.

³¹ Elsevier Image Alliance A comparison of DC - versus AC - based mini-grids <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484719300617?token=1CC673EF309F79143500252E66AA3A5642A79806AB4AD265761B8C9871538F1E3D0802384DFD3C1A8CE766B4EAB4B5A6>.

³² Willems, S., Aerts, W., De Jonge, S., Haeseldonckx, D., van Willigenburg, P., Woudstra, J., Stokman, H., 2013. Lirias: Sustainable Impact and Standardization of a DC Micro Grid. Présenté au colloque international sur l'écoconception, KU Leuven, Ile de Jeju, République de Corée.

³³ IRENA 216 - Innovation Outlook Renewable Mini-grid.

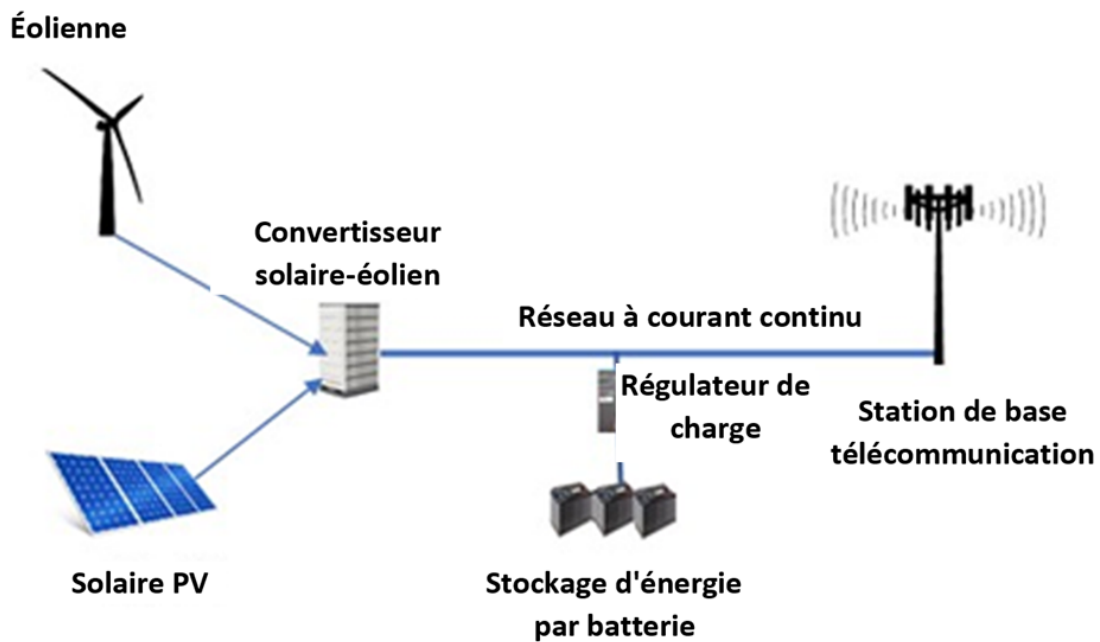
Figure 23: Mini-réseau hybride couplé en courant alternatif



Source: Schéma d'un mini-réseau en courant alternatif avec les composants du système, adapté de ARE (2011) <https://www.ruralelec.org/sites/default/files/inensus-toolkit-en-21x21-web-ok.pdf>.

Figure 24: Réseau hybride à courant continu - éolien et solaire PV

Site de télécommunication distant



5.13 Production hybride solaire et diesel

Les panneaux solaires ont une très longue durée de vie. Les fabricants annoncent une durée de vie de 20 à 25 ans, [la production diminuant à environ 80% du rendement initial](#) après cette période. Cette longévité s'explique par le fait que les panneaux solaires ne comportent aucune pièce mobile. Seuls les effets de dégradation lente des ultraviolets (UV) usent les panneaux.

Les mini-réseaux solaires PV-groupes électrogènes diesel utilisent des batteries ou d'autres systèmes de stockage d'énergie pour lisser l'énergie fournie à la charge tout au long de la journée et s'assurer que les demandes de charge de pointe sont satisfaites tout en réduisant au minimum le temps de fonctionnement des groupes électrogènes diesel et la consommation de carburant.

Le système solaire photovoltaïque doit être conçu pour satisfaire les charges de pointe pendant la journée; l'énergie excédentaire peut être utilisée pour charger les batteries de secours. Les batteries doivent être dimensionnées pour fournir une alimentation de secours dans le pire des cas, lorsque toutes les sources d'énergie primaires sont indisponibles. Dans le pire des cas, cela peut durer quelques jours, par exemple lorsque la lumière directe du soleil n'est pas disponible pendant une période prolongée.

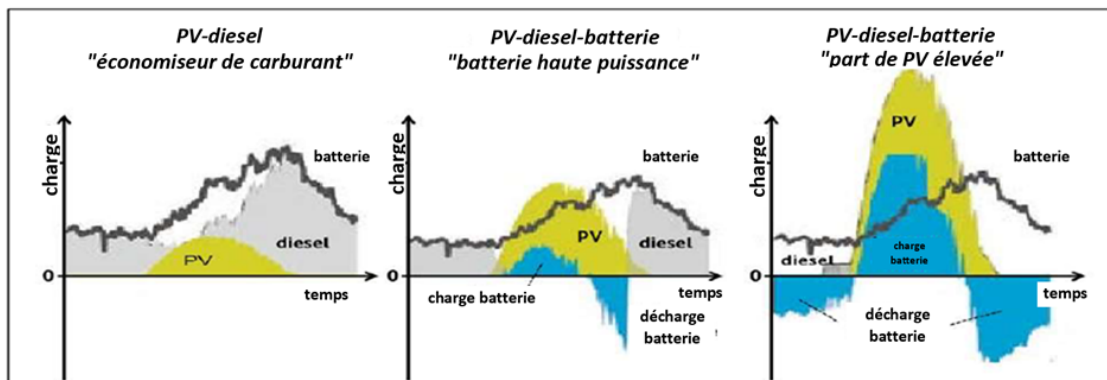
Les groupes électrogènes diesel, quant à eux, ont un coût de fonctionnement constant en raison des besoins en carburant, du nettoyage et du remplacement des filtres. Bien que les groupes électrogènes diesel soient bon marché au départ, leur coût net s'accroît lentement au fil du temps. [Par ailleurs, les groupes électrogènes diesel ne sont pas fiables](#) et nécessitent souvent des révisions coûteuses pour continuer à fonctionner. C'est pourquoi de nombreuses études de cas ont montré que les générateurs solaires constituent une option moins coûteuse à long terme³⁴.

Malgré cela, les groupes électrogènes diesel restent un [choix courant pour la production d'électricité](#), car le coût d'acquisition des systèmes solaires photovoltaïques est plus de cinq fois supérieur à celui d'un groupe électrogène diesel. Les populations ayant un accès limité au capital peuvent ne pas avoir les ressources nécessaires pour payer les coûts initiaux élevés de l'énergie solaire sans financement. Toutefois, le coût du cycle de vie de l'énergie solaire photovoltaïque sera inférieur en raison des coûts d'alimentation, de transport et d'entretien régulier du groupe électrogène diesel.

Afin de dimensionner le système, le facteur de charge du groupe électrogène diesel et le cycle de la batterie doivent être déterminés car ils ont des incidences significatives sur le coût du cycle de vie du système (AIE 2013). La Figure 25 illustre un profil de charge quotidien typique et le fonctionnement du groupe électrogène diesel et du système solaire photovoltaïque.

³⁴ [Solar Electric Light Fund](#); [Universities Gadjah Mada](#); [Abubakar Tafawa Balewa University](#); [Arba Minch University](#); et [Indian Institute of Technology](#).

Figure 25: Illustration des différents modes de fonctionnement des systèmes hybrides



Source: The German Climate Technology Initiative GIZ Promotion of Solar-Hybrid Mini-Grids, août 2016.

5.14 Solaire PV groupe électrogène diesel

Situation: pas de réseau électrique sur le site au Pakistan, auparavant uniquement alimenté par un groupe électrogène diesel.

Solution proposée: système photovoltaïque hybride, groupe électrogène diesel, groupe de batteries lithium-ion.

Résultat:

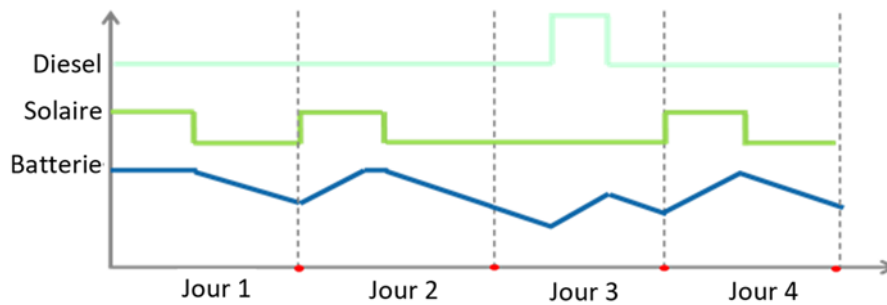
- Le groupe électrogène diesel fonctionne en moyenne moins de deux heures par jour.
- Les systèmes ont généré 12% d'énergie en plus qu'une solution fondée uniquement sur le diesel.
- La consommation de carburant a été réduite de 80%.



Source: Huawei

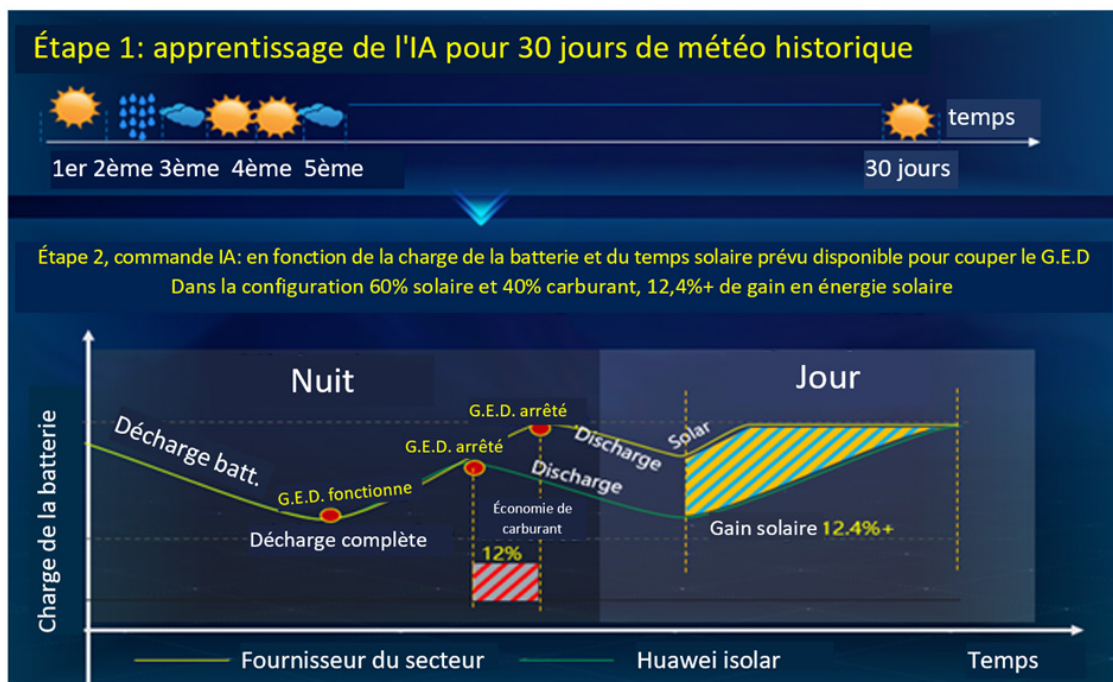
Les cycles de charge et de décharge sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Logique de programmation multi-énergie



L'intelligence artificielle est utilisée pour commander le groupe électrogène diesel. Comme le montre l'illustration ci-dessous, le groupe électrogène diesel est mis en marche lorsque la tension de la batterie atteint le seuil de décharge minimum. Dans une situation normale sans IA, le groupe électrogène diesel ne s'éteint que lorsque l'énergie du panneau solaire photovoltaïque atteint 12,4% de la puissance maximale.

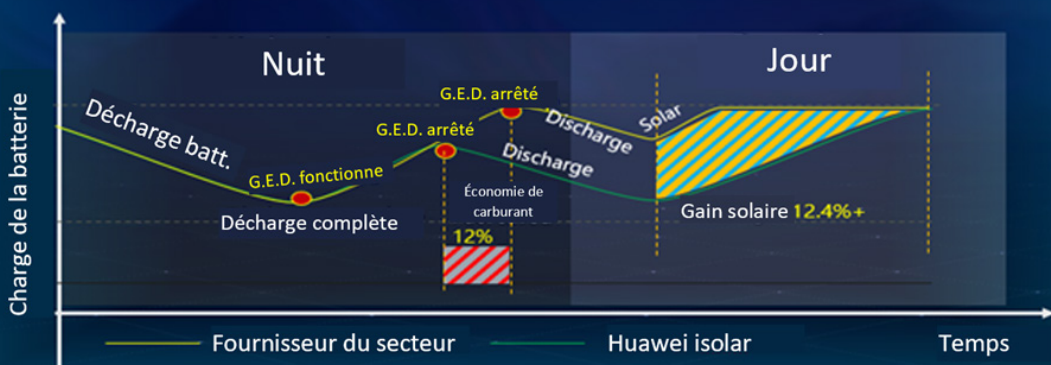
Grâce à l'intelligence artificielle, les systèmes prévoient les heures de lever du soleil du lendemain, c'est-à-dire le moment où l'irradiation solaire sera suffisante pour charger les batteries, de manière à éteindre le groupe électrogène diesel plus tôt. Le niveau de charge de la batterie est surveillé et l'intelligence artificielle est utilisée pour prédire à quel seuil de tension de la batterie et à quel moment la source solaire photovoltaïque sera disponible pour recharger suffisamment la batterie au cours de la journée.



Étape 1: apprentissage de l'IA pour 30 jours de météo historique



Étape 2, commande IA: en fonction de la charge de la batterie et du temps solaire prévu disponible pour couper le G.E.D. Dans la configuration 60% solaire et 40% carburant, 12,4%+ de gain en énergie solaire



Étude de cas Huawei

Solution rurale de Huawei pour les mini-réseaux hybrides d'énergie renouvelable - réduction des coûts d'exploitation pour l'opérateur de téléphonie mobile Ufone au Pakistan

Ufone fait partie du groupe Etisalat et est le quatrième opérateur de télécommunications mobiles au Pakistan, avec une part de marché de 14% et 22 millions d'abonnements. Ufone exploite des milliers de stations de base mobiles, dont certaines sont situées dans des zones urbaines et sont alimentées par le réseau électrique principal, tandis que d'autres fonctionnent hors réseau dans des zones rurales isolées. Ufone a installé des groupes électrogènes diesel sur plus de 8 000 sites afin de fournir une alimentation stable et de réserve à ses stations de base dans les zones où le réseau électrique est instable. En raison des coupures de courant qui durent longtemps, les groupes électrogènes diesel devaient fonctionner pendant plusieurs heures d'affilée. Les coupures de courant ont duré en moyenne de 6 à 10 heures dans les villes, et de 8 à 20 heures dans certaines villes et villages ruraux.

La concurrence sur le marché pakistanais de la téléphonie mobile a conduit les opérateurs à percevoir une recette moyenne par utilisateur (RMPU) très faible de 2,50 USD. Ufone a donc examiné les coûts du réseau et cherché des moyens de réduire les coûts d'exploitation et d'investissement. Le coût élevé de l'exploitation et de la maintenance, en particulier l'alimentation des groupes électrogènes diesel dans les zones où l'approvisionnement en réseau n'est pas fiable, a été retenu comme une préoccupation majeure et un objectif de réduction des coûts.

Huawei a proposé et mis en œuvre quatre modèles de solutions d'alimentation hybride pour Ufone, fondées sur différentes combinaisons de systèmes solaires et photovoltaïques, de batteries de stockage et de groupes électrogènes diesel (fournis en tant que groupes électrogènes de secours). Réduire au minimum le fonctionnement des groupes électrogènes diesel ou les supprimer complètement permettrait de réduire la pollution de l'environnement.

Modèle 1. Sites subissant des coupures de courant de 6 à 8 heures.

Huawei a proposé:

- de supprimer le groupe électrogène diesel et
- d'installer des batteries à charge rapide (3-4 heures pour une charge complète).

Il s'agissait d'une solution appropriée, car le groupe électrogène diesel et l'ancien groupe de batteries au plomb n'étaient plus nécessaires.

Modèle 2. Sites subissant des coupures de courant de 10 à 16 heures.

Huawei a proposé des groupes diesel et une solution hybride de

- batteries au lithium avec une capacité de charge rapide d'une heure, une capacité plus élevée, une durée de vie plus longue (100 Ah, durée de vie de 3 500 cycles);



- batteries à charge rapide de secours, offrant 2 à 3 heures de charge rapide en mode veille. (100 Ah, durée de vie de 2 000 cycles).

Modèle 3. Sites subissant des coupures de courant de 16 à 20 heures.

Huawei a proposé de supprimer les groupes électrogènes diesel et d'installer une solution hybride:

- panneau solaire photovoltaïque;
- batteries au lithium à charge rapide (2 heures).

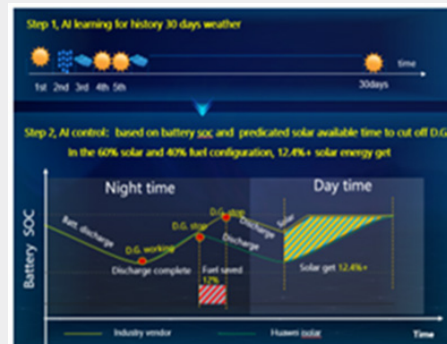
Cette solution était appropriée et ne nécessitait pas d'alimentation électrique à partir d'une autre source.

Modèle 4. Sites autonomes sans accès au réseau.

Huawei a proposé de mettre en œuvre une solution hybride composée d'énergie solaire, d'un groupe électrogène, de batteries et d'une gestion par intelligence artificielle:

- panneau solaire photovoltaïque;
- batteries au lithium à charge rapide (2 heures);
- groupe électrogène diesel de secours.

Cette solution a permis de réduire de 80% le fonctionnement du groupe électrogène diesel et la consommation de carburant, car le panneau solaire a produit suffisamment d'énergie pour faire fonctionner l'équipement de communication et charger complètement les batteries au lithium. L'intelligence artificielle a été utilisée pour prédire la période optimale de fonctionnement du groupe électrogène et commander son fonctionnement.



5.15 Solutions de stockage

Le stockage fournit ou absorbe de l'énergie pour équilibrer l'offre et la demande et pour contrer les fluctuations de la charge et de la production des clients³⁵.

En raison de la baisse rapide des coûts des technologies solaires et éoliennes et de l'augmentation des volumes de production, les systèmes d'énergie renouvelable deviennent la norme pour la plupart des applications hors réseau. Le stockage de l'électricité devient un élément essentiel des solutions hors réseau et a des incidences directes sur les initiatives de décarbonation dans ces segments clés de l'utilisation de l'énergie qui dépendent actuellement fortement du gazole.

On estime qu'avec l'amélioration de la technologie des batteries, la capacité totale de stockage de l'électricité pourrait tripler d'ici à 2030. Les coûts des technologies de stockage par batterie devraient baisser de 66%³⁶. À mesure que le prix des technologies de stockage de l'électricité continue de baisser et devient plus abordable, la part d'énergie renouvelable utilisée dans les

³⁵ [SE4All HIO CEMG](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf). Off-grid renewable energy solutions to expand electricity access https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf.

³⁶ <https://www.powerelectronics.com/alternative-energy/6-promising-energy-storage-options-tie-grid>.

mini-réseaux continuera d'augmenter, avec un ensemble croissant d'avantages techniques, économiques et sociaux (IRENA, 2016).

5.15.1 Batteries au plomb

Les batteries au plomb sont la principale technologie de stockage de l'énergie utilisée depuis des décennies comme solution de secours aux groupes électrogènes diesel, pour alimenter les installations de télécommunication raccordées au réseau électrique ou hors réseau électrique dans les zones urbaines et rurales du monde entier. Les deux principales catégories de batteries au plomb sont les batteries à cellules humides (batteries inondées non scellées) et les batteries au plomb à régulation par soupape (VRLA) qui utilisent des batteries scellées au gel ou au verre absorbé (AGM). Les batteries au gel scellées sont préférées pour les applications qui nécessitent une décharge lente ou qui fonctionnent à des températures ambiantes élevées, tandis que les batteries AGM ont de meilleurs taux de charge.

Les batteries au plomb sont une technologie rechargeable peu coûteuse et largement répandue. Elles conviennent à un large éventail d'applications; cependant, elles ont une faible densité énergétique, des cycles de vie très courts et une faible profondeur de charge. Leur plage de température de fonctionnement optimale est également assez restreinte.

Les batteries inondées nécessitent un système de gestion thermique et un entretien périodique pour le remplacement de l'eau. Les batteries VRLA, en revanche, sont conçues avec des soupapes autorégulatrices qui empêchent la perte d'électrolyte et, bien que plus chères que les batteries inondées, ont un cycle de vie beaucoup plus long et peuvent fonctionner sans entretien pendant 10 ans.

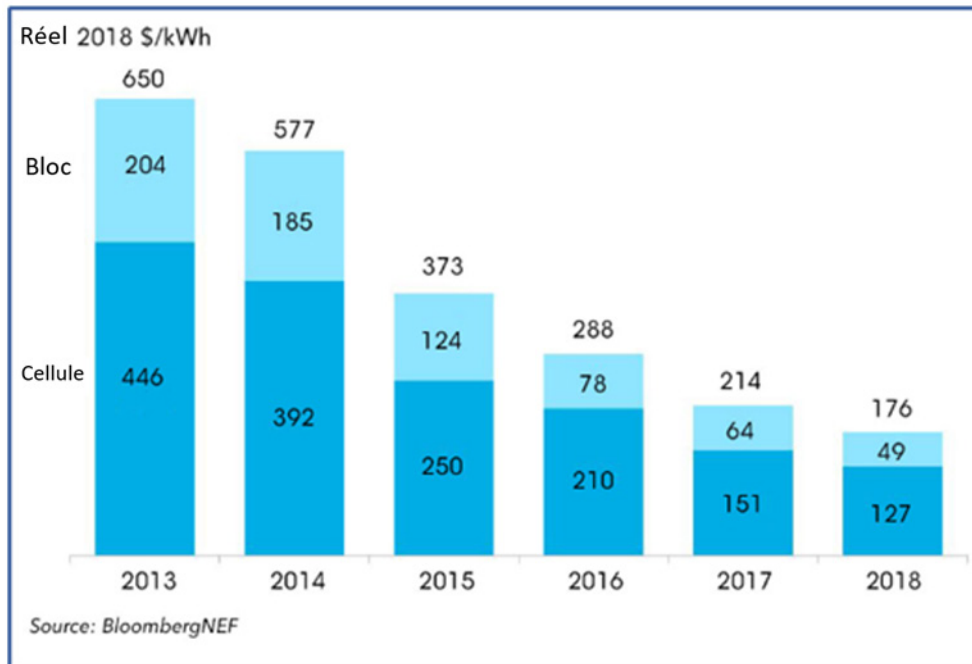
Si la profondeur de décharge est inférieure à 50%, la durée de vie des batteries au plomb sera réduite, tandis que les batteries au lithium peuvent être déchargées à 80% sans dommages significatifs à long terme.

5.15.2 Batteries au lithium

Les batteries lithium-ion ont connu la croissance la plus rapide et les baisses de coûts les plus importantes ces dernières années, en grande partie grâce au développement des véhicules électriques. Elles sont principalement utilisées dans les appareils mobiles et portables et dans l'électronique grand public en raison de leur densité énergétique supérieure. Le Rapport de l'étude Bloomberg New Energy de 2017 (voir la Figure 26) indique que le prix moyen d'une batterie lithium-ion a chuté de 85% entre 2010 et 2018 et qu'il continuera à diminuer au cours des prochaines décennies, principalement en raison de l'augmentation des volumes et sous l'impulsion du secteur des transports et de la recherche et du développement. L'IRENA prévoit une baisse significative du coût des batteries lithium-ion installées, de 54% en 2016 à 64% en 2030 pour les applications stationnaires³⁷.

³⁷ IRENA. Electricity Storage Costs 2917.

Figure 26: Enquête sur le prix des batteries lithium-ion: répartition des blocs et des cellules



Les batteries au lithium sont la solution de stockage par batterie la plus largement déployée, utilisée dans plus de 90% du marché mondial du stockage par batterie de réseau³⁸. Leur capacité à stocker l'énergie de manière économique pendant la journée, lorsque l'énergie solaire est abondante et moins chère, puis à la restituer la nuit lorsque la demande résidentielle augmente, entraînera une augmentation de la production d'énergie solaire. De même, l'énergie éolienne excédentaire produite la nuit par les parcs éoliens, à faible coût, peut être stockée et restituée pendant la journée pour répondre aux pics de demande.

Par rapport aux batteries au plomb, les batteries au lithium présentent les avantages suivants³⁹:

- densité énergétique élevée, faible poids (les nouvelles technologies comprennent le remplacement du graphite par du silicium);
- elles tolèrent des niveaux de profondeur de décharge plus importants sans détérioration significative, contrairement aux batteries au plomb;
- coûts de cycle de vie plus faibles avec une durée d'utilisation nettement plus longue; environ six fois le nombre de cycles de charge que les batteries au plomb peuvent supporter (en particulier les batteries lithium-ion phosphate);
- elles peuvent être rechargées très rapidement (les batteries au lithium-fer peuvent être rechargées complètement en 30 minutes) et ne perdent qu'une petite partie de leur charge lorsqu'elles sont inutilisées pendant une période prolongée;
- elles ne nécessitent pas d'entretien et ne doivent pas être stockées verticalement ou dans des compartiments ventilés;
- meilleure efficacité;
- les prix ayant baissé ces dernières années, les batteries au lithium deviennent plus intéressantes pour les installations électriques hors réseau.

³⁸ Environmental and Energy Study Institute Fact Sheet: Energy Storage (2019) <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>.

³⁹ Lithium-ion Batteries - <https://www.usaid.gov/energy/mini-grids/emerging-tech/storage>.

5.15.3 Batteries à flux redox

Les batteries à flux redox diffèrent des batteries rechargeables classiques en ce sens que leurs matériaux électroactifs ne sont pas tous stockés dans la cellule autour des électrodes, mais sont dissous dans des solutions électrolytiques stockées dans des réservoirs distincts pour l'anode et la cathode.

Les batteries à flux redox ont une densité énergétique inférieure à celle des batteries Li-ion, mais leurs caractéristiques en matière d'énergie et de puissance peuvent être modulées de manière indépendante.

5.15.4 Volants d'inertie

Lorsque de l'énergie excédentaire doit être stockée, les volants d'inertie peuvent le faire sous la forme d'énergie cinétique de rotation en accélérant une masse en rotation dans une enceinte sans frottement. Lorsque l'énergie est requise, l'énergie cinétique est restituée sous forme d'énergie électrique en décélérant la vitesse du rotor du volant d'inertie.

Les volants d'inertie conviennent pour des durées de décharge courtes (de quelques secondes à plusieurs heures) et sont utilisés pour la gestion de l'énergie, notamment pour améliorer la stabilité du réseau. Ils sont souvent utilisés pour réguler et améliorer la qualité de l'énergie. Les volants d'inertie sont utilisés pour lisser l'énergie produite par les éoliennes. Ils peuvent libérer une grande quantité d'énergie sur une période très courte (quelques secondes).

Bien que très coûteux à installer, les volants d'inertie ont un potentiel de puissance élevé et peuvent atteindre 100% de profondeur de décharge pendant plus de 150 000 cycles sans dégradation au fil du temps. Ils présentent toutefois des pertes relativement élevées en mode veille en raison de taux de décharge très élevés, pouvant atteindre 15% par heure, et conviennent donc au stockage à court terme.

5.15.5 Batteries solides

Les batteries solides ont bénéficié d'un investissement considérable dans la recherche au cours des dernières décennies. Les batteries actuellement mises au point sont dotées d'une cathode et d'une anode solides et d'un électrolyte solide au lieu d'un liquide. Elles sont donc plus durables et leur utilisation est extrêmement sûre. Les batteries solides ont également une densité énergétique plus élevée que les batteries lithium-ion standard. Cependant, elles sont très coûteuses et ne sont généralement pas viables sur le plan commercial.

5.15.6 Supercondensateurs

Les supercondensateurs sont une autre technologie nouvelle pour les systèmes de stockage d'énergie qui peuvent offrir une densité de puissance plus élevée que les batteries classiques et une densité d'énergie plus élevée que les condensateurs traditionnels. Les supercondensateurs deviennent une solution d'alimentation intéressante pour un nombre croissant d'applications. Un supercondensateur est conçu comme un condensateur à double couche avec une capacité très élevée mais de faibles limites de tension et stocke plus d'énergie que les condensateurs électrolytiques. L'énergie électrique est stockée à l'interface électrode-électrolyte, qui se compose de deux plaques métalliques recouvertes d'un matériau poreux à base de charbon

actif qui présente une plus grande surface pour stocker beaucoup plus de charge. Les plaques sont immergées dans un électrolyte.

Les supraconducteurs offrent les avantages d'une densité de puissance élevée et d'une capacité à gérer des courants de charge importants. Ils présentent une bonne efficacité, ont une durée de vie atteignant des centaines de milliers de cycles et peuvent fonctionner sur une large gamme de températures.

Les supercondensateurs sont idéaux pour les applications nécessitant de nombreux cycles de charge/décharge rapides et peuvent être chargés en quelques secondes. Ils sont parfaits pour les besoins en énergie à court terme, par exemple pour garantir la stabilité du réseau électrique (stabilité de la tension et de la fréquence). Ils sont également utilisés dans l'électronique grand public, les systèmes d'alimentation sans interruption pour les éoliennes et les dispositifs utilisés dans les réseaux de distribution, etc.

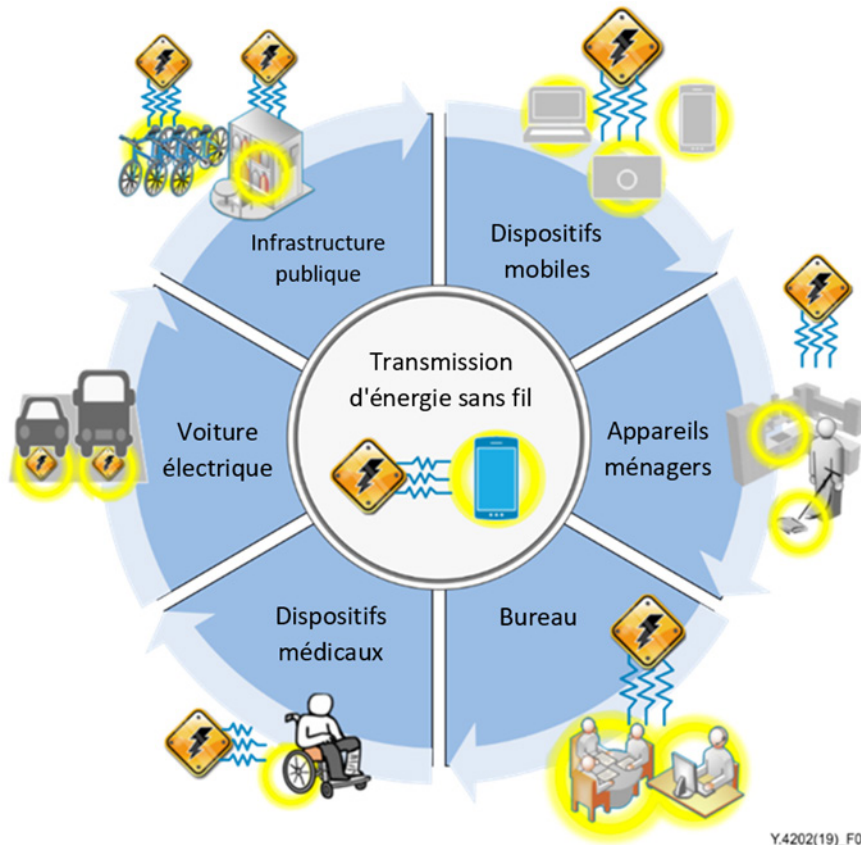
Leur faible densité énergétique constitue un inconvénient majeur. Ils ne conviennent donc pas comme source d'énergie à stockage continu.

5.16 Transmission d'énergie sans fil

La transmission (ou le transfert) d'énergie sans fil (WPT) est considérée comme une technologie révolutionnaire, car elle permettra de fournir de l'énergie électrique même dans les conditions les plus difficiles. La transmission d'énergie par ondes radioélectriques remonte aux premiers travaux de Nikola Tesla en 1899. C'est en effet à cette date que Tesla avait procédé aux premiers essais de transmission d'énergie sans fil. Il avait employé une énergie basse fréquence à 150 kHz, mais cette tentative avait échoué. À titre d'éléments de réponse à la Question UIT-R 210-3/1, des informations sur la transmission WPT fondée sur des techniques autres que la transmission par faisceau radioélectrique ont été publiées en 2014 dans le Rapport UIT-R SM.2303 et mises à jour à plusieurs reprises jusqu'en 2021. Après une démonstration au Massachusetts Institute of Technology (MIT), les chercheurs se sont penchés sur différentes technologies de transmission WPT prometteuses, notamment l'induction magnétique, le couplage par résonance et la transmission par faisceau radiofréquence. On trouvera des détails dans le Rapport de l'UIT-T mentionné ci-dessus.

Les incidences de ces systèmes WPT sur les services de radiocommunication fait l'objet d'études approfondies au sein de l'UIT-R et certaines recommandations ont déjà été approuvées (voir <https://www.itu.int/rec/R-REC-SM/en>). D'autres études concernant les aspects de sécurité tels que l'exposition des personnes à des champs électromagnétiques sont également en cours.

Figure 27: Scénario type de transmission d'énergie sans fil



5.16.1 Accès à l'énergie par transmission sans fil de l'énergie par faisceau de radiofréquences

Les technologies de chargement sans fil ne cessent d'évoluer et prennent actuellement en charge les transmissions par rayonnement quelle que soit la distance (transmission WPT par faisceau). La technologie WPT par faisceau peut offrir des améliorations considérables pour certaines applications par rapport à la transmission WPT sans faisceau, qui utilise des technologies de couplage par induction, de couplage par résonance ou de couplage capacitif.

La technologie WPT par faisceau peut être conçue et mise en œuvre dans de nombreux dispositifs électroniques professionnels ou domestiques de tailles différentes, ainsi que dans le secteur médical, l'industrie, le secteur de détail et l'industrie automobile, et elle garantit l'interopérabilité entre les produits. Ces dispositifs sont notamment les dispositifs à porter sur soi, les prothèses auditives, les écouteurs, les casques Bluetooth, les dispositifs de l'Internet des objets, les smartphones, les tablettes, les liseuses électroniques, les claviers, les souris, les télécommandes, les lampes rechargeables, les piles de forme cylindrique, les dispositifs médicaux et tout autre dispositif ayant des besoins de chargement analogues qui sinon devraient être équipés d'une batterie ou raccordés à une prise électrique.

Les émetteurs WPT par faisceau utilisent du spectre à bande étroite, généralement 400 kHz ou moins, pour transmettre l'énergie RF au dispositif client. L'émetteur est inactif tant qu'un dispositif client n'est pas identifié, authentifié et localisé à une distance zéro du socle de chargement WPT. La technologie hertzienne WPT par faisceau fonctionne avec un spectre similaire et repose sur des réseaux d'antennes et des techniques à focalisation du faisceau

pour transmettre l'énergie RF vers l'emplacement précis où se trouve le dispositif client. Étant donné que certaines transmissions d'énergie WPT par faisceau provenant de systèmes de chargement sans fil sont dirigées en direction d'un dispositif client, ces systèmes ne devraient pas être considérés comme des éléments rayonnants isotropes, car ils focalisent leur énergie vers des emplacements précis et n'émettent qu'en présence d'un client autorisé.

Figure 28: Représentation d'un système WPT point à point



Figure 29: Expérience d'acheminement d'énergie sur 1,6 km par un système MPT point à point. On a employé une antenne parabolique de 26 m et un émetteur Klystron de 450 kW fonctionnant dans la bande des 2,388 GHz, ainsi qu'un réseau d'antennes redresseuses de $3,4 \times 7,2$ m comme récepteur



Dans un système WPT fonctionnant par faisceau radiofréquence, on emploie des antennes pour émettre et recevoir des ondes radioélectriques. Ces antennes n'étant pas couplées de manière électromagnétique, le nombre d'émetteurs et de récepteurs est indépendant des paramètres du circuit d'émission et de réception. La théorie principale du système WPT par faisceau radiofréquence est fondée sur la formule de transmission de Friis. Les ondes radioélectriques permettant de transmettre de l'énergie sans fil n'ont pas besoin d'être modulées comme dans un système de communication hertzien.

Plusieurs entreprises des États-Unis ont mis au point des technologies WPT par faisceau destinées aux cas d'utilisation des transmissions à distance. En 2020, une entreprise a présenté une démonstration d'un système d'étiquetage numérique destiné aux revendeurs de détail qui ne nécessite ni branchement ni batterie. Cette technologie fonctionne à 2,4 et 5,8 GHz. Elle offre une portée de fonctionnement allant jusqu'à 10 mètres environ et peut également alimenter des smartphones, des dispositifs domestiques intelligents compatibles, des capteurs automobiles et de nombreux autres dispositifs. Toutefois, la FCC n'autorise actuellement pas l'exploitation des technologies WPT par faisceau existantes à ces distances plus grandes dans les lieux publics aux États-Unis. Une autre entreprise utilise les fréquences dans la bande des ondes millimétriques attribuée pour les applications scientifiques et médicales (ISM).

Le Rapport UIT-R SM.2392, mis à jour jusqu'en 2021, contient des informations supplémentaires sur les applications utilisant le WPT par faisceau radiofréquence.

5.16.2 Accès à l'énergie par transmission sans fil avec d'autres technologies

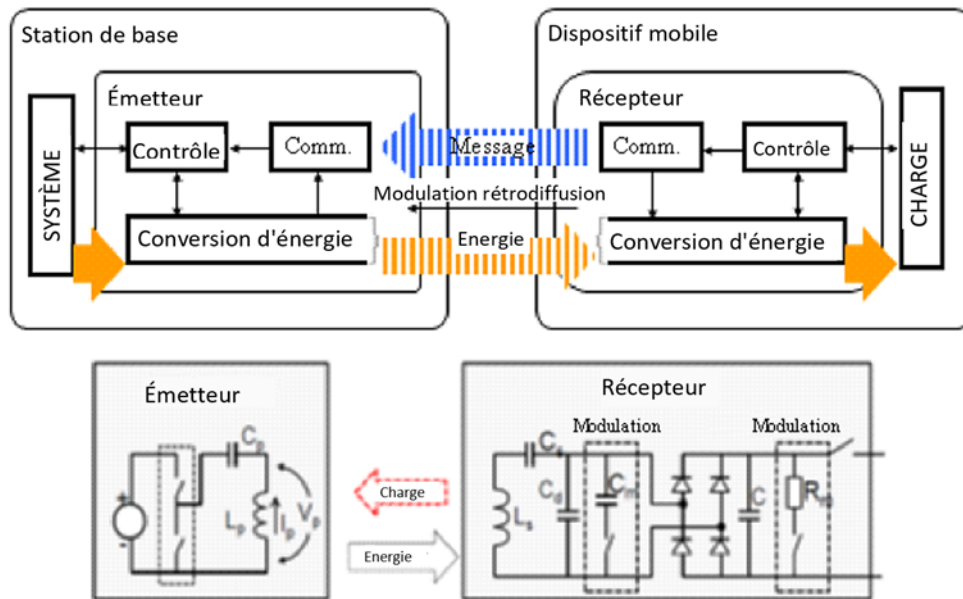
Les technologies suivantes sont également décrites dans le Rapport UIT-R SM.2303.

Technique WPT par induction magnétique

La technique WPT par induction magnétique est une technique bien connue, qui utilise le même principe que celui des transformateurs classiques, dans lesquels une bobine primaire et une bobine secondaire sont couplées par induction, l'utilisation d'un noyau magnétique perméable commun permettant d'améliorer le couplage. La transmission d'énergie par induction dans l'air, dans laquelle la bobine primaire et la bobine secondaire sont séparées physiquement, est également une technique connue depuis plus d'un siècle. Également appelée WPT à couplage étroit, cette technique est caractérisée par le fait que le rendement de la transmission d'énergie chute si la distance dans l'air est supérieure au diamètre de la bobine et si les bobines ne sont pas alignées en deçà de la distance de décalage. Le rendement de la transmission d'énergie dépend du facteur de couplage (k) entre les inducteurs et de leur qualité (Q). Cette technique permet d'obtenir un rendement plus élevé que la méthode de résonance magnétique. Elle est commercialisée pour la recharge des smartphones. Avec un réseau de bobines, cette technique offre par ailleurs une certaine souplesse concernant l'emplacement de la bobine du récepteur par rapport à l'émetteur.

Les dispositifs portables et mobiles représentent, de loin, le plus grand nombre de dispositifs WPT actuellement en service. Un sondage mené par l'institut IHS indique que 35% des consommateurs américains utilisent la recharge sans fil avec leur appareil mobile (smartphones essentiellement). D'après le site web du Wireless Power Consortium, environ 150 millions d'émetteurs WPT pour smartphone étaient en service à la mi-2017.

Figure 30: Schéma fonctionnel traditionnel d'un système WPT par induction magnétique



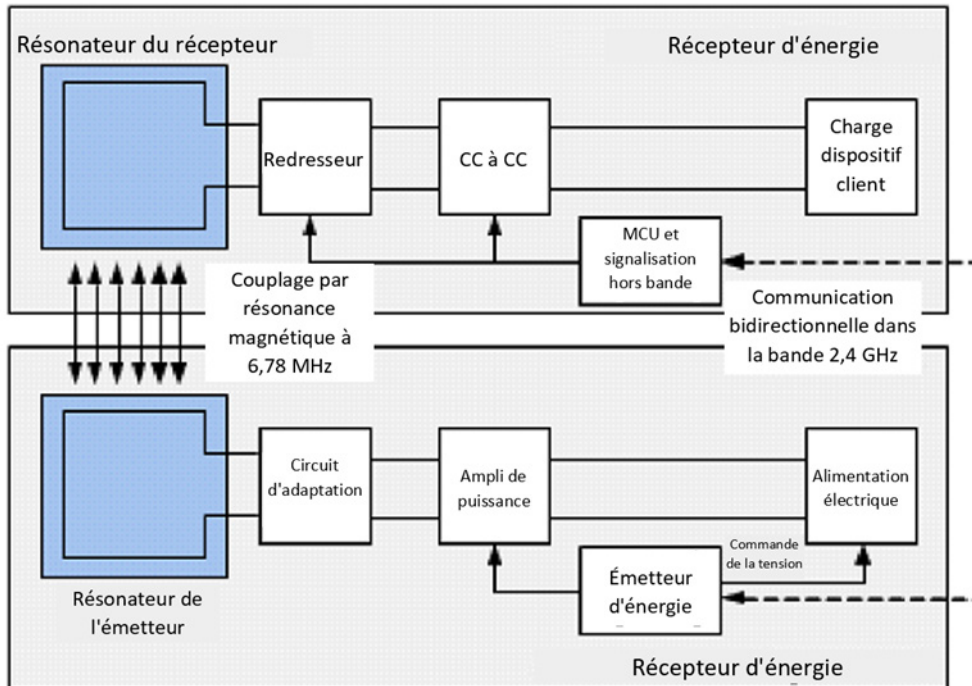
Report SM.2303-3-01

Technique WPT par résonance magnétique

La WPT par résonance magnétique est également appelée WPT à faible couplage. Le principe théorique de cette méthode de résonance magnétique a commencé à être élaboré en 2005 par le MIT et a été validé expérimentalement en 2007. La méthode utilise une bobine et un condensateur en tant que résonateur, l'énergie électrique étant transmise par résonance électromagnétique entre la bobine de l'émetteur et celle du récepteur (couplage par résonance magnétique). En faisant correspondre la fréquence de résonance des deux bobines avec un facteur Q élevé, l'énergie électrique peut être transmise sur une grande distance sur laquelle le couplage magnétique entre les deux bobines est faible. Un système de WPT par résonance magnétique permet de transmettre l'énergie électrique sur une distance pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres.

Cette technique offre également une certaine souplesse concernant l'emplacement de la bobine du récepteur par rapport à la bobine d'émission. On trouvera des détails techniques pratiques dans le Rapport UIT-R SM.2303.

Figure 31: Schéma fonctionnel traditionnel d'un système WPT par résonance magnétique



Report SM.2303-3-0

La station de base WPT ne peut charger que les appareils WPT identifiés, en bloquant les appareils non identifiés. Cet environnement peut être un bureau ou une maison, avec des appareils enregistrés, comme le montre la Figure 32.

Figure 32: Exemple de dispositifs WPT fixes



Si un utilisateur souhaite installer de nouveaux appareils WPT à la maison ou au bureau, ces derniers doivent être enregistrés auprès de la station de base WPT. La station de base WPT conservera les informations relatives aux nouveaux appareils, telles que l'identification de l'appareil et le type de charge WPT.

6 Mécanismes financiers pour les investissements dans les énergies renouvelables

Les pays les moins avancés (PMA), où vivent 13% de la population mondiale mais qui ne représentent que 2% du produit intérieur brut (PIB) mondial, sont confrontés à de graves obstacles structurels qui les empêchent de réaliser les ODD (UN-OHRLLS, 2017). Avec un taux d'accès moyen à l'électricité de 44,8% et un taux d'électrification mondiale de 87,4% en 2016, les PMA sont loin d'atteindre l'objectif de l'accès universel à l'énergie moderne d'ici 2030. L'extension de l'accès aux zones rurales a été entravée par des coûts de mise en œuvre et des coûts de connexion et d'exploitation élevés, associés à un manque d'investissement (UN-OHRLLS, 2017).

Dans les PMA, l'accès à l'électricité tend à être beaucoup plus élevé dans les zones urbaines que dans les zones rurales. En 2016, 75% de la population urbaine avait accès à l'électricité, contre seulement 31% de la population rurale, mais l'accès ne se développe que légèrement plus rapidement dans les zones rurales, à partir d'une base très faible. En raison de l'investissement initial élevé requis pour les projets de mini-réseaux, les tarifs sont généralement plus élevés que les tarifs du réseau (à moins qu'il n'y ait une subvention importante pour le mini-réseau), ce qui peut être inabordable pour les entreprises et les ménages ruraux.

La situation de l'accès à l'énergie dans les PMA varie également d'un point de vue régional. En 2016, les PMA de la région Asie-Pacifique avaient atteint un taux d'électrification moyen de 73,6%, tandis que le taux des PMA de la région Afrique était beaucoup plus faible, à savoir 30%⁴⁰.

6.1 Financement des infrastructures rurales d'énergie renouvelable

Le financement des mini-réseaux verts dans les zones rurales des pays en développement a constitué, au fil des ans, un défi majeur pour les promoteurs privés. La raison principale en est le coût élevé de la technologie des énergies vertes et le défi que cela représente pour la rentabilité de ces projets. Ce coût a considérablement diminué au cours des dix dernières années, mais les niveaux de revenus très bas dans les régions rurales des pays en développement signifient que les technologies d'énergie propre restent largement inaccessibles dans ces parties du globe.

En 2013, les besoins totaux de l'Afrique en matière d'infrastructures énergétiques étaient estimés à 63 milliards USD. Seuls 12% de ces besoins de financement ont été satisfaits cette année-là, 50% du financement provenant de sources nationales (des gouvernements respectifs) et le reste de sources extérieures⁴¹. Les pays africains ont généralement des niveaux d'imposition

⁴⁰ Nations Unies, Accès à l'énergie et principaux obstacles dans les PMA <https://www.un.org/ldcportal/energy-access-and-main-challenges-in-the-ldcs/>.

⁴¹ Sy, Amadou et Copley, Amy (2017): Closing the Financing Gap for African Energy Infrastructure: Trends, Challenges, and Opportunities. Note d'orientation, Africa Growth Initiative, The Brookings Institution, Washington, DC. https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2017/04/global_20170417_africa-energy-infrastructure.pdf#page=10&zoom=auto,-99,92.

faibles par rapport au PIB et, en conséquence, ne disposent pas des recettes nécessaires pour financer de manière adéquate le développement de leurs infrastructures énergétiques locales.

L'un des moyens recommandés pour augmenter les recettes nationales dans ces pays est de réduire les dépenses publiques, notamment en ce qui concerne le versement de subventions sur les hydrocarbures. Cette stratégie de réduction des coûts, ainsi que d'autres, peut donner aux gouvernements la latitude financière nécessaire pour offrir des incitations fiscales et financières aux promoteurs privés de solutions de mini-réseaux verts. Ces incitations sont utiles, mais posent une nouvelle difficulté aux investisseurs: l'incertitude quant à leur durabilité, étant donné qu'elles sont fondées sur des politiques qui peuvent changer au cours de la durée de vie du projet. Même en tenant compte de ces incitations, les coûts de démarrage restent très élevés.

Pylône de télécommunication - client principal

Le secteur des télécommunications offre de grandes possibilités aux promoteurs privés. Il connaît une croissance très rapide dans les régions rurales des pays en développement qui ne sont pas raccordées au réseau électrique. Cela est possible parce que les opérateurs de réseaux produisent leur propre énergie hors réseau électrique, généralement à l'aide de groupes électrogènes diesel, mais en se tournant de plus en plus vers les énergies renouvelables, pour faire fonctionner leurs stations de base mobiles. Afin d'améliorer la sécurité des stations de base, de réduire le coût de l'électricité, d'augmenter les flux de recettes et de faciliter l'utilisation accrue des téléphones mobiles dans ces communautés hors réseau électrique, les opérateurs de télécommunications essaient différentes méthodes pour fournir de l'électricité aux communautés locales au-delà de la station de base, dans le cadre du programme "Mobile for Development Utilities"⁴². (Taverner, 2010). La principale de ces méthodes est l'externalisation de l'électricité à des promoteurs privés, la station de base mobile constituant un point d'ancrage stable pour la demande d'électricité. Le fait d'ancrer leur activité sur la fourniture d'électricité à la station de base mobile peut permettre aux promoteurs privés d'alimenter en énergie de manière rentable les communautés environnantes. Bien que ce modèle de partenariat entre les opérateurs de réseaux et les promoteurs privés de solutions de mini-réseaux ne résolve pas le problème des coûts de démarrage élevés, la demande d'énergie fiable des stations de base mobiles constitue une justification économique solide qui peut attirer des investissements et un financement de la recherche à long terme.

6.2 Fonds pour le service universel

Les fonds pour le service universel sont traditionnellement utilisés pour inciter les entreprises de télécommunication à étendre les services de télécommunication aux régions isolées⁴³. Le financement de projets d'énergie communautaire dans les communautés cibles n'en fait pas partie pour l'instant. Il est nécessaire de diversifier les fonds afin d'inclure le financement des phases initiales des projets d'énergie communautaire comme moyen de faciliter l'adoption des services de télécommunication dans ces communautés hors réseau électrique.

Le financement sera un défi majeur pour l'expansion et la modernisation systématiques des systèmes électriques des PMA qui sont considérées comme nécessaires pour assurer l'accès universel d'ici à 2030.

⁴² Taverner, David (2010): Community Power: Using Mobile to Extend the Grid. Green Power for Mobile. GSMA, Londres. 80p.

⁴³ Dorward, Lynne A. (2013): Fonds de service universel et inclusion numérique pour tous. Union internationale des télécommunications, Genève. 142p.

Comme pour d'autres processus de production, la production, le transport et la distribution d'électricité entraînent des coûts fixes et variables. Le secteur de l'électricité fait face à une charge initiale importante d'investissements avant que le recouvrement des coûts ne puisse avoir lieu. En particulier, le réseau de transport et de distribution est associé à des coûts fixes considérables.

Les techniques de production d'énergie renouvelable non hydraulique, comme l'énergie éolienne et solaire, ont également des coûts fixes élevés, bien qu'ils soient nettement inférieurs à ceux des grandes centrales alimentées par des combustibles fossiles ou des sources d'énergie renouvelables.

Les risques couramment évalués dans le secteur de l'électricité des PMA sont la faible capacité des consommateurs à payer, l'absence de cadres pour guider la participation du secteur privé et le risque réglementaire perçu des services publics monopolistiques, soumis à des mandats à caractère social et à des incertitudes politiques.

Entre 2012 et 2014, la part des pays à revenu intermédiaire dans les financements mobilisés par le biais de garanties, de prêts syndiqués et d'actions était de 72,3%. La part des PMA était de 8% et celle des autres pays à faible revenu de 2%. Les pays en développement d'Afrique (29,1%) sont ceux qui en ont le plus bénéficié, suivis par ceux d'Asie (27,2%) et des Amériques (21,1%) (OCDE, 2016a).

Systemes de paiement à l'utilisation

Les fournisseurs de services de paiement à l'utilisation peuvent adopter l'une des deux méthodes suivantes pour financer le système par l'intermédiaire du consommateur:

- une redevance indéfinie pour le service, dans laquelle le consommateur ne possède jamais le système lui-même, mais paie simplement pour l'utiliser. Le principe est que le consommateur ne paie que lorsque l'énergie est nécessaire et disponible à un prix abordable, généralement sur une base quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle (ce qui s'apparente à un accord de financement classique);
- le consommateur sera finalement propriétaire du système après avoir remboursé les principaux éléments de coûts du système et il devra effectuer des paiements distincts.

Le cas M-KOPA

M-KOPA Solar est un exemple souvent cité d'entreprise ayant une bonne expérience des applications de paiement à l'utilisation réussies. Elle a en effet connecté plus de 330 000 foyers au Kenya, en Tanzanie et en Ouganda à l'énergie solaire, avec plus de 500 nouveaux foyers ajoutés chaque jour (The Economist 2016).

6.3 Financement externe

Actuellement, les principales sources de financement des projets d'énergie communautaire sont externes, sous forme de financement public du développement par des organisations multilatérales comme la Banque africaine de développement, la Banque mondiale et le CAD de l'OCDE, ainsi que sous forme de contribution d'investisseurs privés. Les organisations multilatérales collaborent de plus en plus pour trouver des moyens plus innovants de compenser

les risques et les coûts élevés associés à ces projets afin d'encourager la participation des investisseurs privés. De nombreuses plates-formes ont ainsi été créées par ces organisations pour faciliter la conception de projets d'énergie verte susceptibles d'être financés et mettre en relation les investisseurs avec ces projets. La plupart de ces plates-formes influencent également les politiques énergétiques des pays en développement, d'autant plus que la politique est l'un des principaux facteurs que les investisseurs citent comme étant important pour déterminer leur décision d'investir dans certains pays. Quelques-unes des plates-formes de financement sont présentées ci-dessous.

6.3.1 Vente de carbone

Le protocole de Kyoto, qui a été signé en 1997⁴⁴ et est entré en vigueur en 2005, impose des plafonds d'émissions de gaz à effet de serre à tous les pays signataires. L'objectif est d'accélérer la mise au point de technologies propres et d'inverser la tendance au réchauffement climatique. Le protocole a donc institué un mécanisme permettant de récompenser les efforts de création de technologies propres⁴⁵. Les pays (c'est-à-dire les projets au sein de ces pays) qui tardent à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre à des niveaux acceptables peuvent acheter des crédits carbone pour compenser les émissions excédentaires qu'ils génèrent (mesurées en tonnes métriques d'équivalent dioxyde de carbone). Ces crédits carbone sont émis par les pays (c'est-à-dire les projets au sein de ces pays) dont les émissions sont inférieures aux plafonds qui leur ont été assignés. Le commerce du carbone est très réglementé et comprend plusieurs étapes de vérification par des tiers.

6.3.2 Mécanisme pour un développement propre (MDP)

Le MDP est la plate-forme mise en place dans le cadre du protocole de Kyoto pour l'attribution de crédits carbone aux projets de réduction des émissions dans les pays en développement. Ces crédits, appelés réductions d'émissions certifiées (REC), sont vendus aux pays industrialisés, qui les achètent pour atteindre leurs objectifs de réduction des émissions. Le commerce est supervisé et géré par le Conseil du Fonds d'adaptation (AFB).

Le cycle de projet du MDP se compose de sept étapes, toutes régies par des règles et des références distinctes. Ces étapes sont les suivantes (1) la conception du projet par les participants au projet, (2) l'approbation nationale du projet par l'autorité nationale désignée, (3) la validation du projet par l'entité opérationnelle désignée, (4) l'enregistrement du projet par le Conseil exécutif du MDP, (5) le suivi du projet par les participants au projet, (6) la vérification du projet par une entité opérationnelle désignée, et (7) l'émission des REC par le Conseil exécutif du MDP.

Le nouveau cadre réglementaire du MDP est entré en vigueur le 1er juin 2017 et est résumé ci-dessous.

⁴⁴ Nations Unies (1997): Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies, New York. 192p.

⁴⁵ CCNUCC (2007): Les mécanismes du Protocole de Kyoto. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. 6p.

Source de financement	Projets admis	Restrictions	Retombées
MDP	<ul style="list-style-type: none"> - Projets d'énergie hydroélectrique, éolienne, solaire, géothermique et de biomasse - Projets d'appareils ménagers économes en énergie 	<ul style="list-style-type: none"> - Projets d'énergie nucléaire - Les projets hydroélectriques ne doivent pas dépasser une capacité installée de 20 MW (sauf sous certaines conditions) - Applicable dans les pays qui ont ratifié le protocole de Kyoto - Suppression en 2020 et remplacement par les dispositions de l'accord de Paris 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus de 8 409 projets enregistrés à ce jour. <ul style="list-style-type: none"> • 1 097 en Amérique latine • 6 877 en Asie-Pacifique • 84 en Europe et Asie centrale • 241 en Afrique • 110 au Moyen-Orient
Références principales (y compris les cadres politiques et les méthodes de modélisation de la valeur attendue du financement)			
<ul style="list-style-type: none"> - https://cdm.unfccc.int/Projects/diagram.html - http://climateneutralnow.org/Pages/Home.aspx 			

6.3.3 Bourse africaine du crédit carbone (ACCE)

L'ACCE est une bourse du carbone mise en place par le gouvernement zambien pour servir de plate-forme aux particuliers et aux entreprises de toute l'Afrique afin de lever des fonds pour des projets écologiques. L'ACCE n'est qu'une des nombreuses bourses du carbone qui existent déjà dans le monde.

Source de financement	Projets admis	Restrictions	Retombées
Bourse africaine du crédit carbone	Tous les projets verts en Afrique	Ne sera pas disponible pour les projets qui ne sont pas basés en Afrique.	Pas encore opérationnel
Références principales			
<ul style="list-style-type: none"> - http://www.africacce.com/ - https://www.daily-mail.co.zm/carbon-credit-exchange-set/ 			

6.3.4 Bourse du carbone (CTX)

Le CTX est une bourse du carbone basée à Londres qui opère à l'échelle mondiale. Elle appartient à Global Environmental Markets (GEM). Le CTX est connecté à de nombreux registres de matières premières environnementales et est relié électroniquement à des intermédiaires financiers pour assurer l'efficacité des échanges et la transparence.

Source de financement	Projets admis	Restrictions	Retombées
Bourse du carbone	Projets verts mondiaux	Aucune mentionnée	La première et la plus grande bourse électronique d'échange de droits d'émission de carbone au monde
Références principales			
<ul style="list-style-type: none"> - http://ctxglobal.com/ - http://www.gemglobal.com/ 			

6.3.5 Fonds africain pour les énergies renouvelables (AREF)

AREF est un fonds d'investissement panafricain qui soutient les petits et moyens producteurs indépendants d'électricité en Afrique subsaharienne. Le fonds, qui a été lancé en 2014, dispose d'un capital engagé de 200 millions USD. Il a son siège à Nairobi, au Kenya, et est principalement parrainé par la Banque africaine de développement (BAD). Parmi les autres organismes de parrainage notables, on mentionnera Sustainable Energy for Africa (SEFA).

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
AREF <i>Les autres partenaires sont les suivants: SEFA, BAD, ABREC, BIDC, BOAD, FMO, Calvert Foundation, CNUCED, Berkeley Energy Africa Limited, GEF, DANIDA, USAID.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Projets énergétiques indépendants de petite/moyenne envergure dans les domaines de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, de la biomasse, de l'hydroélectricité ainsi que de certaines technologies géothermiques et de gaz non exploité 	<ul style="list-style-type: none"> - Financement par fonds propres - Soutien en ingénierie - Soutien à la gestion 	<ul style="list-style-type: none"> - 10 à 30 millions USD de fonds propres sont engagés par projet.
		Références principales	Restrictions
		<ul style="list-style-type: none"> - http://www.berkeley-energy.com/index.jsp#home 	<ul style="list-style-type: none"> - Les projets doivent avoir une puissance comprise entre 5 et 50 MW - Pas de soutien pour les projets en Afrique du Sud

6.3.6 Power Africa, Beyond the Grid

Power Africa est une initiative du gouvernement des États-Unis axée sur l'investissement et la croissance des solutions en matière d'énergie hors réseau et à petite échelle dans toute l'Afrique subsaharienne. L'organisation s'est associée à plus de 40 investisseurs et professionnels pour mobiliser plus d'un milliard de dollars d'engagements en faveur de solutions innovantes. Power Africa collabore également avec les gouvernements africains pour s'assurer que les environnements réglementaires sont favorables aux options privées hors réseau. À ce jour, Power Africa a dressé une liste de 13 installations de préparation de projets en phase de démarrage qui sont actives dans le secteur de l'énergie en Afrique subsaharienne.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance		Retombées
<p>Power Africa - un partenariat dirigé par le gouvernement des États-Unis</p> <p>Les autres partenaires sont les suivants: BAD, ATI, Canada, DBSA, UK Aid, France, UE, IDC, IRENA, Israël, Japon, NEPAD, Norvège, SE4All, Suède, Banque mondiale.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Projets d'énergie hydroélectrique, éolienne, solaire, géothermique et de biomasse - Projets d'appareils ménagers économes en énergie 	<ul style="list-style-type: none"> - Subventions - Finance-ment par emprunt - Fonds propres - Financement mezzanine - Assurance - Garanties - Capital-risque en phase de démarrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Prépa-ration de projet - Soutien à la création de projets - Assistance technique - Assistance juridique - Recherche technique/scientifique - Études de marché 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus de 54 milliards de dollars ont déjà été engagés. - Soutien à 130 partenaires du secteur privé dans plus de 14 pays d'Afrique subsaharienne. - 40 des part-naires du secteur privé se concentrent sur la création de services et d'infrastructures de mini-réseaux et d'électricité distribuée dans les zones rurales et périurbaines.
Références principales				
<ul style="list-style-type: none"> - https://www.usaid.gov/powerafrica/beyondthegrid - https://www.usaid.gov/powerafrica/toolbox 				

6.3.7 Fonds pour l'énergie durable en Afrique (SEFA)

Le SEFA est une structure multi-donateurs de 95 millions USD hébergée par la BAD et financée par les gouvernements du Danemark, de l'Italie, du Royaume-Uni et des États-Unis. Il soutient le programme d'action pour l'énergie durable en Afrique. Le SEFA fonctionne en accordant des subventions pour faciliter la préparation de projets susceptibles d'être financés, en prenant des participations dans ces projets par le biais de l'AREF et en soutenant les institutions du secteur public pour l'amélioration d'un environnement favorable aux investissements du secteur privé. Il est aligné sur l'initiative Énergie durable pour tous (SE4All) des Nations Unies. Ensemble, ils gèrent le Green Mini-Grid Help Desk, qui fournit un service d'information complet aux créateurs de mini-réseaux verts en Afrique.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
SEFA <i>Partenaires: BAD et SE4All</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Projets de mini-réseaux verts en Afrique - Le projet doit viser un investissement en capital de 30 à 200 millions d'USD 	<ul style="list-style-type: none"> - Subvention de partage des coûts pour faciliter les activités de préinvestissement (de la préfaisabilité à la clôture financière) - Assistance technique au stade du préinvestissement - Prise de participation via l'AREF - Aider les gouvernements à créer des environnements favorables aux investissements privés (régimes juridiques, réglementaires et politiques) 	<ul style="list-style-type: none"> - Un des principaux contributeurs à l'initiative AREF
		Références principales	
		<ul style="list-style-type: none"> - https://www.afdb.org/en/topics-and-sectors/initiatives-partnerships/sustainable-energy-fund-for-africa/ - https://www.se4all-africa.org/se4all-in-africa/financing-opportunities/sustainable-energy-fund-for-africa/ - http://greenminigrd.se4all-africa.org/ 	

6.3.8 Fonds OPEP pour le développement international (OFID)

L'OFID est l'institution de financement du développement créée par les États membres de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) en 1976 en tant que mécanisme d'aide aux pays en développement. L'Initiative Énergie pour les pauvres de l'OFID, qui est financée par une dotation renouvelable d'un milliard d'USD annoncée par le Conseil ministériel de l'OPEP, cherche à trouver des solutions viables pour rendre l'énergie propre universellement accessible aux populations pauvres des zones rurales dans les pays en développement. En 2016, l'initiative a pris de nouveaux engagements pour un montant total de 412 millions d'USD. Plus de la moitié de ce montant a été approuvé par le biais du secteur privé pour la construction de centrales électriques comprenant des installations photovoltaïques et hydroélectriques en Afrique.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
OFID <i>Partenaires: SE4All, le secteur de l'énergie</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Tous les projets énergétiques dans les pays en développement 	<ul style="list-style-type: none"> - Fourniture d'infrastructure et d'équipements - Recherche et renforcement des capacités - Subventions pour les projets d'énergie renouvelable à petite échelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Des projets répartis dans 90 pays en développement ont été soutenus jusqu'à présent
		Références principales	Restrictions

(suite)

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
		- http://www.ofid.org/FOCUS-AREAS/Energy	- Ne soutient pas de projets en au Nigeria et en Côte d'Ivoire.

6.3.9 Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA)

Le mécanisme de financement de projets de l'IRENA est une structure de financement pour les projets d'énergie renouvelable dans les pays en développement. Il offre des prêts à des conditions préférentielles répartis sur sept cycles de financement pour soutenir les projets d'énergie renouvelable recommandés par l'IRENA à l'ADFD (Abu Dhabi Fund for Development) en vue d'un financement dans les pays en développement. Les demandes peuvent être soumises par des organismes publics, parapublics, privés ou non gouvernementaux, mais elles doivent être soutenues par le gouvernement du pays où le projet doit être mis en œuvre et être considérées comme prioritaires par ce dernier.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
IRENA <i>Partenaires: SE4All, le secteur de l'énergie</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Le projet doit être mis en œuvre dans un pays membre de l'IRENA - Le projet doit mettre en œuvre des énergies renouvelables - Le projet doit avoir dépassé les stades de la faisabilité et de la pré-mise en œuvre - Le projet doit faire l'objet d'une étude de faisabilité et d'une analyse économique complètes au stade de la proposition de projet 	<ul style="list-style-type: none"> - Financement par emprunt de 5 à 15 millions d'USD par projet 	<ul style="list-style-type: none"> - Des projets répartis dans 90 pays en développement ont été soutenus jusqu'à présent
		Références principales	Restrictions
		<ul style="list-style-type: none"> - http://www.ofid.org/FOCUS-AREAS/Energy 	<ul style="list-style-type: none"> - Toutes les demandes doivent être accompagnées d'une lettre de garantie du gouvernement, émanant du ministère ou de l'autorité responsable de la coopération internationale et des emprunts du pays.

6.3.10 Partenariat pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (REEEP)

Le REEEP est un partenariat international multilatéral basé à Vienne qui vise à accélérer le déploiement des énergies renouvelables et des systèmes à haute efficacité énergétique dans les pays en développement. Le REEEP investit dans des solutions d'électricité décentralisées fiables, abordables et sûres pour les ménages de petite taille non connectés au réseau (éclairage et sources d'énergie solaires autonomes) et les applications de micro-réseau et de mini-réseau dans les communautés dont la connectivité au réseau n'est pas fiable ou inexistante. Le réseau de conseil en financement privé (PFAN), en partenariat avec le REEEP, offre aux entreprises participantes un mentorat commercial et stratégique, ainsi qu'une mise en relation avec des investisseurs pour faciliter la transition des projets des bailleurs de fonds vers le financement privé. Le REEEP suit ces projets de près, en utilisant un cadre de suivi, d'évaluation et d'apprentissage qui les aide à saisir et à traiter les expériences de projet au fur et à mesure qu'elles se produisent et à y réagir. Ce cadre permet aussi de générer des informations fondées sur des données probantes pour continuer à concevoir et à reproduire des modèles prometteurs. Cette connaissance est une étape fondamentale dans la réduction du risque d'entrée sur le marché pour les entreprises, les investisseurs et les parties prenantes du secteur public. Le REEEP suit également une approche à plusieurs niveaux pour le partage des connaissances, en commençant par une collaboration directe avec des partenaires proches qui peuvent utiliser les données probantes à bon escient en élaborant des politiques et en formant des filières d'investissement. L'organisation accueille une alliance émergente de courtiers en connaissances sur le climat, connue sous le nom de Climate Knowledge Brokers Group, dont elle est l'un des principaux membres.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
<p>REEEP</p> <p><i>Les autres partenaires sont notamment: ONUDI, IRENA, ASDI, Autriche, Blue Moon Fund, CDKN, Allemagne, GIZ, Norvège, OFID, Suisse, Royaume-Uni, CEC, EURIMA, UE, Australie, Canada, Irlande, Italie, Nouvelle-Zélande, Espagne, Pays-Bas, États-Unis, NAIMA, Fondation Rockefeller</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Techniquement viable - Commercialement viable - Réduction des émissions de gaz à effet de serre - Avantages pour le développement - Équipe de gestion compétente - Potentiel de croissance 	<ul style="list-style-type: none"> - Soutien à la conception du projet - Structuration du projet (y compris structuration financière) - Financement pour les études de faisabilité et les études techniques - Recherche de subventions - Recherche d'emprunts - Recherche de fonds propres - Technologie collaborative de partage des connaissances pour l'élaboration des politiques et la formation des filières d'investissement - Systèmes de gestion des connaissances efficaces et performants - Financement mezzanine - Assurance - Garanties - Capital-risque en phase de démarrage 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus de 1,2 milliard d'USD pour le financement de 87 projets - Projet Power Africa: fonds Beyond the Grid pour la Zambie - Un investissement de 25 millions d'USD pour apporter des solutions énergétiques propres à un million de Zambiens.

(suite)

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
		Références principales	Restrictions
		<ul style="list-style-type: none"> - https://www.reeep.org/ - https://www.bgfz.org/ - http://pfan.net/ - http://www.reeple.info/ - https://www.climateknowledgedebrokers.net/ - https://www.climategetter.net/ 	<ul style="list-style-type: none"> - Le REEEP ne peut pas accepter de propositions non sollicitées en dehors des appels à projets.

6.3.11 Fonds Impact du ministère du développement international (DFID), Royaume-Uni

Le programme Impact du DFID vise à stimuler les marchés de l'investissement à fort impact en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud afin de favoriser l'investissement dans des entreprises qui visent les populations pauvres et les personnes à faible revenu en améliorant l'accès à des biens et services abordables et en créant des perspectives génératrices de revenus à la base de la pyramide. Le programme comporte deux composantes principales: deux vecteurs d'investissement gérés par le CDC et une série d'activités de développement du marché. Le programme a démarré en 2012 et le DFID prévoit de fournir jusqu'à 197 millions de livres sterling sur 16 ans à cette fin. L'investissement à fort impact couvre un large éventail de domaines sociaux et environnementaux avec différents investisseurs et intermédiaires. À court terme, le fonds favorisera l'augmentation des capitaux en donnant confiance aux co-investisseurs par le biais d'un contrôle préalable rigoureux des rendements financiers et de l'impact sur le développement des entités détenues et en offrant une subordination potentielle limitée aux investisseurs privés si nécessaire pour stimuler leur participation. À plus long terme, le fonds vise à mobiliser d'autres capitaux en prouvant la viabilité financière des modèles commerciaux en faveur des populations pauvres et en démontrant les retombées positives de ce type d'investissement. Dans le cadre du programme Impact du DFID, qui vise à stimuler le marché de l'investissement à fort impact en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud, le DFID a lancé un mécanisme de renforcement de l'impact de 40 millions de livres sterling. Cette structure, gérée par le CDC, vise à susciter des perspectives économiques et de l'emploi par la création d'emplois directs et indirects et par l'amélioration de l'accès aux biens et services de base, en particulier dans les zones isolées ou les États fragiles. Les stratégies d'investissement à fort impact se concentrent sur deux domaines spécifiques. (1) Aider les entreprises à réaliser des interventions à fort impact sur le développement liées à leur activité principale qu'elles n'auraient pas réalisées autrement, comme l'entrée dans une nouvelle zone au contexte géographique très complexe ou la conception d'une offre de produits à un prix nettement inférieur pour permettre aux consommateurs les plus pauvres, en particulier les femmes et les filles, d'accéder aux biens et services. (2) Aider les sociétés dans les zones aux conditions géographiques complexes à créer des entreprises vertes ou sur des friches industrielles à côté de leurs investissements principaux pour fournir des biens et services essentiels à leurs activités, comme le logement, les soins de santé et le transport.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
Fonds Impact du DFID <i>Autres partenaires: Groupe CDC, etc.</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Projets axés sur la réduction de la pauvreté dans les communautés à faible revenu - Le projet doit avoir des retombées sociales démontrables et être financièrement viable 	<ul style="list-style-type: none"> - Diligence raisonnable rigoureuse - Financement en fonds propres de 5 à 15 millions d'USD - Diversification de projets 	<ul style="list-style-type: none"> - Le fonds soutient sept entreprises du secteur de l'énergie en Afrique. - Il vise à financer plus de 100 entreprises en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud.
		Références principales	Restrictions
		<ul style="list-style-type: none"> - http://www.theimpactprogramme.org.uk/investments-dfid-impact-fund/ 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne finance pas des projets qui peuvent être soutenus par le micro-financement. - Le fonds a encore 11 ans pour mener à bien sa mission.

6.3.12 Énergie durable pour le développement économique (SEED)

SEED est une initiative du Rocky Mountain Institute, aux États-Unis, qui collabore avec les gouvernements, les services collectifs, les partenaires de développement et les promoteurs privés du secteur de l'énergie en Afrique subsaharienne afin de mettre en place des programmes énergétiques abordables, efficaces et globaux qui intègrent les technologies renouvelables décentralisées émergentes et fournissent rapidement un accès à l'énergie aux personnes privées d'électricité.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
Energie durable pour le développement économique (SEED) <i>Autres partenaires: Virgin Unite, Fondation Rockefeller</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Projets d'énergie hydroélectrique, éolienne, solaire, géothermique et de biomasse - Projets d'appareils ménagers économes en énergie 	<ul style="list-style-type: none"> - Conseils techniques, politiques et financiers - Participation à la mise en œuvre des projets 	<ul style="list-style-type: none"> - Partenariat avec le Rwanda pour renforcer les capacités et la stratégie en vue d'une gestion plus efficace de l'énergie, ce qui permettra d'économiser 20 millions d'USD à court terme et 1 milliard d'USD à long terme sur l'énergie et d'augmenter l'accès à l'électricité en réseau et hors réseau dans les zones rurales de 22% à 70%. - Actuellement actif en Sierra Leone et en Ouganda.
		Références principales	
		<ul style="list-style-type: none"> - https://www.rmi.org/our-work/global-energy-transitions/seed/ 	

6.3.13 Plate-forme de performance des énergies renouvelables (REPP)

La REPP soutient des projets d'énergie renouvelable de petite et moyenne taille, inférieurs à 25 MW, dans toute l'Afrique subsaharienne. Cette initiative a été mise au point par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et la Banque européenne d'investissement (BEI) afin d'atteindre les objectifs du programme SE4All des Nations Unies en Afrique subsaharienne en soutenant des projets d'énergie renouvelable. Un large éventail de technologies d'énergie renouvelable peut bénéficier d'un soutien, notamment l'énergie éolienne, l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie géothermique, la valorisation énergétique des déchets (gaz de décharge et valorisation thermique des déchets), l'hydroélectricité au fil de l'eau, la biomasse et le biogaz. La REPP bénéficie d'un financement initial de 48 millions de livres sterling de la part du ministère britannique des activités commerciales, de l'énergie et de la stratégie industrielle, par l'intermédiaire du Fonds international pour le climat. La REPP soutient à la fois les projets connectés au réseau et les projets hors réseau. Elle prend également en considération les projets conçus par des promoteurs privés, si les critères d'admissibilité de la REPP sont remplis.

Source de financement	Projets admis	Type d'assistance	Retombées
<p>REPP</p> <p><i>Partenaires: Département de l'énergie de et du Changement climatique, PNUE et Banque européenne d'investissement</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Projets dans le secteur de l'énergie renouvelable. - Les projets doivent avoir une capacité de 1 à 25 MW. - Les projets doivent se situer dans au moins un des pays suivants: Bénin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Éthiopie, Ghana, Kenya, Liberia, Madagascar, Malawi, Mali, Mozambique, Nigeria, Rwanda, Sénégal, Sierra Leone, Tanzanie, Togo et Zimbabwe. - Les promoteurs de projets doivent suivre la politique et les procédures environnementales et sociales de la REP. 	<ul style="list-style-type: none"> - Assistance technique. - Facilite l'accès aux instruments d'atténuation des risques et aux prêts à long terme fournis par les partenaires de la REPP pour le financement en fonds propres. - Fournit un soutien financier axé sur les résultats à des projets financièrement sains. Le soutien financier axé sur les résultats peut prendre la forme d'un complément au tarif de rachat ou d'autres instruments appropriés. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le fonds soutient sept entreprises du secteur de l'énergie en Afrique. - L'objectif est de financer plus de 100 entreprises en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud.
		Références principales	Restrictions
		<ul style="list-style-type: none"> - https://www.repp-africa.org/africa.org/ 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas plus de cinq projets peuvent être parrainés parmi les pays admissibles. - Les projets bénéficiant d'un financement de la REPP ne sont pas censés recevoir d'autres revenus provenant de crédits carbone dans le cadre du MDP ou de tout autre mécanisme officiel de marché du carbone.

6.3.14 Synthèse des catégories de financement

Le tableau ci-dessous résume les différentes options de financement évoquées ci-dessus.

	Plates-formes de financement	Catégorie
1	Fonds de service universel*	Gouvernement, organisation internationale
2	Échange de crédits carbone	
a)	MDP	Organisation internationale
b)	Bourse africaine du crédit carbone (ACCE)	Gouvernement
c)	Bourse du carbone (CTX)	Privé
3	Fonds africain pour les énergies renouvelables (AREF)	Privé, organisation internationale
4	Power Africa, Beyond the Grid	Gouvernement, organisation internationale
5	SEFA	Organisation internationale
6	OFID	Organisation internationale
7	IRENA	Organisation internationale
8	REEEP	Gouvernement, organisation internationale
9	Fonds Impact DFID	Gouvernement
10	SEED	Privé
11	REPP	Gouvernement, organisation internationale

* Actuellement, ne finance que les opérateurs de télécommunications, sans prévoir de financement pour les projets communautaires de production d'électricité.

6.3.15 Financement des infrastructures large bande pour réduire au minimum les risques pour les investisseurs privés

Dans les zones rurales à faible densité de population, les fournisseurs sont dissuadés d'investir dans des projets de télécommunication, car la construction d'une infrastructure large bande est coûteuse et longue à amortir et les bénéfices tirés d'une petite base de clientèle sont perçus comme peu attrayants. Les agences de financement peuvent mettre en place des mécanismes de financement qui incitent le secteur privé à investir dans le développement de réseaux numériques large bande et à accès ouvert dans les communautés rurales mal desservies.

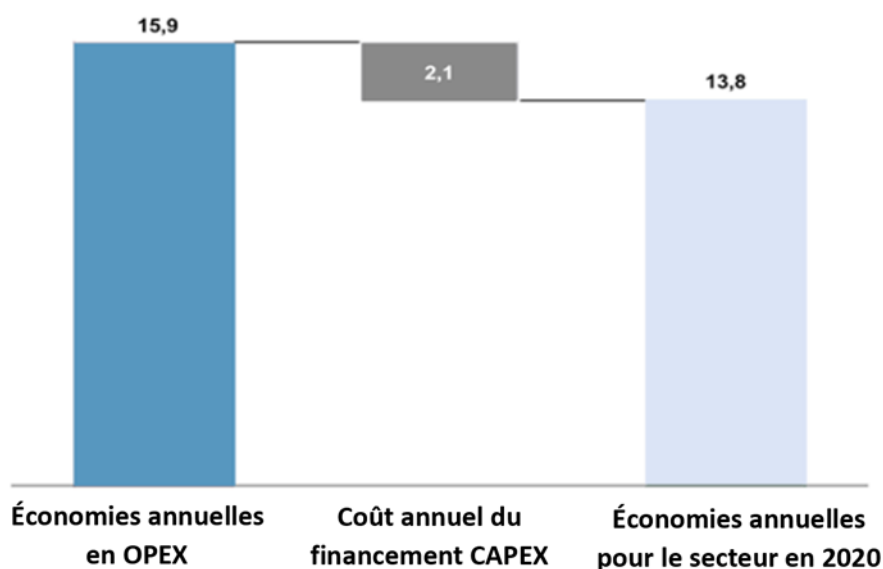
Les projets d'infrastructure large bande en libre accès de ce type pourraient intégrer le développement de micro-réseaux d'électricité renouvelable hors réseau, ou s'associer à des producteurs d'énergie locaux pour alimenter les sites de télécommunication ainsi que les communautés rurales isolées situées à proximité.

Un exemple représentatif est le fonds du mécanisme pour l'interconnexion en Europe (MIE), un partenariat entre la BEI et le mécanisme pour l'interconnexion en Europe de la Commission européenne qui accorde des incitations aux investisseurs afin d'encourager le financement de réseaux large bande pour étendre les services Internet numériques à haut débit dans les zones rurales et isolées peu peuplées et mal desservies en Europe.

6.3.16 Les télécommunications et l'énergie au service du développement durable

De nombreuses stations de base situées dans des zones où le réseau électrique est peu disponible et dans des installations hors réseau électrique sont encore alimentées par des groupes électrogènes diesel. Cependant, les technologies renouvelables innovantes et les méthodes hybrides de fourniture d'énergie sont de plus en plus déployées. Selon les recherches menées par la GSMA (2014), ces systèmes peuvent permettre aux opérateurs de télécommunications de réaliser d'importantes économies annuelles (voir la Figure 33).

Figure 33: Économies annuelles pour le secteur grâce à la transition vers des solutions énergétiques vertes (milliards USD)



Source: GSMA, 2014

7 Mécanismes politiques et recommandations

7.1 Introduction

Les politiques en matière d'énergies renouvelables doivent de plus en plus être intégrées dans la planification globale du secteur énergétique national et dans le cadre stratégique qui englobe l'ensemble du cycle de conception et de mise en œuvre des énergies renouvelables. Les décideurs devraient définir des stratégies et des objectifs à long terme et adapter les politiques et les réglementations qui favorisent également un environnement énergétique décarboné. Les politiques doivent être alignées et coordonnées entre les secteurs de l'énergie et de l'environnement.

L'IRENA recommande que cela comprenne "l'identification des bonnes pratiques et des tendances dans la conception des politiques et l'évaluation des mécanismes de soutien et de leur adaptation à l'évolution des conditions du marché".

L'expansion des services large bande dans les zones rurales suppose de développer et d'étendre sensiblement l'accès à l'électricité dans les zones rurales. Les gouvernements devront créer un environnement favorable qui requiert la participation du secteur privé. Pour ce faire, un environnement politique et réglementaire solide sera nécessaire pour réduire les risques sur le plan des investissements, améliorer la viabilité et accroître l'attractivité globale du secteur de l'énergie hors réseau en particulier.

Politiques énergétiques traditionnelles

À l'échelle mondiale, l'économie numérique des pays en développement croît au rythme impressionnant de 15 à 25% par an⁴⁶. Néanmoins, le milliard de personnes qui vivent encore hors réseau électrique ne peuvent pas profiter des avantages de cette expansion numérique car elles n'ont pas d'électricité pour accéder à Internet. En conséquence, les efforts visant à étendre les services numériques à ces communautés hors réseau doivent aller de pair avec le développement de l'infrastructure électrique. Étant donné que les grands opérateurs historiques du secteur électrique sont souvent réticents à étendre leurs services aux zones reculées à faible revenu et peu peuplées, des mécanismes de soutien politique sont nécessaires pour encourager l'intervention de petits opérateurs du secteur de l'électricité innovants. Fait encourageant, à partir de 2016, les pays en développement avaient adopté des politiques de soutien aux investissements dans des projets d'énergie renouvelable visant à étendre l'accès à l'électricité aux communautés hors réseau⁴⁷. Certaines de ces politiques sont décrites ci-dessous.

⁴⁶ Bock, W., Vasishth, N., Wilms, M. et Mohan, M. (2015): The Infrastructure Needs of the Digital Economy. The Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2015/infrastructure-needs-of-the-digital-economy.aspx>.

⁴⁷ Hsu, H., Rosengarten, C., Weinfurter, A., Xie, Y., Musolino, E et Murdock, H.E. (2017): Renewable Energy and Energy Efficiency in Developing Countries: Contributions to Reducing Global Emissions. The 1 Gigaton Coalition. 90p.

Normes en matière d'offre d'énergie renouvelable (RPS): il s'agit d'un règlement qui oblige les compagnies d'électricité à produire une partie déterminée de leur électricité à partir de sources d'énergie renouvelables. Les producteurs d'énergie obtiennent des certificats pour chaque unité d'électricité qu'ils produisent à partir de sources renouvelables. Ce certificat est vendu avec l'électricité aux sociétés de distribution, qui le transmettent ensuite à l'organisme de réglementation pour démontrer leur conformité à la réglementation.

Incitations financières: Plusieurs pays fournissent des fonds publics sous forme de subventions, de prêts ou d'incitations fiscales pour encourager les investissements dans les énergies renouvelables. L'Inde, par exemple, offre une subvention en capital de 30% pour les systèmes solaires photovoltaïques installés sur les toits.

Tarifs de rachat garantis (FIT) - pour les systèmes connectés au réseau: il s'agit de la politique de soutien réglementaire la plus courante pour les entreprises du secteur des énergies renouvelables. Il est conçu pour offrir des contrats à long terme aux producteurs d'énergie renouvelable sur la base du coût de production d'électricité de chaque technologie. Les compagnies d'électricité bénéficient de prix par kWh plus élevés qui reflètent le coût de production de l'électricité. Ces dernières années, plusieurs pays ont revu leur politique afin de soutenir des projets à plus petite échelle.

Nouveaux modèles commerciaux et rôle des politiques

Considérations relatives aux politiques énergétiques propices

Le plus grand obstacle pour les solutions d'énergie renouvelable hors réseau est le manque de financement. Les raisons de ce manque sont le temps considérable nécessaire pour parvenir à l'équilibre financier et les faibles rendements de ces projets. Il convient donc de mettre en œuvre des politiques pour résoudre ce problème. Des efforts sont déjà déployés pour accroître le financement public au moyen de subventions, de prêts et d'incitations fiscales pour les investisseurs. Il faut faire plus encore pour encourager l'investissement privé.

Politiques générales: les politiques devraient viser à créer un environnement propice aux investissements dans l'efficacité énergétique et l'approvisionnement, le stockage et les applications numériques dans le secteur des énergies renouvelables.

- Une coopération étroite entre les secteurs public et privé est nécessaire pour la transformation de l'énergie.
- Il convient de créer des conditions équitables pour les énergies renouvelables (par exemple, réformes des subventions aux combustibles fossiles, politiques de tarification du carbone).
- Des normes qui garantissent la fiabilité des technologies et des réseaux (par exemple, normes techniques et de qualité, certificats, etc.) doivent être définies.
- Il convient de créer des mécanismes de garantie soutenus par des organismes multilatéraux pour le compte de gouvernements dont la capacité de financement et d'endettement est limitée, afin de réduire les risques pour le secteur privé et d'attirer des investissements plus substantiels.

Politiques financières: des instruments politiques sont nécessaires pour que les banques accordent des prêts à long terme fiables à ces projets. Grâce à un cadre politique et réglementaire approprié, les décideurs peuvent atténuer les risques économiques des projets en définissant des structures tarifaires appropriées qui reflètent la structure des coûts du projet, y compris un processus bien conçu pour l'obtention et la conservation des permis, des licences

et des concessions. Les groupes à faible revenu peuvent également être exemptés des droits d'importation sur les appareils électriques et de la TVA sur les services liés à l'énergie.

- a) Politiques d'efficacité énergétique: les mesures d'efficacité énergétique sont très efficaces pour réduire la consommation d'énergie par habitant et élargir l'accès à l'électricité. Cela permet de réduire les coûts de l'électricité et le gaspillage d'énergie. Des pratiques efficaces en matière d'efficacité énergétique peuvent améliorer considérablement les caractéristiques de l'économie des projets d'énergie renouvelable.
- b) Tarifs de l'énergie: les tarifs devraient également refléter les coûts et les caractéristiques uniques de la production à partir de sources renouvelables et les réglementations devraient permettre des variations de tarifs en fonction de l'heure d'utilisation.

7.2 Politiques numériques

- a) L'approche traditionnelle du déploiement des réseaux numériques repose sur le fait que chaque opérateur construit sa propre infrastructure. Dans les régions essentiellement rurales et isolées, cette méthode n'est pas efficace et les opérateurs de téléphonie mobile ont cherché activement et avec succès des moyens de partager les investissements dans l'infrastructure afin d'étendre la couverture du réseau tout en préservant une saine concurrence dans la fourniture de services. Les modèles de partage des infrastructures peuvent améliorer les caractéristiques économiques de l'extension des réseaux dans les zones rurales et isolées. Les opérateurs peuvent réduire leurs coûts de capital et d'investissement de 50 à 70%⁴⁸.
- b) Les opérateurs de téléphonie mobile cèdent également leurs pylônes de communication à des opérateurs de pylônes dans le cadre d'une stratégie de réduction des coûts.

7.3 Considérations relatives aux politiques numériques

- a) Déployer des réseaux dorsaux publics pour pénétrer les zones rurales et atteindre les sites isolés.
- b) L'agrégation des zones rurales peut être réalisée en déployant un accès hertzien fixe multipoint ou des technologies mobiles 4G et 5G de nouvelle génération.
- c) Réduire les coûts de transport en subventionnant les fournisseurs de réseaux large bande en zone rurale.
- d) Mettre en place des méthodes innovantes d'attribution du spectre radioélectrique afin de réduire le coût de mise en œuvre des réseaux hertziens, en simplifiant et en réduisant les coûts élevés d'acquisition des licences pour l'utilisation du spectre en zone rurale permettant le partage ou l'assignation du spectre sur une base coopérative, tout en respectant les droits et obligations du Règlement des radiocommunications de l'UIT.
- e) Créer un environnement réglementaire approprié pour encourager les innovations numériques comme des systèmes énergétiques plus intelligents, l'utilisation de l'IA et l'Internet des objets.
- f) De nouveaux modèles pour les solutions autonomes (par exemple paiement à l'utilisation, service postpayé et charge des batteries) et les mini-réseaux (par exemple, une approche de partenariat public-privé).

⁴⁸ GSMA (2016): Unlocking Rural Coverage: Enablers for commercially sustainable mobile network expansion. Connected Society. https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wpcontent/uploads/2016/07/Unlocking-Rural-Coverage-enablers-for-commercially-sustainable-mobile-network-expansion_English.pdf.

Dans le Rapport "[Renewable Energy Policies in a Time of Transition](#)" (Politiques en matière d'énergies renouvelables à l'heure de la transition) (IRENA, AIE REN21)⁴⁹, on recense les principaux obstacles et met en évidence les options politiques pour stimuler le déploiement des énergies renouvelables, en se concentrant sur le soutien direct, l'intégration et l'environnement favorable.

Le Tableau 7 présente une classification pour le suivi des principaux mécanismes de politique sectorielle liés aux objectifs de développement.

⁴⁹ IRENA, AIE REN21 <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition>.

Tableau 7: Classification des politiques

Politiques visant à réaliser la transition énergétique		Déploiement (installation et production) des énergies renouvelables dans le contexte général	Déploiement (installation et production) des énergies renouvelables dans le contexte de l'accès (y compris les services énergétiques)	Optimisation du développement socio-économique grâce au déploiement des énergies renouvelables
Politiques directes	Pression	<ul style="list-style-type: none"> - Cibles contraignantes pour l'utilisation des énergies renouvelables - Contingents et obligations en matière d'électricité - Codes de la construction - Mandats (par exemple, chauffe-eau solaires, énergies renouvelables dans le chauffage urbain) - Mandats sur les mélanges 	<ul style="list-style-type: none"> - Cibles, stratégies et programmes d'électrification rurale - Stratégies et programmes de cuisson propre - Programmes de digesteurs de biogaz 	Politiques de déploiement conçues pour tirer le plus grand parti possible et assurer une transition durable (par exemple, communautés, genre), y compris des exigences, un traitement préférentiel et des incitations financières pour les installations et les projets qui contribuent à la réalisation d'objectifs socio-économiques.
	Traction	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques de réglementation et de tarification (par exemple, tarifs et primes de rachat, ventes aux enchères) - Certificats négociables - Instruments pour l'autoconsommation (par exemple, facturation nette et comptage net) - Mesures de soutien aux programmes volontaires 	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques de réglementation et de tarification (par exemple, dispositions légales, réglementation des prix/tarifs) 	
	Budgétaires et financières	<ul style="list-style-type: none"> - Incitations fiscales (par exemple, crédits d'impôt à l'investissement et à la production, amortissement accéléré, réductions d'impôts) - Subventions - Aides 	<ul style="list-style-type: none"> - Incitations fiscales (par exemple, réduction) - Subventions - Aides - Financement à des conditions préférentielles - Soutien aux intermédiaires financiers 	

Tableau 7: Classification des politiques (suite)

Politiques visant à réaliser la transition énergétique	Déploiement (installation et production) des énergies renouvelables dans le contexte général	Déploiement (installation et production) des énergies renouvelables dans le contexte de l'accès (y compris les services énergétiques)	Optimisation du développement socio-économique grâce au déploiement des énergies renouvelables
Politiques d'intégration	<ul style="list-style-type: none"> - Mesures visant à améliorer la souplesse du système (par exemple, promotion des ressources souples comme le stockage, l'approvisionnement réparti, la modulation de la charge) 	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques d'intégration des systèmes hors réseau dans le réseau principal - Politiques pour les mini-réseaux et les systèmes énergétiques décentralisés intelligents - Couplage des politiques en matière d'énergies renouvelables avec des appareils et des services énergétiques efficaces 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques visant à garantir la présence des infrastructures nécessaires (par exemple, réseaux de transmission et de distribution, stations de recharge pour véhicules électriques, infrastructures de chauffage urbain, accès routier) - Politiques de couplage sectoriel - Soutien à la RD&D pour la mise au point de technologies (par exemple, le stockage) 		
	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleur alignement des politiques en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables - Intégration des objectifs de décarbonation dans les plans énergétiques nationaux - Mesures d'adaptation de la structure socio-économique à la transition énergétique 		

Tableau 7: Classification des politiques (suite)

Politiques visant à réaliser la transition énergétique	Déploiement (installation et production) des énergies renouvelables dans le contexte général	Déploiement (installation et production) des énergies renouvelables dans le contexte de l'accès (y compris les services énergétiques)	Optimisation du développement socio-économique grâce au déploiement des énergies renouvelables
Politiques propices	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques visant à uniformiser les règles du jeu (par exemple, réformes des subventions aux combustibles fossiles, politiques de tarification du carbone) - Mesures visant à adapter la conception des marchés de l'énergie (par exemple, échanges souples à court terme, signaux de prix à long terme) - Politiques visant à garantir la fiabilité des technologies (normes techniques et de qualité, certificats, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Politique industrielle (par exemple, exploitation des capacités locales) - Politiques commerciales (par exemple, accords commerciaux, promotion des exportations) - Politiques environnementales et climatiques (par exemple, réglementations environnementales) 	
	<p>Politique nationale en matière d'énergies renouvelables (par exemple, objectifs, cibles)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Politiques visant à faciliter l'accès de toutes les parties prenantes à un financement abordable - Politiques d'éducation (par exemple, inclusion des énergies renouvelables dans les programmes d'études, coordination de l'éducation et de la formation avec l'évaluation des compétences réelles et nécessaires) - Politiques de l'emploi (par exemple, politiques du marché du travail, programmes de formation et de recyclage) 		
	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques d'aménagement du territoire - Politiques de RD&D et d'innovation (par exemple, subventions et fonds, partenariats, facilitation de l'entrepreneuriat, formation de groupes industriels) - Politiques urbaines (par exemple, mandats locaux sur l'utilisation des carburants) - Politiques de santé publique 		
Politiques propices et d'intégration	<ul style="list-style-type: none"> - Gouvernance et architecture institutionnelle favorables (par exemple, procédures d'autorisation rationalisées, institutions spécialisées dans les énergies renouvelables) - Programmes de sensibilisation à l'importance et à l'urgence de la transition énergétique, axés sur la prise de conscience et le changement de comportement - Politiques de protection sociale pour faire face aux perturbations - Mesures de gestion intégrée des ressources (par exemple, le lien entre l'énergie, l'alimentation et l'eau). 		

Source IRENA Avril 2018 <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition>.

7.4 Recommandations de politique opérationnelle en matière de mini-réseaux

Les modèles d'exploitation des mini-réseaux décrivent la structure organisationnelle de la mise en œuvre et de l'exploitation des mini-réseaux, et déterminent en particulier qui est propriétaire des actifs de production et de distribution d'électricité, et qui exploite et entretient le système.

Quatre modèles principaux d'opérateurs de mini-réseaux peuvent être envisagés:

- services collectifs;
- secteur privé;
- communauté;
- hybride.

La réussite de la mise en œuvre de chaque modèle dépend de son contexte unique:

- a) l'environnement naturel (par exemple, la géographie, les ressources énergétiques et les conditions climatiques);
- b) le contexte socio-économique local;
- c) l'environnement politique et réglementaire.

Des mesures réglementaires appropriées doivent permettre au secteur privé de produire (générer) et de vendre (distribuer) de l'électricité soit aux distributeurs publics, soit directement aux utilisateurs finals par le biais de mini-réseaux.

7.5 Politiques propres aux solutions hors réseau

La plus grande partie de l'énergie supplémentaire nécessaire pour parvenir à l'accès universel sera fournie par des micro-réseaux et des mini-réseaux hors réseau appartenant à des particuliers, à une entreprise de services collectifs ou à des réseaux électriques communautaires dans les zones rurales des pays en développement. Il est peu probable que ces solutions hors réseau soient intégrées au réseau principal et elles continueront très probablement à fonctionner de manière autonome. Il est possible que les grands projets communautaires soient absorbés par le réseau national, financé ou géré par la compagnie d'électricité existante qui est responsable de la production et de la fourniture d'énergie. La plupart des pays subventionnent l'électricité fournie par le réseau. Par conséquent, les sources d'énergie hors réseau ne peuvent pas concurrencer le prix de l'électricité fournie par le réseau réparti.

Considérations relatives aux politiques:

Compte tenu du rôle essentiel des sources d'énergie décentralisées et décarbonées pour combler le déficit d'électricité dans les zones isolées, les mécanismes politiques et financiers des solutions hors réseau et des acteurs du secteur privé sont déterminants.

Les opérateurs hors réseau devront atténuer le risque potentiel de l'arrivée future du réseau national, qui peut introduire une incertitude majeure pour la viabilité à long terme des mini-réseaux. Les politiques relatives à l'arrivée du réseau principal doivent régir les modalités et la date d'arrivée du réseau principal et atténuer les risques auxquels sont confrontés les exploitants hors réseau et les exploitants de mini-réseaux.

Les promoteurs, exploitants et investisseurs privés de mini-réseaux devraient être autorisés à recouvrer les coûts d'une exploitation durable et disposer d'un délai raisonnable pour le faire, avec des marges appropriées⁵⁰.

L'accès à l'électricité permet aux personnes et aux communautés locales d'accroître leurs revenus et leur productivité, de renforcer leur accès aux soins de santé, à l'eau et à l'éducation et d'améliorer leur bien-être socio-économique général. L'accès à un service énergétique universel et à des services numériques large bande est essentiel pour atteindre les ODD d'ici à 2030.

⁵⁰ https://www.academia.edu/38089928/Renewable_Energy_Policies_in_a_Time_of_Transition?auto=download.

8 Conclusion

La connectivité est gourmande en énergie et ne se développera pas sans l'accès à l'électricité, en particulier à des sources d'énergie abordables, fiables et évolutives. Il n'est pas surprenant de constater que les déficiences en matière de connectivité et d'alimentation électrique se retrouvent souvent aux mêmes endroits.

La production et la distribution d'électricité connaissent une rupture grâce à l'innovation technologique en matière d'énergie propre, les tendances suivantes étant observées: décarbonation, numérisation et décentralisation.

Les sources d'énergie renouvelables, associées au stockage et aux logiciels d'efficacité énergétique, sont la clé d'un accès fiable et abordable à la connectivité dans les zones isolées.

En outre, l'accès aux services essentiels tels que l'électricité et la connectivité peut et doit être abordé dans le cadre d'infrastructures combinées ou partagées, afin de réduire au minimum les investissements et les coûts opérationnels tout en accélérant les progrès vers la réalisation de plusieurs ODD.

Pour connecter le prochain milliard d'utilisateurs, il faut innover non seulement dans la technologie, mais aussi dans les modèles d'entreprise et le financement. Comme tous les autres aspects de la quatrième révolution industrielle, le développement social et économique ne peut être réalisé que par des modèles évolutifs et reproductibles inspirés de la révolution des plates-formes qui s'applique à tous les segments de l'économie et de la société.

C'est dans l'économie du partage, à la fois entre les acteurs du secteur privé et dans les partenariats public-privé, que l'accès à l'électricité et à la connectivité peut être abordé de manière efficace. Le soutien financier des organisations de développement et des organisations internationales peut attirer les investissements du secteur privé dans des infrastructures à forte intensité de capital. Ces infrastructures sont la clé pour réduire l'écart numérique et en matière d'accès à l'électricité, ouvrant de multiples perspectives pour des mécanismes productifs de développement économique et social, y compris l'accès aux services numériques.

9 Annexes et études de cas

9.1 Entreprises de services énergétiques

Un marché de l'électricité produite de manière décentralisée sera essentiel pour accélérer le déploiement de solutions d'énergie propre en Afrique, en fournissant des services d'électricité fiables, abordables et propres au secteur des opérateurs de pylônes de télécommunication.

Un marché en pleine croissance

En Afrique, le nombre de nouveaux abonnements cellulaires a augmenté à un taux annuel moyen de plus de 12% entre 2010 et 2015 et la taille du réseau mobile africain devrait passer de 240 000 pylônes en 2014 à 325 000 pylônes d'ici 2020. Les opérateurs de réseau mobile (MNO) sont au cœur de l'économie mobile à croissance rapide de l'Afrique, y compris le commerce électronique et le commerce mobile, l'argent mobile, les services bancaires sur mobile et d'autres services à valeur ajoutée comme la santé en ligne, l'administration en ligne et l'agriculture en ligne.

Toutefois, à mesure que les MNO se déplacent vers des zones rurales peu peuplées, la recette moyenne par utilisateur (RMPU) diminue et les coûts énergétiques augmentent, en raison de l'absence de réseau électrique et du coût élevé des combustibles. Les coûts énergétiques peuvent représenter 60% des dépenses d'exploitation de l'infrastructure d'un MNO et constituent un frein au déploiement à grande échelle de la couverture mobile dans les zones rurales. Avec la récente baisse des prix des technologies photovoltaïques et de stockage de l'énergie, les solutions d'énergie solaire et hybride sont devenues de plus en plus compétitives et peuvent fournir aux MNO et aux towercos une alimentation électrique plus fiable et plus rentable.

Toutefois, dans un environnement à la fois très concurrentiel et en pleine croissance, les MNO se concentrent sur le service aux clients et l'investissement dans l'infrastructure active (c'est-à-dire l'équipement radioélectrique) plutôt que d'investir du temps et des ressources dans des solutions d'énergie propre. Dans un paysage de l'énergie en constante évolution qui nécessite des compétences techniques spécialisées, les MNO ne sont pas idéalement positionnés pour promouvoir l'efficacité énergétique. En outre, à mesure que la RMPU diminue, les MNO donnent la priorité à l'extension du réseau et à la mise à niveau technologique des équipements actifs. Avec une réserve de capital limitée, ils ont tendance à privilégier l'investissement dans l'équipement radioélectrique actif plutôt que dans les solutions énergétiques. Le potentiel de réduction des coûts des solutions énergétiques vertes et renouvelables n'est pas exploité, d'autant plus que les opérateurs attendent un retour sur investissement de quatre ans maximum. Les entreprises de services énergétiques (ESCO) sont mieux placées pour investir dans des actifs à long terme et les amortir au fil du temps afin de tirer pleinement parti de la réduction des coûts.

Figure 34: Solutions énergétiques ESCO en Afrique



Durabilité

Les MNO et les towercos s'engagent à réduire les émissions de CO₂ liées à leurs activités. En réduisant la consommation de carburant de 66% en moyenne grâce à des investissements dans des systèmes d'alimentation efficaces, les MNO réduisent considérablement leurs émissions de CO₂.

Les avantages des solutions ESCO pour les MNO et les towercos sont les suivants:

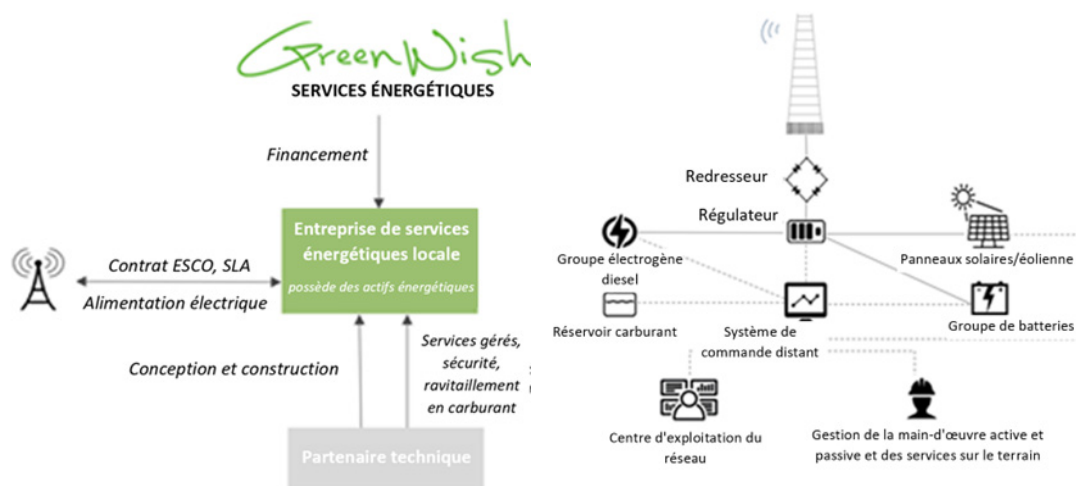
- préservation des dépenses d'investissement (CAPEX)
le fait de confier l'investissement dans la production d'énergie et l'exploitation et la maintenance (O&M) aux ESCO permet aux MNO et aux towercos de limiter les répercussions sur les dépenses d'investissement, d'encaisser d'emblée et de réduire la mobilisation des réserves de capital pour les actifs commerciaux non essentiels;
- réduction des coûts
le modèle ESCO permet aux MNO et aux towercos de bénéficier d'une réduction totale significative des coûts d'exploitation (OPEX) (entre 20 et 35% selon le pays), principalement grâce à la réduction des dépenses en énergie, mais aussi à la réduction des coûts d'exploitation et de maintenance, sans avoir à déboursier le moindre capital en investissement, puisque l'ESCO investit à leur place;
- fiabilité
l'énergie est essentielle pour les MNO et les towercos afin de garantir la fiabilité de leur réseau et le niveau des services fournis à leurs clients. Le modèle ESCO leur permet de bénéficier d'une source d'énergie fiable qui nécessite peu d'entretien sur les sites, ainsi que de garanties de performance contractuelles.

9.2 Solutions financières, contractuelles et opérationnelles classiques

Une ESCO locale sera chargée de la conception, de l'achat, de l'exploitation et de la maintenance des équipements à haut rendement énergétique destinés à alimenter les pylônes de télécommunication. Chaque ESCO locale passera un contrat avec un ou plusieurs clients dans le cadre d'un accord-cadre de services d'une durée de dix ans (ou plus), en leur facturant:

- une redevance d'infrastructure fixe couvrant les dépenses d'investissement initiales et de remplacement, les coûts de financement et les coûts de gestion de l'ESCO;
- une redevance énergétique couvrant les coûts du combustible et du réseau, avec un volume garanti d'économies de combustible (le risque est transféré au partenaire technique);
- une redevance d'exploitation et de maintenance couvrant les services d'exploitation et de maintenance (le risque est transféré au partenaire technique).

Figure 35: Exemple de solutions contractuelles et techniques pour les entreprises de télécommunication



Répartition des risques

Le modèle ESCO permet au MNO/towerco d'isoler les actifs énergétiques liés à ses pylônes dans une société ad hoc. Comme dans une structure classique de financement de projet fondée sur les actifs, les risques de construction, de performance et d'exploitation seront transférés aux partenaires EPC et O&M du projet.

Reproductivité et évolutivité

Grâce à la présence locale et aux activités des partenaires d'exploitation et de maintenance (O&M) qui travaillent déjà avec les opérateurs de réseau mobile en Afrique subsaharienne, le modèle ESCO est facilement reproductible et évolutif dans d'autres pays. Les accords-cadres de services entre l'ESCO et les opérateurs devraient être fortement normalisés entre les projets. Ainsi, l'ESCO locale sera regroupée avec les projets futurs au niveau du portefeuille de l'ESCO, ce qui permettra aux bailleurs de fonds de soutenir les projets au niveau du portefeuille ou au niveau du projet, en s'appuyant toujours sur les garanties d'actifs, mais finalement avec un profil de risque diversifié dans l'approche portefeuille.

Forte incidence de l'investissement sur l'environnement

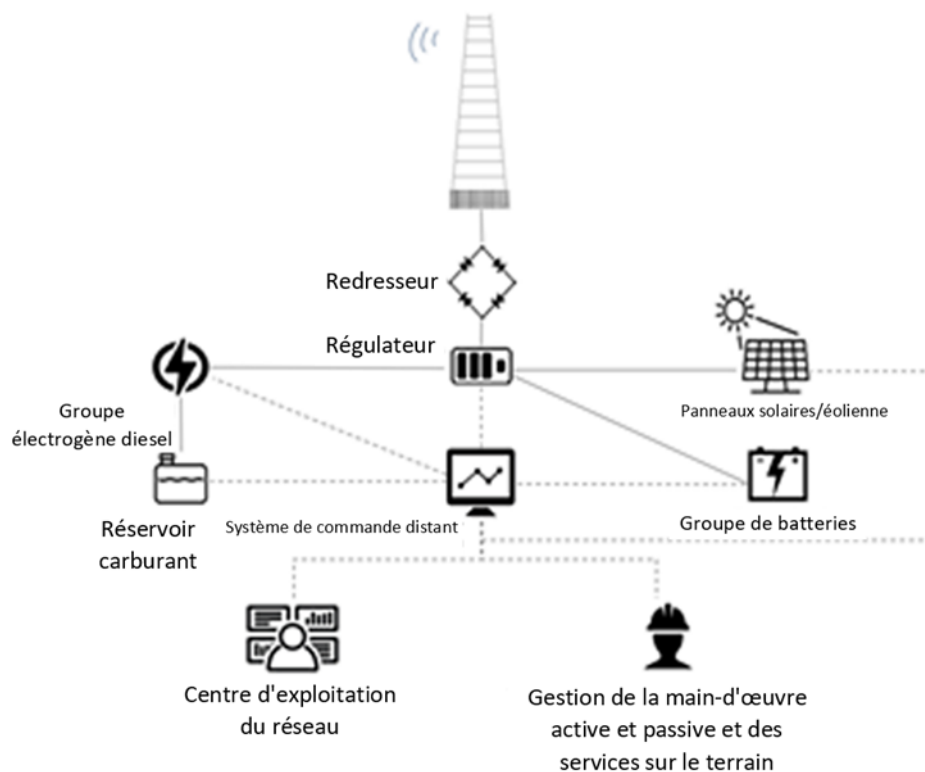
L'activité ESCO est fondée sur le remplacement de systèmes de production d'énergie à forte consommation de carburant par des systèmes de production d'énergie hybrides. À titre d'exemple, l'investissement permet d'installer des équipements de production d'énergie renouvelable ou des batteries efficaces, réduisant la consommation de carburant de 66% en moyenne, ce qui correspond à environ 5 500 tonnes d'émissions d'équivalent CO₂ économisées par an dans le seul cas du projet Orange RDC.

Une solution technique fiable

Chaque ESCO locale remplacera les systèmes de production d'électricité diesel inefficaces appartenant aux MNO ou aux towercos par des systèmes solaires hybrides à haut rendement énergétique qui fourniront de l'électricité:

- moins chère, grâce à la réduction de la dépendance à l'égard des groupes électrogènes diesel;
- plus propre, car la consommation de carburant est réduite de 50 à 100%;
- plus fiable, grâce à un temps de fonctionnement garanti avec une disponibilité allant jusqu'à 99,9%.

Figure 36: Exemple de solution technique fiable



9.3 Communautés écologiques intelligentes

9.3.1 Les communautés intelligentes

Les communautés intelligentes est une plate-forme mondiale de distribution partagée, physique et numérique, qui cible les zones mal desservies dans le but ultime de favoriser le développement social et économique.

Les communautés intelligentes répondent à 15 des 17 ODD définis par les Nations Unies, conformément à l'initiative de la présidence française, présentée lors du Sommet One Planet à Nairobi en mars 2019, associant l'Agence française de développement (AFD) et Bpifrance, entre autres institutions.

Grâce à un modèle B2G/B2B2C, les plates-formes alimentées à l'énergie solaire et connectées servent de micro-entrepôts autonomes et de points de distribution efficaces et intelligents pour mettre les produits et services commerciaux, gouvernementaux et des ONG à la disposition du dernier kilomètre. En accédant au réseau d'infrastructures partagées, ils peuvent développer leurs activités et leurs entreprises à moindre coût, tout en contribuant à leurs stratégies sociales et environnementales.

Les communautés intelligentes ouvrent également des perspectives de manière durable pour les populations locales, en servant de guichet unique pour tous ces différents services et de porte d'entrée sur le marché mondial.

Dans un modèle évolutif et rentable, l'ambition est de fournir un accès aux services universels à un coût marginal minimal: électricité, eau, connectivité, éducation, santé, services d'administration en ligne, services bancaires, ainsi que l'autonomisation des agriculteurs, des femmes et des jeunes.

Figure 37: Exemple de village écologique intelligent



Source: GreenWish.

9.3.2 Modèle commercial

Voie d'accès au marché

Grâce au réseau des communautés intelligentes, les partenaires des secteurs public et privé accèdent à de nouveaux marchés à un coût concurrentiel pour la distribution ou la livraison, mais aussi à des espaces publicitaires et à des données qui peuvent se révéler précieuses en tant que contribution aux politiques publiques et pour améliorer la compréhension des consommateurs. Les partenaires B2B bénéficient du modèle commercial inclusif des communautés intelligentes, qui répond à 15 des 17 ODD définis par les Nations Unies grâce à l'accès à l'eau, à l'électricité, à la connectivité, à l'éducation, à la santé, à l'agriculture, à la création d'emplois, à l'autonomisation des femmes et des jeunes, aux services d'administration en ligne et aux services bancaires, etc.

Les communautés locales intelligentes sont gérées par une combinaison d'employés internes et de sous-franchisés en tant que locataires de magasins.

La gestion de l'infrastructure et la plate-forme numérique sont assurées par GreenWish par l'intermédiaire de sous-traitants.

La structure de franchise vise à accélérer la croissance exponentielle de la plate-forme communautés intelligentes, en donnant aux marques locales et internationales l'accès aux consommateurs et aux utilisateurs, à la publicité, à la plateforme numérique et à la logistique partagée, à l'énergie et à la connectivité dans plusieurs pays.

Le modèle est fondé sur des mesures d'incitation et il est exponentiel: plus la rentabilisation est rapide, plus il est possible d'offrir de services et de résultats supplémentaires. Il ne peut réussir que grâce à une approche partagée et collaborative entre les marques et les pouvoirs publics.

Modèle de revenu

Le modèle de revenu des communautés intelligentes est fondé sur:

- les redevances fixes à long terme pour les locataires ou les utilisateurs, versées par les partenaires B2B;
- le partage des frais de transaction sur les transactions physiques et numériques sur place;
- la publicité;
- la collecte et la monétisation des données, en copropriété avec les collectivités locales;
- des subventions au titre de la RSE accordées par des partenaires privés et des ONG pour soutenir des activités sociales à but non lucratif.

Structure contractuelle

Le modèle le plus viable et le plus durable suppose le financement des infrastructures par les pouvoirs publics locaux, par le biais du financement des institutions de financement du développement (IFD) ou des crédits à l'exportation.

La mission des communautés intelligentes étant de favoriser le développement social et économique dans les territoires mal desservis en proposant des produits et des services innovants, à la fois privés et publics, il est logique de mettre en place l'activité sous la forme d'un modèle de concession dans lequel les pouvoirs publics possèdent les infrastructures tandis que les communautés intelligentes les construisent, les exploitent et gèrent les activités.

9.3.3 Services essentiels

- **Électricité**

Les communautés intelligentes sont alimentées par l'énergie solaire ou par des batteries et sont totalement hors réseau.

Le dimensionnement de la puissance est adapté à la taille des communautés intelligentes et des services (entrepôt frigorifique, connectivité, etc.), qui sont modulaires et adaptables à l'emplacement: périurbain ou rural.

Les locataires de magasins peuvent également vendre de l'électricité à des clients individuels.

- **Eau**

Les communautés intelligentes sont équipées de systèmes de purification de l'eau à faible coût pour desservir 200 à 3 000 personnes par jour.

- **Stockage et entreposage frigorifique**

Chaque communauté intelligente est équipée d'un entrepôt et d'un entrepôt frigorifique, y compris d'un entrepôt de congélation le cas échéant.

Des espaces de stockage sont disponibles pour les biens de consommation à rotation rapide (alimentation, boissons, soins personnels), les produits pharmaceutiques, les appareils et produits de télécommunication, les systèmes solaires domestiques, éventuellement les engrais et d'autres produits d'intérêt local. Ces points de stockage serviront également de points de distribution locaux.

Une plate-forme numérique permet la traçabilité des produits, de l'importation à la vente B2C, avec un suivi des stocks.

- **Vente de détail**

Les communautés intelligentes disposent d'un magasin de vente directe.

- **Point d'accès WiFi**

Chaque communauté intelligente dispose d'un accès WiFi avec différentes formes d'accès.

Si aucune connexion Internet n'est disponible dans le village, que ce soit via la 3G ou un fournisseur d'accès Internet, différentes options sont possibles.

Dans un environnement totalement hors réseau électrique, l'accès à l'Internet peut être obtenu grâce à la station de base la plus proche ou à une connexion par satellite (VSAT), ou encore en utilisant les espaces blancs de télévision.

Les communautés intelligentes seront le laboratoire de multiples voies d'accès à la connectivité à un prix concurrentiel dans les zones isolées.

- **Services numériques**

La plate-forme numérique spécialisée, disponible dans chaque communauté intelligente, sert de marché pour les services et héberge des services en ligne de partenaires stratégiques,

notamment: gouvernement en ligne, santé en ligne, éducation en ligne, banque en ligne, agriculture en ligne, commerce électronique.

Certains services électroniques particuliers peuvent être mis au point en interne.

- Collecte de données

La plate-forme recueillera des données physiques et numériques personnalisées pour les clients et les partenaires.

Chaque communauté intelligente dessert un bassin de population de 15 à 20 000 personnes dans une zone de 5 km, et est stratégiquement placée pour la circulation.

Cette empreinte et les multiples services et produits offerts dans les communautés intelligentes créeront une excellente possibilité de recueillir des données ciblées pour tous les partenaires.

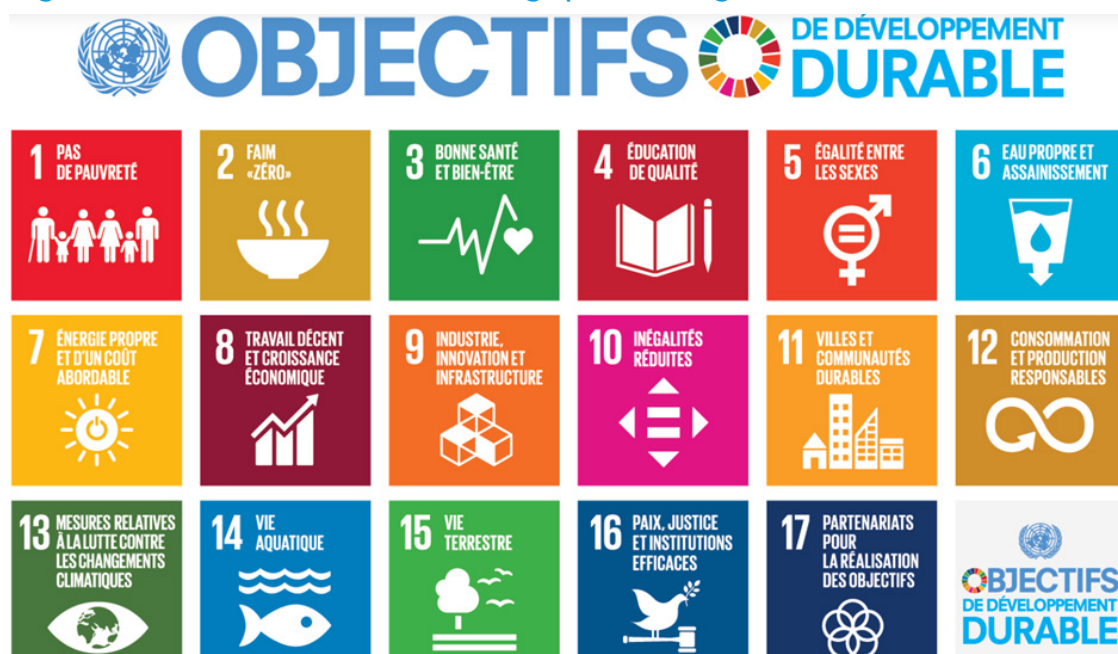
Les données sont la propriété conjointe de GreenWish et des autorités locales et sont mises à la disposition d'autres partenaires moyennant une redevance, sous réserve du but de l'utilisation.

9.3.4 Responsabilité sociale des entreprises (RSE)

Les communautés intelligentes mesurent leur contribution à la RSE à l'aune des ODD.

En déployant une infrastructure pour améliorer l'accès à l'énergie et réduire la fracture numérique dans les communautés privées de connectivité, les communautés intelligentes répondent à 15 des 17 ODD.

Figure 38: Les communautés écologiques intelligentes et les ODD



- Participer à l'**éducation** et au renforcement des capacités par des formations générales et sectorielles.
- Débloquer la **distribution de divers biens à valeur ajoutée**, notamment les produits en technologie solaire et les intrants agricoles spécialisés.
- Diffuser des services et de produits clés par l'intermédiaire des femmes entrepreneurs et auprès des **femmes**.

- Lutter contre la pauvreté en permettant aux individus d'avoir accès à l'**information** et de connaître le prix réel du marché des produits de base. Leur offrir également un nouveau canal de vente par le biais du commerce électronique.
- Faire de la **cyberagriculture**, de la **cybersanté** et du **cyberenseignement** une réalité dans les régions qui en ont le plus besoin.
- La connectivité contribue à rendre la fabrication plus intelligente et moins gourmande en carbone.
- **Coordonner** l'action des principaux acteurs privés, des organismes publics, des agences multilatérales et des organisations non gouvernementales dans les zones peu connectées.

9.4 Liens utiles:

Technologies et centrales hydroélectriques

- <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=d8kOe9VdG4I>
- <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=B5qIB-asleo>
- <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=W1PR9fhsf9c>
- https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=UW_SgFUfYds
- https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=qaUufeq_7IIIIII

Un spécialiste de la conversion de l'énergie

- <https://www.enetek-power.com/industries>

Transmission d'énergie sans fil

- **WiPE (Wireless Power Transmission for Sustainable Electronics, transmission d'énergie sans fil pour une électronique durable)**
 - <http://www.cost-ic1301.org/>
- **WiPoT (Wireless power transfer consortium for practical applications, consortium pour la transmission d'énergie sans fil destinée à des applications pratiques)**
 - <http://www.wipot.jp/english/>
- **BWF (Broadband wireless forum, forum sur la transmission d'énergie sans fil en large bande)**
 - <http://bwf-yrp.net/english/>
 - <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-capacity-growth-between-2019-and-2024-by-technology>

Sigles

ADFD	Fonds d'Abu Dhabi pour le développement (<i>Abu Dhabi Fund for development</i>)
CPE	Équipement de locaux d'abonné (<i>customer premises equipment</i>)
ESCO	Entreprise de services énergétiques (<i>energy services company</i>)
IFD	Institutions de financement du développement
IRENA	Agence internationale pour les énergies renouvelables (<i>international renewable energy Agency</i>)
MNO	Opérateur de réseau mobile (<i>mobile network operator</i>)
ODD	Objectifs de développement durable
O&M	Exploitation et maintenance (<i>operation and maintenance</i>)

Union internationale des télécommunications (UIT)
Bureau de développement des télécommunications (BDT)
Bureau du Directeur
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

Courriel: bdttdirector@itu.int
Tél.: +41 22 730 5035/5435
Fax: +41 22 730 5484

Département des réseaux et de la société numériques (DNS)
Courriel: bdt-dns@itu.int
Tél.: +41 22 730 5421
Fax: +41 22 730 5484

Afrique

Ethiopie

International Telecommunication Union (ITU) Bureau régional
Gambia Road
Leghar Ethio Telecom Bldg, 3rd floor
P.O. Box 60 005
Addis Ababa
Ethiopie

Courriel: itu-ro-africa@itu.int
Tél.: +251 11 551 4977
Tél.: +251 11 551 4855
Tél.: +251 11 551 8328
Fax: +251 11 551 7299

Amériques

Brésil

União Internacional de Telecomunicações (UIT)
Bureau régional
SAUS Quadra 6 Ed. Luis Eduardo
Magalhães,
Bloco "E", 10^o andar, Ala Sul
(Anatel)
CEP 70070-940 Brasília - DF
Brazil

Courriel: itubrasilia@itu.int
Tél.: +55 61 2312 2730-1
Tél.: +55 61 2312 2733-5
Fax: +55 61 2312 2738

Etats arabes

Egypte

International Telecommunication Union (ITU) Bureau régional
Smart Village, Building B 147,
3rd floor
Km 28 Cairo
Alexandria Desert Road
Giza Governorate
Cairo
Egypte

Courriel: itu-ro-arabstates@itu.int
Tél.: +202 3537 1777
Fax: +202 3537 1888

Pays de la CEI

Fédération de Russie

International Telecommunication Union (ITU) Bureau régional
4, Building 1
Sergiy Radonezhsky Str.
Moscow 105120
Fédération de Russie
Courriel: itumoscow@itu.int
Tél.: +7 495 926 6070

Département du pôle de connaissances numériques (DKH)
Courriel: bdt-dkh@itu.int
Tél.: +41 22 730 5900
Fax: +41 22 730 5484

Cameroun

Union internationale des télécommunications (UIT)
Bureau de zone
Immeuble CAMPOST, 3^e étage
Boulevard du 20 mai
Boîte postale 11017
Yaoundé
Cameroun

Courriel: itu-yaounde@itu.int
Tél.: + 237 22 22 9292
Tél.: + 237 22 22 9291
Fax: + 237 22 22 9297

La Barbade

International Telecommunication Union (ITU) Bureau de zone
United Nations House
Marine Gardens
Hastings, Christ Church
P.O. Box 1047
Bridgetown
Barbados

Courriel: itubridgetown@itu.int
Tél.: +1 246 431 0343
Fax: +1 246 437 7403

Asie-Pacifique

Thaïlande

International Telecommunication Union (ITU) Bureau régional
4th floor NBTC Region 1 Building
101 Chaengwattana Road
Laksi,
Bangkok 10210,
Thaïlande

Adresse postale:
P.O. Box 178, Laksi Post Office
Laksi, Bangkok 10210, Thailand

Courriel: itu-ro-asiapacific@itu.int
Tél.: +66 2 574 9326 – 8
+66 2 575 0055

Europe

Suisse

Union internationale des télécommunications (UIT)
Bureau pour l'Europe
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse
Courriel: eurregion@itu.int
Tél.: +41 22 730 5467
Fax: +41 22 730 5484

Adjoint au directeur et Chef du Département de l'administration et de la coordination des opérations (DDR)
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

Courriel: bdtdeputydir@itu.int
Tél.: +41 22 730 5131
Fax: +41 22 730 5484

Département des partenariats pour le développement numérique (PDD)
Courriel: bdt-pdd@itu.int
Tél.: +41 22 730 5447
Fax: +41 22 730 5484

Sénégal

Union internationale des télécommunications (UIT)
Bureau de zone
8, Route des Almadies
Immeuble Rokhaya, 3^e étage
Boîte postale 29471
Dakar - Yoff
Sénégal

Courriel: itu-dakar@itu.int
Tél.: +221 33 859 7010
Tél.: +221 33 859 7021
Fax: +221 33 868 6386

Chili

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)
Oficina de Representación de Área
Merced 753, Piso 4
Santiago de Chile
Chili

Courriel: itusantiago@itu.int
Tél.: +56 2 632 6134/6147
Fax: +56 2 632 6154

Indonésie

International Telecommunication Union (ITU) Bureau de zone
Sapta Pesona Building
13th floor
Jl. Merdan Merdeka Barat No. 17
Jakarta 10110
Indonésie

Courriel: itu-ro-asiapacific@itu.int
Tél.: +62 21 381 3572
Tél.: +62 21 380 2322/2324
Fax: +62 21 389 5521

Zimbabwe

International Telecommunication Union (ITU) Bureau de zone
TelOne Centre for Learning
Corner Samora Machel and Hampton Road
P.O. Box BE 792
Belvedere Harare
Zimbabwe

Courriel: itu-harare@itu.int
Tél.: +263 4 77 5939
Tél.: +263 4 77 5941
Fax: +263 4 77 1257

Honduras

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)
Oficina de Representación de Área
Colonia Altos de Miramontes
Calle principal, Edificio No. 1583
Frente a Santos y Cía
Apartado Postal 976
Tegucigalpa
Honduras

Courriel: itutegucigalpa@itu.int
Tél.: +504 2235 5470
Fax: +504 2235 5471

Inde

International Telecommunication Union (ITU) Area Office and Innovation Centre
C-DOT Campus
Mandi Road
Chhatarpur, Mehrauli
New Delhi 110030
Inde

Courriel: itu-ro-southasia@itu.int

Union internationale des télécommunications
Bureau de développement des télécommunications
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

ISBN: 978-92-61-35962-1



Publié en Suisse
Genève, 2023

Photo credits: Adobe Stock