



# Principes pour la Boîte à Outils des Modèles Africains de Règlementations des Mini-Réseaux – Guide Technique



**Préparé par**

Forum africain des régulateurs de services publics (AFUR)

Forum africain des régulateurs de services publics (AFUR)

526 Madiba Street, Arcadia, 0083.

Pretoria, Afrique du Sud

info@afurnet.org / afurnet@gmail.com

© 2023 Tous droits réservés. (AFUR)

**Lieu et date de publication**

Pretoria, décembre 2023

**Remerciements**

L'AFUR remercie le programme européen GET.transform pour le soutien apporté à l'élaboration de ce guide.

[get.transform.eu](http://get.transform.eu)

L'AFUR remercie également les auteurs experts mandatés par GET.transform:

[inensus.com](http://inensus.com)[gfa-group.de](http://gfa-group.de)

# Table des Matières

	<b>Résumé Analytique</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Aspects Techniques de la Réglementation sur les Mini-Réseaux</b>	<b>8</b>
	Le Statu Quo : Principales Observations	11
<b>3</b>	<b>Triangle de la Réglementation Technique entre Sécurité, Fiabilité et Accessibilité Financière</b>	<b>12</b>
	3.1 Fiabilité et Accessibilité Financière	13
	3.2 Sécurité et Accessibilité Financière	20
<b>4</b>	<b>Au-delà du Triangle : L'impact d'Autres Aspects sur l'Accessibilité Financière</b>	<b>26</b>
	4.1 Préparation à l'Interconnexion	26
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Annexe I</b>	<b>29</b>

<b>Figure 1</b>	<b>4</b>	<b>Figure 9</b>	<b>19</b>
Triangle de la sécurité, de la fiabilité et de l'accessibilité financière, et recherche du juste milieu		Approche décisionnelle recommandée pour définir le niveau de tension approprié	
<b>Figure 2</b>	<b>6</b>	<b>Figure 10</b>	<b>21</b>
Triangle de la sécurité, de la fiabilité et de l'accessibilité financière, et recherche du juste milieu		Démonstration conceptuelle des défaillances des onduleurs sur les CAPEX, les OPEX et le tarif	
<b>Figure 3</b>	<b>8</b>	<b>Figure 11</b>	<b>22</b>
Aspects techniques de la réglementation des mini-réseaux		Les charges élevées sont plus sensibles à la qualité de l'énergie que les appareils ménagers classiques.	
<b>Figure 4</b>	<b>13</b>	<b>Figure 12</b>	<b>24</b>
Les défaillances de composants à différents endroits peuvent avoir un impact sur la fiabilité des mini-réseaux.		Impact sur le tarif pour certains tableaux de comptage et d'installation	
<b>Figure 5</b>	<b>14</b>	<b>Figure 13</b>	<b>25</b>
Impact d'une plus grande fiabilité sur les dépenses d'investissement, les dépenses d'exploitation et les tarifs des mini-réseaux		Approche décisionnelle recommandée pour la norme des composants	
<b>Figure 6</b>	<b>15</b>	<b>Figure 14</b>	<b>27</b>
Approche décisionnelle pour la sélection des exigences appropriées en matière de disponibilité des mini-réseaux		Impact de l'état de préparation à l'interconnexion au réseau sur les coûts et les tarifs de distribution	
<b>Figure 7</b>	<b>16</b>	<b>Tableau 1</b>	<b>9</b>
Démonstration conceptuelle de la chute de tension à travers la distance		Aperçu des aspects techniques des réglementations relatifs aux mini-réseaux	
<b>Figure 8</b>	<b>17</b>	<b>Tableau 2</b>	<b>23</b>
Impact des chutes de tension autorisées sur les dépenses d'investissement, les dépenses d'exploitation et le niveau tarifaire des mini-réseaux		Différentes catégories de compteurs et leurs impacts	

# Résumé Analytique

Le Forum Africain des Régulateurs de Services Publics (AFUR) présente ce **Guide technique** dans le cadre de son travail sur les modèles africains de réglementations des mini-réseaux que l'AFUR développe en partenariat avec GET.transform. AFUR vise à élaborer une **Boîte à outils**, sur la base de l'expérience des régulateurs, documentant les derniers développements et les meilleures pratiques continentales en matière de réglementation des mini-réseaux. Avec le soutien de GET.transform, les outils en résultent dans le cadre des **Modèles africains de réglementations des mini-réseaux** aideront les régulateurs quant aux meilleures pratiques à déployer pour surmonter les défis réglementaires récurrents. Parallèlement, les outils peuvent être appliqués dans différentes juridictions et contribueront à la convergence des réglementations relatives aux mini-réseaux sur le continent africain et au-delà. GET.transform soutient des ateliers sur les approches techniques, financières, juridiques et commerciales des mini-réseaux en collaboration avec l'AFUR et ses régulateurs membres, afin de conduire le processus participatif en vue de développer des outils publiables qui constituent les **Modèles africains de réglementations des mini-réseaux**. Ce **Guide technique** est le premier de ces documents. Il souligne les aspects techniques innovants qui pourraient être pris en compte dans la réglementation des mini-réseaux. Les principes abordés dans cette directive technique seront intégrés aux modèles de réglementation des mini-réseaux, qui sont à l'heure actuelle en cours d'élaboration dans le cadre des **Modèles africains de réglementations des mini-réseaux**. Les modèles de réglementation des mini-réseaux devraient être publiés en 2024.

L'AFUR remercie également l'UKaid pour son soutien dans le cadre de la plateforme TEA (Transforming Energy Access) pour son soutien au projet « Diffusion des outils de règlement tarifaire des mini-réseaux auprès des régulateurs africains », qui a permis le développement de ces modèles dans le cadre du projet.


Les réglementations relatives aux mini-réseaux fixent **une série d'exigences techniques, financières et juridiques** que les développeurs de mini-réseaux doivent respecter dans un pays. Ces exigences ne sont pas isolées les unes des autres, mais elles ont une **nature complexe d'interdépendance** entre elles. Des exigences trop rigides ne contribuent pas à la croissance du secteur des mini-réseaux. D'autre part, des exigences trop souples peuvent aboutir à des systèmes de qualité médiocre et à des niveaux de service médiocres. Les régulateurs doivent toujours trouver un **juste milieu** entre les exigences interdépendantes. Ce concept est illustré dans le présent rapport par un triangle composé de la sécurité, de la fiabilité et de l'accessibilité financière.


L'interrelation triangulaire entre la sécurité, la fiabilité et l'accessibilité financière reste **un jeu à somme nulle** jusqu'à ce que l'innovation technologique change la dynamique. Le régulateur peut fixer les exigences techniques de manière à ce que les mini-réseaux soient très sûrs et fiables. Cependant, le coût de la mise en conformité avec ces exigences peut amener le tarif à un niveau inabordable. Par conséquent, un régulateur ne peut pas chercher à améliorer l'un des aspects sans avoir un impact sur les autres.


En général, les mini-réseaux sont confrontés à des défis spécifiques par rapport à des réseaux principaux beaucoup plus importants. La nature de l'électrification rurale est d'apporter des services modernes de fourniture d'électricité à des communautés isolées, sous-développées et économiquement faibles. Fournir une énergie illimitée de haute qualité n'est pas faisable dans les petits systèmes, qui ont une complexité et une structure de coûts similaires à celles du réseau principal, mais qui n'ont pas la même échelle. Un compromis ne peut fonctionner que si l'opérateur et les clients sont conscients de la

disponibilité limitée de la production d'énergie et de la capacité de distribution de l'infrastructure basse tension du mini-réseau. Les réglementations doivent aider à trouver un équilibre viable entre la fiabilité, l'accessibilité financière et la sécurité.


Ce concept est validé dans le présent rapport par une approche fondée sur des données. Plusieurs simulations menées par les experts de GET.transform ont permis de mieux comprendre le triangle et au-delà, avec des moyens de trouver un « juste milieu ».


 **La disponibilité du mini-réseau**, quantifiée par le nombre d'heures de service par jour, est le pilier de sa **fiabilité**. La disponibilité peut être limitée en raison de défaillances du système et de contraintes de capacité (par exemple, capacité de stockage limitée). La disponibilité s'améliore avec les niveaux de compétence du personnel local, l'efficacité des centres d'appel et la capacité des entrepôts. Les simulations suggèrent que pour une disponibilité de 99,9 %, le tarif d'un mini-réseau subventionné à 75 % par le CAPEX pourrait atteindre 1,4 USD/kWh, alors qu'une disponibilité de 90 % se traduirait par un **tarif plus abordable** de 0,3 USD/kWh.

 **La chute de tension admissible** est un autre aspect technique étroitement lié à la fiabilité et à la qualité de l'approvisionnement. Tous les appareils électriques disponibles sur le marché local, qui répondent aux normes locales, doivent fonctionner dans les limites de leurs spécifications de tension lorsqu'ils sont raccordés par les clients. En raison de la taille limitée d'un mini-réseau, l'opérateur doit limiter les appareils de qualité inappropriée et sélectionner avec prudence les appareils de grande puissance, pour veiller à ce que la tension reste stable dans les limites requises. Si la chute de tension autorisée est trop faible, des câbles de plus grande section seront nécessaires, qui sont relativement onéreuses en raison du coût des matériaux et des efforts d'installation. À titre d'exemple, avec des considérations de coûts similaires sur (~75% de subvention avec 90% de disponibilité), si l'exigence de chute de tension passe de 5% à 15%, le tarif pourrait être réduit de 0,33 US\$/kWh à 0,29 US\$/kWh. Toutefois, la chute de tension admissible peut varier d'un groupe de clients à l'autre en fonction des appareils qu'ils utilisent.

 Les exigences en matière de **qualité de l'énergie** varient également en fonction des appareils utilisés. Les exploitants de mini-réseaux doivent donc sensibiliser les consommateurs et les aider à choisir les appareils appropriés. Une mauvaise qualité de l'énergie peut entraîner des pannes d'équipement et une surchauffe des systèmes de distribution, ce qui peut compromettre la **sécurité du système**. L'onduleur est pris comme composant pour démontrer comment il peut avoir un impact

sur la qualité de l'énergie. Les exigences en matière de qualité de l'énergie sont de plus en plus strictes, depuis les appareils ménagers jusqu'aux appareils commerciaux et productifs. Si des onduleurs de basse qualité sont utilisés, ils risquent de ne pas pouvoir gérer les mini-réseaux avec une utilisation productive élevée, ce qui entraînerait des dommages aux appareils. Les onduleurs haut de gamme sont capables de mieux gérer de telles situations, mais ils sont aussi comparativement coûteux et auront donc un impact sur le tarif.

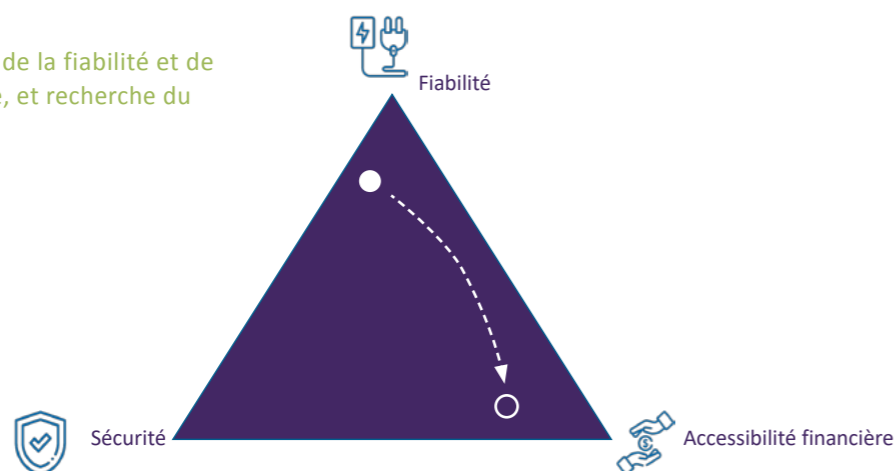
 **La sécurité** dépend également des **normes des composants** utilisés. Différents types de compteurs d'énergie et de panneaux d'installation avec des mesures de sécurité ont été considérés comme des exemples. Les simulations suggèrent que la combinaison d'un compteur intelligent et d'un panneau d'installation rural prêt à l'emploi ou d'un compteur prépayé et d'un panneau d'installation rural prêt à l'emploi peut maintenir le tarif à un niveau inférieur à celui des autres options disponibles, par exemple les compteurs à post-paiement et les panneaux d'installation adaptés aux zones urbaines. Les réglementations relatives aux mini-réseaux doivent permettre l'utilisation de disjoncteurs miniatures appropriés avec un courant nominal beaucoup plus faible que celui des réseaux principaux, en combinaison avec une mise à la terre adéquate et une protection individuelle recommandée contre les fuites à la terre. Cela permettra de réduire les dépenses d'investissement et les tarifs sans compromettre la sécurité.

 **Au-delà du triangle**, d'autres considérations techniques influencent également les niveaux tarifaires. La **préparation à l'interconnexion** dès le début peut signifier que les réseaux de distribution des mini-réseaux sont conçus selon les normes des services publics. De ce fait, les dépenses de distribution peuvent augmenter jusqu'à 38 %. Il peut en résulter un tarif plus élevé - de 0,27 USD/kWh à 0,37 USD/kWh.

En plus de fournir de tels exemples, ce produit de connaissance de l'AFUR et de GET.transform propose également un processus de prise de décision pour chaque cas, qui peut être utilisé lors de la rédaction (ou de l'ajustement) des réglementations relatives aux mini-réseaux.

Cette nouvelle façon d'examiner les réglementations relatives aux mini-réseaux permettra aux régulateurs d'adopter une approche affinée pour établir des réglementations techniques appropriées. Cela garantira également que les régulateurs de mini-réseaux en Afrique adoptent une approche normalisée pour définir les exigences relatives au développement et à l'exploitation des mini-réseaux en tenant compte de leur contexte local respectif.

**Figure 1**  
Triangle de la sécurité, de la fiabilité et de l'accessibilité financière, et recherche du juste milieu

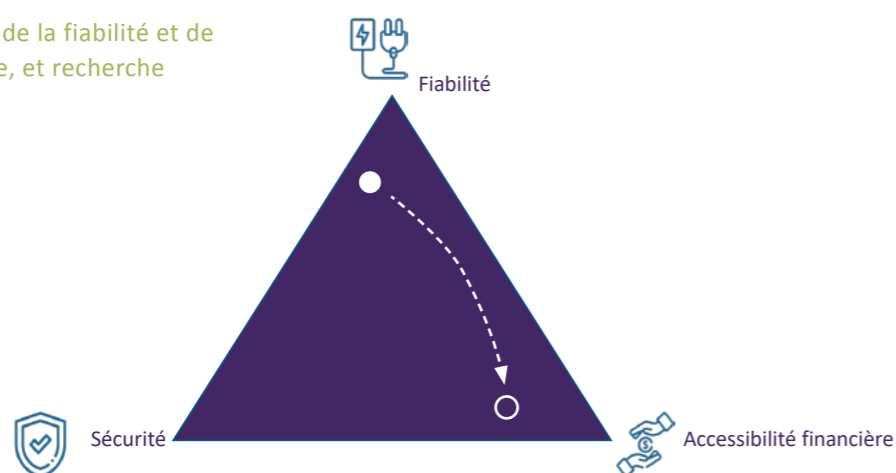


# 1 Introduction

Les réglementations relatives aux mini-réseaux couvrent divers aspects techniques, financiers et juridiques qui, en fin de compte, contribuent à la manière dont les mini-réseaux seront exploités dans un pays. Les **instruments réglementaires trop rigides** ne facilitent pas la croissance des mini-réseaux dans un pays ; dans le pire des cas, des réglementations rigides peuvent avoir le même effet que l'absence de réglementation. Les exigences

rigides ne concernent pas seulement les sujets individuels couverts par les réglementations, mais aussi la **nature complexe de l'interdépendance entre les différents aspects des opérations des mini-réseaux**. À l'autre extrémité du spectre, chaque réglementation peu contraignante ouvre la voie à des systèmes et à des niveaux de service médiocres. Il incombe aux régulateurs de trouver le **juste milieu**.

**Figure 2**  
Triangle de la sécurité, de la fiabilité et de l'accessibilité financière, et recherche du juste milieu



Cet argument peut être illustré par un triangle composé de la sécurité, de la fiabilité et de l'accessibilité financière. Le régulateur peut fixer les exigences techniques de manière à ce que les mini-réseaux soient très sûrs et fiables. Toutefois, le coût de la mise en conformité avec ces exigences techniques peut porter le tarif à un niveau inabordable. Par conséquent, à un moment donné, un régulateur ne peut pas chercher à améliorer l'un des aspects sans que cela ait un impact sur les autres. Cette façon d'envisager les réglementations soulève les questions suivantes :

- Lequel de ces trois aspects est le plus important à réaliser pour le secteur des mini-réseaux du pays ?
- Comment les régulateurs peuvent-ils s'assurer que les exigences techniques n'aboutissent pas à des tarifs socialement et politiquement inacceptables ?
- Quelles sont les considérations à prendre en compte dans ce processus de décision ?

Ce produit de connaissance se concentre sur l'identification et la découverte de certains liens entre ces aspects techniques et le caractère abordable de l'électricité des mini-réseaux et recommande aux régulateurs des approches décisionnelles basées sur les données pour trouver le **juste milieu** entre les tarifs abordables et les exigences techniques.

Cette nouvelle façon d'aborder les réglementations relatives aux mini-réseaux permettra aux régulateurs de répondre aux questions susmentionnées et d'adopter une approche affinée pour établir des réglementations techniques appropriées.

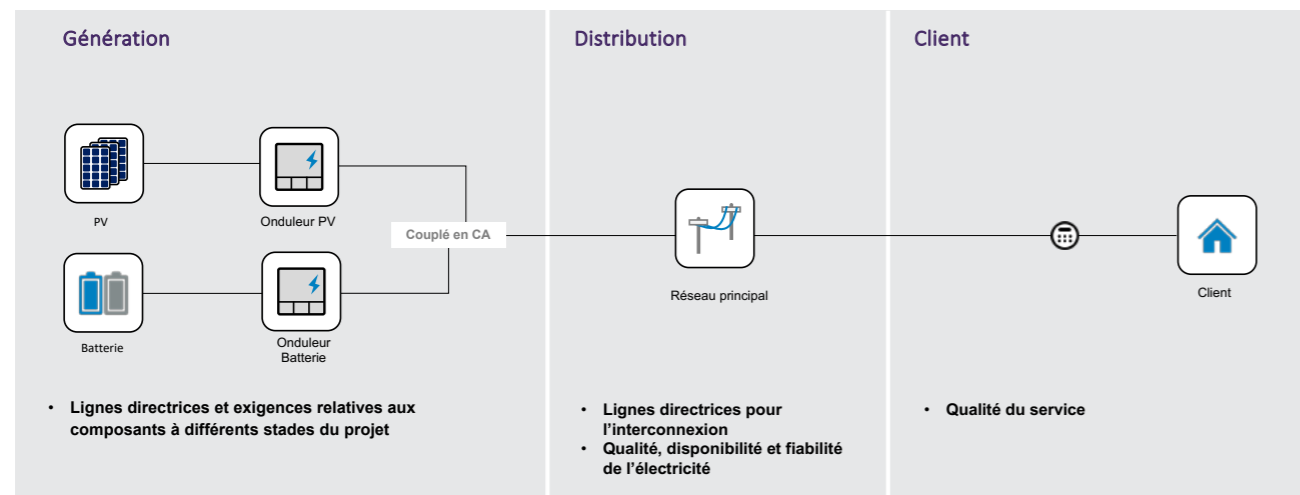
Avant d'approfondir les thèmes abordés, les aspects techniques pertinents sont brièvement abordés dans les sections suivantes de ce produit de connaissance.

## 2 Aspects Techniques de la Réglementation sur les Mini-Réseaux

Les réglementations relatives aux mini-réseaux fixent non seulement les exigences financières, juridiques et commerciales que les développeurs de mini-réseaux doivent respecter, mais aussi certaines exigences techniques essentielles en matière de qualité de service, de sécurité, d'appareils de mesure autorisés, d'options d'interconnexion avec le réseau principal, etc. Le régulateur définit les conditions et les procédures d'obtention

des différents types de licences de mini-réseaux, ainsi que les services aux consommateurs correspondants et les possibilités d'interconnexion avec le réseau. La réglementation relative aux mini-réseaux fournit également des lignes directrices et des exigences pour les composants au cours des différentes étapes de développement d'un projet de mini-réseau.

**Figure 3**  
Aspects techniques de la réglementation relative aux mini-réseaux



La figure 3 représente les différents aspects techniques couverts par les réglementations relatives aux mini-réseaux, qui sont brièvement examinés dans le tableau suivant.

**Tableau 1**  
Aperçu des aspects techniques de la réglementation relative aux mini-réseaux

ASPECTS	CE QUI EST COUVERT
<b>GÉNÉRATION</b>	Des lignes directrices et des exigences sont fournies pour les actifs de production. Les réglementations peuvent faire référence aux normes nationales et/ou internationales applicables. Les lignes directrices en matière de santé et de sécurité sont couvertes par les réglementations aux différents stades de développement du projet et, par la suite, de l'exploitation.
<b>DISTRIBUTION</b>	
<b>QUALITÉ DE L'ÉNERGIE</b>	<p>Du point de vue du client d'un mini-réseau, une bonne qualité d'électricité se traduit par une disponibilité et une fiabilité élevée de l'approvisionnement à une tension stable uniquement.</p> <p>Plus techniquement, la qualité de l'énergie électrique est le résultat de l'impact des appareils connectés et interférant avec les limites des équipements de production et de distribution d'énergie. En particulier pour les mini-réseaux à capacité limitée, un grand nombre d'appareils à faible consommation (par exemple, les lampes LED et de nombreux chargeurs de téléphone) entraîne un facteur de puissance très faible avec une distorsion harmonique élevée de la tension et du courant. Les appareils monophasés peuvent facilement consommer une part importante de la capacité totale installée en raison du déséquilibre des phases et des fluctuations critiques de la charge. Les courants de démarrage des appareils de grande puissance (par exemple, les pompes à eau) peuvent amener les onduleurs à leur limite de courant. En premier lieu, les opérateurs de mini-réseaux doivent surveiller attentivement la violation des limites de tension du réseau et la surcharge, en particulier dans le conducteur neutre en raison des harmoniques.</p> <p>Si le fonctionnement des appareils a une incidence négative sur les spécifications requises pour un fonctionnement sûr et fiable du système, des restrictions ou des limitations de l'utilisation d'appareils de grande puissance doivent être appliquées afin de rétablir des conditions de fonctionnement sûres et acceptables. L'opérateur est entièrement responsable de définir la distorsion harmonique totale maximale acceptable et de compenser le facteur de puissance et le déséquilibre de phase en cas de besoin.</p> <p>Compte tenu de la taille réduite des mini-réseaux, la norme CEI 62257 propose des lignes directrices pour la mesure et l'évaluation de la qualité de l'alimentation électrique dans les mini-réseaux autonomes. Une fois que les mini-réseaux sont raccordés au réseau principal, la réglementation de ce dernier s'applique en fonction des spécifications des appareils.</p>

<p>DISPONIBILITÉ ET FIABILITÉ</p>	<p>La qualité du service pour les mini-réseaux est décrite quantitativement par les paramètres suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité technique des actifs de production et de distribution d'électricité - s'ils sont opérationnels et non perturbés, en cours de réparation ou d'entretien (heures par jour/mois/année).</li> <li>• Fiabilité (interruption de l'approvisionnement en termes de nombre et de durée, à la fois planifiée et non planifiée).</li> </ul> <p>Les paramètres ci-dessus dépendent de l'équilibre entre la production et la demande, qui peut être appréhendé sous deux angles.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilité de la production d'électricité par rapport à la demande : Étroitement liée à la capacité de l'onduleur et à la capacité du générateur de secours . Cela pourrait entraîner des coupures d'électricité en raison d'une insuffisance de courant électrique.</li> <li>• Disponibilité de l'énergie par rapport à la demande : Nécessite une capacité de stockage pour couvrir une disponibilité temporairement faible des ressources renouvelables ou une capacité photovoltaïque installée limitée. Le manque de capacité de stockage peut également entraîner l'arrêt du système en raison d'une pénurie d'énergie.</li> </ul>
<p>EXIGENCES EN MATIÈRE D'INTER-CONNEXION</p>	<p>Si les mini-réseaux doivent être interconnectés au réseau principal à un moment donné, ils doivent être conçus avec la compatibilité nécessaire dès le départ ou mis à niveau ultérieurement. Les normes relatives au réseau sont principalement des normes nationales complétées par des normes techniques internationales disponibles auprès de la Commission électrotechnique internationale ( CEI) et de l'Institut des ingénieurs électriques et électroniques (IEEE).</p> <p>Pour une interconnexion, le réseau de distribution du mini-réseau doit également être de la même qualité que le réseau principal . Cela s'applique si l'opérateur du mini-réseau continue à fonctionner comme un distributeur d'électricité unique (SPD) ou comme une combinaison de SPD et de producteur d'électricité unique (SPP). Des lignes directrices claires doivent être fournies dans les réglementations comme voies d'accès pour les sociétés de mini-réseaux sur ce qui se passera après l'arrivée du réseau principal.</p>
<p>RAPPORTS TECHNIQUES</p>	<p>Les régulateurs exigent que le titulaire d'une licence de mini-réseau rende compte fréquemment des performances techniques et financières de ses systèmes. Si les rapports sont trop fréquents, ils deviennent un fardeau pour la société de mini-réseau, car les exigences en matière de rapports augmentent ses frais généraux. Il existe des outils numériques permettant d'automatiser les processus d'établissement de rapports sans trop d'efforts. Les exploitants de mini-réseaux disposent d'outils appropriés pour générer ces rapports ; parallèlement, les régulateurs disposent également d'outils numériques pour examiner rapidement les rapports de performance des mini-réseaux sur le site.</p>

## 2.1 Le Statu Quo : Principales Observations

Cette section présente les principales observations de l'équipe de l'AFUR et de GET.transform sur le statu quo des réglementations relatives aux mini-réseaux. Les aspects techniques des réglementations relatives aux mini-réseaux sont souvent fixés en fonction des normes les plus élevées disponibles, qui sont développées pour les zones urbaines connectées aux services publics. La mise en place de ces normes élevées pour les réglementations relatives aux mini-réseaux se fait avec la bonne intention de fournir la meilleure qualité de service à la population rurale.

Toutefois, ces exigences sont étroitement liées aux niveaux de tarifs réalisables. Des exigences strictes obligent les développeurs de mini-réseaux à investir davantage de capital au départ et parfois à augmenter leurs dépenses d'exploitation pour se conformer aux exigences réglementaires. En fin de compte, cela se traduit par un tarif plus élevé qui suscite le mécontentement des clients ruraux ; et il devient complexe de réduire le tarif a posteriori sans faire entrer en jeu des subventions supplémentaires.

Les développeurs de mini-réseaux sont également invités à concevoir des systèmes interconnectables avec le réseau principal dès le départ. Certaines réglementations ne traitent même pas les mini-réseaux séparément, mais plutôt comme n'importe quel autre projet d'électrification indépendant. Cette approche augmente les dépenses d'investissement (CAPEX), parfois les dépenses d'exploitation (OPEX) et, en retour, le tarif.

Ce produit de connaissance invite les régulateurs à adopter une approche plus axée sur les mini-réseaux où les normes sont fixées en tenant compte du contexte et des capacités locales. Cela ne signifie pas qu'il faille renoncer à la norme la plus élevée, mais adopter **une approche ascendante** progressive pour mettre en œuvre les normes les plus élevées de manière plus efficace.

Le chapitre suivant est consacré à la compréhension des liens entre les aspects techniques et à la recherche d'une **solution** qui permette d'atteindre une qualité minimale tout en maintenant les implications financières dans une limite acceptable.

## 3 Triangle de la Réglementation Technique entre Sécurité, Fiabilité et Accessibilité Financière

L'interrelation triangulaire entre la sécurité, la fiabilité et l'accessibilité financière devient, à un moment donné, un jeu à somme nulle. Repousser les limites de l'un des aspects aura des conséquences négatives sur les autres. Cette relation peut changer à l'avenir grâce à des solutions innovantes et abordables. Dans ces conditions, l'objectif de l'autorité de régulation devrait être de trouver le **juste milieu** à l'intérieur du triangle. Les cas suivants soulignent davantage cet argument ;

- L'ajout des dispositifs de sécurité les plus élevés entraîne des coûts supplémentaires pour le promoteur, ce qui rend l'électricité moins abordable. Les équipements de sécurité spéciaux peuvent ne pas être facilement disponibles. Leur réparation peut même nécessiter un niveau de compétence particulier, ce qui augmente les temps d'arrêt. **Par conséquent, un système très sûr n'est pas forcément très fiable et abordable.**

- **L'exploitation d'un mini-réseau très fiable** nécessite des électriciens qualifiés, des centres de service à la clientèle efficaces et disponibles 24 heures sur 24, ainsi qu'un ou plusieurs entrepôts locaux. Ces éléments augmentent les coûts d'investissement et d'exploitation, et donc le tarif.

- **Un service d'électricité très abordable** (sans tenir compte de l'impact des subventions) signifie que le développeur devra réduire les coûts d'acquisition des actifs et des services opérationnels. Cela peut avoir un impact sur la sécurité du système (si des produits de qualité inférieure sont achetés pour réduire les dépenses d'investissement) et sur la fiabilité du site (mauvais service à la clientèle et longs temps d'arrêt si les dépenses d'exploitation sont réduites pour diminuer les dépenses globales).

Un système fiable et abordable ne doit pas sacrifier les exigences minimales de sécurité. Les interactions complexes entre ces trois aspects peuvent être intuitives ; cependant, le défi pour un régulateur est de trouver le bon équilibre entre eux. Il existe d'autres aspects techniques qui ne font pas partie du triangle, mais qui ont toujours un impact sur l'accessibilité financière. Ces aspects sont abordés à la fin du chapitre.

Pour garantir la sécurité et la fiabilité des systèmes, il existe des normes techniques internationales et des recommandations pour les énergies renouvelables et les systèmes hybrides destinés à l'électrification rurale, tant pour les composants individuels que pour l'ensemble du système. Pour par exemple, IEC 62257 (système global), IEC 61215 (modules PV), et IEC 61427-1 (batteries).

## 3.1 Fiabilité et Accessibilité Financière

La fiabilité des mini-réseaux est quantifiée par le nombre d'heures de service convenues par jour et le nombre de pannes planifiées et non planifiées par rapport à la disponibilité journalière convenue. La recherche d'un équilibre approprié entre la fiabilité et l'accessibilité financière est abordée à travers deux aspects sous l'égide de la « fiabilité » ;

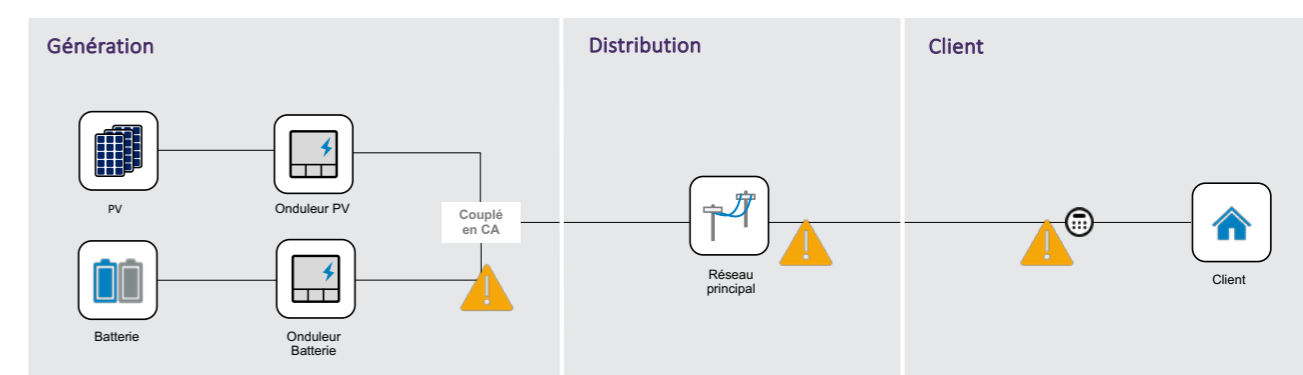
- a) La disponibilité.
- b) La chute de tension admissible qui est liée à la fiabilité du mini-réseau.

### 3.1.1 Disponibilité et Accessibilité Financière

La disponibilité d'un mini-réseau est définie par le nombre de pannes et leur durée totale au cours d'une période de temps. Il convient de mentionner que les pannes peuvent se produire à différents niveaux du mini-réseau (Figure 4). Il peut être

nécessaire de remplacer divers composants en cas de défaillance. Les composants doivent être disponibles sur site ou au moins aussi près que possible du site afin que le temps de réaction puisse être réduit.

**Figure 4**  
Les défaillances de différents composants peuvent avoir un impact sur la fiabilité du mini-réseau



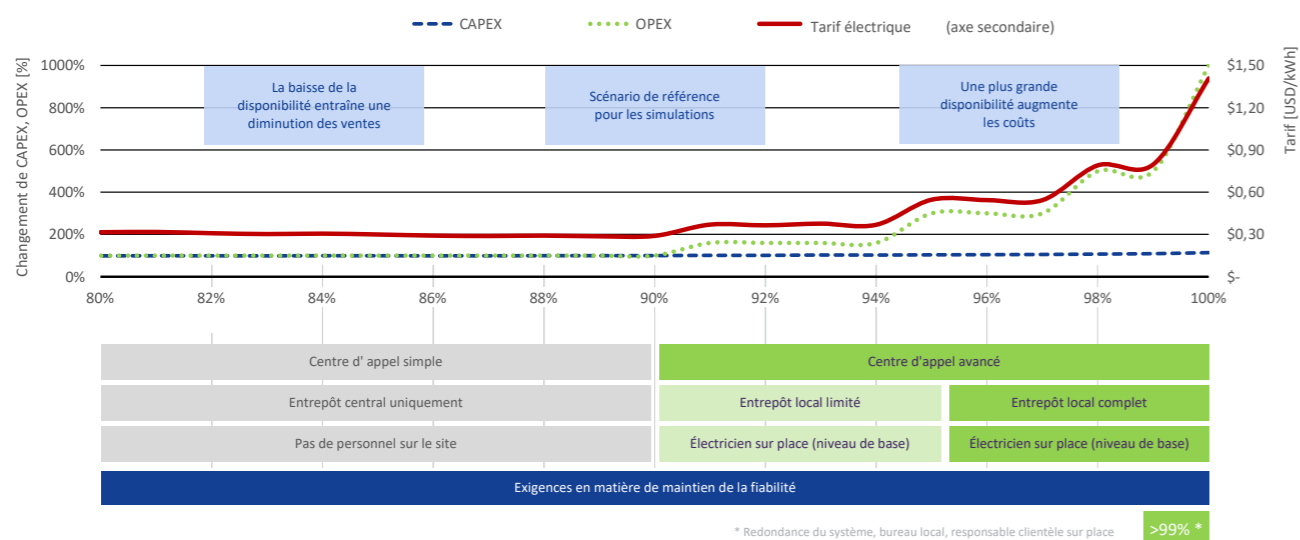
En chiffres, les taux de disponibilité de 99,9 % et 99 % correspondent à des interruptions de service de 8,76 heures et 87,6 heures (3,65 jours) par an sur le site. Les deux niveaux de disponibilité correspondent au niveau de service Tier 5 selon le cadre multi-niveau de l'ESMAP. Une disponibilité de 90 %, qui équivaut à 36,5 jours d'indisponibilité par an, correspond au niveau 4.

Pour réduire le nombre de pannes, divers composants de remplacement doivent être disponibles en stock et aussi près que possible du site afin de raccourcir les délais de réaction.

L'introduction d'une exigence de disponibilité plus élevée dans la réglementation signifie que le développeur de mini-réseau devra disposer d'un entrepôt local, d'un électricien qualifié sur le site, et d'un centre d'appel de pointe.

Des simulations de plusieurs scénarios ont été réalisées pour visualiser l'impact de la haute disponibilité du système sur le CAPEX, l'OPEX et le tarif des mini-réseaux. Le scénario de base est simulé en considérant 75 % du niveau de subvention du CAPEX requis. Les hypothèses sous-jacentes aux simulations sont présentées à l'annexe 1. Les différents scénarios simulés sont les suivants.

**Figure 5**  
Impact sur les CAPEX, les OPEX et les tarifs d'une plus grande fiabilité technique du mini-réseau

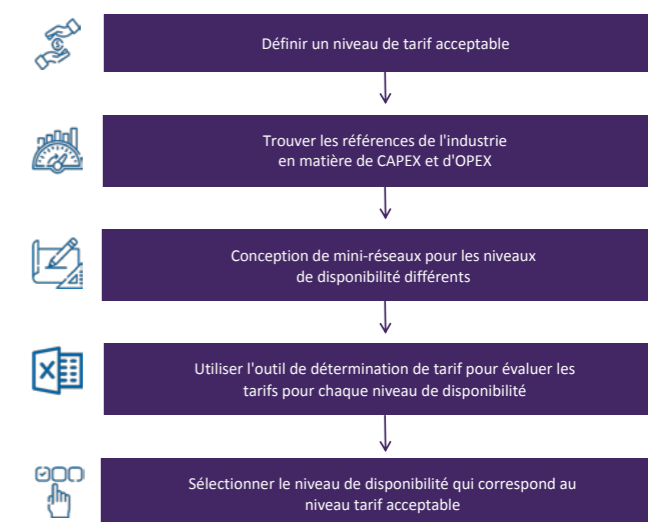


• **Disponibilité plus faible (<90%)** : Ce niveau se caractérise par un entrepôt central sans personnel sur place et un simple centre d'appel. Par conséquent, dans un tel scénario, une société de mini-réseau peut mettre plus de temps à répondre aux problèmes techniques et aux réclamations des clients, ce qui se traduit par une disponibilité plus faible et une réduction des ventes d'électricité.

• **Disponibilité plus élevée** : Ce niveau est simulé en deux étapes : a) pour une disponibilité allant jusqu'à 95 %, la société de mini-réseau met en place un centre d'appel de pointe et dispose d'un entrepôt local limité (conservant des pièces de rechange de petits articles tels que des fusibles) et b) pour un niveau de disponibilité supérieur à 95 %, outre un centre d'appel de pointe, l'opérateur de mini-réseau dispose d'un entrepôt local complet (par exemple, il dispose d'onduleurs de rechange sur le site) et d'électriciens de haut niveau pour résoudre immédiatement tout problème technique. Si ces pratiques améliorent les performances de l'opération mini-réseau, elles augmentent également les dépenses d'investissement, les dépenses d'exploitation et le niveau des tarifs.

En général, les réglementations définissent le temps d'arrêt planifié et non planifié de par connexion et par an. **Par exemple, le régulateur peut exiger une disponibilité de 99,9 %, soit 8,76 heures d'interruption par an. La simulation révèle que pour une telle exigence, le tarif pourrait atteindre 1,4 USD/kWh.** Cependant, si un niveau de tarif acceptable est plutôt de **0,3 USD/kWh**, cela se traduira par 876 heures de temps d'arrêt planifié et non planifié par connexion et par an (**disponibilité de 90 %**). Par conséquent, les régulateurs devraient considérer le niveau cible abordable et réalisable pour le contexte local. Sur la base de cette compréhension, une approche décisionnelle pour établir la disponibilité en nombre pourrait être la suivante.

**Figure 6**  
Approche décisionnelle pour la sélection des exigences appropriées en matière de disponibilité des mini-réseaux

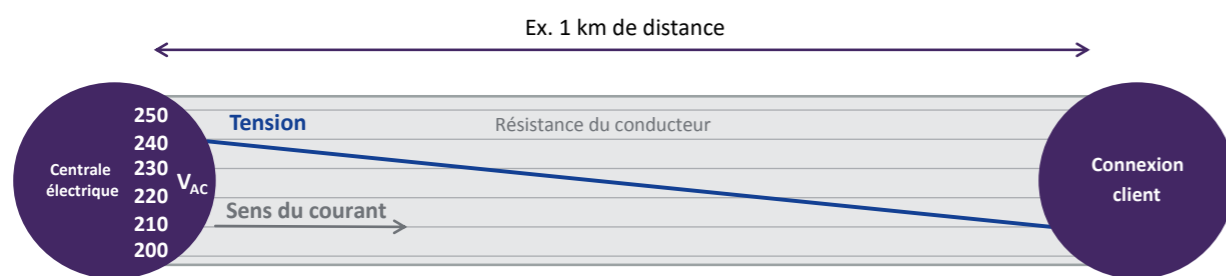


### 3.1.2 Chute de Tension Admissible et Accessibilité Financière

**Dans le cadre de l'aspect « fiabilité », un autre sujet pertinent est la chute de tension admissible.** Les appareils du consommateur peuvent être moins performants ou ne plus fonctionner si la tension est inférieure à un certain niveau. La tension chute tout au long du réseau de distribution en raison de la résistance des conducteurs. Plus la distance parcourue est grande, plus la chute de tension est importante. Les équipements de production des mini-réseaux doivent donc être aussi proches que possible des charges, et les charges de forte puissance ne doivent être utilisées qu'à proximité des équipements de production.

Entre autres facteurs, le niveau de chute de tension dépend principalement de la section du câble et de la longueur de la ligne de distribution, en combinaison avec le courant de charge constant et transitoire. Les pertes en ligne et les sections de câble ont une relation linéaire inverse, tandis que la section de câble et les coûts ont une relation presque linéaire entre eux, compte tenu de l'installation et des matériaux supplémentaires. Plus la section est grande, plus les pertes sont faibles. Toutefois, les câbles de plus grande section sont comparativement plus chers en termes de coût des matériaux et d'efforts d'installation. Les consommateurs situés à l'extrémité d'une ligne électrique longue distance sont généralement plus affectés par la chute de tension.

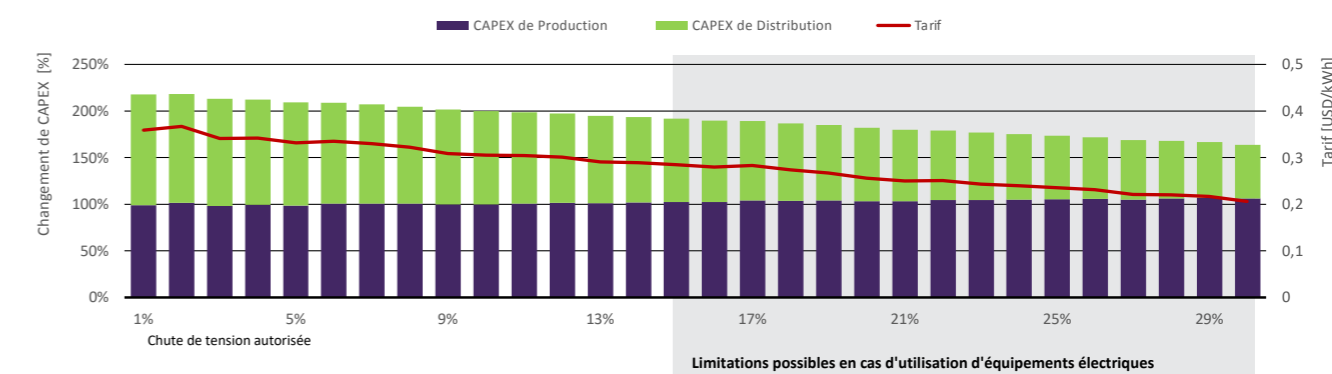
**Figure 7**  
Démonstration conceptuelle de la chute de tension à travers la distance



La norme CEI 60038 « tensions standard » définit les limites de sécurité de fonctionnement des appareils par rapport à la tension nominale. Dans des conditions normales de fonctionnement, la tension d'alimentation ne doit pas s'écarter de la tension nominale du système de plus de  $\pm 10\%$  au niveau du raccordement du client ou du point de comptage. Outre les variations de tension au niveau de la borne d'alimentation, des

chutes de tension peuvent se produire dans les installations du consommateur jusqu'au point d'utilisation, de l'ordre de  $-5\%$  supplémentaires, ce qui est acceptable. Certains appareils électriques modernes peuvent avoir une alimentation électrique à large gamme et fonctionner dans une certaine gamme de tension qui est beaucoup plus élevée que  $-10\%$  de la tension nominale (à l'extrémité inférieure).

**Figure 8**  
Impact des chutes de tension autorisées sur les CAPEX, OPEX et le niveau tarifaire des mini-réseaux



Les simulations du système avec une fiabilité ciblée de 90 % révèlent que le CAPEX global et le niveau tarifaire diminueront si une chute de tension plus importante est autorisée jusqu'au moment où les appareils électriques commencent à être moins performants. Les dépenses d'investissement liées à la production augmenteront légèrement pour couvrir les pertes, mais la réduction des dépenses d'investissement liées à la distribution aura un impact plus important. Dans l'ensemble, le niveau des CAPEX diminuera si une chute de tension plus importante est autorisée. À titre d'exemple, avec des considérations de coûts similaires, si l'exigence de chute de tension passe de 5 % à 15 %, le tarif pourrait passer de 0,33 USD/kWh à 0,29 USD/kWh.

La tension chute sur la distance de la ligne électrique, avec une absence de chute à la source et la tension la plus basse à l'extrémité de la ligne. La chute de tension s'accompagne de pertes de distribution non payées et doit donc être limitée. Pour un examen plus approfondi, le mini-réseau doit être divisé

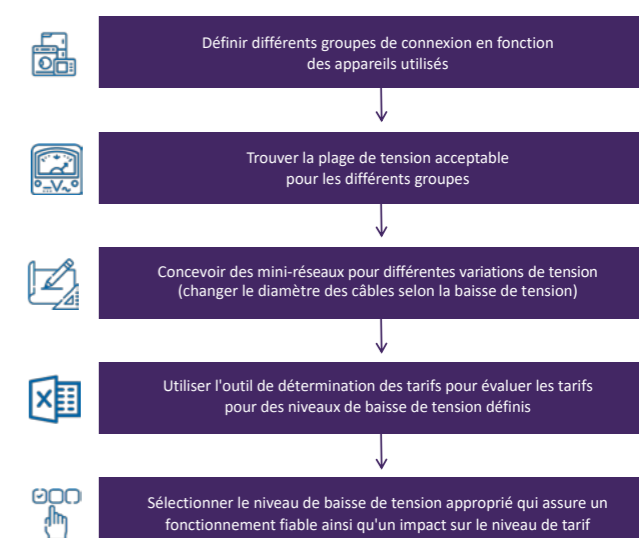
en deux zones : la plus proche de la source de production d'électricité, dans un rayon d'environ 1 km, et les extensions plus éloignées couvrant de plus grandes distances. Pour une qualité d'approvisionnement optimale, la zone centrale doit être entièrement conforme à la norme CEI 60038, c'est-à-dire qu'elle doit respecter les limites de tension de  $\pm 10\%$ , mais aussi les limites d'intensité de l'électricité,  $\pm 10\%$  limites de tension, mais cela ne signifie pas nécessairement qu'aucun client ne peut se connecter en dehors de cette zone, qui doit être limitée aux petits appareils. Une enquête minutieuse est nécessaire pour s'assurer que les appareils disponibles dans les zones les plus reculées sont conformes à la tension inférieure et ne posent pas de problème de sécurité pour les clients.

Pour cet accès de base à l'électricité rurale, les régulateurs peuvent permettre une chute de tension plus élevée pour les extensions les plus éloignées des mini-réseaux, mais seulement après s'être assurés que les clients sont formés et

équipés d'appareils et de dispositifs de protection entièrement compatibles avec la tension inférieure. Un modèle de réglementation pourrait être le suivant : « **Les opérateurs de mini-réseaux sont autorisés à connecter des clients dans les extensions de ligne les plus éloignées dans le but de fournir un accès de base uniquement, même si la tension d'alimentation peut être constamment inférieure à 10 % de la tension nominale. L'opérateur a l'entière responsabilité de n'accepter qu'un maximum de 100W par client, et doit s'assurer que les appareils utilisés sont entièrement compatibles avec la tension inférieure, conformément à la plaque signalétique, et qu'une protection appropriée est installée contre les surintensités et les surtensions** ». Le texte ne doit être considéré que comme un exemple.

Le processus global de prise de décision à cet égard peut être le suivant.

**Figure 9**  
Approche décisionnelle recommandée pour le réglage du niveau de tension approprié



## 3.2 Sécurité et Accessibilité Financière

Les lignes directrices en matière de santé et de sécurité sont généralement abordées dans les réglementations relatives aux mini-réseaux, qui couvrent les recommandations pendant le transport, l'installation et l'exploitation. Par ailleurs, le concept de « sécurité » est également lié aux exigences techniques, par exemple aux normes des composants et à la qualité de l'énergie. Le concept de qualité de l'énergie a été introduit

dans la **section 2**. Une **mauvaise qualité de l'alimentation peut entraîner une défaillance des équipements et une surchauffe des systèmes de distribution, ce qui peut compromettre la sécurité du système**. Dans le présent document, un onduleur est pris comme exemple pour montrer l'impact de la qualité de l'énergie sur l'accessibilité financière. L'impact des normes relatives aux composants est également abordé ultérieurement.

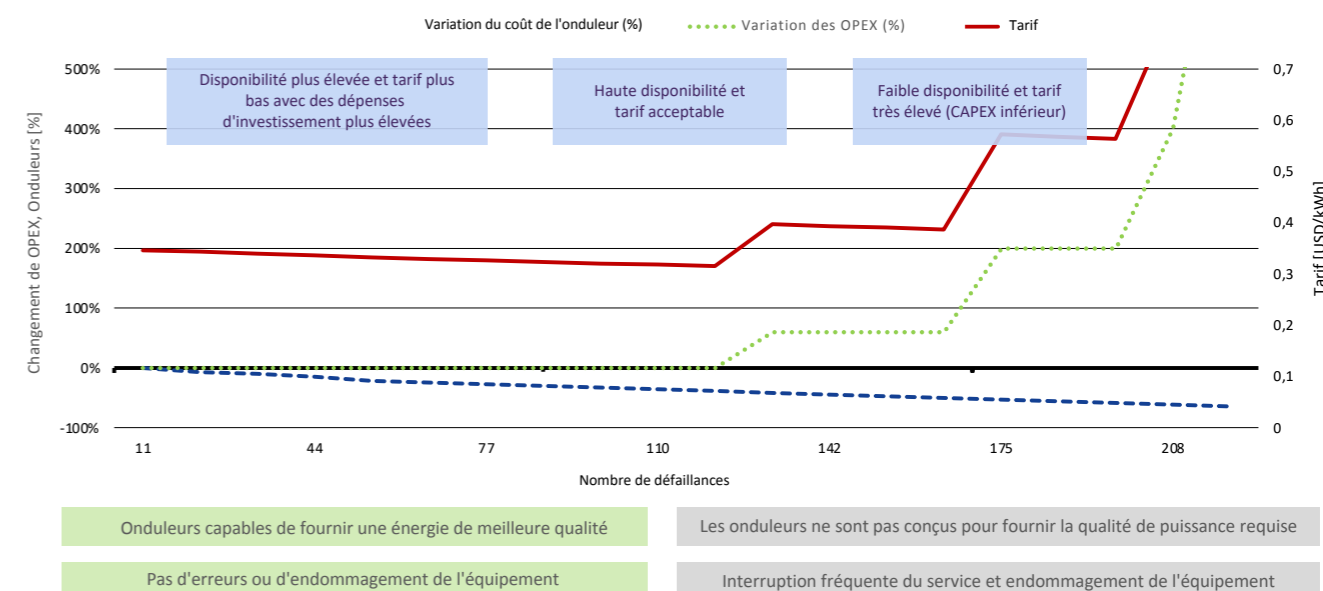
### 3.2.1 Impact de la Qualité de l'Électricité

L'onduleur est le « cerveau » du mini-réseau, qui règle la tension et la fréquence du système, équilibre la demande et l'offre en fournissant une puissance réactive ou en fournissant une puissance plus élevée pendant une courte période. La distorsion harmonique résulte du courant non sinusoïdal consommé par les appareils, l'impédance du réseau et les limites de l'onduleur.

Les exigences en matière de qualité de l'énergie diffèrent en fonction des appareils utilisés. Par exemple, les exigences sont de plus en plus strictes entre les appareils domestiques et les appareils plus commerciaux et productifs. Certains appareils sont sensibles aux variations de tension transitoires, de courte durée, etc.

Si des onduleurs de mauvaise qualité sont utilisés, ils risquent de ne pas pouvoir gérer les mini-réseaux à forte utilisation productive, ce qui entraînerait des dommages sur les appareils. Les onduleurs haut de gamme sont capables de mieux gérer de telles situations, mais ils sont aussi comparativement plus coûteux. Cela ne signifie pas que tous les onduleurs « bon marché » sont mauvais en soi, mais si leurs performances techniques ne sont pas adaptées à l'utilisation visée, **ils peuvent entraîner des défaillances involontaires**. Ces problèmes peuvent inclure des déclenchements intempestifs dus à des charges élevées, des défaillances du système de communication des onduleurs, des performances médiocres dues à l'accumulation de poussière, à une mauvaise ventilation, etc. et des **défaillances de composants (condensateurs, disjoncteurs DC)**, entre autres.

**Figure 10**  
Démonstration conceptuelle des défaillances d'onduleurs sur les CAPEX, OPEX et tarifs



Une figure conceptuelle est présentée ici pour démontrer l'impact d'une mauvaise sélection des onduleurs. Si l'onduleur choisi n'est pas en mesure de maintenir la qualité de l'énergie requise, il en résultera plusieurs pannes. Même si les dépenses d'investissement sont moindres, les dépenses d'exploitation augmentent pour résoudre les problèmes, de même que les tarifs. Contrairement à ce scénario, les onduleurs appropriés maintiendront une disponibilité élevée, garantissant un fonctionnement sûr et un tarif durable.

Pour définir les exigences de manière appropriée, il faut tenir compte des déséquilibres de tension, des variations de tension transitoires, de courte et de longue durée, et des variations de fréquence. Pour garantir la sécurité des opérations, il est important de prendre les mesures suivantes.

- **Étape 1.** Catégorisation des niveaux de qualité d'énergie appropriés : Les régulateurs doivent définir au moins deux ou trois catégories, par exemple le niveau de base (ménages ruraux), le niveau intermédiaire (commercial) et le niveau avancé (charges productives, charges critiques).
- **Étape 2.** Définir la variation de tension pour chaque catégorie : La plupart des appareils ménagers peuvent fonctionner avec une gamme de tensions. Pour les catégories avancées (commerciales, productives et même les ménages avec des charges élevées), la variation admissible doit être définie. Ce point a été abordé dans la section 3.1.2.

- **Étape 3.** Définir le déséquilibre de tension pour chaque catégorie : Cette propriété est particulièrement importante pour les consommateurs triphasés (catégories avancées). Un exemple typique pour catégories avancées est d'être <5 %, cependant, compte tenu du type de charges productives, il peut être encore plus bas (<3 %).
- **Étape 4.** Régulation de la fréquence : Le réglage de la variation de fréquence autorisée en milieu rural est un défi. La plupart des onduleurs utilisent une stratégie de contrôle actif de la puissance basée sur la fréquence. Pour les appareils sensibles, la variation doit être faible, généralement à  $\pm 1$  Hz de la fréquence nominale.
- **Étape 5.** Transitoires : Les catégories avancées comportant des appareils sensibles peuvent être endommagées par des transitoires. Ils doivent donc être équipés de dispositifs de protection contre les surtensions.
- **Étape 6.** Variations de tension de courte et de longue durée : Les variations de tension de courte durée (plus d'un demi-cycle, mais moins d'une minute) et de longue durée (plus d'une minute) peuvent toutes deux avoir un effet négatif sur les appareils sensibles. Les valeurs typiques pour les catégories avancées sont <1 par jour et <5 par jour pour les variations de tension à court et à long terme.

**Figure 11**  
Les charges importantes sont plus sensibles à la qualité de l'énergie que les appareils ménagers typiques



© INENSUS

La qualité de l'énergie dépend de l'efficacité du système d'onduleur et de sa compatibilité avec la capacité du réseau de distribution à gérer les courants de charge individuels. En outre, elle tient compte de l'influence des autres clients sur la charge globale du réseau. La capacité de l'onduleur et le réseau de distribution ont tous deux leurs limites, ce qui peut nécessiter

des restrictions sur l'utilisation d'appareils de grande puissance. Cette restriction peut prendre la forme d'une interdiction totale d'utilisation, d'une restriction basée sur la localisation géographique au sein d'un mini-réseau ou d'une utilisation limitée à des heures spécifiques, en fonction de la disponibilité de l'électricité.

### 3.2.2 Impact des Normes sur les Composants

Tous les composants et leurs normes ont également un impact direct sur la sécurité et l'accessibilité financière. Toutefois, le présent rapport s'en tiendra à la discussion limitée aux composants qui relient les consommateurs, partant des poteaux aux appareils, c'est-à-dire la ligne directe, le compteur, le tableau d'installation avec les disjoncteurs et les interrupteurs, et le câblage intérieur.

Pour le comptage, les développeurs de mini-réseaux ont trois options : les compteurs intelligents, les compteurs à prépaiement et les compteurs à post-paiement. Dans le cas d'une installation à l'intérieur, les développeurs de mini-réseaux peuvent utiliser

- a. Un tableau prêt à l'emploi avec des ampoules fixes et des points de charge adapté à l'installation en milieu rural, ou
- b. Un tableau prêt à l'emploi pour l'installation urbaine avec des disjoncteurs de plus grande capacité.

D'autre part, **l'opérateur peut installer des disjoncteurs de 5A au lieu de 16A ou 25A, ce qui offre déjà une sécurité suffisante tout en étant moins coûteux.** En combinant ces options, différents scénarios peuvent être élaborés.

**Tableau 2**  
Différentes catégories de compteurs et leur impact

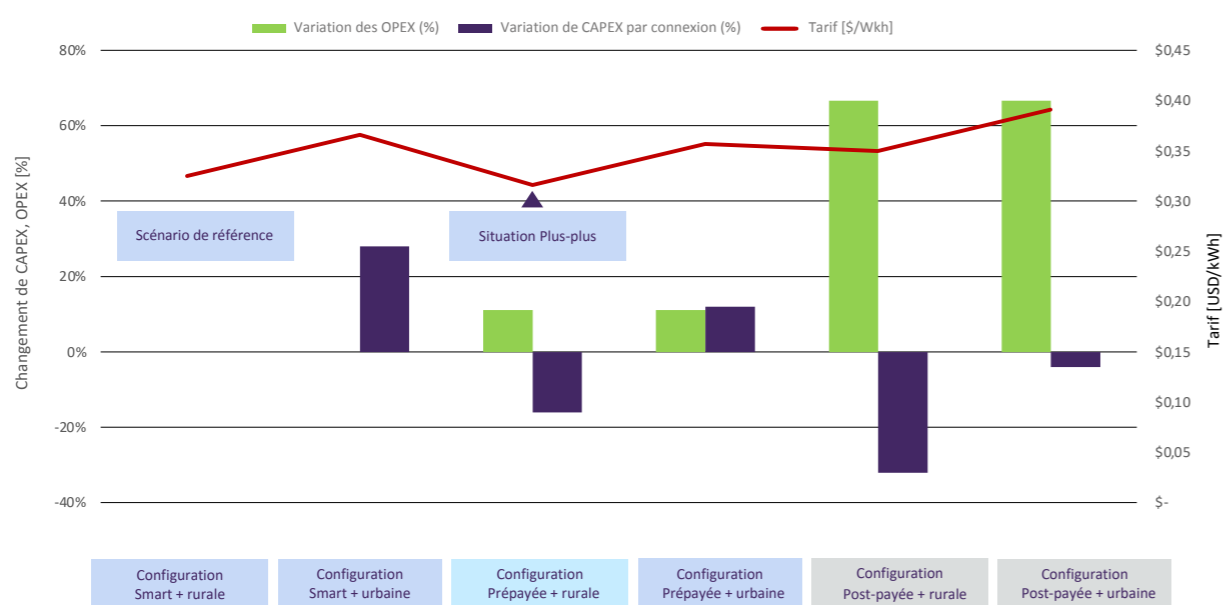
TYPE DE COMPTEUR	IMPACT
Compteurs intelligents (recharge automatique, données granulaires, plus de fonctionnalités) Exemples : SparkMeter, SteamaCo, Inhemeter, etc. utilisés au Nigeria et en Sierra Leone, entre autres <sup>1</sup>	+ Réduction de l'OPEX - Augmentation des dépenses d'investissement + Protection des données et transparence Quelle quantité de données est suffisante ( analyse coût-bénéfice) ?
Compteurs à prépaiement (basé sur le jeton STS avec SMS) Exemples : <i>Inhemeter, Calin meter, etc. utilisés en Tanzanie, au Nigeria et au Myanmar, entre autres</i>	+ Réduction des OPEX et - Augmentation des dépenses d'investissement + Les données relatives à la recharge fréquente des compteurs indiquent déjà bien le modèle de consommation.
Compteurs à post-paiement (relevé manuel, facturation, recouvrement) Exemples : <i>Peu utilisé dans les mini-réseaux. Même dans les zones connectées au réseau, des pays comme le Kenya, le Nigeria et le Ghana, entre autres, passent de solutions post-payées à des solutions prépayées.</i>	- Augmentation de l'OPEX (vol, ressources humaines nécessaires) + Baisse des dépenses d'investissement (CAPEX)

1) Les noms des solutions de comptage mentionnés dans le tableau 2 ne sont que des exemples. AFUR, GET.transform et les partenaires associés ne soutiennent aucune marque de solutions par rapport à d'autres.

L'impact sur les tarifs des situations expliquées ci-dessus est illustré dans la Figure 12. La simulation du scénario mentionné suggère que la **combinaison de compteurs intelligents et de panneaux ruraux prêts à l'installation est aussi bonne que les compteurs prépayés et panneaux ruraux prêts à l'installation, si l'on considère leur impact sur les tarifs.** Toutefois, la

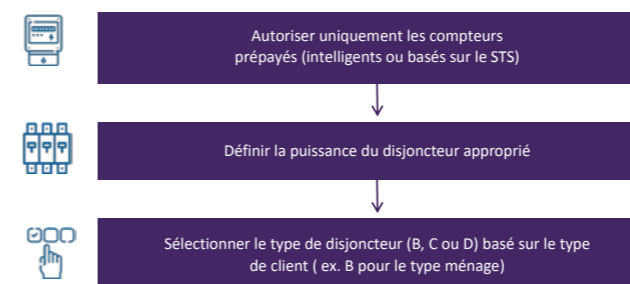
combinaison de compteurs prépayés et de panneaux ruraux prêts à l'emploi nécessitera moins de dépenses d'investissement que la combinaison de compteurs intelligents et de panneaux ruraux. Pour les autres combinaisons, le tarif est plus élevé.

**Figure 12**  
Impact sur le tarif pour les compteurs et les «Ready Board» sélectionnés



Le principal enseignement que l'on peut tirer du site est qu'une combinaison de technologies de compteurs à prépaiement et de panneaux d'installation appropriés garantira la sécurité et la fiabilité du service de mini-réseau tout en proposant un tarif abordable. Un processus de prise de décision est recommandé pour les régulateurs.

**Figure 13**  
Approche décisionnelle recommandée pour la norme des composants



**BOITE 1.**  
Tenir compte du contexte local : L'équilibre entre les trois aspects clés doit être établi en fonction des besoins et des contraintes spécifiques du pays.

**Exemple 1 :** Dans une communauté rurale, certains clients peuvent être localisés de façon « dispersés », ce qui entraîne des chutes de tension plus importantes. Toutefois, s'il s'agit de ménages ayant des besoins d'éclairage de base, jusqu'à une certaine chute de tension, des appareils de bonne qualité comme les LED avec des commandes actives fonctionneront de manière fiable. Exemple de pays : La Zambie compte de nombreuses localités non électrifiées avec des ménages « épars ».

**Exemple 2 :** Les consommateurs pourraient être très sensibles aux changements de tarifs sur le site. En général, les ménages peuvent se permettre un montant mensuel fixe. Des exigences strictes en matière de disponibilité entraîneront une augmentation des tarifs qui, à son tour, mécontentera les clients. Il est important de comprendre la capacité financière de base des communautés et leur perception des tarifs.

**Exemple 3 :** Une fois définies, les exigences doivent être vérifiées pour garantir la conformité avec les exigences techniques. Certains pays ont désigné une autorité chargée de définir les exigences techniques et une autre chargée de les vérifier. Avec des lignes directrices claires et du personnel formé, un processus rationalisé pourrait contribuer à garantir le niveau de conformité attendu.

Exemple de pays : Au Nigeria, l'Organisation des normes du Nigeria (SON) fixe les normes techniques et l'Agence nigériane des services de gestion de l'électricité (NEMSA) vérifie les installations.

## 4 Au-delà du Triangle : L'impact d'Autres Aspects sur l'Accessibilité Financière

D'autres aspects techniques qui se situent en dehors du triangle de la fiabilité, de la sécurité et de l'accessibilité financière, comme les exigences d'interconnexion des réseaux et les rapports techniques, ont également un impact direct sur l'accessibilité

financière. L'état de préparation à l'interconnexion et son impact sont examinés ici pour permettre aux régulateurs d'apprécier les sujets situés au-delà du triangle et les lignes directrices sur la manière dont ils peuvent être soigneusement définis.

### 4.1 Préparation à l'Interconnexion

Les mini-réseaux peuvent être tenus d'être prêts pour l'interconnexion au réseau, en particulier s'ils sont construits à proximité du réseau principal (5 à 20 km selon le rythme d'avancement du réseau). La préparation à l'interconnexion exige que le réseau de distribution et les points de connexion des clients soient conformes au code du réseau, ce qui pourrait être coûteux pour un mini-réseau au début. Par exemple, un poteau de 9 mètres peut être exigé par le code national du réseau. Au lieu de cela, un poteau de 7,5 mètres peut être facilement utilisé dans les zones rurales, car l'espace libre pour les gros véhicules n'est pas un problème dans les zones rurales profondes. Cela pourrait réduire les dépenses d'investissement, ce qui, à l'adresse, a un impact positif sur le tarif. Toutefois, s'il est prévu que le réseau principal arrive dans un délai défini, une certaine conformité au réseau pourrait être imposée dès la phase de conception. Le coût peut augmenter jusqu'à 25 % pour

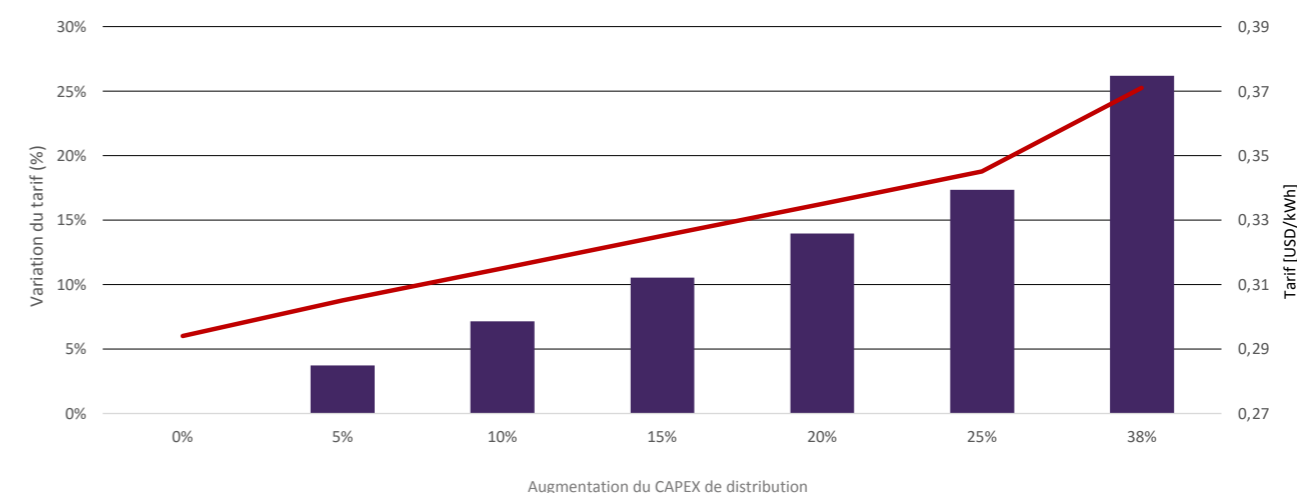
être conforme au réseau<sup>2</sup>. Les coûts augmenteront encore si le transformateur est nécessaire pour se connecter à un réseau moyenne tension (MT). Cela a un impact sur le tarif, comme l'illustre la figure 14.

Les composants supplémentaires ou les mises à niveau du site nécessaires pour être conformes au réseau peuvent être les suivants

- Une section plus élevée des câbles,
- Transformateur avec l'appareillage de commutation MV et ses accessoires,
- Appareils de commutation basse tension (BT), et
- Des disjoncteurs plus puissants du côté du client (par exemple, 16A).

Figure 14

Impact sur les coûts de distribution et les tarifs du niveau de préparation d'un mini-réseau à s'interconnecter au réseau électrique



**L'augmentation des dépenses en capital pour la distribution peut atteindre 38 % si l'on tient compte des transformateurs. Cela peut se traduire par une augmentation du tarif de 0,27 US\$/kWh à 0,37 US\$/kWh.**

Par ailleurs, les pratiques d'installation ont également un impact sur le tarif. Par conséquent, l'autorité de régulation devrait faire preuve de prudence lorsqu'elle fixe une certaine exigence. Une installation de haute qualité peut nécessiter le recrutement de personnel à l'extérieur du pays, ce qui augmente les coûts et, par conséquent, les tarifs. Pour améliorer les capacités locales, la formation des techniciens est probablement l'option la plus rentable. Une solution consiste à déployer un institut de formation pour y parvenir, mais cela comporte un risque de monopole. Pour définir soigneusement les exigences en matière de préparation à l'interconnexion, le régulateur doit adopter l'approche suivante.

- **A quelle distance se trouve le réseau ?** Les régulateurs peuvent se référer à la stratégie ou au plan d'électrification rurale (le cas échéant) pour sélectionner les zones non

électrifiées et déterminer les zones situées à une distance de 5 à 20 km du réseau principal (cette distance peut également être de 25 km en fonction de la rapidité avec laquelle le réseau se rapproche). Ces zones, si elles sont envisagées pour des mini-réseaux, doivent être conformes au réseau principal à un moment donné pour l'interconnexion.

- **Déterminez le degré de préparation à l'interconnexion et son impact dans votre pays.** Il est important de concevoir le système avec et sans préparation au réseau afin de déterminer les différences en termes de CAPEX et d'OPEX. L'outil tarifaire disponible peut être utilisé pour déterminer la différence de tarif. Si la différence est insignifiante, les mini-réseaux peuvent être prêts pour l'interconnexion dès le départ ; si le cas contraire, les systèmes peuvent être mis à niveau lorsque le réseau arrive.

- Les régulateurs devraient définir différents niveaux sur la base des deux étapes susmentionnées afin de préciser à quel moment les mini-réseaux doivent être prêts pour l'interconnexion.

<sup>2</sup>) <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31772>

## 5 Conclusion

Les réglementations relatives aux mini-réseaux sont un outil essentiel pour libérer le potentiel des solutions de mini-réseaux basées sur les énergies renouvelables, pour développer un secteur en réduisant les risques des investissements et, en fin de compte, pour fournir une électricité sûre, fiable et abordable aux régions rurales non électrifiées d'Afrique. Les régulateurs, tout en fixant les exigences techniques dans les réglementations, doivent également prendre en compte leur impact sur d'autres aspects, en particulier l'accessibilité financière. La recommandation est que les régulateurs s'inspirent des meilleures pratiques et normes, mais qu'ils suivent en fin de compte un processus de prise de décision systématique et fondé sur des données pour définir les exigences qui correspondent aux besoins locaux et à la capacité de leurs emplacements géographiques.

L'idéal serait que les mini-réseaux servent de noyau de développement pour commencer à fournir de l'électricité aux communautés rurales et s'adaptent constamment à leur demande croissante. Les étapes de ce parcours doivent être franchies de manière rentable. Une fois que le réseau principal arrive, les mini-réseaux doivent avoir la possibilité de continuer à servir de systèmes interconnectés au réseau. Dans un tel scénario, les mini-réseaux doivent soutenir cette transition par le biais de la compatibilité technique des actifs sans mettre en péril la sécurité de l'investissement et sans compromettre la sécurité des clients.

## 6 Annexe I

Le tableau suivant résume les principales hypothèses sous-jacentes des simulations. Les simulations ont été réalisées par les experts de GET.transform.

### SIMULATION

### HYPOTHESES

#### Disponibilité et accessibilité financière

- Simulations Homer avec une fiabilité du système définie X%. Par exemple, un système simulé avec une fiabilité de 80 % est un système photovoltaïque de 32 kWp avec une batterie de 68 kWh et un onduleur de 12 kW, tandis qu'un mini-réseau fiable à 90 % est un système de 39 kWp avec 76 kWh de stockage en batterie et 10 kW d'onduleur de batterie pour un profil de charge typique (123 kWh/jour).
- Les pertes techniques et commerciales et une marge de réserve de 25 % au total sont prises en compte pour déterminer le tarif.
- Durée de vie du projet : 20 ans.
- Subvention de 75 % pour les coûts d'investissement (cas de base). La part de la subvention varie en fonction des besoins totaux en CAPEX.
- Nombre total de clients : 205 (200 en monophasé, 5 en triphasé).
- Les coûts CAPEX, OPEX et de développement du projet ont été supposés sur la base des connaissances sectorielles des experts de GET.transform et des études de référence disponibles sur les coûts, telles que
  - o ESMAP (2017). [Étude comparative des coûts d'investissement des mini-réseaux solaires photovoltaïques.](#)
  - o AMDA (2020). [Benchmarking Africa's mini-grids \(Analyse comparative des mini-réseaux africains\).](#)
  - o Rocky Mountain Institute (2018). [Les mini-réseaux dans l'argent. Six façons de réduire les coûts des mini-réseaux de 60 % pour l'électrification rurale.](#)

#### Chute de tension admissible et accessibilité financière

- Simulations Homer avec une fiabilité du système de 90 %. Le profil de la charge de base (123 kWh/jour) est ensuite mis à l'échelle pour simuler les pertes tout au long de la ligne de distribution (en tant qu'indicateur des différentes chutes de tension). Par exemple, un mini-réseau avec une chute de tension de 10 % par rapport aux valeurs nominales se traduit par un système photovoltaïque de 40 kWp, alors que pour permettre une chute de tension de 30 %, la capacité passe à 52 kWp pour couvrir les pertes et continuer à répondre à la même demande.
- Les pertes techniques et commerciales et une marge de réserve de 25 % au total sont prises en compte pour déterminer le tarif.
- Durée de vie du projet : 20 ans.
- Subvention de 75 % pour les coûts d'investissement (cas de base). La part de la subvention varie en fonction des besoins totaux en CAPEX.
- Nombre total de clients : 205 (200 en monophasé, 5 en triphasé).
- CAPEX, OPEX et coûts de développement du projet selon les normes industrielles.
- Le coût de distribution est ajusté de manière linéaire en fonction de la capacité (section) des câbles aériens. Cette hypothèse tient compte non seulement des coûts des câbles, mais aussi de l'installation et des matériaux supplémentaires (par exemple, des poteaux plus solides). Sur la base de cette compréhension, le coût de distribution est ajusté de manière linéaire.

---

## Impact de la qualité de l'électricité

---

- Les résultats de la simulation Homer avec une fiabilité du système de 90 % sont pris en compte. Le coût de l'onduleur (10 kW) est ajusté, en supposant que le CAPEX/kW de l'onduleur est linéairement lié au nombre de panes. Les relations peuvent être différentes en réalité. Par conséquent, les chiffres ne doivent être utilisés que pour comprendre les concepts.
- Les pertes techniques et commerciales et une marge de réserve de 25 % au total sont prises en compte pour déterminer le tarif.
- Durée de vie du projet : 20 ans.
- Subvention de 75 % pour les coûts d'investissement (cas de base). La part de la subvention varie en fonction des besoins totaux en CAPEX.
- Nombre total de clients : 205 (200 en monophasé, 5 en triphasé).
- CAPEX, OPEX et coûts de développement du projet selon les normes industrielles.
- L'OPEX est lié aux performances de l'onduleur. Plus le nombre de défaillances est élevé, plus l'OPEX augmente également. Les niveaux d'OPEX sont les mêmes que ceux des autres simulations présentées à la section 3.1.1.

---

## Impact des normes sur les composants

---

- Les résultats de la simulation Homer avec une fiabilité du système de 90 % sont pris en compte. Différents scénarios CAPEX sont créés avec les combinaisons définies (compteur intelligent + installation intérieure rurale, compteur intelligent + installation intérieure urbaine, compteur prépayé + installation intérieure rurale, compteur prépayé + installation intérieure urbaine, compteur post-payé + installation intérieure rurale, compteur post-payé + installation intérieure urbaine).
- Les pertes techniques et commerciales et une marge de réserve de 25 % au total sont prises en compte pour déterminer le tarif.
- Durée de vie du projet : 20 ans.
- Subvention de 75 % pour les coûts d'investissement (cas de base). La part de la subvention varie en fonction des besoins totaux en CAPEX.
- Nombre total de clients : 205 (200 en monophasé, 5 en triphasé).
- CAPEX, OPEX et coûts de développement du projet selon les normes industrielles.

---

## Préparation à l'interconnexion

---

- Les résultats de la simulation Homer avec une fiabilité du système de 90% sont pris en compte. Pour déterminer l'impact de l'état de préparation à l'interaction, le coût de distribution est augmenté sur le site par paliers de 5 % jusqu'à 25 %. Les tarifs sont documentés. Si un petit transformateur est considéré, le coût de distribution peut augmenter jusqu'à 38%, ce qui est également illustré.
  - Les pertes techniques et commerciales et une marge de réserve de 25 % au total sont prises en compte pour déterminer le tarif.
  - Durée de vie du projet : 20 ans.
  - Subvention de 75 % pour les coûts d'investissement (cas de base). La part de la subvention varie en fonction des besoins totaux en CAPEX.
  - Nombre total de clients : 205 (200 en monophasé, 5 en triphasé).
  - CAPEX, OPEX et coûts de développement du projet selon les normes industrielles.
-

