

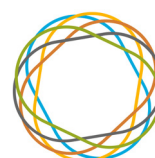
Électrification de la RDCongo : À la recherche des pistes de solution

RAPPORT PHASE 1
NOVEMBRE 2020

Resource Matters

et

Energy Systems Research Group,
University of Cape Town



resource matters



Remerciements

Ce rapport est le résultat d'un partenariat entre Resource Matters et l'Energy Systems Research Group de l'Université de Cape Town.

Les chercheurs et éditeurs qui ont contribué au rapport sont Cristian Trujillo, Christian Kabongo Mbenga, Jean Claude Mputu Ingole, Elisabeth Caesens (Resource Matters), Gregory Ireland, Alison Hughes et Jiska De Groot (Université de Cape Town).

Les enquêteurs qui ont contribué à l'enquête de terrain sont Christian Kabongo Mbenga (coordinateur), Iris Kashindi (coordonnateur adjoint), Fabrice Mbala, Frésias Messo, Michée Mbuyi, Jean Tawaba, Jeanine Pelani, Bénédicte Kunda, Lauriane Mutubadi, Hornella Pombo, Suzie Kensey, Tiziana Boyeli et Zephyrin Nakatala.

Resource Matters et l'Université de Cape Town tiennent à remercier l'Unité de Coordination et de Gestion des Projets (UCM) du Ministère de l'Energie et des Ressources Hydrauliques pour l'accord de coopération et de partage de données qui a été et sera crucial dans le développement du projet. Ils remercient également Laurence Masing pour ses services de traduction et Elisa Rapaport pour son travail dans la mise en page graphique de ce rapport.

Les chercheurs souhaitent enfin remercier The 11th Hour Project (Schmidt Family Foundation) pour son soutien au projet.

Table des matières

Liste de figures	v
Liste de cartes	vii
Liste de tableaux	viii

Introduction	1
--------------	---

Chapitre 1. Aperçu de l'électrification en RDC	5
--	---

1.1	Introduction	5
1.2	Présentation générale	6
1.2.1	Consommation d'énergie issue de la biomasse en RDC	6
1.2.2	Un faible taux d'électrification malgré un potentiel énorme : les possibilités inexploitées de l'électricité hydraulique et solaire en RDC	9
1.2.3	Une production électrique dominée par la Société nationale d'électricité (SNEL)	12
1.3	Difficultés à surmonter	17
1.4	Réforme politique et cadre institutionnel	18
1.4.1	La politique énergétique actuelle	18
1.4.2	La loi 14-011 de 2014	19
1.4.3	Le cadre institutionnel actuel du secteur électrique	21
1.5	Que nous réserve l'avenir ? Petit tour d'horizon des tendances émergentes du secteur électrique en RDC	23
1.5.1	La lente ascension des solutions d'électrification hors réseau	23
1.5.2	Les incitations des bailleurs internationaux en faveur de solutions hors réseau	25
1.5.3	L'appui gouvernemental aux solutions hors réseau	27
1.5.4	Poursuite des grands projets hydroélectriques	27
	Références	30

Chapitre 2. Données énergétiques : analyse des lacunes identifiées 32

2.1	Introduction	32
2.1.1	Modèles de système énergétique et données nécessaires	32
2.1.2	Données en République démocratique du Congo (RDC)	33
2.2	Données sur la demande : population générale, ménages, entreprises et équipements publics	34
2.2.1	Données démographiques par imagerie satellital	35
2.2.2	Enquêtes auprès des ménages	47
2.2.3	Structure économique et activité des entreprises	55
2.2.4	Équipements publics	63
2.3	Approvisionnement : les ressources énergétiques	65
2.3.1	Énergie solaire	65
2.3.2	Énergie éolienne	67
2.3.3	Potentiel de la ressource hydroélectrique	69
2.3.4	Bioénergie	73
2.4	Infrastructures énergétiques et de transports	73
2.4.1	Infrastructures de transports	73
2.4.2	Infrastructures électriques	82
2.5	Données géographiques et de terrain	87
2.5.1	Occupation des sols	87
2.5.2	Élévation	90
2.5.3	Hydrologie	91
2.6	Délimitations administratives	92
2.7	Données à exploiter dans les prochaines phases : recommandations, planification et défis	93
	Références	102

Chapitre 3. État des lieux et tendances des systèmes énergétiques et des approches de modélisations appropriés 106

3.1	Introduction	106
3.2	Vue d'ensemble des modèles de systèmes énergétiques	107
3.2.1	Modèles descendants	108
3.2.2	Modèles techniques ascendants	108
3.2.3	Modèle d'optimisation géospatiale des systèmes énergétiques pour l'électrification	112
3.2.4	Modèles hybrides	113
3.3	Quels critères les modèles doivent-ils offrir pour soutenir la planification de l'électrification en RDC ?	113

3.3.1	Cadre de modèle proposé pour atteindre les fonctionnalités souhaitées	116
3.4	Tour d’horizon des modèles les plus pertinents pour notre projet	117
3.4.1	Logiciel commercial ou libre ?	117
3.4.2	Descriptions et comparaisons des modèles spatiaux d’optimisation énergétique décentralisés adaptés à notre projet	119
3.4.3	Résumé des comparaisons entre les modèles, des lacunes et solutions présentées par les outils géospatiaux appliqués à la planification énergétique décentralisée	127
3.5	Descriptions et comparaisons des modèles d’optimisation énergétique pour une planification centralisée	128
3.5.1	Tour d’horizon des modèles centralisés	128
3.5.2	Résumé des comparaisons entre les modèles, des lacunes et solutions pour les modèles centralisés	137
3.6	Modèles spécifiquement adaptés à l’optimisation des mini-réseaux	138
3.7	Cadre de modèle proposé pour la phase 2	139
3.7.1	Le modèle et les outils de planification centralisée	139
3.7.2	Modèle et outils géospatiaux pour l’électrification	141
3.7.3	Améliorations du modèle et développement à venir sur OnSSET et OSeMOSYS	142
3.7.4	Modèle géospatial de demande des ménages	145
3.7.5	Outil de visualisation	146
3.8	Consultations avec les partenaires potentiels du projet	147
3.8.1	Aperçu de RLI et KTH-DESA	147
	Références	149

Chapitre 4. Analyse initiale de la planification spatiale de l’électrification grâce à l’outil OnSSET

150

4.1	Introduction	150
4.2	Utilisation du modèle OnSSET	151
4.3	Description du processus d’élaboration du modèle OnSSET RDC présenté aux acteurs	154
4.4	Hypothèses des scénarios et paramètres technologiques	156
4.4.1	Paramètres des options technologiques	158
4.5	Résultats	158
4.6	Exemples de difficultés identifiées lors de la modélisation	161
4.6.1	Opportunités d’amélioration de la modélisation	166
4.6.2	Difficultés rencontrées lors de l’élaboration du modèle	168
4.7	Réactions des acteurs suite à la présentation OnSSET	169
4.8	Perspectives pour les prochaines phases du projet	171
	Références	173

Chapitre 5. Enquête énergétique — Kinshasa 174

5.1	Introduction	174
5.2	Méthodologie d'enquête	174
5.2.1	Questionnaire	174
5.2.2	Sélection des enquêteurs	175
5.2.3	Kobo : un outil pour la collecte de données d'enquête	175
5.2.4	Formation des enquêteurs et pilotage de l'enquête	176
5.3	Echantillonnage	176
5.3.1	Taille de l'échantillon	176
5.3.2	Zone d'échantillonnage	177
5.3.3	Méthode d'échantillonnage	177
5.3.4	Principales difficultés liées au choix de la méthodologie	179
5.4	Résultats de l'enquête	180
5.4.1	Démographie	180
5.4.2	Sexe des personnes interrogées	181
5.4.3	Sources d'énergies utilisées pour éclairer, cuisiner et réchauffer l'eau	184
5.4.4	Accès à l'électricité et aux appareils	192
5.5	Discussion	194
5.5.1	Diversité géographique dans l'accès et l'usage de l'électricité : l'impératif d'élargir les cibles de l'électrification	194
5.5.2	Revenus, accessibilité économique et demande	196
5.5.3	Distinguer source et service énergétique	197
5.6	Réflexions et conclusion	197
	Références	199

Conclusions 200

Annexe 1. Paramètres technologiques de performance et coûts utilisés sur OnSSET.	205
Annexe 2. Appel pour le recrutement des enquêteurs	208
Glossaire des acronymes	211

Liste de figures

Figure 1.1 Consommation énergétique par habitant dans les pays d'Afrique subsaharienne, 2014	7
Figure 1.2 Consommation d'énergie par type de source, 2017	9
Figure 2.1 Eléments d'un modèle de système électrique	33
Figure 2.2 Jeux de données démographiques	37
Figure 2.3 Processus de base pour la création des données GHSL	39
Figure 2.4 Exemples de données utilisées pour la classification dans le modèle de détection de Facebook	42
Figure 2.5 Poids de la démographie provinciale dans les enquêtes menées entre 2001 et 2013	48
Figure 2.6 Produit de l'initiative AICD	78
Figure 3.1 Offre et demande énergétique : les limites de la croissance	110
Figure 3.2 Structure type d'un modèle d'optimisation	130
Figure 3.3 Composantes du modèle d'optimisation énergétique centralisé envisagé pour la Phase 2	141
Figure 3.4 Composantes du modèle d'optimisation géospatial envisagé pour la phase 2	142
Figure 3.5 Connexion envisagée entre les modèles OSeMOSYS et OnSSET	145
Figure 4.1 Options d'approvisionnement électrique et types de services énergétiques alimentés	153
Figure 4.2 Cadre de la boîte à outils Open Source Spatial Electrification (OnSSET)	154
Figure 4.3 Instantané des données spatiales saisies sur OnSSET par zone peuplée de 1x1 km	156
Figure 4.4 Représentation graphique du Cadre multi-niveaux de la Banque mondiale	157
Figure 4.5 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande faible, niveau 2	159
Figure 4.6 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande moyenne, niveau 3	160
Figure 4.7 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande élevée, niveau 4	160
Figure 4.8 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande très élevée, niveau 5	161

Figure 4.9 Démonstration de résultats irréalistes de l'extension du réseau et amélioration de la résolution des résultats OnSSET de 1×1 km	162
Figure 4.10 Démonstration d'une extension irréaliste du réseau selon la cartographie de l'ONU et résultats en faible résolution (10×10 km)	163
Figure 4.11 Démonstration des problèmes liés à la simplification de la trajectoire d'extension du réseau autour de Kindu et Kingombe en RDC	164
Figure 4.12 Démonstration du remplacement total des mini-réseaux et options autonomes par l'extension du réseau à mesure que la demande électrique augmente	165
Figure 4.13 Démonstration des populations manquantes dans le jeu de données utilisé sur la province du Kasaï oriental, près de Logja dans le centre de la RDC	166
Figure 4.14 Résultats du modèle TEMBA	168
Figure 5.1 Zones d'enquête	178
Figure 5.2 Échantillonnage orienté	179
Figure 5.3 Représentation des sexes dans l'échantillon de l'enquête	181
Figure 5.4 Âge des personnes interrogées (zones rurale, péri-urbaine et urbaine)	182
Figure 5.5 Estimation des revenus totaux des ménages (<i>n=1 879, dont n=291 en zones rurales, n=669 en zones péri-urbaines, et n=910 en zones urbaines</i>)	183
Figure 5.6 Types de logement dans les zones rurales, péri-urbaines et urbaines enquêtées (<i>n=1 973</i>)	184
Figure 5.7 Sources d'énergie utilisées par les ménages	185
Figure 5.8 Services énergétiques obtenus dans les zones rurales, péri-urbaines et urbaines de l'échantillon d'enquête à Kinshasa	186
Figure 5.9 Sources d'énergie utilisées pour l'éclairage	187
Figure 5.10 Adéquation des principales sources lumineuses pour répondre aux besoins d'éclairage	188
Figure 5.11 Satisfaction des enquêtés vis-à-vis de leurs sources d'éclairage actuelles	188
Figure 5.12 Obstacles au changement de la principale source d'éclairage	189
Figure 5.13 Sources énergétiques utilisées pour la cuisine	189
Figure 5.14 Adéquation du principal combustible de cuisine par rapport aux besoins de cuisson des ménages	190
Figure 5.15 Satisfaction des sondés par rapport à leurs combustibles de cuisson actuels	191
Figure 5.16 Obstacles au changement pour le combustible de cuisson privilégié	191
Figure 5.17 Combustibles utilisés par les sondés pour chauffer l'eau	192
Figure 5.18 Accès à l'électricité	193
Figure 5.19 Usage d'appareils électrique dans les zones péri-urbaines et urbaines	194

Liste de cartes

Carte 1.1 Localisation des trois réseaux hydroélectriques régionaux de la RDC	13
Carte 2.1 Différentes composantes des jeux de données GHSL avec l'exemple de la ville de Gemena	40
Carte 2.2 Carte Facebook sur la détection de population et de bâtiments dans la ville de Gemena	43
Carte 2.3 Image du câble jour/nuit VIIRS à l'échelle de la RDC	44
Carte 2.4 Couches de populations non-électrifiées de la FEEM	46
Carte 2.5 Estimation de la population avec et sans accès à l'électricité selon OnSSET	47
Carte 2.6 Production annuelle moyenne d'énergie solaire en RDC à une résolution de 250 m	67
Carte 2.7 Cartographie de la vitesse du vent en RDC avec une résolution de 250 m	69
Carte 2.8 Durée moyen d'un trajet vers la ville la plus proche, en jours	82
Carte 2.9 Exemple de carte de la SNEL sur les infrastructures électriques	84

Liste de tableaux

Tableau 1.1	Consommation énergétique par type de consommateur, 2017	7
Tableau 1.2	Consommation énergétique par type de source, 2017	8
Tableau 1.3	Consommation énergétique par type de consommateur, 2017	10
Tableau 1.4	Configuration des trois réseaux hydroélectriques régionaux en RDC	12
Tableau 1.5	Production d'électricité en RDC par type d'agent, 2014	14
Tableau 1.6	Régimes juridiques pour l'octroi de concessions aux opérateurs privés du secteur électrique	20
Tableau 1.7	Projet d'énergie hydroélectrique dans le Nord Kivu	26
Tableau 2.1	Sources de revenus des ménages	55
Tableau 2.2	Consommation énergétique en RDC par type de consommateur (GWh)	55
Tableau 2.3	Sources de longues séries temporelles sur le PIB de la RDC	56
Tableau 2.4	Sources des séries de PIB sectoriels et régionaux pour la RDC	56
Tableau 2.5	Sources d'informations sur l'inflation en RDC	57
Tableau 2.6	Sources d'informations sur la composition entrepreneuriale en RDC	57
Tableau 2.7	Echantillon de l'enquête sur l'économie informelle menée par l'Observatoire de l'économie Informelle en RDC	59
Tableau 2.8	Résumé des sites hydrauliques compilés dans le jeu de données de Resource Matters	70
Tableau 2.9	Indicateurs sur les infrastructures de RDC	74
Tableau 2.10	Réseau routier en RDC	75
Tableau 3.1	Critères pour l'étude des plateformes de modélisation	115
Tableau 4.1	Sources des données utilisées pour l'élaboration du modèle OnSSET sur la RDC	155
Tableau 4.2	Projections démographiques et objectif d'électrification	157
Tableau 5.1	Échantillonnage	177
Tableau A.1	Paramètres technologiques sur OnSSET	205

Introduction

La République démocratique du Congo (RDC) dispose d'importantes ressources énergétiques, mais moins de 20 % de ses 80 millions d'habitants a accès à l'électricité. Cet accès est inégalement réparti, avec une production et une consommation électrique concentrée autour de Kinshasa et des régions minières, alors que l'approvisionnement électrique est faible, voire inexistant dans le nord et le centre du pays. Le taux d'électrification rurale est actuellement estimé à moins de 1 %. Il n'est donc pas surprenant que l'électricité ne représente qu'une maigre part de la consommation énergétique nationale. La consommation électrique par habitant est l'une des plus faibles au monde ; en 2016, on estimait que 94 % de l'énergie utilisée en RDC provenait du bois ou du charbon de bois.

L'accès à des services énergétiques propres et abordables est un impératif de développement durable. Bien qu'ils soient difficiles à mesurer, il existe de nombreux avantages à améliorer l'accès à l'électricité. Parmi ceux-ci, mentionnons un meilleur accès aux services de santé, à la réfrigération, à l'eau potable, à l'éclairage public, aux technologies de la communication, aux services de banque mobile ou encore à l'enseignement. Un meilleur accès à l'électricité permettrait également d'accroître les activités productives locales, communautaires, industrielles et commerciales.

Le potentiel en énergie propre et renouvelable est également considérable en RDC. Le fleuve Congo, deuxième plus grand cours d'eau au monde par son débit, ainsi que d'autres fleuves d'envergure permettent d'envisager de nombreuses infrastructures hydroélectriques. Le pays peut également compter sur de nombreuses ressources solaires, éoliennes et géothermiques, bien que celles-ci attendent encore d'être exploitées à grande échelle.

Si des objectifs ambitieux d'électrification universelle¹ ont été fixés en RDC, la planification énergétique reste limitée, tant au niveau central que provincial, et les données nécessaires pèchent par leur rareté, leur dispersion et leur imprécision. De plus, la plupart des plans existants privilégient les gros investissements hydroélectriques centralisés et dépendent d'une vaste extension du réseau de transmission — alors que ce scénario est souvent inadapté ou exorbitant pour l'électrification rurale et les centres de demande trop éloignés du réseau.

¹ En tant que signataire des ODD (Objectifs de développement durable) de l'ONU, la RDC s'est engagée à atteindre une cible de 100 % d'accès à des services énergétiques propres et modernes d'ici à 2030 dans le cadre de l'ODD 7.1 « énergie durable pour tous », avec un objectif intermédiaire de 30 % d'accès à l'électricité d'ici à 2023.

Les récentes évolutions des technologies énergétiques et des méthodologies de planification, reposant sur des modèles de systèmes énergétiques informatisés et fondés sur les données, ouvrent la voie à une planification de l'électrification à très haute résolution spatiale. Ce haut niveau de précision permet d'optimiser l'usage des ressources locales, des nouvelles innovations technologiques et des énergies renouvelables en vue d'offrir une électricité propre et abordable répondant aux besoins énergétiques sur l'ensemble du territoire congolais.

Notre projet vise à tirer parti de ces avancées en matière de planification énergétique géospatiale afin d'élaborer un outil de modélisation contribuant à une planification robuste et réaliste de l'électrification en RDC. Cet outil permettra de comparer différents scénarios d'optimisation de l'électrification grâce à l'extension du réseau, à des mini-réseaux et des systèmes autonomes déployés sur l'ensemble du pays, y compris dans les zones rurales les plus reculées.

L'analyse de la planification pour l'électrification est basée sur un modèle de planification géospatial nommé OnSSET (*Open-Source Spatial Electrification Tool*). Un outil de planification centralisée sera connecté à OnSSET afin de fournir différents scénarios visant à optimiser les investissements en infrastructures des solutions d'approvisionnement à grande échelle issues du réseau central.

Ce projet permettra de fournir des données, des outils et une plateforme de visualisation transparents et en accès libre, à même d'orienter la création de meilleurs systèmes énergétiques grâce aux investissements et aux politiques éclairées des acteurs publics et privés. La société civile pourra elle aussi avoir accès à ces informations, cruciales pour promouvoir un système électrique équitable pour l'ensemble de la population congolaise.

Nous utiliserons les meilleurs modèles, méthodes et données disponibles en open-source, et les rendrons accessibles à tous. Ainsi, nos travaux bénéficieront d'une minutieuse vérification par les pairs, tandis que d'autres acteurs pourront utiliser, modifier et adapter le code source et les données à d'autres modèles et activités de planification. La mise à disposition de nos travaux et les améliorations apportées à ces outils (déjà considérés comme les meilleurs disponibles) ne pourra que bénéficier à d'autres projets de modélisation et de planification similaires ailleurs dans le monde.

Des activités de renforcement des capacités et de mobilisation des acteurs seront menées tout au long du projet. Elles viseront à la fois les acteurs désireux de mieux comprendre les résultats du processus, et ceux qui souhaiteraient s'impliquer plus activement dans le projet. La mobilisation des acteurs permettra d'assurer l'utilisation de l'outil et ses modifications sur le long-terme, dans la poursuite d'un intérêt national.

Notre action s'inscrit dans le cadre d'un projet sur plusieurs années et divisé en trois phases. Ce rapport couvre la première phase du projet, notamment constitué des activités suivantes :

1. Étude contextualisée de la situation énergétique actuelle en RDC, et notamment du secteur électrique ;
2. Collecte et analyse détaillées des lacunes identifiées dans les jeux de données utiles pour la planification des systèmes énergétiques en RDC, et plus particulièrement la planification spatiale de l'accès à l'électricité ;
3. Étude des modèles et méthodes appropriés pour la planification électrique en RDC, avec suggestions détaillées sur les plateformes et approches de modélisation les mieux adaptées aux prochaines étapes de notre projet ;
4. Première démonstration et analyse de planification spatiale de l'électrification à l'aide d'OnSSET et des jeux de données disponibles au début du projet ;

5. Diverses activités de mobilisation des acteurs, afin de diffuser les ambitions du projet et de recevoir leurs contributions et commentaires : atelier national de mobilisation des acteurs, plusieurs ateliers et réunions de plus petite ampleur, divers engagements en continu avec des réseaux d'acteurs à l'échelle nationale et internationale ;
6. Consultation de plusieurs organisations techniques internationales pour la conception et la méthodologie du projet ;
7. Conduite d'une enquête énergétique auprès des ménages afin de mettre en lumière les usages et préférences énergétiques dans les zones urbaines, péri-urbaines et rurales dans et aux alentours de la capitale.

Ce rapport est divisé en cinq chapitres présentant les diverses activités et résultats atteints à ce jour, ainsi que la façon dont les travaux réalisés alimenteront les prochaines phases du projet.

- **Le chapitre 1 décrit le contexte énergétique congolais.** Nous débutons le chapitre en dressant un bilan du potentiel énergétique, de l'approvisionnement et des infrastructures électriques en RDC. Le chapitre présente également le cadre institutionnel de la gestion énergétique, en mettant l'accent sur les dernières évolutions liées à la nouvelle loi relative au secteur de l'électricité. Ce premier chapitre se conclut avec une analyse des défis et opportunités liées à l'électrification.
- **Le chapitre 2 dresse un état des lieux des données nécessaires à la planification énergétique en RDC.** Nous y décrivons les sources de données existantes et les données qui seront exploitées pour élaborer les outils de planification de l'électrification. Dans ce chapitre, vous trouverez une étude complète des données exploitables pour l'estimation de la demande énergétique (population, ménages, activités commerciales, équipements publics), du potentiel des ressources énergétiques (ressources solaires, hydrauliques, éoliennes, etc.), des infrastructures de transport et de transmission énergétique (réseau, postes et sous-stations) et d'autres données géographiques (occupation des sols, réseaux fluviaux, frontières, etc.) Le chapitre décrit les principales lacunes des jeux de données disponibles, et se conclut sur un résumé des données que nous utiliserons dans les phases 2 et 3 du projet, avec des recommandations d'approches afin de combler les écarts identifiés.
- **Le chapitre 3 fournit une description des méthodologies de modélisation et une sélection des plateformes de modélisation jugées adaptées à la planification de l'électrification en RDC.** Nous y présentons donc plusieurs outils de modélisation centralisés et décentralisés. Pour les besoins de notre projet, nous exposons les avantages et inconvénients des différents outils, en abordant l'éventualité d'une combinaison/ connexion de certains d'entre eux afin de répondre aux réalités spécifiques de la RDC. Après cette comparaison, nous apportons des justifications précises quant aux outils et cadre de modélisation retenus. Un autre élément important dans ce chapitre est le choix des partenaires impliqués dans l'élaboration de chaque outil. Nous avons en effet choisi l'Institut Reiner Lemoine (RLI) de Berlin et l'Institut royal de technologie (KTH) de Stockholm en raison de leur expertise avérée en modélisation des solutions d'électrification dans le contexte africain.
- **Le chapitre 4 expose les résultats de notre première application du modèle OnSSET en RDC** (présenté lors du premier grand atelier national de mobilisation des acteurs à Kinshasa). Nous y expliquons le processus de travail grâce auquel nous avons obtenu ces résultats, les problèmes rencontrés, et partageons les enseignements et les opportunités

identifiés au cours de ces travaux. Le chapitre s'achève sur une analyse des suggestions des acteurs afin d'affiner la pertinence de notre modélisation.

- Enfin, **le chapitre 5** présente les résultats des enquêtes conduites à Kinshasa en novembre et décembre 2019. Ces enquêtes couvrent la demande énergétique des ménages et leur perception des énergies renouvelables. Le principal objectif de cette étude était d'estimer la demande énergétique des ménages et d'améliorer sa représentation dans nos modèles. Ces enquêtes permettent également de comparer l'accès et la consommation énergétique entre les zones rurales, péri-urbaines et urbaines. Au cours de la phase 2, nous mènerons de plus amples analyses de ces données et les intégreront à un nouveau modèle d'estimation de la demande, en vue d'inclure ce dernier à nos activités de planification de l'optimisation spatiale.

CHAPITRE 1.

Aperçu de l'électrification en RDC

➤ 1.1 Introduction

La RDC est un pays aux richesses naturelles sans pareil. Son sous-sol regorge de cobalt, de nickel, de cuivre et de coltan, des minéraux incontournables pour la révolution des énergies propres en cours, tandis que les gisements de diamant et d'or sont également foisonnants. En surface, les ressources ne sont pas moins abondantes. D'après des données de la Banque mondiale datant de 2016, les forêts congolaises couvrent 67,2 % des 2 345 millions de kilomètres carré du territoire national (il s'agit du deuxième plus grand pays d'Afrique), ce qui fait de la RDC la deuxième plus grande zone forestière au monde après l'Amazonie. Le fleuve Congo est également le deuxième plus long cours d'eau africain après le Nil, ainsi que le deuxième mondial après le fleuve Amazone en termes de débit. Les nombreuses rapides et cascades présentes le long du fleuve Congo en font un cadre idéal pour l'établissement d'infrastructures hydroélectriques.

De plus, compte tenu de la présence de nombreuses ressources minières indispensables à la transition vers une énergie propre (cobalt, cuivre, nickel, tantale...), l'importance des ressources énergétiques du pays est non négligeable, tant à l'échelle continentale qu'internationale. Malheureusement, les retombées de ces richesses ne profitent pas à la population congolaise, dont l'indice de développement humain demeure parmi les plus faibles de la planète.

L'accès à l'électricité est une illustration flagrante de ces inégalités au niveau national ; moins de 20 % des 80 millions de congolais ont accès à l'électricité. Le chiffre exact varie selon les sources consultées. Ce pourcentage varie aussi énormément à l'intérieur du pays : d'une part, entre les zones urbaines (35 % d'accès en moyenne, et 50 % à Kinshasa) et rurales (moins d'un pour cent d'électrification), et d'autre part en fonction des régions—la production et la consommation sont concentrées dans la région de Kinshasa et dans les zones minières, tandis que dans le nord du pays, par exemple, l'accès à l'électricité est extrêmement faible.

Les autorités elles-mêmes admettent que les avancées pour corriger ce retard se font encore attendre. Lors de l'ouverture du premier forum national sur l'énergie électrique en RDC en août 2019, le président Félix-Antoine Tshisekedi Tshilombo déclarait :

« Depuis la finalisation du site d'Inga II en 1982, la RDC n'a plus connu d'avancées significatives dans le développement de la production d'énergie électrique. En effet, en

1982, nous comptons environ 28 millions d'habitants pour une capacité installée de l'ordre de 2 442 Mégawatts. Nos capacités actuelles se situent à 2 625 Mégawatts pour près de 80 millions d'âmes. Pourtant, la politique énergétique adoptée en 2009 fixait comme objectif un accroissement des capacités installées de 360 Mégawatts par an. En 2011, alors qu'on évaluait le taux d'accès à l'énergie pour nos populations à 9 %, la RDC s'inscrivait dans la résolution de l'ONU visant l'atteinte de l'accès universel à l'électricité à l'horizon 2030. Aujourd'hui, on évalue le taux d'accès à 8 %, ce qui confirme le recul. »

Ceci dit, il convient de souligner quelques changements balbutiants mais prometteurs. En 2014, le gouvernement adoptait la loi n°14/011 relative au secteur de l'électricité en vue de réguler le secteur. Concrètement, cette loi autorise la participation d'entreprises privées à l'industrie électrique et régule le développement de partenariats public-privé afin d'attirer de nouveaux investisseurs. Cette loi fait ressortir deux éléments importants : l'importance de développer le potentiel énergétique du pays pour ériger la RDC au statut de puissance productrice d'énergie, et le préalable de protection et de préservation environnementale.

Notre projet de cartographie énergétique s'insère donc dans ce contexte. L'objectif visé est de mettre à disposition un outil permettant d'éclairer les futurs investissements publics et privés dans le secteur, tout en portant à la connaissance des organisations de la société civile les informations nécessaires à leur quête constante d'équité dans la production et la distribution électrique à travers le pays.

Le but de ce premier chapitre est d'affiner la définition de ce contexte spécifique, à commencer par un rapide tour d'horizon de la consommation électrique nationale. Nous poursuivrons avec une présentation du potentiel énergétique de la RDC, suivi par un aperçu de l'approvisionnement et des infrastructures électriques. Nous nous concentrerons plus tard sur le cadre institutionnel de la gestion énergétique, et plus spécifiquement sur les avancées occasionnées par l'adoption de la législation récente. Enfin, nous concluons ce chapitre en détaillant les défis et les opportunités auxquelles est confronté le secteur.

➤ 1.2 Présentation générale

Les informations sur l'énergie, qu'il s'agisse de sa production, de sa consommation ou d'autres étapes de la chaîne, ne sont pas collectées de façon systématique en RDC. De fait, ces dernières sont rares et souvent obsolètes. Comme nous le verrons dans les deux premiers chapitres de ce rapport, de nombreux chercheurs ont identifié l'insuffisance des données comme un frein important dans les études du secteur électrique.

Cette faiblesse limite les initiatives cherchant à restituer les tendances quantitatives en matière énergétique dans le pays. Ainsi, il sera plus prudent de considérer les chiffres présentés ici comme des illustrations de tendances générales, plutôt qu'en tant que données officielles et définitives.

1.2.1 Consommation d'énergie issue de la biomasse en RDC

La consommation énergétique dans le pays est relativement faible comparée au reste du monde (Figure 1.1). Sur 141 pays ayant fourni leurs données à la Banque mondiale en 2014, la RDC est classée 131^{ème} en matière d'énergie consommée, avec une utilisation équivalente à 389,33 kg de pétrole par habitant. La RDC se retrouve ainsi en 15^{ème} position sur les 21 pays d'Afrique subsaharienne inclus dans l'échantillon de 2014.

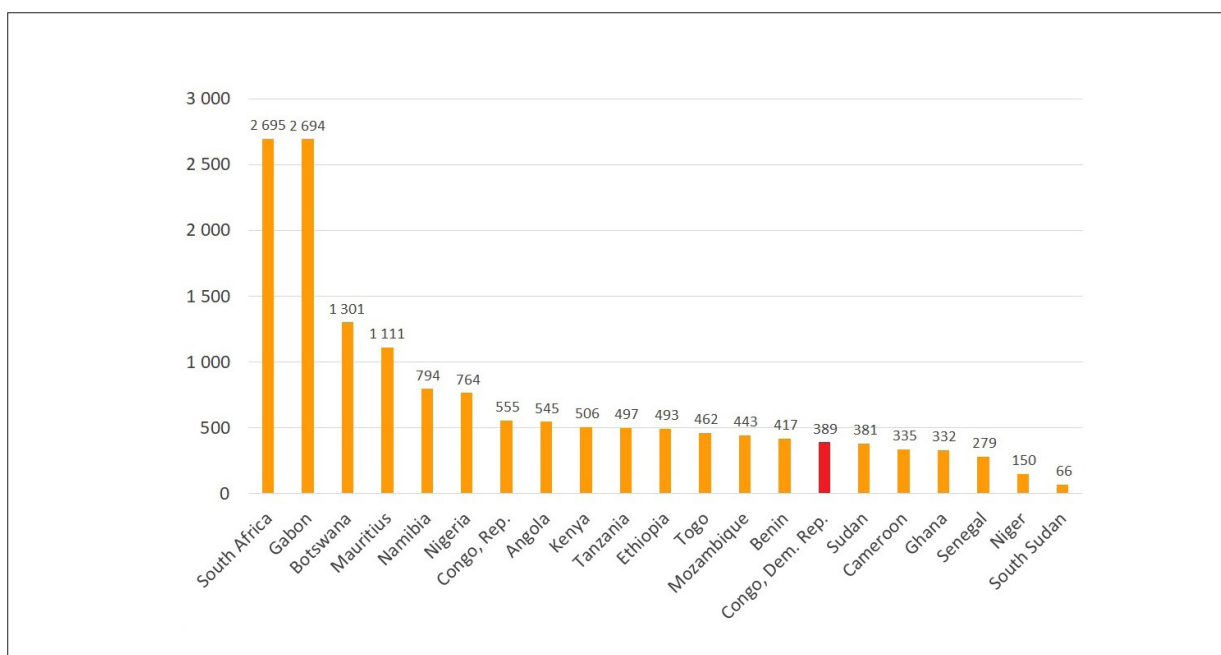


Figure 1.1 Consommation énergétique par habitant dans les pays d’Afrique subsaharienne, 2014

Source : Banque mondiale, 2014

Selon toutes les sources consultées, il apparaît que les ménages constituent une part importante de la consommation, bien que l’on observe des disparités importantes en fonction des sources. Les données de la Commission africaine de l’énergie (AFREC) indiquent 68,75 % de consommation effectuée par les ménages, alors que l’Agence internationale de l’énergie (AIE) évalue la consommation des ménages à 80,21 % de la consommation globale. Le Tableau 1.1 illustre certains de ces résultats. Comme nous le dévoilerons plus loin, ces tendances ne s’appliquent pas à la consommation d’électricité ; dans ce second cas, l’utilisation à des fins productives prend clairement le pas.

Tableau 1.1 Consommation énergétique par type de consommateur, 2017

AFREC Energie (en tonne d’équivalent pétrole, tep)		AIE (tonne d’équivalent pétrole, tep)	
Ménages	13 049,3 (68,75%)	Résidentiel	20 238 (80,21%)
Industrie	414,84 (2,18%)	Industrie	3 997 (15,84%)
Transports	826,86 (4,35%)	Transports	709 (2,81%)
Services publics et commerciaux	4 689,72 (24,70%)	Services publics et commerciaux	86 (0,34%)
Agriculture/foresterie	—	Agriculture/Foresterie	—
Autres (non spécifiés)	—	Autres (non spécifiés)	—
Usage non énergétique	—	Usage non énergétique	4 (0,001%)
Total	18 980,72 (100%)	Total	25 229 (100%)

Sources: AFREC² et AIE³

² Voir AFREC, Base de données énergétiques africaines <https://afrec-energy.org/bk-energydatabase.php>

³ Voir AIE, Total final consumption (TFC) by sector, Democratic Republic of Congo, 1990–2017 <https://www.iea.org/data-and-statistics>

Les comparaisons entre différents jeux de données doivent toutefois être menées avec précaution. Dans sa catégorie « résidentiel », l'AIE tient compte de « la consommation des ménages, à l'exclusion des combustibles utilisés pour les transports ». L'AFREC, elle, ne fournit aucune définition de sa catégorie « ménages ». De plus, les informations disponibles ne permettent pas d'approfondir l'analyse sur l'usage productif de l'énergie.

Du côté de l'offre, la biomasse est la principale source énergétique dans le pays (Tableau 1.2). Elan (2018, p. 2) indique que 94 % de la consommation énergétique de base repose sur la biomasse (charbon) ; le DEAS de l'ONU (2019, p. 58) estimait également en 2016 que 94 % de l'énergie utilisée en RDC provenait de la combustion de bois ou de charbon de bois. L'électricité représente donc une faible part de l'usage énergétique total.

Tableau 1.2 Consommation énergétique par type de source, 2017

AFREC (tep) ⁴		AIE par source (tep) ⁵	
Biocombustibles et déchets	17 459,19	Biocombustibles et déchets	28 173
Produits pétroliers	843,18	Pétrole	729
Electricité	678,35		
		Sources hydrauliques	815
Total	18 980,72	Total	29 717

Sources: AFREC et AIE

D'après ces deux sources, la biomasse fournit plus de 95 % des intrants énergétiques du pays, principalement sous la forme de bois de chauffe et de charbon de bois (Figure 1.2). Compte tenu de leur dépendance quasi exclusive à ce type d'énergie, les ménages sont les principaux consommateurs de biomasse. Selon la base de données de la Commission africaine de l'énergie (AFREC) pour le secteur résidentiel, le charbon de bois représentait 15 % de l'énergie consommée en 2018, contre 84 % pour le bois de chauffe, et seulement 1 % pour l'électricité. Dans les ménages, l'énergie est principalement utilisée pour cuisiner ; l'usage généralisé de réchauds rudimentaires justifie la forte demande de bois de chauffe. Le charbon de bois est surtout utilisé dans les zones urbaines. Les usages comme « l'éclairage, la cuisine, la télévision, la climatisation, la ventilation, les machines à laver et la réfrigération dominent la consommation d'électricité » (AFREC, 2018, p. 43).

⁴ Voir AFREC : Base de données énergétiques africaines <https://afrec-energy.org/En/bds.html>

⁵ Voir AIE : Total primary energy supply (TPES), Democratic Republic of the Congo 1990–2017, <https://www.iea.org/data-and-statistics>

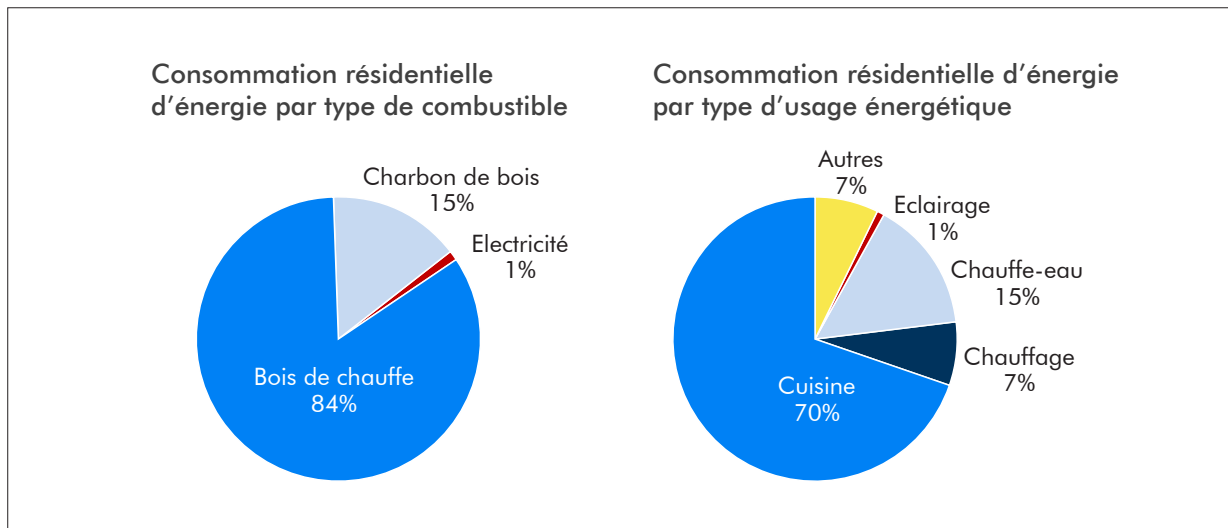


Figure 1.2 Consommation d'énergie par type de source, 2017

Source : AFREC (2018, p. 43)

Fort de ses 145 millions d'hectares de forêt, le pays dispose d'un potentiel énergétique considérable issu de la biomasse. Toutefois, ce type de production énergétique est souvent considéré comme inefficace et néfaste à la population et à l'environnement. Cette mauvaise réputation se justifie par de faibles rendements énergétiques, d'importantes émissions de fumée dans les foyers (seuls 5 % des ménages utilisent des équipements de cuisson améliorés) et par l'absence de gestion durable des ressources forestières. En effet, si la biomasse est exploitée sans replanter d'arbres, cette option énergétique contribue aux émissions mondiales de gaz à effet de serre et au réchauffement climatique. De plus, la collecte de bois de chauffe et le défrichement à des fins agricoles sont les principales causes de la déforestation (Kusakana, 2016).

1.2.2 Un faible taux d'électrification malgré un potentiel énorme : les possibilités inexploitées de l'électricité hydraulique et solaire en RDC

L'inconvénient de cette dominance de la biomasse dans le mix énergétique en RDC est le faible taux d'électrification du pays. Comme indiqué précédemment, l'énergie électrique ne représente qu'un pourcentage infime de la consommation énergétique en RDC. Le taux d'accès à l'électricité se situe même parmi les plus faibles du monde. Le taux exact est toutefois inconnu, et le manque d'informations sur le secteur énergétique reste un défi majeur, comme nous le décrivons dans les prochaines sections — plusieurs indicateurs témoignent de ce phénomène.

Avec une consommation d'électricité de 88,8 kWh par habitant en 2017 selon l'édition 2020 du Livre de poche des statistiques sur l'énergie des Nations Unies, la RDC occupe la 208^{ème} place sur une liste de 225 territoires (constitués d'États souverains et des de territoires au statut controversé).

D'après plusieurs sources, le taux d'électrification ne dépasserait pas les 20 % : la CIA (2020) estime un taux de 17,1 % en 2016. Le chiffre de 9 % est utilisé par plusieurs agences comme UKAID, ÉLAN RDC (Elan, 2019, p. 3 et Elan, 2018), USAID (USAID, 2018), mais surtout par l'Unité de coordination et de management des projets (UCM) du Ministère de l'Énergie et des Ressources Hydrauliques (MERH) (voir UCM 2018), dont nous reparlerons plus loin. Les estimations les plus optimistes sont celles de l'initiative de la Banque mondiale *Sustainable Energy for All* (SE4ALL), dont la base de données de 2018 affiche le taux de 18,97 % d'électrification dans le pays. Toutefois, malgré cette estimation haute, la RDC demeure à la 211^{ème} sur 218 pays en matière d'accès à l'électricité.

Cet accès est très inégalitaire sur le territoire congolais. Elan (2019), USAID (2018) et UCM (2018) tablent sur le chiffre de 1 % de taux d'électrification rurale, tandis que la CIA (2020) estime ce taux à 0,4 %. À l'inverse, Elan (2019) et USAID (2018) évaluent le taux d'électrification urbain à 19 % ; la CIA (2020) parle de 47,2 % tandis qu'UCM fait référence au taux de 35 % pour les zones urbaines et économiques, qui comprennent les sites industriels et miniers.

L'accès à l'électricité est également inégal entre les différents types de consommateurs. Les chiffres présentés dans le Tableau 1.3 suggèrent que les entreprises consomment une part importante de la production électrique. La définition de la catégorie « Ménages et autres consommateurs » utilisée par la Division des statistiques des Nations Unies inclut « les consommateurs d'énergie hors secteur industriel, construction et extraction minière non-combustible, compris dans les sous-catégories suivantes : « agriculture, foresterie et pêche », « commerces et services publics », « ménages » et « autres, non spécifiés » ». Cette précision implique donc que la proportion énergétique consommée par les ménages est en fait bien inférieure, et probablement plus proche des estimations de l'AIE.

Tableau 1.3 Consommation énergétique par type de consommateur, 2017

AFREC (tep)		AIE (2017) (tep)		ONU (2017) (millions de kWh)	
Ménages	214,03 (31,55 %)	Résidentiel	135 (21,73 %)	Ménages et autres consommateurs	2 570 (35,49 %)
Industrie	399,25 (58,85 %)	Industrie	399 (64,25 %)	Industrie et construction	4 643 (64,12 %)
Transports	—	Transports	1 (0,1 %)	Transports	10 (0,1 %)
Services publics et commerciaux	65,07 (9,59 %)	Services publics et commerciaux	86 (13,84 %)		
				Consommation des industries énergétiques	17 (0,2 %)
Total	678,35		621		7 240

Sources : AFREC⁶, AIE⁷, et ONU⁸

D'autres estimations sont plus pessimistes. Selon la Banque africaine de développement (BAD), 85 % de la production électrique en RDC est consommée par le secteur industriel en général, et plus spécifiquement par le secteur minier. Un rapport de diagnostic rédigé par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) en préparation de l'initiative SE4ALL indique que d'un point de vue géospatial, les sites de production électrique se développent autour des grosses industries minières ; ceci s'explique dans la mesure où « le sous-secteur de l'électricité a été initialement développé pour faciliter l'exploitation et la transformation des minerais (notamment au Katanga), plutôt que pour créer une infrastructure permettant le développement d'activités diversifiées et la consommation par les ménages, tant en milieu urbain que rural » (PNUD, 2013, p. 18). <https://www.undp.org/content/undp/en/home.html>

⁶ Voir AFREC : Base de données énergétiques africaines <https://afrec-energy.org/bk-energydatabase.php>

⁷ Voir AIE : Consommation finale électrique par secteur, République démocratique du Congo, 1990–2017, <https://www.iea.org/data-and-statistics>

⁸ Nations Unies, 2017. Electricity Profiles. RDC : <https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/eprofiles/2017/pcf.pdf>

L'essentiel de l'électricité congolaise provient de sources hydrauliques. Les données de la CIA (2020) pour l'année 2017 indiquent que l'énergie hydroélectrique compte pour 98 % de l'électricité nationale, les deux pour cent restants étant comblés par des combustibles fossiles. L'initiative *Sustainable Energy For All* (SE4ALL) de la Banque mondiale établit la part de l'énergie hydraulique à 99,7 % de la production électrique congolaise. Ces chiffres n'ont rien de surprenant compte tenu de l'immense potentiel hydroélectrique du pays, qui prend sa source dans le bassin versant du fleuve Congo.

Le réseau hydrographique du fleuve Congo couvre une zone d'environ 3,7 millions de kilomètres carré — une superficie plus large que l'Inde, et englobant un dixième du continent africain — soit approximativement la taille de sa république éponyme (Van Reybrouck, 2014 ; Andritz, s.d.). Le gigantesque bassin du Congo traverse effectivement tous les climats et écosystèmes du pays :

« Depuis sa source en altitude à l'extrême sud du pays, à travers la savane aride et les marais couverts de lentilles d'eau du Katanga, le long de l'immense forêt équatoriale qui couvre presque toute la moitié nord du pays, jusqu'aux paysages changeants du Bas-Congo et aux mangroves fantomatiques de l'embouchure » (Van Reybrouck, 2014, p. 18).

Le fleuve Congo est le cours d'eau le plus puissant d'Afrique (voir International Hydropower Association, s.d) ainsi que le plus important en termes de volume. Au niveau mondial, seul le fleuve Amazone le surpasse à ces deux égards (Andritz, s.d.).

D'après plusieurs sources, dont Andritz (s.d), le PNUD (2013) et UCM (2018), cette force de la nature serait à l'origine d'un potentiel hydroélectrique de 100 000 MW. Toutefois, ce chiffre relève presque du mythe, car aucune source ne fournit la méthode utilisée pour parvenir à ce résultat.

Cet énorme potentiel reste malheureusement largement inexploité. D'après de nombreuses références, la capacité installée actuelle des infrastructures hydroélectriques avoisine les 2 500 MW, soit 2,5 % du potentiel national. Les chiffres exacts varient selon les sources :

- Elan (2019) évoque 2 700 MW en citant USAID (2018) ;
- Plus précisément, USAID (2018) fait état d'une capacité installée de 2 677 MW, soit la somme de 2 542 MW de sources hydrauliques et de 135 MW de sources thermiques ;
- USAID (2017) mentionne une puissance installée de 2 590 MW ; 2 472 MW de sources hydrauliques et 34 MW de combustibles ;
- UCM établit une capacité installée totale à 3 190 MW générée depuis 108 sites : 62 sites hydroélectriques et 46 sites thermiques (UCM, 2018, 21). Les sites hydrauliques représentent 2 500 MW (UCM, 2018, p. 1) ce qui laisse supposer une capacité installée de 290 MW pour les sites thermiques ;
- Enfin, le PNUD (2013) estime la capacité installée de la RDC à 2 566 MW, répartie entre 62 sites opérationnels, dont 69 % (1 775 MW) réunis sur le site d'Inga (351 MW sur Inga 1 et 1 424 MW sur Inga 2) (p 14).

La RDC présente également un potentiel très encourageant pour le développement de l'énergie solaire, avec des niveaux de rayonnement compris entre 3,25 et 6 kWh/m²/jour (Kusakana, 2016). Avec de tels niveaux, des systèmes d'énergie photovoltaïque et de chauffage solaire pourraient fournir de l'énergie à travers le pays. À elles seules, les villes de Matadi et de Lubumbashi concentrent un potentiel photovoltaïque de 3,6 et 4,8 kWh/kWp, respectivement (Elan, 2019). Kusakana (2016) estime qu'à l'heure actuelle, « seuls 836 systèmes solaires photovoltaïques d'une puissance de 83 kW sont opérationnels ». À titre de comparaison, l'Allemagne dispose d'un potentiel d'ensoleillement de 0,9–1,2 kWh/kWp, mais d'une capacité installée de 44 GW.

Malgré le gigantesque potentiel énergétique de la RDC, une chose est sûre : la capacité opérationnelle, c'est à dire la capacité installée actuellement exploitée, est médiocre. Sur les quelques 2 500 MW de capacité hydroélectrique installée, seuls 1 000 MW sont réellement exploités (UCM, 2018, p. 1). Dans la prochaine partie de ce chapitre, nous approfondirons ce point en dressant un tableau général des infrastructures électriques du pays.

1.2.3 Une production électrique dominée par la Société nationale d'électricité (SNEL)

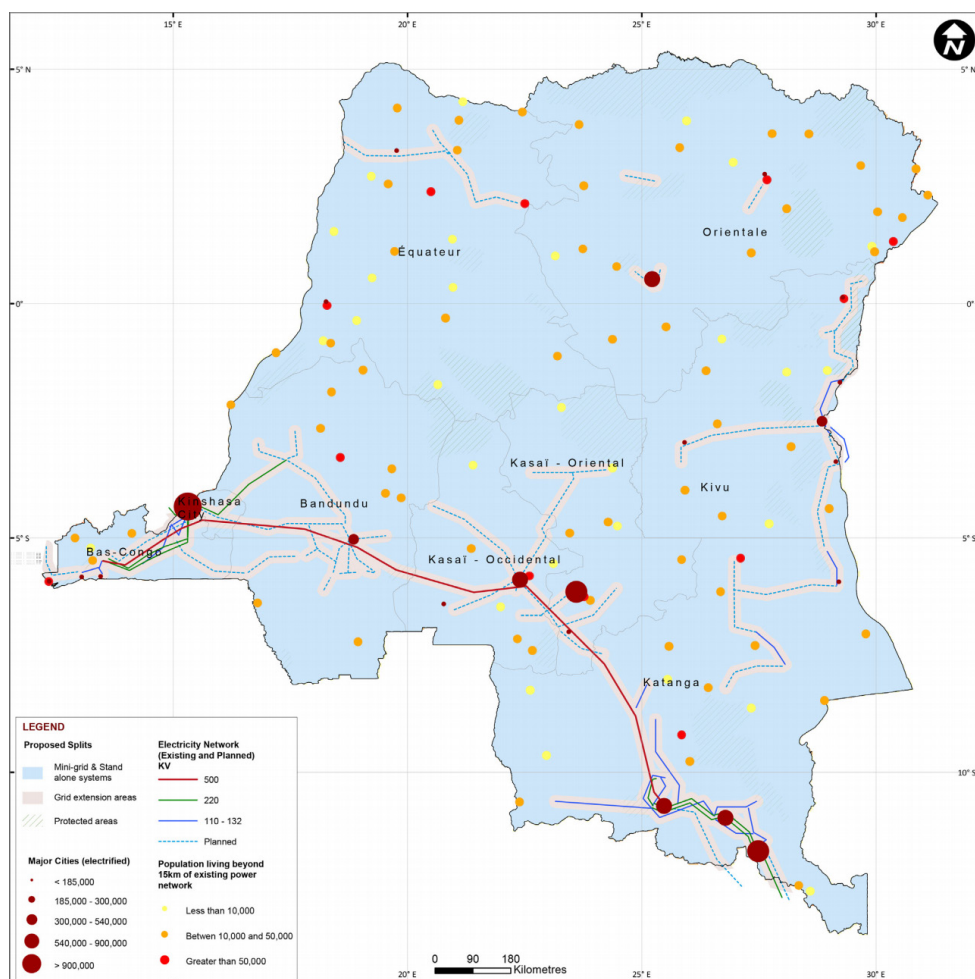
Selon l'UCM (2018, p. 18), la capacité installée nationale totale s'élève à 3 190 MW et repose sur une production répartie sur 108 sites : 2 500 MW provenant de sites hydrauliques et 290 MW tirés de sites thermiques. UCM (2018) et le PNUD (2013) évoquent le chiffre de 62 sites hydroélectriques comme source des 2 500 MW de capacité hydroélectrique installée. Sur ces 62 sites, les 14 centrales exploitées par la Société Nationale d'Électricité (SNEL) sont les plus productives. D'après UCM (2018) et USAID (2017, p. 36) les 14 centrales hydroélectriques et les 36 centrales thermiques de la SNEL représentent 95 % des 3 190 MW de capacité installée.

Douze des sites hydroélectriques de la SNEL constituent la source énergétique des trois réseaux électriques nationaux (UCM, 2018, p. 21), comme illustré dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 Configuration des trois réseaux hydroélectriques régionaux en RDC

Réseau Ouest : six sites hydroélectriques dans la province du Kongo Central, pour un potentiel de 2 013,2 MW	Réseau Sud : quatre sites hydroélectriques dans la province de Lualaba, avec un potentiel de 466 MW	Réseau Est : deux sites dans la province du Nord Kivu, avec un potentiel de 74,8 MW
• Inga 1 (350 MW), sur le fleuve Congo. • Inga 2 (1 424 MW), sur le fleuve Congo. • Zongo 1 (75 MW), sur le fleuve Inkisi • Zongo 2 (150 MW), sur le fleuve Inkisi • Sanga (12 MW), sur la rivière Inkisi • Mpozo (2,2 MW), sur la rivière Mpozo.	• Mwadingusha (68,04 MW), sur la rivière Lufira. • Koni (42,12 MW), sur la rivière Lufira. • Nzilo (108 MW) sur la rivière Lualaba. • Nseke (260 MW) sur la rivière Lualaba.	• Ruzizi 1 (29,8 MW). • Ruzizi 2 (45 MW).

Source : UCM, 2018



Carte 1.1 Localisation des trois réseaux hydroélectriques régionaux de la RDC

Source : Gnassou, L., 2019

D'après UCM (2018, p. 21), quatre autres sites hydroélectriques existent indépendamment des trois principaux réseaux. Il s'agit de :

- Bendera (17,2 MW) près de Kalemie, sur la rivière Kiyimbi, dans la province de Tanganyika.
- Tshopo (19,65 MW) à Kisangani sur la rivière Tshopo, dans la province de Tshopo.
- Kilubi (10,8 MW) à Kamina sur la rivière Kilubi, dans la province du Haut Lomami.
- Mobayi (11,367 MW) près de Gbadolite sur la rivière Ubangi, dans la province du Nord Ubangi.

Outre la SNEL, il existe quelques sociétés indépendantes participant à la production électrique dans le pays. Selon la Banque mondiale (2017), ces sociétés privées produisaient environ 135 MW en 2014.

Les réseaux Sud et Ouest sont interconnectés et alimentent six provinces : Kongo Central, Kinshasa, Kwilu, Haut Katanga, Haut Lomami et Lualaba. Le réseau Est répond à la demande des villes de Bukavu, Katana et Uvira dans la province de Sud Kivu, et de Goma dans la province du Nord Kivu.

En parallèle de ces trois principaux réseaux, il existe quelques petites poches de mini-réseaux alimentés par des stations hydroélectriques isolées (évoquées plus haut). Parmi ceux-ci, les plus importants sont le

mini-réseau de Kibali (nord-est du pays), le projet hydroélectrique de Virunga et le mini-réseau de Tshikapa (centre-sud) (UCM 2018, p. 22).

La Tableau 1.5, tiré d'un rapport de la Banque mondiale (voir Banque Mondiale, 2017, p. 46) étayé par des données de la SNEL datant de 2014, présente un aperçu général du secteur hydroélectrique en RDC. Compte tenu des années d'écart, les chiffres du tableau ne coïncident pas exactement avec ceux évoqués précédemment. Néanmoins, l'idée générale reste la même : en dépit de la participation de quelques entreprises privées, la SNEL détient un quasi-monopole sur le secteur.

Tableau 1.5 Production d'électricité en RDC par type d'agent, 2014

Sociétés	Nbre de centrales hydro-électriques	Nbre de centrales thermi-ques	Capacité installée énergie hydro-électrique (MW)	Capacité installée énergie thermique (MW)	Capacité totale disponible
SNEL	14	36	2 442	28,6	1 574,12
Auto-producteurs	43	10	105,15	9	31
Indépendant	4		29,8	30	9,8
Total	61	46	2 576,95	67,6	1 614,92

Source : Banque mondiale, 2017

Mise à part la domination de la SNEL dans le secteur, le tableau ci-dessus permet également de souligner la piètre capacité opérationnelle du pays comparé à sa capacité installée ; sur une capacité installée de 2 442 MW, seuls 1 574,12 MW sont réellement produits, soit à peine 64,46 % du potentiel national. Les chiffres exposés par l'UCM sont d'autant plus décourageants : sur les quelques 2 500 MW de capacité installée d'énergie hydroélectrique, à peine 1 000 MW sont exploités (UCM, 2018, p. 1).

En d'autres termes, une forte proportion de la demande en électricité n'est pas comblée. Toujours d'après UCM (2018), la production réelle des réseaux Sud et Ouest atteint 974 MW sur les 2 326 MW de capacité installée. En comparaison de la demande en électricité estimée à 2 600 MW (1 400 MW dans le pôle sud, et 1 200 MW dans le pôle ouest), on constate un déficit évalué à 1 626 MW (700 MW dans l'agglomération sud, et le reste à l'ouest). L'Atlas du ministère congolais des Ressources hydrauliques et Électricité de 2014 produit par Believe in DRC, un portail de promotion des investissements en RDC, brosse un tableau similaire à l'échelle de certaines provinces :

- Katanga : « La puissance installée (hydro et thermique) est de l'ordre 567 MW, alors que la demande actuelle est évaluée à près de 900 MW, dont 600 MW uniquement pour le secteur minier ».
- Kasai Oriental : « Les besoins énergétiques (2012) sont estimés à 264,774 MW, alors que la capacité installée actuelle (2012) affiche le niveau insignifiant de 1,94 MW ».
- Bandundu : « La province présence un gap de près de 408,35 MW entre l'offre et la demande ; la capacité installée des infrastructures existantes atteint 22,66 MW, contre une demande estimée à 431,01 MW afin de couvrir les besoins énergétiques actuels ».
- Equateur : « Les besoins énergétiques (2012) de la province sont estimés à 426,085 MW (tous les territoires de l'Equateur), par rapport à une disponibilité de l'ordre de 26,770 MW (2010), soit un gap de 399,315 MW à combler ».

Comme l'explique la Banque mondiale (2017), l'obsolescence des équipements est l'un des principaux facteurs justifiant ces insuffisances. Les centrales hydroélectriques et thermiques sont généralement dans un état de dégradation extrême. Plus spécifiquement, les sites hydroélectriques Inga 1 et Inga 2 — les deux principales sources énergétiques du pays — et leurs réseaux de transmission étaient jusqu'à récemment dans un état de détérioration avancé⁹, ce qui impactait la qualité et la fréquence de la tension (p. 55). Selon un fonctionnaire du ministère, ces faiblesses s'ajoutent à des pannes récurrentes des centrales thermiques causées par le manque de maintenance et de pièces détachées.

Cet état des lieux ne se limite pas aux infrastructures de production électrique, et touche également les équipements de transmission et de distribution¹⁰. Le réseau national de transmission électrique représente environ 6 711 km articulés en quatre blocs correspondant aux trois réseaux régionaux :

- Le réseau de transport ouest (Kinshasa, Bas Congo et Bandundu)
- Le réseau de transport sud (Katanga)
- Le réseau de transport de l'est
- La ligne directe Inga-Kolwezi (Banque Mondiale, 2017, p. 49).

En tant que propriétaire de l'ensemble du réseau de transmission, la SNEL est également en première ligne sur ce dossier (UCM, 2018).

La séparation des réseaux de transmission constitue un problème en soi. Le réseau national n'est pas interconnecté, à l'exception des pôles ouest (Inga) et sud (Kolwezi). Cette déconnexion limite la possibilité de transfert d'énergie d'un pôle à l'autre en cas de variations de l'offre et de la demande.

Une autre conséquence est le faible taux d'électrification de certaines capitales provinciales, dépendantes de réseaux isolés et peu performants. (Banque mondiale, 2017, p. 49). Les pôles ouest et sud (entre Inga et Kolwezi) sont reliés par trois lignes haute tension courant continu (HTCC) d'une puissance de transit de 1 100 MW (UCM, 2018), tandis qu'une deuxième ligne de transmission Inga-Kinshasa a été construite en 2015 (USAID, 2017, p. 14).

Ces lignes sont fortement dégradées, pour différentes raisons :

- « Actes de vandalisme perpétrés sur les équipements des postes et des lignes, avec vols massifs des conducteurs en cuivre au Katanga ;
- Défaillance des équipements électromécaniques et avarie des réducteurs de tension et de courant du fait de la vétusté et de l'obsolescence desdits équipements ;
- Absence d'une politique de renouvellement du matériel au-delà de la durée de vie garantie par le constructeur ;
- Avarie des transformateurs de puissance HT/MT ;
- Manque de maintenance requise faute de pièces de rechange nécessaires et d'expertise requise ;
- Dégradation des voies d'accès aux sous-stations et des pistes d'accès aux lignes HT ;

⁹ Les travaux de rénovation d'Inga 1 ont été finalisés l'an dernier ; ceux d'Inga 2 sont toujours en cours.

¹⁰ Les lignes de transmission transportent l'électricité sur de longues distances, leur voltage est plus élevé et elles peuvent transporter davantage d'électricité. Les lignes de distribution sont utilisées pour de plus courtes distances, leur voltage est plus faible et elles transportent l'électricité au niveau local (voir <https://callmepower.com/faq/energy-markets/difference-between-transmission-distribution>).

- Érosion des plates-formes des lignes HT ;
- Corrosion avancée des cornières, particulièrement sur les lignes 50 kV du Katanga, et inexistence ou obsolescence des automates d'enregistrement et de localisation des défauts ;
- Délestage de charges consécutives à la saturation des infrastructures (dépassement des capacités de transit des lignes de transport et surcharge des transformateurs des sous-stations) ;
- Dysfonctionnement des commutateurs en charge suite aux défauts ;
- Absence d'un centre de conduite du réseau interconnecté Est » (Banque Mondiale, 2017, p. 49).

Les réseaux évoqués plus haut sont connectés à ceux des pays voisins afin de faciliter le commerce énergétique (USAID, 2017, p. 14). Le réseau Sud est relié au réseau zambien (Pool énergétique d'Afrique australe) ; le réseau Ouest est relié aux réseaux du Congo-Brazzaville et d'Angola (Pool énergétique d'Afrique centrale) ; et le pôle, ou réseau Est est relié aux réseaux du Rwanda, du Burundi et d'Ouganda (Pool énergétique d'Afrique de l'Est) (UCM, 2018).

Le dernier maillon du système électrique est le réseau de distribution, grâce auquel l'électricité est acheminée des transformateurs jusqu'aux consommateurs finaux (ménages, entreprises, etc.). Le réseau de distribution mesure 38 083 km au total, dont 34 387 km de lignes à basse tension, et 3 696 km pour la moyenne tension (Banque mondiale, 2017). Le réseau souffre d'incidents fréquents, principalement justifiés par deux facteurs : le vieillissement des lignes et leur saturation permanente.

Un facteur courant de la surexploitation du système est l'absence de compteurs électriques. Les sous-stations, les cabines et les branchements des clients ne permettent pas de mesurer le volume d'énergie consommée ; de fait, les factures d'électricité sont constantes pour les consommateurs, quel que soit leur niveau de consommation. Cela a des conséquences préjudiciables sur la qualité des services fournis. L'absence d'un système de métrage de l'électricité livrée entraîne une utilisation inefficace et excessive, permettant aux plus gros consommateurs d'être injustement subventionnés par les paiements de plus petits usagers ainsi que par les caisses de la SNEL (Banque mondiale, 2017).

Un autre élément permettant d'expliquer la saturation des lignes est le nombre important de raccordements informels et illégaux. Le réseau de distribution ne couvre pas la totalité des villes desservies, ce qui crée des « poches noires » sans accès à l'électricité. Faute de couverture, de nombreux citoyens se rabattent sur des moyens informels pour satisfaire leurs besoins énergétiques. Selon des estimations de la Banque mondiale (2017), pour chaque client commercial facturé « géré » par la SNEL, on compterait quatre branchements « non gérés ». Ces connexions ne sont pas sécurisées, mal construites, conduisent à des pertes énergétiques importantes et représentent un problème de sécurité pour les biens et les personnes.

Enfin, les actes de vandalisme et les catastrophes naturelles contribuent également à la dégradation des lignes de distribution. La Banque mondiale (2017) a dressé la liste de ces dégâts occasionnés :

- Les vols des câbles et des luminaires sur les réseaux de distribution et d'éclairage public ;
- Les vols de disjoncteurs et autres équipements dans les nouvelles cabines de décharge en cours d'implantation ;
- Les avaries des parafoudres des lignes suite aux décharges atmosphériques ;
- Les interventions illicites dans les cabines ;
- L'arrachement des câbles MT et BT par les engins de terrassement qui aménagent les routes.

➤ 1.3 Difficultés à surmonter

Au vu des précédentes sections, deux principaux défis techniques s'imposent donc au système électrique congolais : le délabrement des centrales de production électrique, et la vétusté et la saturation des réseaux de transmission et de distribution électrique. Ces défaillances contribuent à d'importantes pertes énergétiques et, en bout de chaîne, à la prestation d'un service de qualité insuffisante.

Au-delà des problèmes techniques, d'autres facteurs permettent d'expliquer la faible couverture en électricité du pays. Tout d'abord, de nombreux éléments liés au marché de l'électricité limitent la généralisation de l'électrification. Par exemple, de trop rares connaissances sur le potentiel commercial sont à déplorer en raison du manque de données disponibles sur les revenus, le consentement à payer ou sur le recouvrement des factures (Elan, 2019, p. 5).

Un certain nombre d'obstacles logistiques découragent également les investissements dans de nouveaux sites énergétiques, notamment : les coûts élevés de la logistique, les frais douaniers et liés au transport des marchandises importées (Elan, 2019, p. 7), l'accumulation de retards d'investissements dans les infrastructures énergétiques (USAID, 2017, p. 14) et la mauvaise gestion chronique des installations de l'opérateur (USAID, 2017, p. 14).

À cela peuvent s'ajouter certains déboires en matière de gouvernance :

- L'absence de vision à long terme dans le secteur de l'électricité et un cadre juridique incomplet (USAID, 2018) — nous approfondirons ces facteurs dans la prochaine section ;
- Un climat d'investissements risqué au niveau sécuritaire, politique et légal (Elan, 2019, p. 1) ;
- La présence d'une forte mentalité rentière (Elan, 2019, p. 3) ;
- Les faibles performances de la SNEL et la revente d'électricité à des prix inférieurs aux coûts de production (USAID, 2018) ;
- La rareté des données sur le secteur.

Sur ce dernier point, UCM (2019) mentionne que « les informations sur l'énergie mises à disposition par SNEL SA ou d'autres opérateurs privés sont partielles, dispersées, anachroniques et difficiles d'accès. Ces rares données sont disponibles dans des formats techniques incompatibles avec les nouvelles technologies de l'information et de la communication (TIC) et ne permettent pas de modifications sur la durée » (UCM 2018, p. 2).

Les difficultés touchent enfin le domaine fiscal :

- Le système fiscal de la RDC est très confus (Elan, 2019, p. 3) ;
- Existence de lourdes taxes à l'importation, qui atteignent 42 % de facto, selon Elan (2019, p. 6 ; 2018, p. 2) et USAID (2018, p. 1) ;
- Absence d'un régime fiscal ou autre mesure d'incitation fiscale spécifique, notamment pour le développement d'une énergie solaire photovoltaïque hors réseau — bien que des négociations au cas par cas soient possible par le biais de l'ANAPI (Elan, 2019, p. 5–6 ; Elan, 2018, p. 9).

Cet aperçu du système électrique congolais fait ressortir la stagnation du système et ne permet donc pas de rendre compte des évolutions récentes. En 2014, la RDC a adopté une loi relative au secteur de l'électricité ; celle-ci introduit des changements majeurs à la nature du secteur en vue de son amélioration. Les effets

de cette loi ne sont pas révolutionnaires, mais les perspectives sont encourageantes. La deuxième partie de ce chapitre portera sur les réformes, sur un cadre institutionnel hermétique à ces évolutions, et sur les opportunités et défis qui subsistent dans le secteur.

➤ 1.4 Réforme politique et cadre institutionnel

1.4.1 La politique énergétique actuelle

L'un des problèmes les plus pressants du secteur énergétique est l'absence de vision pour sa gestion à long terme. A titre d'exemple, les objectifs d'électrification sont fixés dans la stratégie générale de croissance et de réduction de la pauvreté, et l'Article 4 de la Constitution congolaise consacre le droit à l'électricité pour tous. Néanmoins, en dépit des difficultés rencontrées, il n'existe aucune stratégie de planification dédiée au secteur de l'électricité.

Comme nous l'avons vu plus haut, la stratégie d'électrification du Congo au cours du siècle passé s'est concentrée sur une production et une distribution centralisée de l'énergie hydroélectrique (au détriment d'alternatives hors réseau, par exemple). Depuis l'indépendance du pays en 1960, la production électrique passe principalement par l'intermédiaire de l'entreprise publique SNEL.

La SNEL a été constituée par le décret 70-033 du 16 mai 1970 afin de nationaliser la gestion de l'électricité, auparavant entre les mains de quelques entreprises privées sous la colonisation belge. Le pays, alors dénommé Zaïre, accorde à la SNEL un certain nombre de pouvoirs : « capturer et utiliser les eaux du fleuve Congo dans la région d'Inga pour produire de l'énergie ; construire, réhabiliter et exploiter les barrages à travers sa propre agence ou par le biais d'une tierce partie ; et utiliser et revendre l'énergie » (Nkongolo, 2016, p. 41).

Au cours des années 1970, la SNEL devient un monopole énergétique de fait. En 1974, la société prend possession des droits, obligations et activités de toutes les autres entreprises de distribution énergétique ; en 1979, elle s'empare également de toutes les centrales thermiques de l'ancienne société de distribution d'eau et d'électricité (SNEL, 2013).

Néanmoins, ces nouveaux actifs ne s'accompagnent pas d'une augmentation du soutien financier nécessaire à leur maintenance et amélioration. Pour ne rien arranger, pendant le règne de Mobutu Sese Seko (1965–1997), la SNEL « ne parvient pas à recouvrer les factures des entités gouvernementales, des utilisateurs résidentiels et des sociétés minières » (International Rivers, 2013) et se trouve dépourvue d'un système efficace de facturation électrique (voir section précédente).

Dès lors, l'entreprise se heurte à des difficultés financières dans lesquelles elle est encore empêtrée aujourd'hui. D'après l'ONG International Rivers (2013), la SNEL reçoit depuis 2007 le soutien financier de la Banque mondiale, ce qui ne l'a pas empêché de frôler la faillite en 2010. En 2014, l'entreprise publique enregistre des pertes financières de l'ordre de 330 millions de dollars, soit l'équivalent d'un pour cent du PIB national. « Ainsi, le secteur énergétique dépend de financements publics extérieurs et privés » selon l'ONG Tearfund (2018, p 7).

L'une des conséquences de cette situation est l'ouverture progressive du secteur à la participation d'acteurs privés. Par exemple, en 1994, la construction et l'exploitation de centrales hydroélectriques et des réseaux liés a été ouvertes aux entreprises privées —uniquement à des fins commerciales. Cela explique pourquoi dans l'aperçu présenté plus haut, l'intégralité de l'électricité ne provient pas de la SNEL. En réalité, outre la

production et la revente d'électricité à travers le pays, l'entreprise publique « rachète également l'électricité générée par des producteurs indépendants, comme certaines sociétés minières disposant de leurs propres centrales électriques » (Lukamba-Muhiya & Uken, 2006, p. 22).

1.4.2 La loi 14-011 de 2014

Cette tendance à l'ouverture du marché s'est accentuée ces dernières années. Le secteur connaît en effet de lentes évolutions. Dernièrement, les dirigeants politiques ont fait de l'électrification l'une des priorités nationales. Lors du premier forum sur l'énergie électrique organisé par la RDC en août 2019, le président Tshisekedi a déclaré :

« L'accès à l'électricité est au cœur de tous nos enjeux économiques, sociaux et environnementaux, car aucun développement n'est possible sans énergie. L'absence d'une énergie électrique stable et de qualité obère les intentions d'investir dans de nombreux secteurs, étant donné que les entreprises font face à des surcoûts importants pour s'approvisionner en électricité en dehors du réseau. »

La promulgation de la loi 14-011 de 2014 portant sur le secteur électrique atteste de cette prise de conscience : la SNEL est incapable de supporter seule le fardeau de l'électrification. La loi introduit un changement majeur dans le secteur. En libéralisant la production, la transmission et la distribution électrique à la participation d'acteurs privés, cette nouvelle loi sonne le glas du monopole de la SNEL.

Conformément à la promotion de la participation privée sur le marché, la loi innove en régulant plusieurs domaines du secteur électrique : les partenariats public-privé (PPP) ; le processus de passation de marché ; la création de nouvelles agences publiques ; la décentralisation électrique ; et la prise en compte des dimensions socio-environnementales. (Gnassou, 2019). Enfin, et pas des moindres, la loi souligne l'existence d'un droit à l'électricité et le prérequis que représente la préservation de l'environnement pour tout projet de développement du secteur électrique.

La nouvelle loi établit que les opérations privées en matière d'électricité doivent être régies par l'un des cinq régimes juridiques suivants : la concession, la licence, l'autorisation, la déclaration et la liberté¹¹. La compétence d'octroi de permis à un opérateur privé est partagée entre les niveaux central et provincial, en fonction du régime juridique de l'activité (voir Tableau 1.6).

Ce partage illustre clairement le tournant en faveur de la décentralisation adoptée par la loi. Néanmoins, le budget général des provinces nouvellement créées reste limité, car la décentralisation administrative n'a pas été appuyée par une décentralisation fiscale. La situation est problématique ; sans les moyens financiers nécessaires, ces provinces auront du mal à assumer les responsabilités que leur confère la nouvelle loi (Gnassou, 2019).

¹¹ Ces régimes s'ajoutent à la forme juridique de « Délégation de service public », dans laquelle une tierce partie de nature publique ou privée est chargée de la gestion d'un service public, telle qu'encadrée par la loi 10/010 de 2010.

Tableau 1.6 Régimes juridiques pour l’octroi de concessions aux opérateurs privés du secteur électrique

Régime	Domaine d’application	Autorités compétentes
1. Concession	Toute activité de production, transport ou distribution d’électricité établie dans le domaine public	1. Gouvernement central pour l’exploitation des sources énergétiques ou réseaux électriques d’intérêt national 2. Gouvernement provincial (sources énergétiques ou réseaux électriques d’intérêt local ou provincial)
2. Licence	1. Production indépendante de l’énergie électrique de puissance égale ou supérieure à 1 000 kW réalisée en dehors du domaine public 2. Importation ou exportation d’énergie électrique 3. Commercialisation d’énergie électrique	1. Gouvernement central ou provincial 2. L’importation et l’exportation relèvent de la seule responsabilité du gouvernement central
3. Autorisation	1. Autoproduction en dehors du domaine public, puissance comprise entre 100 kW et 999,99 kW 2. Etablissement de lignes électriques privées traversant une voie publique ou située à moins de 10 m d’une ligne existante	Autorités provinciales
4. Déclaration	Autoproduction, puissance comprise entre 51 kW et 99,99 kW	Déclaration écrite à l’administration locale en charge de l’électricité.
5. Liberté	Installation de centrales électriques d’une puissance installée inférieure à 50 kW. Lignes électriques privées entièrement implantées sur une concession foncière privée.	Aucun permis exigé

Source : Loi 14-011 de 2014

En outre, six ans après son adoption, certains éléments cruciaux de la loi ne sont toujours pas mis en application. Par exemple, les processus d’acquisition des concessions, des contrats de bail ou de gestion ne font toujours l’objet d’aucune régulation (Tearfund, 2018). Ces détails sont pourtant essentiels pour encourager l’entrée de nouveaux acteurs sur le marché. Leur absence maintient « un climat d’affaires hostile et impacte négativement les investissements » (Tearfund 2018). De plus, dans les faits et à quelques exceptions près, il existe très peu d’opportunités pour les investisseurs et les nouveaux opérateurs privés. Cet éclairage permet d’expliquer pourquoi l’entreprise publique est toujours responsable de la production de plus de 95 % de l’électricité nationale (voir l’un des tableaux précédents).

Si la loi modifie également le cadre institutionnel du secteur en accord avec les évolutions qu’elle introduit, certaines des nouvelles entités prévues ne sont toujours pas opérationnelles, voire n’ont pas du tout été créées (Barba, 2018). Nous approfondirons ce nouveau cadre institutionnel dans la prochaine section.

1.4.3 Le cadre institutionnel actuel du secteur électrique

Grâce à la loi sur l'électricité, le cadre institutionnel du secteur énergétique de la RDC a énormément évolué, du moins en théorie. Néanmoins, six ans après son adoption, le pays n'a toujours pas mis en oeuvre l'ensemble des réformes prévues par la loi, y compris d'importantes réformes institutionnelles. Selon cette nouvelle loi, l'organisation institutionnelle du secteur énergétique de la RDC est la suivante :

Ministère de l'Énergie et des Ressources Hydrauliques (MERH)

Le ministère est responsable de l'élaboration et de la mise en oeuvre des politiques en matière d'électrification. La dénomination même du ministère reflète la préférence traditionnelle pour l'énergie hydroélectrique comme source de production électrique. Le ministère est responsable de l'élaboration d'une stratégie globale visant à un accès aussi démocratique que possible à l'électricité. Il est en charge de la mise en place et du développement des infrastructures nationales. Dans l'attente de l'établissement d'une nouvelle autorité de régulation, le ministère continue à jouer ce rôle, comme par le passé.

Société Nationale de l'Électricité (SNEL)

Comme évoqué plus haut, la SNEL est l'entreprise publique d'électricité congolaise. Bien que son statut soit passé d'entreprise publique à entreprise commerciale, la SNEL demeure une entreprise entièrement contrôlée par l'Etat. Elle reste également le principal acteur du secteur électrique. Dans l'attente d'investisseurs et de nouveaux acteurs, la SNEL conserve son quasi-monopole.

Unité de Coordination et de Management des Projets (UCM)

Le ministre de l'Électricité a créé l'Unité de Coordination et de Management des Projets (UCM) en octobre 2015 (arrêté CAB/MIN-ERH/058/2015). Initialement baptisée Unité de gestion du projet de développement de centrales hydroélectriques de taille moyenne, UCM, comme son nom l'indiquait, a été créée pour assurer la gestion du développement des projets hydroélectriques de taille moyenne. Son mandat a rapidement été étendu pour y inclure tous les projets énergétiques et hydrauliques à l'exception d'Inga 3 (arrêté CAB/MIN-ERH/039). <http://www.ucmenergie-rdc.com/>

Selon ses documents fondateurs et son site internet, le rôle d'UCM est de mener à bien les missions suivantes :

- Elaborer et coordonner la mise en oeuvre du plan d'électrification de la RDC ;
- Améliorer le cadre institutionnel afin de favoriser les investissements du secteur privé dans les projets hydroélectriques de taille moyenne ;
- Identifier et sélectionner les sites en vue de leur étude et développement ;
- Coordonner les activités, projets et initiatives financées par les bailleurs dans le secteur de l'énergie et de l'eau ;
- Initier et gérer la sélection des investisseurs ;
- Evaluer les possibilités d'obtention de financements « carbone ».

Dans les faits, UCM gère bien l'ensemble des programmes financés par les bailleurs, notamment (d'après UCM, 2018, p. 25) :

- Projet d'Appui à la Gouvernance et à l'Amélioration du Secteur Electricité (PAGASE), financé par la Banque africaine de développement (BAD) ;

- Projet d'Accès et d'Amélioration des Services Electriques (PAASE), financé par l'IDA de la Banque mondiale ;
- Programme d'hydroélectricité pour le Programme du Secteur Eau (PROHYDRO), financée par la banque de développement allemande *Kreditanstalt für Wiederaufbau* (KfW) ;
- Programme de construction de mini réseaux solaires décentralisés en partenariat public-privé (ESSOR), financé par UKAID ;
- Projet de réforme du secteur de l'électricité « PSR », financé par USAID.

L'UCM est coordonnée par Maximilien Munga, ancien directeur de la CODESI (l'ancienne commission responsable de la gestion de la passation de marché d'Inga 3) aujourd'hui remplacée par l'ADPI.

Agence pour le Développement et la Promotion du Projet Grand Inga (ADPI)

L'ADPI a été créé en octobre 2015 pour promouvoir et développer le projet Grand Inga, un ouvrage sur le fleuve Congo qui représente le plus grand potentiel hydroélectrique au monde (44 GW) (ordonnance 15/079). Les centrales électriques Inga 1 et Inga 2 exploitent moins de 5 % de ce potentiel.

Le gouvernement congolais a lancé une procédure d'appel d'offre pour Inga 3 en octobre 2010. Deux consortiums chinois et espagnol ont soumis leurs offres à ADPI en 2016. Les deux groupements ont affirmé qu'un projet à 4,8 GW (tel que proposé par les consultants de la BAD de la Banque mondiale) ne serait pas faisable économiquement et ont proposé un projet alternatif à plus de 10 GW. L'ADPI leur a demandé de fusionner leurs propositions en mai 2017. Les deux consortiums ont signé un accord de développement exclusif en octobre 2018 et soumis leur proposition préliminaire commune un mois plus tard. (ADPI 2020 ; RM/CRG, 2019)

La vision du nouveau président congolais pour Inga 3 est ambiguë. Tout en se montrant ouverte à un projet de plus grande envergure, la Présidence a fait savoir que la RDC préférerait retenir la version initiale du projet à 4,8 GW soutenue par les institutions financières internationales. A l'heure actuelle, impossible de dire si le calendrier d'Inga 3 sera respecté et permettra de satisfaire la demande de ses principaux clients, l'Afrique du Sud et le secteur minier du sud-est de la RDC.

Autorité de Régulation de l'Electricité (ARE)

L'ARE est responsable de la supervision de l'application des normes du secteur électrique par les divers opérateurs. Son but est de veiller à la promotion de la compétitivité et au respect de l'ensemble des lois et normes du secteur de l'électricité. Créé par décret (14/011), le site Internet de l'ARE est <http://are.cd/>

Agence Nationale d'Électrification et des Services Énergétiques en milieux Rural et périurbain (ANSER)

La mission générale de l'ANSER est de mettre en oeuvre la politique nationale d'électrification rurale, telle que définie par le ministère en charge de l'électricité, conformément aux objectifs qui lui ont été fixés. L'agence est responsable de la promotion de la planification et du financement des projets d'électrification rurale. L'ANSER a été créée par le décret 16/014.

Commission Nationale de l'Énergie (CNE)

Les fonctions de la commission sont la collecte, le traitement et l'analyse de données visant à la compilation d'une base de données sur le secteur énergétique. La base de données sera utilisée pour établir des équilibres et indicateurs énergétiques afin de faciliter la mise en oeuvre de stratégies énergétiques cohérentes et efficaces par les autorités politiques.

La CNE mène les activités suivantes :

- Tests des nouvelles technologies en laboratoire ;
- Etudes de préfaisabilité de micro-centrales électriques pour les gouverneurs provinciaux ;
- Etudes et inventaires du potentiel des petits sites d'énergie hydroélectriques et autres sources d'énergie ;
- Promotion des technologies pour l'électrification rurale.

La Cellule d'Appui Technique à l'Énergie (CATE)

La principale mission de la CATE est d'apporter son soutien institutionnel au ministère de l'Energie et d'assurer le renforcement de capacités des administrations et entreprises publiques dans le secteur énergétique. La cellule est responsable de l'analyse et coordination de la présentation des projets et programmes d'investissements avec divers bailleurs ; du suivi et de la définition de stratégies à moyen et long terme à l'échelle du secteur ; et contribue au montage technique et financier des projets hydrauliques et électriques.

L'ensemble des tâches attribuées à la CATE sont liées à la conception, à la mise en oeuvre et au suivi de projets et programmes d'investissements dans le secteur énergétique. La cellule est moins active depuis la création de l'UCM, du CPARE et CPANSER (les Comités préparatoires de l'ARE et de l'ANSER).

Ces institutions doivent désormais s'ouvrir aux provinces, qui disposent d'importants pouvoirs sur les différents projets par l'intermédiaire de leurs entités respectives, ainsi qu'aux organisations internationales dédiées à la planification de l'accès à l'électricité/à l'énergie dans le pays, notamment :

- *Alliance for Rural Electrification (ARE)*
- *Global Off-grid Lighting Association (GOGLA)*
- *Energie durable pour tous (SE4ALL) des Nations Unies*
- *Africa Minigrid Developers Association (AMDA)*
- *Power for All.*

➤ 1.5 Que nous réserve l'avenir ? Petit tour d'horizon des tendances émergentes du secteur électrique en RDC

1.5.1 La lente ascension des solutions d'électrification hors réseau

Bien que loi ne soit pas complètement mise en œuvre, l'ouverture du secteur électrique est bien engagée. Le développement de projets énergétiques hors réseau (*off-grid*) devient donc plus plausible. Par exemple, dans son article de 2018, Barba parle du « premier projet de mini-réseau en RDC » dans le contexte de la nouvelle loi sur l'électricité. Cette innovation doit être saluée car, comme l'explique l'auteur, les solutions de mini réseaux (*mini-grid*) sont des options très efficaces dans le contexte congolais, caractérisé par de faibles densités de population sur un territoire immense—sans parler des avantages écologiques que peuvent représenter ces réseaux.

Plusieurs évolutions dans le secteur font de ces projets hors réseau des options plus que réalistes. D'un point de vue technologique, le coût des installations solaires à usage domestique (SHS) a énormément baissé ces dernières années. D'autres initiatives intéressantes contribuent à l'accessibilité économique de ces nouvelles technologies énergétiques. Un bon exemple est le système « *pay as you go (PAYG)* », grâce auquel les ménages peuvent louer un kit solaire et payer depuis leur téléphone portable (*mobile money*) de façon échelonnée pendant la période de leur contrat (Bboxx, 2019).

Bboxx est l'une des entreprises à proposer ce système en RDC. L'entreprise est active dans l'est de la RDC (Goma et Bukavu) et propose à ses clients trois types de systèmes solaires à usage domestiques : « un kit avec un frigo de 90 L, un autre avec une TV 40 pouces, et enfin un pack avec les deux appareils ». Un autre exemple est illustré par les nouveaux mécanismes de crédit ciblant les PME et les foyers à hauts revenus, identifiés comme de potentiels promoteurs d'une mode de l'énergie solaire.

D'autres mécanismes innovants favorisent la demande pour de tels projets ; des partenariats entre opérateurs téléphoniques et institutions financières visent, par exemple, à mieux comprendre le principe du consentement à payer et à assurer l'accès au marché de la banque mobile (Elan, 2019, p. 9). Les initiatives PAYG sont particulièrement favorisées par la généralisation des structures de paiement mobile.

Les opérateurs tels que Vodacom, Orange et TMB (Peleele) cherchent à étendre la couverture de ces paiements mobiles (Elan, 2019 ; Elan, 2018, p. 5). L'intégration des réseaux de téléphonie et de paiements mobiles aux systèmes d'énergie solaire hors réseau représente donc un énorme potentiel. Néanmoins, la baisse des ventes et l'augmentation du taux de défaut observés en Afrique de l'Est incitent à la prudence (Elan, 2018, p. 6 ; Elan, 2019, p. 1).

Les stratégies cherchant à rendre les nouvelles énergies plus accessibles à la majorité des congolais sont bien adaptées au contexte national, et ce pour plusieurs raisons :

- Les ménages à faibles revenus craignent d'investir leurs maigres ressources dans de nouveaux produits, et les prix au détail sont souvent trop élevés pour eux (Elan, 2018, p. 6) ;
- Une culture enracinée d'achat de « biens de consommation à circulation rapide », plutôt que de biens plus chers et durables (Elan, 2019, p. 7) ;
- Une ignorance généralisée des produits reposant sur des énergies renouvelables ou à faible consommation énergétique (Elan, 2019, p. 5).

Le potentiel pour des solutions d'électrification hors réseau est favorisé par des niveaux de rayonnement solaire très élevés (voir plus haut).

La demande, déjà élevée et en constante évolution, augmente le potentiel des alternatives d'électrification hors réseau. La RDC compte la troisième plus grande population urbaine d'Afrique, avec une croissance annuelle de 4 % et une augmentation estimée à un million de nouveaux citoyens chaque année (Elan, 2018). Les populations urbaines à forte densité et sans accès à l'électricité sont une cible particulièrement attractive pour le secteur (ex. Masina, Kingasani à Kinshasa) (Elan 2019, p. 5 ; Elan, 2018, p. 5).

Le pays adopte progressivement des solutions d'électrification alternatives au modèle traditionnel reposant sur le réseau. Un indicateur de cette tendance sur le territoire congolais est la prolifération des opérateurs sur le terrain. Elan (2018, p. 2) a identifié près de dix entreprises spécialisées dans les systèmes photovoltaïques, notamment :

- Altech, une entreprise de Goma spécialisée dans la distribution et la revente de produits « pico-photovoltaïques » (pico-PV). Entre 2013 et 2017, l'entreprise a vendu 100 000 lampes (Elan, 2019, p. 4) :

- ▶ Partenariat avec Omnivoltaic : lampe pico PV pilote X + chargeur ;
- ▶ Partenariat avec Angaza : plateforme de paiement mobile PayGo.
- Bboxx, une autre entreprise de Goma spécialisée dans l’approvisionnement, la distribution et la revente de systèmes à usage domestique :
 - ▶ Octroi d’une exemption d’importation de produits solaires de l’ANAPI ;
 - ▶ Partenariat avec Orange à Kinshasa.
- D.light, leader mondial de l’approvisionnement et de la distribution de systèmes de lampes solaires dont le siège se trouve à Kinshasa ;
- Dev Solaire-Trust Merchant Bank (TMB), un projet pilote de SHS à Lubumbashi reposant sur le programme de crédit Pelele de l’opérateur téléphonique TMB (Elan, 2019, p. 7) ;
- Equatorial Power, un investisseur dans les mini-réseaux solaires :
 - ▶ Phase 1 sur Idjwi (île sur le lac Kivu) : 400 connections ;
 - ▶ Phase 2 inachevée plus de > 1 MW à partir de 10 mini réseaux.

Un autre indicateur de la tendance pour les sources d’énergie alternatives est l’augmentation des achats de biens liés à l’accès à l’énergie hors réseau. D’après l’ONG Tearfund (2018), l’Association mondiale sur l’industrie de l’énergie solaire hors réseau (GOGLA) a fait état de la vente de « 73 920 produits solaires hors réseau en 2016, et 46 090 au premier semestre 2017 ». Dans le même temps, le projet pilote « A Lighting Africa » a distribué 20 000 lampes solaires et 5 000 systèmes solaires à usage domestique en partenariat avec la Cellule d’Appui Technique à l’Énergie (CATE), le Ministère de l’Énergie et des Ressources Hydrauliques (MERH) et des commerçants locaux » (Lighting Africa, 2019).

Enfin, une autre preuve de cette tendance est l’émergence de nombreuses initiatives d’incitation à l’utilisation de solutions électriques à petite échelle. L’une d’entre elles est l’Association Congolaise pour les Énergies Renouvelables et Décentralisées (ACERD), une organisation indépendante à but non lucratif constituée de nombreuses entreprises locales, régionales et internationales soutenant le développement à travers leurs activités dans le secteur des énergies renouvelables et décentralisées en RDC.

1.5.2 Les incitations des bailleurs internationaux en faveur de solutions hors réseau

Les initiatives de plusieurs bailleurs ont également amplifié l’adoption de ces solutions d’électrification dans le pays. La **stratégie d’accès à l’électricité du programme ESSOR du département du Développement international (DFID) britannique** vise par exemple au lancement de 30 projets de mini réseaux solaires hybrides dans des zones d’au moins 100 000 habitants, par le biais d’un appel d’offre au secteur privé (IED, s.d.). Le projet cherche également à couvrir l’ensemble de la chaîne de valeur d’énergie renouvelable (ER) à partir du fournisseur international, ce qui permettrait aux consommateurs finaux d’accéder à des produits alimentés par des ER.

A travers son Fonds vert pour le climat, la Banque africaine de développement verse « 20+1 millions de dollars » à la RDC pour un projet de mini-réseaux écologiques à Gemena, Bumba et Isiro (environ 150 000 habitants chacune).

Le gouvernement indien a accordé un prêt de 83 millions de dollars à la RDC pour le financement de projets photovoltaïques de 35 MW dans les villes de Karawa, Mbandaka et Lusambo¹².

Les initiatives de l'**Alliance Virunga**, organisation à la croisée de la société civile, du secteur privé et d'institutions étatiques, et soutenue par des ressources extérieures, sont un autre exemple de la tendance hors réseau — du moins dans sa forme initiale. La coalition compte fournir 96 MW d'énergie hydroélectrique dans la province du Nord Kivu d'ici à 2020 grâce au soutien financier de la Fondation Howard Buffett et de l'Union européenne, mais aussi grâce à 9 millions de dollars apporté par le CDC du département du Développement international (DFID) britannique et la Schmidt Family Foundation (note de service de l'Alliance Virunga, 2016). Sur les 96 MW prévus, au moins 15 MW sont déjà disponibles. Les travaux ont avancé au point qu'aujourd'hui, la capacité installée du projet alimente le réseau Est du pays (voir le Tableau 1.7 pour plus de détails sur les centrales prévues et leur état d'avancement actuel). <https://www.cdcgroup.com/en/our-investments/investment/virunga/>

Tableau 1.7 Projet d'énergie hydroélectrique dans le Nord Kivu

Centrale	Capacité	Bénéficiaires
Mutwanga	0,38 MW	Usine locale de savon
Matebe	13,8 MW	Ruthuru, Goma (district de Nyirigonga), PME locales et clients résidentiels
Lubero	11,7 MW	Lubero
Mutwanga 2	1,4 MW	Mutwanga
Taliha Nord	23,2 MW	Beni, Butembo
Rutshuru 2	24 MW	Rutshuru, Goma
Taliha Sud	12,5 MW	Kanya, Nanyabayanga, Kirumba
Lukwaliha	9,1 MW	Beni

Source : Virunga, 2016, p. 29.

USAID a adopté une approche mixte dans le cadre de son programme **Power Africa**. Power Africa est une initiative américaine multi-acteurs (gouvernement et opérateurs privés) de soutien aux gouvernements d'Afrique subsaharienne afin de permettre aux populations d'accéder à l'électricité, notamment par le biais d'investissements privés. D'après le rapport 2017 et la fiche d'information 2018 d'USAID, l'initiative menée en RDC a :

- Contribué à l'établissement partiel des agences d'électrification ARE et ANSER ;
- Financé des consultants de la SFI pour mener une étude sur le potentiel de la demande à Kikwit (Kwilu), Kananga et Tshikapa (Kasai Central) et Mbuji-Mayi (Kasai Oriental) afin d'évaluer la viabilité de l'extension de l'accès au réseau dans ces villes ;
- Financé une autre étude de faisabilité de quatre mini-réseaux dans les provinces du Nord et Sud Kivu ;
- Soutenu de nouveaux investissements dans des mini-réseaux et systèmes SHS en étroite collaboration avec les autorités provinciales de l'est de la RDC ;

¹² Voir <https://www.esi-africa.com/industry-sectors/renewable-energy/indian-bank-approves-83-11m-for-solar-pv-plants-in-drc/>

- Prévu de financer une ligne CA d'Inga à Lubumbashi en passant par Kinshasa et Mbuji-Mayi dans le cadre du projet Inga 3 (détails disponibles dans le rapport 2017 d'USAID-SFI).

1.5.3 L'appui gouvernemental aux solutions hors réseau

Par ailleurs, le gouvernement manifeste un intérêt indéniable pour la diversité des technologies d'électrification du pays. Actuellement, UCM mène trois initiatives d'information (implicite ou explicite) sur la politique énergétique, notamment sur les projets de développement hors réseau :

- UCM prépare une étude pour l'élaboration d'un plan national géospatial d'électrification au moindre coût entre 2021 et 2040. D'après les termes de référence, l'un des mandats de cette étude est de parvenir à électrifier d'une part les agglomérations densément peuplées grâce à une extension du réseau, à une interconnexion de réseaux isolés ou à la création de mini-réseaux, et d'autre part les zones moins densément peuplées par le biais de systèmes autonomes (UCM 2018, p. 2). L'entreprise américaine NRECA est responsable de la préparation de cette étude ;
- UCM gère un autre projet dont le but est d'identifier des solutions techniques permettant d'accélérer l'électrification de 21 capitales provinciales congolaises à moindre coût, notamment grâce à l'usage de technologies hors réseau exploitant des sources d'énergies renouvelables. L'un des objectifs de ce projet est la réalisation d'études de préfaisabilité pour l'électrification de ces 21 capitales de province. Le projet est mis en oeuvre par l'entreprise française Innovation Energy Development, actuellement au stade de la collecte des données ;
- En collaboration avec la Banque mondiale, UCM supervise un projet de révision et d'amélioration des bases de données actuelles sur les ressources hydrauliques et solaires existantes en RDC, ainsi que d'identification de nouvelles sources hydroélectriques de plus de 2 MW grâce à l'imagerie satellite et une technologie SIG appelée Site Finder—qui permet d'obtenir des données essentielles pour le développement de nouveaux projets hors réseau. L'étude est actuellement en cours, mais UCM a déjà partagé les résultats préliminaires. L'entreprise belge SHER est en charge de cette étude.

Ces initiatives étant étroitement liées à notre projet, nous suivons de près leurs avancées afin d'éviter toute duplication des efforts et de favoriser de potentielles collaborations.

1.5.4 Poursuite des grands projets hydroélectriques

La tendance de l'électricité hors réseau ne signifie pas que les projets hydroélectriques d'envergure ont été rayés de la carte. Certains projets hydroélectriques importants, fruits d'alliances stratégiques entre le gouvernement national et des banques d'import-export (EXIM), sont actuellement en chantier. C'est notamment le cas de Zongo 2. En 2011, la China EXIM Bank et Sinohydro Corp ont signé un accord à hauteur de 360 millions de dollars pour construire une centrale hydroélectrique de 150 MW à Zongo, dans la province du Kongo Central (USAID, 2018).

La SNEL détient la concession et exploitera la centrale, tandis que Sinohydro est responsable des études techniques, des passations de marché et de la construction. La centrale a été mise en service en 2018, mais les lignes électriques vers Kinshasa n'étant pas encore prêtes, la centrale n'est pas totalement opérationnelle. Un certain nombre de failles techniques doivent également être comblées (CERERK, 2019).

Un autre exemple est le projet hydroélectrique de 10,5 MW à Kakobola, dans la province de Kwilu. Il s'agit de l'un des deux projets énergétiques financés par la banque d'import-export d'Inde et le GRDC. La centrale est construite pour un total de 57,4 millions de dollars, dont 42 millions proviennent du gouvernement d'Inde (GOI) et 15,4 millions du gouvernement de la RDC (USAID, 2018).

La construction aurait déjà dépassé le budget et serait à l'heure actuelle inachevée (RM). Une seconde centrale est en cours de construction à Katende dans la province du Kasai (occidental) grâce au soutien du gouvernement d'Inde. Cette centrale hydroélectrique de 64 MW, réalisée à 50–60 %, est construite pour un montant total de 280 millions de dollars (financement de 250 millions de dollars par le gouvernement indien par le biais de sa banque d'import-export, et 30 millions versés par le GRDC) (USAID, 2018). Le projet a été interrompu à de multiples reprises, et demeure inachevé (RM).

UCM a également dressé la liste des projets hydroélectriques prévus, s'élevant à un total supérieur à 5 000 MW, et « intégrant des centrales hydroélectriques (CHE) comme la CHE Inga 3 (4 230 MW), CHE Luapula (900 MW), CHE Ruzizi 3 (147 MW), CHE Nzilo 2 (120 MW) et CHE Busanga (240 MW) ». Parmi les centrales de cette liste, Inga 3 et Busanga méritent que l'on s'y attarde plus longuement.

Busanga est le plus gros projet hydroélectrique actuellement en construction. Le concessionnaire du projet est Sicohydro, une joint-venture entre l'entreprise minière Sicominex et plusieurs autres parties congolaises. Sur les 240 MW produites par la centrale, 170 MW sont alloués au projet minier de la Sicominex à Kolwezi, dans la province du Lualaba. L'énergie restante sera revendue au prix du marché à d'autres sociétés minières, à la SNEL ou autres acquéreurs. La mise en service est prévue fin 2020 ou début 2021.

Inga 3 sera située sur le fleuve Congo, tout comme Inga 1 et Inga 2. Avec une capacité potentielle totale de 40 000 MW, Inga 3 représente le plus grand potentiel hydroélectrique au monde — éclipsant largement les capacités d'Inga 1 et 2, de 351 MW et 1 424 MW, respectivement. Les défenseurs d'Inga voient donc dans le développement du projet une opportunité rêvée d'augmenter l'approvisionnement énergétique de façon spectaculaire, non seulement en RDC, mais pour l'ensemble du continent africain.

Néanmoins, le projet est sujet à de nombreuses controverses ; Inga 3 ne sera construit qu'à la condition que des clients « bancables » soutiennent le projet. Aux yeux des investisseurs privés qui se proposeront de développer et exploiter le projet, un client bancable ne peut être que le secteur minier ou des exportations, compte tenu de la pauvreté de la population congolaise et des dysfonctionnements de la SNEL¹³. Les mêmes inquiétudes sont soulevées dans le cadre des projets financés par les banques d'import-export.

Il existe enfin quelques projets de rénovation des infrastructures hydroélectriques existantes. C'est notamment le cas du projet de développement des marchés régional et national de l'électricité de la RDC, qui inclut :

- La réhabilitation des installations hydroélectriques à Inga ;
- La construction d'une ligne de transmission de 400 kV entre Inga et Kinshasa en complément de la ligne de 220 kV existante, ainsi que la construction de deux sous-stations de 100 MVA ;
- Expansion du système de distribution de Kinshasa ;
- Une composante études de faisabilité et services techniques ;
- Une composante institutionnelle et renforcement des capacités.

Congo Energy, une entreprise congolaise du Groupe Forrest International, a prévu de rénover d'importants sites hydroélectriques comme Sanga et Inga 2, et de construire une centrale solaire de 1 MW à Manono

¹³ Pour plus de détails sur Inga 3, consultez le rapport de Resource Matters « Inga III, un projet gardé dans l'ombre ».

(Katanga central). Enfin, l'entreprise belge Société de Techniques Spéciales (STS), basée en RDC, est en cours de construction d'infrastructures électriques industrielles (ex. Bralima, Bracongo), et d'installation d'équipements de transmission et de distribution (notamment à Lubumbashi-Likasi-Kolwezi, Kinshasa). Elle prévoit en outre de développer des micro-infrastructures de transmission et distribution hydroélectriques à Béni et dans ses environs (Nord-Kivu), notamment à Taliha (un site contesté par Virunga). L'entreprise a pris part à de nombreux projets étatiques en tant que sous-traitant, y compris les projets de Kakobola et Katende, tandis que sa filiale Energie du Congo (EDC) dirige la micro-centrale hydroélectrique de Tshikapa (Kasai Occidental).

Tous ces projets, qu'ils soient rattachés au réseau ou hors réseau, illustrent le futur prometteur du secteur électrique en RDC. A travers notre projet, nous souhaitons contribuer à cet environnement en plein essor et mettre à disposition un outil facilitant l'orientation des projets de développement à venir et des efforts entrepris en faveur de la population congolaise.

Au cours des prochains chapitre, nous présenterons un examen approfondi de notre plan afin de concrétiser nos objectifs.

Références

ADPI-RDC (2020), *Processus de sélection du développeur*.

Andritz, (s.d.) Democratic Republic of Congo — Cornucopia of Africa. Disponible sur : <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/hydropower-africa/democratic-rep-congo>

Banque Mondiale (2017), *Revue de la Gestion des Dépenses Publiques et de la Responsabilisation Financière. Accroître l'Efficacité et l'Effcience du Secteur Public pour Promouvoir la Croissance et le Développement (En Deux Volumes). Volume II. Septembre 2017*. Disponible sur : <http://documents1.worldbank.org/curated/pt/931391530518362918/pdf/R%c3%a9publique-D%c3%a9mocratique-du-Congo-Revue-de-la-Gestion-des-D%c3%a9penses-Publiques-et-de-la-Responsabilisation-Financi%3%a8re.pdf>

Banque mondiale. (2020) Production d'électricité à partir de sources hydroélectriques (% du total) — Congo, Dem. Rep. Disponible sur : <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.HYRO.ZS?locations=CD>

Barba, Julien (Clyde & Co LLP), (2018), The new models for energy transition in Africa: A legal review of mini-grid systems in DRC. Disponible sur : <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=9e24db2d-abc9-4cd4-a159-00f2a4b317e8>

CIA (2020), The World Factbook—Democratic Republic of Congo. Disponible sur : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/cg.html>

DESA (2019), 2016 Electricity Profiles

Élan RDC/UKaid (2019), The Last Frontier for Energy Access — The Renewable Energy Opportunity in the DR Congo. Disponible sur : <https://static1.squarespace.com/static/5bc4882465019f632b2f8653/t/5caf6631e79c7023d6525a3d/1554998850604/22+-+DRC+Energy+Opportunity.pdf>

Élan RDC/UKaid, 2018. Energy Access in the DRC — Serving the poor and building a capable energy sector to serve them. Disponible sur : <https://static1.squarespace.com/static/5bc4882465019f632b2f8653/t/5d3195598e770e000175b0f0/1563530670488/Energy+Access+in+the+DRC.pdf>

Gnassou, L. (2019), Addressing renewable energy conundrum in the DR Congo: Focus on Grand Inga hydropower dam project. *Energy Strategy Reviews*, Vol. 26, 100400. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300938>

International Hydropower Association (s.d.), Democratic Republic of the Congo Disponible sur : <https://www.hydropower.org/country-profiles/democratic-republic-of-the-congo>

International Rivers (2013), Congo's Energy Divide Factsheet. International Rivers. Disponible sur : <https://www.internationalrivers.org/resources/congo%E2%80%99s-energy-divide-factsheet-3413>

Kusakana, K. (2016), A Review of Energy in the Democratic Republic of Congo. dans ICDRE 2016: 18th International Conference on Desalination and Renewable Energy. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/306380971_A_Review_of_Energy_in_the_Democratic_Republic_of_Congo

Lighting Africa (s.d.), Democratic Republic of Congo—Lighting Africa. Lighting Africa. Disponible sur : <https://www.lightingafrica.org/country/democratic-republic-of-congo/>

Lukamba-Muhiya, J. M., & Uken, E. (2006), The electricity supply industry in the Democratic Republic of the Congo. *Journal of Energy in Southern Africa*, 17(3), pp. 21–28.

Nachmany, M., Fankhauser, S., Davidová, J., Kingsmill, N., Landesman, T., Roppongi, H., & Sundaresan, J. (2015), Democratic Republic of the Congo. An excerpt from the 2015 global climate legislation study: a review of climate change legislation in 99 countries: summary for policy-makers. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/284149889_The_2015_Global_Climate_Legislation_Study_-_A_Review_of_Climate_Change_Legislation_in_99_Countries_summary_for_policymakers

Nations Unies (2020) Energy Statistics Pocketbook. Disponible sur : <https://unstats.un.org/unsd/energystats/pubs/documents/2020pb-web.pdf>

Nkongolo, N. (2016), Managing legal risks in project finance in the Democratic Republic of Congo: the example of the Grand Inga Project (Doctoral dissertation, University of Pretoria). Disponible sur : https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/58734/Nkongolo_Managing_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

PNUD (2013) Rapport National « Energie Durable pour tous à l’Horizon 2030 » Programme National et Stratégie. Disponible sur : https://www.cd.undp.org/content/rdc/fr/home/library/environment_energy/Rapport_national_energie_pour_tous.html

SNEL (2013), Overview of the Electricity Sector in The Democratic Republic of Congo. Disponible sur : <https://usea.org/sites/default/files/event-/Democratic%20Republic%20of%20Congo%20Power%20Sector.pdf>

Tearfund. (2018) Pioneering Power. Transforming lives through off-grid renewable electricity in Africa and Asia. Democratic Republic of the Congo. Disponible sur : https://learn.tearfund.org/~media/files/tilz/climate_and_energy/2018-odi-tearfund-pioneering-power-country-report-drc-en.pdf?la=en

UCM. (2018) Termes de référence : Recrutement d’un consultant chargé de l’élaboration de l’étude du plan national géo-spatial d’électrification de la RDCAU Moindre Coût (PNGE-MC) «2021–2040 »

Van Reybrouck, D. (2014), Congo : une histoire. London: Not HarperCollins

CHAPITRE 2.

Données énergétiques : analyse des lacunes identifiées

➤ 2.1 Introduction

Dans le chapitre 1, nous avons identifié une série d'obstacles à l'approvisionnement électrique en République démocratique du Congo (RDC). Afin de contribuer à la résolution de ces problèmes, Resource Matters (RM), en partenariat avec l'Université de Cape Town (UCT), le l'Institut royal de technologie de Suède (KTH) et le Reiner Lemoine Institut (RLI) entend développer un modèle géospatial de système énergétique afin d'orienter les politiques énergétiques d'électrification en RDC. Ce chapitre présente les données nécessaires à l'élaboration de ce modèle, leurs sources et les lacunes identifiées et devant être comblés pour atteindre nos objectifs. Dans la mesure du possible, les sources décrites sont accessibles au grand public.

Ces données peuvent s'appliquer à de nombreuses initiatives en dehors de notre projet, et ne se cantonnent donc pas au contexte spécifique de la modélisation de systèmes énergétiques. Elles peuvent être utilisées par un large éventail d'acteurs, à des fins de planification en dehors du secteur de l'énergie. Les lecteurs pourront parcourir la table des matières afin de trouver les jeux de données correspondant à leurs besoins.

Nous sommes ouverts à tout commentaire sur le contenu de ce chapitre et les approches décrites, et accueillerons chaleureusement toute contribution pertinente sous forme de nouvelles sources de données, d'actualisation des connaissances ou d'évolution des méthodologies. Notre travail sera révisé à mesure que de nouvelles données et informations seront disponibles.

2.1.1 Modèles de système énergétique et données nécessaires

Les données nécessaires aux modèles de système énergétique dépendent principalement de deux facteurs : le nombre de variables prises en compte, et l'approche de la modélisation choisie. Pour le premier facteur, les modèles énergétiques nécessitent des données sur l'approvisionnement, la demande et les infrastructures énergétiques. La Figure 2.1 tirée du module de formation sur les systèmes énergétiques du Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies (DAES Nations Unies) illustre cet aspect.

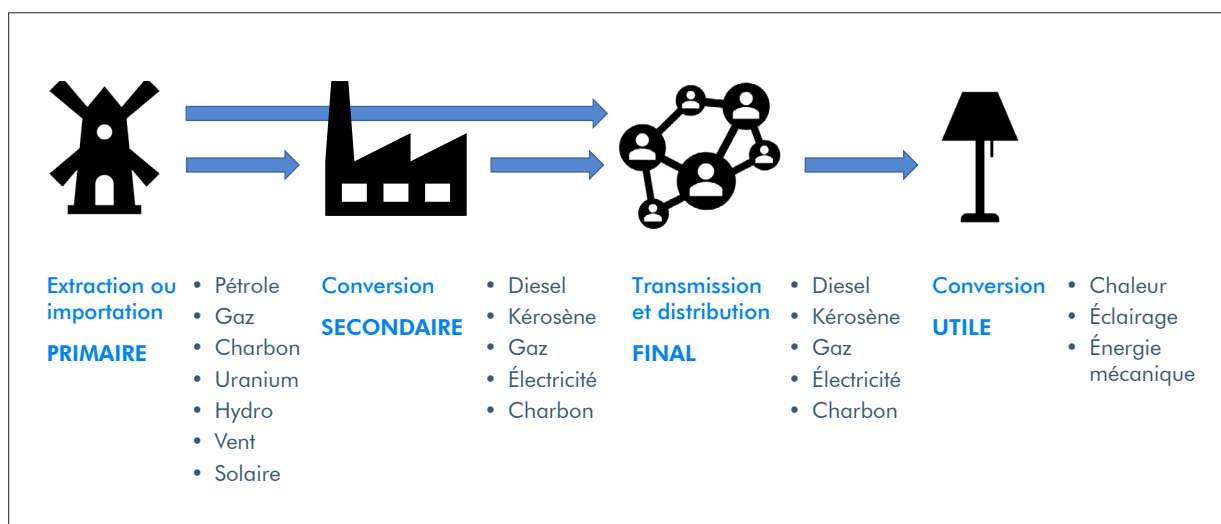


Figure 2.1 Eléments d'un modèle de système électrique

Source : DESA Nations Unies

« Un modèle typique de système électrique comprend des aspects techno-économiques, tels que les types de technologies de production électrique (...) ou les capacités de production, (...) et des aspects opérationnels, comme la demande énergétique » (UN-DESA, n.d.).

Pour ce qui est du second facteur sur les approches de modélisation, il existe trois principales manières d'aborder la modélisation énergétique : 1) les modèles descendants (*top-down*), qui s'appuient sur des données agrégées à des fins de prédiction, 2) les modèles ascendants (*bottom-up*) qui utilisent des données ventilées pour rendre compte de façon plus détaillée des usages et finalités énergétiques, et 3) les modèles hybrides, qui combinent les avantages et inconvénients de plusieurs approches, ou utilisent plusieurs modèles indépendants mais complémentaires (Urban et al., 2007, p. 3 479).

Ces différents concepts et notre préférence pour le modèle hybride seront expliqués plus en détail dans le chapitre 3. Notre équipe ayant l'intention d'élaborer un ensemble de modèles hybrides, nous avons identifié des données applicables à plusieurs approches de modélisation.

2.1.2 Données en République démocratique du Congo (RDC)

La modélisation énergétique, et plus particulièrement les modèles de type ascendants reposent sur une quantité importante de données. Ainsi, l'absence de données est l'un des principaux obstacles à l'élaboration de systèmes énergétiques dans les pays en développement—la RDC ne faisant pas figure d'exception. C'est donc dans ce contexte que nous présentons les résultats de notre collecte et analyse de données en RDC afin de répondre aux besoins soulignés par le projet.

Plusieurs jeux de données disponibles pour la RDC datent du siècle dernier, au cours duquel de nombreuses recherches ont été menées. D'autres sont plus récents, mais incomplets et de moins bonne qualité. Certaines données sont des projections d'études conduites il y a 10 ou 20 ans, et posent donc le risque de ne pas refléter les évolutions rapides sur le terrain. L'état de la collecte de données démographiques en est d'ailleurs une preuve (nous approfondirons ce sujet plus loin).

De plus, s'il existe de nombreuses données sur l'énergie en RDC, le problème réside davantage dans leur absence de diffusion. Les agences publiques nationales comme la Société Nationale d'Électricité (SNEL) et le Ministère de l'Énergie et des Ressources Hydrauliques publient certaines informations, mais il s'agit

généralement de simples aperçus de jeux de données plus étoffées, qui eux, sont difficiles d'accès — même pour les institutions au sein de l'administration publique. Cela représente un frein à l'amélioration de l'approvisionnement électrique dans le pays.

Grâce aux technologies actuelles, il est possible de créer ou d'estimer certaines données grâce à l'imagerie satellite et au traitement informatique, sans forcément devoir collecter de données sur le terrain (ex. éclairage nocturne, potentiel énergétique solaire et éolien, répartition démographique). Ces données sont généralement faciles d'accès dans des formats exploitables par les chercheurs. En fait, les modèles énergétiques existants pour l'Afrique subsaharienne et la RDC reposent largement sur des données satellitaires afin d'atteindre leurs objectifs. Toutefois, l'utilisation de ces données n'est pas dénuée de contraintes :

- Indisponibilité et manque d'intégration des informations issues des institutions publiques à l'échelle nationale ; néanmoins, certaines agences et institutions ont récemment mené des études et mis à disposition des données de bonne qualité ;
- Les projections basées sur des données satellitaires ne reflètent pas forcément la réalité, et les vérifications de terrain ne sont pas systématiques ;
- Les projections de données à l'échelle nationale ne reflètent pas les immenses variations potentielles entre les différentes provinces et ménages.

Ce chapitre est composé de cinq sections : 1) les données sur la demande, qui comprennent des données démographiques et socio-économiques, 2) les données sur l'approvisionnement énergétique, qui passent en revue les ressources énergétiques disponibles en RDC, 3) les infrastructures énergétiques et de transports, 4) les données liées à la géographie physique et 5) les délimitations administratives.

Dans les sections à venir, nous présentons les jeux de données que nous avons identifiés et répartis par domaine avec, lorsque possible, un aperçu de la situation actuelle congolaise. Pour chaque jeu de données jugé pertinent pour notre étude, la description inclut : le nom et l'origine des données, leur type (vecteur, raster, CVS, non-spatiale, etc.), la méthode de création, la couverture géographique et temporelle¹⁴.

Nous clôturerons le chapitre en présentant les jeux de données qui, en l'état ou améliorés, seront utilisés dans les prochaines phases du projet, ainsi que la façon dont nous entendons surmonter les difficultés et lacunes liées aux données.

➤ 2.2 Données sur la demande : population générale, ménages, entreprises et équipements publics

Les données portant sur la demande sont déterminantes pour estimer les solutions optimales d'électrification pour une localité donnée, car le coût de l'approvisionnement énergétique dépend de l'ampleur de la consommation énergétique potentielle. De plus, des données de qualité sur la demande contribuent à une meilleure estimation des effets induits par différents types de changement au niveau de l'offre ou de la demande énergétique, ce qui rend la modélisation d'autant plus utile et précise en matière de décisions politiques.

Le décompte et la répartition de la population est l'une des informations primordiales pour définir la demande énergétique dans un modèle de système énergétique. Compte tenu de la nature spatiale de notre modèle, des données précises de la répartition démographique, estimées grâce à l'imagerie satellite

¹⁴ Vous trouverez une compilation de ces informations, et plus encore, sur le lien <https://rb.gy/9gdrhp>.

et à un traitement informatique, sont considérées comme la méthode la plus adaptée car elle offre une résolution spatiale bien plus sophistiquée que des données obtenues par un recensement classique. Néanmoins, les données obtenues par recensement sont toujours nécessaires pour déterminer le nombre de personnes qui habitent dans une zone donnée. Les données de recensement de la RDC sont désuètes, certaines zones ne sont pas couvertes, et leur qualité laisse à désirer. Au cours de nos recherches, nous avons trouvé huit sources de données démographiques accessibles.

Le modèle a également besoin d'informations sur la façon dont les acteurs nationaux consomment l'énergie. Pour ce qui est des ménages, les données issues d'enquêtes de ménages sont l'option privilégiée. Nous avons identifié des micro-données tirées de cinq enquêtes de ménages à l'échelle nationale, et avons découvert l'existence de neuf enquêtes conduites entre 2000 et 2017. Au-delà des variables classiques qui caractérisent les ménages, certaines enquêtes comprennent également des questions sur leurs habitudes et préférences de consommation énergétique. Notre équipe de projet a par ailleurs mené une enquête sur la consommation énergétique dans la capitale Kinshasa et sa périphérie à l'automne 2019.

Dunkerley (1982) propose une liste de données optimale pour l'utilisation d'un modèle visant à estimer la demande énergétique. Cette liste comprend le niveau d'activité économique, les changements dans la structure de l'activité économique, ainsi que les évolutions régionales de l'activité économique. Ces informations ne sont pas surprenantes, car les infrastructures productives consomment généralement une large proportion de l'énergie produite en comparaison du nombre de ménages. Les informations sur la structure économique générale de la RDC sont d'ailleurs de bonne qualité. En revanche, les données ventilées sur la présence des entreprises sur le territoire, et sur leur demande énergétique se font plutôt rares. L'accès aux données concernant les équipements publics est encore plus délicat. Les jeux de données accessibles sur la localisation de ces structures sont très limités, d'autant plus s'il est question de leur demande énergétique.

Dans les pages suivantes, nous présentons dans le détail les sources identifiées pour chaque agent, les difficultés rencontrées, ainsi qu'une note introductive sur la façon dont nous avons géré ces données.

2.2.1 Données démographiques par imagerie satellitale

Pour les données démographiques, l'imagerie satellite (des images prises par satellite autour de la Terre et dont la résolution est suffisamment bonne) peut être utilisée pour identifier des bâtiments ou autres activités humaines. En combinaison de données démographiques traditionnelles, comme les recensements et enquêtes de ménages, il est possible de déduire le nombre d'habitants à un instant T. Des algorithmes informatiques peuvent être utilisés pour automatiser ce processus. Les données dérivées de l'imagerie satellite sont généralement **plus récentes** (aussi récentes que les images satellite) et **beaucoup plus précises** que celles tirées d'un recensement classique mené dans un pays en développement. Il est également possible d'étudier les changements et évolutions des schémas d'implantations, d'urbanisation et de croissance démographique en exploitant des images satellite d'archives.

Néanmoins, **quelques précautions s'imposent** lorsque l'on utilise des données démographiques obtenues via satellite. Par exemple, l'estimation du nombre de personnes vivant dans une zone donnée dépend essentiellement des données issues d'un recensement classique. Cela pose problème car dans le cas congolais, le dernier recensement national officiel remonte à 1984. De plus, de « **faux positifs** » (la détection d'un bâtiment qui n'en est en fait pas un, mais un rocher, une ferme etc.) et de « **faux négatifs** » (des bâtiments ignorés en raison d'une faille de l'algorithme, d'absence d'imagerie satellite, de l'indisponibilité des données de recensement, d'une faille de visualisation de présence humaine dans une certaine localité...) sont des dangers possibles.

L'exactitude des images satellites peut également être affectée par des obstacles entravant la **vue satellite**, comme un couvert nuageux, des toits réfléchissants, de grands arbres, ou encore par des **activités humaines**, comme des déplacements de populations, des bâtiments provisoires ou l'expansion rapide de zones d'habitation. Enfin, dans les pays dont les données se font rares, la **validation des données** est souvent incomplète, surtout dans les zones pour lesquelles il est attendu de faibles densités de populations, comme les zones rurales.

Divers **éléments techniques** intervenant dans le traitement des données doivent également être pris en compte. L'ampleur colossale des jeux de données rend leur manipulation très complexe. Les différentes résolutions, méthodologies et couvertures spatiales/historiques des diverses sources complexifie leur combinaison. Un calcul à la baisse ou l'absence de certains établissements humains (faux négatifs) peut entraîner une surestimation de la population à approvisionner dans les autres zones détectées. A l'opposé, de nombreux « faux positifs » **peuvent entraîner** l'estimation de présence humaine dans des zones inhabitées, avec pour conséquence une sous-alimentation énergétique des populations dans des zones correctement détectées. Enfin, les données satellite peuvent donner lieu à des problèmes de protection de la vie privée. En effet, l'anonymat et la sécurité de certaines populations peuvent être mises en danger ; dans certaines zones sans accès internet ou à l'information, les populations peuvent même ignorer l'existence de ces données en ligne, ou le fait qu'elles sont utilisées à des fins de planification d'infrastructures censées les desservir.

Par souci de viabilité de notre projet, nous avons consulté les sources suivantes de données démographiques et d'accès à l'électricité :

Données démographiques

1. Couches mondiales des établissements humains (*Global Human Settlement Layers, GHSL*), 2019, par le Centre commun de recherche de la Commission européenne ;
2. Cartes de densité démographique de Facebook, 2019, par Facebook et le Centre for International Earth Science Information Network (CIESIN) de l'Université de Columbia, puis le regroupement de ces données par le KTH Royal Institute of Technology de Suède ;
3. Cartes du quadrillage de la population mondiale (*Gridded population of the world*), 2017, par le SEDAC (Centre des données et d'applications socioéconomiques de la NASA) et le CIESIN ;
4. WorldPop, 2018, par l'Université de Southampton et le CIESIN.

Données sur l'accès à l'électricité

5. Bande jour/nuit (DNB) de la Suite de radiomètres pour imageurs dans l'infrarouge et le visible (*Visible Infrared Imaging Radiometer, VIIRS*) par le Earth Observations Group (EOG) du National Centre for Environmental Information (USA) ;
6. Cartes sur l'accès énergétique et la répartition démographique, 2019, par la Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM) et Landsat ;
7. Données sur la population électrifiée et non électrifiée d'OnSSET.



Figure 2.2 Jeux de données démographiques

Sources, de gauche à droite : (1) Groupe de recherche commun GHSL de la Commission européenne, (2) données Facebook, (3) données FEEM/Landsat, (4) WorldPop, et (5) SEDAC GPW v4.0. [Les figures à l'échelle nationale et en bonne résolution sont disponibles en annexe.]

Ces jeux de données couvrent intégralement la RDC, mais avec des couvertures temporelles et des résolutions différentes (variant entre des résolutions de 30×30 m et des décomptes à l'échelle provinciale). De plus, la plupart de ces données peuvent être téléchargées en accès libre sur internet ; elles disposent toutefois de différents niveaux de disponibilité en open-source, de transparence et de reproductibilité des étapes visant à la création des cartes démographiques finales. Les données Landsat utilisées par la FEEM font figure d'exception, et ne sont actuellement pas disponible en accès libre. Il est néanmoins possible de demander une licence universitaire pour y accéder ; les données sont également disponibles de façon indirecte grâce au retraitement de certaines cartes issues du jeu de données de la FEEM.

Le jeu de données de la SEDAC « Quadrillage de la population mondiale v4.0 » ne propose pas le même niveau de détails que les autres données présentées. Il s'agit simplement d'une reproduction accessible au public des données du dernier recensement de chaque pays du monde (1984 pour la RDC). Ces données sont exploitées via une méthode normalisée afin de créer un maillage de la population à partir des shapefiles, avec le décompte total de la population pour chaque zone couverte par le recensement (ex. quartiers, communes, etc.) et attribue un nombre égal d'habitant par pixel — sans pour autant ajouter d'informations à la répartition démographique dans ces zones. Plusieurs jeux de données dérivés de l'imagerie satellite s'appuient sur ces données de la SEDAC en tant qu'informations basiques issues du recensement. On retrouve donc des problèmes liés à l'absence de certaines informations dans le recensement (notamment véhiculés par cette source) dans d'autres sources de données modélisées (voir ci-dessous). Le Quadrillage de la population mondiale permet enfin de fournir des métadonnées pour chaque cellule du quadrillage (ex. année du recensement, signalements de données manquantes, zones terrestres ou aquatiques...)

Il y a quelques années, les jeux de données créés et publiés par WorldPop et l'Université de Columbia pour la RDC¹⁵ (<https://www.worldpop.org/geodata/summary?id=6348>) étaient les meilleures sources disponibles. Néanmoins, la qualité de ces données a peu évolué pour la RDC, alors que les autres jeux de données décrits ont fait d'énormes progrès en termes de précision et de résolution des données (c'est probablement vrai pour d'autres pays, mais nous n'avons pas approfondi cette question). Faute d'améliorations notables, les données WorldPop ne sont, à ce jour, plus considérées comme utiles par les experts cherchant à modéliser la répartition des populations — et ne seront donc pas abordées dans plus de détails dans le cadre de notre étude.

Pour chaque jeu de données décrit ci-après, la ville de Gemena, dans le nord-est de la RDC, est utilisée pour rendre compte de la plus haute résolution proposée par chaque source.

¹⁵ Ces données sont une estimation démographique pour 2020 (selon les projections démographiques de l'ONU) ; néanmoins, le jeu de données a été mis à jour pour la dernière fois en 2018.

Couches mondiales des établissements humains (GHSL)

Auteur : Commission européenne

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2018

Couverture géographique : mondiale

Site internet des données : <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/index.php>

Lien vers la méthodologie : <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/data.php#GHSLBasics>

Disponibilité : accessible au téléchargement

La Commission européenne (CE) a produit le GHSL à travers son Centre commun de recherche (JRC). Le GHSL est un jeu de données SIG illustrant la présence humaine sur Terre au fil du temps sous forme de cartes « bâties » (elles cartographient les constructions humaines), de cartes sur les densités démographiques et de classifications de cartes d'établissements humains (où la population est agglomérée de façons spécifiques). Afin de créer ces cartes, plusieurs jeux de données ont été utilisés, notamment des archives mondiales d'imagerie satellite à échelle fine, des données de recensement et des informations géographiques volontaires. Ces données sont ensuite traitées à l'aide d'algorithmes informatiques afin de générer les résultats étudiés (CE JRC GHSL, 2019).

Actuellement, ces données sont les plus prometteuses en termes d'ouverture, de couverture géographique et historique, de classification des types d'habitats et de développement international continu. Il s'agit du seul jeu de données comportant des données historiques et couvrant l'histoire des bâtiments, des populations et des types d'établissements humains (données disponibles pour 1975, 1990, 2000 et 2015).

Pour créer ces données, le cadre GHSL 2019 détecte les zones abritant des bâtiments à l'aide d'un grand nombre d'images satellite en haute résolution (Landsat) et d'un logiciel de traitement/détection de l'image. Ce processus permet d'élaborer des **couches de zones construites (GHS_BUILT-UP)**, à savoir des cartes en haute résolution présentant la répartition des bâtiments permanents détectés. Les données démographiques tirées des recensements sont ensuite ventilées par bâtiment (ceux identifiés à l'étape précédente) en fonction de leur densité. Ces chiffres sont ajustés en fonction des estimations de croissance démographique des Nations Unies. Le résultat de cette opération sont les **couches de répartition démographique (GHS_POP)**. Enfin, les populations identifiées dans les couches GHS_POP sont regroupés en établissements, par la suite classés par types d'établissements (ville, banlieue, ville secondaire, village, zone rurale, etc.). Ces critères reposent à la fois sur la densité de population et la densité de construction. Les **couches du modèle de classification par type d'établissement (GHS_SMOD)** constituent le résultat final de ce processus.

La Figure 2.3 résume ce processus. Pour une description plus détaillée, consultez le site internet <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/data.php#GHSLBasics>.

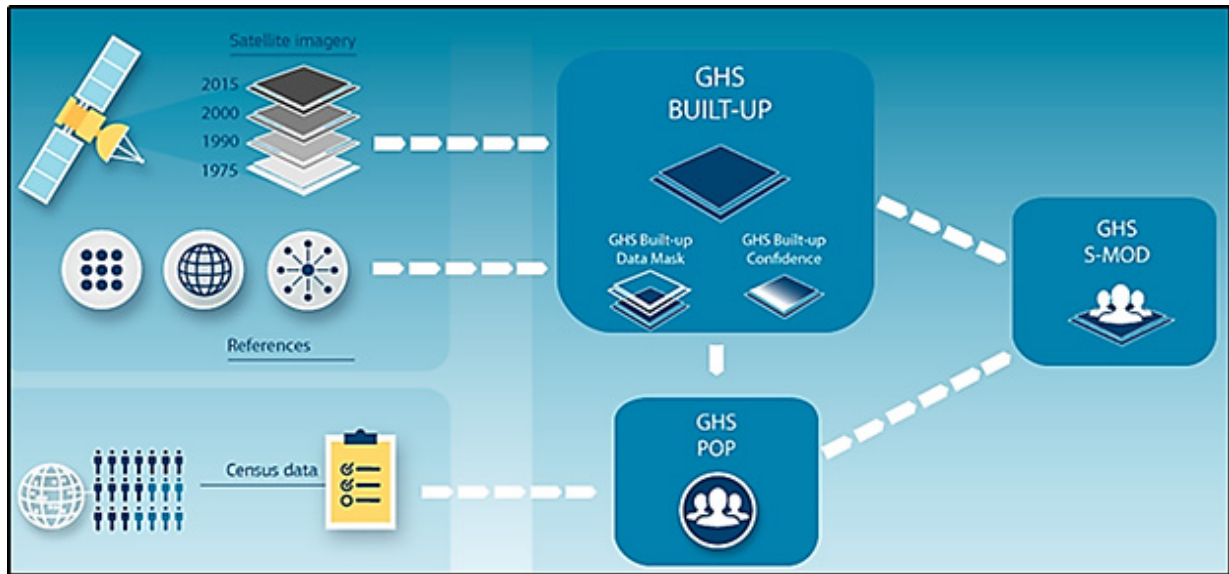
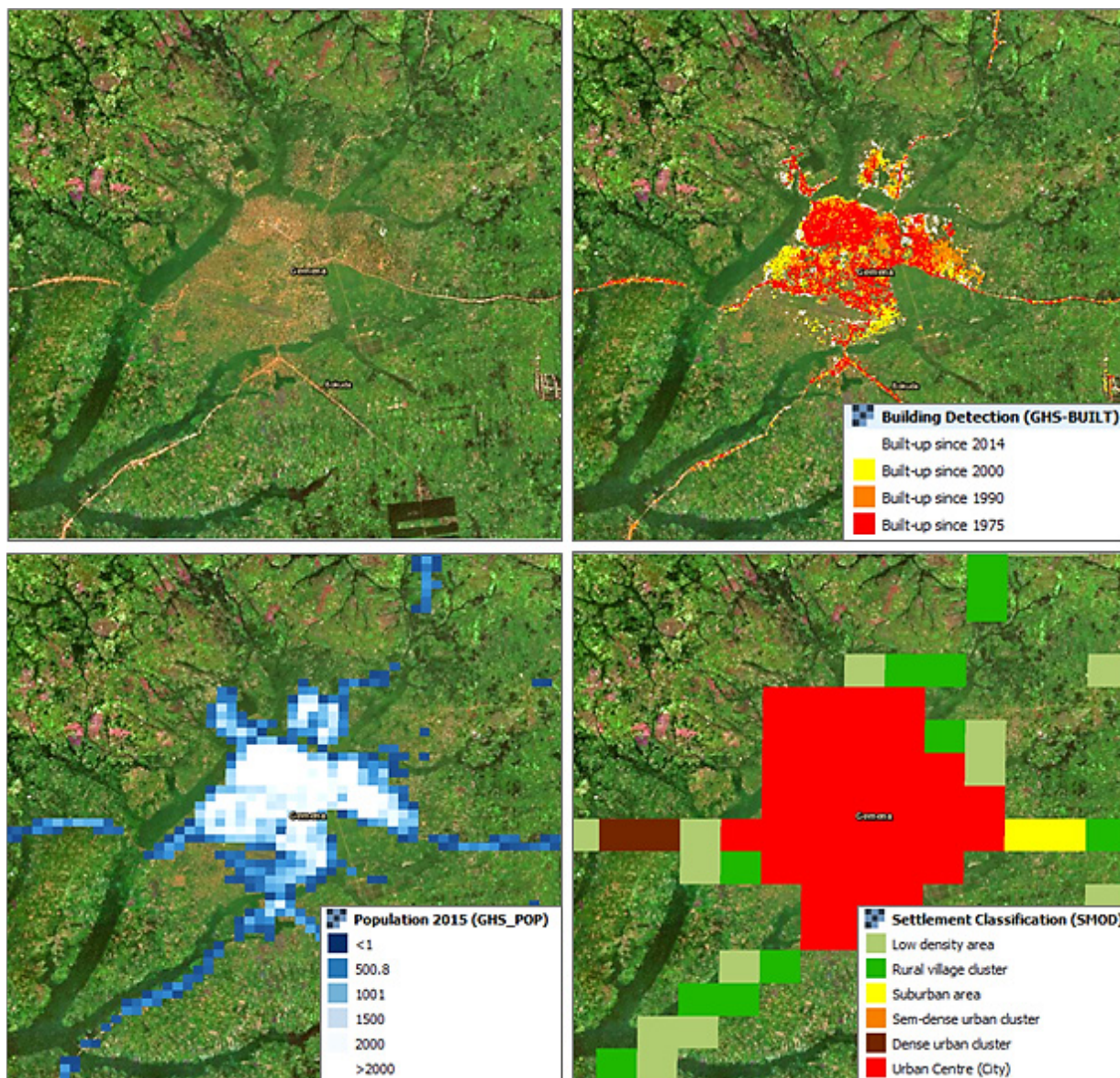


Figure 2.3 Processus de base pour la création des données GHSL

Source : <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/data.php#GHSLBasics>



Carte 2.1 Différentes composantes des jeux de données GHSL avec l'exemple de la ville de Gemena

Jeux de données GHS modélisés de 1975 à 2015.

En haut à gauche : image satellite.

En haut à droite : cartographie de la détection des bâtiments (GHS-BUILT : 30×30 m).

En bas à gauche : données sur la répartition démographique (GHS_POP : résolution 250×250 m).

En bas à droite : modèle de classification des établissements humains (GHS_SMOD : résolution 1×1 km).

Source : voir ci-dessus

Cartes de Facebook sur les densités de population

Auteur : Facebook

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2017

Couverture géographique : mondiale

Site internet : données brutes de Facebook disponibles sur <https://data.humdata.org/dataset/highresolutionpopulationdensitymaps-cod>

Données regroupées par KTH pour l'Afrique subsaharienne disponible sur : <https://data.mendeley.com/datasets/z9zfhzk8cr/3>

Lien vers la méthodologie :

<https://research.fb.com/wp-content/uploads/2019/05/Building-High-Resolution-Maps-for-Humanitarian-Aid-and-Development-with-Weakly-and-Semi-Supervised-Learning.pdf?>

<https://www.weforum.org/agenda/2019/08/facebook-using-machine-learning-to-map-world-population/>

https://www.researchgate.net/publication/321901984_Mapping_the_world_population_one_building_at_a_time

Disponibilité : accessible au téléchargement

Ces données sont générées de la même manière que les données GHSL, à savoir « à l'aide d'une combinaison de technologies d'apprentissage automatique, d'imagerie satellite en haute résolution et de données démographiques » (Bonafilia et al., 2019). Tout d'abord, des images satellite de DigitalGlobe disponibles sur le marché sont utilisées pour détecter les bâtiments grâce à un algorithme (illustré en Figure 2.4). Pour chaque cellule de 30×30 cm, cet algorithme détecte l'éventuelle présence de bâtiment, mais il ne fait pas de décompte des bâtiments dans chaque cellule.

Une fois que l'algorithme a détecté les bâtiments, il divise le décompte de la population (données issues du recensement) de la plus petite unité géographique (quartier, commune, province...) pour chaque zone de 30×30 m détectée dans la zone. Par conséquent, une cellule abritant un unique petit bâtiment peut comptabiliser le même nombre d'habitants qu'une cellule comprenant un grand immeuble. L'algorithme peut aussi déterminer un nombre d'habitants en fraction décimale dans certaines zones.

La carte démographique raster finale présente une résolution de 30×30 m, bien plus précise que la carte démographique du GHSL (250×250 m)¹⁶. Les estimations démographiques pour les cellules de 30 m² offrent ainsi une résolution nettement meilleure que celles de 250 m². Toutefois, c'est une arme à double tranchant : qui dit plus de cellules, dit plus d'erreurs potentielles, d'autant plus que l'algorithme ne dénombre pas les bâtiments présents dans chaque cellule. Il facilite néanmoins l'identification d'erreurs dans la mesure où celles-ci ne seront pas « lissées » (ex. à une échelle de 250 m, une valeur peut sembler correcte uniquement car les imprécisions sont invisibles pour l'utilisateur).

¹⁶ Les données de GHSL permettent la détection des bâtiments à une échelle de 30×30 m par cellule, mais elles ne proposent pas d'estimation démographique par cellule à ce niveau. GHSL calcule plutôt la densité des bâtiments par zone de 250×250, puis répartit la population dans ces zones en fonction de la densité déterminée.

La Figure 2.4 présente des exemples de données utilisées pour la classification dans le modèle de détection de Facebook, et la Carte 2.2 expose les données brutes de détection des bâtiments et de répartition démographique de Facebook à la plus haute résolution disponible (30×30 m).



Figure 2.4 Exemples de données utilisées pour la classification dans le modèle de détection de Facebook

A gauche : images classées comme abritant un bâtiment.

A droite : images classées comme exemptes de bâtiment.

Source : Facebook et al., 2017

Une limite importante des données de Facebook est qu'en cas d'absence de données démographiques tirées des recensements (c'était notamment le cas à Lodja, Kolwezi et Mabu-Maji), l'algorithme ne détectera aucun bâtiment, et n'affectera donc aucune présence humaine dans ces zones, alors que nous savons parfaitement qu'elles abritent des bâtiments et des habitants. Une autre faiblesse réside dans l'éventuelle obsolescence des délimitations géographiques d'un territoire (ex. une ville, village ou banlieue s'est étendue au-delà de ses limites de 1984) : cette erreur se répercutera sur la carte finale de répartition démographique. L'équipe de l'Union européenne (UE) chargée des données a récemment élaboré un algorithme pour rechercher les populations dans des zones dépourvues de données de recensement, puis réparti la population totale du pays dans ces zones ; les résultats présentent désormais la cartographie de ces populations dans les zones de Lodja, Kolwezi et Mabu-Maji.

L'Institut royal de technologie KTH de Suède a par la suite traité ces données sous forme de groupements (*clusters*) afin de les exploiter dans leur Global Electrification Platform (GEP) — une « plateforme internet interactive et en accès libre offrant un aperçu de divers scénarios d'investissements d'électrification pour plusieurs pays », dont la RDC¹⁷. KTH a regroupé les points de données de Facebook dans des établissements

¹⁷ Voir <https://electrifynow.energydata.info/>.

humains dont la taille oscille entre des cellules de quadrillage de 30 m et des bâtiments espacés d'une distance maximale de 100 m pour un même groupement¹⁸. Ils ont par ailleurs intégré une estimation de la population dans chacun de ces groupements grâce aux données d'éclairage nocturne récemment détectées par satellite, ainsi que des estimations démographiques de ces zones pour 2030, en s'appuyant sur des estimations de l'ONU.

La carte de Gemena ci-dessous présente les groupements de population. Les lignes indiquent le périmètre de chaque regroupement d'établissements humains. Chaque regroupement enregistre la population totale établie en son sein, ainsi qu'une estimation du pourcentage de la zone sur laquelle un éclairage nocturne a été détecté (utilisé par OnSSET pour déterminer le niveau d'électrification de référence). La carte repose enfin sur des projections démographiques horizon 2030 pour chaque regroupement.



Carte 2.2 Carte Facebook sur la détection de population et de bâtiments dans la ville de Gemena

A gauche : Bâtiments détectés avec la plus haute résolution de 30×30 m. A droite : KTH a regroupé les données par groupes de bâtiments avec un espacement maximal de 100 m au sein d'une même groupement. L'échelle de l'image de droite a été réduite afin d'afficher les groupements de populations aux alentours de Gemena.

Source : Facebook et al., 2017, et GEP, 2019.

Données sur l'accès à l'électricité

Les trois derniers jeux de données (VIIRS, FEEM/Landsat et OnSSET) cartographient les populations avec ou sans accès à l'électricité. Cette information est incontournable, car nécessaire pour déterminer quelles populations ne sont pas encore approvisionnées en électricité (c'est à dire la nouvelle demande potentielle en électricité, et sa localisation).

¹⁸ Pour plus d'informations, consultez <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/7/1395> et <https://gep-user-guide.readthedocs.io/en/latest/GEP%20Toolbox.html#q-gis-plugin-in-for-developing-population-clusters>.

VIIRS DNB (canal jour/nuit)

Auteur : Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA)

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2016 pour les données composites annuelles « lumières stables », et 2019 pour les données composites mensuelles.

Couverture géographique : mondiale

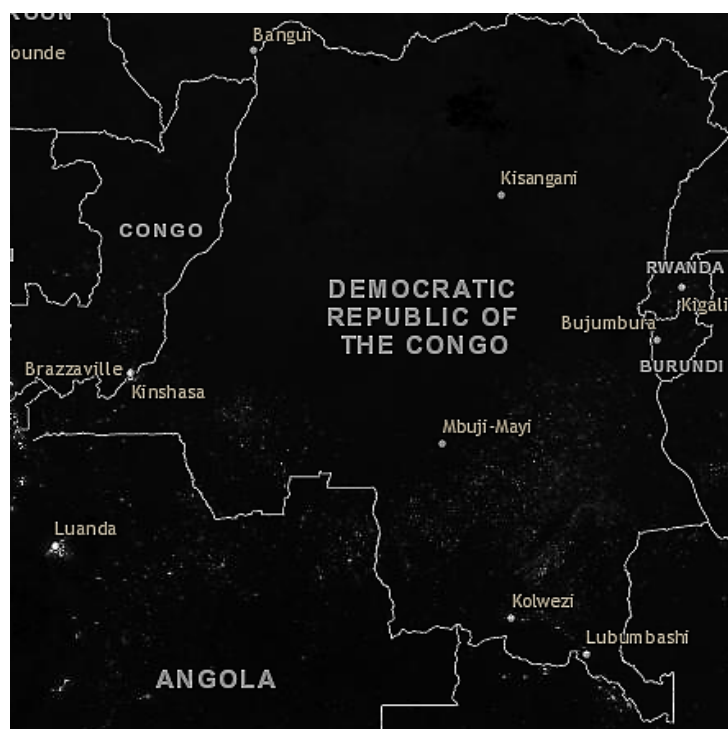
Site internet des données :

https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_dnb_composites.html#NTL_2015 (fichiers très volumineux, ~4GB)

Lien vers la méthodologie : <https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/>

Disponibilité : accessible au téléchargement

VIIRS (*Suite de radiomètres pour imageurs dans l'infrarouge et le visible*) est un capteur embarqué à bord des satellites météorologiques, qui collecte des images et des mesures radiométriques de la terre, de l'atmosphère, de la cryosphère et des océans dans toutes les bandes du visibles et de l'infrarouge du spectre électromagnétique. Le « canal jour et nuit » (DNB pour day/night band), l'un des canaux visibles, capture des images à faible luminosité tirées des villes, des villages, de diverses sources de combustion et des éclairages de bateaux de pêcheurs. Ce faisant, il offre une mosaïque mondiale de la luminosité nocturne, des données composites mensuelles et annuelles sans nuage. La version 1 des résultats du capteur balaie le globe de la latitude 75N à 65S, et est disponible en format geoTIFF.



Carte 2.3 Image du câble jour/nuit VIIRS à l'échelle de la RDC

Source : données VIIRS, 2016

Cartes démographiques et sur l'accès énergétique de la Fondation Eni Enrico Mattei (FEEM) et Landscan

Auteur : Fondation Eni Enrico Mattei

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2018

Couverture géographique : mondiale

Site internet des données : <http://gdessa.ene.iiasa.ac.at/gdessaInterface.html>

Lien vers la méthodologie : https://github.com/giacfalk/Electrification_SSA_data, <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0122-6>

Disponibilité : accessible au téléchargement

La FEEM et Landscan ont conçu « un jeu de données sur l'accès à l'électricité en Afrique subsaharienne d'une résolution de 1 km, reposant sur des données maillées relatives à l'éclairage nocturne, à la population et à l'occupation des sols. Grâce aux répartitions de la probabilité de radiance, [ils] ont défini des niveaux de consommation électrique dans les zones urbaines et rurales et ont estimé la proportion de consommateurs résidant dans des zones électrifiées pour chaque niveau de consommation. Ce jeu de données est facile à reproduire et à modifier grâce à un cadre informatique et scientifique en libre accès » (Falchetta et al., 2019).

Suite à un retraitement des couches démographiques fournies par Landscan, la FEEM met également à disposition des jeux de données sur la répartition démographique entre 2014 et 2018 à une résolution de 1 × 1 km. Les jeux de données brutes de Landscan ne sont pas accessibles librement, mais il est possible de solliciter une licence universitaire.



Carte 2.4 Couches de populations non-électrifiées de la FEEM

Données démographiques de 2018 à la résolution maximale de 1×1 km. Les données sont disponibles pour la période entre 2014 et 2018.

Source : FEEM et al., 2019

Données d'OnSSet sur les populations électrifiées

Auteur : KTH

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2019

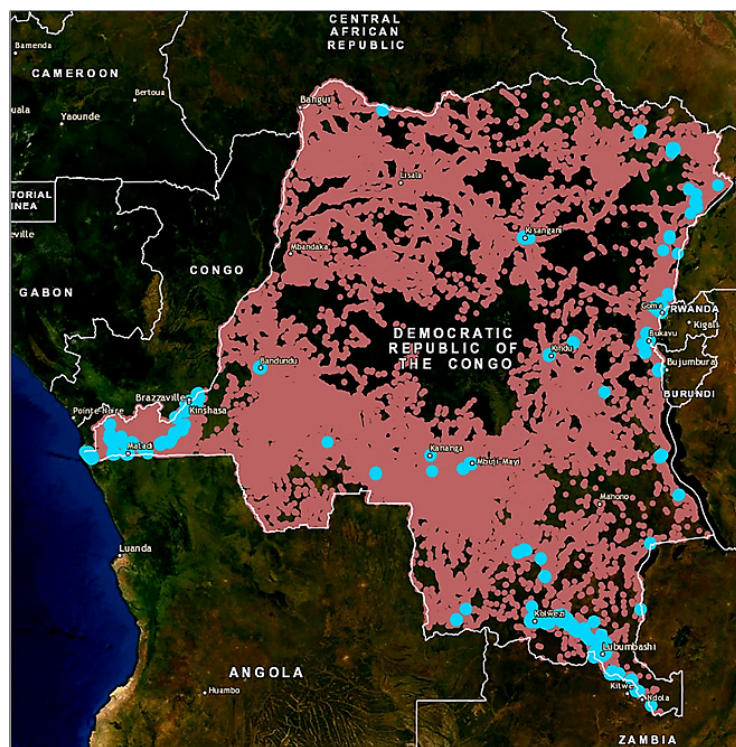
Couverture géographique : mondiale

Site internet des données : <https://drive.google.com/drive/folders/12rddv1Oqw-bWo5CV0RSGJJ5hW2dsnQ-4?usp=sharing>

Lien vers la méthodologie : www.onsset.org

Disponibilité : accessible au téléchargement

La Carte 2.5 fait ressortir une estimation de la localisation des populations électrifiées (en bleu) et non-électrifiées (en rouge). Ce modèle évalue la localisation des populations ayant accès à l'électricité à l'aide de données démographiques, mais aussi de données relatives à l'éclairage nocturne, à la proximité avec les réseaux électriques et routes existantes. Cette carte est tirée d'une précédente application d'OnSSET (menée dans le cadre de notre projet). La méthode de détection/estimation a été améliorée dans la dernière version d'OnSSET afin d'utiliser des groupements de populations, plutôt que des points.



Carte 2.5 Estimation de la population avec et sans accès à l'électricité selon OnSSET

Source : Analyse des auteurs à l'aide de l'algorithme d'OnSSET 2018, Données démographiques 2016 des GHSL, et données sur l'éclairage nocturne 2016 de la VIIRS.

2.2.2 Enquêtes auprès des ménages

Les enquêtes représentent une autre source importante de données démographiques. Les données tirées des enquêtes fournissent de nombreuses informations utiles pour la caractérisation des habitudes et préférences des ménages. Outre les variables socio-démographiques (nombre de personnes, revenus, niveau d'études, etc.), certaines enquêtes fournissent des informations sur les habitudes et préférences des ménages en matière de consommation énergétique (ex. possession d'appareils électriques, capacité à payer...). Les nombreux détails contenus dans les enquêtes permettent de faire des corrélations entre les variables étudiées — ce qui est très utile lors de l'extrapolation des données.

Ces dernières années, plusieurs enquêtes auprès des ménages ont été menées en RDC. Thontwa et al. (2017) en ont comptabilisé neuf entre 2000 et 2017 : *enquête MICS2* (2001, avec un échantillon de 8 600 ménages) ; *enquête 1-2-3* (2004, 13 688 ménages) ; *enquête CFSVA* (2007/2008, 2 336 ménages), *enquête démographique et de santé (DHS)* (2007, 8 886 ménages), *enquête MICS4* (2010, 11 490 ménages), *enquête CFSVA* (2011/2012, 24 884 ménages), *enquête OOSC* (2012, 13 519 ménages), *enquête 1-2-3* (2012/13, 21 454 ménages), et *enquête DHS* (2013/14, 18 171 ménages).

Quelques précautions s'imposent lors de l'analyse des informations sur les ménages en RDC. Il existe peu de continuité entre les différentes enquêtes citées ci-dessus, peut-être en raison des différentes institutions internationales qui les ont menées. Faute d'un échantillonnage normalisé, ces enquêtes auprès des ménages ne fournissent pas non plus d'indication précise sur la population (Marivoet & De Herdt, 2017). La Figure 2.5 présente un aperçu de la population interrogée dans chaque échantillon. Le dernier recensement national (une donnée élémentaire pour définir les échantillons d'enquêtes) remonte à 1984.

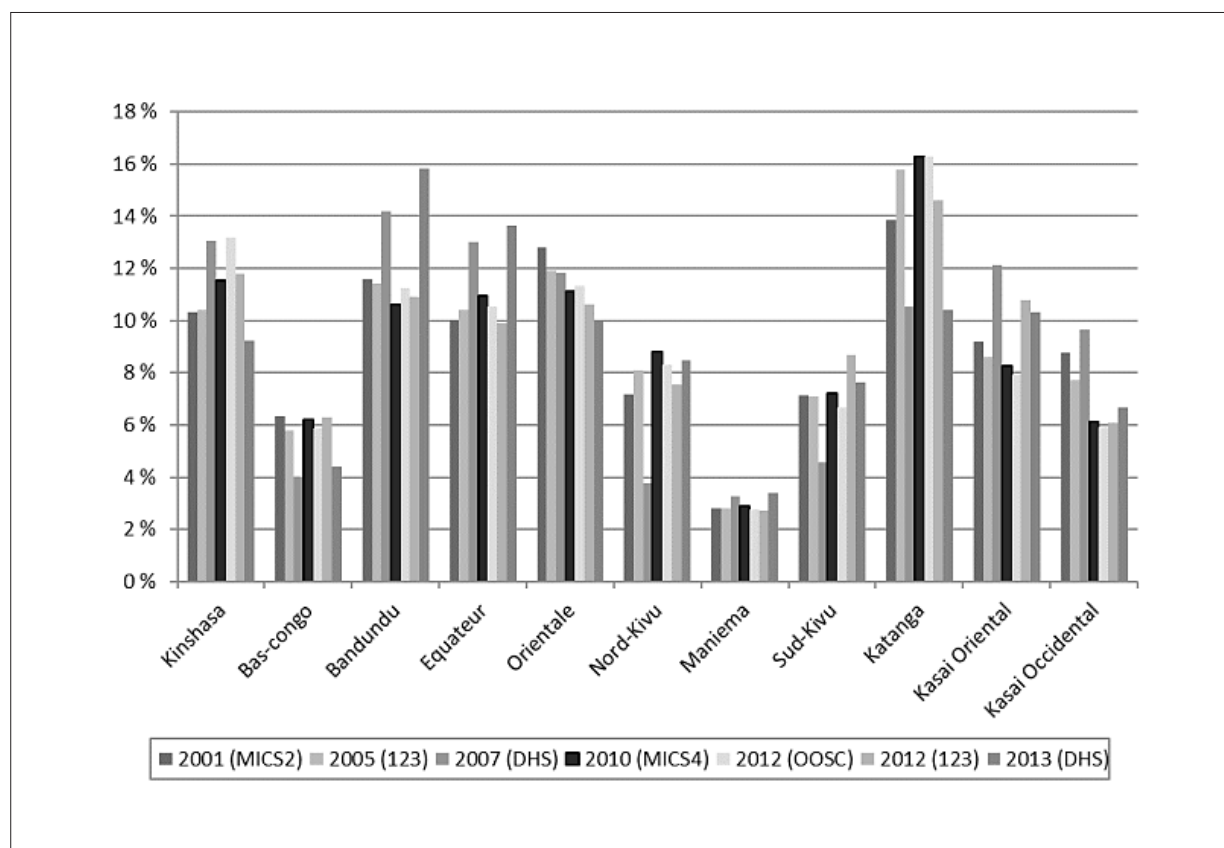


Figure 2.5 Poids de la démographie provinciale dans les enquêtes menées entre 2001 et 2013

Source : Thontwa, et al., 2017, p. 13

L'obsolescence du recensement national est d'autant plus problématique que la RDC a traversé des événements historiques marquants du point de vue de la répartition démographique. Parmi ces événements, Marivoet & De Herdt (2017, 1–2) évoquent « la fin du Zaïre en 1996 », « les deux guerres consécutives qui ont suivi » et « un relèvement économique et institutionnel progressif mais fragile depuis 2003 ».

De nombreux éléments expliquent la mauvaise qualité des données. D'un point de vue technique, une étude menée dans le cadre de la Stratégie nationale pour le développement de la statistique souligne la faiblesse du système statistique en termes de « ressources humaines, de capacités institutionnelles, d'infrastructures physiques et de disponibilité d'informations statistiques » (Banque mondiale, 2015, p. 3). En matière de ressources humaines, seul 44 % du personnel de l'Institut national de la statistique détient un diplôme professionnel ; parmi ceux-ci, seuls 17 % sont diplômés en statistique, en économie, en démographie ou en informatique. Ce pourcentage est inférieur à d'autres pays africains comme le Sénégal (59 %) ou le Ghana (39 %). Le salaire du personnel est également très bas ; en 2014, les salariés gagnaient moins de 150 dollars par mois. La RDC ne repose pas non plus sur un registre d'Etat civil fiable, et n'a jamais déployé de recensement des entreprises ou des activités agricoles. Ces facteurs impactent négativement l'exactitude

et la crédibilité de la planification, de la gestion et de la reddition de comptes sur la gestion publique du pays (Banque mondiale, 2015).

Les conséquences politiques de la collecte des données sont un autre facteur faisant obstacle à l'amélioration des informations démographiques au Congo (Brandt & De Herdt, 2019). D'après Marivoet & De Herdt (2017), il y aurait deux raisons à cela. Tout d'abord, un nouveau recensement pourrait modifier la composition régionale du parlement, dans la mesure où le poids démographique de chaque quartier pourrait évoluer. D'autre part, de meilleures données démographiques permettrait de mener une évaluation plus pointue des politiques économiques ou des programmes sociaux d'assistance internationale (vaccinations, professeurs par nombre d'élèves, santé du nouveau-né, etc.).

Au-delà de la qualité des données, leur simple disponibilité pose problème ; les micro-données de certaines enquêtes sont inaccessibles en ligne. En revanche, le Centre des Grands Lacs d'Afrique, implanté au sein l'Université d'Anvers, est parvenu à collecter de nombreuses enquêtes qu'il met à la disposition du public. Parmi ces enquêtes, quatre ont suscité notre intérêt. Le Centre dispose notamment d'une enquête mobilisant un échantillon d'envergure sondé sur les appareils électriques, l'électricité, la consommation et l'accès énergétique dans les ménages. Ces enquêtes nous aideront à mieux comprendre l'accès et la consommation énergétique des ménages congolais, ce qui nous permettra d'enrichir leurs profils de demande énergétique.

Dans les pages qui suivent, nous présentons une description des bases de données exploitables pour l'estimation des données sur la demande énergétique en RDC. Une question fondamentale demeure : quelle enquête contient les meilleures informations ? La dernière section de ce chapitre comporte certaines notes à ce sujet, ainsi que des éclairages sur la méthodologie utilisée pour extrapoler les informations tirées d'enquêtes à des zones géographiques non couvertes par celles-ci afin de les intégrer à notre modèle.

Enquêtes de RM et UCT sur la consommation énergétique

Auteurs : RM et UCT

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2020

Couverture géographique : Kinshasa

Données, méthodologie et disponibilité : voir Chapitre 5

Lors de la phase 1 de notre étude, nous avons conduit une enquête afin d'obtenir une compréhension plus fine des usages énergétiques dans les zones rurales, péri-urbaines et urbaines de Kinshasa. Notre enquête a été menée dans la province de Kinshasa entre les mois de septembre et décembre 2019. Le chapitre 5 couvre l'élaboration du questionnaire, la formation et la sélection des sondeurs, l'outil d'enquête, la méthode d'échantillonnage utilisée et les sites ciblés, ainsi que les statistiques descriptives préliminaires tirées de l'enquête.

Enquêtes démographiques et de santé (« DHS » 2007 et 2013)

Auteurs : Institut national de la Statistique de RDC, Ministère du plan de la RDC et Agence des États-Unis pour le développement international (USAID)

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2013

Couverture géographique : nationale (échantillon de 8 886 ménages en 2007 et de 18 171 ménages en 2013)

Site internet des données : <https://www.uantwerpen.be/en/projects/great-lakes-africa-centre/national-datasets-livelihoods-drc/demographic-and-health/>

Lien vers la méthodologie : <https://www.who.int/bulletin/volumes/90/8/11-095513/en/> (pour l'enquête de 2007)

<https://dhsprogram.com/pubs/pdf/SR218/SR218.e.pdf> (rapports des résultats de 2013)

<https://academic.oup.com/ije/article/41/6/1602/747345> (pas uniquement sur la RDC)

Disponibilité : accessible au téléchargement

D'après l'Institut des Grands lacs, cette étude consiste en une « enquête auprès des ménages représentative à l'échelle nationale et fournissant des données sur un large éventail d'indicateurs de suivi et d'évaluation d'impact, notamment sur la population, la santé et la nutrition en RDC. Elle fournit des données fiables sur la fertilité ; l'activité sexuelle ; la planification familiale ; l'allaitement », entre autres thématiques. Parmi les données de base recueillies, l'enquête inclut des questions sur les caractéristiques socioéconomiques des ménages, notamment le nombre de personnes composant le ménage, les matériaux de construction de l'habitat, l'éventuelle possession d'appareils électriques et accès à l'électricité.

Enquêtes nationales auprès des ménages 1-2-3 (« Enquêtes 1-2-3 » de 2005 et 2012)

Auteurs : Institut national de la statistique de RDC, en coopération avec plusieurs partenaires internationaux

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2012

Couverture géographique : nationale (échantillon de 13 688 ménages en 2005 et de 21 454 ménages en 2012).

Site internet des données : <https://www.uantwerpen.be/en/projects/great-lakes-africa-centre/national-datasets-livelihoods-drc/national-household-s/>

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus et Marivoet, et al. (2019).

Disponibilité : accessible au téléchargement

Il s'agit de la « première enquête nationale auprès des ménages orientée sur l'emploi, le secteur informel et les dépenses des ménages en RDC. L'enquête a permis de collecter des données sur trois aspects : 1) l'emploi, le chômage et les conditions de vie des ménages, 2) le secteur informel, ses conditions de travail, ses performances économiques et le mode d'insertion dans le tissu productif, et 3) la consommation, les lieux d'achats et la pauvreté. L'objectif général est de recueillir des données utiles pour l'estimation du niveau de vie des ménages.

Ces enquêtes s'intéressent à la taille, à l'accès à l'électricité et aux appareils électriques des ménages et des entreprises. Dans le second axe de l'enquête, on retrouve au moins une question sur le type d'activité économique (TYPAC), dont les réponses sont extrêmement précises : « vente au détail de farine de maïs », « vente au détail de l'huile de palme », « vente au détail de la boisson indigène », « vente au détail de la farine de manioc », etc. **En croisant ces réponses avec un indicateur de la consommation énergétique des ménages, il serait possible de développer des profils de consommation énergétique beaucoup plus sophistiqués.** Une première étude des enquêtes sur la consommation, les lieux d'achat et la pauvreté tend à indiquer qu'aucune question n'aborde les dépenses liées à la consommation électrique — mais une analyse plus poussée du questionnaire pourrait contredire cette première impression.

Enquête en grappes à indicateurs multiples (MICS) (1995, 2001, 2010)

Auteurs : Institut national de la statistique, Fonds des Nations Unies pour l'enfance (UNICEF), Secrétariat général de la planification et autres agences de l'ONU

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2010

Couverture géographique : nationale (échantillon de 4 574 ménages en 1995, 8 600 ménages en 2001 et de 11 490 ménages en 2010).

Site internet des données : <https://www.uantwerpen.be/en/projects/great-lakes-africa-centre/national-datasets-livelihoods-drc/multiple-indicator-c/>

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus et https://www.unicef.org/statistics/index_24302.html

Disponibilité : accessible au téléchargement

Cette collection d'enquêtes fournit des informations sur la situation des enfants et des femmes en RDC. Elle repose largement sur la nécessité de suivre les avancées vers les Objectifs du millénaire pour le développement (OMD). Les questions de l'enquête couvrent principalement généralisation des pratiques de santé et de prestations de soins, notamment l'usage de certains médicaments, les vaccins, l'usage de moustiquaires et les visites chez le médecin, entre autres. On y trouve également des informations intéressantes sur les conditions socioéconomiques et l'accès énergétique des ménages. Concernant leur accès à l'électricité, les enquêtes MICS comprennent des questions sur le type de combustible utilisé pour la cuisine, le type d'aliments préparés, l'accès à l'électricité, et l'éventuelle possession d'une radio, d'une télé, d'un réfrigérateur, d'un groupe électrogène, d'un téléphone portable, d'un PC, d'une voiture et d'un camion.

Enquête nationale sur la situation des enfants et adolescents non scolarisés (OOSC)

Auteurs : Ministère de l'Éducation, UNICEF, Département des financements internationaux du Royaume-Uni (DFID), Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), et les l'Institut supérieur des sciences de la population (ISSP) de l'Université de Ouagadougou

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2013

Couverture géographique : nationale (échantillon de 13 519 ménages en 2012).

Site internet des données : <https://www.uantwerpen.be/en/projects/great-lakes-africa-centre/national-datasets-livelihoods-drc/national-survey-on-t/>

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus et <https://www.alnap.org/help-library/national-survey-on-the-situation-of-out-of-school-children-and-adolescents> (rapport sur les résultats)

Disponibilité : accessible au téléchargement

Cette étude rassemble des statistiques et des informations sur les facteurs contribuant à la déscolarisation précoce des enfants en RDC. Cette enquête pose des questions sur les enfants déscolarisés, leur lieu de vie et les raisons de leur déscolarisation. On y trouve également des informations intéressantes sur les conditions socioéconomiques et l'accès énergétique des ménages. Sur ce dernier point, l'enquête pose notamment des questions sur le type de combustible utilisé pour la cuisine, le type d'aliments préparés, l'accès à l'électricité, et la possession d'une radio, d'une télé, d'un réfrigérateur, d'un groupe électrogène, d'un téléphone portable, d'un PC, d'une voiture, d'un camion et de panneaux solaires.

Toutes les enquêtes ci-dessous sont ventilées par province (24) ; les enquêtes démographiques et de santé (DHS) de 2007 et 2012 contiennent également les coordonnées des ménages (disponibles sur demande auprès d'USAID).

Initiative mKengela

Auteur : Cellule d'Analyses des Indicateurs de Développement (CAID) en collaboration avec le projet mobile d'Analyse et cartographie de la vulnérabilité du Programme alimentaire mondial (PAM)

Type de données : données quantitatives en texte brut

Dernière mise à jour : 2020

Couverture géographique : nationale (échantillon de 120 territoires).

Site internet des données : <https://www.caid.cd/index.php/publications/mkengela/>

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus et <http://mvam.org/2016/04/20/introducing-mkengala/>

Disponibilité : accessible au téléchargement

De nouvelles sources nous ont permis d'accéder à de précieuses informations sur les revenus des ménages, une variable déterminante pour estimer leur capacité à payer pour leur raccordement à l'électricité. Parmi ces nouvelles sources d'informations figure l'initiative mKengela. Dans le cadre de ce projet, un centre d'appel professionnel de Kinshasa contacte deux fois par mois des revendeurs locaux pour leur demander le prix de produits alimentaires de base sur certains territoires (voir section 2.6). Des agents de terrain collectent également des informations par territoire, notamment sur le coût d'une journée de travail agricole, puis comparent ce salaire avec le coût de deux paniers alimentaires de base. Ces éléments permettent d'estimer le pouvoir d'achat des ménages dont le revenu principal découle de l'agriculture, ce qui est le cas de la majorité des ménages congolais. Cette initiative est toujours d'actualité.

Faber et al. (2017) du *Center for Effective Global Action* de l'Université de Berkeley ont mené une série d'enquêtes auprès de ménages dans les communautés de mineurs artisanaux de la Copperbelt congolaise. Leur échantillon comportait une sélection aléatoire de 2 635 ménages (15 023 individus). Les données tirées de ces enquêtes comprennent les revenus moyens et médians par habitant (28 dollars et 14 dollars, respectivement), et indiquent que les ménages sondés vivent dans des conditions d'extrême pauvreté. D'un point de vue statistique, les dépenses mensuelles moyennes par tête (environ 20 dollars) sont quasiment identiques aux revenus mensuels moyens des ménages par habitant, ce qui signifie que toute épargne est théoriquement inexistante.

En 2020, le *International Peace Information Service (IPIS)* publiera une étude portant sur les revenus des mineurs situés dans l'une des régions orientales de la RDC. Le croisement de ces informations avec la description du CAID du tissu économique des territoires et des villes permettrait d'obtenir une estimation indicative du pouvoir d'achat des ménages dans ces différents territoires. Enfin, le CAID présente la part des revenus des ménages agricoles en fonction de leur principale source de revenus (travail salarié et autres emplois informels, ex. pêche, élevage, agriculture). Afin de compléter les informations de ses « fiches d'identité » des territoires et des villes congolaises, le CAID intègre également une liste des principales sources énergétiques ainsi qu'un état des lieux succinct mais précis de l'accès à l'énergie — qui, malheureusement, ne couvre pas la totalité des villes et territoires.

Tableau 2.1 Sources de revenus des ménages

Etude sur les moyens de subsistance des ménages de mineurs, menée par le Center for Effective Global Action	https://cega.berkeley.edu/assets/cega_research_projects/179/CEGA_Report_v2.pdf
International Peace Information Service (IPIS)	https://ipisresearch.be/
Composition des revenus des ménages agricoles (CAID)	https://www.caid.cd/index.php/exporter-les-donnees/?donnees=agriculture&round=2 — Option « Proportion de la population selon la source principale de revenu »
Liste des principales sources énergétiques par unité géographique (CAID)	https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-province-administrative/ pour les territoires, et https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-villes/ pour les villes. Dans chaque « fiche de territoire », consultez l’option « Situation économique — Principales sources d’énergie » https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-villes

2.2.3 Structure économique et activité des entreprises

En République démocratique du Congo, la demande énergétique à des fins productives a toujours largement surpassé la demande des ménages ; ceci dit, ces derniers rattrapent leur retard depuis quelques années (voir le Tableau 2.2). Afin de mieux comprendre la demande électrique appliquée aux usages productifs, nous abordons quatre aspects dans le cadre de ce rapport : 1) la structure économique générale, 2) les activités des entreprises, 3) les activités informelles et 4) la demande par secteur.

Tableau 2.2 Consommation énergétique en RDC par type de consommateur (GWh)

	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Usage personnel des industries énergétiques						
Industrie et construction	4 258	3 652	3 262	4 342	3 994	3 848
Transports		15	0	0	0	...
Ménages et autres consommateurs	2 460	3 716	4 009	3 557	3 272	3 153
Total	6 718	7 383	7 271	7 899	7 266	7 001

Source : DESA Nations Unies, 2019

2.2.3.1 Structure économique

Les informations macroéconomiques sont l’un des principaux indicateurs de la demande énergétique. Grâce à des jeux de données relativement foisonnants sur la production de biens et services, et sur la consommation énergétique dans le pays, il est possible d’estimer la relation entre ces deux variables. La **Banque centrale du Congo (BCC)** dispose d’une base de données compilant le produit national brut (PIB) de 1960 à 2008. D’autres bases de données, très couramment utilisées dans le cadre de la recherche macroéconomique, comme celles du **Fonds monétaire international (FMI)**, de la **Banque mondiale** ou le **Penn Tables** — un ensemble de données nationales disponible pour de nombreux pays, largement

utilisé parmi les chercheurs — contiennent également de riches historiques du PIB congolais, entre autres indicateurs utiles pour l'estimation de la consommation énergétique nationale.

Tableau 2.3 Sources de longues séries temporelles sur le PIB de la RDC

Série d'informations sur le PIB de la Banque centrale de la RDC	http://www.bcc.cd/index.php?option=com_content&view=article&id=150:production-interieur-brut-pib-constant-au-prix-de-2000&catid=73:secteur-reel&Itemid=14
Profil pays de la RDC par le FMI	https://www.imf.org/en/Countries/COD#countrydata
Profil pays de la RDC par la Banque mondiale	https://data.worldbank.org/country/congo-dem-rep
Penn World Tables	https://www.rug.nl/ggdc/productivity/pwt/

Le PIB par secteur est également disponible. Dans ses rapports annuels, la Banque centrale congolaise compile des informations sur la production des principaux biens de l'économie nationale : sept minerais, production de sept cultures vouées à l'exportation, quatre produits manufacturés, production d'eau et d'électricité — ainsi que les statistiques sur la composition par secteur de la production nationale brute entre 2008 et 2017. La *Structural Change Database* (Base de données des changements structurels) réalisée par l'Université des Nations Unies contient des données intermittentes sur le PIB sectoriel de neuf secteurs entre 1950 et 2016. Néanmoins, les chiffres les plus récents remettent en cause la solidité de ces données. En effet, les données relatives au PIB régional se situent à mi-chemin entre le PIB général et sectoriel. La Banque centrale ne produit pas d'estimations régionales du PIB (ou du moins, elle ne les publie pas sur son site internet), mais l'agence Congo Business propose une série de PIB sectoriels pour certaines provinces, offrant même un certain niveau de ventilation.

Tableau 2.4 Sources des séries de PIB sectoriels et régionaux pour la RDC

Compilations annuelles de la Banque centrale de RDC	http://www.bcc.cd/downloads/pub/rapann/rapport_annuel_2017.pdf (2017) http://www.bcc.cd/downloads/pub/rapann/rapport_annuel_2018.pdf (2018)
Structural Change Database de l'Université des Nations Unies	https://www.merit.unu.edu/themes/3-economic-development-innovation-governance-and-institutions/structural-change-database-1950-2016/
PIB sectoriel pour certaines provinces, par Congo Business	http://www.congobusinessrdc.org/Chiffres-Cles.php?valeur=Plans%20quinquaux

Une autre variable fondamentale est le taux de change. Cela est valable pour deux raisons : 1) au niveau microéconomique, dans un pays dont l'écrasante majorité des biens consommés sont importés, le taux de change a forcément des répercussions sur le pouvoir d'achat des citoyens, et 2) au niveau macroéconomique, il affecte le niveau de revenus créé par les exportations et injecté dans l'économie nationale. La **Banque centrale**, le **FMI**, la **Banque mondiale (BM)** et les **Penn Tables** tiennent également des archives de longue date sur cette variable (voir les liens dans les tableaux ci-dessous).

Le taux d'inflation a une incidence sur le pouvoir d'achat des ménages et la compétitivité des exportations nationales. La Banque centrale, le FMI, la Banque mondiale et les Penn Tables disposent de nombreuses informations sur le taux de change. D'autres initiatives ont été lancées afin de produire des données territorialisées. D'une part, la Banque centrale publie un ensemble d'indices des prix extrêmement détaillé pour les principales villes du pays (en 2019, Kinshasa, Lubumbashi, Goma, Bukavu, Kisangani, Bandundu,

Kananga, Mbuji-Mayi, Kindu, Matadi and Mbandaka) dans ses rapports mensuels « **Condensé d'information statistiques** ». D'autre part, le CAID conduit un suivi mensuel des prix de plusieurs produits alimentaires de base dans certains territoires (unités politico-administratives en RDC). En 2016, ce suivi concernait 89 territoires sur 145. En 2019, l'échantillon a été élargi à 115 (voir plus haut l'initiative **mKengela**).

Tableau 2.5 Sources d'informations sur l'inflation en RDC

Rapports mensuels de la Banque centrale de RDC « Condensé d'information statistiques »	http://www.bcc.cd/index.php?option=com_content&view=category&id=59&Itemid=91
---	---

2.2.3.2 Activités des entreprises

Comme nous l'avons déjà évoqué, le pays n'a jamais conduit de recensement des entreprises. De même, les bases de données générales et périodiques portant sur le nombre et la localisation des entreprises dans le pays est difficile d'accès (mais nous avons découvert quelques jeux de données dont l'accès est limité, mais l'utilité avérée). Le **Guichet unique**, une agence gouvernementale chargée de la centralisation du processus de création d'entreprise, produit des statistiques sur les entreprises et établissements créés dans le pays depuis 2013 et consigne le nombre, la localisation et le type d'entreprises créées. L'Agence nationale pour la promotion des investissements (ANAPI) a publié les chiffres du Guichet Unique entre 2013 et 2017, ce qui laisse penser qu'elle a un accès privilégié à ces données.

A l'autre extrémité, la Fédération des entreprises du Congo (FEC) a publié ses données pour l'année 2010–2011, notamment la liste des entreprises adhérentes. Cette liste est disponible pour 11 provinces (Kinshasa, Bandundu, Bas-Congo, Equateur, Kasai-Occidental, Kasai-Oriental, Katanga, Maniema, Nord-Kivu, Orientale et Sud-Kivu) et divisée par secteur (agriculture, élevage et pêche ; commerce ; construction ; énergie ; banque et finance ; hydrocarbures ; mines ; services ; industrie et bois ; télécommunications ; transports ; et autres). Toutefois, la représentativité de cette base de données est toute relative. Jeune Afrique (2010) décrit la FEC comme un club très sélectif, dans la mesure où les cotisations varient entre 1 000 et 15 000 dollars, selon la taille de l'entreprise.

Tableau 2.6 Sources d'informations sur la composition entrepreneuriale en RDC

Répertoire des entreprises du Guichet Unique	https://guichetunique.cd/dev/pdf/docs/Statistiques_1555080942.pdf
Chiffres sur les entreprises publiés par l'Agence Nationale pour la Promotion des Investissements	https://www.investindrc.cd/fr/generalites-sur-la-rdc/environnement-economique-des-investissements/statistiques-des-entreprises-creees?task=document.viewdoc&id=245
Annuaire (annuel) de la Fédération des Entreprises du Congo	https://www.fec-rdc.com/index.php/nos-publications/category/6-annuaire
Liste du CAID sur les principales activités économiques par unité géographique	https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-province-administrative/ pour les territoires, et https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-villes/ pour les villes. Dans chaque « fiche » territoriale, consultez l'option « Situation économique ».

2.2.3.3 Activités informelles

Outre l'absence de mise à jour systématique, l'autre problème des listes d'activités économiques est qu'elles ne tiennent pas compte des entreprises informelles. Selon l'Observatoire de l'économie informelle en RDC, les activités informelles comprennent : « 1) les activités de subsistance, qui visent à assurer la survie quotidienne de la famille dans un contexte d'absence ou d'insuffisance de revenus formels ; 2) la production d'un marché local, mené par des micro-entreprises ; et 3) les activités de grande envergure qui demeurent dans l'ombre pour raisons fiscales ou pour dissimuler leur origines criminelles » (2019). Le Professeur Sylvain Shomba Kinyamba, directeur de la Chaire de dynamique sociale, estime qu'environ 80 % de l'économie congolaise est informelle (Enabel, 2017). Ce chiffre correspond aux estimations du cabinet d'audit KPMG (2018) et de l'Observatoire de l'économie informelle en RDC, qui considèrent que plus de 80 % de la population active relève du secteur informel de subsistance, dont les activités ne représentent que 20 % du produit national brut (2019).

Les enquêtes auprès des entreprises sont très utiles pour rendre compte de cet aspect économique, et peuvent fournir de précieuses informations au niveau de l'entreprise. Au cours de notre étude, nous avons identifié **trois enquêtes auprès des entreprises** menées en RDC : celles de la Banque mondiale ; une enquête menée par l'Observatoire de l'économie informelle en RDC auprès d'employés et travailleurs informels à Kinshasa ; et le chapitre sur les entreprises et les activités informelles dans les Enquêtes nationales 1-2-3 de 2005 auprès des ménages.

Micro-données des enquêtes auprès des entreprises

Auteur : Banque mondiale

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2013

Couverture géographique : quatre grandes villes de RDC : Kinshasa, Kisangani, Lubumbashi et Matadi

Site internet des données : https://microdata.worldbank.org/index.php/catalog/enterprise_surveys/#r=&collection=&country=52&dtype=&from=1890&page=1&ps=&sid=&sk=&sort_by=nation&sort_order=&to=2019&topic=&view=s&vk=

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus

Disponibilité : accessible au téléchargement

Les micro-données des enquêtes auprès des entreprises menées par la Banque mondiale reposent sur trois vagues d'enquête : 2006, 2010 et 2013. Il est possible de télécharger ces fichiers sur le site de la Banque mondiale après inscription. L'enquête de 2006 contient des données sur 340 entreprises situées dans quatre villes (Kinshasa, Kisangani, Lubumbashi et Matadi), réparties en trois secteurs et 14 sous-secteurs (production industrielle : 9 sous-secteurs ; commerce au détail et TIC : 2 sous-secteurs, ainsi que 3 autres sous-secteurs). Par ailleurs, l'enquête intègre des questions permettant de rapprocher la taille de l'entreprise (nombre d'employés, estimations des ventes en 2002 et 2005) et sa consommation électrique

(dépenses en électricité, possession d'un groupe électrogène, % d'électricité produit par celui-ci... entre autres informations plus indirectes mais tout aussi intéressantes).

Enquête sur l'économie informelle à Kinshasa

Auteur : Observatoire de l'économie Informelle en RDC

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2017

Couverture géographique : Kinshasa (350 travailleurs et entrepreneurs informels)

Site internet des données : <https://hiva.kuleuven.be/en/research/theme/globaldevelopment/p/ObservatoireDRC/enquetesetudes/kinshasa>

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus

Disponibilité : accessible au téléchargement

L'enquête sur l'économie informelle à Kinshasa, conduite par l'Observatoire de l'économie Informelle en RDC est une autre source précieuse. Cet observatoire est une initiative de la Chaire de dynamique sociale (CDSUNIKIN) en collaboration avec l'Institut de recherche pour le travail et la société (HIVA) de l'Université catholique de Louvain. L'échantillon de l'enquête inclut des employés et entrepreneurs informels choisis parmi plusieurs secteurs économiques qui, selon les auteurs, seraient représentatifs de l'économie informelle de la ville.

Tableau 2.7 Echantillon de l'enquête sur l'économie informelle menée par l'Observatoire de l'économie Informelle en RDC

Secteur économique	Sous-secteur économique	Entrepreneurs	Employés	Total
Secteur agro-alimentaire	Maraîchage	30	21	51
	Préparation de chikwangue	19		19
	Stand de nourriture	4	56	53
	Travail domestique	60		67
Transports	Taxi-moto	25	15	40
	Rickshaw (pousse-pousse)	24	15	39
Travail manuel	Ferronnerie		81	81
Total		162	188	350

Les enquêtes auprès des employés et des entrepreneurs comprennent les mêmes catégories de questions : caractéristiques des membres du personnel et de la famille ; emploi et conditions de travail ; relations de travail ; situation de travail ; adhésion à un syndicat ; qualité de vie ; entre autres. L'aspect le plus pertinent pour notre étude est sans doute les questions liées aux revenus. Nous avons notamment découvert que

«Le salaire dépasse les 60 000 Francs congolais (FC) pour seulement 28 % des employés. La moyenne pour tous les employés se situe à 62 475 FC, mais des variations se montrent autour des sous-secteurs : salaire moyen de 103 000 FC chez les motards ; 75 630 chez les fabricants de chikwange ; 60 000 chez les pousse-pousseurs de charriots ; 53 000 dans le travail domestique ; 43 900 dans le maraîchage et enfin, 41 250 dans les restaurants de fortune.

Le salaire moyen dans notre échantillon est à 62 400 FC ou 50 dollars américains par mois. Chez les femmes, la moyenne est à 56 000 FC, chez les hommes à 68 400 FC. Cette différence correspond avec les différences en salaire entre les secteurs, c.à.d. le transport comme secteur masculin, l'agro-alimentaire avec une majorité féminine ». (Pollet, et al., 2017, pp. 11–12).

Il est également pertinent de se pencher sur les risques auxquels font face les entrepreneurs—dont font partie les coupures d'électricité. Malgré le niveau élevé des sondés considérant qu'il s'agit d'un problème (53,2 %), les chercheurs signalent que pour les trois secteurs retenus dans le cadre de cette enquête, en dehors du secteur agro-alimentaire (petite restauration, boisson fraîche, musique), il y a peu ou pas de rapport direct entre électricité et activités économiques ciblées (transport, artisanat limité à la fabrique manuelle de brasero). Si l'analyse précédente souligne que différentes demandes énergétiques découlent de différentes activités économiques, il apparaît de façon générale que la demande énergétique est relativement faible dans l'économie informelle. Cette hypothèse pourrait être évaluée à l'aide d'informations tirées d'autres enquêtes.

Enquêtes nationales 1-2-3 auprès des ménages (2012) — Chapitre sur l'emploi, le secteur informel et les conditions de vie des ménages

Auteurs : Institut national de la statistique de RDC, en coopération avec plusieurs partenaires internationaux

Type de données : jeu de données Stata

Dernière mise à jour : 2012

Couverture géographique : nationale (échantillon de 3,4 millions d'unités de production).

Site internet des données : <https://www.uantwerpen.be/en/projects/great-lakes-africa-centre/national-datasets-livelihoods-drc/national-household-s/>

Lien vers la méthodologie : lien ci-dessus et Marivoet, et al. (2019)

Disponibilité : accessible au téléchargement

L'Enquête 1-2-3 comprend un chapitre dédié aux sociétés et entreprises informelles. Dans le cadre de cette enquête, 3,4 millions d'unités de production ont été interrogées dans tous les centres urbains de la RDC. Parmi les résultats de l'étude, on peut citer :

- Deux unités de production sur trois sont dans le secteur du commerce ;
- 62,9 % des unités dans le commerce sont dirigés par les femmes, qui occupent 64,2 % des emplois dans ce secteur (et 55 % des emplois dans l'informel au total) ;

- Précarité des conditions de travail : 56,4 % des unités de production sont sans local professionnel spécifique et 37,4 % sont exercés à domicile ; plus de 96 % des employés n'ont pas de contrat écrit. Seuls 6,9 % sont salariés. En revanche, la prestation est considérable, à une moyenne de 52 heures par semaine, pour une rémunération mensuelle moyenne de 62 740 FC (environ 65 USD) ;
- Caractère atomisé : 82,3 % des unités de production sont réduites à une seule personne. (Pollet et al., 2017, p. 9).

Des études plus approfondies sont nécessaires pour vérifier les informations contenues dans cette enquête sur les habitudes de consommation électrique parmi les unités de production informelles. Toutefois, les résultats présentés plus haut indiquent une fois encore que les besoins électriques dans ce sous-secteur ne sont pas considérables.

Enfin, en 2016, le CAID a collecté des informations sur le nombre d'entreprises sur chaque territoire. Bien que des chiffres soient disponibles pour l'ensemble des territoires (ce qui s'apparente à un signe de qualité des données), il est préoccupant que pour nombre d'entre eux, aucune entreprise ne soit recensée dans des secteurs pourtant porteurs dans ces régions. De plus, le nombre d'entreprises dans les villes (une autre unité politico-administrative en RDC, correspondant aux plus grosses agglomérations du pays) est absent de cette enquête. Toujours est-il que le CAID a mis à disposition des descriptions qualitatives très fournies du tissu économique des territoires et de certaines villes de RDC. Ces descriptions comprennent au minimum une liste des principales activités économiques des unités territoriales¹⁹, et dans certains cas une liste des principales entreprises et un résumé de leurs activités économiques. Ces informations pourraient s'avérer précieuses si nous pouvions les traiter rapidement.

Liste du CAID sur les principales activités économiques par unité géographique

<https://www.caid.cd/index.php/donnees-par-secteur-de-developpement/economie-et-marche/>

Rapport de Prévision de la Demande (ESSOR) – Bumba, Gemena et Isiro

Auteur : ESSOR

Type de données : trois rapports

Dernière mise à jour : juin 2018

Couverture géographique : trois villes moyennes : Bumba, Gemena et Isiro

Site internet des données : non disponible

Lien vers la méthodologie : inclus dans le rapport

Disponibilité : confidentiel, mais peut être obtenu sur demande

¹⁹ Dans certains cas, chaque activité économique est accompagnée de pourcentage dont la somme équivaut à 100 %. Nous ignorons toutefois à quoi correspond ces 100 % (emploi, production, autres).

ESSOR a mené des études afin de prévoir la demande énergétique dans trois villes congolaises, à savoir Bumba, Isiro et Gemena. Ces recherches font office d'études techniques et de préféabilité sur la demande de trois mini-réseaux solaires non reliés, en vue de promouvoir le secteur privé.

Les prévisions de la demande ont été obtenues grâce à une simulation de la demande sur 20 ans (2012–2040) reposant sur les données tirées d'enquêtes menées sur ces trois villes et de données socioéconomiques disponibles dans certaines institutions (Regideso, service étatique local). Ces simulations sont présentées de la façon suivante :

- Un modèle de référence (approvisionnement électrique continu 24h/24) reposant sur des hypothèses réalistes d'augmentation de la consommation ;
- Un modèle de référence reposant sur un scénario avec approvisionnement électrique 16 heures par jours (de 8 heures à minuit) ;
- Un modèle optimiste (approvisionnement électrique continu 24h/24) caractérisé par un contexte socioéconomique stimulé par un fort dynamisme économique.

Les données de ces enquêtes d'ESSOR peuvent nous être utiles pour prévoir la demande à venir dans le modèle, ainsi que pour élaborer des scénarios d'usage énergétique quotidien dans ces trois villes.

2.2.3.4 Demande sectorielle

Cette section se penche sur les données liées aux facteurs de production, en s'intéressant aux différents secteurs, plutôt qu'aux entreprises.

Ciment

Les entreprises spécialisées dans le ciment en RDC sont de gros consommateurs énergétiques. Une augmentation du nombre de cimenteries est à prévoir dans le sillage du projet hydroélectrique Inga 3, dont la construction dynamisera considérablement la demande de ciment en RDC. Pour les cimenteries, il est avantageux de produire et vendre leurs produits à l'échelle locale. Il existe au moins 16 projets de construction d'usines de ciment dans le Kongo central, notamment à Kasangulu, Songololo et Matadi.

D'après le bulletin d'information de la Banque centrale du Congo, la RDC a produit plus de 530 000 tonnes de ciment entre janvier et juin 2018. Cela représente approximativement 44 % de la capacité de production totale des cimenteries, selon ce bulletin.

Nous prenons note de l'existence des sociétés suivantes dans les provinces de :

- Kongo central : CILU, PPC, CIMCO, CINAT
- Kasaï : projet de ciment Katende
- Tshopo : travaux d'installations de la Cimasat

Brasseries

On décompte trois grandes brasseries en RDC ; deux sont situées à Kinshasa (Bracongo et Bralima) et la troisième dans la province du Katanga (Brassimba). Elles produisent de la bière 24 heures sur 24 et ont besoin d'un approvisionnement énergétique en continu. L'un des principaux freins à cette industrie est l'approvisionnement électrique. Il s'agit d'un obstacle majeur qui a des répercussions sur la production de ces entreprises, mais aussi sur l'économie du pays et sur le prix de leurs produits sur le marché. Pour

l'heure, nous n'avons pas encore recueilli de données sur la demande énergétique des brasseries, mais nous espérons nous les procurer directement auprès des entreprises ou de la SNEL.

Production de pain

La liste des producteurs de pains en RDC est extrêmement longue. La grande majorité des provinces peuvent compter sur une entreprise de boulangerie à l'échelle industrielle.

Néanmoins, nous ne disposons pas de la liste exhaustive de ces entreprises, ni de données sur leur demande énergétique. A ce jour, nous savons uniquement que la plupart des boulangers opèrent dans le secteur informel.

Secteur minier

RM a un accès privilégié aux informations sur la demande électrique de plus de 50 entreprises minières en RDC, entre 2000 et 2014 pour certaines, ainsi qu'à des prévisions de la demande du secteur pour les dix prochaines années. Si nous croisons ces données avec les statistiques officielles sur la production et les données sur le traitement des minerais, nous parviendrons à estimer la relation entre production minière et demande énergétique. Cela nous sera fort utile afin d'extrapoler ces informations pour des lieux sur lesquels nous n'avons aucun élément en termes de consommation énergétique.

Agriculture

Pour ce qui est de la production agricole, les fiches sur les villes et les territoires élaborées par le CAID contiennent une description qualitative de l'état de la production agricole dans la plupart des unités territoriales, et intègrent même quelquefois les principales cultures récoltées. Ces fiches exposent également le taux de rentabilité des différentes cultures dans les régions. Toutefois, nous nous interrogeons sur la méthode de calcul de ce taux. Les informations mises à disposition par le CAID ont été produites en collaboration avec le Programme alimentaire mondial (PAM), qui devrait être en mesure de fournir d'autres données pertinentes.

2.2.4 Equipements publics

Santé

D'après le ministère de la Santé publique (2010), le ministère est organisé en trois niveaux, à savoir le niveau central, le niveau intermédiaire (ou provincial) et le niveau périphérique. Le niveau intermédiaire compte 11 Inspections provinciales de la santé et 65 Districts sanitaires, les hôpitaux provinciaux.

En théorie, le niveau périphérique comprend des zones et des aires de santé. Une zone de santé (ZS) est une zone géographique bien définie, contenue dans les limites d'un territoire ou d'une commune abritant une population entre 50 000 et 100 000 habitants en zones rurales, et entre 100 000 et 250 000 habitants en zones urbaines. Les structures sanitaires obligatoires de la zone de santé sont les centres de santé et les hôpitaux généraux de référence (CAID, n.d.). En 2010, on décomptait 515 zones de santé avec 393 hôpitaux généraux de référence (Ministère de la Santé publique, 2010). Le niveau des aires de santé (AS) est chargé de la mise en oeuvre de la stratégie de santé primaire sous la supervision et l'encadrement du niveau intermédiaire. En 2010, il y avait 8 504 aires de santé planifiées, dont 8 266 disposaient d'un centre de santé.

D'après l'Ecole de santé publique de Kinshasa (ESPK) (2019), les statistiques sont les suivantes : 516 ZS avec 393 hôpitaux généraux de référence (les HGR offrent des soins qui relèvent du « paquet complémentaire

d'activités ») et 8 504 AS planifiées, dont 8 266 disposent d'un centre de santé (les CS offrent le « paquet minimum d'activités »).

Le Système national d'information sanitaire (SNIS) du ministère congolais de la Santé publique propose peut-être les meilleures données statistiques sanitaires à l'échelle nationale, mais celles-ci sont inaccessibles au public. Le jeu de données du centre de santé du Bureau pour la coordination et les affaires humanitaires des Nations Unies (OCHA) dénombre un total de 1 086 centres de santé identifiés via OpenStreetMap. Cette base de données n'est pas exhaustive, mais c'est un bon début. Au vu des mises à jour quotidiennes assurées par ses nombreux utilisateurs à travers le monde, les informations disponibles sur OpenStreetMap sont sans doute plus nombreuses aujourd'hui. Un travail de validation sera donc nécessaire. Enfin, le CAID est en possession de données sur les centres de santé privés, les centres de santé, hôpitaux et personnels de santé par territoire.

Enseignement

Selon le rapport du ministère de l'Enseignement primaire, secondaire et professionnel, utilisé en 2015 par l'Institut national de la statistique (INS), la RDC compte 48 147 établissements d'enseignement primaire, secondaire et professionnel. Les jeux de données d'OCHA font état de 3 972 écoles sur l'ensemble du territoire. Encore une fois, ce chiffre est tiré d'OpenStreetMap.

Equipements liés à l'eau

La Régideso (Régie de distribution de l'eau) et la Société nationale d'électricité (SNEL) travaillent en étroite collaboration pour la production d'eau. Selon un rapport publié en 2014 par UNICEF (<https://www.radiookapi.net>), plus de 30 millions d'individus n'ont pas accès à l'eau potable en RDC. La Régideso justifie ces lacunes par le manque d'accès à l'électricité. D'après une étude prévisionnelle de la demande pour le programme Essor du DFID, 400 W sont nécessaires pour pomper de l'eau pour 1 000 personnes. (Essor, 2018). En extrapolant ces données énergétiques en fonction de la population, il serait possible d'estimer l'énergie nécessaire pour pallier les carences de Régideso.

Equipements urbains

Les études décrivant les installations urbaines de certaines villes spécifiques pourraient intégrer nos sources de données sur les équipements urbains. En 2013 par exemple, la Banque mondiale a réalisé l'évaluation d'un projet de développement urbain visant à améliorer l'état des installations urbaines de plusieurs villes. Les critères de sélection de celles-ci étaient « être une capitale provinciale ou la ville principale de sa province, de compter entre 100 000 et un million d'habitants (car ce sont ces villes qui subissent la croissance démographique la plus forte), être accessible pour des travaux sur site et pour leur supervision, représenter un important potentiel économique en relation avec l'hinterland, avoir une expérience préalable en participation communautaire, et représenter une continuité entre des investissements passés et en cours » (Banque mondiale, 2013, p. 8).

Six villes ont été sélectionnées : Bukavu, Kalemie, Kikwit, Kindu, Matadi et Mbandaka, pour une population totale d'environ deux millions d'habitants. Dans chacune de ces villes, la Banque mondiale a conduit une courte étude des principales caractéristiques urbaines à l'aide de données obtenues lors d'audit urbains, financiers et organisationnels de ces villes. Voici un extrait de l'étude sur Bukavu :

« Les principales infrastructures de la ville sont composées de : 135 kilomètres de routes urbaines, composées de 3 kilomètres bétonnés, 63 kilomètres goudronnés (22 kilomètres en cours de réhabilitation), et le reste en terre ; 1 marché central et 8 marchés de quartier ; 6 équipements de production industrielle (brasseries, production de plastique et extraction de

quinine) ; et 2 chantiers navals. Cinq banques ; 20 institutions d'enseignement supérieur ; 37 écoles primaires publiques et 211 autres écoles primaires (privées et religieuses) ; 28 écoles secondaires publiques, et 123 autres écoles secondaires ». (Banque mondiale, 2013, p. 87)

Nous pourrions répliquer cet exercice à une plus grande sélection d'agglomérations (et non pas uniquement à des grandes villes). Une autre option serait de déduire les ratios entre la population et le nombre d'équipements, puis de les utiliser pour estimer le nombre d'établissements en d'autres lieux en fonction du type d'activités attendus.

➤ 2.3 Approvisionnement : les ressources énergétiques

Si la population, les entreprises, les équipements publics et leur consommation électrique respective représentent la demande dans notre modèle, les ressources énergétiques constituent la principale composante de l'offre. Dans cette nouvelle section, nous épluchons les ressources énergétiques grâce auxquelles la demande préalablement identifiée pourrait être satisfaite.

2.3.1 Énergie solaire

L'énergie solaire est une source énergétique émergente et prometteuse. D'après la Banque mondiale, l'énergie solaire devient une source énergétique de premier plan au niveau mondial à mesure que les coûts de déploiement baissent et que les gouvernements améliorent leurs capacités à mobiliser les fonds nécessaires. Les pays en développement représentent d'ailleurs plus de la moitié de la production d'énergie solaire mondiale (Banque mondiale, 2017). Non contente d'être propre et renouvelable, l'énergie solaire prodigue d'autres avantages de poids dans le contexte congolais. En règle générale, son déploiement est moins coûteux que l'extension du réseau électrique, ce qui rend cette technologie plus adaptée à l'approvisionnement énergétique dans les zones reculées. De plus, elle n'exige pas beaucoup d'espace supplémentaire, car les panneaux solaires peuvent être installés sur les toits des maisons. La maintenance des panneaux est également des plus abordables. Néanmoins, cette solution n'est pas sans inconvénient. Parmi les principaux aléas : les coûts élevés liés à l'installation et au stockage énergétique, le risque posé par les déchets de panneaux en matière de pollution des sols, et une production énergétique directement liée à l'ensoleillement et à la pollution atmosphérique (Conserve Energy Future, 2015). Le graphique ci-dessous, conçu par Sindhu, et al. (2017), présente les forces, les faiblesses, les opportunités et les obstacles associés à l'électricité solaire en Inde — et qui s'appliquent aussi bien au contexte congolais.

Forces	Faiblesses
Potentiel d'ensoleillement élevé dans le nord et le sud de la RDC (Kusakana, 2016)	Ressource variable (variation quotidienne et saisonnière)
Technologie respectueuse de l'environnement	Investissements initiaux élevés
Aucun coût de combustible, faibles coûts de maintenance	Impacts écologiques de l'énergie solaire (ex. recyclage des panneaux usés)
Adapté aux zones rurales et reculées	Faible potentiel énergétique dans le centre du pays
Permet de réduire les émissions de carbone et la pollution sonore (comparé au diesel)	Nécessite un espace suffisant (terrain ou espace sur les toits)

Opportunités	Obstacles
Opportunités professionnelles dans l'installation, le fonctionnement et la vente des systèmes	Faiblesses des systèmes de financement, complexité des procédures administratives
Amélioration de la qualité de vie	Manque d'acceptabilité sociale et de confiance dans cette technologie
Application dans de nombreux secteurs utilisant des ressources disponibles localement	Taxe à l'importation sur les panneaux solaires
Opportunité de satisfaire la demande énergétique nationale	Production locale invraisemblable dans le futur proche en RDC
Réduction de la dépendance aux sources énergétiques conventionnelles	

Source : Sindhu et al., 2017, p. 1 145.

Global Solar Atlas

Auteurs : Banque mondiale, ESMAP et SolarGIS

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2020

Couverture géographique : mondiale

Site internet des données : <https://globalsolaratlas.info/>

Lien vers la méthodologie : <https://solargis2-web-assets.s3.eu-west-1.amazonaws.com/public/publication/2015/b9250e6826/Betak-et-al-ZP2015-49-1-Solar-Resource-Key-Information-for-Solar-Energy-Industry.pdf>

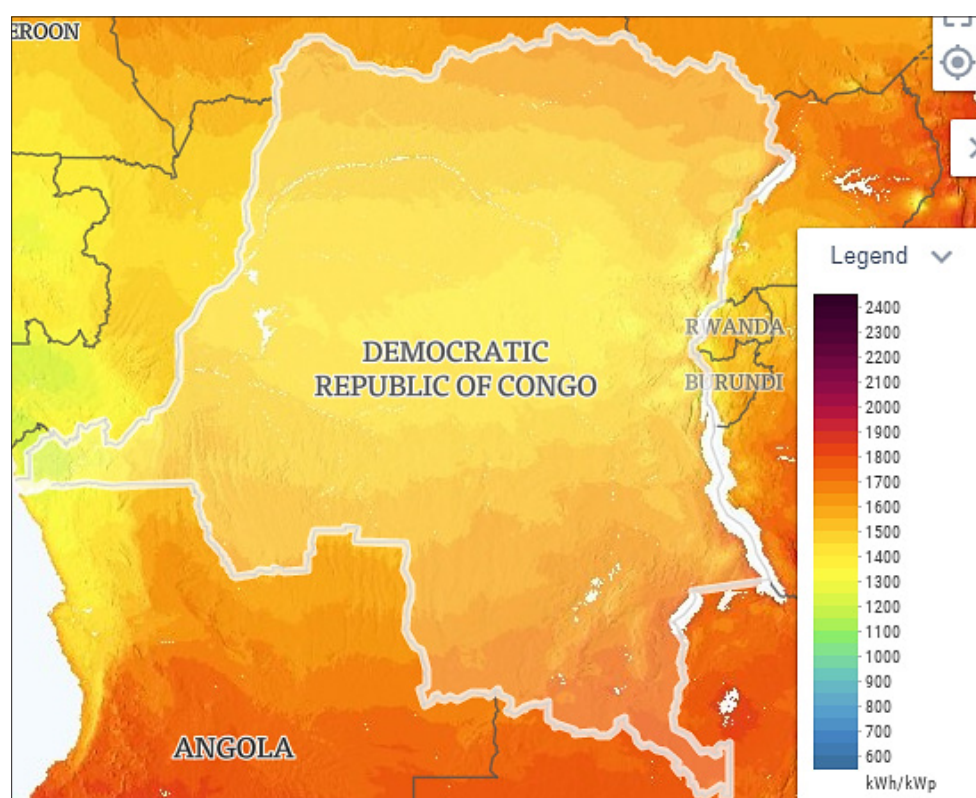
Disponibilité : accessible au téléchargement

A ce jour, le Global Solar Atlas est le meilleur jeu de données accessible au public sur la ressource solaire. Les principales variables utilisées sont 1) le rayonnement solaire, qui mesure la quantité totale d'ensoleillement d'une zone, 2) la géographie locale, notamment d'éventuelles montagnes ou collines pouvant générer de l'ombre, et 3) le climat local, à savoir la température, les nuages et le vent. Associées, ces variables permettent de déterminer une estimation de la performance solaire d'une zone donnée. Ce jeu de données repose sur deux mesures : des instruments météorologiques au sol, et des modèles de rayonnement solaire basés sur des données satellitaires et atmosphériques (Beták et al., 2015, p. 15).

Ces apports et calculs ont été utilisés pour estimer le niveau de rayonnement solaire entrant en contact avec la surface terrestre. Tout d'abord, un modèle calcule le rayonnement solaire dans l'atmosphère par ciel clair (c'est à dire en l'absence de nuages). Les variables prises en compte sont l'altitude et la concentration de particules, d'ozone et de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Un indice nuageux est ensuite déterminé afin de déduire l'effet d'atténuation induit par les nuages. Les deux modèles sont ensuite combinés pour obtenir les valeurs d'irradiance en toutes conditions (*all-sky*). Ces valeurs sont par la suite corrigées en

tenant compte des effets d'ombrage sur les terrains alentours et de paramètres météorologiques, comme la température de l'air, la vitesse et la direction du vent, l'humidité relative, et d'autres paramètres importants pour estimer l'efficacité des panneaux solaires (Solargis, 2020).

Le résultat final de ce processus est un ensemble de couches d'une résolution de 250×250 m offrant une couverture globale des variables suivantes : potentiel photovoltaïque (PVout), rayonnement global horizontal (GHI), rayonnement diffus horizontal (DIF), rayonnement global pour une surface inclinée de façon optimale (GTI), inclinaison optimale du module photovoltaïque pour maximiser le rendement annuel (OPTA), rayonnement normal direct (DNI), température de l'air à deux mètres au-dessus du sol, en °C (TEMP) et hauteur du terrain par rapport au niveau de la mer, en mètres (ELE). La Carte 2.6 illustre le rayonnement normal direct en RDC.



Carte 2.6 Production annuelle moyenne d'énergie solaire en RDC à une résolution de 250 m

Source : Global Solar Atlas, 2020

2.3.2 Énergie éolienne

Selon l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), l'énergie éolienne est l'une des technologies dont l'expansion est la plus fulgurante, avec une croissance multipliée par 75 en seulement 20 ans, passant de 7,5 gigawatts (GW) en 1997 à près de 564 GW en 2018 (IRENA, 2018).

Global Wind Atlas

Auteurs : Banque mondiale et l'Université technique du Danemark (DTU)

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2019

Couverture géographique : mondiale

Site internet des données : <https://globalwindatlas.info/>

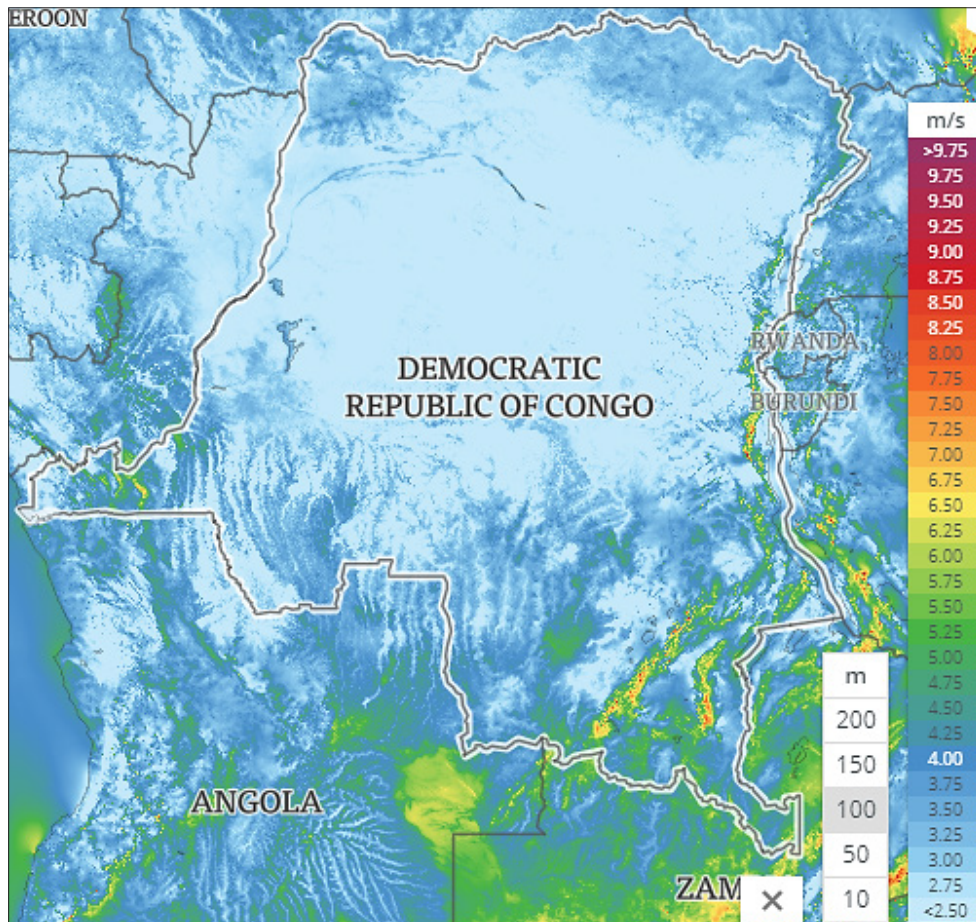
Lien vers la méthodologie : <https://globalwindatlas.info/about/method>
<http://science.globalwindatlas.info/methods.html#header>
https://www.energiteknologi.dk/sites/energiteknologi.dk/files/slutrappporter/gwa_64011-0347_finalreport.pdf
https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/112135732/European_Wind_Atlas.pdf

Disponibilité : accessible au téléchargement

Le *Global Wind Atlas* est à ce jour le meilleur jeu de données disponible gratuitement sur la ressource éolienne. Pour déterminer le potentiel d'énergie éolienne, trois paramètres importants doivent être pris en compte : la vitesse du vent, la masse volumique de l'air et la surface balayée (OpenEI, n.d.). Ces paramètres peuvent être utilisés dans le cadre d'une approche descendante (*top down*), en créant des simulations de vitesse de vent sur de grandes superficies à une faible résolution, puis en augmentant la résolution dans le cadre de limites géographiques spécifiques, ou à l'aide d'une approche ascendante (*bottom-up*), c'est à dire en s'appuyant complètement sur les mesures du vent prises sur plusieurs sites spécifiques (Papadopoulos, 2018). Le *Global Wind Atlas* suit une approche descendante. Les responsables de l'étude considèrent l'approche ascendante comme inadaptée aux zones comportant de nombreux collecteurs de données éoliennes. Ce choix se justifie également car les mesures de la vitesse du vent ne sont représentatives que dans une zone restreinte autour du point de collecte des données. Cette limite s'explique car « la vitesse du vent mesurée depuis une station météorologique est principalement déterminée par deux facteurs : les systèmes météorologiques généraux, d'une portée de plusieurs centaines de kilomètres, [mais également] la topographie dans les quelques dizaines de kilomètres autour de la station » (Troen & Petersen, 1989, p. 15).

Le *Global Wind Atlas* démarre sa collecte de données à une large échelle en s'appuyant sur des centres météorologiques partout dans le monde. Les données sont ensuite transformées en un maillage éolien régional d'un espacement d'environ 50 km (Badger et al., 2015) à l'aide d'une méthode de généralisation présentée dans le *European Wind Atlas* de 1989 (DTU Wind Energy, 2018). Ce réseau tient compte de l'état des surfaces, des variations de la hauteur des sols autour d'une station météorologique donnée, ainsi que d'éventuels effets d'abri générés par la présence de bâtiments ou d'autres obstacles (Troen & Petersen, 1989, p. 16). Les régimes de vent régionaux sont ainsi utilisés comme donnée en vue de produire des régimes éoliens spécifiques à chaque site grâce au logiciel WAsP²⁰ (*Wind Atlas Analysis and Application Program*, une référence dans le secteur éolien). Ce logiciel calcule les régimes éoliens locaux tous les 250 m à trois hauteurs différentes : 50 m, 100 m et 200 m. Pour finir, les caractéristiques des régimes éoliens locaux sont regroupés dans un maillage de 1 km (DTU Wind Energy, 2018). Le produit final de ce processus est représenté en Carte 2.7.

²⁰ Voir <https://www.wasp.dk/>



Carte 2.7 Cartographie de la vitesse du vent en RDC avec une résolution de 250 m

Source : Global Wind Atlas, 2020

2.3.3 Potentiel de la ressource hydroélectrique

La RDC dispose d'un fort potentiel de production d'énergie hydroélectrique. Grâce à la puissance du fleuve Congo, le deuxième plus grand fleuve en termes de flux, le pays peut compter sur un potentiel hydroélectrique estimé de 100 000 MW, soit le plus élevé d'Afrique (Odhiambo, 2014 ; Kusakana, 2016). Par conséquent, les sources hydroélectriques sont les principales sources électriques du pays — d'après la Banque mondiale, la majorité de l'approvisionnement électrique du pays en 2015 reposait sur une source hydroélectrique²¹. Néanmoins, une grande partie de ce potentiel reste inexploité : « En 2003 par exemple, la RDC reposait sur une capacité de production totale d'environ 2 568 MW. Pourtant, seuls 600–700 MW étaient réellement produits. » Bilan, moins de 20 % de la population a accès à l'électricité dans le pays²², et l'accès à l'énergie repose majoritairement sur la consommation de bois et d'énergie tirée de la biomasse (Odhiambo, 2014, p. 190). Selon Kusakana (2016, p. 1) : « 93,6 % du pays est largement dépendant du combustible bois en tant que principale source d'énergie. »

²¹ Voir <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.HYRO.ZS?locations=CD>.

²² Il n'est pas facile de déterminer un chiffre exact pour cet indicateur. Selon les indicateurs de développement de la Banque mondiale, l'accès à l'électricité atteignait 19 % en 2019 (voir <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=CD>), alors que pour l'Agence internationale de l'énergie, le niveau d'électrification ne dépassait pas les 8,7 % en 2018 (voir <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity>).

Base de données sur l'énergie hydroélectrique de Resource Matters

Auteur : Resource Matters

Type de données : points

Dernière mise à jour : 2018

Couverture géographique : RDC

Site internet des données : <http://resourcematters.org/>, <http://resourcematters.org/>

Lien vers la méthodologie : <https://resourcematters.org/wp-content/uploads/2019/06/RM-Note-me%CC%81thodologique-et-recommandations-Cartographie-Energie-RDC-2018-09-10.pdf>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Désireux de contribuer à la réalisation du potentiel hydroélectrique du pays, Resource Matters a compilé et comparé les informations mises à disposition par plus de 20 sources sur les sites hydroélectriques congolais. Après vérification, nous avons mis notre base de données et les cartes associées à la disposition du public en 2018. Cette compilation comprend 1 206 sites, dont 639 en projet et 377 existants — l'état des 190 sites restant est inconnu. La majeure partie des sites recensés (1 027) sont alimentés par des sources hydrauliques. Néanmoins, nous avons également intégrés les sites identifiés et qui produisaient d'autres types d'énergie (gaz, vent, solaire...). Vous trouverez un résumé de nos résultats dans le Tableau 2.8.

Tableau 2.8 Résumé des sites hydrauliques compilés dans le jeu de données de Resource Matters

	Existants	Inconnus	En projet	Total
Biomasse	1			1
Cabines	20			20
Centrale à gaz	1			1
Turbine éolienne	1			1
Gaz			1	1
Hybride biomasse-solaire			1	1
Hybride biomasse-thermique	1			1
Hybride solaire-éolien	1			1
Hydroélectrique	238	162	629	1 029
Inconnus		6	1	7
Poteau électrique	1			1
Solaire	6	3		9
Solaire photovoltaïque	4		2	6
Thermique	103	19	5	127
TOTAL	377	192	639	1 208

Source : auteurs

Nous déplorons toutefois de ne pas disposer de suffisamment de données détaillées ou précises. Sur les 1 206 sites recensés, seuls 655 sont associés à des coordonnées géographiques. Pire, la localisation de 213 d'entre eux a mis en évidence des contradictions ou n'ont pas pu être identifiés sur Google Earth. Par exemple, de nombreux sites hydroélectriques recensés se sont avérés être très éloignés de tout cours d'eau. Au total, 545 sites ont dû être retirés de la carte : 36 centrales thermiques existantes, 4 centrales thermiques en projet, 108 centrales hydroélectriques existantes et 397 centrales hydroélectriques en projet.

Récemment, RM a pris connaissance de nouvelles informations tirées de trois sources ne figurant pas dans la version publiée de notre base de données. La première de ces sources est un document du **ministère des Mines au niveau de la province d'Ituri**. Il contient les coordonnées, le flux et la puissance hydraulique de 20 sites identifiés pour de futurs projets de centrales hydroélectriques, ainsi que ces mêmes données (hormis les coordonnées) pour six autres sites.

La deuxième source provient de l'Unité de coordination et de management des projets (**UCM**) du ministère des ressources hydrauliques et électrique de la RDC. Nous y avons trouvé des bases de données très fournies dans les termes de référence publiés pour le recrutement récent de deux consultants. Il s'agit, dans le premier cas, d'une consultance pour la réalisation d'études de préféabilité sur des sites potentiels aux abords de neuf capitales de province et de 66 autres agglomérations urbaines. L'autre consultance vise à soutenir la création d'un plan d'électrification national à moindre coût d'ici à 2040, accompagné d'une stratégie de mise en œuvre et d'un prospectus couvrant les cinq premières années. Au total, 83 sites sont listés dans les deux documents, dont 74 disposent de coordonnées.

La troisième source est une étude produite par le **Nile Basin Discourse (NBD)** en vue de produire un « rapport sur les principales thématiques de plaidoyer liées au projet de construction et d'amélioration de 1) l'interconnexion Ouganda-Rwanda, 2) l'interconnexion Kenya-Ouganda et, plus important dans le cadre de notre modèle et du projet du NBD, 3) l'amélioration de l'interconnexion entre le Burundi, la RDC et le Rwanda. Une liste de 64 sites hydroélectriques situés le long de l'interconnexion entre le Burundi, la RDC et le Rwanda figure parmi les annexes de ce document. Quinze de ces sites se situent sur le territoire de Rutshuru, 37 sur le territoire de Lubero et 12 sur le territoire de Beni. Les données disponibles sur ces sites comprennent la puissance potentielle et les agglomérations urbaines couvertes, ainsi que, dans certains cas, le débit et la hauteur de chute. En revanche, les coordonnées ne sont pas disponibles.

Sites potentiels pour petites centrales hydroélectriques, par KTH

Auteur : Division de l'analyse des systèmes énergétiques du Royal Institute of Technology KTH

Type de données : points

Dernière mise à jour : 2019

Couverture géographique : RDC

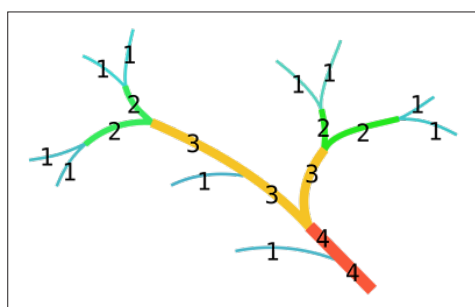
Site internet des données : <https://energydata.info/dataset/small-and-mini-hydropower-potential-in-sub-saharan-africa>

Lien vers la méthodologie : <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3100>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Une autre source de données importante est l'évaluation technique conduite par l'équipe de recherche de la **Division de l'analyse des systèmes énergétiques du Royal Institute of Technology KTH**. Cette étude avait pour objectif de déterminer des points géographiques présentant le potentiel de recevoir de petites centrales hydroélectriques (de 0,1 à 10 MW) « au fil de l'eau » (c'est à dire exploitant le débit naturel et la hauteur de chute du cours d'eau, sans utiliser de barrage) en Afrique subsaharienne. Ce type de centrales peut en effet être déployé plus rapidement que des barrages, et s'avère assez courant pour des applications à petite échelle. Nous décrivons ci-dessous la méthodologie en quatre étapes (Korkovelos, 2018) utilisée pour exploiter cette base de données :

1. **Saisie des données SIG** : estimation du débit du cours d'eau en combinant les données liées à la hauteur de chute et aux précipitations. Ces données, associées à la base de données de l'UE sur les débits moyens, ont été comparées aux données fournies par les stations hydrométriques. Les résultats obtenus permettent de constater que la couche de données basées sur nos estimations est en fait plus précise que les données de l'UE pour les petites valeurs de débit — donc plus représentative pour les rivières à faible débit, et plus utiles au vu de l'objectif de notre recherche.
2. **Calcul du potentiel hydroélectrique pour chaque localité** : à partir de la couche ci-dessus, nous avons estimé le potentiel hydroélectrique grâce aux éléments suivants : la densité de l'eau, l'accélération de la pesanteur, la performance de la turbine et du générateur, un facteur de conversion reflétant la déduction des débits environnementaux, le débit, et la différence de hauteur entre un point donné et le point le plus proche en amont.
3. **Processus de sélection de sites adaptés en fonction de critères techniques et topologiques** : cela implique d'exclure les points caractérisés par les aspects suivants :
 - ▶ Zones humides, dont le débit est trop limité ;
 - ▶ Zones agricoles, car la réglementation liée aux eaux des centrales hydroélectriques pourrait avoir des répercussions sur les pratiques agricoles dans la zone ;
 - ▶ Zones urbaines construites, afin d'éviter toute contrainte technique, économique et sociale ;
 - ▶ Terrains arides, car ils paraissent inadaptés au déploiement hydroélectrique ;
 - ▶ Classification des affluents inférieur à 3, afin d'assurer un débit suffisant au niveau de la centrale (voir image ci-dessous).



Source : Wikipédia

Autres sources

Pour terminer, il convient de mentionner les travaux du bureau d'ingénieurs belge SHER, recruté comme consultant dans le projet mené par la Banque mondiale et UCM, dont la première phase consiste à cartographier le potentiel énergétique (notamment hydroélectrique et solaire) de la RDC. Concernant le potentiel hydroélectrique, le cabinet travaille actuellement sur une estimation des sites dont le potentiel dépasse les 2 MW. Cette phase d'étude devrait se clôturer d'ici mars 2020. Par la suite, cinq provinces identifiées comme présentant le potentiel de satisfaire la demande de façon viable seront sélectionnées pour une analyse plus poussée intégrant la faisabilité géologique de construire des centrales hydrauliques. Les résultats de ce projet seront disponibles en libre accès.

Plus qu'une source potentielle de données, SHET collabore déjà avec Resource Matters pour le nettoyage des données de notre base de données. En effet, celle-ci a constitué une source primaire d'informations pour SHER ; à ce titre, l'entreprise mène une révision minutieuse des données, et partage avec RM toute incohérence identifiée

2.3.4 Bioénergie

En RDC, la biomasse est une source importante d'énergies renouvelables à ne pas négliger. Pourtant, les données associées à ce type d'énergie ne sont pas monnaie courante. Compte tenu de la diversité des sources de biomasse (ex. huile de palme, manioc...), il est crucial de considérer certains aspects avant d'inclure la biomasse comme source énergétique dans notre modèle. Par exemple, ces sources présentent également une fonction nutritive pour la population, tandis que leur utilité d'alimentation des systèmes électriques est extrêmement sensible aux distances (source énergétique adaptée pour un village situé à 1 km, mais pas à 10 km).

En tant que source énergétique dans notre modèle, la biomasse pourrait donc se substituer au diesel, mais sur des zones d'approvisionnement limitées. Nos partenaires universitaires KTH et RLI ont des idées intéressantes sur la question. RLI développe par exemple de nouveaux projets favorisant les mini-réseaux hybrides (générateurs et unités photovoltaïques) intégralement alimentées par des sources renouvelables. UCT dispose aussi d'une équipe de recherche spécialisée sur le compromis entre énergies renouvelables et durabilité, qui pourrait ouvrir des perspectives intéressantes à ce sujet.

➤ 2.4 Infrastructures énergétiques et de transports

Outre la demande et la faisabilité des sources énergétiques, les coûts représentent une autre variable utilisée pour déterminer la meilleure solution d'électrification pour un lieu donné. L'approvisionnement énergétique implique au minimum trois types de coûts : 1) la transformation de l'énergie brute, 2) son acheminement d'un lieu d'origine vers les lieux de la demande, et 3) l'accessibilité des emplacements de construction des infrastructures nécessaires pour la transformation et le transport de l'énergie. Cette section traitera de ces trois aspects, en commençant par le transport.

2.4.1 Infrastructures de transports

La qualité et la disponibilité des infrastructures de transport peuvent avoir un impact considérable sur le coût du transport des matériaux et des combustibles. En RDC, les infrastructures routières sont limitées. D'après UNJLC (2006), les chemins de fer et les autoroutes sont pour ainsi dire inexistantes entre les

principaux centres urbains. En général, les infrastructures routières et ferroviaires sont « dilapidées, et le réseau de chemin de fer est tombé en désuétude » (PwC, n.d., p. 34), même si l'on peut souligner quelques progrès récents sur certains segments du réseau. Comme illustré dans le Tableau 2.9, l'état des infrastructures routières du pays est plutôt décevant, et ce, même en comparaison d'autres pays à faible revenus. En 2011, la Banque mondiale estimait que la RDC avait besoin d'effectuer des investissements à hauteur de 5,3 milliards de dollars par an sur les dix prochaines années afin de rattraper les autres pays en développement. Cette somme représente approximativement 75 % de son PIB de 2006.

Tableau 2.9 Indicateurs sur les infrastructures de RDC

Indicateur	Unités	Moyenne des pays à faibles revenus	RDC
Densité de route goudronnées	km/1 000 km ² de surface	16	1
Densité des routes non goudronnées	km/1 000 km ² de surface	68	14
Circulation sur les routes goudronnées	Circulation quotidienne moyenne	1 028	257
Circulation sur routes non goudronnées	Circulation quotidienne moyenne	55	20
Perception de la qualité des transports	% des entreprises considérant qu'il s'agit d'une contrainte économique	23	30

Source : Ali et al., 2015, p. 3.

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette situation. Tout d'abord, la « vaste étendue géographique, les faibles densités de populations, les immenses forêts et l'enchevêtrement des rivières complexifient le développement de réseaux d'infrastructures » en RDC, selon Foster & Benitez (2011, p. iv). Également en cause, l'abandon délibéré du réseau routier par l'ancien président Mobutu Sese Seko, particulièrement dans les années 1980 et 1990 afin d'empêcher toute mobilisation collective contre son régime, puis les deux Guerres du Congo entre 1997 et 2003, qui ont « achevé de détruire ce qu'il restait des infrastructures matérielles du pays » (Schouten, 2013, p. 568), et contribué à l'état déplorable du réseau routier.

Des raisons historiques pèsent également sur l'état actuel des routes. Les infrastructures congolaises de transport ont été développées sous l'ère coloniale dans le but d'accélérer l'exportation de matières premières (principalement le caoutchouc, l'ivoire, des minerais et du bois), ce qui explique l'absence de réseaux routiers reliant l'ensemble du territoire (Damania, et al., 2016, p. 21). On constate en effet que les routes reliant les trois principaux pôles urbains et économiques — Kinshasa au sud-ouest, Lubumbashi au sud-ouest et Kisangani au nord-est — sont dans un triste état (Banque mondiale, 2011). Selon le Centre logistique commun des Nations Unies (UNJCL) en 2006, « seules quelques routes, reliant principalement le port de Matadi à Kinshasa et au sud du Katanga (Lubumbashi-Kipushi-Likasi) demeurent en bon état ».

Dans le Tableau 2.10, l'UNJCL présente un inventaire des routes du pays, bien que ces chiffres ne soient pas très convaincants. Alors que UNJCL compte 15 000 km de voies non goudronnée, la Banque mondiale en dénombre « au moins 30 000 km... dont seulement 42 pour cent sont en bon état, ou dans un état convenable » (Foster & Benitez, 2011, p. 10). En revanche, les deux sources estiment le nombre de routes goudronnées dans le même ordre de grandeur : 2 250 km pour UNJCL, et un peu moins de 3 000 km pour la Banque mondiale.

Tableau 2.10 Réseau routier en RDC

Catégorie de routes	Km	%
Routes goudronnées	2 250	1,3
Routes non-goudronnées	15 000	8,8
Pistes	43 000	25,1
Chemins	21 000	12,3
Routes locales	90 000	52,5
Total	171 250	100

Source : UNJLC, 2006, p. 3

Pour rebondir sur une note plus positive, la réhabilitation du réseau routier est depuis quelques années une priorité du gouvernement. Le pays a obtenu des engagements financiers de bailleurs multilatéraux et bilatéraux, et notamment de la Chine ; 40 % de la dette extérieure congolaise correspond à des engagements au titre du projet Sicomin, dit « minerais contre infrastructures » (FMI, 2019).

Avec un réseau routier et ferroviaire aussi limité, le fleuve Congo et son important système de voies navigables constitue l'épine dorsale des transports nationaux. Selon PwC (n.d.), près des deux-tiers des déplacements nationaux ont lieu par les voies navigables. De son côté, UNJLC (2006, p. 2) affirme qu'entre l'époque coloniale et les années 1970, le fleuve a toujours supplanté les routes et chemins de fer pour les transports.

Damania et al. (2016) proposent un bon aperçu des transports fluviaux dans le pays. D'après ces chercheurs, les quelques 25 000 km de voies navigables représentent un moyen de transport abordable et permettant de relier la majorité des localités du pays. Dans certaines régions, le fleuve remplace complètement le réseau routier. Par exemple, « Kisangani, la troisième plus grande ville du pays, et Mbandaka, capitale de l'importante province d'Équateur, sont uniquement reliées à la capitale Kinshasa par transport fluvial » (p. 21).

« L'exploitation des transports fluviaux et lacustres, quasi-monopole d'État jusqu'en 1971, est aujourd'hui géré par de nombreux opérateurs formels et informels. Le plus grand port du pays se trouve à Kinshasa, et peut gérer près de deux millions de tonnes de fret par an. En comparaison, le seul port de Kinshasa voit passer plus du triple du volume transporté par l'entreprise nationale de chemin de fer, la Société Nationale des Chemins de Fer du Congo (SNCC). Le transport fluvial est essentiel pour le développement de l'agriculture, aujourd'hui au cœur de la stratégie de développement économique du gouvernement en raison de son potentiel d'ouverture des immenses zones rurales du pays. »

Toutefois, le transport fluvial est confronté à d'importants obstacles, comme le mauvais état des ponts et des embarcations utilisées pour traverser les petites rivières (UNJLC, 2006). En 2014, le Bureau des Nations Unies pour les services d'appui aux projets (UNOPS) a conduit un projet de construction de 11 ponts prioritaires. D'après le bureau, ces ponts étaient indispensables pour maîtriser l'épidémie d'Ebola dans la population de Lokolia (province de Tshuapa), dans la mesure où ils ont rendu accessibles ces zones reculées aux médecins et aux équipements médicaux (UNOPS, 2017). Le chemin de fer relie Kinshasa aux provinces du Kasai et du Katanga, mais les trains sont lents et peu fiables (Damania et al., 2016).

Dans ce contexte, les informations compilées sur les infrastructures de transport en RDC devraient inclure les voies routières et fluviales.

Les options concernant les données routières sont abordées ci-dessous.

Carte du réseau routier de la RDC

Auteur : Cellule Infrastructures

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : n.d.

Couverture géographique : RDC

Site internet des données : <http://www.celluleinfra.org/index.php/geomatique/webmapping>

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : téléchargement ou visualisation indisponible

La Cellule infrastructures (CI), l'organe technique du ministère des Infrastructures et travaux Publics, dispose d'une carte présentant les 59 129 km de routes d'intérêt général (routes nationales et provinciales) et les routes de « desserte agricole », à savoir l'équivalent des routes locales dans les zones rurales. Malheureusement, la visualisation du jeu de données est défailante sur la plateforme internet, et il n'est pas possible d'en télécharger les données brutes. Néanmoins, en novembre 2016, le CAID a diffusé des cartes sur lesquelles étaient basées les données de la CI. Ces cartes nous apprennent que les données présentées sont le fruit d'une actualisation menée par les techniciens de la Cellule Infrastructures.

Le lien suivant propose un exemple du réseau routier dans la province du Tshuapa : <https://www.caid.cd/index.php/cartes-thematiques/?secteurs=infrastructures&theme=asphalte&entite=tshuapa&temps=2>

WebGIS – Carte interactive du Katanga

Auteur : Geology for an economic sustainable development (GECO)

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : n.d.

Couverture géographique : province du Katanga

Site internet des données : http://edit.africamuseum.be/geco_website/geco_webgis/htdocs/geco.html

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : téléchargement ou visualisation indisponible

GECO est un centre de recherche né de la collaboration entre l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique (IRSNB) et le Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC). Sa principale mission est de soutenir les personnalités politiques, les citoyens et les entreprises travaillant sur la gestion durable des ressources minières. L'une de ses réalisations est la carte susmentionnée. Cette carte couvre le territoire correspondant à l'ancienne province du Katanga (actuellement les provinces de Lualaba, Haut-Lomani, Haut-Katanga et Tanganyika), et affiche son réseau routier par type de routes (routes goudronnées, en latérite, pistes, sentiers) ainsi que le réseau ferroviaire et les aéroports. Ces informations ne sont pas disponibles en téléchargement, et n'existent pas à l'échelle nationale.

Diagnostic des infrastructures nationales en Afrique

Auteur : Banque mondiale

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : 2006

Couverture géographique : Afrique

Site internet des données : non disponible

Méthodologie : <https://infrastructureafrica.opendataforafrica.org/mhjjmpf/aicd-scope>
<https://core.ac.uk/download/pdf/6218549.pdf>

Disponibilité : téléchargement indisponible

Le but du Diagnostic des infrastructures nationales en Afrique était d'élargir les connaissances sur les infrastructures africaines. Ce projet a émergé suite à l'engagement du G8 en faveur d'une augmentation de l'aide publique au développement (APD) pour l'Afrique, et notamment dans le secteur des infrastructures, lors du Sommet de 2005. Dans le cadre de ce diagnostic, le terme « infrastructures » a été défini de façon à inclure les principaux réseaux sur lesquels repose l'économie : transport aérien, technologies de l'information et de la communication (TIC), irrigation, ports, énergie, chemins de fer, routes, eau et assainissement. Entre 2001 et 2006, des représentants de la Banque mondiale ont recueillis des données primaires sur ces thématiques dans 24 pays africains, dont la RDC.

Les résultats de cette initiative ont tout d'abord été mis à disposition en format SIG, comme que Foster & Benitez (2011) le démontrent dans leur étude (Figure 2.6 ci-dessous). A cette époque, Foster était économiste principal spécialisé dans les infrastructures en Afrique pour la Banque mondiale. Au-delà des données SIG, le jeu de données du diagnostic AICD « comprend des indications qualitatives, comme la nature goudronnée ou non goudronnée des routes, le type de routes (primaires, 7 m de large ; secondaires, 6 m de large ; et tertiaires, 5 m de large), ainsi que l'état de celles-ci (bon ; convenable ; mauvais) » (Ali et al., 2015, p. (p. 12)). Hélas, le site internet hébergeant les données SIG cité par Foster & Benitez (2011) n'est plus opérationnel.

A l'heure actuelle, la Banque africaine de développement mène le Programme de connaissances sur les infrastructures en Afrique (AIKP), une initiative qui s'appuie sur l'étude AICD. Néanmoins, malgré la continuité attendue entre les deux programmes, le catalogue de données disponibles d'AIKP (<https://infrastructureafrica.opendataforafrica.org/apps/gallery>) ne semble pas comprendre de données SIG.

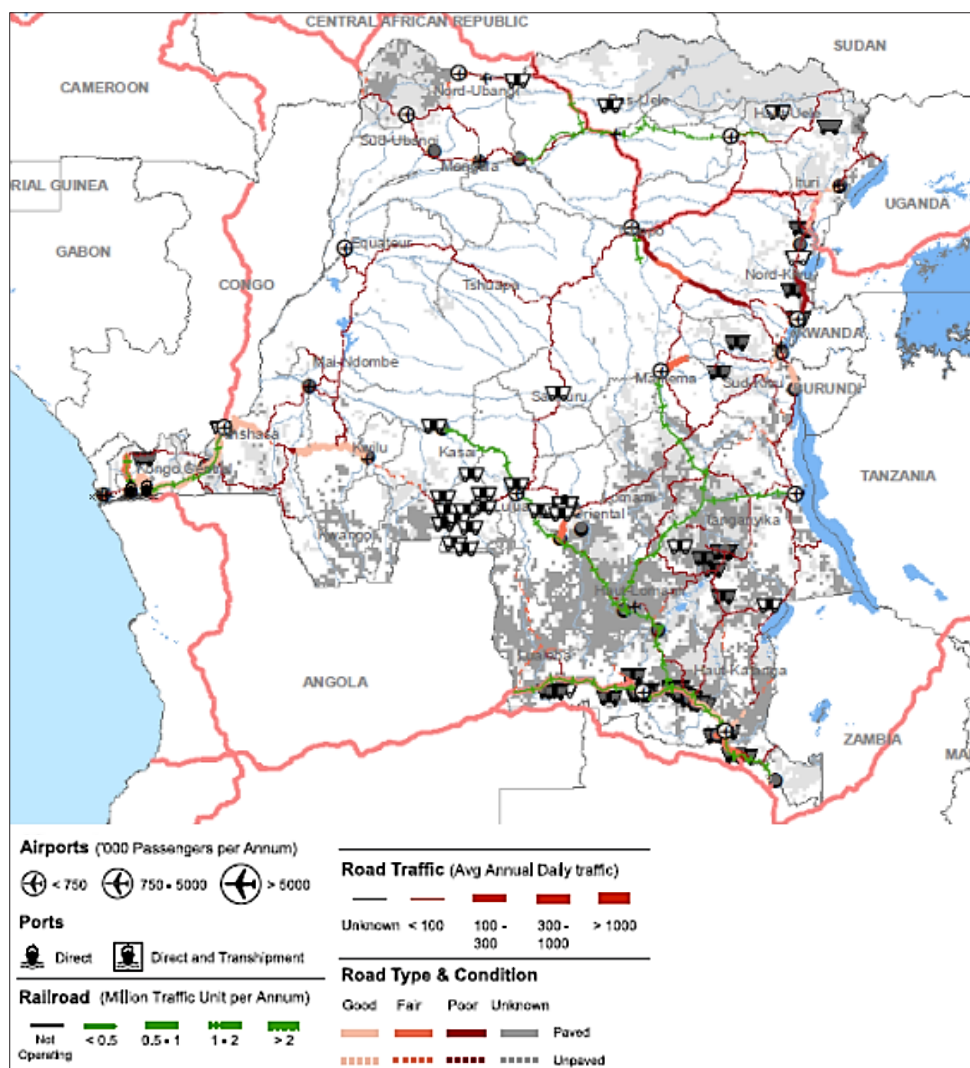


Figure 2.6 Produit de l'initiative AICD

Source : Foster & Benitez, 2011, p. 12

Jeu de données de Delorme sur le réseau routier africain

Auteur : Delorme

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : n.d.

Couverture géographique : Afrique

Site internet des données : indisponible

Méthodologie : citée dans <http://documents.worldbank.org/curated/en/810421468000299138/pdf/WPS7273.pdf> (p. 12)

Disponibilité : indisponible

Dans le cadre de leur étude des infrastructures en RDC, Ali et al. (2015) citent deux principales sources d'informations : le programme AICD, évoqué plus haut, et Delorme. Delorme est une entreprise privée « spécialisée dans les appareils GPS, et qui a en outre compilé minutieusement un réseau de routes géoréférencées à travers l'Afrique » (p. 12) Dans l'étude d'Ali et al., les données de Delorme sont utilisées comme source primaire « en raison de leur précision ; elles comprennent à la fois les principaux segments routiers et les voies rurales sur l'ensemble du territoire national » (p. 12). Malheureusement, le site internet de Delorme, cité par Ali et al. (2015) est introuvable, nous ne sommes pas parvenus à remonter la trace de cette entreprise à travers nos recherches internet.

Jeux de données du Référentiel Géographique Commun

Auteurs (directeurs) : Cellule Infrastructures et l'Institut Géographique Congolais

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : 2017

Couverture géographique : Afrique

Site internet des données : https://www.rgc.cd/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=43&Itemid=77 (source originale ; dernière mise à jour en 2010)

<https://data.humdata.org/dataset/dr-congo-transportation-network> (dernière mise à jour en 2017)

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : accessible au téléchargement

S'il est une source incontournable en matière de SIG en RDC, il s'agirait peut-être du Référentiel géographique commun (RGC). Cette plateforme héberge les données SIG produites par de nombreux acteurs travaillant en RDC, principalement (mais pas exclusivement) à des fins d'assistance humanitaire (CI, IGC, Cluster Logistic, MONUSCO, UNMACC, OSFAC, OCHA, UNOPS, ISCO...), et dont la MONUSCO est la principale source. Selon ses directeurs, un aspect important de ce référentiel est son ambition d'éviter la dispersion des informations et la réplication des efforts. S'il vise également à la compatibilité et à la comparaison entre les informations, le RGC ne saurait assurer le caractère exhaustif ou exact des données compilées, les acteurs concernés n'étant pas, dans leur majorité, des producteurs officiels d'informations géographiques.

Dans le domaine des infrastructures, le RGC comprend des données vectorielles en téléchargement libre :

Réseau routier (dernière mise à jour : 22 juin 2010)	Réseau ferroviaire (dernière mise à jour : 11 décembre 2008)	Gares ferroviaires (dernière mise à jour : 11 décembre 2008)	Aéroports (dernière mise à jour : 22 septembre 2010)
- Nom courant de la route - Nom de l'axe routier tel que défini par l'Office des routes (ODR) - Catégorie de la route - Capacité (types de véhicules) - Longueur en kilomètres - Etat - Existence d'un financement spécifique	- Nom courant du réseau - Nom de l'axe tel que défini par la SNCC - Nom du district où se situe le chemin de fer - Etat du chemin de fer - Type de chemin de fer (voie simple ou multiple) - Longueur en kilomètres - Largeur, en mètres - Vitesse moyenne - Voie électrifiée ou non - Eventuel projet de réhabilitation du chemin de fer	- Nom courant de la gare - Nom du district dans lequel la gare est située - Présence et catégorie d'un espace d'entreposage de la SNCC - Présence d'un atelier central pour locomotives diesel ou électriques	- Nom courant de l'aéroport - Autres noms utilisés dans les bases de données - Catégorie de l'aéroport - Utilisation de l'aéroport - Couverture de la piste - Longueur de la piste en mètres - Largeur de la piste, en mètres - Altitude de la piste, en mètres - Etat de la piste (bon/mauvais)

Le jeu de données d'AICF sur les **voies navigables** comporte des informations SIG sur les ports, mais celles-ci ne sont pas disponibles. Le RGC met également à disposition des données sur les transports fluviaux :

Portions navigables des rivières de RDC (dernière mise à jour : 22 septembre 2010)	Ports (dernière mise à jour : 22 septembre 2010)	Bacs (dernière mise à jour : 22 septembre 2010)	Ponts (dernière mise à jour : 22 septembre 2010)
- Nom de l'axe - Longueur totale du segment de l'axe, en kilomètres - Catégorie de mouillage	- Nom courant du port fluvial - Type de port - Nom du district dans lequel se situe le port	- Caractéristique technique du bac ou type de véhicule pour lequel il est conçu - Code courant du bac, tel que défini par l'Office des routes - Nom du bac - Nom de la rivière traversée - Etat du bac (bon/mauvais)	- Nom courant du pont - Axe routier sur lequel le pont est situé - Nom de la rivière traversée par le pont - Type de structure, ou type de véhicule pour lequel le pont a initialement été conçu - Longitude, en mètres - Largeur, en mètres - Etat du pont (bon/mauvais)

Carte globale de la durée de transport vers les villes

Auteurs (directeurs) : collaboration entre Google, la Commission européenne et l'Université de Twente

Type de données : raster

Dernière mise à jour : 2015

Couverture géographique : mondiale

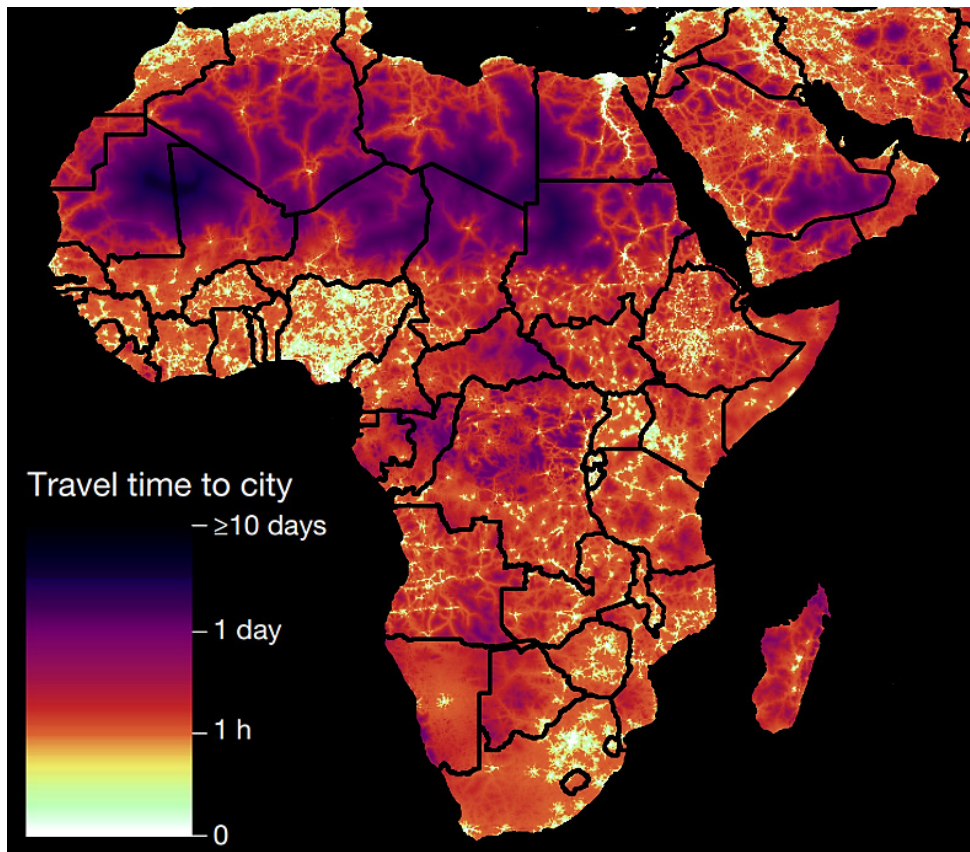
Site internet des données : <https://malariaatlas.org/explorer/#/>

Méthodologie : <https://www.nature.com/articles/nature25181#Sec13>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Ce jeu de données illustre l'accessibilité des centres urbains à forte densité démographique à une résolution de 1×1 km en 2015. Il permet de mesurer la durée moyenne d'un trajet en heures/minutes vers la ville la plus proche. En comparaison des autres initiatives citées, la principale innovation de ce projet est la combinaison de deux jeux de données routiers d'envergure : les données d'OpenStreetMap et les données de distances des routes tirées de la base de données routières de Google. Un atout majeur de ces nouvelles données routières est l'intégration des routes secondaires (ex. routes rurales non goudronnée), qui représentent une part importante des routes de nombreux pays en développement—et qui étaient jusqu'alors absentes ou erronées dans les données routières disponibles.

«Avec cette carte datant de 2015, nous offrons à la communauté scientifique et aux acteurs de terrain, chez qui ces données sont en forte demande, les informations les plus récentes sur l'accessibilité des lieux. A ce jour, aucune autre étude n'offrait ce niveau de qualité, de cohérence et de portée géographique ; nos résultats permettent ainsi d'analyser les différences d'accessibilité de différents lieux.» — Weiss et. al. (2018)



Carte 2.8 Durée moyen d'un trajet vers la ville la plus proche, en jours

Source : Weiss et al., 2018

2.4.2 Infrastructures électriques

Comme nous l'avons exposé dans le chapitre 1, l'un des obstacles les plus urgents à résoudre pour favoriser l'électrification est d'augmenter la production énergétique et de fournir l'électricité de façon plus économique. En ce sens, cette section décrit les données recueillies sur les infrastructures électriques dans le pays.

2.4.2.1 Réseau électrique national

Jeux de données de la SNEL

Auteur : SNEL

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : 2017

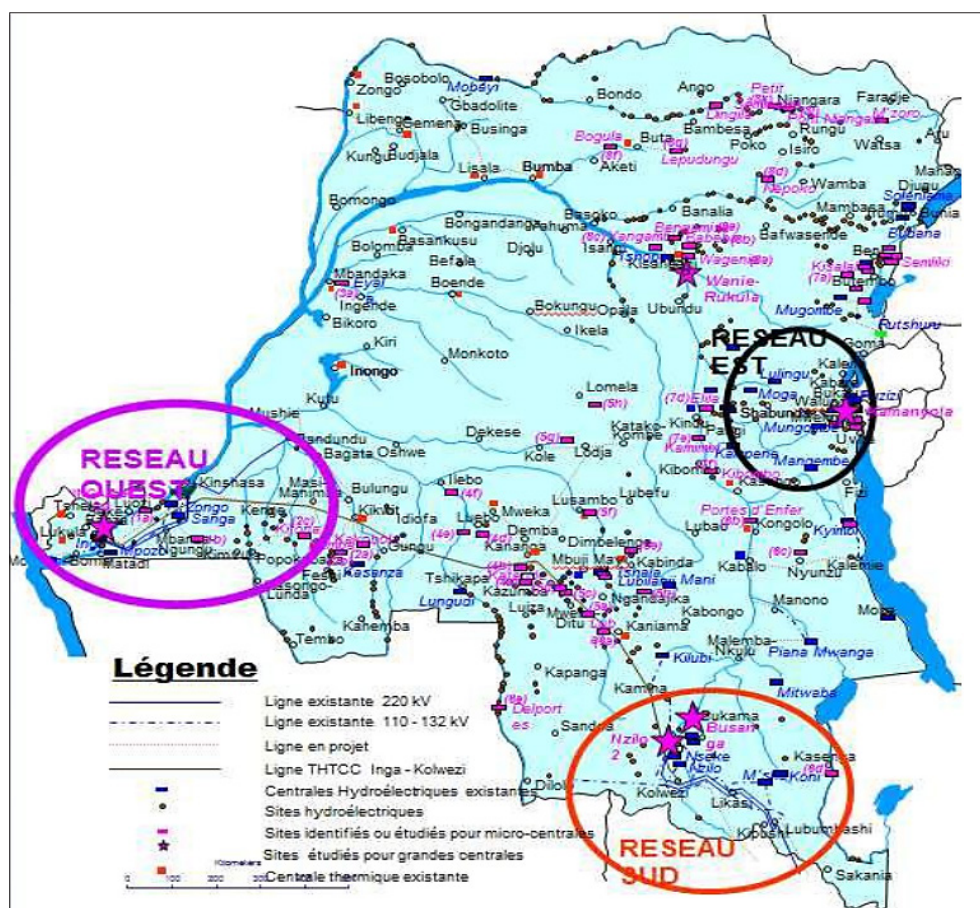
Couverture géographique : indisponible

Site internet des données : indisponible

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : uniquement en format PDF basse résolution

Compte tenu de son ancien statut d'unique fournisseur d'électricité en RDC, la SNEL a eu accès à de précieuses informations sur les infrastructures d'approvisionnement électrique. Jusqu'à ce jour, ces données ne sont pas accessibles au public, mais la publication de cartes dans certains documents ou leur apparition dans les présentations d'institutions publiques prouvent leur existence. La carte présentée en Carte 2.9 a été utilisée dans plusieurs présentations officielles. C'est un exemple du type de données détenus par la SNEL.



Carte 2.9 Exemple de carte de la SNEL sur les infrastructures électriques

Source : UCM, 2018

Jeu de données OpenStreetMap

Auteur : OpenStreetMap

Type de données : divers

Dernière mise à jour : mise à jour régulière

Couverture géographique : mondiale

Site internet des données : <https://www.openstreetmap.org/#map=5/-4.083/13.975>

Méthodologie : numérisation décentralisée des images satellite par de multiples utilisateurs validés par les réviseurs sur la plateforme

Disponibilité : téléchargement possible

OpenStreetMap est un projet de cartographie visant à créer une base de données géographique gratuite du monde entier à l'aide d'un système de GPS et d'autres données gratuites. En tant que source de

données géographiques, l'usage d'OpenStreetMap est très répandu en RDC. La localisation des centres de santé, des réseaux routiers, des écoles et du réseau électrique existant est mise à jour par des contributeurs d'OpenStreetMap indépendants. Les institutions publiques sont directement liées au serveur d'OpenStreetMap pour télécharger ses informations et les mettre à jour sur leurs sites respectifs. A l'heure actuelle, la principale préoccupation avec les données fournies par OpenStreetMap est leur niveau de précision et de qualité. Il arrive en effet que les informations soient actualisées par des individus sans réelles connaissances du site. Pour s'assurer de la qualité, il est donc conseillé de comparer les données d'OpenStreetMap avec les informations des institutions spécifiques responsables de chaque information.

Jeu de données de la Banque mondiale sur le réseau électrique

Auteur : Banque mondiale

Type de données : linéaires

Dernière mise à jour : 2017

Couverture géographique : non disponible

Site internet des données : <https://energydata.info/dataset/africa-electricity-transmission-and-distribution-2017>
<https://datacatalog.worldbank.org/dataset/democratic-republic-congo-electricity-transmission-network-2017>

Méthodologie : liens ci-dessus

Disponibilité : téléchargement possible

La Banque mondiale a élaboré un jeu de données combinant les données de l'étude AICD, d'OpenStreetMap et d'autres sources, en fonction du pays. La BM considère cette compilation de données comme « la carte en accès libre la plus récente et complète sur les réseaux électriques en Afrique ». Les données ont été mises à jour en 2017.

Algorithmes prédictifs sur le réseau

Lorsqu'il n'existe aucune donnée, ou que celles-ci sont indisponibles, de nouveaux algorithmes à la pointe de l'analyse géospatiale permettent de prédire où pourraient se situer les lignes du réseau. Les entrées de cet algorithme sont les réseaux routiers et électriques, l'éclairage nocturne, la population, les établissements urbains, les zones administratives, des modèles numériques d'élévation, les taux d'électrification et l'occupation des sols.

Un exemple de cette technologie est l'algorithme créé par Arderne et al. (2020). Il a été testé en RDC, mais n'a pas bien fonctionné ; il a notamment prédit la présence de lignes du réseau à des endroits qui en étaient dépourvus. Le fonctionnement de cet algorithme peut donc être défaillant dans les zones disposant de peu, voire d'aucun réseau, de même que dans les régions regroupant un nombre important de petits ou mini réseaux.

La liste ci-dessous illustre cette expérience et d'autres travaux de ce type :

Titre	Lien
GRIDFINDER 2020 – Global energy infrastructure	https://gridfinder.org/
Using NASA nighttime lights to guess where the grid is [Utilisation des données d'éclairage nocturne de la NASA pour prédire l'emplacement du réseau]	https://rdn.me/night-time-lights-find-grid/ https://github.com/cardene/gridfinder (modèle de logiciel en open source)
Medium-Voltage Distribution (Predicted) [Distribution sous moyenne tension (Prediction)]	https://energydata.info/dataset/medium-voltage-distribution-predictive (télécharger les fichiers)
Predictive mapping of the global power system using open data [Cartographie prédictive des systèmes énergétiques mondiaux grâce à des données en libre accès]	https://www.nature.com/articles/s41597-019-0347-4.pdf

Projet de l'Association des coopératives d'électricité rurale nationale (NRECA) — Réseau

Auteur : NRECA en collaboration avec VSI et UCM

Type de données : multiples

Dernière mise à jour : en cours

Couverture géographique : RDC

Site internet des données : indisponible

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : inconnue

UCM a commandé une étude de planification géospatiale. Les données recherchées sur les réseaux existants dans le cadre de notre étude pourraient être complétées par ce type de recherches menées par l'Association des coopératives d'électricité rurale nationale (NRECA) — la structure internationale recrutée par l'UCM pour conduire cette étude de planification géospatiale. NRACA prévoit de compléter les données de numérisation des images satellite des réseaux existants avec des données issues d'enquêtes de terrain sur l'ensemble du réseau. Néanmoins, l'association rencontre certaines difficultés avec cette dernière composante en raison de crise sanitaire liée au Covid-19. Les données sur les analyses des caractéristiques techniques des réseaux (HT et MT) et sur leur extension pourraient également s'avérer utiles pour estimer les coûts du développement du réseau dans notre modèle.

2.4.2.2 Postes et transformateurs

Jeu de données de la Banque mondiale sur le réseau électrique

Type de données : jeux de données de la SNEL

Auteur : SNEL

Dernière mise à jour : indisponible

Couverture géographique : indisponible

Site internet des données : indisponible

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : téléchargement indisponible

Certaines cartes prouvent clairement l'existence d'informations géographiques sur les postes et les transformateurs électriques (voir carte la Carte 2.9 sur les informations du réseau de la SNEL), mais les fichiers sources utilisés ne sont pas mis à la disposition du public. L'équipe NRECA citée plus haut pourrait accéder à ces données dans le cadre de son étude du réseau, actuellement en cours. Si nous n'arrivons toujours pas à mettre la main sur ces fichiers originaux, nous pourrions toujours numériser la carte existante pour en exploiter les données.

➤ 2.5 Données géographiques et de terrain

Les données sur le terrain, notamment l'occupation des sols, l'élévation et l'hydrologie, sont utilisées dans plusieurs processus de notre modèle afin d'estimer le potentiel énergétique, les zones de restriction ou encore la viabilité de l'extension du réseau, entre autres (KTH & SNV, 2018, p. 5). Les sources de telles données sont nombreuses et faciles d'accès. Dans cette section, nous décrivons les différentes sources étudiées.

2.5.1 Occupation des sols

Les jeux de données sur l'occupation des sols indiquent les différents usages du terrain. Dans le cadre de notre modèle, ces informations nous servent aussi à estimer le potentiel de la biomasse, et indirectement à déduire le pouvoir d'achat de la population. Il existe plusieurs sources dans ce domaine. Les organisations étrangères, comme l'Observatoire des forêts d'Afrique centrale (OFAC), l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ou l'Université du Maryland produisent des données sur l'occupation des sols dans le monde entier, et notamment en RDC. L'Université du Maryland a notamment mené des analyses annuelles des images satellite Landsat afin de caractériser l'étendue et les changements des forêts du monde de 2000 à 2018. En RDC, la Direction des inventaires et aménagement forestiers (DIAF) du ministère de l'Environnement compile des données sur l'occupation des sols depuis 2014.

Nous sommes actuellement en possession des jeux de données suivants :

Système national de surveillance des forêts

Auteur : Direction des Inventaires et Aménagement Forestiers (DIAF) en partenariat avec le World Resources Institute

Dernière mise à jour : 2018

Site internet des données : <http://rdc-snsf.org/>

Méthodologie : <http://rdc-snsf.org/>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Ce jeu de données est le fruit d'un système de surveillance suivant les évolutions du couvert forestier en RDC, ainsi que les principaux événements de déforestation, et permet de produire des informations essentielles pour que le pays puisse répondre aux exigences des conventions internationales comme la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Il est alimenté par une collection de données de terrain fiables et de haute qualité sur les forêts. Les résultats tirés de la collecte de 2018 devraient être publiés cette année (2020). Au-delà du couvert forestier, ce système contient d'autres jeux de données liés à l'occupation des sols.

Atlas forestier interactif de la RDC

Auteur : Ministère de l'Environnement et du développement durable (MEDD) avec le soutien du World Resources Institute (WRI)

Dernière mise à jour : 2018

Site internet des données : <https://cod.forest-atlas.org/map?l=fr>

Méthodologie : <https://cod.forest-atlas.org/?l=fr>

Disponibilité : accessible au téléchargement

L'Atlas forestier interactif de la RDC est un système dynamique de surveillance forestière fournissant des informations crédibles et récentes sur le secteur forestier congolais. L'Atlas repose sur une plateforme de système d'informations géographiques (SIG) et a pour but de renforcer la gestion forestière et l'aménagement du territoire en regroupant les multiples informations liées à la forêt sur une même plateforme normalisée. L'Atlas fait office de répertoire des informations liées à l'occupation des sols sur la RDC et au niveau mondial. Il contient 71 jeux de données mis à jour à mesure que de nouvelles informations émergent, et comprend des publications périodiques en téléchargement libre.

Atlas sur l'utilisation des terres forestières

Auteur : Observatoire des forêts d'Afrique centrale

Dernière mise à jour : différentes dates en fonction des couches

Site internet des données : <https://www.observatoire-comifac.net/old/geo/atlas/>
<https://www.observatoire-comifac.net/old/gisrepository/>

Méthodologie : <https://www.observatoire-comifac.net/old/gisrepository/>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Ce jeu de données contient différentes couches sur les rivières et l'hydrographie linéaire ; les lacs et l'hydrographie de surface ; le couvert forestier ; les délimitations administratives ; les villes, localités et villages ; les routes et chemins de fer ; les différents régimes fonciers ; les zones de chasse (zones d'intérêt cynégétiques, ou ZIC) ; les zones (de chasse) d'intérêt à gestion communautaire (ZICGC) ; les zones villageoises de chasse (ZoVIC) ; les aires protégées ; les localités des projets REDD+ ; et les plantations agro-industrielles.

Cartes mondiales d'occupation des sols à 300 m

Auteur : Agence spatiale européenne (ESA)

Dernière mise à jour : 2015

Site internet des données et méthodologie : <http://www.un-spider.org/links-and-resources/data-sources/300-m-global-landcover-maps-cci-lc>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Cette carte mondiale d'occupation des sols à une résolution de 300 m comprend 22 types d'occupation des sols et 24 classifications annuelles entre 1992 et 2015.

Un jeu de données similaire créé par l'ESA, intégrant moins de catégories d'occupation des sols mais présentant une meilleure résolution, est également disponible ici : <http://www.un-spider.org/links-and-resources/data-sources/cci-land-cover-s2-prototype-land-cover-20m-map-africa>

Base de données partagée de l'occupation des sols mondiale (GLC-SHARE)

Auteur : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)

Dernière mise à jour : 2013

Site internet des données et méthodologie : <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home?uuid=ba4526fd-cdbf-4028-a1bd-5a559c4bff38>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Cette base de données sur l'occupation des sols à l'échelle mondiale a été créée par la division Terres et eaux de la FAO, avec les contributions de différents partenaires et institutions. La base de données est produite à une résolution de 30 secondes d'arc (1 km). Le principal avantage du jeu de données GLC-SHARE est sa capacité à conserver des informations existantes et disponibles en haute résolution sur l'occupation des sols au niveau régional et national, obtenues grâce à des données spatiales et de données multi-temporelles, et de les intégrer aux meilleures synthèses de jeux de données mondiaux.

La base de données est distribuée en 11 couches au format raster (geoTIFF), dont la valeur d'un pixel représente le pourcentage de couverture de chaque type d'occupation des sols. La couche dominante, qui représente la valeur du type d'occupation des sols dominant, est également disponible avec une légende au format LYR ESRI. Enfin, des informations disponibles sur la source de chaque couche peuvent être récupérées à la source en associant les valeurs raster de chaque couche à un tableau Excel.

Les 11 couches sont : sols artificiels ; terres cultivées ; prairies ; zones arborées ; zone de végétation arbustive ; zone de végétation herbacée, aquatique ou régulièrement inondée ; mangroves ; végétation éparse ; sol nu ; neige et glaciers ; masses d'eau.

2.5.2 Elévation

Base de données numérique d'élévation (DEM) SRTM à 90 m

Auteur : NASA

Site internet des données : https://www.rgc.cd/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=42&Itemid=184

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : accessible au téléchargement

Des modèles numériques d'élévation (MNE) couvrant l'ensemble des pays du monde peuvent être téléchargés sur ce site. Le MNE SRTM 90 m a une résolution de 90 m à l'équateur, et propose une pixélisation

en mosaïque de 5°×5° pour un téléchargement et un usage plus facile. Ils sont tous produits à partir d'un jeu de données intégré afin de faciliter le processus de création de la mosaïque. Les MNE sont disponibles en format Arcinfo ASCII et GeoTIFF afin de faciliter leur utilisation dans de multiples traitements d'images et applications SIG. Les données peuvent être téléchargées via un navigateur ; vous pouvez également y avoir accès directement depuis le ftp.

Courbes de niveau du Référentiel géographique commun

Auteur : Référentiel géographique commun

Site internet des données : https://www.rgc.cd/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=42&Itemid=184

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : accessible au téléchargement

Le Référentiel géographique commun a également mis à la disposition du public (via transfert, en raison du volume des fichiers) d'abondants jeux de données sur les courbes de niveau au niveau national, avec un degré de précision allant jusqu'à 50 m. Les données ont été mise à jour pour la dernière fois en mai 2012.

2.5.3 Hydrologie

Comme déjà évoqué dans ce rapport, la RDC est dotée des plus importantes ressources hydroélectriques d'Afrique, lui donnant non seulement le potentiel de répondre à sa demande intérieure de façon très économique, mais également de devenir le principal exportateur énergétique du continent. Dans le même temps, les voies navigables peuvent fournir un mode de transport à moindre coût ne nécessitant que de faibles investissements pour améliorer la navigabilité.

Le réseau de voies fluviales a toujours été central dans le développement du pays : son usage stratégique ouvre de nombreuses perspectives en termes de transport et de production électrique. La longueur totale des rivières, canaux et autres masses d'eau navigables atteint 15 000 km (CIA).

Jeux de données hydrologiques du Référentiel géographique commun

Auteurs (directeurs) : Cellule Infrastructures et l'Institut Géographique Congolais

Site internet des données : https://www.rgc.cd/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=42&Itemid=184

Méthodologie : indisponible

Disponibilité : accessible au téléchargement

Le Référentiel géographique commun dispose de nombreux jeux de données sur des domaines hydrologiques pertinents pour notre étude. On peut notamment citer :

- Voies navigables (dernière mise à jour : 18 octobre 2010), contient :
 - ▶ Type de voie navigable
 - ▶ Nom courant de la voie navigable
 - ▶ Longueur, en kilomètres
- Sections hydrologiques d'importantes longitudes (plus de 200 m de large) (dernière mise à jour : 22 septembre 2010), contient :
 - ▶ Nom courant de la rivière
- Lacs (dernière mise à jour : 22 septembre 2010), contient :
 - ▶ Nom courant du lac
 - ▶ Autres noms utilisés dans les bases de données
 - ▶ Surface du lac, en km²
- Chutes d'eau (dernière mise à jour : 22 février 2010), contient :
 - Type de cascade
 - Nom courant de la cascade

2.6 Délimitations administratives

Dans un modèle de système énergétique, les frontières administratives internes servent à délimiter le cadre de l'analyse. En RDC, les frontières extérieures n'ont pas changé depuis la Conférence de Berlin en 1885. Ces dernières années toutefois, le pays a connu des changements dans sa division politique.

D'après la loi organique n° 08/016 de 2008, la division administrative congolaise de premier niveau est la province, y compris pour la capitale du pays, Kinshasa. La province est ensuite divisée en villes et en territoires, qui correspondent aux zones urbaines et rurales. Par la suite,

- les villes sont divisées en communes ;
 - ▶ les communes sont répartis en quartiers et/ou en groupements.
- Les territoires sont divisés en communes, en secteurs et en chefferies ;
 - ▶ Les secteurs ou chefferies sont fractionnées en groupements ;
 - ✖ et les groupements en villages.

La RDC compte 26 provinces. C'est officiellement le cas depuis 2006, année de promulgation de l'actuelle Constitution. Néanmoins, la réforme n'est entrée en vigueur qu'en 2015, après que le parlement congolais ait adopté une loi de partition du pays en 26 provinces, au lieu des 11 qui prévalaient jusqu'alors (Luntumbue, 2017). Ces nouvelles provinces sont : Kinshasa, Bas-Uele, Equateur, Haut Lomami,

Haut-Katanga, Haut-Uele, Ituri, Kasai, Kasai Central, Kasai Oriental, Kongo Central, Kwango, Kwilu, Lomami, Lualaba, Ma'I-Ndombe, Maniema, Mongala, Nord-Kivu, Nord-Ubangi, Sankuru, Sud-Kivu, SudUbangi, Tanganyika, Tshopo et Tshuapa.

Les limites administratives par la Banque mondiale

Site internet des données : <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/resource/eea14f3c-827e-44d3-9d09-842b70ae3e7b>

Disponibilité : accessible au téléchargement

Limites administratives du Référentiel géographique commun

Site internet des données : https://www.rgc.cd/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=41&Itemid=183

Disponibilité : accessible au téléchargement

OpenStreetMap

Site internet des données : <https://www.openstreetmap.org/>

Disponibilité : accessible au téléchargement

➤ 2.7 Données à exploiter dans les prochaines phases : recommandations, planification et défis

Pour conclure ce chapitre, nous vous présentons les résultats de nos recherches. Nous abordons les jeux de données fournissant les meilleures données dans chaque domaine, et décrivons la marche à suivre dans les prochaines phases. Il s'agira notamment d'améliorer et de compléter les jeux de données, de rester à la page grâce à de nouvelles publications et de collaborer avec des institutions congolaises afin qu'elles valident ces données.

A. Demande

A.1 Répartition de la population

Données pour les prochaines phases :

- Commission européenne (CE), GHSL, 2019 : de nombreuses avancées ; extrêmement prometteur en termes de développement et d'amélioration continue en dehors de notre projet. Contiennent toutefois quelques écueils.
- Facebook, 2019 : relativement bonnes avancées, source également prometteuse, mais qui contient certaines limites comparée au GHS de la Commission européenne, notamment l'absence des populations manquantes dans le recensement de 1984 et la non-prise en compte du changement de délimitation administrative de certains quartiers.

Les meilleurs jeux de données sur ceux de la CE (GHSL) et de Facebook. Il est néanmoins difficile de départager les deux sources. Les données de Facebook permettent de détecter certains bâtiments/populations que l'UE n'identifie pas, mais elles ignorent également des données repérées par la CE. De plus, elles ne sont disponibles que jusqu'à 2016. En outre, le jeu de données de l'UE présente une plus faible résolution que celui de Facebook (250×250 m vs. 30×30 m), même si les couches de détection des bâtiments des deux sources ont la même résolution (30×30 m). Cela aura une incidence sur les tâches à mener en phase 2.

Tâches à accomplir en phase 2 :

1. Tester le modèle avec les deux jeux de données afin d'en sélectionner un, ou de combiner les deux

Ce modèle sera lancé avec les deux jeux de données pour évaluer a) la façon dont la qualité des données affecte l'une ou l'autre résolution (30×30 m et 250×250 m), b) l'existence de lacunes majeures (ex. Lodja dans le jeu de données de l'Union européenne et Kolwezi dans celui de Facebook) et c) pour mener une analyse de sensibilité afin de vérifier la cohérence des résultats en cas de changement de certains paramètres.

La combinaison des deux jeux de données est une autre option. Néanmoins, cela pourrait s'avérer compliquer dans la pratique car selon KTH, il faudrait connaître la localisation exacte de tous les problèmes dans les deux jeux de données.

2. Se rapprocher de Facebook et de l'Union européenne pour vérifier si les décomptes de population peuvent être améliorés (entre autres)

Toutes les bases de données analysées utilisent des projections de croissance démographiques reposant sur le recensement de 1984 afin de répartir la population en cellules — il s'agit là de données largement dépassées. La prochaine étape consistera donc à vérifier auprès des institutions respectives s'il est possible de recalibrer la répartition démographique sur la base d'enquêtes plus récentes. Dans la mesure où ces institutions seront probablement intéressées à l'idée d'améliorer la qualité de leurs produits, notre équipe les informera également des lacunes identifiées ; à elles ensuite de décider s'il est possible de les surmonter.

3. Valider les jeux de données démographiques avec les acteurs locaux

Compte tenu des probables connaissances des acteurs locaux concernant les modèles d'établissements des populations, leurs changements récents, futurs plans etc., ceux-ci pourront nous aider à valider nos jeux de données. Notre équipe devrait mettre une stratégie en place en vue d'exploiter leurs commentaires pour améliorer les jeux de données.

4. Nécessité de distinguer les établissements urbains ou ruraux

Cette distinction devrait être établie afin d'estimer de façon plus précise la demande énergétique dans les différents groupements de populations. L'Union européenne dispose déjà d'un jeu de données sur ce sujet. Eurostat possède également un jeu de données SIG nommé Degree of Urbanisation, et qui s'avère idéal pour traiter cette question²³.

A.2 Demande énergétique en provenance des ménages, des usages productifs et des équipements publics

Données nécessaires pour les prochaines phases : les jeux de données sur les agents et les modèles de demande en provenance des ménages, des entreprises et des équipements publics ne sont pas complets (il n'existe aucun recensement des entreprises ou des équipements publics ; du moins, ils ne sont pas accessibles au public. Le dernier recensement des ménages a eu lieu en 1984, et les échantillons utilisés semblent être différents en fonction des enquêtes). Ces données sont indirectes (et pour la plupart, pas spécifiques à la demande énergétique) et dispersées entre de nombreuses institutions et vagues de collecte des données. Notre objectif est donc moins de sélectionner le meilleur jeu de données que de définir une méthode d'utilisation cohérente de celles-ci afin d'estimer les demandes énergétiques des différents agents. Pour ce faire, la coopération avec l'institut RLI sera déterminante (voir Chapitre 3). Il existe cependant d'autres tâches à mettre en oeuvre pour assurer la qualité optimale des données identifiées.

Tâches à accomplir en phase 2 :

S'entretenir avec les partenaires universitaires (RLI, KTH et UCT) sur la méthodologie à utiliser pour estimer la demande énergétique.

²³ Voir <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/degurba>

Données sur les ménages	Données sur les usages productifs	Données sur les équipements publics
• Définir si une deuxième vague d'enquêtes sera menée, et le cas échéant, son but et son contenu ; • Consulter la documentation spécialisée, et se rapprocher d'experts sur la qualité des enquêtes menées en RDC. Parmi les sources et auteurs identifiés : Marivoet & De Herdt (2014), Thontwa et al. (2017), Marivoet, et al. (2018), Marivoet et al. (2019). Marivoet & De Herdt (2018) ; • Nettoyer et analyser les résultats des enquêtes auprès des ménages de la BM en se focalisant sur les variables énergétiques ; • Comparer les résultats de l'enquête RM à Kinshasa avec les enquêtes de la BM en RDC — cela pourrait être utile pour extrapoler les résultats ; • Contacter les institutions locales pour obtenir plus d'informations (particulièrement le CAID) ; • Valider les résultats avec les partenaires locaux.	• Nettoyer et analyser les résultats des enquêtes auprès des entreprises de la BM en se focalisant sur les variables énergétiques ; • Déterminer si et comment des jeux de données raster (PIB et agriculture) peuvent interagir avec les informations quantitatives ; • Contacter les institutions locales pour obtenir de plus amples informations : Guichet Unique, Agence nationale pour la promotion des investissements, Fédération des entreprises du Congo, CAID ; • Distinguer le secteur formel et informel ; • Valider les résultats avec les partenaires locaux.	• Contacter les institutions locales pour obtenir plus d'informations. Santé : CAID, Système national d'information sanitaire (SNIS). Enseignement : Ministères de l'Enseignement primaire, secondaire et technique, de l'Enseignement supérieur et universitaire, et de la Formation professionnelle, arts et métier ; • Identifier les données sur les équipements liés à l'eau (Regideso) • Comparer les données avec celles d'OpenStreetMap ; • Valider les résultats avec les partenaires locaux.

B. Offre

B.1 Hydroénergie

Données nécessaires pour les prochaines phases : concernant l'hydroénergie, le *masterfile* de RM demeure le jeu de données disponible le plus complet. Cela a été implicitement reconnu par la BM, qui l'utilise comme l'une de ses principales sources. Néanmoins, d'autres initiatives sont en cours et visent à l'améliorer et le compléter. Concrètement, le jeu de données actuel sera combiné à d'autres, comme celui de KTH et de SHER lorsqu'ils seront mis à notre disposition, ainsi que ceux périodiquement collectés par nos partenaires sur le terrain.

Tâches à accomplir :

1. Inclure les jeux de données des partenaires locaux de SHER et KTH dans le *masterfile* de RM ;
2. Inclure les paramètres minimaux afin de déterminer des estimations de coûts raisonnables pour le développement des sites du projet ;
3. Déterminer si les sites intégreront des réservoirs ou des configurations au fil de l'eau.

4. Inclure des aspects de saisonnalité du flux et l'éventualité de variabilité liée au dérèglements climatiques.
5. Valider avec les partenaires locaux et lorsque possible, intégrer de nouvelles informations.

B.2 Energie solaire

Données nécessaires pour les prochaines phases : Global Solar Atlas

Tâches à accomplir : Vérifier les mises à jour

B.3 Energie éolienne

Données nécessaires pour les prochaines phases : Global Wind Atlas

Tâches à accomplir : Vérifier les mises à jour

B.4 Energie issue de la biomasse

En RDC, la biomasse est une source importante d'énergie à ne pas négliger. Pourtant, les données associées à ce type d'énergie se font rares. Des détails sur de potentielles opportunités sont fournis dans le point 2.3.4 de la section sur les ressources bioénergétiques (surtout pour le biodiesel, qui pourrait permettre d'atteindre 100 % d'énergies renouvelables dans les mini-réseaux hybrides). La biomasse solide, les déchets ménagers et municipaux et les résidus animaux et agricoles présentent un réel potentiel en termes de ressources. Ce défi nécessitera une étude plus poussée dans les prochaines étapes. Il pourrait par exemple s'agir d'aspects spécifiques analysés par des étudiants au cours de leurs projets de recherche de fin de Master, et qui seraient par la suite intégrés à notre modèle.

B.5 Gaz naturel (ressources nationales)

Notre étude de données n'a pas pris en compte le gaz naturel (méthane (CH₄)) en tant que source énergétique potentielle. Des données seront collectées dès le lancement de la prochaine phase, car des réserves de méthanes sont censées être disponibles à l'échelle nationale. Les questions environnementales et économiques liées à cette ressource seront également prises en considération.

C. Infrastructures énergétiques et de transports

C.1 Infrastructures de transports

Données nécessaires pour la prochaine phase : le modèle OnSSET utilise actuellement le jeu de données basé sur les durées de trajets (plutôt que sur les routes) pour définir les coûts d'accès à un lieu donné ; étant donné que ce jeu de données est créé et obtenu de façon externe, notre équipe ne peut intervenir et continuera à l'utiliser en l'état.

Cependant, si/quand notre modèle sera capable d'inclure directement les jeux de données sur les routes, ou si/quand le jeu de données sur la durée des trajets sera amélioré, la combinaison des données du Référentiel géographique commun et d'OpenStreetMap seront notre point de départ. Les jeux de données du Référentiel géographique commun sont facilement téléchargeables et sont assez complets, dans la mesure où ils tiennent compte de différents moyens de transports. OpenStreetMap met à jour et valide constamment ses données en interne.

Des améliorations sont possibles, mais il conviendra de tenir compte du cadre d'élaboration des autres jeux de données (spécifiquement axé sur les transports, ou élaborés par d'éminentes institutions orientées vers les infrastructures). Cela constituera les principales tâches à accomplir.

Tâches à accomplir dans la phase 2 :

1. Vérifier avec les auteurs s'il est possible d'améliorer la couche des durées de trajets ;
2. Vérifier s'il est possible de modifier le modèle afin d'y inclure directement les jeux de données sur les routes ;
3. Contacter les institutions locales pour obtenir davantage d'informations, notamment sur la capacité et l'état d'avancement des travaux (planifié, en construction, opérationnel...) ;
4. Valider les jeux de données en les comparant aux *basemaps* satellite, puis fusionner les segments qui coïncident ;
5. Valider les résultats avec les partenaires locaux.

Le tableau ci-dessous dresse la liste des institutions à contacter pour valider et obtenir des données supplémentaires en fonction du type de moyen de transport.

Données routières	Données sur les ports et aéroports
BM (diagnostic infrastructures nationales en Afrique), Geology for an Economic sustainable development (GECO) (carte interactive du Katanga), Cellule Infrastructure (Carte du réseau routier de la RDC), Office de routes	Régie de voies maritime (RVM), Régie de voies fluvial (RVF), Régie de Voies Aériennes (RVA)

C.2 Infrastructures électriques

Données nécessaires pour les prochaines phases : après avoir validé les sources disponibles en les comparant à l'imagerie satellite, nous nous sommes rendus compte qu'OpenStreetMap constituait une meilleure source que la Banque mondiale. De plus, les partenaires locaux ont indiqué qu'en fait, les données sur le réseau de transmission électrique prévu, incluses dans les jeux de données de la BM, correspondaient aux plans d'extension du réseau national de transport routier. Cependant, la SNEL demeure une source optimale — et l'unique source dans le cas des projets de réseaux.

Tâches à accomplir :

1. Vérifier la validité des lignes électriques incluses dans les jeux de données de la BM mais absentes de celles d'OpenStreetMap, puis fusionner les données correctes ;
2. Contacter la SNEL afin d'obtenir des informations sur le réseau et les postes électriques ;
3. Numériser les cartes de la SNEL mises à disposition du public ;
4. Valider les algorithmes prédictifs sur le réseau avec nos partenaires universitaires ;
5. Valider les données avec les partenaires locaux.

D. Données relatives au terrain

D.1 Occupation des sols

Données nécessaires pour les prochaines phases : de tous les jeux de données collectés, celui du DIAF-FAO est peut-être le plus optimal. Les données sont les plus récentes, et elles sont mises à jour grâce à des données recueillies sur le terrain, ce qui les rend plus précises. Néanmoins, ces informations sont spécifiquement axées sur la surveillance des forêts, et il n'est pas exclus de trouver d'autres informations pertinentes pour notre modèle dans d'autres jeux de données étudiés. De plus, le nombre de classes d'occupation des sols dans ce jeu de données doit être vérifié. A ce jour, notre modèle comporte 17 catégories d'occupation des sols, et certains blocages pourraient survenir s'il devait lire une carte comportant plus ou moins de classes.

Tâches à accomplir :

1. Comparer les informations des différents jeux de données, analyser les écarts et fusionner les complémentarités ;
2. Vérifier le nombre de catégories dans le jeu de données sélectionné, et si nécessaire, l'adapter pour le rendre complémentaire avec le modèle.

D.2 Elévation

Données nécessaires pour la prochaine phase : couche par défaut actuellement utilisée par le modèle.

Tâches à accomplir : vérifier avec RLI l'identité de ce jeu de données afin d'appliquer son algorithme d'extension du réseau.

D.3 Hydrologie

Données nécessaires pour les prochaines phases : à ce sujet, la principale source est le Référentiel géographique commun. Mais comme dans le cas des infrastructures, l'utilité de ces données dépendra de la capacité de notre modèle à les utiliser directement, ou à modifier le jeu de données sur les durées de trajet pour qu'il tienne compte de l'hydrologie, afin que le modèle parvienne à l'utiliser de façon indirecte. Les tâches à accomplir pour les prochaines phases impliquent donc d'assurer qu'il est possible d'inclure ces données dans le modèle et de vérifier l'utilité de ce jeu de données.

Tâches à accomplir :

1. A partir des données disponibles, vérifier s'il est possible de déterminer :
 - a. S'il est possible d'exploiter la rivière pour transporter du matériel (ex. panneaux solaires, batteries, câbles, générateurs alimentés au diesel, turbines hydrauliques...)
 - b. La saisonnalité du potentiel de navigation des rivières.
2. Valider les données avec les partenaires locaux, les institutions et les développeurs nationaux de systèmes solaires et de mini-réseaux.

E. Délimitations administratives

Données nécessaires pour la prochaine phase : la source présélectionnée est le Référentiel géographique commun car il intègre la réorganisation des limites administratives internes de 2015. Ces données sont

aussi plus complètes que d'autres sources, dans la mesure où elles contiennent la division de différentes entités territoriales pour une large part du pays, ce qui n'est pas le cas des autres jeux de données consultés. Toutefois, nous avons détectés quelques problèmes avec ce jeu de données : certains polygones ne sont pas délimités, tandis que d'autres ne correspondent pas aux limites présentées par Google Maps ou OpenStreetMap. Il s'agira donc de régler ces incohérences.

Tâches pour la phase 2 :

1. Systématiquement comparer les données avec Google Maps et OpenStreetMap ;
2. Communiquer les erreurs identifiées dans le Référentiel géographique commun et définir une façon de les corriger.

Résumé des sources de données utilisées dans cette première phase et à réexploiter à l'avenir

Type de données	Données utilisées dans la première phase	Données à utiliser dans la deuxième phase
Demande		
Repartition démographique	CE GHS, 2016, 1 × 1 km	Deux options : jeux de données de l'Union européenne et de Facebook
Eclairage nocturne	VIIRS 2016	VIIRS (dernière version disponible, ou 2016)
Enquêtes auprès des ménages	Pas utilisé	RM et autres enquêtes
Structure économique et activité des entreprises	Pas utilisé	Enquêtes sur les entreprises de la BM, jeux de données d'institutions locales
Equipements publics	Pas utilisé	OpenStreetMap avec données issues d'institutions locales (SNIS, Ministère de l'enseignement)
Offre		
Energie solaire (Tableau KTH : ressource en rayonnement solaire et facteur de charge)	Globalsolaratlas.info version 1, résolution 1 × 1 km	Globalsolaratlas.info version 2, résolution 250 × 250 m
Energie éolienne (Tableau KTH : vitesse du vent et facteur de charge)	Globalwindatlas.info version 1, résolution 1 × 1 km	Globawindratlas.info version 2, résolution 250 × 250 m
Energie hydraulique	KTH	RM, KTH, SHER

Type de données	Données utilisées dans la première phase	Données à utiliser dans la deuxième phase
Infrastructures énergétiques et de transports		
Infrastructures de transports	Routes : OCHA	Routes : jeux de données d'OpenStreetMap et du Référentiel géographique commun, plus données issues d'institutions locales
Infrastructures de transports Infrastructures électriques	Ports maritimes et aéroports : pas utilisés	Routes : jeux de données d'OpenStreetMap et du Référentiel géographique commun, plus données issues d'institutions locales
	Durée des trajets : Weiss et al. (2018)	Durée des trajets : Weiss et al. (2018), éventuellement avec modèle actualisé
	Réseau existant : jeux de données de la Banque mondiale et OpenStreetMap	Réseau existant : jeux de données validés d'OpenStreetMap et de la Banque mondiale, plus intégration de données de la SNEL (si mises à disposition) et algorithmes prédictifs du réseau (si améliorés)
Coûts des infrastructures électriques	Postes et transformateurs : non inclus	Postes et transformateurs : données de la SNEL, si mises à disposition. Autrement, numérisation des cartes de la SNEL déjà à disposition du public
	Hypothèses du KTH (voir chapitre 4)	Etude plus poussée des données du secteur. Certains acteurs locaux peuvent aussi disposer de données spécifiques utiles au projet
Données relatives au terrain		
Occupation des sols	Global Land Cover Facility	DIAF FAO plus autres si de nouvelles données deviennent disponibles
Élévation	Base de données numérique d'élévation (DEM) SRTM à 90 m	Base de données numérique d'élévation (DEM) SRTM à 90 m
Hydrologie	Pas utilisé	<i>Référentiel géographique commun</i>
Délimitations administratives	<i>Référentiel géographique commun</i>	<i>Référentiel géographique commun</i>

Références

Ali, R., Barra, A. F., Berg, C. N., Damania, R., Nash, J. D., & Russ, J. (2015) Infrastructure in conflict-prone and fragile environments: evidence from the Democratic Republic of Congo. Banque mondiale. Disponible sur : <http://documents.worldbank.org/curated/en/810421468000299138/pdf/WPS7273.pdf>

Badger, Jake; Hahmann, Andrea; Guo Larsen, Xiaoli; Badger, Merete; Kelly, Mark; Davis, Neil; Olsen, Bjarke T.; Mortensen, Niels G. (2015) The Global Wind Atlas An EUDP project carried out by DTU Wind Energy Final Report. Disponible sur : https://www.energiteknologi.dk/sites/energiteknologi.dk/files/slutrapporter/gwa_64011-0347_finalreport.pdf

Banque mondiale (2011), Public-Private Partnership in Telecommunications Infrastructure Projects: Case of the Republic of Congo. Washington, DC. © Banque mondiale Disponible sur : <http://documents.worldbank.org/curated/en/368281468247842993/pdf/687010ESWOP1220f0Dem-0Rep-0of0Congo.pdf>

Banque mondiale (2015), Document d'information (PID)—Phase d'évaluation. Disponible sur : <http://documents.banquemondiale.org/curated/fr/699551468026105092/pdf/PID-Appraisal-Print-P150148-06-24-2015-1435138970302.pdf>

Banque mondiale (2017), Solar. Disponible sur : <https://projects.worldbank.org/en/results/2017/11/29/solar>

Beták, J., Šúriová, N., Šúri, M., Cebecauer, T. Solar Resource – Key Information for Solar Energy Industry. Životné prostredie, 2015, 49, 1, p. 15–21.

Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2010) Modelling energy demand of developing countries: Are the specific features adequately captured? Energy policy, 38(4), 1979–1990.

Bonafilia, Derrick; Basu, Saikat; Gill; James; Kirsanov, Danil; Yang, David. (2019) Mapping roads through deep learning and weakly supervised training. Ai.facebook.com. Disponible sur : <https://ai.facebook.com/blog/mapping-roads-through-deep-learning-and-weakly-supervised-training/>

CAID. (n.d.) Santé. Disponible sur : <https://www.caid.cd/index.php/sante/>

Conserve Energy Future (10 Jan. 2015) Pros and Cons of Solar Energy—Conserve Energy Future. Conserve Energy Future. Disponible sur : <https://www.conserve-energy-future.com/pros-and-cons-of-solar-energy.php>

Damania, R., Barra, A. F., Burnouf, M., & Russ, J. D. (2016) Transport, croissance économique et déforestation en République démocratique du Congo. Disponible sur : <http://documents.worldbank.org/curated/en/135731468184171732/pdf/103695-WP-P145907-PUBLIC-Transport-Economic-Growth-and-Deforestation-in-the-Democratic-Republic-of-Congo-1-13-16.pdf>

DESA Nations Unies (2019) 2016 Electricity Profiles

DESA, Nations Unies (n.d.), Understanding Modelling Tools for Sustainable Development. Module: Energy Systems Model: A Reader. Disponible sur : <https://un-modelling.github.io/documents/module-5/2.%20Energy%20Systems%20-%20Reader.pdf>

DTU Wind Energy (2018) Global Wind Atlas—methodology. Science.globalwindatlas.info. Disponible sur : <http://science.globalwindatlas.info/methods.html#header>

Dunkerley, J. (1982) Estimation of energy demand: the developing countries. *The Energy Journal*, 3(2).

Ecole de Santé Publique de Kinshasa (ESPK). (2019) Évaluation des Prestations des Services de soins de Santé (EPSS) 2017–2018. Disponible sur : <https://dhsprogram.com/pubs/pdf/SPA30/SPA30.pdf>

Ecole de Santé Publique de l'Université de Kinshasa (ESPK) [République Démocratique du Congo] et ICF. (2019) République Démocratique du Congo : Evaluation des Prestations des Services de soins de Santé (EPSS RDC) (2017–2018) Kinshasa, RDC et Rockville, Maryland, USA : ESPK et ICF. Disponible sur : <https://dhsprogram.com/pubs/pdf/SPA30/SPA30.pdf>

Enabel—Agence belge de développement. (2017) Economie informelle en RDC. YouTube. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=snEUUIRCIEY>

Essor. (2018) Rapport de prévision de la demande.

Faber, B., Krause, B., & Sánchez de la Sierra, R. (2017) Artisanal mining, livelihoods, and child labour in the cobalt supply chain of the Democratic Republic of Congo.

Facebook et al. (2017) Building High Resolution Maps for Humanitarian Aid and Development with Weakly- and Semi-Supervised Learning. Disponible sur : <https://research.fb.com/wp-content/uploads/2019/05/Building-High-Resolution-Maps-for-Humanitarian-Aid-and-Development-with-Weakly-and-Semi-Supervised-Learning.pdf>

Facebook et al. (2017) Mapping the world population one building at a time. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/321901984_Mapping_the_world_population_one_building_at_a_time

Foster, V., & Benitez, D. A. (2011) The Democratic Republic of Congo's Infrastructure. A Continental Perspective. Disponible sur : <https://core.ac.uk/download/pdf/6218549.pdf>

FMI. (2019) Rapport pays n° 19/285 République démocratique du Congo. Disponible sur : <https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2019/09/04/Democratic-Republic-of-the-Congo-2019-Article-IV-Consultation-Press-Release-Staff-Report-and-48648>

Ioannis, Papadopoulos. (2018) "Wind atlases no substitute for on-ground experience". *Wind Power Monthly*. Consulté le 30 novembre 2018. Disponible sur : <https://www.windpowermonthly.com/article/1519111/wind-atlases-no-substitute-on-ground-experience>

IRENA. (2018) Wind energy. Irena.org. Disponible sur : <https://www.irena.org/wind>

JeuneAfrique.com (2010) Albert Yuma Mulimbi, le patron des patrons – JeuneAfrique.com. Disponible sur : <https://www.jeuneafrique.com/197166/archives-thematique/albert-yuma-mulimbi-le-patron-des-patrons/>

KPMG. (2017) DRC Economic Snapshot H2, 2017. Disponible sur : <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/za/pdf/2017/12/DRC-2017H2.pdf>

KTH & SNV. (2018) Electrifications Pathways for Benin. A spatial electrification analysis based on the Open Source Spatial Electrification Tool (OnSSET). Disponible sur : https://snv.org/cms/sites/default/files/explore/download/2019jan_electrification_pathways_for_benin_final.pdf

Kusakana, K. (2016) A Review of Energy in the Democratic Republic of Congo, dans ICDRE 2016: 18th International Conference on Desalination and Renewable Energy. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/306380971_A_Review_of_Energy_in_the_Democratic_Republic_of_Congo

Luntumbue, M. (2017) RDC : Les enjeux du redécoupage territorial : Décentralisation, équilibres des pouvoirs, calculs électoraux et risques sécuritaires. GRIP.

Makang, T., Nefer, M., & Dobrotkova, Z. (2019) The Role of the Public Sector in Mobilizing Commercial Finance for Grid-Connected Solar Projects.

Marivoet, W., De Herdt, T., & Ulimwengu, J. (2018) Navigating around the DRCs statistical potholes: new estimates on welfare and poverty trends (2005–2012) following a spatially disaggregated approach. Disponible sur : <https://www.uantwerpen.be/en/research-groups/iob/publications/working-papers/wp-2018/wp-201802/>

Marivoet, W., De Herdt, T., & Ulimwengu, J. (2019) Reviewing DRC's poverty estimates, 2005–2012: unprecedented GDP growth without trickle down. Disponible sur : <https://repository.uantwerpen.be/docman/irua/d3d55b/157948.pdf>

Marivoet, W., & De Herdt, T. (2018) Tracing down real socio-economic trends from household data with erratic sampling frames: the case of the Democratic Republic of the Congo. *Journal of Asian and African Studies*, 53(4), 532–552. Disponible sur : <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021909617698842>

Marivoet, W., & De Herdt, T. (2014) Reliable, challenging or misleading? A qualitative account of the most recent national surveys and country statistics in the DRC. *Canadian Journal of Development Studies/Revue canadienne d'études du développement*, 35(1), 97–119. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/261758058_Reliable_challenging_or_misleading_A_qualitative_account_of_the_most_recent_national_surveys_and_country_statistics_in_the_DRC

Marivoet, W., & De Herdt, T. (2017) From figures to facts: making sense of socioeconomic surveys in the Democratic Republic of the Congo (DRC). Analysis and policy brief/University of Antwerp, Institute of Development Policy and Management; 23.

Ministère de la Santé Publique. (2010) Plan National de Développement Sanitaire PNDS 2011–2015. Disponible sur : <https://www.asrames.org/wp-content/uploads/2016/07/PNDS.pdf>

Marivoet, W., De Herdt, T., & Ulimwengu, J. (2019) Reviewing DRC's poverty estimates, 2005–2012: unprecedented GDP growth without trickle down.

Observatoire de l'économie informelle en RDC. (2019) Economie Informelle. Hiva.kuleuven.be. Disponible sur : <https://hiva.kuleuven.be/en/research/theme/globaldevelopment/p/ObservatoireDRC/economieinformelle>

OpenEI. (n.d.) Wind energy | Open Energy Information. Openei.org. Disponible sur : https://openei.org/wiki/Wind_energy#cite_ref-awea-basics_1-0

Pollet, I., Van Ongevalle, J., Shomba, S., & Mulamba, I. (2017) Cadre conceptuel et revue de la littérature. Disponible sur : https://hiva.kuleuven.be/en/research/theme/globaldevelopment/p/ObservatoireDRC/documents/ZKD1433_Cadre_conceptuel_et_revue_de_la_litterature_FR_A4.pdf

- Pollet, I., Van Ongevalle, J., Shomba, S., & Mulamba, I. (2017) Analyse des enquêtes qualitatives et quantitatives sur l'économie informelle à Kinshasa. Disponible sur : https://hiva.kuleuven.be/en/research/theme/globaldevelopment/p/ObservatoireDRC/documents/ZKD1433_rapport_EIND_FR_A4.pdf
- PwC. (n.d.) Africa gearing up. Future prospects in Africa for the transportation & logistics industry. Disponible sur : <https://www.pwc.co.za/en/assets/pdf/africa-gearing-up.pdf>
- Schouten, P. (2013) The materiality of state failure: Social contract theory, infrastructure and governmental power in Congo. *Millennium*, 41(3), 553–574. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/258171465_The_Materiality_of_State_Failure_Social_Contract_Theory_Infrastructure_and_Governmental_Power_in_Congo
- Sindhu, S., Nehra, V., & Luthra, S. (2017) Solar energy deployment for sustainable future of India: Hybrid SWOC-AHP analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1138–1151.
- Solargis. (2020) Global Solar Atlas. [globalsolaratlas.info](https://globalsolaratlas.info/support/methodology). Disponible sur : <https://globalsolaratlas.info/support/methodology>
- Thontwa, S. K., De Herdt, T., Marivoet, W., & Ulimwengu, J. (2017) National datasets on livelihoods in the DRC: precisely wrong or vaguely right? Disponible sur : <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/wp-201712.pdf>
- UCM. (2018) Termes de référence—Recrutement d'un consultant chargé de l'élaboration de l'étude Du Plan National Géospatial D'électrification De La RDC AU Moindre Cout (PNGE-MC) « 2021– 2040 »
- UNJLC (2006), Construire des routes modernes en République démocratique du Congo Disponible sur : <https://reliefweb.int/report/democratic-republic-congo/dr-congo-snapshot-roads-dr-congo>
- UNOPS. (2017) Construire des routes modernes en République démocratique du Congo UNOPS. Disponible sur : <https://www.unops.org/news-and-stories/stories/from-footpaths-to-modern-roads-in-drc>
- Urban, F. R. M. J., Benders, R. M. J., & Moll, H. C. (2007) Modelling energy systems for developing countries. *Energy Policy*, 35(6), 3473–3482.
- Weiss, D. J., Nelson, A., Gibson, H. S., Temperley, W., Peedell, S., Lieber, A., & Mappin, B. (2018) A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015. *Nature*, 553(7688), 333–336. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/nature25181#Sec13>

CHAPITRE 3.

Etat des lieux et tendances des systèmes énergétiques et des approches de modélisations appropriés

➤ 3.1 Introduction

La planification énergétique dans les pays en développement doit tenir compte d'un éventail complexe de défis et d'objectifs d'ordres économiques, sociaux, politiques et environnementaux. L'évolution rapide des technologies énergétiques ouvre la voie à l'intégration d'énergies renouvelables à petite échelle comme alternative viable aux solutions de réseau centralisé. Dans le même temps, les progrès de la planification énergétique, notamment des méthodologies reposant sur des modèles de systèmes énergétiques informatisés et fondés sur les données, permettent de planifier des systèmes énergétiques offrant davantage de précision spatiale et temporelle. Il devient possible d'optimiser l'utilisation de ressources locales, de nouvelles innovations technologiques et d'énergies renouvelables afin de fournir une électricité propre et abordable et de satisfaire des demandes énergétiques réparties sur tout le territoire.

Dans le chapitre 1, nous avons abordé les défis de l'électrification en RDC. Ces dernières années, le degré de représentation de ces défis et opportunités sous forme de modèles de planification de systèmes énergétiques s'est considérablement développé. Alors que les modèles de systèmes énergétiques étaient auparavant élaborés avec un objectif de planification d'infrastructures centralisées, ils sont désormais capables d'intégrer des informations spatiales et temporelles détaillées pour mieux rendre compte de la diversité des ressources et de la demande. Qui plus est, les coûts et d'autres paramètres techniques peuvent être intégrés aux modèles afin d'optimiser la capacité de production et réduire le coût d'approvisionnement électrique.

Le présent chapitre couvre les arguments qui ont motivé notre choix pour l'Outil en open source pour l'électrification spatiale (OnSSET) et le Système en open source de modélisation énergétique (OSeMOSYS) comme principaux modèles de planification pour les phases 2 et 3 de notre projet. Dans un premier temps, nous brosserons un aperçu des différentes approches de modélisation des systèmes énergétiques, puis nous aborderons la question des livrables prévus et des critères pris en compte lors de la sélection des modèles proposés pour l'analyse de l'électrification en RDC que nous mènerons dans les phases 2 et 3 du projet. Par la suite, nous analyserons les modèles jugés particulièrement adaptés (par rapport aux critères définis) et justifierons notre choix final. Nous traiterons également les consultations menées lors de la phase 1 avec les partenaires potentiels du projet afin de faire valeur leurs forces individuelles et la façon dont ils pourraient contribuer aux prochaines phases de l'étude. Enfin, les dernières sections du chapitre nous permettront d'expliquer comment la méthodologie et les modèles choisis seront exploités pour créer un outil de visualisation dans les phases 2 et 3 du projet.

➤ 3.2 Vue d'ensemble des modèles de systèmes énergétiques

Les systèmes énergétiques comprennent la production, la conversion, l'approvisionnement et l'utilisation d'énergie (5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC). L'analyse des systèmes énergétiques vise à comprendre les interactions entre les différentes composantes du système, les opportunités de transformation, mais aussi à rendre les systèmes énergétiques plus efficaces, durables, fiables, etc. Un aspect fondamental de cette analyse dans les pays en développement est d'améliorer l'accès à l'énergie.

Des modèles de système énergétique ont été élaborés pour soutenir l'analyse technico-économique de ces systèmes dans différents contextes et à différentes échelles. Ils peuvent être utilisés pour analyser l'offre et la demande énergétique sur l'ensemble d'un système énergétique, ou uniquement sur certains segments (ex. centrales individuelles, secteurs et sous-secteurs, communautés spécifiques...). Les modèles de système énergétique sont appliqués en vue de résoudre de nombreux défis énergétiques au niveau local, national et mondial. Parmi ces défis, mentionnons la conception de réponses adaptées à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le développement de stratégies et de cibles pour une meilleure efficacité énergétique, la création de synergies avec les énergies renouvelables intermittentes afin d'assurer la sécurité de l'approvisionnement, ou encore, à l'image de notre projet, la planification de l'électrification.

Un certain nombre d'approches sont utilisées pour analyser les systèmes énergétiques, et de nombreux modèles ont déjà été élaborés. De Carolis (2012) a par exemple dénombré l'utilisation de plus de 43 modèles pour les analyses présentées lors des *International Energy Workshops* tenus entre 2001 et 2011. Hall et Buckley ont recensés l'utilisation de 97 modèles de système énergétique pour l'analyse des systèmes énergétiques au Royaume Uni entre 2008 et 2015 (Hall et Buckley, 2016). Plusieurs chercheurs (Jebaraj (2006), Neshat (2014), Wei (2006), Hiremath (2007), Herbst (2012), De Carolis (2012), Pfenninger (2014), Lopin (2018), Ringkjøb (2018) et Subramanian (2018), entre autres) proposent un tour d'horizon des différentes approches de modélisation appliquées à l'analyse des systèmes énergétiques, selon différents contextes et échelles. Ringkjøb (2018) propose lui aussi une étude de 75 modèles et de leur adéquation à la planification des systèmes électriques, en faisant la part belle aux sources d'énergies renouvelables intermittentes.

Les différentes approches de modélisation des systèmes énergétiques sont extrêmement différentes en termes de finalité, de méthodologie et de techniques. On les distingue également en fonction des données requises, de leur couverture géographique et de leur facilité d'utilisation. Les articles suscités mettent aussi bien en évidence l'éventail d'approches de modélisation actuellement utilisées que leur application généralisée pour répondre aux nombreuses questions et défis posés par la planification des systèmes énergétiques actuels. Ils témoignent également de la richesse des modèles et des tendances dans leur développement au fil de l'évolution des technologies, de l'augmentation de la puissance de calcul, et de la multiplication et la plus grande accessibilité des données.

On différencie souvent les approches de modélisation des systèmes énergétiques ascendantes (*bottom-up*) des approches descendantes (*top-down*). Dans le champ des approches *bottom-up*, il convient également de différencier les modèles d'optimisation et de simulation. Dans les paragraphes suivants, nous passons en revue les caractéristiques de la modélisation descendante ainsi que de la modélisation ascendante de simulation et d'optimisation afin d'en souligner le fonctionnement de base, la finalité et le type d'analyses pour lequel chaque approche est la mieux indiquée.

3.2.1 Modèles descendants

Les modèles descendants débutent avec un aperçu du contexte macroéconomique et du système énergétique concerné. Ils représentent souvent la demande de façon globale, avec peu, voire aucune représentation technologique. Les modèles énergétiques descendants sont généralement des **modèles macroéconomiques, économétriques ou des modèles d'équilibre général**. Les modèles économétriques sont souvent utilisés pour développer de simples prévisions de la demande énergétique et électrique en fonction de divers facteurs de la demande. Les modèles économiques d'équilibre général calculable (MEGC) sont des modèles complexes exploitant des données économiques (transferts d'argent), plutôt que des flux physiques, dans leur analyse. Cette spécificité rend les modèles EGC très utiles pour explorer les réponses à un changement de prix ; ils peuvent par exemple être appliqué pour analyser la façon dont l'économie pourrait répondre à de nouvelles mesures politiques, comme l'introduction de taxes ou de subventions sur les combustibles ou les émissions.

Ces modèles ne sont pas adaptés à la planification détaillée des systèmes énergétiques ; en général, ils ne tiennent pas compte des aspects techniques et ne permettent donc pas de restituer l'influence d'un changement de technologie sur la demande énergétique dans l'économie, ou d'analyser les technologies à privilégier pour l'approvisionnement en combustibles et en électricité dans l'économie. Les MEGC ne peuvent donc pas rendre compte de l'impact d'évolutions technologiques sur le prix général de l'électricité ou sur la fiabilité du système à répondre à la demande en électricité. Si ces modèles peuvent apporter des éclairages politiques intéressants, ils s'avèrent inadaptés à la planification de systèmes énergétiques. De plus, l'application de ce type de modèle alourdirait considérablement les besoins en données et en compétences, et complexifierait l'exécution du modèle, alors même qu'il ne nous permettrait pas d'analyser la planification spatiale de l'électrification.

3.2.2 Modèles techniques ascendants

Les modèles techniques ascendants reposent généralement sur la demande, et offrent une représentation détaillée des technologies. Les modèles ascendants sont généralement des modèles d'optimisation partielle de l'équilibre, ou des modèles de simulation. Les modèles d'équilibre partiel s'intéressent à l'équilibre d'un secteur ou d'un sous-secteur, et non pas à l'économie dans son ensemble.

Dans le cadre de la planification des systèmes énergétiques, les modèles techniques ascendants présentent l'avantage de représenter la demande en termes de besoin ou d'utilisation de services énergétiques, et de technologies d'approvisionnement de ces services. Par exemple, l'utilisation énergétique d'un ménage peut être modélisé selon plusieurs services énergétiques (éclairage, réfrigération, refroidissement, chauffage...). De même, les besoins en éclairage peuvent être satisfaits par différentes technologies (lampe à incandescence, LED, lampe fluorescente...). Dans les modèles ascendants, la demande est souvent ventilée par région, par secteur et sous-secteur, et par service énergétique nécessaire dans chacune de ces catégories. Les demandes totales et les options technologiques à même de fournir les services énergétiques attendus permettent ainsi de déterminer la quantité d'électricité (ou autre combustible) et la capacité de production électrique nécessaires.

Les modèles ascendants permettent de représenter les technologies d'approvisionnement des services énergétiques ; il est donc possible d'inclure l'efficacité d'approvisionnement énergétique et les coûts associés à leur analyse. Lorsque des technologies plus efficaces sont utilisées, le modèle réduit la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter le service énergétique. La représentation de la demande en matière de besoins en services énergétiques et la description de l'efficacité de l'approvisionnement électrique des services énergétiques permet un calcul endogène de la demande en combustible. Ainsi, les facteurs

à même d'influencer la demande (changement de technologie, amélioration de l'efficacité...) peuvent automatiquement être pris en compte par le modèle en tant que solutions d'approvisionnement.

Il s'agit donc d'une fonction intéressante pour examiner les interventions au niveau de l'offre et de la demande, mais il n'est pas toujours possible de la mettre en oeuvre. En effet, les données nécessaires pour ventiler la demande au niveau des services énergétiques, ou liées aux technologies alimentant les services énergétiques sont souvent inexistantes, et peuvent être coûteuses et complexes à recueillir. Néanmoins, les modèles ascendants de systèmes énergétiques sont souvent flexibles, et conçus de façon à laisser le développeur du modèle choisir le degré de représentation des services énergétiques. Il est généralement possible d'adapter la représentation des technologies, l'inclusion d'autres combustibles que l'électricité, et la représentation des ressources.

Des enquêtes énergétiques auprès des ménages sont souvent utilisées pour constituer les profils de la demande des ménages pour les services et technologies énergétiques. Les résultats de ces enquêtes constituent des échantillons des différents types de ménages ; il est par la suite possible de les redimensionner en fonction du profil socio-démographique de la zone ou du pays.

3.2.2.1 Modèles ascendants de simulation

Les modèles de simulation servent à simuler les flux énergétiques et l'adoption d'une technologie donnée au sein du système énergétique. Plusieurs types de modèles de simulation peuvent être appliqués pour l'analyse des systèmes énergétiques : on compte notamment des modèles de dynamique des systèmes, des modèles basés sur les agents et des modèles de comptabilisation.

Les modèles de dynamique des systèmes sont relativement abstraits ; ils sont axés sur le développement d'une dynamique de systèmes en réponse à la croissance de certains facteurs, et sur la capacité du système à réagir et à s'adapter aux changements survenant au fil du temps. Le rapport « Les limites de la croissance » de Donella Meadows est un exemple connu de modèle de simulation. On trouve des exemples de modèles de dynamique des systèmes appliqués à l'énergie, ainsi que l'ambition d'appliquer la dynamique des systèmes à la planification énergétique dans les travaux de Mutingi (2017). Vous trouverez un exemple de cadre de dynamique des systèmes appliqués à la modélisation de l'offre et de la demande dans la Figure 3.1 : l'augmentation de la demande énergétique (+) entraîne de plus gros investissements et une croissance du secteur industriel, qui à son tour entraîne une augmentation de la demande énergétique.

En revanche, la croissance de la demande ne peut pas dépasser les capacités d'approvisionnement. Ainsi, lorsque la demande n'est pas satisfaite, la croissance de la demande énergétique diminue (-). Les modèles de dynamique des systèmes sont de bons outils pour modéliser les systèmes constitués d'aspects interactifs que l'on peine à comprendre dans leur globalité. Ils peuvent ainsi être décomposés et examinés séparément afin d'en améliorer notre compréhension. L'interaction et l'interdépendance des différents composants fournissent ainsi un éclairage sur le fonctionnement du système dans son ensemble.

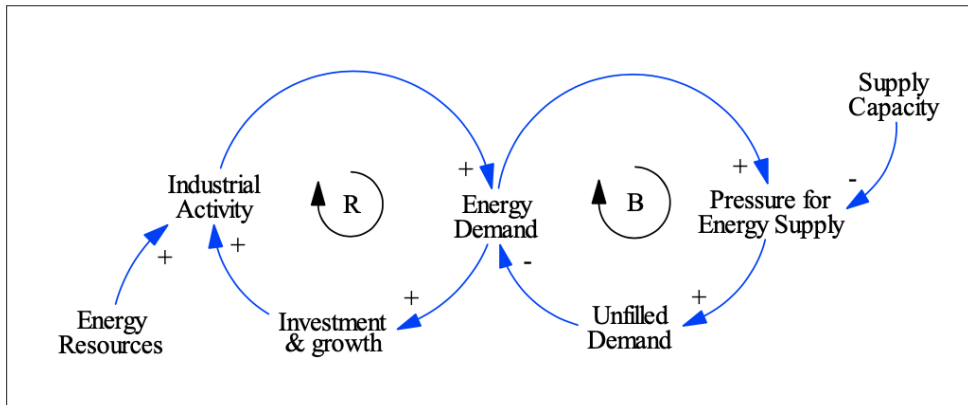


Figure 3.1 Offre et demande énergétique : les limites de la croissance

Source : Mutingi, 2017

Les modèles basés sur les agents représentent les prises de décision individuelles (des agents) au sein du modèle. Les agents peuvent être des individus, des entreprises, des produits, des villes, des acteurs, etc. Le comportement des agents au sein du modèle détermine le comportement du système. Dans les systèmes énergétiques, les agents prennent des décisions sur les investissements technologiques et sur leurs différents comportements (ex. choisir de marcher ou de conduire). Les modèles basés sur les agents permettent de mener des simulations sur les comportements de différents individus, agents et acteurs au sein d'un système donné. Le plus souvent, le niveau optimal « global » du système ne coïncide pas avec les intérêts individuels de chaque acteur ; le système ne présente donc pas un résultat optimal global et peut prendre une forme inattendue correspondant à la somme des intérêts des acteurs individuels. On peut trouver une critique des modèles basés sur les agents et de leur application pour l'analyse des systèmes énergétiques dans les travaux de Klein (2019). Les principaux défis présentés par la modélisation basée sur les agents reposent sur l'assemblage des données empiriques nécessaires pour formuler le comportement des agents, ainsi que sur le choix et la validation des paramètres.

Les modèles de comptabilisation sont les modèles de simulation les plus courants pour l'analyse des systèmes énergétiques — il s'agit en fait de modèles de simulation simplifiés. Contrairement aux modèles de dynamique des systèmes ou basés sur les agents, ils ne simulent pas les décisions ou les réponses entre les composantes du système ; ils permettent plutôt de calculer la demande future en fonction d'une relation supposée entre l'usage énergétique ou la demande de services énergétiques et divers facteurs sectoriels. Le modèle pour l'analyse de la demande énergétique (MAED) et le modèle de planification à long-terme des énergies alternatives (LEAP) sont deux exemples de modèles de comptabilisation. Dans ces modèles, la demande est par exemple calculée en émettant des hypothèses sur le taux de pénétration de certains appareils électriques, leur classe énergétique et heures d'utilisation. La demande peut également être calculée en faisant l'hypothèse du niveau de services énergétiques nécessaires et de leur niveau d'efficacité d'alimentation électrique (en fonction de l'efficacité des appareils et de la part des types d'appareils fournissant ces services énergétiques). Il revient au développeur du modèle de déterminer le degré de représentation des services énergétiques ou des technologies fournissant ces services. Les modèles de comptabilisation sont généralement utilisés pour étudier l'impact potentiel de certains scénarios de croissance ou de l'introduction d'une nouvelle mesure politique sur la demande énergétique à venir. Ils peuvent par exemple être utilisés pour évaluer l'impact de l'introduction de normes pour les appareils électriques sur l'usage énergétique et les émissions liées.

La simulation permet de mener une analyse en se demandant ce qu'il pourrait se produire (ex. « quelle serait la réduction de la consommation énergétique des ménages si l'on menait un programme d'éclairage plus efficace ? »), mais il n'est pas possible pas de définir la méthode la plus efficace pour atteindre un

objectif spécifique. Prenons un exemple : si votre objectif est de réduire les émissions de carbone jusqu'à un certain seuil, les modèles de simulation peuvent vous éclairer sur le niveau de contribution de certains programmes à l'atteinte de votre objectif, mais ils ne vous permettront pas d'évaluer les critères et les coûts pour déterminer le meilleur moyen d'arriver à vos fins. Le développeur du modèle devra donc passer par une phase de tâtonnement pour trouver une solution.

3.2.2.2 Modèles d'optimisation ascendants

Les modèles d'optimisation servent généralement à minimiser les coûts d'approvisionnement énergétique du système. Ils visent donc à atteindre un mix technologique optimal (du point de vue de l'offre et de la demande) afin de satisfaire la demande énergétique à moindre coût. Les coûts impliqués sont principalement financiers, mais certains coûts indirects (ex. coûts d'opportunité) peuvent aussi être intégrés à l'optimisation. L'approche la plus courante est de chercher à réduire les coûts du système, mais il est aussi possible d'optimiser le système énergétique en jouant sur d'autres variables, comme la réduction des émissions, ou encore en ciblant plusieurs objectifs.

A la base, les modèles d'optimisation de la planification des systèmes énergétiques ont été élaborés pour répondre aux problématiques liées à la sécurité de l'offre énergétique des grands réseaux centralisés. Ces modèles fournissaient alors un plan visant à répondre à l'évolution de la demande électrique en fonction des coûts, des ressources disponibles, de diverses contraintes, etc. Les modèles d'optimisation requièrent la configuration de paramètres liés aux aspects financiers et techniques des technologies étudiées. Les technologies côté offre (ex. centrales hydroélectriques) ou côté demande (ex. pompes à chaleur) sont donc caractérisées selon différents facteurs : coûts d'investissement, frais de fonctionnement et de maintenance fixes et variables, facteurs de disponibilité, capacité maximale et autres paramètres technico-économiques nécessaires pour l'optimisation.

Les modèles conçus pour déterminer les options d'approvisionnement énergétique les mieux adaptées comprennent généralement les variables suivantes :

- Quantité et disponibilité de ressources énergétiques locales : le développement d'un modèle d'approvisionnement robuste exige la représentation de la disponibilité saisonnière des technologies. Les technologies renouvelables, qui offrent des opportunités intéressantes pour l'accès énergétique dans les zones reculées, ont favorisé le développement de modèles offrant une meilleure résolution spatiale afin de permettre l'optimisation de l'offre en fonction du potentiel local — qui peut varier en fonction du contexte, des zones climatiques, etc.
- Caractéristiques liées à la performance et au coût des technologies d'approvisionnement.
- Demande saisonnière d'électricité : représentée sous forme de profils de la demande. Cette demande repose sur une estimation du nombre de clients à raccorder, leur demande probable et le niveau des activités économiques ou communautaires locales.
- Contexte pratique ou politique dans lequel s'insère la planification : distance entre la communauté et le réseau, existence de plans nationaux d'électrification, de taxes ou de subventions, politiques de régulation énergétique, et perception publique des technologies.

L'un des inconvénients des modèles d'optimisation est l'approche binaire de leur résultat, une optique de sélection unique où « un unique gagnant rafle la mise ». Dans ce modèle, une technologie peut s'imposer comme unique résultat en raison d'un léger avantage économique ; il est aussi possible que les résultats restent les mêmes malgré une évolution des coûts. Compte tenu du type de données renseignées, il est souvent impossible d'optimiser l'intégralité des éléments du système. Prenons l'exemple des préférences et de l'influence comportementale : concrètement, ces variables impliquent souvent de ne pas choisir la

solution la plus économique, mais elles sont difficiles à estimer et à intégrer au modèle (d'autant plus qu'elles n'impacteraient pas forcément les résultats, en raison de la binarité du modèle). Il n'est pas possible d'intégrer toutes les technologies côté demande qui nécessitent des technologies hybrides. On peut cependant contourner cette difficulté en limitant, ou en forçant l'adoption de certaines technologies dans le modèle afin de les faire correspondre aux estimations actuelles de la part du marché, ou à une estimation des parts de marchés à un instant T dans le futur.

Lorsqu'une simulation du système est nécessaire, il est possible d'utiliser certaines contraintes. Il est par exemple possible de spécifier que le modèle doit construire une centrale hydraulique de 2 GW en 2030 ou à une autre date dans le futur (à condition que cela soit faisable). Dans une optique d'optimisation pure, vous ne spécifieriez pas cette centrale car votre objectif serait que le modèle vous indique quoi construire. Vous pourriez également imposer la construction de centrale dans le modèle d'optimisation, tout en laissant le champ libre à d'autres options. Vous pourriez par exemple définir que votre solution doit inclure une centrale hydraulique de 2 GW, puis laisser le modèle déterminer les autres éléments nécessaires pour satisfaire la demande.

Les modèles de simulation s'appliquent aussi bien du point de vue de l'offre que de la demande. Lorsque l'on cherche à optimiser la demande, on permet au modèle de choisir parmi plusieurs technologies côté demande qui permettraient de modifier la quantité d'énergie nécessaire — alors qu'en cas de simulation de la demande, on forcera le modèle à utiliser un mix énergétique donné.

Si les données sont insuffisantes pour caractériser la demande, ou si une optimisation de la demande n'est pas nécessaire, la demande à satisfaire dans le futur peut être calculée en dehors du modèle. Les modèles pourront par la suite utiliser ces projections de la demande dans leur optimisation du futur mix énergétique.

Parmi les modèles d'optimisation ascendants les plus courants et adaptés aux analyses de l'offre nationale, régionale ou locale, on peut citer MESSAGE, OSeMOSYS, TIMES, MARKAL, EFOM, NEMS, AIM, OEMOF, CALLIOPE, TEMOA, PLEXOS, RESOLVE, PYPISA et Switch. Ces modèles se distinguent principalement par le nombre d'aspects de la demande pris en compte dans leur optimisation, par leur flexibilité de leur représentation de la demande et des profils de ressources, et leur vitesse de proposition des solutions. Parmi les autres éléments de comparaison possibles, notons : le prix de la licence, la façon dont ils sont supportés, l'échelle à laquelle ils sont appliqués, la facilité de chargement des données, la facilité d'utilisation des interfaces, le soutien au développement et la maintenance en continu, entre autres aspects importants. PLEXOS, RESOLVE, SWITCH et PYPISA ciblent l'approvisionnement électrique et fournissent une vue temporelle détaillée de la fiabilité du système d'approvisionnement électrique à un instant T, alors que TIMES/MARKAL, MESSAGE, OSeMOSYS et TEMOA permettent une représentation détaillée de l'ensemble des combustibles, de la demande de services énergétiques et des technologies alimentant les services énergétiques dans le modèle. Grâce à ces derniers modèles, il est donc possible d'optimiser simultanément l'offre et la demande, mais au détriment d'une certaine précision temporelle dans la modélisation des deux aspects. Cela implique que le test de la fiabilité globale des systèmes, notamment ceux dont la pénétration des énergies renouvelables est élevée, est souvent impossible. Certains modèles d'optimisation répandus ont été spécifiquement élaborés pour la production décentralisée (c'est à dire l'approvisionnement à petite échelle pour lequel la disponibilité d'énergies renouvelables locales est l'une des principales composantes de la solution) ; il s'agit notamment de RETScreen, HOMER et OEMOF (Open Energy Modelling Framework).

3.2.3 Modèle d'optimisation géospatiale des systèmes énergétiques pour l'électrification

La tendance générale des modèles de système énergétique tend vers l'exploitation d'un nombre accru de données en vue d'affiner la résolution spatiale et temporelle de l'offre et de la demande énergétique.

Ces avancées permettent d'élaborer des solutions plus solides et détaillées. Les modèles d'électrification, notamment ceux dont la base est faible et pour qui le réseau de transmission est difficilement accessible, ont évolué vers de petits systèmes d'approvisionnement électriques isolés et décentralisés, plutôt que vers un approvisionnement central (par exemple tiré du réseau national).

Des modèles d'optimisation basés sur des cellules SIG sont élaborés pour surmonter les défis liés à l'électrification de vastes étendues ou de petits groupements de population fortement dispersés. Les progrès réalisés dans la science des données et les méthodologies des logiciels en open-source contribuent au développement de ces modèles capables d'analyser les systèmes énergétiques à une haute résolution spatiale et temporelle. Les modélisateurs énergétiques partagent généralement leurs données et modèles de façon à ce qu'ils soient facilement réutilisables et personnalisables.

Ces modèles géospatiaux exploitent des jeux de données nationaux et mondiaux en haute résolution afin de cartographier les ressources énergétiques et la population à l'échelle d'une région ou d'un pays. D'autres composantes, comme les réseaux routiers ou énergétiques, peuvent être ajoutés et exploités dans le modèle d'optimisation. Leurs résultats offrent un aperçu de ce que pourrait devenir le niveau d'électrification en fonction de compromis entre différentes solutions d'approvisionnement en réseau ou hors-réseau au regard des densités de population, des ressources et d'autres variables pesant sur les décisions. OnSSET et la suite d'outils OEMOF sont des exemples de tels modèles.

3.2.4 Modèles hybrides

Au fil des évolutions du secteur, les modèles énergétiques ont été connectés à d'autres modèles de systèmes. Ce type de connexion est utile lorsqu'il existe des liens importants entre le système énergétique et d'autres types de système. Par exemple, dans les pays dont les ressources hydrauliques jouent un rôle important dans la réponse aux besoins énergétiques, il est possible de combiner les modèles hydrauliques et énergétiques afin de mieux rendre compte de la résilience du système énergétique en période de sécheresse ou lorsque d'autres facteurs impactent le système (ex. des usagers en amont entrent en compétition pour l'utilisation des ressources hydrauliques). De même, des modèles énergétiques offrant différentes fonctionnalités peuvent être connectés afin de proposer des solutions plus nuancées et un plus haut niveau d'utilisabilité — des modèles d'équilibre général calculable ont ainsi été connectés à des modèles d'optimisation ascendants à forte composante technologique.

Ces modèles interconnectés sont dénommés modèles hybrides. Le terme « hybride » est souvent utilisé de façon un peu vague pour désigner une combinaison d'approches ou d'options. Il ne s'agit donc pas d'une terminologie spécifique. Dans notre rapport, nous utilisons le terme « hybride » pour indiquer que deux approches de modélisation différentes ont été combinées pour atteindre un résultat. Un modèle hybride peut être réalisé en intégrant une fonctionnalité spécifique dans un modèle énergétique, ou encore en permettant le transfert de données entre deux modèles.

➤ 3.3 Quels critères les modèles doivent-ils offrir pour soutenir la planification de l'électrification en RDC ?

Notre tâche est de sélectionner une méthode, ou approche et un outil adapté aux défis et aux opportunités recensées pour l'électrification en RDC. Dans le cadre de nos travaux, les données sortantes du modèle doivent nous permettre de démontrer la viabilité de l'électrification en RDC, de fixer des objectifs d'électrification à différentes échéances, et d'orienter l'élaboration de politiques.

En RDC, il existe certaines infrastructures de réseau pouvant tirer parti des ressources hydrauliques et autres pour fournir de l'électricité ; néanmoins, pour les nombreuses zones trop éloignées du réseau principal, des micro-réseaux ou des systèmes autonomes représentent des solutions d'électrification plus pertinentes. Ainsi, les résultats tirés des modèles devront nous apporter, au niveau régional et sous-régional :

- Une image géospatiale de la trajectoire d'électrification (*electrification pathway*) grâce au réseau central, aux mini-réseaux et aux systèmes autonomes, et ce, à différentes échéances ;
- Les infrastructures et le niveau d'investissement nécessaires à différentes échéances afin de réaliser la trajectoire d'électrification planifiée ; et
- la capacité d'analyser cette trajectoire selon divers scénarios.

Pour ce faire, il est particulièrement important que :

- les outils de modélisation utilisés permettent une analyse spatiale détaillée de la trajectoire d'électrification optimale qui sera mise en œuvre ;
- les résultats soient présentés sur une plateforme interactive afin que les utilisateurs puissent tester différents scénarios en modifiant certaines données et paramètres du modèle :
 - ▶ cet outil interactif doit permettre un affichage spatial des résultats, ainsi qu'un résumé des principaux résultats sous forme de tableau ou de graphique ;
 - ▶ l'outil interactif doit proposer une sélection parmi différents scénarios et paramètres de données liés à la demande, aux coûts, à l'urbanisation, à l'électrification, au PIB, à la population, etc.
- les résultats et les données d'entrée doivent être faciles à interpréter par un large spectre d'utilisateurs ;
- à des fins de durabilité, les compétences nécessaires pour modifier et mettre à jour le modèle doivent être disponibles au niveau national ;
- l'ensemble des données utilisées et des modèles appliqués doivent être accessibles à quiconque voudrait s'en servir.

D'autre part, les paramètres du modèle et les scénarios modélisés doivent permettre :

- de déterminer un taux d'électrification en tant qu'objectif, puis de l'ajuster à différentes échéances ;
- d'ajuster le taux d'urbanisation à différentes échéances ;
- d'analyser l'impact de l'évolution des niveaux de demande dans différentes régions ou localités, notamment la demande :
 - ▶ des ménages
 - ▶ des activités productives
 - ▶ des équipements publics
- l'analyse de l'impact de l'évolution de divers facteurs de la demande, notamment les différents niveaux de PIB et la croissance démographique ;
- l'analyse de la méthode d'électrification optimale parmi différentes solutions : systèmes autonomes, mini-réseaux et extension du réseau national ;

- l'analyse des besoins en infrastructures de réseau ;
- l'analyse des technologies optimales pour les systèmes autonomes, les mini-réseaux et l'extension du réseau central ;
- l'analyse de la sensibilité des résultats par rapport aux coûts des technologies ;
- l'analyse des principales politiques.

Afin d'obtenir les fonctionnalités suscitées, le Tableau 3.1 résume les différents aspects jugés indispensables pour notre modèle. Nous avons utilisé les critères énumérés dans ce tableau pour mener l'étude des différentes plateformes de modélisation — présentée dans la prochaine section.

Tableau 3.1 Critères pour l'étude des plateformes de modélisation

Critères	Description
Méthode de solution	La capacité à sélectionner des solutions optimales est un critère important pour les solutions en réseau (central) et en micro-réseau (ex. certains modèles ne proposent pas de solutions optimales, ou se contentent de « suggérer » un plan, et simulent les résultats attendus à partir d'un scénario donné ou d'une étude de cas).
Capacité à représenter spatialement la demande, les ressources et les solutions	La représentation spatiale de la demande et des ressources permet d'adapter les solutions aux communautés auxquelles elles sont destinées. Cela permet de comparer différentes technologies en fonction des ressources locales disponibles et d'autres critères, comme la capacité à payer, les préférences locales, etc.
Capacité à intégrer différents types de demandes et différents profils	Cela permet de tenir compte des besoins des communautés, et d'adapter les solutions à ces besoins — ainsi, il est possible de réduire les coûts et d'améliorer les services.
Capacité à tenir compte de solutions de différentes tailles et échelles offertes par le réseau central, les mini-réseaux et les systèmes autonomes	Nous faisons ici référence à la taille des différentes options (ex. un système solaire domestique de très petite taille contre une immense centrale hydraulique) et aux technologies utilisées. La capacité de payer sera un autre élément à prendre en compte, ainsi que l'optimisation du système en matière de raccordement des clients aux micro-réseaux, aux systèmes autonomes ou aux solutions liées à l'extension du réseau. Cela permettrait également d'inclure des scénarios de croissance (économique, démographique, de la demande) très différents. Ex. à l'heure actuelle, un petit village a peut-être uniquement besoin, ou peut uniquement se permettre d'investir dans des systèmes solaires autonomes, mais dans 30 ans, il pourrait évoluer en une ville dont les habitants ont des revenus et des usages énergétiques productifs plus importants — une mine pourrait même être exploitée à proximité, etc.
Capacité à inclure des caractéristiques technologiques détaillées	Cette fonction est importante pour créer des solutions fiables et solides. Les détails technologiques nécessaires comprennent : la performance et les capacités des technologies selon différentes circonstances, le coût de chaque composante, l'efficacité des composantes, etc. ainsi que leurs possibles évolutions avec le temps. Ces détails doivent intégrer la saisonnalité des ressources hydrauliques/solaire/éoliennes et l'estimation des coûts de ces technologies dans le futur (au fil de leurs améliorations).

Critères	Description
Capacité à inclure des contraintes et limites « réelles »	Par exemple, la vitesse à laquelle le réseau pourra être étendu, l'accessibilité des zones grâce au réseau routier ou fluvial, la faible capacité à payer des usagers, les limites environnementales (parcs nationaux, durée de vie d'une mine), ou encore les choix politiques (les régions jugées prioritaires...). Tous ces éléments reposent sur des considérations spatiales et temporelles, et détermineront donc les exigences spatiales et temporelles de notre modèle. Ils ont également une incidence sur la façon dont les données seront entrées dans le modèle.
Cadres de modélisation libre d'accès	Ce critère a une incidence sur les frais de licence, sur la transparence et la reproductibilité des résultats. Il nous importe que les utilisateurs puissent élaborer et modifier le code du modèle en fonction de leurs besoins et des données à leur disposition, de façon transparente et répliquable. Le critère de libre accès est primordial dans la mesure où nous aimerions que notre modèle soit largement utilisé.
Soutien de la communauté au sens large pour de futurs développements et applications de l'outil, le cas échéant	Dans l'idéal, le modèle choisi sera utilisé par une grande communauté qui participera activement à son développement, et sera capable d'apporter un soutien pour l'utilisation de cet outil.
Le potentiel de flexibilité, de modification et d'ajout du modèle en cas de blocage	Ce critère fait référence au niveau d'accessibilité du code source, du langage dans lequel le modèle est écrit et à la facilité de compréhension du code. Un autre aspect intéressant serait que les développeurs du modèle encouragent sa personnalisation.
Facilité d'utilisation et accessibilité	Le niveau de développement de l'interface utilisateurs, la facilité d'exportation des résultats etc. seront également pris en considération.
Composantes de renforcement des capacités liées à l'outil	Le renforcement des capacités est une composante importante dans notre projet, et l'existence de programmes et/ou de supports de formation avec exemples à l'appui sera considéré comme un atout.
Capacité à gérer les informations d'un grand pays comme la RDC	En règle générale, plus le modèle est complexe et détaillé, et plus il prend de temps à s'exécuter et à proposer une solution optimisée. Le problème est que de nombreux modèles d'optimisation ne gèrent pas la complexité de façon « linéaire », ce qui dépend de leur mode de fonctionnement (utiliser un modèle pour un pays deux fois plus vaste qu'un autre ne prendra pas nécessairement deux fois plus de temps — ce processus peut par exemple être dix fois plus long...)

3.3.1 Cadre de modèle proposé pour atteindre les fonctionnalités souhaitées

Les solutions d'électrification de la RDC doivent inclure des systèmes autonomes, des mini-réseaux et l'extension du réseau principal à une haute résolution spatiale. Un **modèle géospatial d'optimisation** est donc proposé comme premier outil pour l'élaboration du plan d'électrification.

Ce modèle doit être capable de :

- tenir compte du réseau et des autres infrastructures dans chaque localité ;
- comparer le coût de l'extension du réseau (en fonction du terrain, des distances, etc.) par rapport aux autres solutions d'approvisionnement capables de satisfaire les futurs besoins en électricité des communautés ou établissements à travers la RDC ; et
- élaborer des solutions évolutives en fonction des ressources disponibles et adaptées à chaque localité alimentée.

L'étude des modèles géospatiaux présentée dans la prochaine section met l'accent sur certaines lacunes d'ordre méthodologique, qui ont leur importance pour la planification de l'électrification en RDC. Tout d'abord, les modèles géospatiaux démontrent certaines limites dans leur capacité à optimiser le mix énergétique pour une électrification basée sur le réseau central et les mini-réseaux. Cela signifie que le modèle géospatial d'optimisation pourrait surestimer, ou sous-estimer les coûts de ces technologies. Nous aurons donc besoin de le coupler à un second modèle à même d'optimiser les technologies du côté de l'offre énergétique (à l'échelle du réseau ou de mini-réseaux).

Par conséquent, l'étude à suivre comporte également une analyse des modèles d'optimisation capables d'identifier un mix technologique optimal pour une électrification basée sur le réseau principal ou les mini-réseaux. Les outils de planification centrale analysés permettent une optimisation de systèmes reposant sur le réseau principal ou sur des mini-réseaux, mais ils ne fournissent pas de modélisation spatiale détaillée avec SIG ou autre information spatiale. Ces outils sont donc capables d'optimiser les technologies du réseau électrique central, mais ne fournissent aucune information sur les coûts réalistes de l'extension du réseau.

Notre étude couvre également les modèles d'optimisation des mini-réseaux spécialisés en planification de mini-réseaux hybrides²⁴, capables d'intégrer le niveau élevé de détail temporel (indispensable au développement de mini-réseaux hybrides alimentés par des énergies renouvelables).

➤ 3.4 Tour d'horizon des modèles les plus pertinents pour notre projet

Plusieurs plateformes pourraient être utilisées pour la planification géospatiale de l'électrification et la planification électrique reposant sur le réseau principal ou les mini-réseaux. Dans cette section, nous proposons un tour d'horizon des modèles géospatiaux OnSSET, OEMOF avec modules géospatiaux, GEOSIM, REM et Network Planner ; des outils de planification centralisée OSeMOSYS, TIMES, MESSAGE, CALLIOPE, TEMOA, OEMOF ; et des outils HOMER et MicrOgridS, spécifiquement adaptés au développement de mini-réseaux. Les modèles géospatiaux ne sont pas particulièrement répandus, mais de nombreux modèles ont été développés pour optimiser la planification centralisée et les mini-réseaux. Ces derniers ont notamment connu d'importantes avancées. Les plateformes de modèles analysées dans cette section correspondent aux outils jugés les plus adaptés à notre projet, compte tenu de leurs fonctionnalités et de leur adéquation aux critères énumérés précédemment.

3.4.1 Logiciel commercial ou libre ?

Le choix entre un logiciel commercial ou en open-source a été une décision importante. Cette section présente les avantages et les inconvénients des deux solutions.

De nombreux modèles affichent un manque de transparence, des limites de répliquabilité de leurs résultats, ou utilisent un logiciel ou des données propriétaires. Cela peut freiner le rapprochement entre science et application politique, et ainsi limiter l'utilité future des systèmes élaborés. En fin de compte, ces obstacles engendrent une diminution de l'impact et de la valeur potentielle des travaux de modélisation et des résultats de la recherche (Pfenninger, 2017 ; DeCarolis, 2012). De nombreux modèles sont également des « boîtes noires », dont les rouages internes et hypothèses de départ sont inaccessibles et ne peuvent donc pas être analysés (Pfenninger, 2017). Des logiciels propriétaires sont souvent utilisés, mais ceux-ci

²⁴ Mini-réseaux qui utilisent différentes technologies afin d'assurer un approvisionnement électrique plus fiable

requièrent de coûteuses licences, tandis que les données utilisées sont parfois elles-mêmes achetées ou confidentielles (HOMER, 2020 ; SolarGIS, 2020 ; GEOSIM, 2020). Les hypothèses émises et les différents scénarios modélisés comportent toujours un certain niveau de subjectivité insufflé par les acteurs du processus. Il importe donc d'assurer une totale transparence des intrants et des données, ainsi que leur répliquabilité, faute de quoi les résultats de nos modélisations et les suggestions politiques pourraient être réfutées par les acteurs pour cause de biais, de parti pris ou de manipulation. Ces limites réduisent la crédibilité et la confiance accordée aux résultats, et peuvent empêcher les acteurs non-techniques ou non-experts de prendre des décisions politiques ou liées aux plans de déploiement, ou encore d'emporter l'adhésion du public.

Tous ces arguments font pencher la balance en faveur des modèles en open-source.

Toutefois, l'un des principaux inconvénients des logiciels en open-source est qu'ils ne sont généralement pas facile d'accès — leur utilisation exige souvent une expérience de codage (parfois dans différents langages de programmation) et une compréhension très poussée de la modélisation des systèmes énergétiques afin d'obtenir des résultats précis et réalistes. Les logiciels en open-source n'ont généralement pas d'interface facile d'utilisation permettant aux utilisateurs de créer, de personnaliser et d'exécuter leurs modèles. De plus, les développements sont le plus souvent orientés vers l'extension des fonctionnalités, plutôt que vers des résultats plus intuitifs et interactifs. En tant que chercheurs, les utilisateurs adaptent le plus souvent la visualisation des résultats aux besoins spécifiques de leurs projets.

Les chercheurs développent ainsi des logiciels en open-source dans le but de répondre à des questions innovantes, à la pointe de leur domaine de recherche. Si les publics familiers du codage et de l'analyse des systèmes énergétiques sont capables de maîtriser ces nouveaux modèles relativement facilement, ce ne sera pas forcément le cas des néophytes dans ces domaines d'expertise.

L'élaboration d'une documentation et de supports de formation/tutoriels de qualité entraîne souvent des retards de plusieurs années dans le développement des logiciels. Cela peut donc représenter un obstacle à un réel renforcement des capacités, particulièrement si l'on souhaite atteindre le niveau de « créateurs » de modèles et de résultats, c'est à dire le stade où des personnes extérieures et non-expertes dans ce domaine pourront concevoir des modèles de A à Z grâce à ce logiciel, les développer ou les améliorer tout en créant et personnalisant de nouveaux modules ou fonctions.

A l'inverse, les logiciels commerciaux s'intéressent souvent à ces aspects — la facilité d'utilisation pour les non-experts, des interfaces graphiques intuitives pour des utilisateurs sans expérience préalable en programmation informatique... Ils proposent généralement de nombreuses formations pour utiliser leur logiciel, déclinées pour différents niveaux de compétences et d'expérience (ex. cours pour débutant en version courte, cours niveau intermédiaire ou « spécialisé par domaine », cours long format en niveau expert...). Les développeurs de ces outils sont parfois recrutés comme consultants pour mener certaines tâches ou études adaptées aux besoins du client, ou peuvent être rémunérés pour apporter un support technique aux utilisateurs abonnés à ce service (ou détenteurs de la licence, si ce service est inclus dans les frais annuels).

Après une confrontation entre les difficultés de navigation des logiciels en open-source et les avantages qu'ils confèrent, nous proposons d'utiliser cette option plutôt que des outils commerciaux. Dans la comparaison des modèles ci-dessous, nous avons mis l'accent sur la facilité d'utilisation, le soutien plausible apporté par la communauté d'utilisateurs, et les supports de formation/tutoriels disponibles pour favoriser la maîtrise de l'outil.

3.4.2 Descriptions et comparaisons des modèles spatiaux d'optimisation énergétique décentralisés adaptés à notre projet

Notre comparaison des outils géospatiaux pour la planification de l'électrification concerne les outils en open-source OnSSET, RLI-GIS et Network Planner. Chacun de ces outils permet de mener une analyse basée sur des SIG en haute résolution spatiale et inclut un certain niveau de concurrence entre systèmes autonomes, micro-réseaux et réseau centralisé en fonction de divers aspects communautaires (niveau de demande envisagé, densités de population, éloignement du réseau central...). On observe toutefois de fortes disparités en matière de représentation des technologies et des ressources, d'adaptation des calculs endogènes de la croissance et de la demande, de facilité d'utilisation et de supports de formation à l'usage de l'outil. Outre ces logiciels en open-source, nous avons ajouté l'analyse de REM et GEOSIM, deux logiciels commerciaux extrêmement bien conçus et proposant des fonctions intéressantes pour notre projet.

3.4.2.1 OnSSET (Boîte à outil Open Source Spatial Electrification)²⁵

OnSSET est développé et maintenu par KTH-dESA. Un modèle initial d'OnSSET a été développé pour chaque pays d'Afrique subsaharienne à divers niveaux de validation et d'analyse. Le produit de visualisation le plus récent et disponible en ligne est la Global Electrification Platform (GEP) : <http://gep-explorer.surge.sh/>. OnSSET a également été utilisé pour développer les scénarios du rapport Perceptives énergétiques pour l'Afrique de l'AIE.

Général	
Méthode de solution	Les options d'optimisation de l'électrification à haute résolution spatiale sont l'extension du réseau (mais pas l'optimisation du mix technologique du réseau), les mini-réseaux (mais pas l'optimisation du mix technologique des mini-réseaux) et les systèmes autonomes.
Logiciel sous licence ou en open-source	Open-source : développé par des chercheurs de l'Institut royal de technologie (KTH) suédois, disponible sur http://www.onsset.org/ . Les licences en open-source permettent de modifier le code, et peuvent être utilisées à des fins commerciales, universitaires, publiques et non-lucratives, à condition que la source originale soit mentionnée.
Facilité d'utilisation et accessibilité	A l'heure actuelle, il n'existe aucune interface graphique sur OnSSET ; pour utiliser le logiciel, il est nécessaire d'avoir des compétences en codage Python.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Le code est flexible, et en tant que modèle en open-source, il peut être adapté selon les besoins. Néanmoins, une expérience de codage Python et des connaissances en modélisation des systèmes énergétiques sont requises.

²⁵ <http://www.onsset.org/>

Représentation de la demande	
Capacité à représenter spatialement la demande	OnSSET peut être développé pour un pays ou une région entière. Au sein de ce pays ou régions, il est possible de modifier la résolution spatiale du logiciel (10 km ² , 1 km ² , ou par regroupement tous les 100 m, en fonction de la résolution des données d'entrée disponibles).
Capacité à intégrer différents types de demande avec différents profils	A ce jour, seule la demande des ménages est intégrée ; il est toutefois possible d'ajouter la demande simplifiée des acteurs agricoles, industriels, commerciaux etc. Les profils de demande sont présentés de façon simplifiée, sans détail journalier ou saisonnier (ces évolutions sont prévues, mais la date de sortie de cette nouvelle fonction est inconnue).
Capacité à simuler les taux d'urbanisation et d'électrification	Le modèle détermine la proportion rurale/urbaine et le taux d'électrification initial, puis projette les populations futures en fonction de ces pourcentages. Toutefois, l'outil se base sur la répartition initiale des établissements humains, tout comme sur leur dénomination rurale ou urbaine initiale. Les taux d'électrification ciblés peuvent être fixés de façon progressive, ou pour des années spécifiques. Il est également possible de définir des contraintes liées au déploiement du réseau. Actuellement, il n'est pas possible de simuler une hausse ou une baisse du taux d'urbanisation ; la population évolue au même taux dans toutes les zones. Il serait toutefois possible d'appliquer des taux de croissance différenciés avec d'autres recherches, modélisations et codages.
Représentation des ressources	
Capacité à représenter spatialement les ressources	La résolution spatiale flexible d'OnSSET permet également de représenter les ressources en fonction des régions et groupements de population auxquels elles sont rattachées. Cela s'avère particulièrement utile pour la représentation des options de micro-centrales hydrauliques, et autres options d'énergies renouvelables.
Capacité à représenter les profils d'énergies renouvelables intermittentes dans l'optimisation	A ce jour, il n'est pas possible de définir une haute résolution temporelle sur OnSSET, car il utilise une approche d'optimisation simplifiée pour chaque option d'approvisionnement (c'est à dire sans analyse horaire de l'offre et la demande sur une année).

Espace de solution	
Capacité à inclure des caractéristiques technologiques détaillées	De nombreuses technologies sont disponibles, ou peuvent être ajoutées, mais elles ne sont proposées qu'à niveau de précision modéré (il n'est pas encore possible d'obtenir des profils de demande en très haute résolution, les niveaux d'efficacité de différents modes de fonctionnement, les variations de température, etc., mais on peut tout de même définir différents coûts pour différents types de mini-réseaux ou différentes disponibilités totales pour chaque ressource).
Capacité à prendre en compte des solutions à différentes échelles ; capacité à prendre en compte les options d'électrification avec réseau principal, mini-réseaux et solutions autonomes dans le modèle	L'extension du réseau est considérée comme une option d'électrification, mais cette solution est relativement simple, et les technologies qui alimentent le réseau, elles, ne sont pas optimisées. De même, les mini-réseaux font partie des solutions d'électrification, mais elles ne sont pas optimisées.
Capacité à inclure des contraintes et limites « réelles »	Possible dans une certaine limite ; par exemple, on peut définir une limite annuelle de nouveaux branchements, mais pas les préférences technologiques des communautés (ex. la communauté veut une technologie décentralisée, mais pas d'un réseau qui pourrait être défaillant).
Capacité à fournir des solutions à différents intervalles	Résolution temporelle basse et simplifiée des options individuelles d'approvisionnement : avec OnSSET, il est possible de définir « un intervalle intermédiaire progressif », d'abord optimisé pour 2025 pour une partie déterminée de la cible d'électrification, puis, à partir de là, de définir une autre cible à atteindre pour 2030 afin d'atteindre l'objectif de taux d'électrification final.
Commerce régional	Pas d'intégration au pool énergétique régional.
Taille du modèle : complexité de traitement informatique et capacité à modéliser l'ensemble de la RDC	OnSSET peut être utilisé pour l'ensemble du territoire national avec une haute résolution spatiale. Le logiciel a été utilisé pour tous les pays d'Afrique subsaharienne, mais selon différents niveaux d'analyse des données d'entrée et de validation des résultats.
Résultats	
Besoins en termes d'infrastructures de réseau et niveau d'investissements	OnSSET développera une simple feuille de route pour les infrastructures du réseau. A l'heure actuelle, l'outil ne tient pas compte du terrain ou d'autres contraintes entre les différents points devant être électrifiés (ex. rivières, parcs nationaux).
Analyse ou résultats sous-régionaux	Pour l'instant, les résultats sont résumés à l'échelle nationale. Toutefois, une analyse sous-régionale est possible si l'utilisateur définit les sous-régions désirées et qu'il mène une analyse personnalisée de ces sous-régions.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	OnSSET est en développement continu, en collaboration avec de nombreux partenaires internationaux ; de plus, des conférences de deux ou trois jours, type « réunion au sommet » ont lieu deux fois par an et réunissent divers partenaires gouvernementaux, universitaires et issus des agences de développement.
Soutien pour le renforcement de capacités	Au grand minimum, une formation sur OSeMOSYS ou la gestion de base de données SIG (les deux sessions sont tenues simultanément) est organisée tous les ans à Trieste en Italie* dans le cadre du Joint Summer School on Modelling Tools for Sustainable Development. D'autres formations sont généralement organisées en décembre ou janvier lors de la Energy Modelling Platform for Africa (EMP-A), à chaque fois dans une université différente (en 2019, la plateforme s'est réunie au Cap ; en 2020, c'était à l'île Maurice).

*Important : reporté jusqu'en 2021

3.4.2.2 Outil de planification géospatiale d'électrification RLI (Reiner Lemoine Institut & Open Energy Modelling Framework)²⁶

RLI utilise plusieurs modèles et codes personnalisés pour mener ses analyses géospatiales d'électrification. L'institut a également créé et mis à la disposition du public plusieurs plateformes de visualisation personnalisées en ligne. On retrouve des exemples d'application de cet outil dans le *Nigerian Energy Support Program* (Phase 1) (<http://rrep-nigeria.integration.org/>) et phase 2 (fin prévue en septembre 2020, avec la publication de nombreuses mises à jour) ou encore dans le cadre d'une étude menées en Tanzanie (<https://tzmapping.github.io/>).

Général	
Méthode de solution	Optimisation des systèmes autonomes, des mini-réseaux et de l'extension du réseau en plusieurs phases progressives.
Logiciel sous licence ou en libre accès	RLI propose plusieurs modèles pouvant être utilisés de façon indépendante, ou en tant que modules dont on peut combiner les fonctionnalités. Plusieurs modules peuvent être combinés aux outils géospatiaux d'électrification. Les modèles de base sont disponibles en open-source. Le code du modèle personnalisé de RLI est disponible à la demande, mais on ne le trouve pas facilement sur internet.
Facilité d'utilisation et accessibilité	A l'heure actuelle, l'outil n'est pas facile d'utilisation pour les non-initiés, car il ne propose pas d'interface graphique pour entrer les données et les paramètres du modèle. Néanmoins, un projet de développement de ces fonctionnalités est en cours. Tous les modèles publiés en open-source ne sont pas faciles d'utilisation ; ce type d'outils est encore en cours de développement et s'applique généralement à des sujets spécifiques traités par RLI. Par conséquent, une bonne expérience des langages de programmations utilisés est indispensable. Tous les modèles sont développés en open-source dans le but de rendre leur code et documentation disponibles au plus grand nombre — la contrepartie est que l'utilisation de ces outils nécessite davantage de ressources et de temps.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Les modèles sont conçus pour être flexibles. Ils sont principalement codés en langages Python et R, ce qui laisse l'opportunité aux utilisateurs de créer des applications et d'en adapter les composantes.
Représentation de la demande	
Capacité à représenter spatialement la demande	Le modèle SIG peut être développé pour une région ou un pays — le modélisateur définit lui-même les limites du modèle. La demande est représentée spatialement pour des groupements de consommateurs, en fonction du nombre d'habitants.
Capacité à intégrer différents types de demandes et différents profils	Il est possible d'intégrer des profils de demande à une haute résolution avec variations au jour le jour. La demande des ménages, tout comme la demande du secteur agricole, commercial, des usages productifs, etc. peut être modélisée.
Capacité à simuler les taux d'urbanisation et d'électrification	Il est nécessaire de formuler des hypothèses de base afin de projeter les populations dans des zones rurales et urbaines, tout en délimitant ces zones.

²⁶ <https://reiner-lemoine-institut.de/en/fields-of-competence/rli-tools/>

Représentation des ressources	
Capacité à représenter spatialement les ressources	Les ressources sont représentées spatialement ; les ressources solaires et diesel sont intégrées par défaut ; les ressources éoliennes, hydrauliques et la biomasse nécessitent l'ajout de données supplémentaires.
Capacité à représenter les profils d'énergies renouvelables intermittentes dans l'optimisation	Des profils d'approvisionnement d'énergies renouvelables intermittentes sont inclus par défaut dans l'optimisation (notamment les profils de la disponibilité des ressources par heure).
Espace de solution	
Capacité à inclure des caractéristiques technologiques détaillées	De nombreux détails sont nécessaires pour la spécification des paramètres technologiques liés au coût des composantes, à l'efficacité et la capacité, afin d'obtenir une représentation précise des systèmes. Les coûts des lignes de transmissions sont ajustés en fonction de la tension.
Capacité à prendre en compte des solutions à différentes échelles ; capacité à prendre en compte les options d'électrification avec le réseau principal, les mini-réseaux et les solutions autonomes dans le modèle	Les options d'électrification incluent le réseau principal, les mini-réseaux et les systèmes autonomes. Le choix entre ces différentes options s'opère en fonction de seuils basés sur l'éloignement du réseau et la taille des groupements de population. Le modèle ne choisit pas le niveau d'augmentation de la capacité du réseau central.
Capacité à inclure des contraintes et limites « réelles »	Le modèle permet de définir des zones d'exclusion ou des « pénalités » pour certains types de terrain afin de se rapprocher des contraintes réelles et des différences de coût pour l'extension du réseau.
Capacité à fournir des solutions à différents intervalles	Le modèle permet d'appliquer une approche graduelle de l'électrification.
Commerce régional	Pas d'intégration au pool énergétique régional.
Taille du modèle : capacité à modéliser spatialement l'ensemble du territoire de la RDC	Ce modèle a déjà été appliqué au cas du Nigéria (Bertheau, 2016) ; il devrait donc pouvoir s'appliquer à la RDC.
Résultats	
Besoins en infrastructures de réseau et niveau d'investissements	Le modèle peut déterminer les besoins et le tracé des infrastructures du réseau.
Analyse ou résultats sous-régionaux	Ces résultats ne sont pas inclus par défaut, mais ils sont toutefois possibles.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	Un événement réunissant les utilisateurs (<i>user meeting</i>) de la boîte à outils RLI est organisé chaque année. OEMOF est à l'avant-garde de la promotion et de l'application de meilleures pratiques normalisées en matière d'open source. Ils assurent une intégration facile vers d'autres outils, le contrôle et la validation de la version du code, ainsi que la répliquabilité des résultats grâce à des données libres de droit à chaque fois que cela est possible.
Soutien pour le renforcement de capacités	L'accès à ces outils, ainsi que des supports de formations et autres instructions sont disponibles à la demande.

3.4.2.3 Network Planner²⁷

Network Planner est développé et maintenu par une équipe du Modi Research Group (Sustainable Engineering Lab du Earth Institute de l'Université de Columbia) de New York (Etats-Unis).

La principale interface internet est actuellement indisponible. Néanmoins, le code en open-source est disponible sur : <https://github.com/SEL-Columbia/networkplanner>. Il intègre uniquement les systèmes autonomes alimentés par énergie solaire.

Général	
Méthode de solution	La méthodologie repose sur un « algorithme de Dijkstra » écrit en Python (un algorithme courant utilisé pour trouver le chemin « le plus court » ou le « plus économique » entre deux points devant être reliés), mais ne tient pas compte des détails topographiques entre ces points. La localisation exacte et l'état d'électrification de chaque communauté à raccorder doit être définie au préalable.
Logiciel sous licence ou open-source	Open-source : outil programmé en langage Python.
Facilité d'utilisation et accessibilité	Il existe une interface utilisateur en ligne, dont le code peut être téléchargé sur GitHub afin de créer une version hors-ligne de l'outil. Le modélisateur doit renseigner la localisation des communautés et leur état d'électrification. Cet outil n'est donc pas facile d'utilisation pour le développement de plans d'électrification, notamment lorsque de nombreuses communautés sont éparpillées dans la région, ou que leur statut d'électrification est inconnu.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Le code est censé être flexible. Etant donné que le modèle est en open-source et qu'il peut être ajusté ou modifié selon les besoins, il est nécessaire d'avoir une expérience de codage Python, et probablement des connaissances en modélisation de systèmes énergétiques. Nous ignorons le degré de flexibilité du code, mais en théorie, il est censé être complètement adaptable.
Représentation de la demande	
Capacité à représenter spatialement la demande	La demande peut être représentée spatialement en fonction des répartitions de populations, mais les taux de croissance et les types de demande doivent être spécifiés par l'utilisateur.
Capacité à intégrer différents types de demandes et différents profils	Il est possible d'intégrer plusieurs types de demande (ex. demande des ménages, des usages productifs, du secteur commercial et publics (type hôpitaux)). Le modèle permet également de définir des seuils afin de définir des caractéristiques de la demande d'établissements de différentes tailles (ex. les plus grands établissements humains auront probablement une plus forte demande car de plus hauts revenus et plus d'activités économiques, ex. plus grandes entreprises ou équipements publics). Nous ignorons comment cela fonctionne précisément, et il sera probablement nécessaire que l'utilisateur modèle et calibre ces seuils en fonction du pays concerné.
Capacité à simuler les taux d'urbanisation et d'électrification	L'ensemble des communautés/villages/populations doivent être renseigné dans un jeu de données séparé, et leur statut d'électrification doit être spécifié en amont. L'utilisateur doit également préciser les taux d'urbanisation et le schéma de croissance spatiale. Pour ce faire, il doit inclure un « seuil urbain/rural », qui définit la taille minimum pour qu'une communauté soit considérée comme urbaine (ex. si une communauté se développe au-delà de la taille déterminée dans la planification, le taux de croissance urbaine lui sera appliqué pendant la période de dépassement des prévisions).

²⁷ <http://networkplanner.modilabs.org/> (Au 18/03/2020, le site principal était inaccessible).

Représentation des ressources	
Capacité à représenter spatialement les ressources	Avec Network Planner, il est possible de représenter spatialement les ressources pour les technologies autonomes, ainsi que des heures d'ensoleillement maximal. Pour l'heure, l'outil n'inclut pas directement les ressources hydrauliques, éoliennes ou tirées de la biomasse — elles doivent être ajoutées à la fonctionnalité par le modélisateur (en spécifiant les caractéristiques détaillées du coût et de la performance de ces options).
Capacité à représenter les profils d'énergies renouvelables intermittentes dans l'optimisation	Non inclus ; seule la moyenne des « heures d'ensoleillement maximal » est calculée pour chaque région.
Espace de solution	
Capacité à inclure des caractéristiques technologiques détaillées	Pour le moment, l'outil ne permet pas d'intégrer ces caractéristiques dans le détail. Il ne s'agit que d'une version simplifiée reposant sur les coûts à l'aide de niveaux basiques d'efficacité et de conversion.
Capacité de prendre en compte des solutions à différentes échelles ; capacité de prendre en compte les options d'électrification via le réseau principal, les mini-réseaux et les solutions autonomes dans le modèle	Ne permet pas d'optimiser l'augmentation des sources de production pour le réseau centralisé, et présuppose un prix de production fixe déterminé par l'utilisateur. Ne permet pas non plus d'optimisation hybride des mini-réseaux et n'inclut comme options technologiques que le diesel OU les systèmes solaires à usage domestique.
Capacité à inclure des contraintes et limites « réelles »	Pour le moment, l'outil ne tient pas compte de facteurs topographiques/de terrain et n'applique pas de « pénalités » lorsqu'il relie les communautés au réseau central ; il utilise des lignes droites pour connecter les groupements de populations.
Capacité à fournir des solutions à différents intervalles	Impossible ; la modélisation ne prend en compte qu'une échéance (ex. 2020 OR 2030, mais pas l'une après l'autre).
Commerce régional	Pas d'intégration au pool énergétique régional.
Taille du modèle : capacité à modéliser spatialement l'ensemble du territoire de la RDC	Network Planner a été utilisée pour le développement de la trajectoire d'électrification nationale du Ghana (Kemausour, 2014). Il semble donc possible d'utiliser cet outil pour développer le plan d'électrification de la RDC.
Résultats	
Besoins en infrastructures de réseau et niveau d'investissements	Inclus, mais les détails sur l'augmentation de la production électrique du réseau centralisé ne sont pas inclus et doivent être déterminés en externe. Cependant, l'outil intègre des détails sur les différents niveaux de tension pour les investissements liés au réseau.
Analyse ou résultats sous-régionaux	L'analyse peut être appliquée à l'échelle communautaire ou nationale, selon les données.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	Il n'existe pas une grande communauté d'utilisateurs, ni d'initiative mise en place pour développer cette communauté. Le code n'a pas été mis à jour depuis cinq ans.
Soutien pour le renforcement de capacités	Nous n'avons pas su déterminer s'il existait des formations sur l'outil, et la documentation sur le logiciel est plutôt limitée. En revanche, le logiciel est créé par des universitaires, et il est donc probable que des formations puissent être organisées à la demande.

3.4.2.4 GEOSIM (Geospatial Simulation)²⁸

GEOSIM est un logiciel de planification géospatiale de l'électrification développée par IED (Innovation Energie Développement) en France. Il peut être utilisé à l'échelle d'un territoire ou d'un pays afin d'identifier des solutions à moindre coût pour l'électrification d'une zone donnée. GEOSIM est composé de quatre modules interdépendants : *Spatial Analyst*, *Demand Analyst*, *Network Options* et *Distributed Energy*. Ce logiciel est utilisé par de nombreuses organisations, collectivités publiques et institutions en Asie et en Afrique.

GEOSIM affirme offrir « une interface utilisateur conviviale simplifiant la gestion et l'édition des résultats de la planification de l'électrification rurale », qui ne devrait pas nécessiter d'expérience préalable en codage ou en programmation. Le logiciel peut être utilisé pour l'identification de pôles de développement, l'extension du réseau et les projets décentralisés à moindre coût reposant sur des sources d'énergies renouvelables. Actuellement, GEOSIM ne permet pas de simuler de mini-réseaux combinant plusieurs sources énergétiques (hybrides) ; nous ignorons s'il s'agit d'une amélioration prioritaire pour ses développeurs.

GEOSIM est un logiciel propriétaire ; le premier prix pour la licence d'un module s'élève à US \$10 600, auxquels il faut ajouter entre US \$850 et US \$1 925 par an de support et services. Différents niveaux et durées de formation (de 3 à 10 jours) sont proposés pour apprendre à utiliser le logiciel. Ces cours sont sans doute disponibles en français, et actuellement proposés en France, au Cameroun, au Burkina Faso et au Cambodge ; ils peuvent également être organisés dans les bureaux des clients. En 2017, les frais de formation étaient de 600 euros par jour et par personne (https://www.ied-sa.fr/images/Formations/en/Training_-_Catalogue_booklet.pdf).

3.4.2.5 REM (Reference Electrification Model)²⁹

L'outil Reference Electrification Model (REM) supporte les projets de planification d'électrification (1) à grande ou (2) petite échelle (local). Pour concevoir les modèles REM, les données suivantes sont nécessaires : localisation des bâtiments, irradiance, topographie, portée et fiabilité du réseau, demande attendue des consommateurs, coûts des combustibles et des infrastructures. Si la localisation du bâtiment est indisponible, REM peut la déduire grâce à l'imagerie satellite. Après avoir exécuté plusieurs algorithmes de groupement et d'optimisation spécifiquement conçus pour la planification de l'électrification, REM sélectionne le mode d'électrification le plus économique pour chaque consommateur individuel (entre réseau central, micro-réseau et système autonome). L'outil sélectionne les technologies et les tailles des composantes pour la production et la distribution électrique ; il fournit également des estimations des coûts et performances des différents systèmes.

A l'heure actuelle, REM ne soutient pas les meilleures pratiques favorisant les données libres de droit. Contrairement aux modèles en open-source, le logiciel REM n'est pas disponible gratuitement, et cela ne semble pas près de changer. L'utilisation du logiciel doit être directement commandée par l'équipe REM du MIT. Nous ne savons pas avec quels systèmes d'exploitation REM est compatible (probablement un seul des principaux opérateurs — Windows, Mac OU Linux).

²⁸ <https://www.ied-sa.fr/en/tools-and-training/our-tools/geosim.html>

²⁹ <http://universalaccess.mit.edu/#/rem>

3.4.3 Résumé des comparaisons entre les modèles, des lacunes et solutions présentées par les outils géospatiaux appliqués à la planification énergétique décentralisée

L'examen des différents modèles géospatiaux d'optimisation s'est avéré prometteur et a permis de mettre en évidence les multiples fonctionnalités offertes par des outils en open-source de référence. Les outils adoptent tous un cadre similaire pour optimiser le choix entre l'extension du réseau et d'autres options autonomes. Nous vous proposons ci-dessous un résumé des principaux critères pris en considération, puis la présentation de l'outil sur lequel nous avons porté notre choix final pour les prochaines phases du projet.

OnSSET

Principales raisons de sélection : OnSSET est un outil en open-source et personnalisable permettant une modélisation en haute résolution spatiale à l'échelle nationale. L'outil dispose de plateformes de visualisation en ligne. Il est soutenu et utilisé par plusieurs organisations internationales. OnSSET propose des formations approfondies, et les développeurs encouragent la communauté d'utilisateurs et autres acteurs internationaux à contribuer au développement de ses fonctionnalités.

Défis persistants : il n'existe pas d'interface utilisateur graphique sur laquelle entrer les données, exécuter le modèle et visualiser les résultats. Il est donc nécessaire d'avoir des compétences en langage Python pour installer le logiciel, entrer les données et personnaliser le modèle. A l'heure actuelle, OnSSET ne propose pas non plus d'optimisation hybride des mini-réseaux, et ne permet pas de haute résolution temporelle. Avec OnSSET, l'extension du réseau est relativement simplifiée ; il est donc nécessaire d'utiliser un autre modèle (type OSeMOSYS) pour spécifier les ressources et capacités devant être ajoutées au réseau central afin de déterminer le prix de l'électricité du réseau. L'outil ne propose pas non plus d'intégration directe au pool énergétique régional, mais il est possible de le simuler grâce aux prix de l'électricité.

Outil géospatial RLI pour la planification d'électrification

Arguments en faveur de son inclusion : il s'agit d'un outil en open-source, il peut être combiné avec plusieurs modules du modèle RLI permettant d'optimiser le réseau et les mini-réseaux. Il dispose de plateformes interactives de visualisation en ligne. Le développement des outils est toujours en cours, et RLI se montre volontaire pour aider les utilisateurs de ses outils et collaborer à leurs projets.

Arguments en faveur de son exclusion : le module offre des fonctions intéressantes, mais il est trop difficile d'utilisation pour des novices. Il n'existe pas d'interface utilisateur graphique pour l'installation et l'entrée des données. Il n'existe aucune formation à cet outil, et le modèle n'est pas très répandu.

Network Planner

Arguments en faveur de son exclusion : Network Planner ne permet pas d'optimiser les mini-réseaux hybrides ou la planification de la production du réseau centralisé. L'outil impose d'entrer les données sur tous les groupements de population et leur statut d'électrification ; cela implique un travail préalable extrêmement important qui paraît inadapté à la modélisation en haute résolution d'un pays aussi vaste. Network Planner ne tient pas non plus compte des aspects « terrains » et de l'occupation des sols pour l'extension du réseau. La documentation et le support pour le logiciel sont très limités, et nous n'avons aucune information sur le niveau de soutien visant au développement du logiciel. Aucune formation ne semble être proposée.

Présente toutefois un intérêt car : l'outil offre une interface utilisateur graphique et une visionneuse (viewer) en open-source.

GEOSIM

Arguments en faveur de son exclusion : GEOSIM n'est pas disponible en open-source et son fonctionnement manque de transparence. Il n'est pas possible de personnaliser l'outil, et les frais de licence sont très élevés. L'inclusion de mini-réseaux hybrides solaires est limitée (bien que d'autres options de mini-réseaux soient disponibles). De nouveaux jeux de données/modèles doivent être ajoutés pour déterminer les groupements de population et leur statut d'électrification, tandis que la simulation/optimisation sur un territoire aussi vaste que la RDC pourrait s'avérer complexe.

Arguments en faveur d'une étude plus approfondie : lorsque l'on combine tous les modules disponibles, GEOSIM offre des fonctionnalités très poussées ; de plus, l'outil ne requière aucune expérience préalable en programmation/codage. Il dispose également d'une interface utilisateur graphique. Plusieurs formations sont proposées. Enfin, dans le cas d'un abonnement aux services de support, les utilisateurs ont accès à un support à la demande.

REM

Arguments en faveur de son exclusion : REM n'est pas disponible en open-source et ne répond pas aux meilleures pratiques de l'open-source. Aucune formation n'est proposée, et l'outil ne semble pas disponible en dehors du cadre du MIT. Le traitement informatique est très lourd, et l'outil risque de ne pas supporter la quantité de données associée à l'immense superficie de la RDC. L'optimisation des mini-réseaux hybrides n'est pas intégrée, et l'outil ne propose pas de modélisation pour l'augmentation de la production énergétique centralisée ou d'un réseau régional (uniquement la modélisation du réseau).

S'avère tout de même utile car : REM utilise un traitement des images satellite pour estimer la localisation des bâtiments de façon endogène, et offre une conception très détaillée des réseaux.

➤ 3.5 Descriptions et comparaisons des modèles d'optimisation énergétique pour une planification centralisée

3.5.1 Tour d'horizon des modèles centralisés

Structure de base

Les modèles de systèmes énergétiques centralisés optimisent soit uniquement l'approvisionnement électrique (ex. la taille et le type de centrales qui alimentent le réseau), soit l'offre et la demande en simultané. Les modèles cherchant à optimiser ces deux aspects commencent par les besoins en services énergétiques utiles aux ménages, aux industries et autres utilisateurs (éclairage, chauffage, etc.). La demande en électricité et autres combustibles est ensuite optimisée en fonction des technologies disponibles côté demande pour alimenter les services énergétiques — chaque technologie étant associée à un niveau d'efficacité et à un coût affectant l'optimisation. Ces modèles permettent aussi d'optimiser le mix technologique côté offre, mais ils offrent généralement un niveau de détails temporels inférieur aux modèles uniquement dédiés à l'optimisation de l'approvisionnement. Les détails temporels sont importants dans la mesure où l'optimisation de l'approvisionnement doit permettre d'obtenir un système capable de fournir de l'électricité au moment où celle-ci est nécessaire. Prenons un exemple. Même si l'énergie éolienne est la technologie la plus économique, il sera peut-être nécessaire de combiner l'éolien à d'autres technologies afin de créer

un système capable de répondre à la demande lorsque les seules ressources éoliennes ne suffiront pas à produire de l'électricité. L'avantage des modèles optimisant à la fois l'offre et la demande et qui intègrent tous les types de combustibles est qu'ils permettent d'optimiser l'intégralité du système ; la demande et la durée d'utilisation de l'électricité peuvent également évoluer en fonction de l'optimisation de la demande.

La structure typique de ce genre de modèles d'optimisation est illustrée en Figure 3.2. Tout commence du côté de l'approvisionnement (à gauche) : les ressources énergétiques sont transformées en électricité et autres combustibles par les technologies d'approvisionnement. L'électricité et les autres combustibles alimentent la demande, ou la demande en services énergétiques. Dans les modèles optimisant uniquement l'approvisionnement, la demande en électricité peut être représentée pour différents secteurs ou services énergétiques, mais les technologies relatives à la demande ne sont pas intégrées au modèle. De fait, la demande en électricité (ou autres combustibles) est intégrée en matière de demande énergétique finale, c'est-à-dire telle que perçue par le réseau central ou autre réseau d'approvisionnement.

Il est possible d'appliquer des contraintes à toutes les parties du système ; par exemple, limiter la quantité d'hydraulique sur le total énergétique ; reproduire la taille de certaines centrales pouvant être construites ; spécifier la proportion d'une technologie donnée dans le mix technologique, ou encore une limite minimale ou maximale pour certaines technologies.

Le stockage énergétique et la résolution temporelle de ces modèles sont d'autres caractéristiques importantes. Les données sur le stockage sont nécessaires pour reproduire le comportement des barrages dans le système ainsi que de l'accumulation par pompage et des systèmes de batterie. Une haute-résolution temporelle permet la modélisation des ressources disponibles et du profil de la demande. L'optimisation du système peut ainsi intégrer une marge de réserve afin d'éviter les pénuries d'approvisionnement et d'assurer l'évaluation de l'adéquation du système tout au long de l'année. Il est par exemple possible que la demande en services énergétiques soit plus importante en hiver qu'en été, ou encore en soirée. Ces éléments doivent être pris en compte lors de la conception du système. De même, il est possible que l'ensoleillement soit plus faible en hiver qu'en été ; si la temporalité n'est pas prise en compte, il se pourrait donc que la capacité du système soit insuffisante pour alimenter la demande à cette période de l'année.

OSeMOSYS, TIMES, MESSAGE, TEMOA et Calliope sont des modèles qui permettent d'optimiser à la fois l'offre et la demande énergétique. A l'inverse, RESOLVE, SWITCH, PYPSA et PLEXOS permettent uniquement d'optimiser l'approvisionnement électrique.

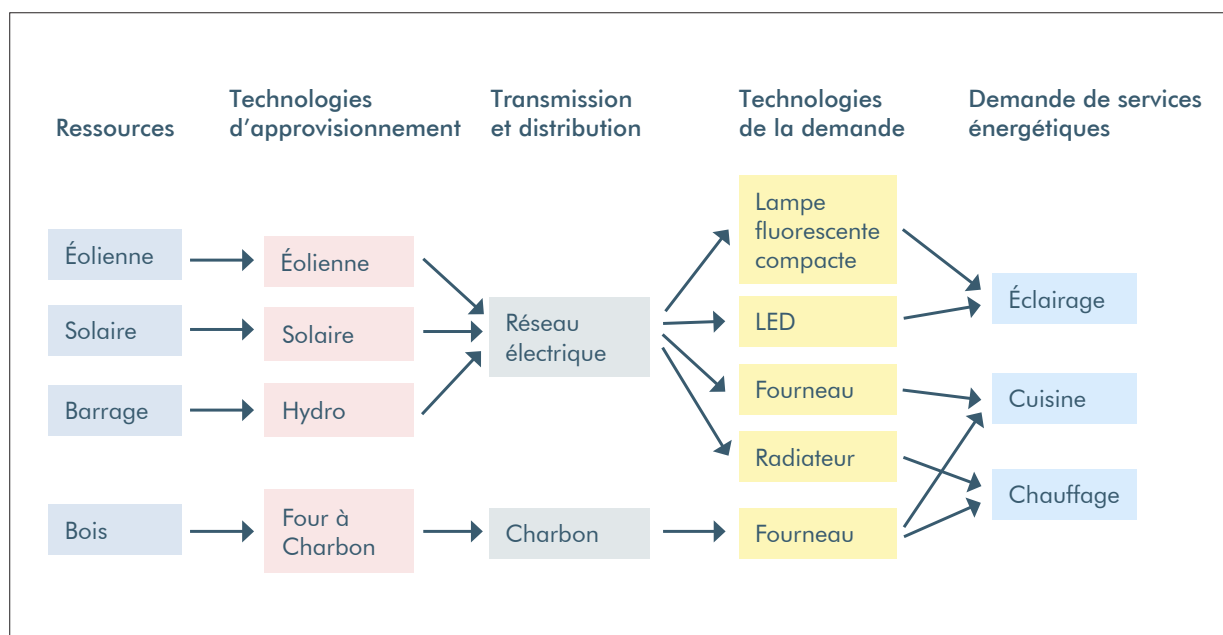


Figure 3.2 Structure type d'un modèle d'optimisation

Source : UCT

Le tableau ci-dessous présente un aperçu des principales fonctionnalités applicables aux modèles centralisés.

Echelle spatiale	Optimisation d'un réseau à nœud unique ou d'un système de mini-réseau à l'échelle régionale, nationale ou locale
Représentation de la demande	
Capacité à représenter spatialement la demande	Un certain degré de représentation spatiale est possible grâce à la représentation des échanges entre régions, mais la demande n'est pas représentée spatialement au sein de ces régions.
Capacité à intégrer différents types de demandes et différents profils	Les modèles permettant l'optimisation de la demande sont complètement flexibles dans leur représentation du système énergétique — en matière de combustibles, de technologies, de ressources et de contraintes au sein du modèle. Dans la Figure 3.2 par exemple, l'intégration de certains combustibles, services énergétiques et technologies d'alimentation de ces services reposera sur les composantes, besoins et contraintes spécifiques au système énergétique étudié. De plus, les composantes du modèle peuvent être ajustées. Ex. s'il n'est pas possible d'utiliser d'énergie hydraulique, cette option sera exclue du modèle ; ou si l'optimisation de la demande n'est pas nécessaire, elle sera exclue. En général, le niveau d'intégration des composantes de la demande dépend du modélisateur, souvent en fonction de la quantité de données à sa disposition.
Capacité à simuler les taux d'urbanisation et d'électrification	Il est possible de simuler les taux d'urbanisation et d'électrification. Ces taux constituent des intrants du modèle, et auront une incidence sur la demande en électricité perçue par le modèle (cas d'un modèle exclusivement appliqué à l'offre) ou sur les niveaux de services énergétiques utiles perçus (si l'optimisation de la demande est intégrée au modèle).

Echelle spatiale	Optimisation d'un réseau à nœud unique ou d'un système de mini-réseau à l'échelle régionale, nationale ou locale
Représentation des ressources	
Capacité à représenter spatialement les ressources	Il est possible d'inclure des technologies d'énergies renouvelables (ER) avec un éventail de profils disponibles afin de reproduire la disponibilité de diverses ER dans différentes régions ; toutefois, il n'est pas possible d'y appliquer une haute résolution spatiale. Il est également impossible d'associer un profil spécifique à un lieu géographique donné. Ces modèles étant généralement développés avec un nœud unique, ou avec des nœuds multiples en cas d'échanges entre les régions, les réseaux de transmission et de distribution dans nœud subissent des pertes d'énergie à l'échelle du système. Les pertes de transmission ne peuvent pas être liées aux centres de demande ; par conséquent, ces pertes, ou les coûts de réseau associés peuvent être sous-estimés ou surestimés.
Capacité à représenter les profils d'énergies renouvelables intermittentes dans l'optimisation	Tous les modèles d'optimisation sont capables de représenter les profils d'offre et de demande ; toutefois, la finesse de la représentation de ces profils varie selon les logiciels.
Espace de solution	
Capacité à inclure des caractéristiques technologiques détaillées	Il est possible d'obtenir un niveau élevé de détails technologiques afin de reproduire la façon dont les technologies seront réellement utilisées dans le système. Toutes les technologies peuvent être représentées en termes d'efficacité, de disponibilité, de capacité, de coûts de fonctionnement et de maintenance, etc.
Capacité à prendre en compte des solutions à différentes échelles : capacité à prendre en compte le réseau central, les mini-réseaux et les systèmes autonomes.	Les systèmes autonomes peuvent être intégrés, mais pas de façon spatiale, ni pour les ménages individuels. Le choix entre systèmes autonomes, mini-réseau et réseau central repose donc entièrement sur les coûts du système, et non pas sur des caractéristiques spatiales pouvant affecter le choix (ex. nombre de ménages dans la communauté, profil de la demande anticipée des ménages...). Il faudra donc conduire ces arbitrages en dehors du modèle.
Capacité à inclure des contraintes et limites « réelles »	Des contraintes peuvent être appliquées au modèle afin de reproduire des contraintes réelles. Elles peuvent notamment s'appliquer à la part de certaines technologies dans le mix technologique, à la capacité maximum ou minimum de certaines technologies, etc.
Capacité à fournir des solutions à différents intervalles	Les modèles peuvent être appliqués à un large éventail d'échelles (locale, régionale, nationale) et de périodes. Ils sont généralement appliqués sur le moyen et long-terme (horizon 20 à 50 ans).
Commerce régional	Les échanges entre « régions » permet au système de tirer parti des forces de chaque région en matière de ressources disponibles. Toutefois, chaque région est représentée par un nœud unique, ce qui implique que les pertes énergétiques et les longueurs des lignes de transmission entre les régions sont cumulées.

Echelle spatiale	Optimisation d'un réseau à nœud unique ou d'un système de mini-réseau à l'échelle régionale, nationale ou locale
Résultats	
Solutions spatiales pour l'électrification	Impossible dans ce cadre.
Solutions technologies pour le réseau principal, les systèmes hors-réseau et autonomes	Ces modèles peuvent être appliqués aux systèmes nationaux, régionaux et locaux. Ils peuvent donc être utilisés pour l'optimisation du réseau principal ou de systèmes en mini-réseau, bien que certains soient plus adaptés à l'optimisation des mini-réseaux que d'autres. Ils ne peuvent pas être utilisés pour comparer l'extension du réseau, les systèmes de mini-réseau ou les systèmes autonomes en fonction de réalités ou des contraintes géographiques.
Infrastructures et niveau d'investissements nécessaires à différentes échéances	Les investissements pour l'augmentation de la capacité à différentes échéances sont une sortie du modèle, ce qui n'est pas le cas pour les infrastructures du réseau (car le modèle ne s'applique qu'à une seule région).
Analyse ou résultats sous-régionaux	Peut s'appliquer à différentes échelles (locale, régionale, nationale) et périodes. L'analyse n'est possible qu'à l'échelle du modèle. Le modèle se caractérise par un nœud unique ; ainsi, si un modèle sous-régional est conçu, l'analyse ne sera possible qu'à cette échelle. Si un modèle national est réalisé, les solutions ne seront disponibles qu'à l'échelle nationale.

L'analyse à venir couvre des modèles fréquemment utilisés et jugés adaptés à la planification de systèmes électriques centralisés en RDC. Ces modèles seront analysés selon les critères suivants : compétences exigées du développeur et contrainte de licence, logiciel utilisé, facilité d'utilisation et interface utilisateur, communauté d'utilisateurs et formations disponibles. Nous avons également ajouté des liens vers des informations supplémentaires sur ces outils.

3.5.1.1 Système de modélisation énergétique en open-source (OSeMOSYS)³⁰

A ce jour, KTH héberge la plateforme par le biais de la communauté OPTIMUS (<http://www.optimus.community>).

OSeMOSYS est le pilier du Modèle de base de l'énergie électrique en Afrique (TEMBA). TEMBA est une application multi-régions d'OSeMOSYS dans laquelle les systèmes d'approvisionnement électrique et les liens de transmission entre régions sont représentées de façon explicite.

³⁰ <http://www.osemosys.org>

Général	
Licences	A l'origine, OSeMOSYS a été développée en GNU-MathProg, un langage de programmation mathématique en open-source qui utilise le solveur GLPK. Il est également possible d'utiliser CPLEX, mais ce dernier est un solveur commercial qui requière une licence d'utilisation. Différentes versions d'OSeMOSYS sont disponibles en GAMS et Python. GAMS requière une licence pour les modèles dépassant une certaine taille.
Facilité d'utilisation et accessibilité	Deux interfaces sont disponibles pour OSeMOSYS. Model Management Infrastructure (MoManI [1]) est une interface accessible en open-source sur laquelle il est possible de créer des modèles et de visualiser leurs résultats. L'interface est disponible en version bureau ou en ligne.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	OSeMOSYS a été spécifiquement développée de façon à ce que son code soit facile à comprendre et accessible aux utilisateurs afin d'en promouvoir une large utilisation. Les équations représentant les relations entre les composantes du système énergétique dans le code d'OSeMOSYS sont donc plus facile à interpréter et peuvent facilement être modifiées ou ajoutées en cas de besoin. Le code est divisé en blocs pour faciliter son interprétation, d'éventuelles modifications ou ajouts par les utilisateurs.
Taille du modèle	A la base, la taille du modèle était limitée en raison de la durée nécessaire pour initialiser et résoudre l'exécution du modèle. Néanmoins, le temps de traitement s'est considérablement réduit ces dernières années, et OSeMOSYS est aujourd'hui capable d'exécuter et de résoudre un modèle relativement rapidement. Pour obtenir une taille de modèle plus importante, il est aussi possible d'utiliser un solveur commercial.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	La communauté d'utilisateurs d'OSeMOSYS est très active dans le développement du code. De nombreux utilisateurs sont des étudiants qui utilisent l'outil pour un spectre très large d'analyses. Pour plus d'informations, consultez http://www.optimus.community . La newsletter d'OSeMOSYS contient de nombreuses informations sur les mises à jour du modèle, les formations proposées et d'autres sujets connexes. Des réunions du comité de pilotage sont organisées chaque année ; elles donnent l'occasion aux utilisateurs et développeurs d'OSeMOSYS de discuter de leurs projets et des prochains développements de l'outil.
Soutien pour le renforcement de capacités	Un manuel d'utilisation, des instructions vidéo et des exemples de modèles à des fins de formation sont disponibles. Des sessions de formation à OSeMOSYS sont aussi proposées dans le cadre de la <i>Summer School on Modelling Tools for Sustainable Development</i> . Malheureusement, l'édition 2020 a été annulée en raison du Covid-19. Ces formations sont soutenues par de nombreuses institutions et universités, notamment par la Banque mondiale. La communauté est aussi active dans l'établissement de centres régionaux de formation. Dernièrement, un nouveau cours sur l'analyse des systèmes énergétiques a été créé à l'Université du Sierra Leone.

3.5.1.2 Système intégré MARKAL EFOM (MARKAL/TIMES)³¹

TIMES est hébergé par un programme de développement international de l'Agence internationale de l'énergie, ETSAP (Energy Technology System Analysis Programme).

Il existe de nombreux exemples d'applications de TIMES pour la planification de systèmes énergétiques, couvrant un large spectre d'analyses politiques au niveau local, régional, national et mondial.

Général	
Logiciel sous licence ou open-source	TIMES utilise le langage General Algebraic Modelling System (GAMS) (https://www.gams.com). Les solveurs GAMS (SIMPLEX, CPLEX) requièrent une licence. Autrement dit, TIMES ne nécessite pas de licence d'utilisation, mais il est inutilisable sans acheter une licence GAMS. Une version open-source de TIMES est disponible sous GNU.
Facilité d'utilisation et accessibilité	TIMES propose deux interfaces utilisateurs. VEDA (<i>front end</i> et <i>back end</i>) et ANSWER. Ces deux interfaces requièrent une licence d'utilisation. VEDA est une plateforme basée sur Excel ; ANSWER est une interface visuelle basique. L'interface ANSWER permet de charger toutes les données du modèle directement sur l'interface ANSWER, ou via Excel. Il est possible de créer des tableaux croisés dynamiques et des résultats graphiques sur VEDA, mais ANSWER affiche uniquement ses résultats sous forme de tableau. Après avoir compris le fonctionnement des paramètres et du modèle, ces interfaces sont relativement faciles à utiliser. L'interface ANSWER indique à l'utilisateur d'éventuelles données manquantes, par exemple si une donnée entrante ou sortante d'un processus n'a pas été renseignée.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Le code de TIMES est expliqué en détail dans le manuel « <i>Documentation for the TIMES Model : Part II</i> » (https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II_July-2016.pdf). Le code source de TIMES est disponible ici : https://github.com/etsap-TIMES/TIMES_model . Bien que le code soit disponible et qu'il n'existe aucune restriction à sa modification, il est en fait quasi-impossible de l'adapter, à moins d'être un utilisateur avancé. De fait, la communauté des contributeurs au développement du code est relativement limitée.
Taille du modèle	Le modèles TIMES est flexible en matière de représentation du système énergétique. Il peut facilement traiter des modèles de taille importante. La programmation en GAMS permet une conversion efficace des matrices, ce qui réduit le temps d'exécution du modèle.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	TIMES fait partie des générateurs de modèles les plus utilisés. Actuellement, TIMES est utilisé dans 63 pays. Le programme international ETSAP qui héberge TIMES reçoit des financements de parties contractantes partout dans le monde. Les financements servent également à soutenir la maintenance et le développement du logiciel, notamment le développement de nouvelles fonctions, comme le développement de données et d'interfaces utilisateurs. ETSAP soutient aussi la documentation du modèle et les programmes de formation sur le modèle et les interfaces utilisateurs. Vous trouverez plus d'informations sur ETSAP et la communauté ETSAP à cette adresse : https://iea-etsap.org/index.php/community/official-documents. ETSAP organise des réunions biennuelles pour approfondir les développements du code et offrir une plateforme de recherche et de partage d'expériences aux utilisateurs et aux développeurs du modèle.
Soutien pour le renforcement de capacités	Des formations sur l'interface VEDA et TIMES sont disponibles lors des réunions biennuelles d'ETSAP. Des manuels très détaillés sur le logiciel (explication des équations, etc.) et les interfaces, ainsi que des exemples de formation sont aussi proposés sur le site internet d'ETSAP.

³¹ <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>

3.5.1.3 Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts (MESSAGE)³²

MESSAGE a été développé par l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA). A l'heure actuelle, MESSAGE est hébergé et soutenu par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en tant que suite d'outils de modélisation mise à disposition de ses Etats membres.

L'IRENA a développé des modèles de pôles énergétiques en Afrique à l'aide de MESSAGE. Ces modèles permettent d'optimiser les choix technologiques de production électrique en fonction des opportunités et la demande régionale, plutôt que d'uniquement se baser sur les données disponibles à l'échelle nationale.

Général	
Logiciel sous licence ou open-source	MESSAGE utilise le langage C et peut être utilisé avec de nombreux solveurs, dont GLPK, CPLEX, CBC, CLP. L'AIEA et l'IIASA développent actuellement une nouvelle version de MESSAGE en GAMS. La documentation de MESSAGE est disponible sur https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1718_web.pdf
Facilité d'utilisation et accessibilité	Les modèles sont créés grâce à une interface utilisateurs relativement facile d'utilisation. Cette interface permet d'entrer des données, mais aussi d'afficher des résultats tabulaires ou graphiques. L'interface est plus adaptée à la création de petits modèles, et ne communique pas aisément avec Excel. Il est toutefois possible de la faire communiquer avec Excel en cas de création de plus grands modèles, mais cela nécessite un personnel avec une bonne maîtrise de MESSAGE, car l'interface doit être personnalisée en fonction des fonctionnalités du modèle.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Dans la version actuelle, il n'est pas possible de modifier le code ; il y a eu très peu d'évolution de cette version au cours des dernières années.
Taille du modèle	Le modèle MESSAGE est flexible en matière de représentation du système énergétique, mais il supporte mal les modèles de taille importante.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	MESSAGE est soutenu par l'AIEA. IRENA soutient aussi activement le développement et l'application de l'outil. Néanmoins, le développement de MESSAGE est actuellement limité.
Soutien pour le renforcement de capacités	L'AIEA soutient ses Etats-membres dans le développement de modèles de systèmes énergétiques par le biais de programmes nationaux de formation et par le financement de petits projets de recherche et de stages. IRENA finance également le développement de modèles MESSAGE en Afrique. Elle organise aussi des formations sur MESSAGE.

³² <https://www.iaea.org/topics/energy-planning/energy-modelling-tools>

3.5.1.4 Calliope (CI)³³

Calliope est principalement développée et maintenue par l'Université ETH de Zurich, en Suisse.

Calliope est utilisée dans plusieurs pays ainsi que par certaines petites villes et quartiers ; dans le contexte africain, certains modèles sont publiés en open-source pour l'Afrique du Sud et le Kenya.

Calliope dispose d'une résolution temporelle et spatiale flexible mais se concentre davantage sur les aspects temporels de sa résolution (ex. haute résolution des données solaires, éoliennes et sur la demande sur de nombreuses années)—l'outil n'intègre que modérément les éléments spatiaux (divise les pays en provinces ou états mais ne les relie que partiellement, ex. 5–30 zones/nœuds). Cet outil pourrait être adapté à une modélisation à l'échelle nationale ou régionale. Il n'est toutefois pas conçu pour une planification d'électrification à haute résolution spatiale comprenant des milliers ou des dizaines de milliers de groupements/communautés.

Général	
Logiciel sous licence ou open-source	Calliope est un cadre d'optimisation bâti sur Python ; il peut être utilisé avec différents solveurs, notamment GLPK, CBC (solveurs gratuits) ou CPLEX et Gurobi (solveurs sous licence).
Facilité d'utilisation et accessibilité	Calliope se distingue en communiquant sur la simplicité de l'installation du modèle, de l'entrée des données et de la visualisation interactive des résultats. Pour le moment, l'outil ne propose pas d'interface graphique simplifiée pour les non-programmeurs, ce qui aurait permis de manipuler les fonctions ou données d'entrée du modèle. Toutefois, il est possible d'exécuter des modèles préconfigurés et prêts à l'emploi sans utiliser Python.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Possibilité d'ajouter et d'ajuster le code (avec compétences en Python).
Taille du modèle	Calliope est flexible en termes de taille de modèle ; il est également capable d'intégrer plusieurs régions différentes.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	Le développement de l'outil est activement soutenu par des développeurs en sciences informatiques du monde entier. Calliope peut compter sur une communauté croissante et passionnée d'utilisateurs et de contributeurs. C'est un excellent exemple de bonne gestion de projet en open-source.
Soutien pour le renforcement de capacités	Toute la documentation en ligne, les supports de formation et tutoriels disponibles font partie des meilleures ressources en ligne pour logiciel en open-source. Facile d'utilisation pour toute personne disposant de bonnes compétences sur Python. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas encore de formation/certification en « compétences Calliope » bien que des sessions d'introduction/tutoriels soient disponibles lors de réunions annuelles ou biannuelles.

³³ <https://www.callio.pe/>

3.5.1.5 Outils pour l'optimisation et l'analyse de modélisation énergétique (TEMOA)³⁴

TEMOA a été développé par l'Université d'état de Caroline du Nord.

Général	
Logiciel sous licence ou en open-source	TEMOA exploite un cadre d'optimisation écrit en Python (Pyomo). Il peut être exécuté avec les solveurs gratuits GLPK et CBC. Il peut aussi être exécuté avec CPLEX et Gurobi, des solveurs commerciaux mieux adaptés aux jeux de données volumineux. Le code source est sous licence GPLv2.
Facilité d'utilisation et accessibilité	L'outil ne propose pas d'interface utilisateurs pour entrer les données. Les données peuvent être entrées sous forme de texte formaté ou, pour les plus gros modèles, à l'aide du système de gestion de base de données SQLite. Les résultats du modèle sont stockés dans une base de données séparée. Graphviz peut être utilisé pour créer des cartes interactives de systèmes énergétiques à partir des données de TEMOA. Ces dernières peuvent également être utilisées pour afficher la capacité et les résultats des activités. Les données graphiques sont également possibles à travers la saisie de commandes spécifiques. Il n'existe aucun moyen facile de sélectionner et produire des résultats graphiques par le biais d'une interface.
Potentiel de flexibilité, de modification et de combinaison du modèle/code	Possibilité d'ajouter et d'ajuster le code (avec compétences en Python).
Taille du modèle	De plus gros modèles peuvent être adaptés avec des solveurs sous licence. Il n'y a aucune restriction de taille de modèle, si ce n'est le temps dédié à l'exécution de ceux-ci.
Soutien pour le développement et la formation	
Soutien de la communauté pour le développement et l'utilisation de l'outil, le cas échéant	Le développement de l'outil repose principalement sur l'Université de Caroline du Nord. Les applications sont limitées en dehors de l'université ; toutefois, le logiciel est relativement récent, et son utilisation devrait se généraliser avec le temps.
Soutien pour le renforcement de capacités	Disponibles sur internet : documentation, supports de formation et tutoriels. Des connaissances en langage Python sont nécessaires pour exécuter le modèle. Le renforcement de capacités est favorisé grâce à des formations dispensées par l'université, mais aucune formation publique n'est disponible.

3.5.2 Résumé des comparaisons entre les modèles, des lacunes et solutions pour les modèles centralisés

De nombreux outils de planification énergétique centralisée proposent des descriptions mathématiques similaires des systèmes énergétiques. Ils se distinguent toutefois par leur facilité d'utilisation et d'entrée des données, leur vitesse de résolution, le niveau de formation proposé, l'étendue de leur communauté d'utilisateurs et du soutien continu dédié au développement de ces outils.

TIMES est probablement l'outil le plus avancé et bénéficiant des plus gros financements pour le développement et la formation, en plus de proposer un niveau satisfaisant de développement et de maintenance de ses interfaces. Néanmoins, nous ne le jugeons pas adapté à notre projet car son code

³⁴ <https://temoacloud.com/about/>

est inaccessible à la grande majorité des utilisateurs (même avec un niveau moyen, voire avancé). Utiliser TIMES comme plateforme de modélisation impliquerait également d'importants frais de licence — à moins que des interfaces utilisateurs personnalisables ne soient développées.

De même, MESSAGE semble inadapté en raison des difficultés d'accès et de modification de son code. Même si MESSAGE bénéficie d'un large soutien aux activités de formation, et qu'il a déjà été utilisé pour développer des modèles pour plusieurs pays africains, le développement de l'outil et de son interface est resté au point mort ces dernières années.

Suite à notre analyse, les outils en open-source répondant à la fois aux critères d'optimisation de l'offre et de la demande et de développement de l'outil par le plus grand nombre sont OSeMOSYS, Calliope et TEMOA. N'importe lequel de ces trois modèles semble donc tout indiqué pour notre projet. Nous privilégions OSeMOSYS car il met l'accent sur la création d'une communauté d'utilisateurs, qu'il est déjà énormément utilisé en Afrique, que des programmes de formation sont disponibles, mais aussi parce qu'il est hébergé par KTH (ce qui simplifiera notre partenariat pour le développement du modèle).

➤ 3.6 Modèles spécifiquement adaptés à l'optimisation des mini-réseaux

Les outils d'optimisation de mini-réseaux analysent les combinaisons de différentes technologies énergétiques complémentaires en vue d'optimiser les systèmes hybrides de mini-réseaux (ex. solaires, batteries, diesel, éolien, hydraulique, etc.). Tout comme pour les outils de modélisation centralisée, n'importe quel modèle de mini-réseaux disponibles peut être utilisé pour leur optimisation, car ils requièrent tous les mêmes données et tiennent compte des mêmes technologies, profils et ressources. La différence entre ces différents modèles réside surtout dans les solveurs utilisés, dans leur facilité d'utilisation, le niveau de soutien proposé, l'éventuelle nécessité de s'acquitter d'une licence et le type de logiciel utilisé. Par exemple, HOMER et MicrOgridS sont tout à fait adaptés à l'optimisation des mini-réseaux. Toutefois, HOMER est plus utilisé.

A la base, HOMER (*Hybrid Optimisation of Multiple Energy Resources*) a été créé par le NREL (Laboratoire national sur les énergies renouvelables) aux USA, mais il est actuellement développé et vendu par HOMER Energy LLC, récemment racheté par UL (Underwriters Laboratories) et disponible sur <https://www.homerenergy.com/>. HOMER est un logiciel propriétaire et requiert un abonnement annuel de 500 dollars pour chaque utilisateur (forfait standard non-universitaire). Pour des modules supplémentaires (très utiles), il faut compter 1 250 dollars l'unité (il existe des versions universitaire et étudiant un peu moins onéreuses, mais la seule option gratuite est la version d'essai pendant 21 jours). HOMER fonctionne uniquement sur Windows (à l'heure actuelle, l'outil n'est pas supporté sur Mac et Linux).

Pour certains, HOMER est « la référence » en termes d'études de préfaisabilité pour l'optimisation de la taille et des configurations de mini-réseaux. De nombreux outils concurrents et d'alternatives en open-source comparent la performance de leurs produits à celle d'HOMER. S'il propose une résolution temporelle très sophistiquée (par heure et minute, généralement sur une année complète), HOMER n'offre aucune résolution spatiale, car il n'est actuellement pas relié à un outil géospatial lui permettant d'évaluer les mini-réseaux sur une zone étendue. HOMER n'intègre pas non plus l'option d'optimiser l'extension d'un réseau centralisé, mais il propose « une distance permettant de maximiser la rentabilité de l'extension du réseau » en fonction du coût de l'énergie du réseau et du coût de l'extension du réseau à MT par kilomètre. Bien qu'il n'ait pas été conçu à cette fin, il serait également possible de l'utiliser pour évaluer les systèmes autonomes. HOMER offre une interface utilisateur graphique, ainsi que des sessions de formation.

MicrOgridS de RLI est un outil en open-source développé sous OEMOF (*Open Energy Modelling Framework*). Les développements de l'outil sont donc intégrés à l'*Open Energy Modelling Initiative*. L'outil est codé en langage Python et peut être utilisé pour définir les composantes du système et répartir les flux énergétiques de façon optimale. L'objectif du système est de minimiser le coût de l'approvisionnement électrique.

➤ 3.7 Cadre de modèle proposé pour la phase 2

Le cadre de modèle proposé pour l'exploration de la trajectoire d'électrification en RDC dans les phases 2 et 3 repose sur cinq composantes. Il s'agit de :

1. Un outil de planification centrale, afin d'optimiser le futur mix technologique qui alimentera l'extension du réseau congolais ;
2. Un outil d'optimisation géospatiale, afin de mener une analyse spatiale détaillée de la trajectoire d'électrification optimale afin d'approvisionner les ménages en électricité à travers toute la RDC ;
3. Un modèle de demande des ménages, pour élaborer des estimations de la consommation des ménages et des projections de cette demande ;
4. Un modèle de mini-réseau, afin d'obtenir une estimation réaliste du coût d'approvisionnement des communautés en RDC grâce aux mini-réseaux ; et
5. Un outil de visualisation, pour élargir le spectre de parties prenantes pouvant accéder à ces données et résultats de scénario.

Nous détaillons ci-dessous chacune de ces composantes et la façon dont nous comptons les combiner pour créer les données exploitées par l'outil de visualisation.

3.7.1 Le modèle et les outils de planification centralisée

La figure 3.3 illustre les composantes et les intrants nécessaires au modèle d'optimisation centralisé (OSeMOSYS). Le graphique présente OSeMOSYS comme modèle à utiliser, mais les mêmes exigences s'appliquent à la plupart des modèles centralisés mentionnés dans la section précédente (à savoir TIMES, MESSAGE, CALLIOPE ou TEMOA).

Le produit de l'outil de planification centralisée est un plan d'extension présentant le mix technologique optimal pour l'alimentation électrique de la RDC à travers son réseau national. Ce plan d'extension est créé en permettant au modèle de choisir parmi un ensemble de technologies hydrauliques, d'ER et autres. Ces technologies sont intégrées au mix technologique au fil du temps afin d'approvisionner la future demande prévue en électricité. Cette demande future varie en fonction du scénario à l'étude.

La programmation du modèle OSeMOSYS se concentre tout d'abord sur la demande. Cela nécessite d'élaborer un équilibre de la demande énergétique pour une année de référence, une estimation du profil de charge de cette demande³⁵ (c'est à dire l'heure de la journée à laquelle le système va tenir compte de

³⁵ Le coût moyen tient compte des coûts de capital, des coûts de fonctionnement et de maintenance fixes et variables, la disponibilité de technologie pour produire l'électricité tout au long de l'année, et du taux d'actualisation.

la demande électrique) et des projections de la demande en fonction des différents scénarios analysés. La consommation électrique de l'année de référence (équilibre énergétique) doit correspondre aux niveaux de consommation actuels en RDC.

Les projections de consommation électrique sur la durée seront développées grâce au modèle de demande des ménages, aux estimations des usages productifs d'électricité des ménages et à l'utilisation électrique des autres secteurs. Le modèle de la demande sera utilisé pour estimer les niveaux de consommation électrique probables des ménages en fonction des différents niveaux de services énergétiques attendus. Les estimations de la demande sur la durée peuvent être éclairées par les objectifs politiques, les estimations des taux d'électrification à venir, les taux d'urbanisation, le PIB et la croissance démographique. Une première estimation de l'extension du réseau peut aussi être tirée des premiers essais d'OnSSET.

Pour caractériser les ressources disponibles, un profil de la disponibilité des ressources éoliennes, solaires et hydrauliques sera élaboré à l'échelle de la RDC. Ce profil sera utilisé dans le modèle pour déterminer la disponibilité des ressources éoliennes et autres à différents moments de la journée ou de l'année. Compte tenu de l'immense superficie de la RDC, il sera peut-être nécessaire d'élaborer plusieurs profils éoliens et solaires pour le modèle — surtout si ces ressources affichent de grandes disparités selon les régions. Notre étude se concentrera sur les régions où ces ressources semblent les plus prometteuses.

L'import-export permet à la RDC d'importer ou exporter de l'électricité et d'autres combustibles. Il peut s'agir d'une quantité spécifique si des accords sont déjà passés, ou d'un prix par unité, si ces importations font partie du plan d'optimisation.

Pour chaque centrale du modèle, la caractérisation doit inclure les combustibles utilisés, l'efficacité (en %), la taille maximum de l'unité (en MW), le taux de disponibilité (en %), la durée de vie estimée de la centrale (en années), le délai de réalisation (en années), les coûts d'investissements (en \$/kW), les frais de fonctionnement et de maintenance fixes (en \$/kW) et les frais de fonctionnement et de maintenance variables (en \$/kW). Lorsque le coût d'une technologie n'est pas défini, il est possible d'utiliser le modèle pour conduire une analyse de sensibilité afin de déterminer le degré de sensibilité des résultats par rapport aux coûts ou à d'autres paramètres d'une ou plusieurs technologies données.

Le premier développement et test du modèle OSeMOSYS sera mené sans interaction avec OnSSET.

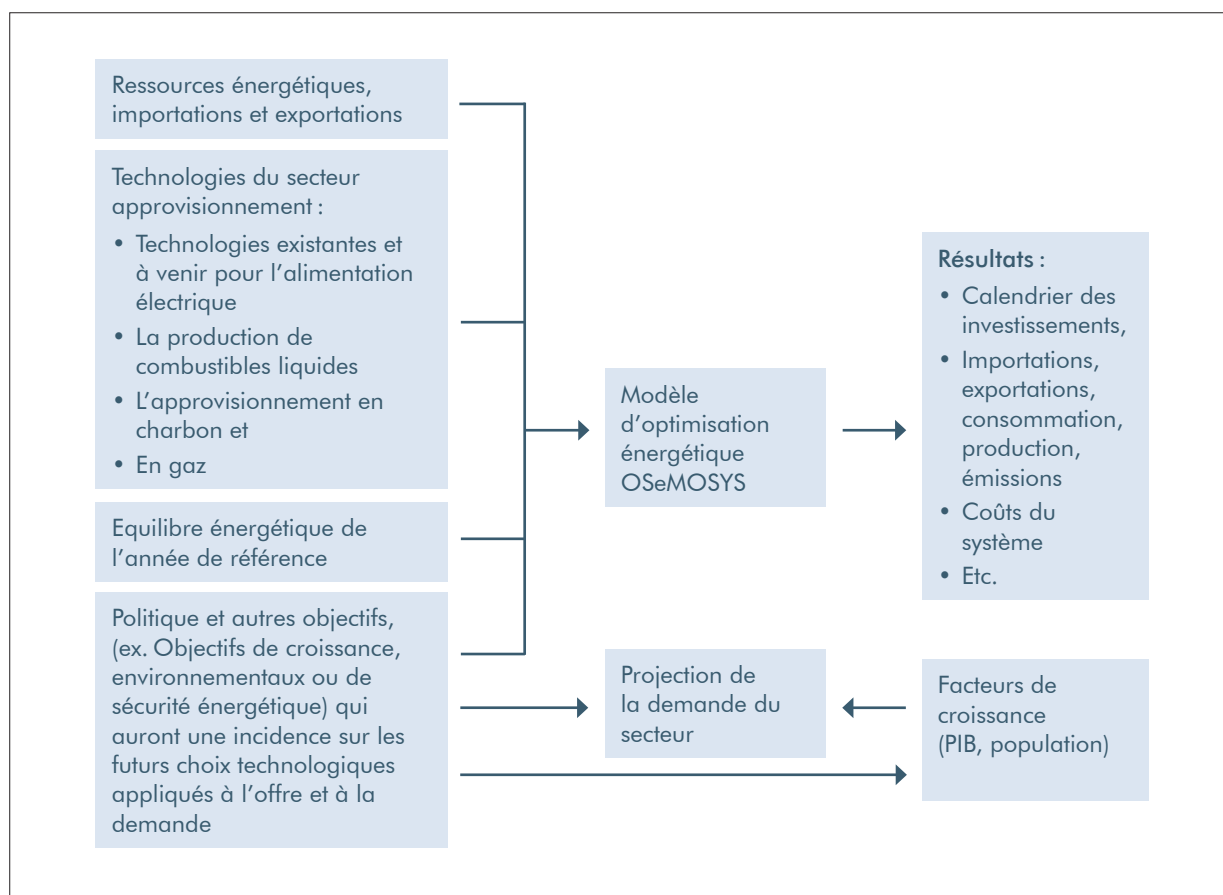


Figure 3.3 Composantes du modèle d'optimisation énergétique centralisé envisagé pour la Phase 2

Source : UCT

3.7.2 Modèle et outils géospatiaux pour l'électrification

Dans cette section, nous vous présentons brièvement l'outil OnSSET. La majeure partie de la modélisation menée en phase 2 consistera à entrer les données, à exécuter le modèle OnSSET et à le développer afin d'améliorer ses fonctionnalités et de mieux l'ajuster au contexte de la RDC. Dans le chapitre 4, nous présentons ce modèle dans de plus amples détails et décrivons notre première application d'OnSSET en RDC, menée dans la phase 1 du projet.

Cet outil d'électrification géospatial est utilisé pour comparer la viabilité du réseau principal, des mini-réseaux et de systèmes autonomes en tant qu'alternatives d'approvisionnement électrique aux communautés actuellement sans accès à l'électricité en RDC. La Figure 3.4 illustre les composantes et données entrantes nécessaires au modèle d'électrification géospatial proposé pour la Phase 2 (OnSSET).

OnSSET requiert diverses entrées : données géospatiales, informations sur la demande, ressources, infrastructures et activité économique. Ces informations sont stockées sur des couches SIG selon un maillage spatial en haute résolution composé de cellules/points cartographiés à travers le pays. Le coût de production électrique est calculé pour chaque cellule en fonction d'une estimation du niveau probable de la consommation future et du profil de demande dans cette cellule, des besoins liés au réseau de

transmission et de distribution, des ressources énergétiques et du coût moyen de la production électrique³⁶ avec différentes options technologiques. L'optimisation du choix d'exploiter l'extension du réseau, des mini-réseaux ou des systèmes autonomes pour l'électrification repose sur le coût de production et de transmission électrique sur le réseau par rapport au coût d'approvisionnement électrique via des solutions hors-réseau ou de mini-réseaux. Ces contraintes sont imposées par rapport à la longueur du réseau MT afin de mieux refléter les conditions réelles de fonctionnement. L'algorithme stocke la longueur des lignes MT entre les établissements. Une fois les lignes étendues, les coûts associés à l'extension sont intégrés à l'optimisation.

Le premier développement et test d'OnSSET sera mené sans interaction avec OSeMOSYS. Il est donc possible d'exécuter indépendamment OSeMOSYS et OnSSET de façon indépendante ou sous forme de modèle couplé d'optimisation géospatiale centralisé.

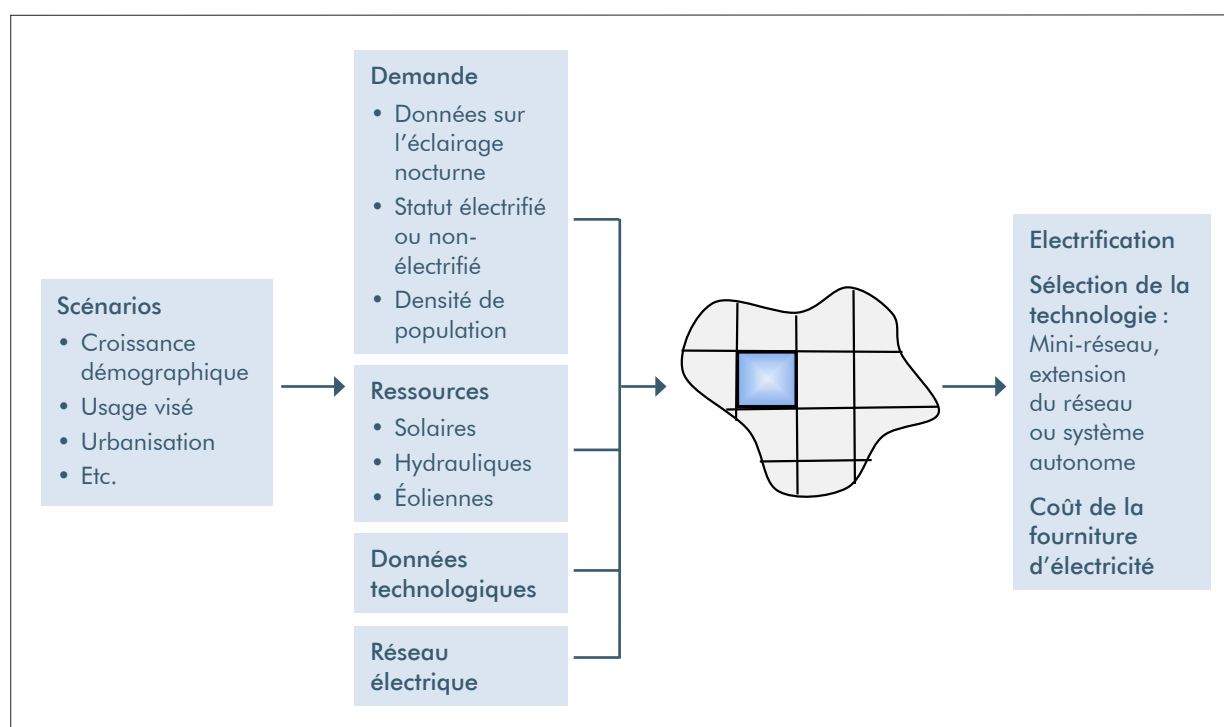


Figure 3.4 Composantes du modèle d'optimisation géospatial envisagé pour la phase 2

Source : UCT

3.7.3 Améliorations du modèle et développement à venir sur OnSSET et OSeMOSYS

Dans le chapitre 4, nous mettons en évidence différents problèmes identifiés dans le modèle OnSSET développé pour la RDC lors de la phase 1. Ceux-ci concernent surtout les estimations de placement et de coûts du réseau, ainsi que l'incapacité à inclure un mix technologique optimisé au réseau central ou aux mini-réseaux hybrides dans la solution d'électrification proposée par OnSSET. Pour surmonter ces obstacles, le modèle devra donc être amélioré.

³⁶ Le coût moyen tient compte des coûts de capital, des coûts de fonctionnement et de maintenance fixes et variables, la disponibilité de technologie pour produire l'électricité tout au long de l'année, et du taux d'actualisation.

Cela permettrait de considérablement améliorer les résultats actuels du modèle, notamment :

- Amélioration des algorithmes d'extension du réseau sur OnSSET — meilleure tracé du réseau ;
- Optimisation des solutions de mini-réseau ;
- Connexion des mini et micro-réseaux afin de constituer de nouveaux réseaux locaux interconnectés sur OnSSET ;
- Connexion du modèle centralisé d'électrification de la DRC et d'OnSSET ;
- Connexion du modèle centralisé d'électrification de la RDC au réseau électrique régional.

Ces options sont détaillées ci-après.

Amélioration des algorithmes d'extension du réseau sur OnSSET — amélioration de la trajectoire du réseau

A l'heure actuelle, OnSSET modélise l'extension du réseau en reliant les établissements avec des « lignes droites ». L'algorithme d'extension du réseau peut donc être amélioré afin de suivre un tracé plus réaliste, qui tiendrait compte du terrain, de ses élévations, du réseau routier, etc. Il permettrait également d'exclure certaines zones dans lesquelles l'extension du réseau est techniquement impossible. Ces algorithmes peuvent s'appuyer sur, et développer les travaux existants menés par RLI (<https://openegoproject.wordpress.com/partners/>) et Facebook (<https://github.com/facebookresearch/many-to-many-dijkstra>).

L'extension du réseau pourrait être mise en oeuvre en tant que post-traitement des résultats. Par exemple, suite à l'application d'un scénario donné, il serait possible d'exécuter un module d'extension du réseau pour examiner la trajectoire des lignes et calibrer les coûts de l'extension. Ces coûts peuvent ensuite être comparés avec ceux utilisés dans OnSSET, tandis que la plateforme de visualisation permettra d'apprécier la trajectoire des lignes.

Solutions d'optimisation du mini-réseau

Etant donné qu'OnSSET ne permet pas d'optimiser le mix technologique appliqué aux mini-réseaux, le modèle MicrOgridS de RLI pourrait remplir cette fonction. Cet outil permettra d'obtenir une estimation plus précise du coût et de la fiabilité réelle des mini-réseaux sélectionnés pour l'électrification de la RDC. En matière de méthodologie et de données nécessaires, les modèles de mini-réseaux sont comparables à ceux des réseaux centralisés.

Connecter les mini et micro-réseaux pour constituer de nouveaux réseaux locaux interconnectés

L'outil OnSSET permet désormais de mener des analyses « à différents intervalles » (par exemple, de 2020 à 2025, puis de 2025 à 2030). Il est possible de changer de technologie d'électrification entre ces différents intervalles (ex. un établissement peut être alimenté par un mini-réseau photovoltaïque jusqu'en 2025, puis raccordé au réseau (régional) jusqu'en 2030. Si l'extension du réseau est limitée au cours du premier intervalle, de nombreux mini-réseaux seront créés, puis ultérieurement connectés au réseau. On peut donc s'attendre à de futures répercussions sur le réseau central (car une production importante d'énergie photovoltaïque et hydraulique s'y ajoutera, en plus de celle générée par les batteries).

La connexion des mini et micro-réseaux est nécessaire sur OnSSET ; sur la durée, il sera impératif de les coupler afin de créer des réseaux de plus grande envergure, et ainsi tirer profit des infrastructures existantes à mesure que l'électrification s'étendra et que la consommation électrique augmentera. De nombreuses zones de RDC sont extrêmement éloignées des trois réseaux centraux existants, et constituent des lieux

adaptés pour l'installation de mini-réseaux pouvant être alimentés par diverses technologies, dont l'énergie hydraulique. A long terme, ces mini-réseaux pourraient être raccordés à des réseaux plus importants, ce qui améliorerait leur fiabilité, leur coût ainsi que le partage des ressources/commerce énergétique, par exemple. Ils pourraient également puiser dans de plus grands sites hydroélectriques — plutôt qu'exploiter les options jugées plus économiques dans le cas de mini-réseaux isolés.

Connecter le modèle centralisé de RDC et OnSSET

Le modèle géospatial et le modèle centralisé peuvent être développés de façon à fonctionner séparément, mais il est également possible de les coupler afin de créer un modèle hybride. Connecter les deux modèles permettrait de transférer les résultats d'un modèle en tant qu'entrée dans le second modèle. Concrètement, les résultats portant sur les prix du réseau (issus d'OSeMOSYS) et la demande probable du réseau (issue d'OnSSET) seront partagés entre les deux modèles afin d'améliorer la fiabilité de leurs résultats respectifs.

A l'heure actuelle, OnSSET n'est pas capable d'optimiser le mix technologique pour l'extension du réseau. Par exemple, l'outil ne peut pas déterminer quelle solution d'approvisionnement électrique serait optimale entre l'hydraulique, l'éolien, le solaire, etc. L'un des produits du modèle OSeMOSYS est un plan d'extension à moindre coût, indiquant le mix technologique optimal pour l'approvisionnement électrique à travers l'extension du réseau national. OSeMOSYS est capable de tirer parti de plus grandes centrales, ce qui peut contribuer à réduire les coûts pour l'optimisation du système d'alimentation central. En tant que modèle d'optimisation géospatiale à haute résolution, l'outil OnSSET permet, lui, d'optimiser d'autres options d'électrification en plus du réseau centralisé.

OnSSET ne dispose pas des fonctionnalités nécessaires pour optimiser les technologies utilisées pour l'approvisionnement électrique via le réseau central, mais l'outil a besoin d'une estimation du prix de l'électricité fournie par le réseau pour l'optimisation de sa trajectoire d'électrification (que celle-ci soit étendue avec le réseau central ou d'autres options décentralisées). Ainsi, OSeMOSYS sera utilisé pour générer une estimation du prix de l'électricité par unité d'électricité produite en fonction de son optimisation du réseau d'approvisionnement électrique central. Le prix unitaire de l'électricité du réseau sera ensuite transféré sur OnSSET afin qu'il fournisse une fourchette de prix plus réaliste du coût unitaire de l'électricité fournie par le réseau national.

Le produit d'OnSSET sera donc un plan à moindre coût pour l'approvisionnement électrique grâce à l'extension du réseau, aux systèmes autonomes ou aux mini-réseaux. OnSSET sera donc utilisé pour étudier spatialement l'échelle optimale de chaque solution d'approvisionnement (réseau, mini-réseau ou système autonome) en RDC à différentes échéances. La quantité d'électricité nécessaire pour alimenter les communautés (électrifiées par OnSSET grâce au réseau) sera ensuite transférée sur OSeMOSYS pour un nouveau cycle d'analyse. Cet échange d'informations se poursuivra jusqu'à l'atteinte d'un équilibre.

La Figure 3.5 illustre le cadre proposé pour le couplage des deux modèles. Les données requises par les deux modèles comprennent certaines données technologiques et liées aux ressources, mais aussi les éléments permettant d'estimer la demande électrique des ménages et autres usages productifs, ainsi que les profils de demande. Certains besoins en données sont similaires aux deux modèles, mais celles-ci doivent être renseignées dans des formats différents. OSeMOSYS requiert des données agrégées, alors qu'OnSSET exige un haut niveau de ventilation spatiale.

Lors des premiers essais avec OnSSET, il est possible d'utiliser plusieurs estimations de coûts du réseau ; cela permettra de déterminer une première estimation réaliste de la demande devant être approvisionnée par le réseau (avec OSeMOSYS).

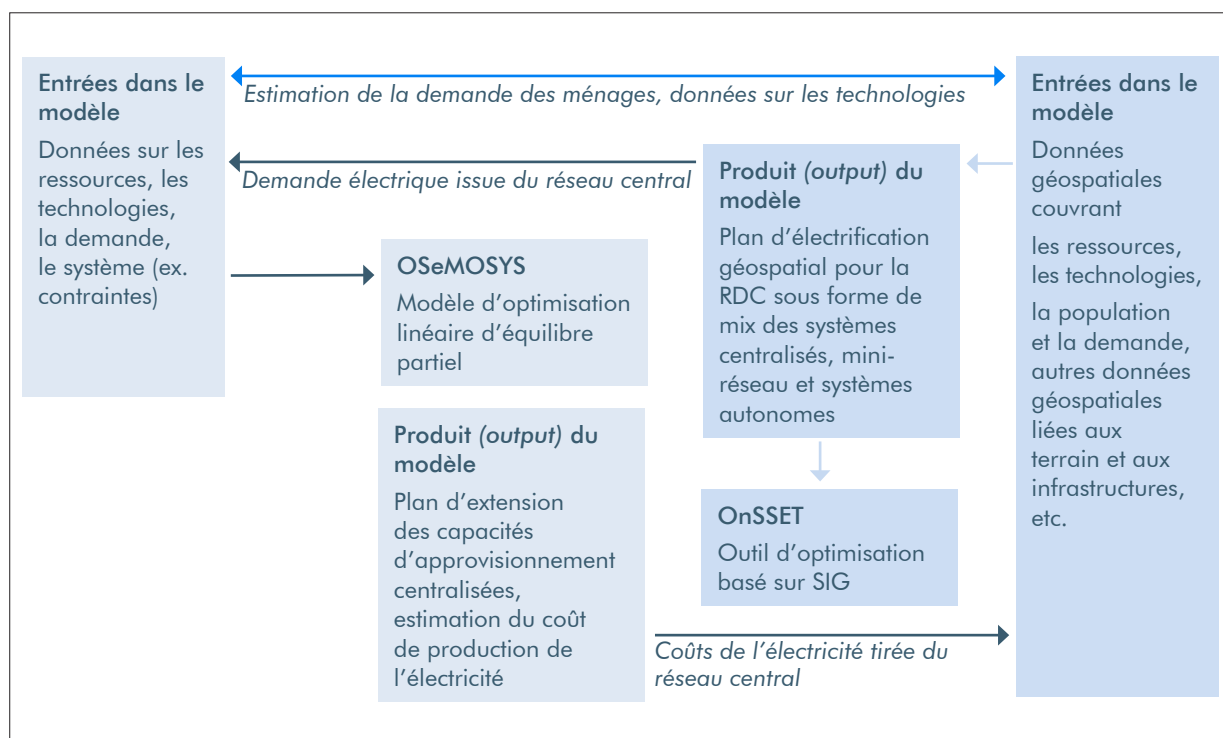


Figure 3.5 Connexion envisagée entre les modèles OSeMOSYS et OnSSET

Source : UCT

Connecter le modèle centralisé de RDC au réseau régional

OSeMOSYS permet le commerce d'électricité entre la RDC et ses pays voisins membres des pôles énergétiques régionaux africains. Ce commerce peut être simulé ou optimisé. La simulation impliquerait de fixer une limite aux importations et exportations d'électricité, tandis que l'optimisation permettrait au modèle congolais de déterminer l'intérêt d'une éventuelle importation d'électricité en fonction de son coût. Le commerce entre Etats peut présenter l'avantage de baisser le coût de l'électricité tout en favorisant la coopération régionale et la fiabilité du réseau électrique.

3.7.4 Modèle géospatial de demande des ménages

Le produit du modèle de demande des ménages sera utilisé comme donnée entrante sur OnSSET et OSeMOSYS. Le produit du modèle de demande fournira tout d'abord des estimations de la consommation énergétique des ménages et des profils de charge pour les différents usages électriques, à différents niveaux de possession d'appareils. Dans un second temps, ces estimations seront redimensionnées afin d'intégrer le modèle. Ce changement d'échelle reposera sur les ménages identifiés dans les différentes « cellules » (représentant la résolution sur OnSSET), sur les caractéristiques des ménages recensés dans ces cellules (ex. taille et revenus du ménage) et sur les caractéristiques de la zone dans laquelle se situent ces ménages.

Les profils de charge électrique des ménages seront déterminés afin d'obtenir une ventilation temporelle précise de la demande électrique journalière des ménages. Par exemple, ils peuvent être élaborés de façon à représenter un profil moyen journalier avec un pas de temps horaire (ou demi-horaire). On peut envisager de répéter ces profils tout au long de l'année, ou d'en déduire un profil journalier moyen en hiver et en été. Le niveau de ventilation des profils (ex. le nombre de périodes temporelles utilisées) dépendra des données de l'enquête et des niveaux de possession d'appareils électriques modélisés. Un pas de temps imprécis (admettons, des intervalles d'une heure) pourrait induire une surestimation de la consommation

(en kWh) ou une sous-estimation de la demande (en kW). Par exemple, un appareil qui consomme 1 kW/h d'électricité par jour équivaldrait à une consommation de 1 kW si le profil est désagrégé à l'heure, mais à 2 kW s'il est désagrégé à la demi-heure. Dans le premier cas, la capacité nécessaire pour approvisionner la demande est peut-être sous-estimée, tandis que dans le second, la quantité d'énergie nécessaire pourrait être surestimée. L'une des difficultés dans le développement du modèle de la demande sera donc de surmonter ce type de problèmes.

Nous avons l'intention de développer les profils de demande selon une méthode similaire à celle conçue par RLI et traitée dans l'article « *Overcoming the Bottleneck of Unreliable Grids: Increasing Reliability of Household Supply with Decentralized Backup Systems* » (Hoffman et al., 2020). Cette méthode combine l'ensemble de la représentation stochastique (aléatoire) des appareils allumés ou éteints au cours de différentes périodes de la journée, avec une fonction permettant de déterminer que les appareils ne s'allument pas alors qu'ils ne sont pas utilisés. La détermination binaire du statut des appareils (allumé ou éteint) repose sur la fréquence d'allumage de ceux-ci au cours d'une journée ou d'une semaine et sur la durée de ces événements (ou durée présumée d'allumage de ces appareils), dont le total représente le nombre d'heures pendant lesquelles les appareils sont présumés allumés chaque jour.

Dans le modèle de la demande, la possession d'appareils électriques détermine les niveaux de demande, tandis que la durée d'utilisation des appareils établit la consommation. L'enquête ou la revue documentaire peuvent être utilisées afin de fournir une estimation des taux probables de possession d'appareils au fil des années suivant l'électrification, ainsi que leur fréquence ou durée d'utilisation. Les niveaux de demande modélisés seront éclairés par les estimations d'efficacité des appareils, et notamment par l'éventuelle alimentation des appareils par courant alternatif (CA) ou courant continu (CC).

Les niveaux de demande doivent aussi pouvoir représenter les évolutions de la demande au fil du temps, par exemple, si les conditions du ménage ou ses appareils évoluent (ex. le ménage passe à un éclairage plus efficace).

Pour ce qui est des entreprises, les données secondaires seront exploitées pour identifier les types d'entreprises situées dans les villages à travers la RDC. Les types d'entreprises identifiés seront associés aux taux d'utilisation des appareils et aux estimations de leur durée d'utilisation d'après les meilleures sources documentaires disponibles. Ces estimations feront office de données entrantes pour l'estimation stochastique de la charge.

Suite à l'analyse du profil de charge caractéristique, il est sera nécessaire d'estimer la composition des villages en fonction de la proportion de charges résidentielles (groupes à faibles et hauts revenus), commerciales, productives et publiques à l'aide de données secondaires. Cette composition de la clientèle sera par la suite utilisée en combinaison des profils de charge caractéristiques pour établir une estimation globale de la courbe de charge du village. Ce procédé devra être mené dans tous les villages de RDC.

Les incertitudes liées à la demande devront être examinées par rapport au niveau de confiance dans l'estimation de la demande de villages de différentes tailles et situés dans différentes régions congolaises. L'analyse de l'incertitude indiquera s'il est nécessaire de collecter de plus amples données d'enquêtes, et fournira une indication sur le ratio coûts-avantage lié à l'amélioration de la précision.

3.7.5 Outil de visualisation

Les résultats de l'exécution des outils de modélisation seront affichés sur un outil de visualisation. Cet outil sera utilisé pour présenter les données exploitées pour exécuter les modèles, ainsi que les meilleures solutions d'électrification selon les scénarios pré-exécutés sélectionnés avec les acteurs locaux. Les principaux critères pour l'élaboration de l'outil de visualisation sont les suivants :

1. Outil interactif permettant à l'utilisateur de concevoir son scénario ;
2. Ne demande pas d'importantes ressources informatiques (ex. mémoire RAM, internet...)
3. Présentation visuelle des résultats engageante et facile à interpréter ;
4. Facilité de téléchargement des résultats et des données ;
5. Facilité de maintenance pour les partenaires congolais (après avoir bénéficié d'un renforcement de capacités)

Afin de garantir ces critères, il sera nécessaire de :

- Développer un outil capable d'extraire les résultats d'une base de données en fonction des paramètres configurés par l'utilisateur ;
- Mener des discussions avec les acteurs pour, d'une part, leur expliquer le fonctionnement des outils de modélisation utilisés pour développer les résultats et les données sur lesquelles reposent le modèle et les sources de données, et d'autre part identifier d'éventuelles limites à prendre en compte lors de l'interprétation des résultats ;
- Mener des tests sur un ensemble de paramètres entrés dans l'outil.

En vue de garantir ce le critère n°3, nous avons mis au banc d'essai plusieurs plateformes d'affichage de résultats de scénarios géospatiaux lors de la phase 1 du projet. Nous avons décidé que l'élaboration de l'outil de visualisation reposerait principalement sur les composantes tirées de la Global Electrification Platform de la Banque mondiale et des Plans d'électrification rurale au Nigéria de RLI.

3.8 Consultations avec les partenaires potentiels du projet

En amont de la phase 1, nous avons identifié certains partenaires potentiels :

- KTH-dESA et RLI ont été identifiés comme partenaires potentiels pour la modélisation des systèmes énergétiques et de l'analyse de la demande. Il s'agit en effet d'acteurs majeurs dans le développement d'outils en open-source et leur application pour la planification de l'électrification en Afrique.
 - ▶ L'institut royal de technologie de Stockholm KTH, division de l'Analyse des systèmes énergétiques (dESA), <https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/desa/desa-news>
 - ▶ Institut Reiner Lemoine à Berlin, <https://reiner-lemoine-institut.de/en/research-fields/off-grid-systems/>

En conclusion de ce chapitre, nous vous présentons brièvement ces deux institutions.

3.8.1 Aperçu de RLI et KTH-DESA

L'**Institut Reiner Lemoine (RLI)** utilise plusieurs outils de modélisation pour conduire des analyses d'électrification personnalisées. Celles-ci comprennent souvent OEMOF ainsi qu'un code de modèle personnalisé pour des projets individuels.

Les chercheurs sont des universitaires et professionnels qualifiés dans les domaines des :

- Outils liés aux systèmes d'information géographique (SIG) et à l'imagerie satellite ;
- Systèmes d'énergies renouvelables et simulation des systèmes énergétiques ;
- Gestion de projet ;
- Technologies de l'information ;
- Economie.

Le RLI dispose de trois groupes de recherche : Systèmes hors-réseau, Transformation des systèmes énergétiques et Mobilité avec énergies renouvelables.

L'institut RLI regroupe des experts en planification géospatiale des systèmes énergétiques, notamment en planification précise des réseaux de transmission et de distribution, en mini-réseaux alimentés par des technologies hybrides, et en outils de visualisation interactifs en ligne. RLI a développé des outils en open-source pour soutenir la transformation énergétique et l'électrification hors-réseau, et a appliqué ces outils dans divers plusieurs pays d'Afrique. L'institut a notamment développé OEMOF, un cadre de modélisation énergétique modulaire et générique en open-source afin d'analyser les systèmes d'approvisionnement énergétique (<https://oemof.readthedocs.io/en/v0.0.4/overview.html>). OEMOF comprend neuf « modules » primaires, ou bibliothèques. La suite de modules OEMOF offre de multiples fonctionnalités pouvant être combinées pour créer des modèles personnalisés. RLI a également développé des plateformes de données énergétiques personnalisées et des outils de visualisation pour présenter ces résultats.

Parmi les travaux de RLI, la composante d'analyse des profils de demande énergétique (basée sur la possession et l'usage d'appareils électriques) et de la capacité des ménages à payer l'électricité et les services énergétiques constitue un aspect particulièrement pertinent pour notre étude. L'institut a développé des instruments d'enquête afin de mener ces analyses et de les appliquer en Afrique. La méthode suivie par RLI lors de la conduite de ses analyses d'électrification au niveau des communautés et à l'échelle nationale leur permet de déterminer où est localisée la population, quel est son statut d'électrification, quelle pourrait être la future demande électrique, et quels sont les coûts et opportunités des différentes options d'électrification. Exemple de leurs travaux : <http://rrep-nigeria.integration.org/>.

La **division de l'analyse des systèmes énergétiques de KTH (KTH-dESA)** rassemble des experts en modélisation géospatiale des systèmes énergétiques en Afrique. KTH-dESA développe des outils et des méthodologies appliqués à la planification électrique et à l'électrification. Ils ont notamment développé les modèles en open-source ONSET, OSeMOSYS et TEMBA. KTH est également le créateur de la *Global Electrification Platform*. KTH applique ses outils développés en interne aux systèmes énergétiques et aux études des liens (des études axées sur les interactions entre l'énergie et d'autres systèmes, ex. systèmes hydrauliques) afin d'analyser les impacts politiques et la durabilité dans de nombreux pays. L'institut suédois justifie d'expériences en formation, en renforcement des capacités et en consultation des acteurs.

Une formation est disponible pour plusieurs outils de KTH dans le cadre du programme Modelling Platform for Africa programme (EMP-A). DESA a également publié la *Global Electrification Platform* (GEP), unique dans sa présentation de scénarios d'électrification dans 46 pays africains dont les niveaux d'accès à l'électricité des ménages sont inférieurs à 90 %. La GEP intègre des scénarios pour la RDC faisant état des investissements nécessaires et de l'accroissement des capacités énergétiques. Le Modèle de base de l'énergie électrique en Afrique (TEMBA) est un modèle d'approvisionnement électrique dans lequel les systèmes d'approvisionnement et les réseaux de transmission nationaux sont explicitement représentés, ce qui permet d'optimiser la planification énergétique à l'échelle du continent, plutôt qu'au niveau de pays et régions individuelles.

Références

- De Carolis, J. F., Hunter, K., & Sreepathi, S. (2012) The case for repeatable analysis with energy economy optimization models. *Energy Economics*, 34(6), 1845–1853. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.07.004>
- Hall, L. M. H., & Buckley, A. R. (2016) A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*, 169, 607–628. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044>
- Herbst, A., Toro, F., Reitze, F., & Jochem, E. (2012) Introduction to Energy Systems Modelling. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, 148(2), 111–135. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/bf03399363>
- Hiremath, R. B., Shikha, S., & Ravindranath, N. H. (2007) Decentralized energy planning; modeling and application – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 729–752. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.07.005>
- Jebaraj, S., & Iniyan, S. (2006) A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 281–311. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.004>
- Klein, M., Frey, U. J., & Reeg, M. (2019) Models within models—Agent-based modelling and simulation in energy systems analysis. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(4). Disponible sur : <https://doi.org/10.18564/jasss.4129>
- Lopion, P., Markewitz, P., Robinius, M., & Stolten, D. (2018) A review of current challenges and trends in energy systems modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96(July), 156–166. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.045>
- Mutingi, M., Mbohwa, C., & Kommula, V. P. (2017) System dynamics approaches to energy policy modelling and simulation. *Energy Procedia*, 141, 532–539. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.071>
- Neshat, N., Amin-Naseri, M. R., & Danesh, F. (2014) Energy models: Methods and characteristics. *Journal of Energy in Southern Africa*, 25(4), 101–111.
- Pfenninger, S., Hawkes, A., & Keirstead, J. (2014) Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 74–86. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003>
- Ringkjøb, H. K., Haugan, P. M., & Solbrekke, I. M. (2018) A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96 (Août), 440–459. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.002>
- Subramanian, A. S. R., Gundersen, T., & Adams, T. A. (2018) Modeling and simulation of energy systems: A review. *Processes*, 6 (12). Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/pr6120238>
- Wei, Y. M., Wu, G., Fan, Y., & Liu, L. C. (2006) Progress in energy complex system modelling and analysis. *International Journal of Global Energy Issues*, 25(1–2), 109–128. Disponible sur : <https://doi.org/10.1504/ijgei.2006.008387>

CHAPITRE 4.

Analyse initiale de la planification spatiale de l'électrification grâce à l'outil OnSSET

➤ 4.1 Introduction

Lors de la phase 1 de notre étude, nous avons mené une analyse spatiale d'optimisation de l'électrification à l'aide du modèle en open-source OnSSET. Cette analyse a eu lieu avant la première consultation avec les acteurs nationaux, ce qui nous a permis de leur présenter un exemple tangible de modélisation spatiale d'un système électrique spécifiquement appliqué à la RDC. La présentation visuelle des résultats de cette modélisation spatiale a plusieurs avantages : elle nous a permis de démontrer aux acteurs locaux le potentiel et l'utilité de cet outil, de discuter des opportunités et des contraintes de ce type d'analyse pour la planification de l'électrification en RDC, de recueillir leurs points de vue sur cette approche, sur l'utilité de ces produits et sur la validité de nos hypothèses, mais aussi de partager des données intéressantes. La participation et les présentations effectuées ont également fait office d'exercices de renforcement de capacités pour les éventuels « utilisateurs finaux » des produits du projet. Ce renforcement de capacités a pu avoir lieu grâce à des explications détaillées du processus de modélisation, des objectifs et des aspirations de notre projet³⁷.

L'élaboration du modèle OnSSET et l'étude de ses résultats a également constitué une expérience pratique pour l'équipe chargée de la conception et mise en oeuvre du modèle spatial d'électrification. Cela a permis aux membres d'identifier les difficultés à venir en termes de modélisation, de données et de renforcement des capacités. Le modèle élaboré sert également de point de départ, qui devra l'objet d'améliorations continues dans les prochaines phases du projet.

Ce chapitre présente les données et la méthodologie utilisées lors de la première utilisation de l'outil OnSSET pour la RDC. Nous y exposerons les principaux résultats et enseignements tirés de la modélisation et du processus global, ainsi que des recommandations d'amélioration pour les prochaines étapes.

Pour cette première analyse, nous avons utilisé des données accessibles au public, et n'avons apporté que des modifications mineures au code OnSSET. Notre modélisation OnSSET n'a été complétée d'aucun autre outil — de type modèles de réseaux centralisés à long-terme ou modèles d'investissement pour des pools énergétiques (ex. OSEMOSYS ou TIMES), outils de traçage détaillé du réseau de transport ou de distribution

³⁷ Voir : <http://www.onsset.org/>

(ex. NetworkPlanner), ou autre outil de modélisation détaillée de mini-réseaux (ex. HOMER). Nous n’y avons pas non plus inclus d’analyse détaillée de la demande (reposant sur les données tirées de notre enquête énergétique, par exemple), ni d’examen poussé des ressources énergétiques disponibles en dehors des données satellitaires et topographiques modélisées. Ces études, ainsi que l’intégration de nouveaux outils de modélisation sont prévues dans les prochaines phases du projet, et décrites plus en détail dans le chapitre 3. Au cours de ces travaux, nous avons identifié de nombreux obstacles et tiré de précieux enseignements qui nous ont permis d’affiner les domaines à approfondir dans les prochaines phases.

➤ 4.2 Utilisation du modèle OnSSET

OnSSET est un outil de modélisation ascendant (*bottom-up*) utilisé pour estimer les solutions électriques les plus économiques pour un pays ou une région donnée. Outil de modélisation spatiale, il permet d’apporter des solutions d’électrification individuelles pour différents lieux (ou groupement de ménages) du territoire modélisé.

Autrement dit, OnSSET permet d’estimer la solution d’électrification optimale pour chaque lieu spécifié sur le modèle, en tenant compte de caractéristiques spatiales liées à l’offre et la demande énergétique. Ces caractéristiques spatiales comprennent la densité et la répartition démographique, la proximité des réseaux routiers et de transmission électrique, mais aussi le potentiel d’énergies renouvelables. Tous ces éléments ont un impact considérable sur le coût final et l’applicabilité des différentes solutions d’accès à l’électricité.

Au fil de ce chapitre, nous décrivons le processus suivi afin de concevoir et mettre en oeuvre le modèle OnSSET en RDC :

1. Des données géospatiales sur la localisation de la population sont utilisées par le modèle pour estimer le nombre de ménages et la densité des ménages dans chaque localité. Des données sur la luminosité nocturne, ou d’autres facteurs, comme la proximité des réseaux électriques ou routiers, sont également utilisés pour développer une estimation binaire de l’accès à l’électricité en différents lieux. A cette étape, nous avons également défini les données détaillées de divers scénarios, par exemples des projections démographiques, des objectifs d’électrification (en pourcentage) et des estimations des cibles de demande énergétique.
2. Ce modèle nous a ensuite permis d’estimer la demande en énergie de la population de chaque localité en fonction d’une estimation de l’usage électrique de chaque ménage (la quantité d’électricité consommée par chaque ménage sur une journée) multipliée par le nombre de personnes/de ménages recensés dans la localité.
3. Notre modèle permet de choisir parmi trois technologies de fourniture électrique aux ménages (voir Figure 4.1 ci-dessous) :
 - a. Extension du réseau grâce à l’électricité générée par des centrales électriques centralisées ;

- b. Mini-réseaux³⁸, c'est à dire de petits systèmes de production et de distribution permettant de fournir de l'électricité à plusieurs consommateurs grâce à des ressources énergétiques locales et par le biais d'un réseau de distribution local ;
- c. Systèmes autonomes, à savoir de petits systèmes électriques non raccordés au système de distribution et fournissant de l'énergie à des appareils uniques³⁹, à des ménages individuels⁴⁰ ou à des installations ou bâtiments communautaires spécifiques.

L'estimation de la demande électrique dans chaque localité, couplée à d'autres paramètres spatiaux (ex. distance du réseau) et au coût de chaque technologie sont ainsi exploités pour calculer le coût d'un approvisionnement électrique à l'aide de chacune des trois technologies (extension du réseau, mini-réseau ou système autonome) dans chaque localité.

4. Pour chaque localité, le modèle compare le coût d'une extension du réseau principal, de l'installation d'un mini-réseau et d'un système autonome afin de déterminer la solution la plus rentable. La sélection de la technologie d'approvisionnement électrique repose donc sur la comparaison entre le coût d'un approvisionnement via le réseau (qui implique des investissements dans des infrastructures de transmission et de distribution électrique) et le coût de mini-réseaux ou de systèmes autonomes. Bien que ces derniers systèmes ne nécessitent aucun investissement dans des infrastructures de réseau, ils ne peuvent bénéficier des économies d'échelle générées par les grandes infrastructures, capables d'alimenter de grandes agglomérations. Si les avantages l'emportent sur les coûts, l'extension du réseau sera l'option retenue. Dans le cas contraire, les mini-réseaux et autres solutions autonomes seront privilégiés.

L'estimation du coût d'approvisionnement électrique dépend donc largement des coûts supposés des infrastructures nécessaires à la production, au transport et au stockage électrique dans le cadre du réseau, de mini-réseaux et de systèmes autonomes. La disponibilité de ressources énergétiques (hydraulique, éolienne, solaire) dans le pays est également prise en compte, tout comme la densité de population approvisionnée (qui représente l'ampleur de la demande).

5. Les résultats du modèle OnSSET sont ensuite traités et chargés sur QGIS ou toute autre plateforme de visualisation par SIG.

³⁸ L'Alliance pour l'électrification rurale définit un micro-réseau comme un réseau dont la puissance est comprise entre 1 et 10 kW, et un mini-réseau entre 10 kW et 10 MW (voir www.ruralelec.org). La terminologie exacte utilisée pour distinguer micro-réseaux et mini-réseaux ne fait pas l'unanimité et est souvent utilisée de manière interchangeable. Seul consensus : « micro » est toujours plus petit que « mini », et ces deux types de réseaux doivent pouvoir fonctionner indépendamment du réseau principal.

³⁹ Les appareils individuels comme les lampes solaires et/ou les chargeurs de téléphone portables sont généralement considérés comme des systèmes solaires « pico ».

⁴⁰ Les systèmes pour ménages individuels sont souvent appelés « systèmes solaires à usage domestiques (SHS) » car l'énergie solaire est la source énergétique la plus courantes, mais d'autres sources (hydrauliques, diesel, vent ou biomasse) sont couramment utilisées si les ressources locales le permettent.

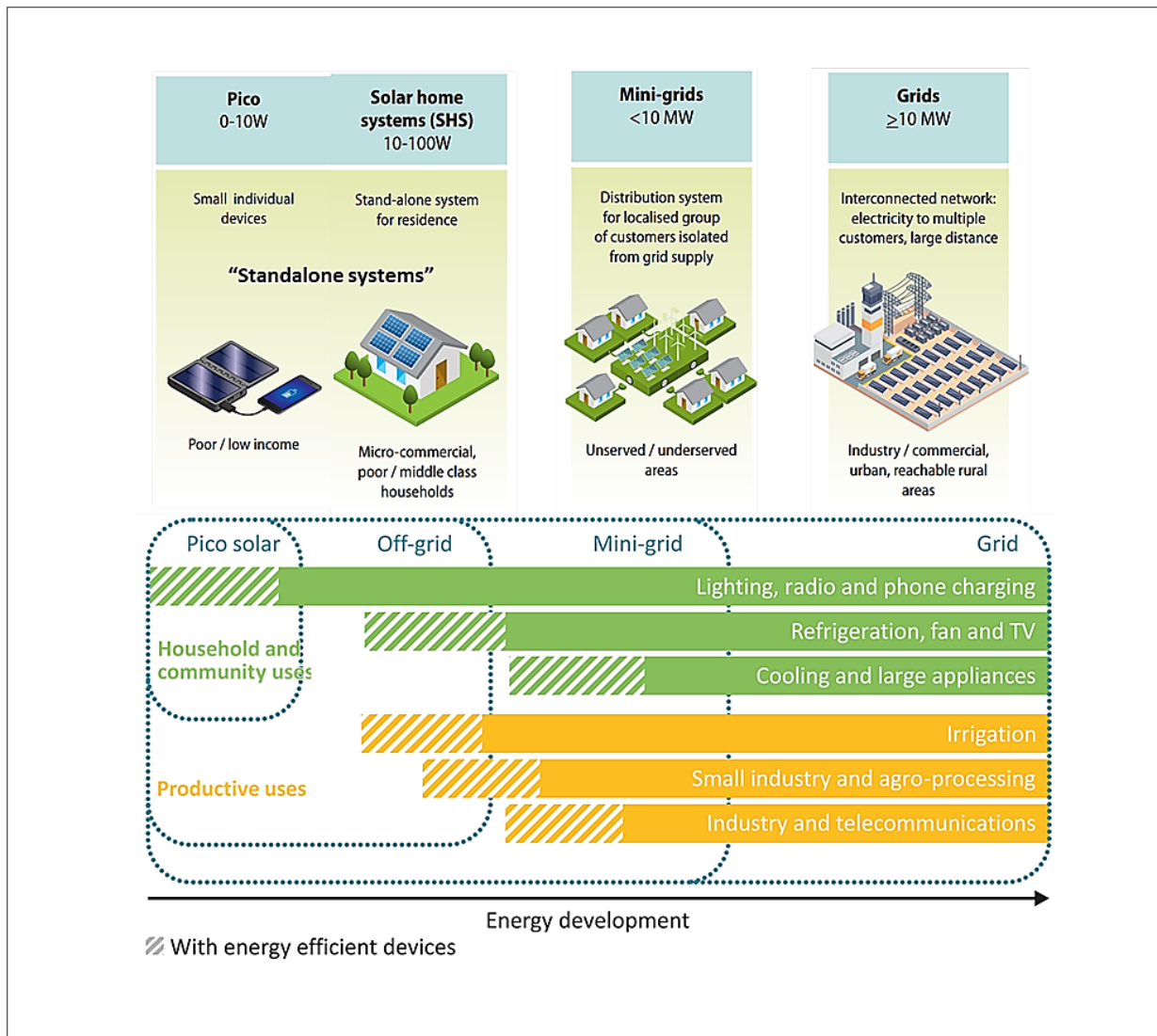


Figure 4.1 Options d’approvisionnement électrique et types de services énergétiques alimentés

Source : adapté de l’AIE, 2017

La Figure 4.1 offre une représentation simplifiée du modèle OnSSET. La solution technologique optimale pour chaque plan d’électrification est déterminée en fonction d’un ensemble de données démographiques et liées à la demande dans chaque localité, ainsi que des coûts spécifiques à chaque technologie et de la disponibilité de ressources.

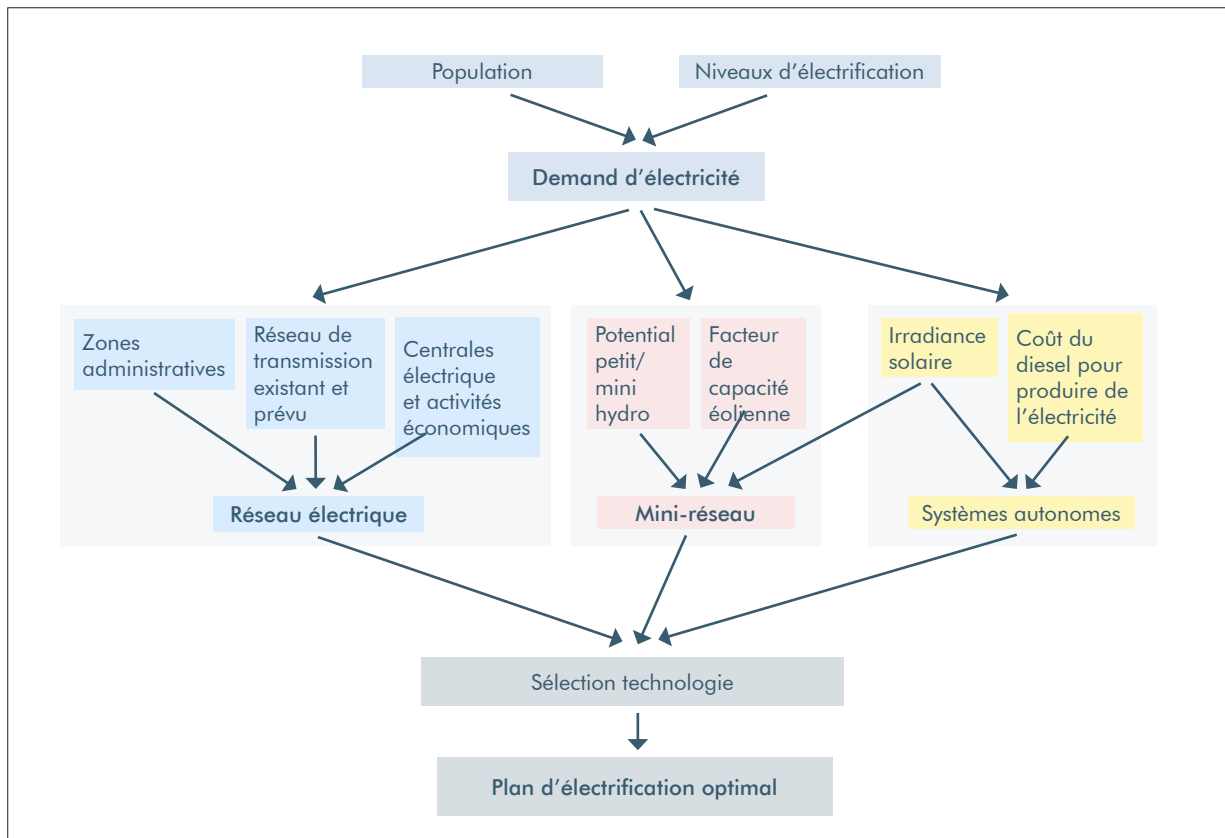


Figure 4.2 Cadre de la boîte à outils Open Source Spatial Electrification (OnSSET)

Source : www.onssetf.org

➤ 4.3 Description du processus d'élaboration du modèle OnSSET RDC présenté aux acteurs

Par le passé, les Nations Unies ont déjà publié un modèle OnSSET⁴¹ pour la RDC, mais faute d'accès aux données et aux codes utilisés, nous n'avons pas pu l'exploiter dans le cadre de notre analyse. D'autres écueils nous ont détourné du modèle de l'ONU : l'utilisation d'une résolution spatiale imprécise (10×10 km) sur le territoire congolais, ainsi qu'une projection utopiquement basse du prix du diesel—qui oriente les résultats du modèle vers une électrification congolaise reposant majoritairement sur des systèmes autonomes alimentés au diesel.

Dans le cadre de notre propre modélisation OnSSET, nous avons utilisé une résolution spatiale de 1×1 km. Cela représente 118 000 cellules habitées à l'échelle de la RDC, pour lesquelles nous avons renseignées les valeurs de données spatiales présentées ci-dessous.

Notre équipe a ensuite suivi le processus suivant afin d'élaborer le modèle :

1. Formation sur OnSSET— participation à la formation à Trieste.

⁴¹ http://un-modelling.github.io/electrification-paths-visualisation/country.html?iso3=COD&tier=3&diesel_price=nps

2. Collecte des données— notamment par l’examen de jeux de données pouvant alimenter les données spatiales et non-spatiales nécessaires à OnSSET, et la vérification de leur disponibilité à l’échelle de la RDC. Le jeux des données utilisées dans notre modèle sont énumérées dans le Tableau 4.1. L’outil OnSSET nécessite en outre des données non-spatiales pour définir chaque scénario. Ces données peuvent inclure, par exemple, la croissance de la population globale, les taux d’urbanisation ou les objectifs d’électrification en pourcentage.

Tableau 4.1 Sources des données utilisées pour l’élaboration du modèle OnSSET sur la RDC

Type de données	Jeux de données
Demande	
Répartition démographique	EC GHSL—2016 — 1 × 1 km
Eclairage nocturne	Rapport annuel VIIRS 2016
Offre	
Energie solaire (Tableau KTH : ressource en rayonnement solaire)	Globalsolaratlas.info version 1 Résolution 1 × 1 km
Energie éolienne (Tableau KTH : vitesse du vent)	Globalwindatlas.info version 1 — Résolution 1 × 1 km
Energie hydraulique	KTH
Infrastructures énergétiques et de transports	
Infrastructures de transports	Routes : OCHA
	Durée des trajets : Weiss et al. (2018)
Infrastructures électriques	Réseaux électriques existants : jeux de données de la Banque mondiale et d’Open Street Map
Coûts	Hypothèses par défaut d’OnSSET (voir ci-dessous)
Données relatives au terrain	
Occupation des sols	Global Land Cover Facility
Elevation	SRTM 90 m DEM Digital Elevation Database
Délimitations administratives	Référentiel Géographique Commun

3. Saisie des données sur OnSSET, en deux étapes :
 - a. Conversion des jeux de données en jeux de données QGIS constituées de fichiers CSV, afin qu’ils puissent être convertis en un format exploitable par OnSSET. Le format du fichier est représenté dans la Figure ci-dessous : chaque ligne représente une cellule de 1 × 1 km, et chaque colonne une valeur spatiale spécifique.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	X_deg	Y_deg	Pop	Elevation	LandCover	NightLights	Slope	GHI	TravelHours	WindVel	SubstationDist	RoadDist	GridDistCurrent	GridDistPlan	Hydropower
2	29.027	-13.394	34.284	1391	8	0	1.611	2103	4.783333333	3.5101981	254.1811331	16.51321779	181.8465251	181.8465251	108
3	29.026	-13.386	99.439	1378	8	0	1.686	2104	4.55	3.7532763	253.4650425	15.62680111	181.1783215	181.1783215	108
4	29.238	-13.37	44.793	1328	8	0	0.26	2109	4.933333333	3.1943121	268.1296891	17.07760053	197.4126401	197.4126401	712
5	29.014	-13.354	53.978	1359	8	0	0.982	2113	3.8	3.3494153	249.8709408	12.38671768	177.716929	177.716929	108
6	29.217	-13.354	56.035	1330	8	0	1.031	2111	5.3	3.2442276	265.1966591	15.61833551	194.4623279	194.4623279	712
7	29.175	-13.337	88.301	1322	8	0	0.806	2113	6.066666667	3.3343353	260.6907211	14.89853208	189.7900951	189.7900951	712
8	29.103	-13.329	21.521	1319	8	0	0.457	2115	6.466666667	3.2303588	254.5647542	10.38546658	183.2112872	183.2112872	108
9	28.968	-13.288	42.855	1300	8	0	0.645	2130	3.6	3.2411656	241.2135309	9.142543915	169.2073057	169.2073057	108
10	28.977	-13.272	34.183	1301	8	0	0.962	2132	3.65	3.175446	240.5485878	7.276080971	168.7291846	168.7291846	108
11	28.946	-13.264	2.7926	1314	8	0	1.55	2135	2.75	3.4283986	237.5962798	8.629818361	165.6133866	165.6133866	108

Figure 4.3 Instantané des données spatiales saisies sur OnSSET par zone peuplée de 1x1 km

Source : UCT via OnSSET 2018 - résultats préliminaires

- b. Modification du code Python d'OnSSET afin d'y intégrer les nouveaux jeux de données du modèle. En l'état, il n'existe aucune interface permettant de saisir les données dans le modèle ; l'une des contraintes de la conception du modèle OnSSET a donc été de modifier le code Python à cette fin. Nous avons par exemple dû modifier le code afin d'indiquer au modèle où étaient stockées les données sur l'ordinateur.
4. Définition des scénarios — voir sous-section 4.4 « Données relatives aux scénarios et aux technologies ».
5. Lancement de la modélisation et analyse des résultats : le produit de l'outil OnSSET est un fichier CSV (Comma Separated Value), similaire au fichier d'origine, sauf que celui-ci contient de nouvelles informations. Pour chaque cellule, le fichier produit indique si un point donné a déjà accès à l'électricité ; si ce n'est pas le cas, il propose le moyen optimal de l'électrifier.
6. Adaptation des données tabulaires en résultats visuels sur QGIS. Les résultats visuels présentés dans la section 4.3 constituent le produit final du processus.

➤ 4.4 Hypothèses des scénarios et paramètres technologiques

L'année de référence de notre modèle est 2015, et l'année finale de l'analyse, 2030. S'il existe aujourd'hui des versions d'OnSSET plus récentes permettant une analyse de l'électrification à différents échelons (permettant par exemple de définir des objectifs d'électrification croissants pour 2025 et 2030), la version disponible à l'époque de notre étude ne nous permettait de définir qu'une cible correspondant à l'année de fin de l'analyse.

Les hypothèses relatives à la croissance démographique et au taux d'urbanisation en 2015 et en 2030 sont présentées dans le Tableau 4.2. Nous avons fixé un objectif d'électrification à 100 % en 2030, contre 16 % en 2015.

Tableau 4.2 Projections démographiques et objectif d'électrification

Facteurs	Unités	2015	2030
Population (ONU 2018)	Millions	76,19 m	119,7 m
Part de la population urbaine (ONU 2017)	Pourcentage	43 %	57 %
Objectif du taux d'électrification (total/urbain/rural)	Pourcentage	16 % / 35 % / 1 %	100 %
Taille des ménages (urbain/rural) (ONU 2017)	Personnes/ménage	6 / 7	6 / 7
Taux d'actualisation	Pourcentage	12 %	12 %

Source : Sources citées ci-dessus ou, par défaut, KTH OnSSET 2018.

Pour notre modèle, nous avons utilisé le Cadre multi-niveau (MTF) de la Banque mondiale afin de déterminer les niveaux de demande cibles. Le MTF est un moyen de mesurer l'accès énergétique plus élaboré qu'une simple mesure binaire de type « connecté » ou « non connecté » à l'électricité. Ce cadre définit six niveaux d'accès à l'énergie, en fonction d'une combinaison de sept déterminants : 1) capacité de pointe 2) disponibilité (durée) 3) fiabilité 4) qualité 5) accessibilité économique 6) légalité 7) santé et sécurité (Bhatia & Angelou, 2015). La Figure ci-dessous présente une version simplifiée de ce cadre en illustrant deux des critères cités : la disponibilité (le nombre d'heures avec électricité) et la capacité de pointe (les appareils alimentés).

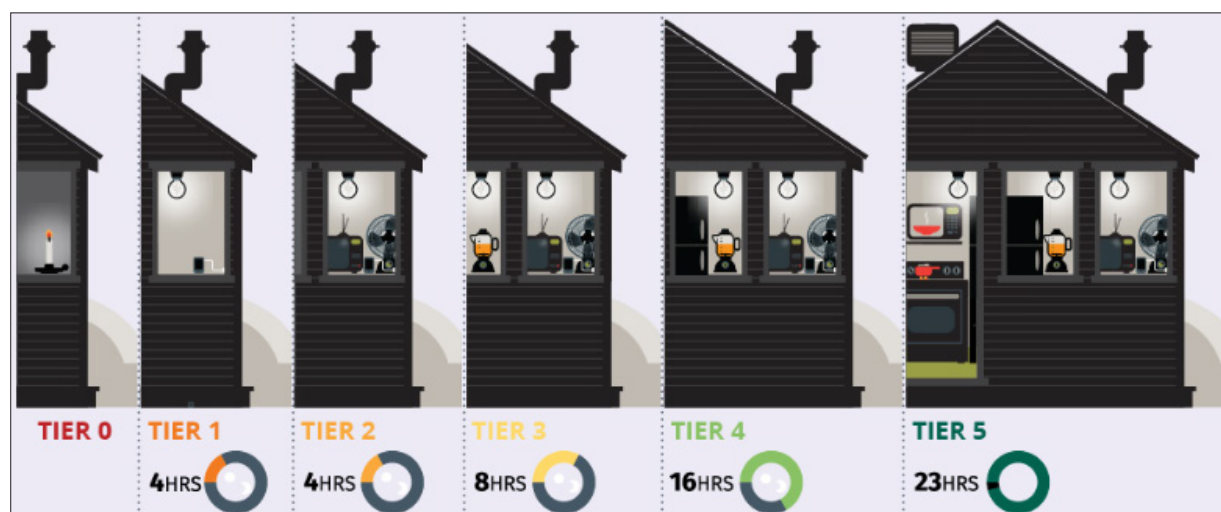


Figure 4.4 Représentation graphique du Cadre multi-niveaux de la Banque mondiale

Source : Cadre multi-niveaux de la Banque mondiale, Bhatia and Angelou, 2015⁴²

Notre modèle utilise quatre niveaux cibles, correspondant aux niveaux 2, 3, 4 et 5 du MTF :

- Niveau 2 : 224 kWh/ménage/an — suffisant pour l'éclairage, la recharge d'un téléphone et l'usage d'appareils à faible consommation
- Niveau 3 : 696 kWh/ménage/an — suffisant pour alimenter des appareils à consommation énergétique moyenne, comme un réfrigérateur

⁴² Voir <https://mtfenergyaccess.esmap.org/methodology/electricity> pour plus de détails sur les niveaux et l'approche adoptée.

- Niveau 4 : 1 800 kWh/ménage/an — suffisant pour alimenter des appareils à forte consommation énergétique
- Niveau 5 : 2 195 kWh/ménage/an — suffisant pour alimenter l'ensemble des appareils du ménage

4.4.1 Paramètres des options technologiques

Les paramètres technologiques ci-dessous ont été utilisés afin de caractériser les différentes options d'électrification (extension du réseau centralisé, systèmes autonomes, dispositifs photovoltaïques et mini-réseaux).

- Coût de l'électricité du réseau, et coût de l'expansion de la capacité de la centrale électrique centralisée (USD/kWh, USD/kW)
- Coûts de l'extension de la transmission et de la distribution (construction et fonctionnement), et pertes énergétiques (pertes techniques et vol) — pour le réseau électrique central et les mini-réseaux, le cas échéant (USD/kW, %/kW/an, % de pertes)
- Coûts de raccordement des ménages (USD/ménage)
- Coûts de production du mini-réseau : solaire, diesel, hydraulique (construction et fonctionnement) — (USD/kW, %/kW/an, USD/litre, USD/kWh)
- Coûts des systèmes autonomes : solaire et diesel (USD/kW, USD/kWh, USD/litre)
- Durée de vie estimée de chaque système (en années).

Vous trouverez plus de détails ainsi que les hypothèses complètes pour chaque paramètre dans l'Annexe 1, également disponible dans les références méthodologiques d'OnSSET.

➤ 4.5 Résultats

Les résultats de notre modèle, appliqués aux niveaux de demandes cibles 2, 3, 4 et 5 sont illustrés dans les figures ci-dessous. On observe une augmentation des niveaux de consommation énergétique à mesure que le nombre de localités électrifiées grâce à des mini-réseaux et à l'extension du réseau central augmente à travers le pays. Au niveau 2 d'accès, la majorité du pays peut être alimenté par des systèmes solaires autonomes. Néanmoins, à mesure que les niveaux de demande électrique augmentent, les mini-réseaux et l'extension du réseau central deviennent plus économiques et sont donc identifiés par le modèle comme solutions les plus abordables dans de nombreuses régions.

Le modèle désigne l'extension du réseau électrique comme option optimale dans les localités proches de lignes électriques existantes (ce qui suppose des lignes CA capables d'approvisionner les communautés) ou au sein de petites zones repérées comme électrifiées lors de l'année de référence en raison de leur éclairage nocturne (en faisant l'hypothèse que la capacité de production électrique dans ces zones isolées pourrait être étendue, par exemple le long de la frontière orientale de la RDC, à Kindu et Kisangani).

L'option de l'extension du réseau existant est sélectionnée à tous les niveaux de demande, mais plus particulièrement pour les niveaux de demande les plus élevés, ainsi que pour les faibles niveaux de demande dans les zones urbaines disposant déjà de réseaux qu'il suffirait d'étendre. Le modèle fait également l'hypothèse que la capacité des mini-réseaux pourrait être augmentée pour le même coût que le réseau

principal centralisé ; néanmoins, ce postulat n'est pas nécessairement correct, et dépend largement de la disponibilité de ressources locales.

Sur le court-terme, le développement de mini-réseaux est préférable à l'extension du réseau dans la partie est du pays. L'option du mini-réseau serait avantageux pour le mix énergétique tout en favorisant des résultats plus rapides et économiques. L'extension du réseau est initialement privilégiée pour les villes plongées dans le noir malgré leur proximité avec un réseau existant (ex. province du Kasai).

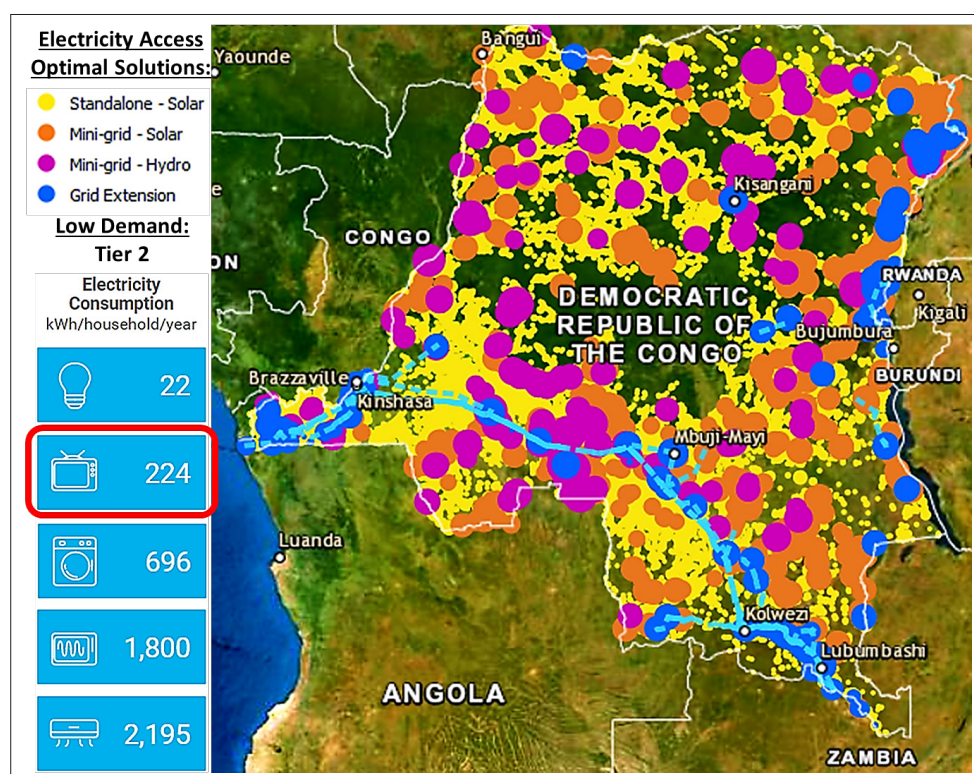


Figure 4.5 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande faible, niveau 2

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

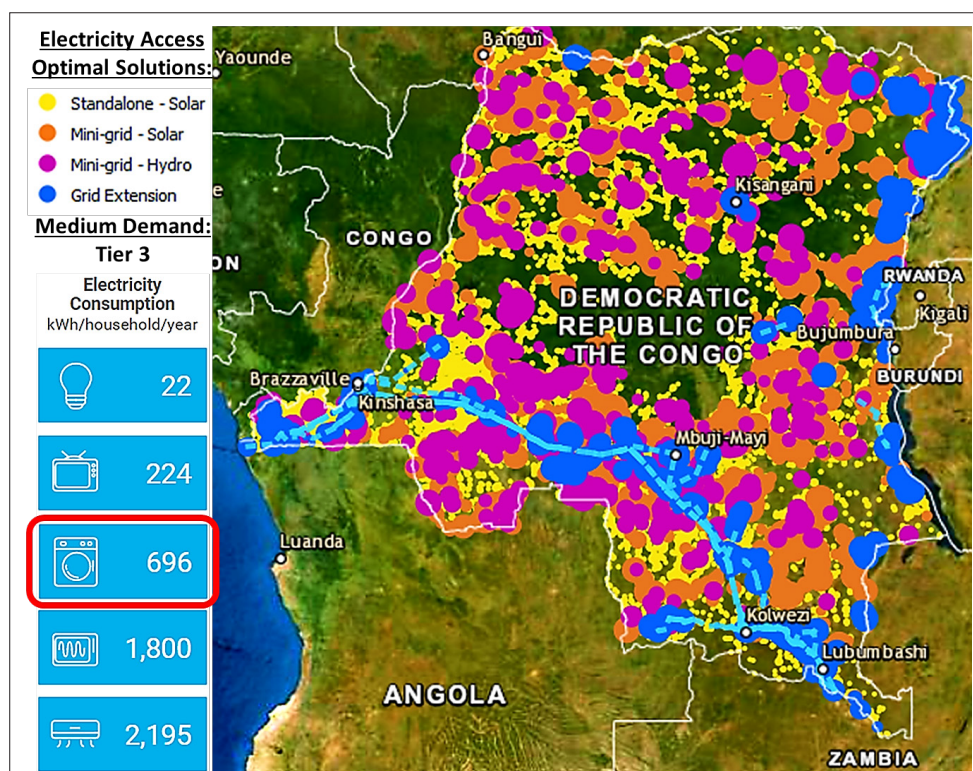


Figure 4.6 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande moyenne, niveau 3

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

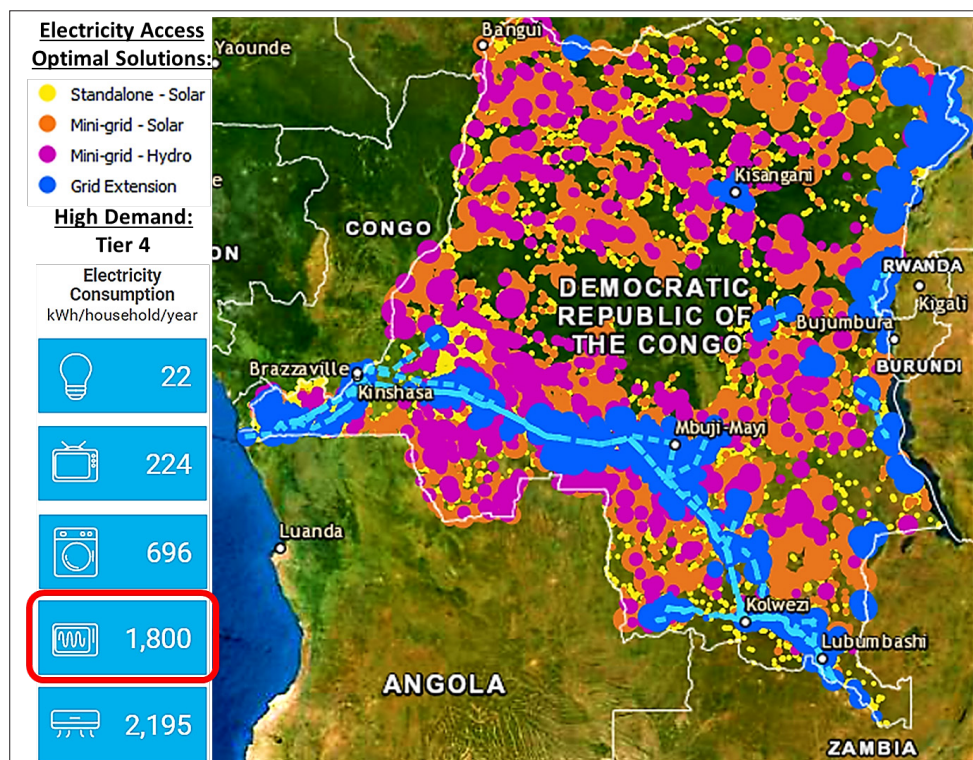


Figure 4.7 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande élevée, niveau 4

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

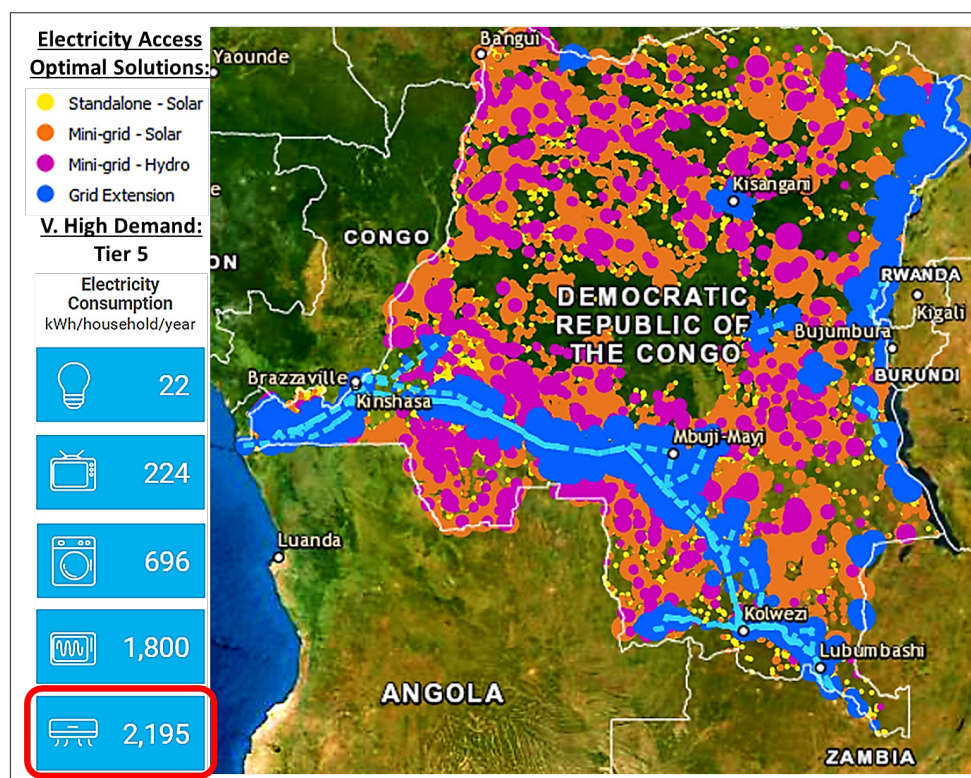


Figure 4.8 Résultats d'OnSSET pour des solutions d'accès optimales à l'électricité : demande très élevée, niveau 5

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

➤ 4.6 Exemples de difficultés identifiées lors de la modélisation

Un facteur observé dans les résultats est l'importance de l'existence, ou de la planification d'installation de lignes de transmission CA (courant alternatif) ou CC (courant continu). Si des lignes CA sont déjà installées, les villes et villages aux abords de la ligne peuvent être électrifiés se « raccordant » à la ligne grâce à la création de nouveaux postes pour distribuer l'électricité aux usagers locaux. Néanmoins, les lignes de transmission déjà installées de Kinshasa (à l'ouest) vers les régions minières du sud (voir le bas de la Figure ci-dessous) sont principalement des lignes CC. Celles-ci sont plus efficaces pour l'acheminement électrique sur de longues distances, mais le raccordement des communautés sur leur trajectoire est extrêmement onéreux. Les résultats présentant l'extension du réseau comme l'option la plus économique pour les zones proches de ces lignes ne reflètent donc pas cette réalité. A l'avenir, l'extension du système de transmission électrique longue distance entre l'ouest et le sud (ou d'autres régions) devra tenir compte de cet élément, car il pourrait avoir un impact considérable sur l'électrification des zones traversées par ces lignes.

Il est plus efficient d'acheminer l'électricité sous haute tension. Lorsque cette option est utilisée, des transformateurs et postes sont nécessaires pour abaisser la tension avant que l'électricité ne soit distribuée aux ménages. Le choix du positionnement spécifique de ces postes électriques, ainsi que l'analyse électro-technique détaillée des flux de puissance du système n'apparaissent pas dans notre modèle — qui repose plutôt des estimations générales. Nous étudierons la nécessité d'intégrer ces détails dans les prochaines phases du projet. Si les acteurs locaux se montrent attachés à cet aspect, nous pourrions l'inclure à la modélisation, mais pour l'heure, cela ne fait pas partie des améliorations prioritaires de notre modèle.

L'algorithme utilisé pour l'extension du réseau permet une extension maximale de 50 km à partir d'une ligne de transmission existante ou d'un établissement déjà électrifié (la distance de 50 km a été définie, mais il est possible de la modifier) ; au-delà, il faudra utiliser des mini-réseaux ou d'autres solutions d'électrification. Toutefois, cet algorithme ne reflète pas toujours fidèlement la réalité, et ne tient pas compte de l'éventualité qu'une communauté au-delà des 50 km soit en fait proche d'un village connecté de façon optimale au réseau, et bénéficie donc elle aussi du réseau électrique centralisé. Autre faiblesse de l'algorithme : à l'heure actuelle, il ignore la capacité et la fiabilité des différentes portions du réseau, et suppose que le réseau pourrait être étendu sans avoir recours à des investissements ou réparations supplémentaires.

La Figure 4.9 présente un exemple de ce scénario, dans lequel de nombreuses solutions de mini-réseaux pourraient être remplacées par une extension du réseau centralisé, dans la mesure où les communautés sont implantées le long de routes, et les ménages rassemblés de façon plutôt compacte sur le territoire.

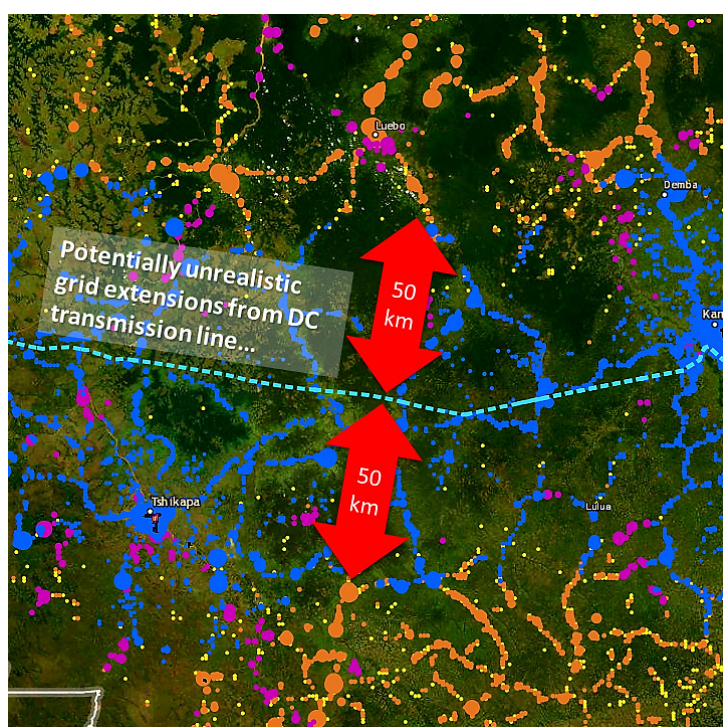


Figure 4.9 Démonstration de résultats irréalistes de l'extension du réseau et amélioration de la résolution des résultats OnSSET de 1 × 1 km

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

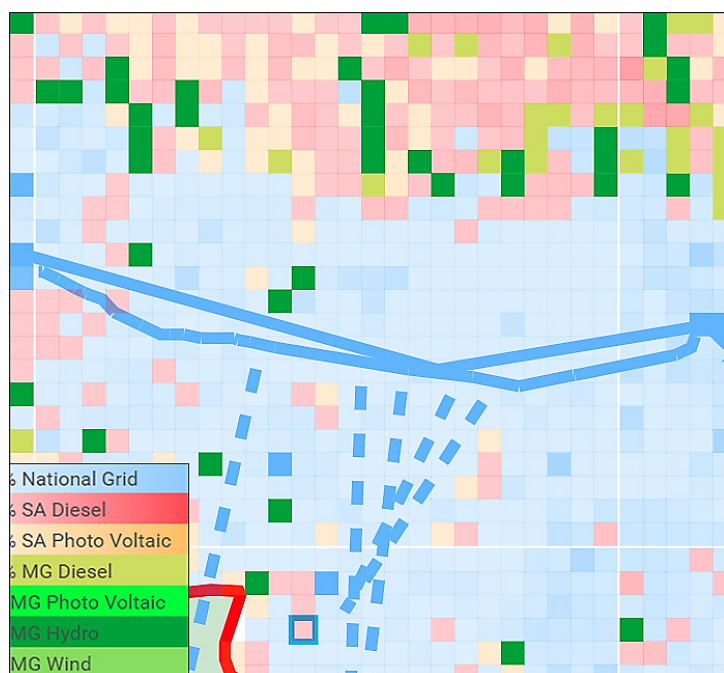


Figure 4.10 Démonstration d’une extension irréaliste du réseau selon la cartographie de l’ONU et résultats en faible résolution (10×10 km)

Source : ONU et KTH, 2016

Le problème de la délimitation des 50 kms et de l’extension du réseau à partir de lignes CC apparaît également dans les résultats de la modélisation de l’ONU pour la même zone, près de Tshikapa. De plus, l’extension du réseau à partir de « projets de lignes » (toujours en appliquant la règle des 50 kms) est intégrée aux résultats, alors qu’une forte incertitude plane sur leur construction concrète. La modélisation initiale de notre projet n’a pas utilisé les lignes prévues, car la qualité des données était douteuse et que d’après les sources accessibles au public, la réalisation de ces projets semblait hautement improbable⁴³.

On observe également les limites de la faible résolution de 10×10 km sur la carte de l’ONU ; de nombreux détails n’apparaissent pas dans les résultats. Les schémas d’implantation de la population dans la zone, généralement le long des routes, ne sont notamment pas visible à cette résolution. En outre, en raison de cette résolution grossière, la résolution choisie répertorie des habitations toutes les zones recensées ; à cette échelle, il est donc impossible de distinguer les zones à très faible densité de population.

La Figure 4.11 indique que Kindu et Kingombe sont bien détectées par OnSSET comme étant des zones électrifiées, en raison de la stabilité de l’éclairage nocturne d’après les données satellitaires. Néanmoins, l’outil suppose que l’énergie est alimentée par le réseau national, alors qu’il s’agit d’un mini-réseau hydraulique isolé. La version actuelle d’OnSSET repose sur un prix unique de production électrique via réseau pour l’ensemble du pays, et propose une modélisation selon laquelle l’électrification la plus économique des villes et villages aux abords et entre Kindu et Kingombe passerait par ce réseau. Le modèle suppose également que la capacité du réseau pourrait être étendue pour le même prix, comme s’il s’agissait du réseau national.

⁴³ Chaque capitale de province en RDC était connectée au même réseau national ; les données géospatiales illustraient les mêmes lignes droites de connexion sur le terrain sans toutefois atteindre les villes de façon précise — comme si le réseau avait été dessiné à la main sur une carte.

L'algorithme du réseau actuellement utilisé ne fournit pas non plus de trajectoire précise pour la construction du réseau d'acheminement de construction ; il relie les points de population à l'aide de lignes droites, sans tenir compte des réalités du terrain. Cet écueil est illustré dans la Figure 4.11 : Makoma est relié en ligne droite à Kalima (à travers la forêt primaire) et à Mali (à travers la rivière), alors qu'il serait considérablement moins coûteux de faire passer le réseau par des terrains vagues ou le long d'une route. Le fichier actuel des résultats d'OnSSET ne précise pas non plus à partir de quel point le réseau est étendu, ce qui suppose d'émettre des hypothèses à partir des résultats graphiques.

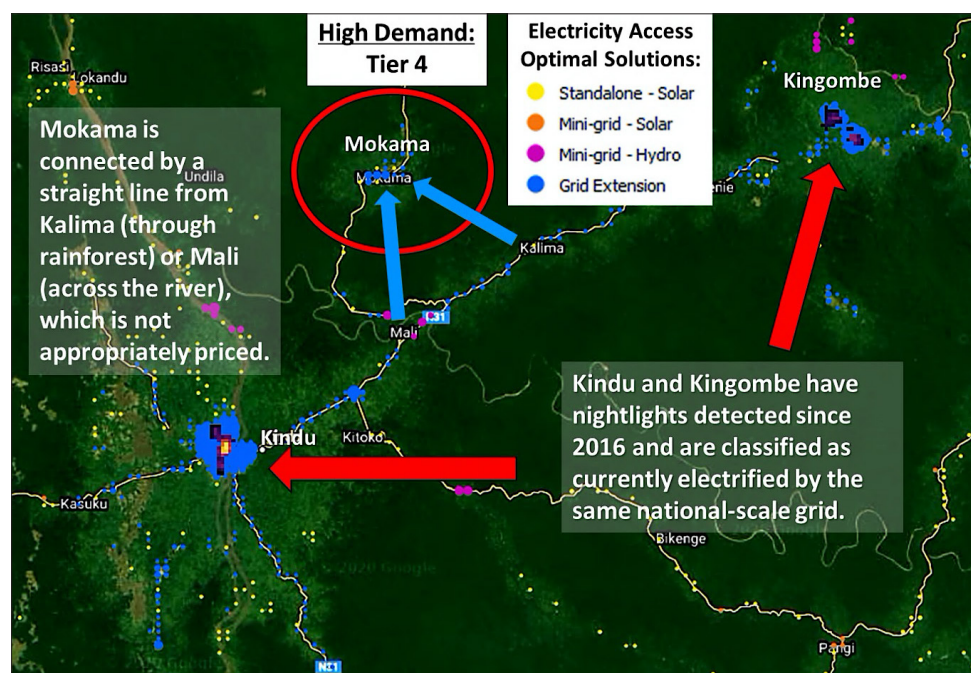


Figure 4.11 Démonstration des problèmes liés à la simplification de la trajectoire d'extension du réseau autour de Kindu et Kingombe en RDC

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

Une autre limite du modèle OnSSET actuel réside dans le fait que la solution « optimale » d'accès à l'électricité ne peut être qu'une des options proposées (réseau, mini-réseau hydraulique ou solaire, système autonome), mais pas une combinaison de celles-ci. La capacité totale d'une ressource potentielle à proximité influe parfois sur la solution proposée.

Les mini-réseaux hydrauliques sont par exemple modélisés pour atteindre une certaine capacité maximale en fonction de la quantité d'eau disponible, du niveau de l'eau, etc. Cette quantité détermine la capacité totale d'une éventuelle mini-centrale hydraulique. Toutefois, si la demande électrique totale d'une population donnée dépasse la capacité prévue pour le mini-réseau hydraulique, celui-ci est considéré comme insuffisant pour satisfaire la demande. Dans ce cas, le modèle propose pour solution optimale de connecter la zone à un autre réseau alentour, ou à un mini-réseau solaire (qui, sans limitation terrestre, peut atteindre une taille bien plus importante).

C'est précisément ce que l'on observe dans la Figure 4.12 : près de Kisangani, les mini-réseaux solaires sont présentés comme la solution optimale pour la périphérie de la ville. Néanmoins, cette option est balayée par l'extension du réseau national dès que la demande excède les capacités du mini-réseau. Pourtant, la solution idéale aurait été d'interconnecter les deux réseaux et de combiner leurs ressources. Dans de nombreuses zones, les systèmes solaires autonomes sont les solutions optimales à un niveau de faible

demande, mais ceux-ci sont supplantés par des mini-réseaux ou le réseau centralisé lorsque la demande s’amplifie. En réalité, ces solutions peuvent coexister, ou de petits systèmes autonomes peuvent par la suite être remplacés, ou encore interconnectés aux autres réseaux à mesure que la demande augmente.

Plus au nord de Kisangani, plusieurs mini-réseaux hydrauliques sont remplacés par le réseau national une fois qu’ils atteignent leur capacité totale, alors qu’ils pourraient simplement être interconnectés au réseau principal en provenance de Kisangani. Dans la partie supérieure de la figure, la capacité maximale des mini-réseaux hydrauliques est également atteinte, et l’implantation de mini-réseaux solaires apparaît nécessaire pour satisfaire cette demande accrue. Une fois encore, l’interconnexion de ces mini-réseaux serait à la fois possible et avantageuse, mais la version actuelle d’OnSSET ne propose pas cette option.

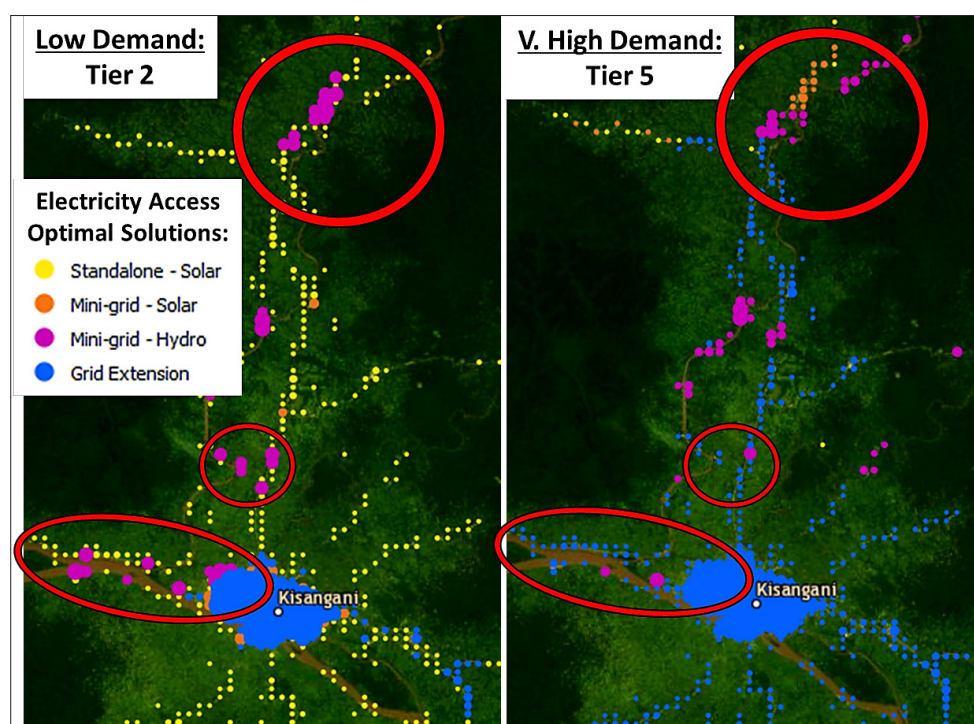


Figure 4.12 Démonstration du remplacement total des mini-réseaux et options autonomes par l’extension du réseau à mesure que la demande électrique augmente

Source : UCT & RM avec OnSSET 2018 – résultats préliminaires

La Figure 4.13 ci-dessous illustre l’une des pires lacunes identifiées en termes de données démographiques utilisées dans notre analyse initiale. Le modèle ne présente aucun résultat pour la quasi-intégralité de la population du Kasai oriental, y compris dans sa capitale Lodja. Ce problème est dans un premier temps passé inaperçu au sein de notre équipe, car aucun des membres ne provient de Lodja et n’a eu l’idée de se pencher sur cette région. D’autres personnes ayant consulté les résultats ont sans doute pensé qu’il existait une bonne raison à l’absence de résultats pour cette province.

Ce n’est que plus tard que nous avons réalisé que les données de recensement pour cette zone étaient inexistantes, et que de fait, l’algorithme de détection démographique n’y avait enregistré aucun habitant. Le plus inquiétant est que l’on retrouve cette erreur dans plusieurs initiatives internationales de cartographie des populations par satellite—les mêmes données étant utilisées par de nombreux algorithmes de cartographie. Un problème similaire s’est présenté à Kolwezi et Mbuji-Mayi.

La méconnaissance de la RDC (et d'autres pays dont la population n'a jamais été cartographiée) parmi les équipes internationales de modélisation est une cause possible de ce problème. Les chercheurs étrangers à une zone du monde ne sauront pas forcément à quelle échelle de population s'attendre, et n'auront pas non plus conscience de l'absence, ou de la mauvaise qualité de certaines données. Cette faiblesse est l'une principale justification du bien-fondé de l'implication des acteurs locaux.

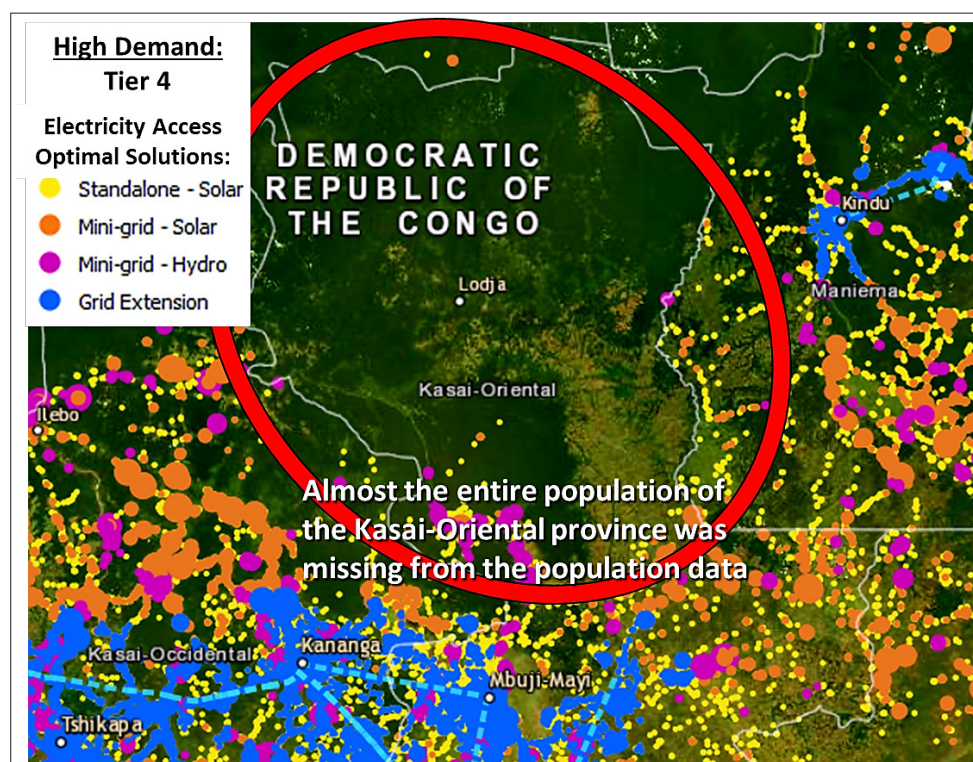


Figure 4.13 Démonstration des populations manquantes dans le jeu de données utilisé sur la province du Kasai oriental, près de Logja dans le centre de la RDC

Source : UCT & RM à l'aide d'OnSSET 2018 (avec les données GHSL 2016 à une résolution de 1×1 km) — résultats préliminaires

4.6.1 Opportunités d'amélioration de la modélisation

Dans cette section, nous allons passer en revue plusieurs opportunités d'améliorations du modèle et de ses résultats.

Tout d'abord, il convient de noter que parmi les variables non-spatiales utilisées pour l'optimisation de l'accès à l'électricité figurent les coûts d'investissements liés aux technologies d'électrification. En réalité, les coûts associés à l'installation d'infrastructures énergétiques sont largement dépendants des conditions d'accès au lieu d'implantation de ces ouvrages. L'une des limites de notre modèle est qu'il ne permet pas d'estimer le coût d'accès et de transport des matériaux vers un lieu donné ; à ce titre, il est donc incapable de refléter la variation des coûts d'installations d'une même technologie à différents emplacements.

Le coût d'extension du réseau peut en effet varier de façon spectaculaire en fonction de la géographie du terrain sur lequel il est établi. Sur OnSSET, un algorithme permet d'appliquer des coûts supplémentaires à l'extension du réseau lorsque l'outil identifie un terrain jugé difficile, par exemple un fort dénivelé ou une forêt. Néanmoins, cet algorithme nécessite davantage de précision sur les coûts supplémentaires induits,

mais aussi l'intégration d'un code indiquant au réseau de ne pas traverser les terrains impraticables. Par la suite, un autre objectif de notre projet sera d'améliorer l'algorithme d'extension du réseau dans notre modèle afin chiffrer les différentes options d'électrification de façon plus réaliste.

Deuxièmement, avec l'algorithme d'OnSSET actuel, qui combine les technologies et les ressources, les mini-réseaux peuvent uniquement être alimentés par une ressource à la fois, à savoir l'énergie solaire ou hydraulique. Il s'agit-là d'une autre limite du modèle. Dans certains cas, il serait plus économique ou efficace d'alimenter les mini-réseaux avec plusieurs types de technologies et ressources, et ainsi tirer parti de la disponibilité saisonnière ou journalière de ces ressources grâce à la création de « mini-réseaux hybrides ». Par exemple, il serait plus efficace d'utiliser un mini-réseau alimenté par un générateur fonctionnant au diesel pendant la nuit, par de l'énergie solaire pendant la journée, et par des ressources hydrauliques ou éoliennes pendant les saisons venteuses ou des pluies. Cet aspect du modèle devrait donc également faire l'objet d'amélioration.

Troisièmement, à l'heure actuelle, OnSSET n'est pas capable d'optimiser le mix technologique utilisé pour fournir de l'énergie au réseau. Le coût unitaire (coût/kWh) de l'électricité fournie par le réseau actuellement utilisé par OnSSET doit être défini de façon externe. Dans notre modèle, le coût de chaque unité d'électricité fournie par le réseau central repose sur les résultats du Modèle de base de l'énergie électrique en Afrique (TEMBA)⁴⁴. TEMBA est une application d'OSeMOSYS pour la RDC. Quant à OSeMOSYS, il s'agit d'un modèle d'optimisation des systèmes énergétiques adapté avec la planification intégrée de l'énergie sur le long-terme⁴⁵. Nous avons utilisé TEMBA afin d'estimer le déploiement technologique et le mix de ressources nécessaires pour fournir une quantité prédéterminée d'électricité par le réseau à moindre coût.

Actuellement, les résultats fournis par TEMBA indiquent que la ressource la plus efficiente pour alimenter le réseau congolais est l'énergie hydraulique (voir Figure 4.14). Compte tenu de ses importantes ressources hydrauliques, ce résultat n'a rien de surprenant en RDC ; néanmoins, il pourrait aussi reposer sur des hypothèses relatives au coût et à la disponibilité des différents types de ressources (y compris hydrauliques) utilisées par le modèle. Il est par exemple possible que les coûts associés à l'énergie hydrauliques soient trop faibles, ou que l'augmentation de la demande entraîne une plus forte utilisation de technologies alternatives. Les résultats indiquent qu'il est possible d'améliorer l'analyse OSeMOSYS, et donc les données utilisées par OnSSET en vue d'optimiser les plans d'électrification. De même, les interactions entre OnSSET et OSeMOSYS pourraient être automatisées, ce qui faciliterait l'analyse de la convergence des résultats des deux modèles.

⁴⁴ Voir <http://www.osemosys.org/temba.html>

⁴⁵ Vous trouverez plus d'informations sur OSeMOSYS dans le chapitre 3.

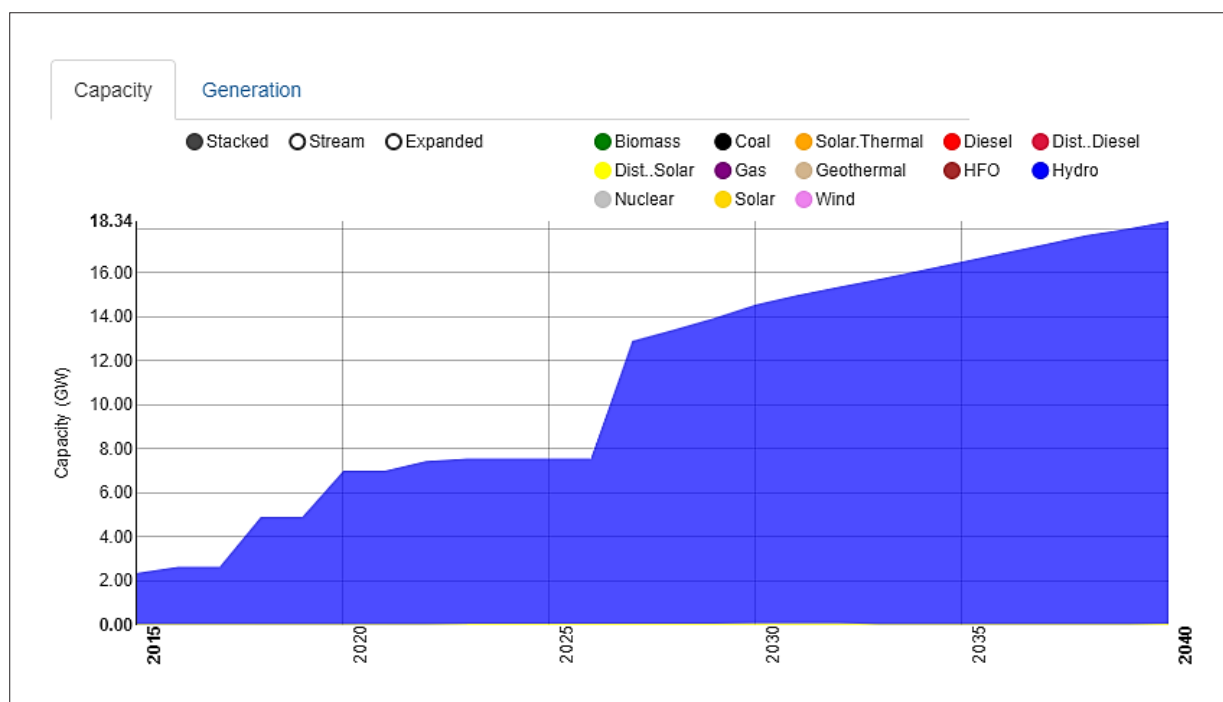


Figure 4.14 Résultats du modèle TEMBA

Source : TEMBA, 2019⁴⁶

4.6.2 Difficultés rencontrées lors de l'élaboration du modèle

Nous avons fait face à certaines difficultés pendant l'élaboration de notre modèle. Celles-ci concernaient l'utilisation d'OnSSET, la connaissance et la superficie de la RDC, ainsi que l'absence d'un outil de visualisation des résultats.

Pour ce projet, notre équipe a utilisé un modèle OnSSET pour la première fois. Bien que les membres de l'équipe aient suivi une formation technique avec OnSSET et qu'ils justifient d'expériences préalables en élaboration d'outils de modélisation, aucun n'avait d'expérience en codage OnSSET. Nous avons ainsi commis plusieurs erreurs de codage ayant entraîné plusieurs blocages du modèle. Face à ces difficultés, notre équipe s'est appuyée sur ses précédentes expériences avec Python, sur des articles universitaires et, lorsque nécessaires, sur les suggestions des développeurs du modèle du KTH.

Ce projet constitue également notre première expérience d'élaboration d'un modèle sur les systèmes énergétiques en RDC. Nos connaissances des jeux de données nationaux étaient donc insuffisantes pour construire le modèle, et nous avons consacré un temps considérable à l'exploration de meilleurs jeux de données afin d'améliorer la précision du modèle. Les données utilisées ont principalement été trouvées sur internet par étude documentaire, et n'ont pas été spécifiquement créées pour notre étude en RDC grâce à la participation d'acteurs et institutions locales, etc.

Le manque d'expérience spécifique de la RDC a également empêché l'équipe d'identifier rapidement certains problèmes rencontrés avec les données. A titre d'exemple, il nous a fallu plusieurs mois avant de réaliser l'absence de données démographiques pour la ville de Lodja, ou pour comprendre la qualité des

⁴⁶ Voir <http://www.osemosys.org/temba.html>

données relatives au réseau — notamment l’exactitude ou le caractère réaliste de projets d’extension du réseau communiqués sur le site de la SNEL, comme nous l’avons exposé plus haut.

Les données précises sur la demande en électricité en RDC se font également rares. C’est d’ailleurs pour cela que les premières estimations du modèle se basent sur le MTF pour indiquer le niveau cible d’accès à l’électricité des ménages en 2030. Toutefois, la modélisation bénéficierait d’une meilleure indication, adaptée et localisée, des niveaux de demande électrique pour le court à moyen terme, et de la façon dont ceux-ci évolueront au fil du temps au niveau national et provincial, dans les zones urbaines et rurales.

La superficie du plus grand pays d’Afrique subsaharienne a rajouté deux difficultés supplémentaires à notre étude. D’un point de vue statistique, cela a impliqué l’analyse d’un nombre très important de localités. Ce nombre élevé a accru la complexité statistique et la durée nécessaire pour l’exploitation du modèle et le traitement des résultats. La vérification de la qualité des données a présenté une autre difficulté : il est extrêmement difficile d’examiner en détails des données utilisées à l’échelle d’un pays comprenant autant de point d’informations et de zones à faibles densités de population.

Enfin, il n’a pas été aisé d’obtenir une visualisation des résultats à même de mobiliser des acteurs. A l’époque de ces présentations, la Global Electrification Platform n’était pas encore accessible au public ; nous avons donc dû leur présenter nos résultats à l’aide de QGIS. Nous avons passé beaucoup de temps à rendre les résultats plus faciles d’interprétation, par exemple en adoptant un code couleur utile à la fois au niveau national et de certaines communautés (grâce à des changements d’échelle).

➤ 4.7 Réactions des acteurs suite à la présentation OnSSET

Nous avons exposé les résultats de notre modèle OnSSET RDC à plusieurs acteurs locaux lors d’un atelier à Kinshasa, puis interrogé les participants à l’issue de notre présentation. Ces entretiens ont représenté une opportunité de dialoguer avec les acteurs, de mesurer leurs réactions par rapport à la qualité des données utilisées et à leurs attentes du projet. Ils nous ont également permis de recueillir leurs commentaires sur les points d’amélioration nécessaires, et même de découvrir de nouvelles sources de données.

Dans cette section, nous analysons les discussions qui ont eu lieu lors de cette première rencontre avec les acteurs locaux. Nous commencerons par aborder les commentaires généraux sur le secteur énergétique de la RDC avant d’approfondir les commentaires spécifiques sur le modèle et les données utilisées.

La situation actuelle du secteur énergétique congolais

Les consultations menées avec les acteurs ont mis en évidence la précarité du secteur énergétique en RD Congo. Il n’existe aucune solution en réseau permettant l’accès à l’électricité pour les millions de congolais qui en sont actuellement dépourvus. Même le réseau existant est dysfonctionnel, et n’est pas suffisamment fiable pour ses neuf millions d’utilisateurs.

La RDC a besoin de nouvelles solutions électriques. Certains facteurs permettant d’expliquer les faiblesses de l’électrification dans le pays sont : la capacité limitée de production énergétique ; le mauvais état du réseau ; et le faible pourcentage (30 %) de recouvrement des factures en dépit d’une vente de l’énergie déjà inférieure au prix de production.

Nous avons également pris connaissance d’initiatives du secteur privé pour améliorer la situation depuis l’adoption de la réforme du secteur, qui a ouvert le marché électrique aux acteurs privés :

- Afin d'augmenter les revenus des ménages grâce à la promotion de l'électricité et du développement économique, Orange a lancé le service Orange Energie. Orange Energie propose deux tailles de kits solaires BBoxx. Néanmoins, ce projet isolé ne suffira pas à satisfaire l'intégralité du marché national.
- Face à l'augmentation de la demande énergétique des sociétés minières, la RDC a sollicité des financements à la Banque mondiale afin de réhabiliter Inga 1 et Inga 2, dont les centrales sont fortement délabrées.
- L'énergie non-utilisée par les mines du Katanga est exportée et, lorsque nécessaire, les déficits congolais en approvisionnement énergétique sont comblés grâce à l'importation d'électricité de Zambie.

Politique

Les acteurs ont confirmé la nécessité de nos recherches et ont détaillé la façon dont elles pourraient bénéficier aux projets gouvernementaux :

- Le gouvernement congolais a besoin d'un outil de planification à court-terme pour l'aider à augmenter le taux national d'accès à l'électricité à 30 % d'ici 2023, principalement à l'aide de systèmes solaires.
- UCM travaille actuellement sur un plan d'électrification national.

Nous avons tiré un enseignement politique important. En conduisant notre atelier dans les locaux d'UCM, certains participants ont pensé que nos recherches étaient en fait le fruit de cette unité. De fait, ils ont posé de nombreuses questions sur les critères de priorisation de l'électrification. Quels publics recevront l'électricité en premier : les mines, les ménages, les habitants de Kinshasa, les populations déjà couvertes par le réseau ? L'électrification prendra-t-elle la forme d'un réseau « officiel », ou plutôt d'un ensemble de mini-réseaux moins officiels ? L'électricité sera-t-elle plus propre, plus fiable, reposera-t-elle sur un fonctionnement indépendant et plus sûr en cas de catastrophe ? Sera-t-elle moins chère ?

D'autres participants ont cru que nous menions un exercice de planification énergétique à l'échelle de la RDC, ce qui n'était pas le cas.

L'outil OnSSET

Plusieurs participants ont voulu en savoir plus sur les outils permettant de faciliter la projection de la demande énergétique grâce à des données satellitaires. La plupart des participants ont démontré un vif intérêt pour le processus de modélisation, et notamment pour OnSSET. Certains se sont également portés volontaires pour intégrer l'équipe chargée d'analyser la méthodologie de collecte des données et les plans de mise en œuvre des résultats de la modélisation.

D'autres ont manifesté un intérêt pour l'étude de la privatisation et des options décentralisées comme solutions au bénéfice aux populations non-desservies — et la façon dont nous pourrions collaborer avec les gouvernements provinciaux pour apporter l'électricité à leurs communautés.

Enfin, certains participants n'ont pas bien compris les résultats, ou n'y ont pas cru. Cela s'explique par plusieurs raisons, notamment :

- La mise en fonctionnement du réseau : croyance que le réseau serait/ne serait pas opérationnel ;
- Des zones présentées comme étant électrifiées alors qu'elles ne l'étaient pas (ou l'inverse).

Les données

Les acteurs ont voulu savoir :

- La façon dont nous avons obtenu les données ;
- Le fonctionnement des modèles, et sur quoi ils reposent ;
- À quoi ressemble notre processus de travail ;
- D'où proviennent les données (sources hydrauliques ou solaire ?) ;
- Le traitement des données avant utilisation dans les modèles.

Les participants nous ont également suggéré de nouvelles sources de données afin de compléter nos informations sur le secteur énergétique congolais :

- NELSAP a récemment mené une étude sur les potentielles interconnexions de transmission électricité entre la RDC ses voisins ;
- ACERD conduit une étude d'un à deux ans sur les options d'électrification/énergétique de la RDC ;
- La Cellule Infrastructures du Ministère des Infrastructures, Travaux Publics et Reconstruction dispose de cartes relatives à l'électrification ;
- La Banque mondiale et IRENA ont mené des études de coûts pouvant être utilisées par la RDC afin d'établir des prix acceptables dans le cadre d'appels d'offres.

Bioénergie : certains participants ont souhaité en savoir plus sur les bioénergies. Comment fonctionnent-elles ? Quels types de bioénergie sont les plus adaptées ? Dans quelles régions du pays ces technologies peuvent-elles être utilisées ?

Réseau électrique : les participants ont souligné le problème des lignes CA et CC (quand utiliser des lignes CA ou CC ?) D'autres ont voulu savoir où ils pouvaient construire de nouvelles lignes électriques.

Au sujet du modèle général

- Les acteurs se sont montrés critiques vis-à-vis des niveaux de demande d'électrification utilisés dans le modèle, et ont remis en question le fondement de leur définition.
- Certains ont demandé pourquoi les résultats n'apparaissaient que jusque 2030. Qu'advient-il du modèle en 2035, 2040, etc. ?
- D'autres ont voulu savoir si le modèle pouvait indiquer les régions prioritaires en matière d'électrification, et de quelle façon ces projets seraient menés d'ici à 2030. Ex. Que peut-on faire pour étendre le réseau, et est-il possible d'estimer l'ampleur nécessaire de cette extension ?

➤ 4.8 Perspectives pour les prochaines phases du projet

Au cours des phases 2 et 3, nous apporterons des améliorations progressives mais continues au modèle OnSSET et à l'analyse spatiale de référence présentés dans ce chapitre. Nous nous efforcerons d'améliorer les données liées à la demande, aux ressources et aux coûts sur lesquelles repose le modèle, ainsi que les algorithmes utilisés pour l'optimisation énergétique. Des produits sous forme de résultats et éclairages

graphiques seront disponibles à l'issue de chaque phase. Des membres du KTH, RLI, RM et UCT collaboreront au sein d'une équipe mixte en vue d'améliorer ces données, le modèle et la visualisation des résultats.

Dans les prochains chapitres de l'étude, nous décrirons dans de plus amples détails les méthodologies et approches de notre modélisation, y compris les rôles et chaque partenaire du projet.

Le résultat final sera présenté sur une plateforme de visualisation interactive en ligne. Contrairement aux premiers résultats présentés à Kinshasa, cette plateforme permettra aux acteurs d'interroger les résultats des nouvelles données, mais aussi d'explorer différents scénarios en modifiant les paramètres, puis en observant leur impact sur les résultats.

La précision des résultats augmentera de façon graduelle. Tout d'abord, grâce à l'amélioration des données de base décrites dans les autres chapitres (population, routes, réseaux, systèmes solaires et hydrauliques, etc.). Dans un second temps, en approfondissant les données sur la demande énergétique, en dépassant la demande des seuls ménages (voir ci-dessus) pour y ajouter des scénarios pour tous les autres secteurs décrits dans les chapitres 1 et 2 (usages productifs et économiques, services et équipements publics, industries et mines, etc.)

Ensuite, la création d'un nouveau modèle centralisé et sa mise en relation avec OnSSET permettra d'améliorer la représentation des gros investissements centralisés en RDC et de déterminer quel mix énergétique alimentera chaque réseau régional. Enfin, nous réviserons la représentation et la modélisation des mini-réseaux hybrides afin d'y inclure de nouveaux facteurs d'optimisation et, à terme, l'interconnexion de multiples mini/micro-réseaux aux réseaux isolés de plus grande envergure et aux réseaux régionaux centralisés.

Différents scénarios seront étudiés en consultation avec les acteurs locaux, notamment une analyse de la sensibilité afin de mieux comprendre comment l'incertitude liée aux diverses hypothèses et paramètres affecte les résultats de la modélisation.

Références

AIE (2017) Perspectives sur l'accès énergétique 2017. Rapport spécial : Perspectives énergétiques mondiales de l'Agence internationale de l'énergie Disponible sur : <https://webstore.iea.org/weo-2017-special-report-energy-access-outlook>

Bhatia, M., & Angelou, N. (2015) Beyond connections: energy access redefined. Banque mondiale. Disponible sur : https://mtfenergyaccess.esmap.org/data/files/download-documents/full_report_beyond_connection.pdf

ONU et KTH (2016) Outil de visualisation en ligne pour un accès universel à l'électricité Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies et KTH Royal Institute of Technology. Disponible sur : http://un-modelling.github.io/electrification-paths-visualisation/country.html?iso3=COD&tier=3&diesel_price=nps

ONU (2017) Household size and composition around the world. Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies Disponible sur : https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/household_size_and_composition_around_the_world_2017_data_booklet.pdf

ONU (2018) World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies, Division de la population. Disponible sur : <https://population.un.org/wpp/>

Weiss, D. J., Nelson, A., Gibson, H. S., Temperley, W., Peedell, S., Lieber, A., & Mappin, B. (2018) A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015. Nature, 553(7688), 333-336. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/nature25181#Sec13>

CHAPITRE 5.

Enquête énergétique — Kinshasa

➤ 5.1 Introduction

Une composante essentielle de la phase 1 de cette étude était d’obtenir une compréhension plus fine de l’utilisation et de la demande énergétique à Kinshasa. Pour ce faire, nous avons soumis un questionnaire d’enquête à plus de 2 000 ménages dans les zones rurales, péri-urbaines et urbaines de Kinshasa et dans les alentours de la capitale entre septembre et décembre 2019. Ce chapitre couvre l’élaboration de ce questionnaire, la formation et la sélection des enquêteurs (ou sondeurs), l’outil d’enquête, la méthode d’échantillonnage utilisée et les sites ciblés pour l’enquête, ainsi que les statistiques descriptives préliminaires tirées de l’enquête.

➤ 5.2 Méthodologie d’enquête

Cette section décrit la conception et la méthodologie de l’enquête, en mettant l’accent sur la conception et l’échantillonnage du questionnaire.

5.2.1 Questionnaire

Le questionnaire d’enquête comprend sept sections. Compte tenu de la longueur de l’enquête et de l’approche complémentaire sur les attitudes vis-à-vis des énergies renouvelables dans les communautés non-électrifiées, l’enquête a été menée à l’aide de deux questionnaires :

1. Une version longue constituée de toutes les sections du questionnaire (y compris les questions sur l’attitude et l’acceptation sociale), utilisée spécifiquement dans les zones rurales ;
2. Une version courte, constituée de cinq sections (sans les sections trois et sept), utilisée dans les zones péri-urbaines et urbaines.

Les sept sections de l'enquête sont les suivantes:

1. Identification du ménage	Description de l'environnement du ménage : zone rurale/péri-urbaine/urbaine, voisinage et rues alentour. Cette partie est remplie par l'enquêteur. Objectif : identifier le type de zone.
2. Démographie, socio-économie et communauté	Description de la personne interrogée, notamment son âge, sexe, situation matrimoniale, niveau d'études, niveau de revenus.
3. Zone locale	Description de la zone d'habitation de la personne interrogée. Objectif : contextualiser l'étude et les résultats.
4. Habitation	Description de l'habitation. Objectif : base pour l'analyse axée sur l'exploration des déterminants influençant le niveau de consommation énergétique.
5. Source d'énergie utilisée	Il existe différentes sources énergétiques utilisées dans les ménages, principalement : électricité, charbon, biogaz, piles et batteries, énergie solaire.
6. Coût de l'énergie et connexion électrique	Description du montant dépensé par les ménages en énergie et connexion aux réseaux électriques.
7. Attitudes et perceptions publiques	Perception des personnes interrogées sur les énergies renouvelables.

5.2.2 Sélection des enquêteurs

Des offres d'emploi ont été diffusées sur les réseaux sociaux et dans les universités (Annexe 2). Au total, 6 000 candidats ont postulé pour les postes d'enquêteurs rémunérés. Ce chiffre élevé nous a convaincu qu'il existait un nombre important de candidats adéquats pour ces postes. Cinq recruteurs ont présélectionné les candidats en fonction de leur expérience préalable des enquêtes, leur expérience professionnelle en zone urbaine/rurale, leur connaissance des sujets liés à l'énergie, et leur professionnalisme.

Sur ces candidats, 25 ont été convoqués pour un entretien en fonction des notes attribuées par chaque recruteur. Les candidats ont passé un entretien et un test de compétences composé de :

- Connaissance des enquêtes
- Compétences en entretien
- Connaissance de l'outil Kobo

5.2.3 Kobo : un outil pour la collecte de données d'enquête

Kobo est une boîte à outils permettant de créer des formulaires et de collecter les réponses tirées d'entretiens. Cette boîte à outils a été conçue par la Harvard Humanitarian Initiative pour une utilisation facile et fiable sur les terrains difficiles, comme les urgences humanitaires, les environnements post-conflit et les cas d'intempéries.

Cet outil a été choisi pour ses nombreux avantages :

- Facilité d'utilisation ;

- Sécurité des données ;
- Utilisation hors-ligne ;
- Transfert automatique des réponses sur une base de données Excel (pas besoin de transcription) ;
- Fonctionne en cas d'intempéries ;
- Plusieurs types de données peuvent être collectées : vidéo, audio, points de cheminement.

Une fois le questionnaire d'enquête créé, il peut être chargé sur site internet de Kobo, grâce au menu interactif et à l'aide fournie pour la conception d'enquêtes électroniques. Ainsi, l'enquête peut être téléchargée sur smartphone ou tablette pour commencer le travail de terrain.

Les enquêteurs peuvent télécharger le questionnaire sur leur téléphone et remplir un nouveau formulaire pour chaque nouvelle personne interrogée. Une fois qu'un questionnaire est rempli, le formulaire est enregistré et envoyé sur le serveur Kobo en ligne. Suite à la collecte des données, les formulaires finalisés peuvent être téléchargés en ligne dans quatre formats (SPSS, Excel, CVS et KML). Il est également possible d'avoir un rapide aperçu des données à partir de la boîte à outils.

5.2.4 Formation des enquêteurs et pilotage de l'enquête

La formation des enquêteurs s'est déroulée sur trois jours, suivis de trois jours de pratique encadrée afin d'assurer la bonne compréhension du questionnaire avant le déploiement sur le terrain.

La formation théorique a couvert les sujets suivants :

- Comment mettre en oeuvre une enquête efficace : choix vestimentaire, comportements et attitudes ;
- Utiliser la boîte à outils Kobo comme outil de collecte des données ;
- Comment expliquer les questions aux personnes interrogées, en français ou en lingala ;
- Comment enregistrer les réponses et obtenir les bonnes informations sans influencer les réponses.

Le premier jour de la formation pratique, il a été demandé à tous les enquêteurs de remplir les informations portant sur leur propre foyer. Le deuxième jour, chaque enquêteur a mené le même exercice avec ses voisins. Le troisième jour, les enquêteurs et formateurs ont examiné chaque questionnaire et apporté des corrections lorsque nécessaire. Les enquêteurs ont continué à tester le questionnaire les deux jours suivants afin d'identifier d'autres problèmes éventuels. Les erreurs ont par la suite été présentées en présence de l'ensemble des enquêteurs pour s'assurer que personne ne les répètera.

➤ 5.3 Echantillonnage

5.3.1 Taille de l'échantillon

Un échantillon de 2 000 ménages était initialement prévu, mais au final, 2 069 questionnaires ont été remplis à travers Kinshasa. L'échantillon a été divisé de la façon suivante :

- 337 ménages en zones rurales ;

- 742 ménages en zones péri-urbaines ;
- 990 ménages en zones urbaines.

5.3.2 Zone d'échantillonnage

La recherche a été menée à Kinshasa, capitale de la République démocratique du Congo. Kinshasa est composée de 24 communes ; afin d'obtenir une image complète de la ville, l'enquête a été menée dans l'ensemble de celles-ci.

5.3.3 Méthode d'échantillonnage

Nous avons adopté une approche d'échantillonnage en trois étapes.

5.3.3.1 Échantillonnage de niveau 1 : zone urbaine/péri-urbaine/rurale

Kinshasa a été séparée en zones urbaines, péri-urbaines et rurales.

- Rural : agriculture comme principale source de revenus, maisons construites en bois et en paille, pas d'électrification ;
- Péri-urbain : activités urbaines et rurales (ex. agriculture), certaines maisons sont faites de ciment et de tôle ;
- Urbain : très développé, quasiment aucun emploi agricole.

Dans chaque commune, les zones ont été regroupées en fonction des définitions ci-dessus. Bien qu'aucune communauté ne soit complètement « rurale », plusieurs d'entre elles entraient dans la définition proposée. Voir le Tableau 5.1 et la Figure 5.1 pour un aperçu du nombre de ménages inclus dans l'échantillon de chaque zone et la localisation des zones ciblées par l'enquête.

Tableau 5.1 Échantillonnage

Type de territoire	Commune	Quartier	Ménages enquêtés
Rural	Maluku	Menkao	90
		Bitu	90
		Ipuru	50
		Ndako ya pembe	90
Péri-urbain	N'sele	Mpasa	90
		Bibwa	90
	Kimbanseke	Kingasani	150
	Masina	Siforco	75
		Mapela	75
	N'djili	Quartier Neuf	150

Type de territoire		Commune	Quartier	Ménages enquêtés
Urbain	Faible revenu	Makala, Ngaba, Bumbu, Selembao, Mont Kgafula, Kisenso	Bolima, Bula Mbemba, Ubangi, Ngafani, Kindele, 17th May	250
	Revenu moyen	Bandalungwa, Kalamu, Lemba, Matete, Ngiri Ngiri, Kasavubu	Sikin, Kauka, Foire, Baboma, Assossa, Christ Roi	250
	Développement rapide	Barumbu, Kinshasa, Kintambo, Lingwala	Bon Marché, Boyoma, Magasin, Beau Vent	250
	Résidentiel de haut standing	Gombe, Limete, Ngaliema	Basoko, Résidentiel, Joli Parc	250
Total				2 000

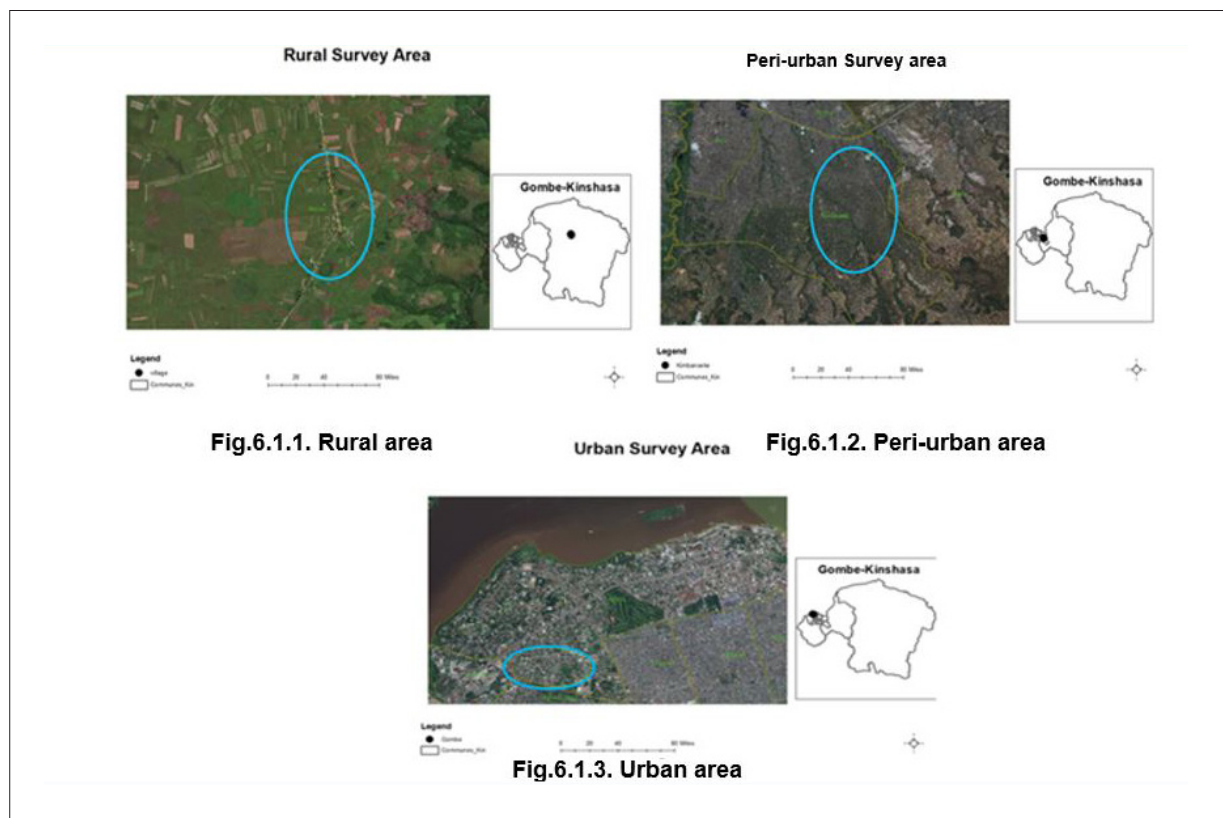


Figure 5.1 Zones d'enquête

5.3.3.2 Échantillonnage de niveau 2 : niveau des revenus

Dans les zones urbaines, nous avons regroupé les communes en fonction des caractéristiques suivantes :

- Faibles revenus
- Revenus moyens
- Revenus moyens et élevés
- Revenus élevés

5.3.3.3 Échantillonnage de niveau 3 : ménages ciblés par l'enquête

Dans les zones rurales, les ménages ont été sélectionnés par hasard. Dans chaque village, les enquêteurs ont tout d'abord rencontré l'autorité locale. Les enquêteurs ont ensuite interrogé les ménages du village en s'appuyant sur un plan de sélection prédéterminé des ménages. Dans les zones péri-urbaines et urbaines, les enquêteurs ont sélectionné une rue sur deux, puis une maison sur trois de chaque côté de la rue, conformément à la Figure 5.2 ci-dessous.

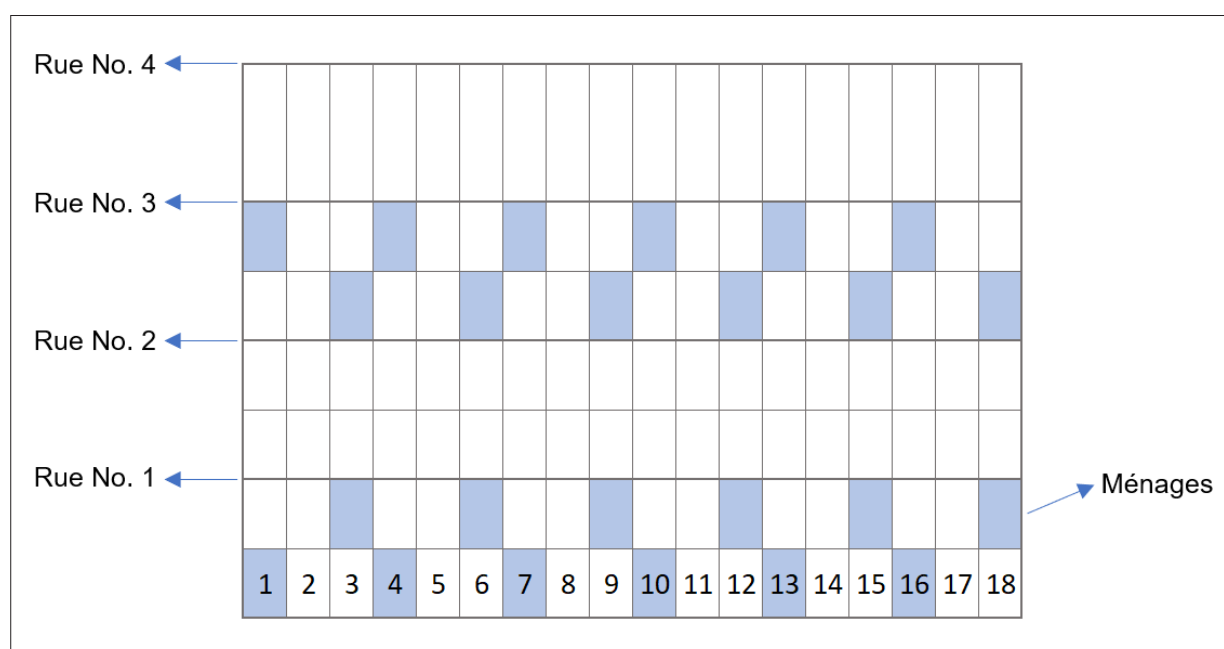


Figure 5.2 Échantillonnage orienté

5.3.4 Principales difficultés liées au choix de la méthodologie

1. **L'accessibilité de l'information : obtenir des informations pertinentes des institutions congolaises s'est avéré extrêmement compliqué.** Pendant près d'un mois, les coordinateurs de l'enquête ont tenté, en vain, d'obtenir des informations de plusieurs institutions comme la SNEL. Ces agences auraient pourtant pu nous aider à acquérir une compréhension approfondie de la répartition démographique dans la ville et de la consommation énergétique en fonction du niveau socioéconomique de la population.

Après plusieurs réunions et discussions avec des représentants des ministères, des universitaires, des acteurs du secteur privé et de la société civile, nous sommes parvenus à recueillir les contributions nécessaires (documents existants, connaissances de la ville, contributions d'experts) pour compléter notre méthodologie d'échantillonnage.

2. **Équilibre entre le niveau de détail et la faisabilité de l'enquête.** Une équipe de cinq experts locaux a été mise en place pour commenter notre ébauche de questionnaire.

Sur la base de leurs commentaires, nous avons ajusté et proposé plus de cinq versions révisées du questionnaire. La principale observation formulée portait sur la longueur de l'enquête. Nous avons retiré certaines questions jugées non-essentiels, mais avons

conservé la majorité d'entre elles compte tenu de la nature « imbriquée » des questions — les personnes interrogées ne répondent qu'aux parties du questionnaire qui s'appliquent à leur cas. De plus, des essais pilotes poussés nous ont démontré que la durée estimée par les réviseurs de l'enquête était largement surestimée.

3. **Langue:** L'ébauche de l'enquête a été conçue en anglais, mais nous avons dû la traduire car les habitants de Kinshasa parlent d'une part français, mais surtout lingala. Le défi a été de traduire le questionnaire en français et en lingala tout en préservant le sens et les nuances des questions originales. La traduction vers le français a été effectuée par un traducteur officiel, mais nous avons eu recours à un traducteur sur le terrain pour la version lingala.
4. **Obtenir les permissions et accéder aux personnes à interroger:** L'accord des autorités locales est indispensable pour mener une enquête à Kinshasa. UCM (l'unité en charge de la gestion et coordination des projets au sein du ministère de l'Énergie) a permis à notre équipe d'obtenir la permission des autorités locales d'entrer dans leurs quartiers. Une lettre d'autorisation a donc été signée par le chef de chaque commune et le chef de chaque quartier sélectionné avant de commencer l'enquête sur chacun des sites. Néanmoins, chaque zone d'étude (urbaine, péri-urbaine, rurale) a présenté ses propres problèmes d'accès.

Par exemple, dans certaines communautés rurales, les enquêteurs n'ont pas eu le droit d'interroger les femmes en l'absence de leur mari, alors qu'elles ont d'excellentes connaissances de l'utilisation énergétique de leur ménage. Dans ce cas, il fallait qu'au moins deux personnes soient présentes dans la pièce. Dans les zones péri-urbaines et urbaines, les difficultés concernaient l'accès à certaines rues en raison de barrages routiers. Dans certains cas, les enquêteurs ont dû convaincre les gardes de les laisser entrer dans une rue ou un *compound* spécifique.

➤ 5.4 Résultats de l'enquête

Ces questionnaires avaient donc pour objectif de recueillir des données sur l'utilisation, le niveau de consommation et les aspirations énergétiques, mais aussi sur les attitudes vis-à-vis des énergies renouvelables. Cette section présente une première analyse des données de l'enquête et explore l'accès aux services énergétiques chez les personnes interrogées, leur satisfaction et leurs aspirations dans le contexte de leur environnement urbain, péri-urbain ou rural. Les résultats présentés dans ce chapitre comprennent les données de l'enquête complétées par une étude documentaire, afin de favoriser une compréhension générale de l'accès à l'énergie à Kinshasa. Ce chapitre se limite à une première statistique descriptive, qui devrait donner un aperçu du type de questions pertinentes pour une bonne compréhension de la consommation énergétique dans la capitale congolaise.

Cette section est structurée de la façon suivante :

Section 5.4.1 : démographie de l'échantillon.

Section 5.4.2 : analyse des services énergétiques.

Section 5.4.3 : prochaines étapes pour l'analyse de l'enquête, puis conclusion.

5.4.1 Démographie

Afin d'obtenir une compréhension générale de l'échantillon de notre enquête, les personnes interrogées ont dans un premier temps répondu à plusieurs questions d'ordre général sur leur ménage et elles-mêmes.

Ces informations sont présentées ci-dessous. Parmi les réponses reçues, 487 ont été recueillies dans des zones rurales, 533 dans des zones péri-urbaines et 960 dans des zones urbaines. Quatre-vingt-neuf (89) personnes n'ont pas souhaité répondre à notre enquête.

5.4.2 Sexe des personnes interrogées

L'échantillon est constitué de 43 % d'hommes et 57 % de femmes (n=1 978). La Figure 5.3 démontre que dans l'ensemble des zones étudiées, le pourcentage de femmes ayant répondu à nos questions était supérieur à celui des hommes, notamment dans les zones rurales et péri-urbaines. Cette tendance féminine s'explique par la conduite de l'enquête pendant la journée, heures pendant lesquelles les femmes sont plus nombreuses au foyer compte tenu de leurs responsabilités domestiques ou d'activités économiques informelles.

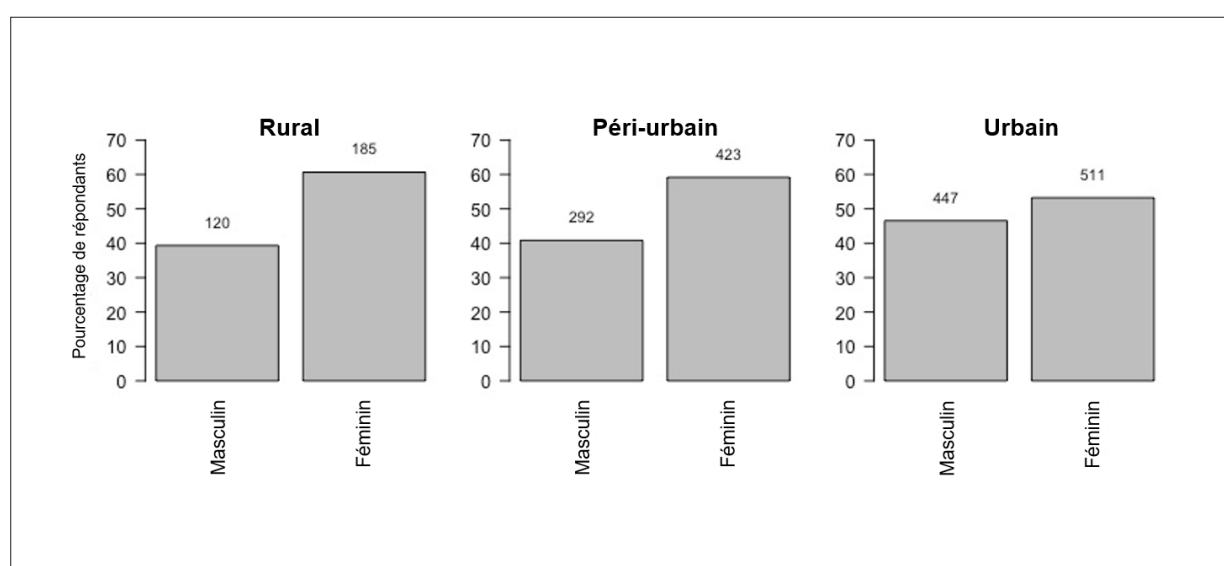


Figure 5.3 Représentation des sexes dans l'échantillon de l'enquête

5.4.2.1 Âge des personnes interrogées

Sans surprise, la majorité des personnes interrogées (plus de 80 %) avaient entre 26 et 60 ans (n=1 979), ce qui reflète le faible pourcentage de jeunes ou de personnes âgées sondés parmi les sondés. La répartition des personnes interrogées est illustrée dans la Figure 5.4.

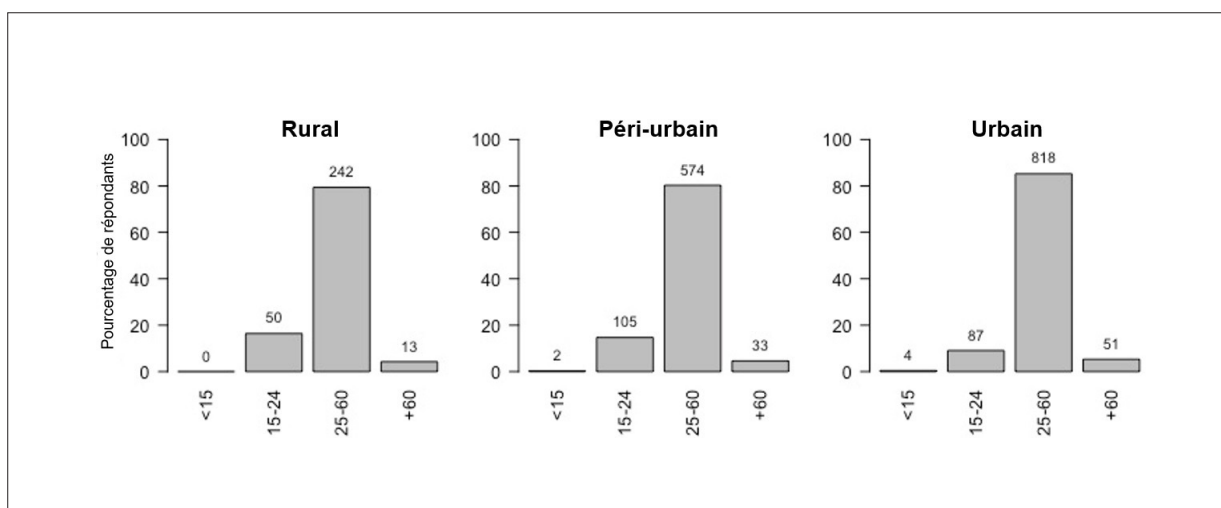


Figure 5.4 Âge des personnes interrogées (zones rurale, péri-urbaine et urbaine)

Ces chiffres ne sont pas représentatifs de la démographie globale de la RDC, où l'âge médian est de 18,8 ans, et près de la moitié de la population a moins de 15 ans ; néanmoins, ils reflètent la structure type des ménages. En effet, c'est généralement le chef de ménage (ou son épouse) qui répond aux enquêtes⁴⁷.

5.4.2.2 Revenus du ménage

Afin d'obtenir une meilleure compréhension du contexte socioéconomique des ménages interrogés et des différences entre les zones de l'enquête, nous avons demandé aux sondés de nous fournir une estimation des revenus totaux de leur ménage. Nous avons recueilli 1 870 réponses à cette question.

La majorité des sondés en zones rurales ont estimé les revenus totaux de leur ménage entre 50 et 100 dollars par mois ; une faible minorité des ménages a indiqué gagner plus de 200 dollars par mois (voir Figure 5.5). Ces chiffres varient fortement dans les zones péri-urbaines, avec une majorité de ménages indiquant gagner entre 100–200 dollars par mois ; les autres réponses les plus fréquentes sont, dans l'ordre, 50–100 dollars et 200–400 dollars. Parmi les personnes interrogées en zones urbaines, une majorité affirme gagner entre 200 et 400 dollars par mois, suivi par une catégorie importante indiquant gagner entre 100 et 200 dollars. En outre, 23 % des sondés estiment leurs revenus à un chiffre supérieur à 400 dollars par mois.

⁴⁷ <http://worldpopulationreview.com/countries/dr-congo-population/>

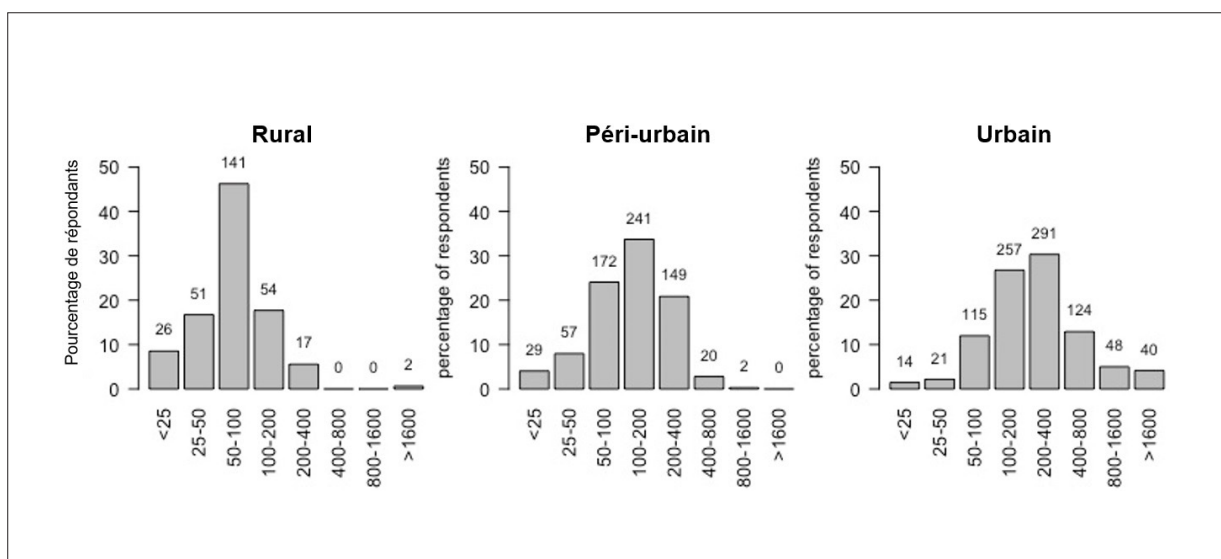


Figure 5.5 Estimation des revenus totaux des ménages ($n=1\,879$, dont $n=291$ en zones rurales, $n=669$ en zones péri-urbaines, et $n=910$ en zones urbaines)

Les niveaux de revenus sont un facteur important pour mieux comprendre la consommation, la satisfaction et la perception en matière énergétique. La deuxième phase de cette étude approfondira donc les liens entre niveaux de revenus et variables énergétiques (par exemple, la relation entre les niveaux de revenus et : les types d'énergie utilisés ; la satisfaction apportée par les différents combustibles utilisés à des fins spécifiques ; les attitudes et perceptions vis-à-vis des énergies renouvelables).

5.4.2.3 Type de logement

En vue de mieux cerner les conditions de vie des ménages interrogés, nous leur avons également demandé d'indiquer le type de logement dans lequel ils vivaient. Cette information est essentielle pour comprendre leur usage énergétique, dans la mesure où le type de logement apporte une indication sur a) le niveau d'affluence, les spécificités géographiques et les services disponibles, mais aussi sur b) les opportunités ou les limites de certaines solutions énergétiques, car certains types d'habitation peuvent restreindre les options de sources énergétiques.

Les différents types de logement rencontrés au cours de l'enquête sont résumés dans la Figure 5.6. Dans ce graphique, on retrouve des « maisons de plain-pied » (c'est à dire une maison sans étage), des « maisons à un étage » et des « maisons familiales », c'est à dire à plus d'un étage.

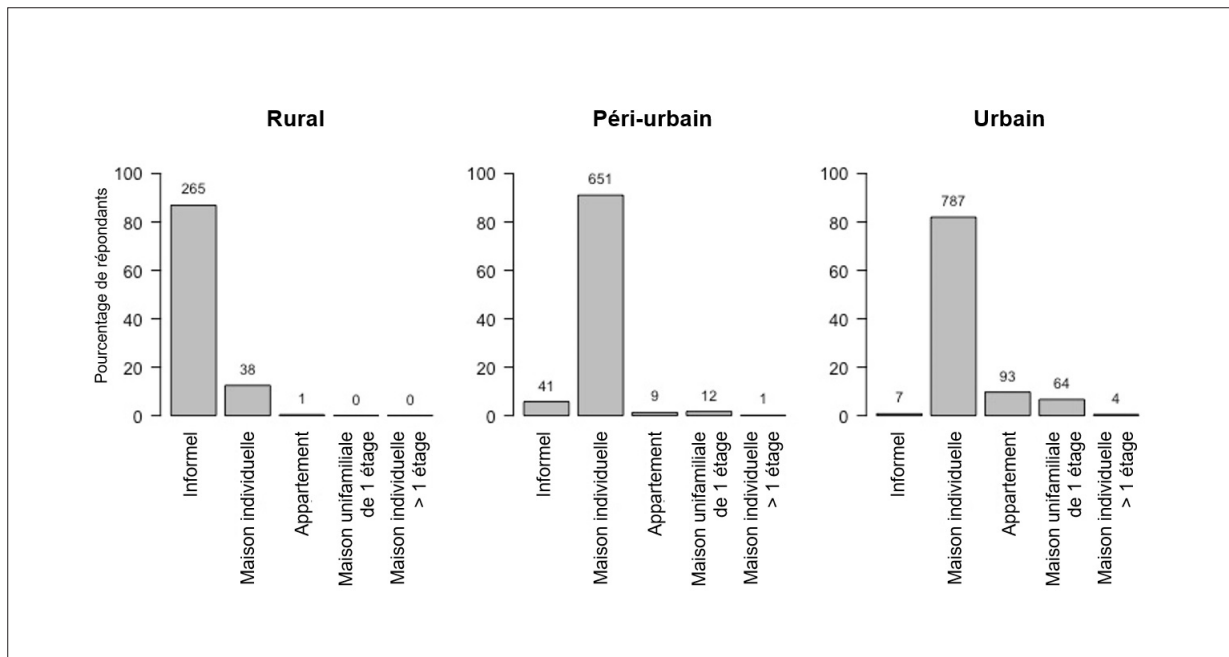


Figure 5.6 Types de logement dans les zones rurales, péri-urbaines et urbaines enquêtées (n=1 973)

Dans les zones urbaines, une grande majorité des personnes interrogées vivent dans une maison à un étage (82 %), suivi par des habitations en appartement (9,7 %) et en maison familiale (6,7 %). Dans les zones péri-urbaines, l'habitation en maison à un étage est largement dominante (91 %), suivi par les habitations informelles (6 %). Une minorité de personnes vit en appartement (1 %) ou dans une maison familiale (1,5 %). En revanche, en zones rurales, la tendance s'inverse ; les personnes interrogées ne sont que 12,5 % à vivre dans une maison à un étage, contre 87 % dans des habitations informelles. Ces chiffres sont représentatifs des modes d'établissement en Afrique, et reflètent la nature de la planification urbaine (ou de son absence) dans les différentes zones de notre enquête. Les informations sur les différents types de logement sont également importantes en termes de planification énergétique, car les coûts de connexion peuvent dépendre de la planification urbaine (ex. coûts d'électrification plus élevés dans des zones d'habitats dispersés que dans des ensembles résidentiels).

5.4.3 Sources d'énergies utilisées pour éclairer, cuisiner et réchauffer l'eau

5.4.3.1 Sources d'énergie

Les enquêteurs ont demandé aux personnes interrogées quelles sources d'énergies elles utilisaient dans leur foyer. Les réponses sont illustrées dans la Figure 5.7 et indiquent que les ménages utilisent plusieurs sources d'énergie quelle que soit leur zone d'habitation. Il est néanmoins important de noter que cette palette énergétique varie selon que les ménages habitent en zones rurales, péri-urbaines ou urbaines.

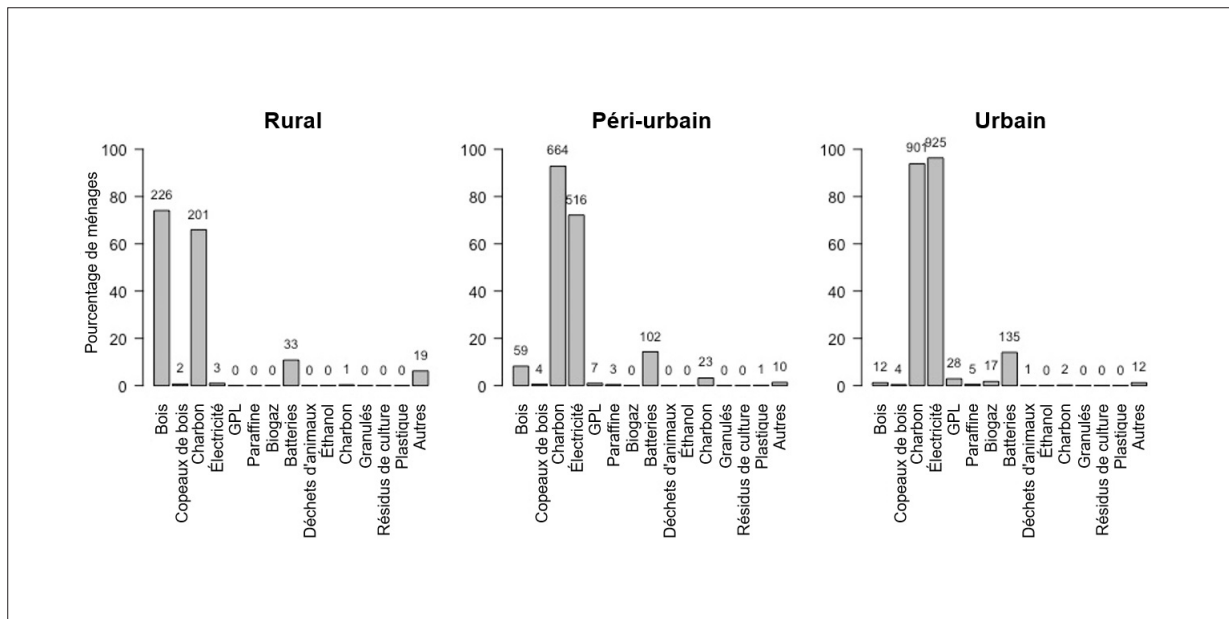


Figure 5.7 Sources d'énergie utilisées par les ménages

Le graphique ci-dessus illustre les grandes disparités d'accès à l'énergie dans les zones urbaines, péri-urbaines et rurales faisant l'objet de notre enquête. Conformément aux informations existantes à l'échelle internationale, l'usage de plusieurs types de combustibles est très répandu à Kinshasa. Au sein de l'échantillon rural, le bois et le charbon de bois sont les principaux combustibles utilisés par les sondés, suivis par les piles électriques, les copeaux de bois et l'électricité (les deux dernières sources sont peu courantes).

Les ménages des zones péri-urbaines dépendent davantage des copeaux de bois et de l'électricité, ainsi que, dans une moindre mesure, des piles électriques, du bois, du charbon, du GPL, des copeaux de bois et d'autres sources. Quant aux ménages des zones urbaines, une majorité d'entre eux ont répondu utiliser l'électricité, suivi de près par le charbon de bois, les piles électriques, le GPL, le biogaz, et marginalement le bois. Il est intéressant de noter que le bois, majoritairement utilisé dans les zones rurales, a été remplacé par le charbon de bois et l'électricité dans les zones urbaines.

Un élément déterminant pour la compréhension des modèles de consommation énergétique en RDC est la connaissance des sources de combustible spécifique à chaque usage. Sans cette information, il serait impossible d'estimer la demande à venir ou la pertinence des futures initiatives de planification.

5.4.3.2 Services énergétiques

L'un des principaux enjeux de notre étude était de générer des connaissances plus fines sur la consommation, les préférences et les perceptions en matière de services énergétiques à Kinshasa. Les services énergétiques explorés dans cette analyse préliminaire incluent l'éclairage, la cuisson, le chauffage d'eau et l'utilisation d'appareils électriques, soient les principales sources de consommation énergétique.

Les aspects spécifiques de l'utilisation énergétique étudiés sont donc : les sources d'énergie utilisées dans les ménages pour chaque type de service énergétique, le caractère suffisant (adéquation) et la satisfaction apportée par ces sources, l'éventuelle préférence pour d'autres sources, et les possibles obstacles empêchant d'adopter ces autres sources privilégiées. Outre ces sources d'énergie, nous avons mené une étude approfondie sur l'accès à l'électricité, notamment les niveaux et sources d'accès, la satisfaction apportée et l'ancienneté de cet accès à l'électricité.

Afin de déterminer les services énergétiques auxquels la population a accès, nous avons demandé aux sondés de citer toutes les formes d'énergie qu'elles utilisaient (voir Figure 5.8 ci-dessous). Cette figure présente une tendance très nette à l'augmentation du nombre de services énergétiques en passant des zones rurales à urbaines. Dans les zones rurales, l'usage énergétique est principalement dédié à l'éclairage (près de 90 %), à la cuisine (presque 100 %), suivi de loin par la charge des téléphones portables et les médias (un peu plus de 20 % pour la recharge des téléphones, et moins de 20 % pour les médias comme la radio ou la télévision).

Le nombre de services énergétiques augmente fortement en passant dans les zones péri-urbaines, où les ménages sont près de 100 % à utiliser une source d'énergie pour l'éclairage ou la cuisine, et plus de 70 % pour alimenter leur téléphone ou consommer des médias (comparé à 20 % en zones rurales). Il est intéressant de noter que la réfrigération n'a été mentionnée que par une personne interrogée en zone rurale (et personne ne l'a citée en tant que service énergétique), alors que 40 % des sondés en zones péri-urbaines utilisent un système de réfrigération, et que 22 % l'ont citée comme un service énergétique (voir Figure 5.8).

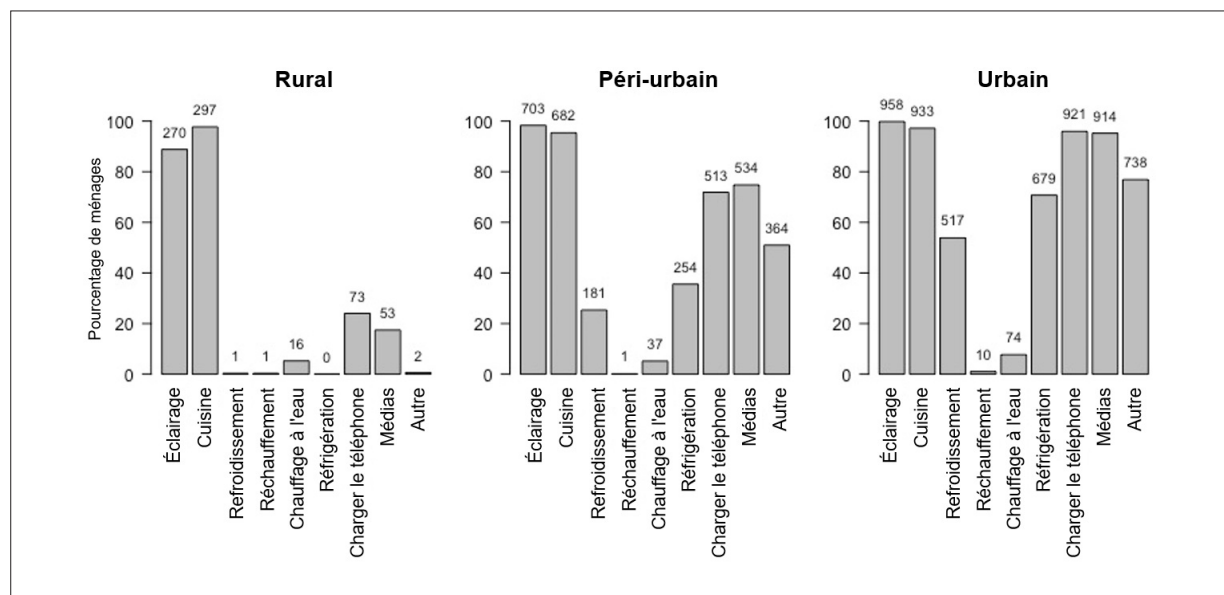


Figure 5.8 Services énergétiques obtenus dans les zones rurales, péri-urbaines et urbaines de l'échantillon d'enquête à Kinshasa

Dans les zones urbaines, ces chiffres sont d'autant plus importants, avec des niveaux de recharge de téléphone et de consommation de médias dépassant les 95 %, et des niveaux d'éclairage et de cuisine à 100 % et 98 %, respectivement. Près de 70 % des sondés ont également évoqué un usage énergétique pour la réfrigération, et près de 55 % pour la climatisation. Moins de 10 % d'entre eux ont indiqué faire réchauffer de l'eau, tandis que dix sondés ont parlé d'un système de chauffage. Les faibles chiffres associés au chauffage de l'eau sont une curiosité, compte tenu du nombre important de ménages kinois disposant d'un chauffe-eau. Une enquête plus poussée sur les pratiques de chauffage de l'eau et l'usage d'appareils électriques fournira probablement des plus amples éclairages à ce sujet.

La prochaine section fournit plus de détails sur les principaux services énergétiques que sont l'éclairage, la cuisson, le chauffage d'eau et l'usage d'appareils électriques.

5.4.3.3 Éclairage

L'éclairage est un service énergétique incontournable utilisé au quotidien par la population. Nous avons demandé aux sondés quelle était la source d'éclairage de leur ménage. La Figure 5.9 indique que la plupart des personnes interrogées ont mentionné des sources multiples, entraînant différents comportements en matière d'éclairage.

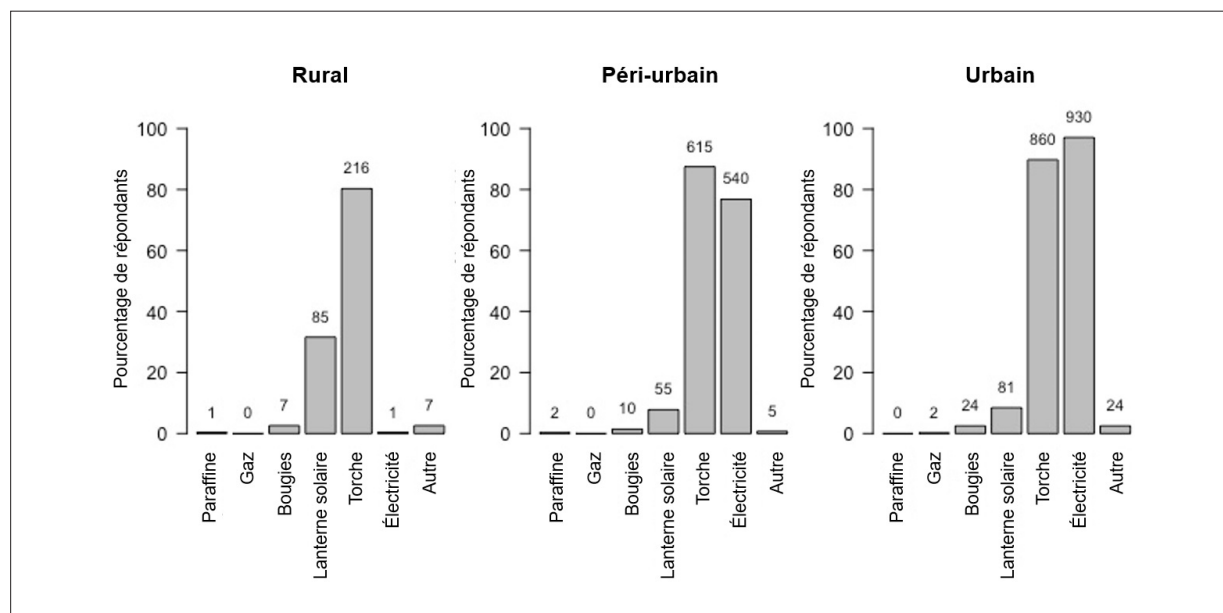


Figure 5.9 Sources d'énergie utilisées pour l'éclairage

Dans les zones rurales par exemple, la principale source d'éclairage est la lampe de poche, suivie par la lampe solaire. En se déplaçant vers les zones péri-urbaines, les sources d'éclairage varient ; en plus des lampes de poche et des lampes solaires, l'électricité devient une source importante de lumière. En zone urbaine, les lampes solaires et les bougies disparaissent au profit de l'électricité pour près de 100 % des ménages. L'utilisation de lampes de poche est toutefois dominante quelle que soit la zone, et répond probablement à un besoin d'appoint, en cas de coupure de courant. Nous approfondirons ce point dans la section dédiée à l'usage électrique.

Les enquêteurs ont également demandé aux ménages si leur principale source d'éclairage répondait bien à leurs besoins. Les résultats sont illustrés dans la Figure 5.10 ci-dessous. Il apparaît clairement que les sources d'énergie actuellement utilisées pour l'éclairage sont largement considérées comme inadéquates par les sondés en zones rurales ; 53,3 % (n=269) d'entre eux indiquent que leurs sources énergétiques d'éclairage (lampes de poche et lampes solaires) ne sont jamais, ou rarement suffisantes, tandis que 28,3 % des personnes interrogées ont répondu qu'elles l'étaient toujours, ou généralement.

Cette tendance s'inverse dans les zones péri-urbaines, où la majorité des enquêtés (57,3 %, n=703) indique que leurs sources d'éclairage répondent toujours, ou généralement à leurs besoins. Il est intéressant de noter que dans les zones urbaines, où la population utilise pourtant largement un éclairage électrique, la perception liée à ces sources d'éclairage (électricité et lampes de poche) est mitigée ; 56,2 % (n= 958) des personnes interrogées les considèrent suffisantes, mais 27,5 % ne partagent pas cet avis.

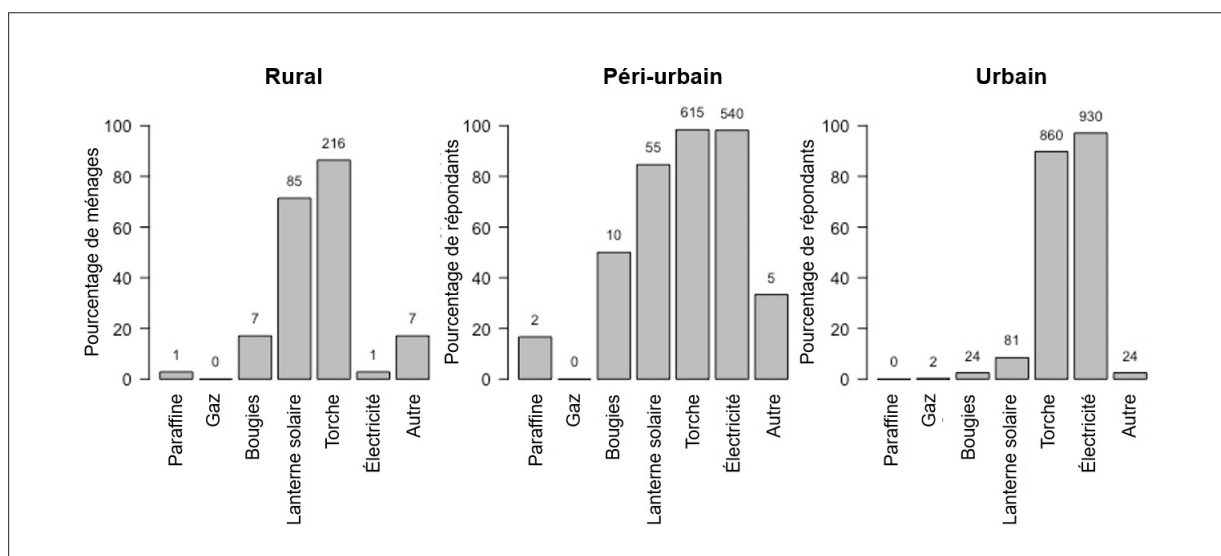


Figure 5.10 Adéquation des principales sources lumineuses pour répondre aux besoins d'éclairage

Nous avons également demandé aux ménages d'indiquer leur niveau de satisfaction par rapport à leur principale source d'énergie pour l'éclairage ; tout comme pour l'adéquation de ces sources, une majorité des sondés en zones rurales a répondu ne pas être satisfaite (Figure 5.11). Environ les trois quarts des personnes interrogées en zones péri-urbaines se disent satisfaits de leur source d'éclairage. Curieusement, malgré des sources énergétiques jugées majoritairement suffisantes en zones urbaines, les niveaux de satisfaction ne reflètent pas la tendance observée ailleurs — en effet, près de la moitié des enquêtés sont malgré tout mécontents de leurs sources d'éclairage.

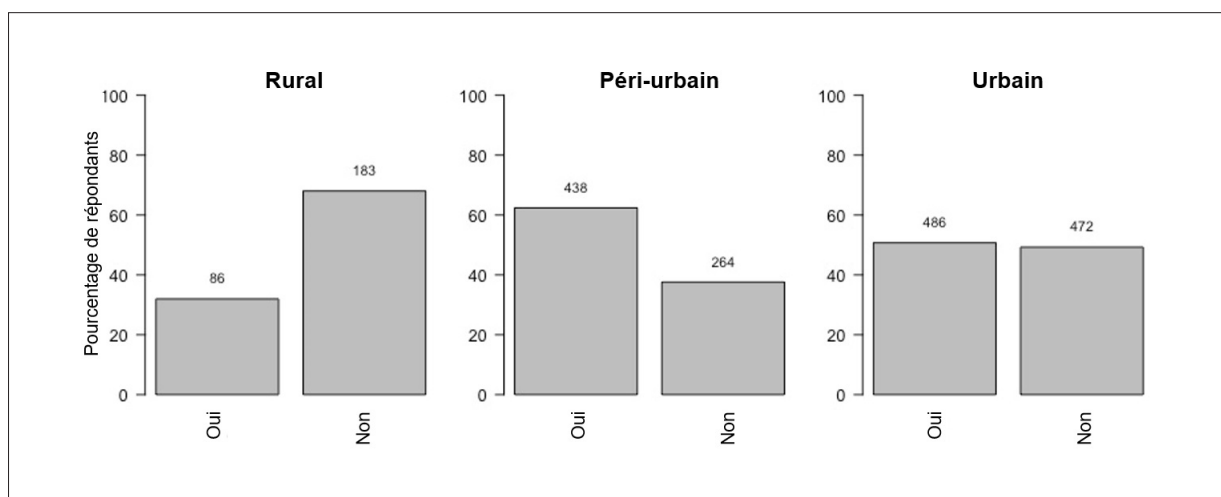


Figure 5.11 Satisfaction des enquêtés vis-à-vis de leurs sources d'éclairage actuelles

Afin d'obtenir plus de précisions sur les sources d'éclairage privilégiées dans les zones où les sondés se sont déclarés insatisfaits de leur option actuelle, les enquêteurs leur ont demandé quelle source d'énergie ils préféreraient utiliser. Les réponses sont similaires quelles que soit la zone d'enquête : la majorité des ménages ont une préférence pour des sources électriques fiables ainsi que pour l'énergie solaire.

Les principaux obstacles identifiés pour concrétiser ce basculement (n=224) sont liés au « règlement » (notamment gouvernemental), au coût et à la disponibilité des sources d'énergie (voir Figure 5.12 ci-dessous).

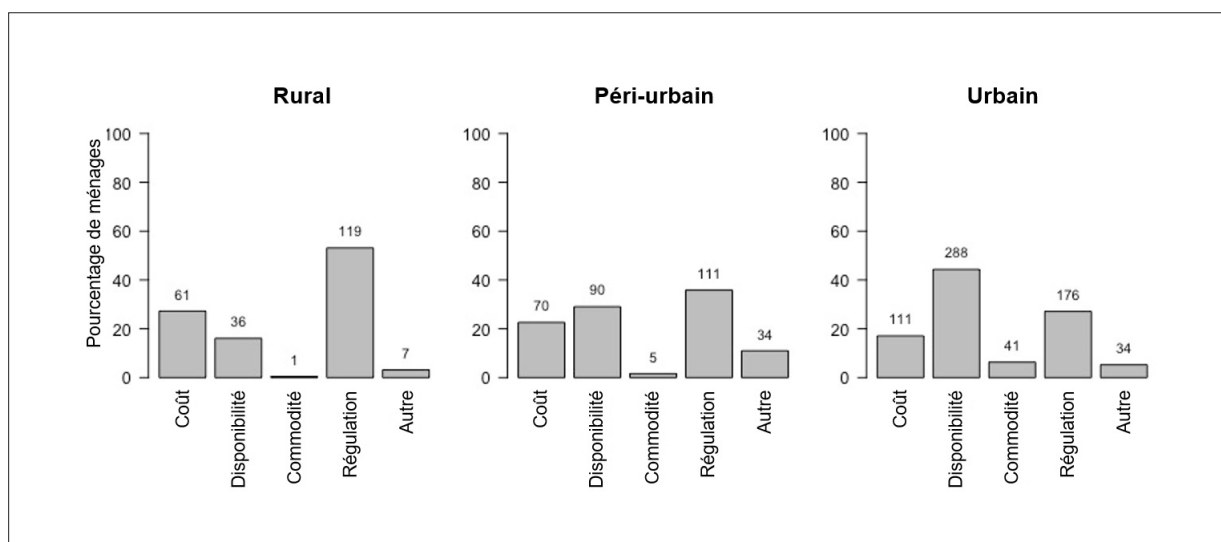


Figure 5.12 Obstacles au changement de la principale source d'éclairage

5.4.3.4 Cuisson

Le deuxième service énergétique étudié est la cuisson. Sans surprise, l'enquête a permis de révéler une grande diversité de sources énergétiques utilisées pour cuisiner. Dans les zones rurales, la majorité des personnes interrogées utilisent en premier lieu du bois, suivi par du charbon de bois (voir Figure 5.13). En zones péri-urbaines, les usages sont extrêmement différents : l'utilisation du bois est quasi-inexistante et largement remplacé par le charbon de bois (à plus de 85 %), suivi par l'électricité (un peu moins de 40 %). Dans l'échantillon urbain, le charbon de bois demeure une source énergétique majoritaire (plus de 90 %), tandis que l'usage du bois est supplanté par l'électricité (près de 60 % des utilisateurs).

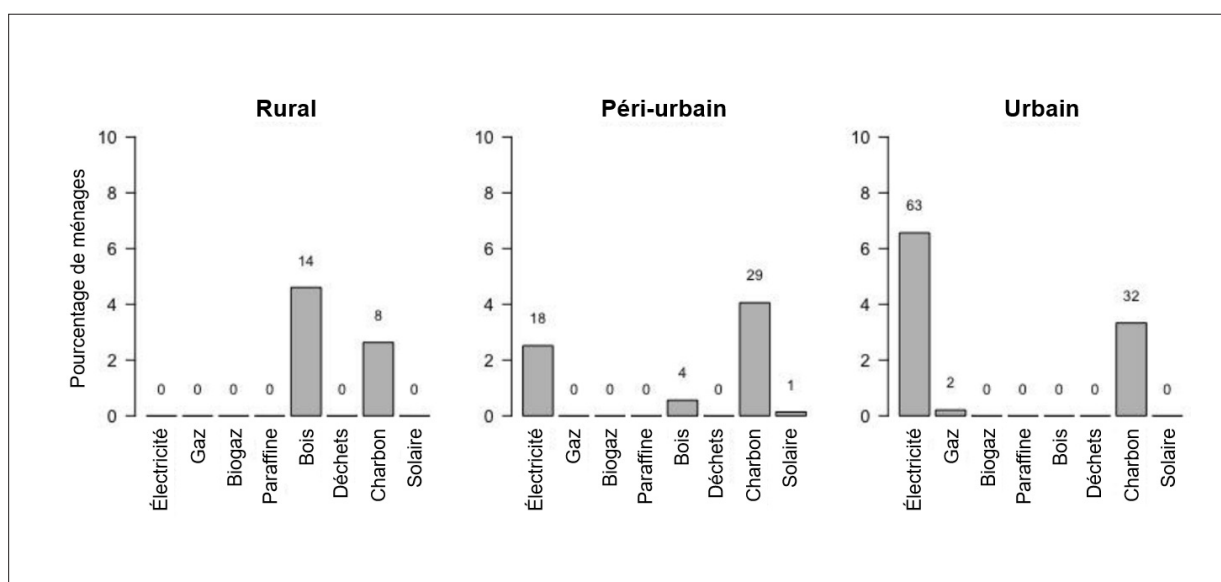


Figure 5.13 Sources énergétiques utilisées pour la cuisine

Niveau adéquation, les sources d'énergies utilisées pour faire la cuisine suscitent un plus large éventail de réponses que celui recueilli pour sur l'éclairage. Dans les zones rurales, 40,7 % des sondés (n=295)

indiquent que le combustible de cuisson habituel n'est jamais, ou rarement en adéquation avec leurs besoins, mais une proportion similaire (38 %) considère que ses sources énergétiques actuelles sont toujours, ou généralement adéquates (voir Figure 5.14).

Ce nombre augmente légèrement en zones péri-urbaines ; 50,4 % des enquêtés estiment que leurs combustibles actuels sont adéquats, contre 32,7 % qui ne les considèrent jamais ou rarement suffisants (n= 681). En zones urbaines, 50,5 % de l'échantillon déclare que les sources énergétiques utilisées sont toujours ou généralement adéquates, tandis que 25,5 % estime qu'elles ne le sont jamais, ou rarement (n=932). Étonnamment, les sources d'énergie utilisées pour la cuisine — pourtant l'un des principaux usages énergétiques des ménages — recueillent un niveau de satisfaction plus élevé que l'éclairage. Cela peut s'expliquer par le poids des habitudes, de l'expérience et des attentes liées à différents types de combustibles, ou encore par les faibles attentes des options disponibles.

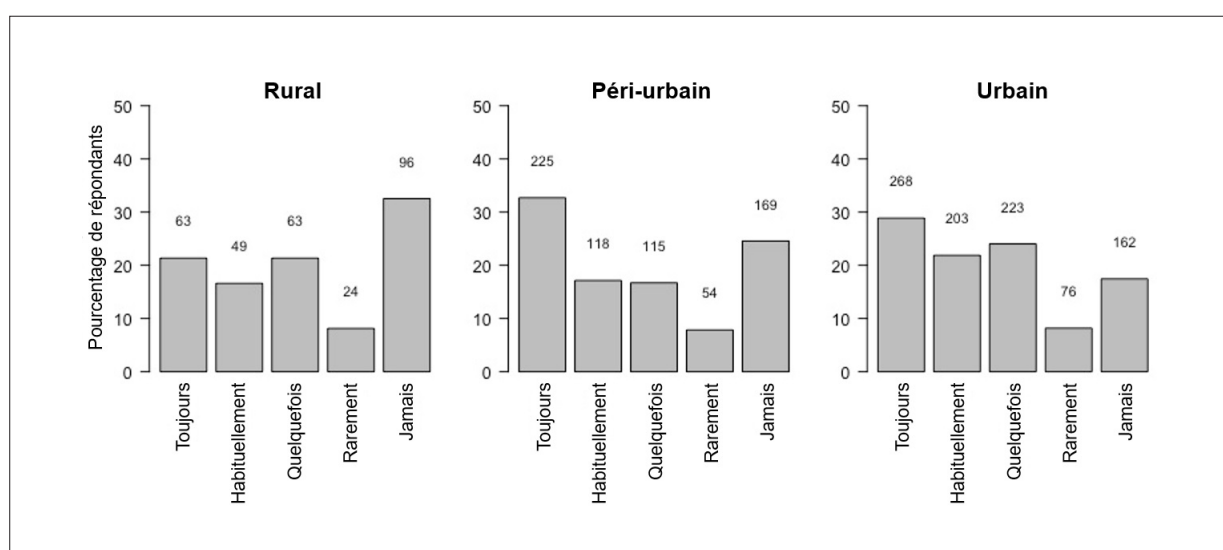


Figure 5.14 Adéquation du principal combustible de cuisine par rapport aux besoins de cuisson des ménages

Nous obtenons une image plus détaillée grâce au niveau de satisfaction des sondés par rapport aux sources énergétiques qu'ils utilisent actuellement pour cuisiner (Figure 5.15). Dans toutes les zones de l'enquête, l'échantillon se déclare insatisfait des combustibles utilisés pour la cuisine. Cette insatisfaction est toutefois plus élevée parmi les sondés en zones rurales, et plus nuancée chez les habitants des zones urbaines et péri-urbaines.

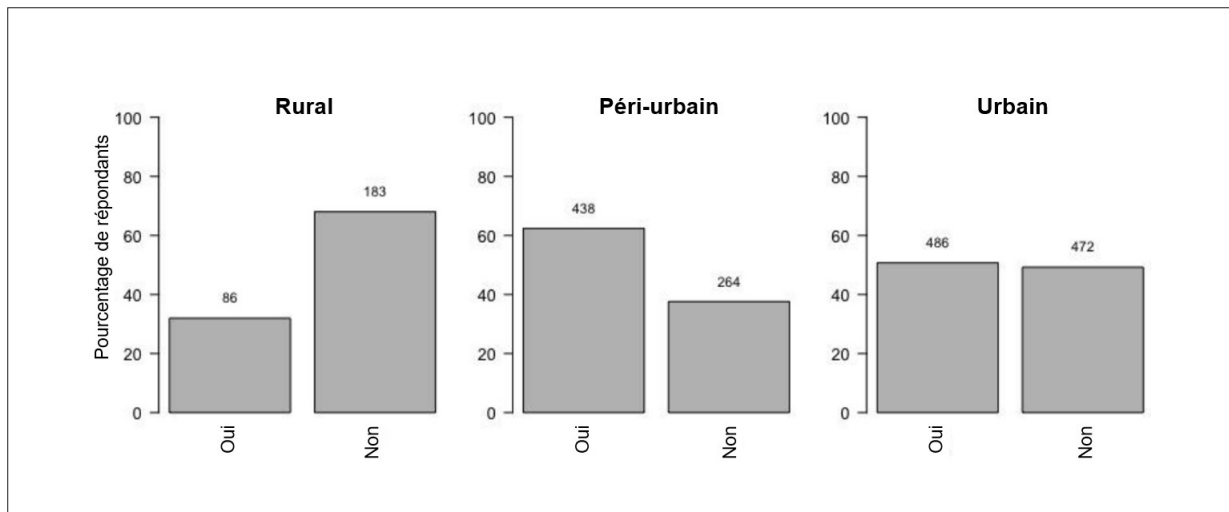


Figure 5.15 Satisfaction des sondés par rapport à leurs combustibles de cuisson actuels

Parmi les sondés, toutes zones confondues, qui n'utilisent pas leur source énergétique privilégiée, la quasi-totalité souhaiterait utiliser l'électricité pour cuisiner.

La Figure 5.16 ci-dessous illustre les freins rencontrés par les ménages qui aimeraient changer de source énergétique pour cuisiner. De toutes les réponses reçues, le coût, la disponibilité et le « règlement » représentent les principaux obstacles à de nouvelles pratiques.

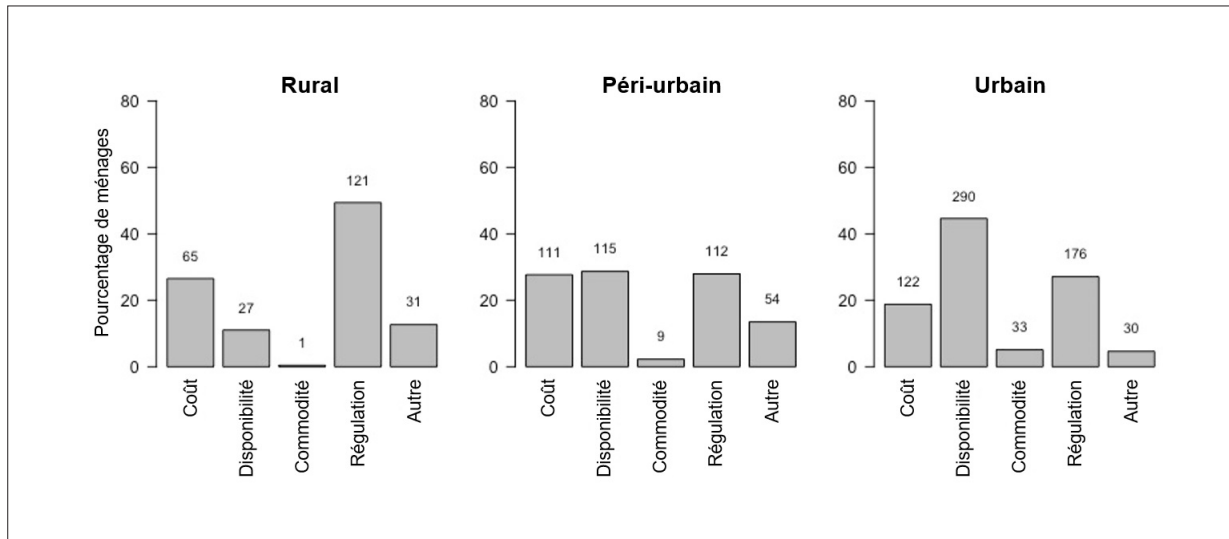


Figure 5.16 Obstacles au changement pour le combustible de cuisson privilégié

5.4.3.5 Chauffage de l'eau

Pour brosser un tableau complet de l'usage énergétique des ménages, nous avons également demandé aux sondés d'indiquer quel moyen ils utilisaient pour chauffer l'eau. Un nombre limité de l'échantillon a indiqué chauffer de l'eau dans sa routine énergétique (voir Figure 5.17). Dans les zones rurales, 22 % à peine des sondés indiquent chauffer de l'eau à la maison ; 14 % d'entre eux utilisent du bois, et 8 % du charbon de bois. Dans les zones péri-urbaines, l'eau est chauffée à l'aide de charbon de bois (29

ménages), d'électricité (18 ménages) ou de bois (4 ménages). En zones urbaines, la grande majorité des personnes interrogées faisant chauffer de l'eau utilise un moyen électrique (63 personnes sur les 97 interrogées), du charbon de bois (32 personnes) ou du gaz (2 personnes).

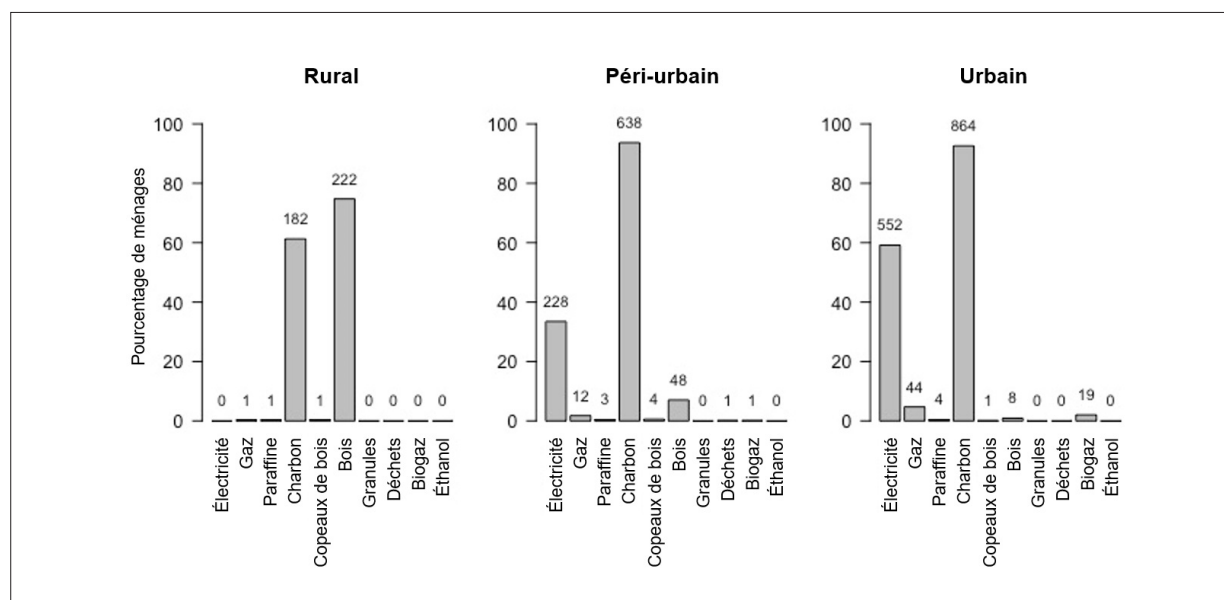


Figure 5.17 Combustibles utilisés par les sondés pour chauffer l'eau

Les faibles pourcentages de l'échantillon ayant recours au chauffage de l'eau pourrait s'expliquer par le calendrier de l'enquête, menée entre octobre et décembre. De plus, compte tenu du faible nombre de sondés faisant chauffer de l'eau, ces données seront analysées plus en détail dans la phase II, puis corrélées avec d'autres questions telles que coût, la satisfaction et l'adéquation des sources énergétiques.

5.4.4 Accès à l'électricité et aux appareils

5.4.4.1 Accès à l'électricité

La majorité des programmes d'accès à l'énergie mettent l'accent sur la fourniture d'un accès à l'électricité au niveau des ménages. Dans le cadre de notre enquête, nous avons posé une série de questions sur l'électricité ; les premières réponses reçues sont exposées ci-dessous.

La première question concernait le niveau d'accès de l'échantillon, enregistré en tant que pourcentage des foyers électrifiés (Figure 5.18). Les résultats de notre analyse initiales sont présentés ci-dessous, et démontrent qu'en zones rurales, 2,2 % des ménages (3 ménages sur 139) déclare avoir accès à une forme d'électricité. Dans les zones péri-urbaines et urbaines, ce nombre monte en flèche pour atteindre 70 % et 90 %, respectivement.

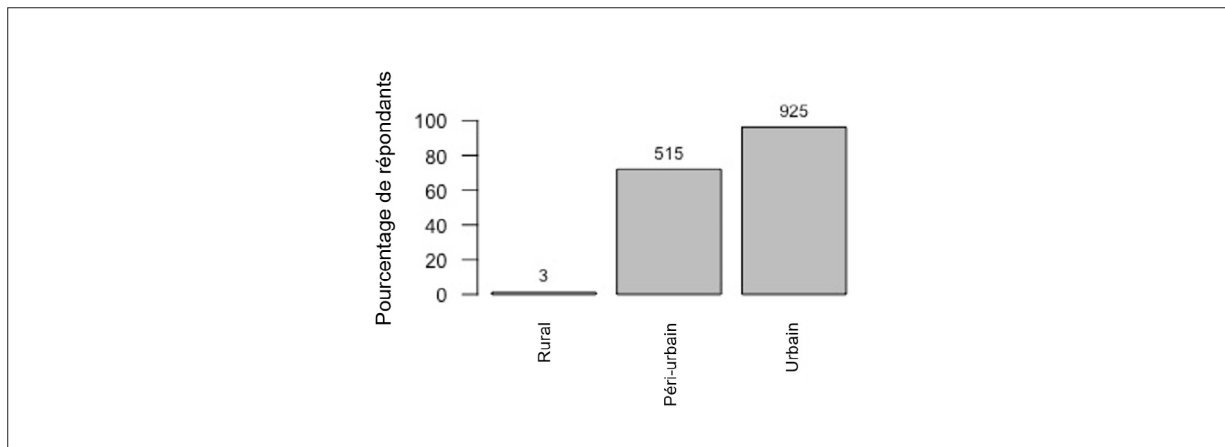


Figure 5.18 Accès à l'électricité

L'étude étant focalisée sur la province de Kinshasa, les niveaux d'électrification indiqués sont largement supérieurs à la moyenne nationale.

5.4.4.2 Usage des appareils

L'accès à l'électricité permet l'utilisation de divers appareils. Nous avons demandé aux enquêtés s'ils avaient accès à différents appareils. Il convient de noter que nous avons posé cette question à l'ensemble des sondés, et non pas uniquement à ceux qui avaient accès à l'électricité. Les réponses à cette question sont illustrées dans la Figure 5.19.

Une tendance saute immédiatement aux yeux : en zones rurales, les ménages ne possèdent presque aucun appareil électrique—raison pour laquelle le graphique illustre uniquement l'usage des appareils électriques en zones péri-urbaines et urbaines. Ce graphique permet d'approfondir le type d'appareils utilisés dans les ménages. Dans les zones péri-urbaines, près de la moitié des ménages utilise un fer à repasser, ainsi qu'un décodeur et un système d'alimentation sans coupure (onduleur). Près de 10 % des ménages a également accès à un ordinateur portable (PC) et une bouilloire.

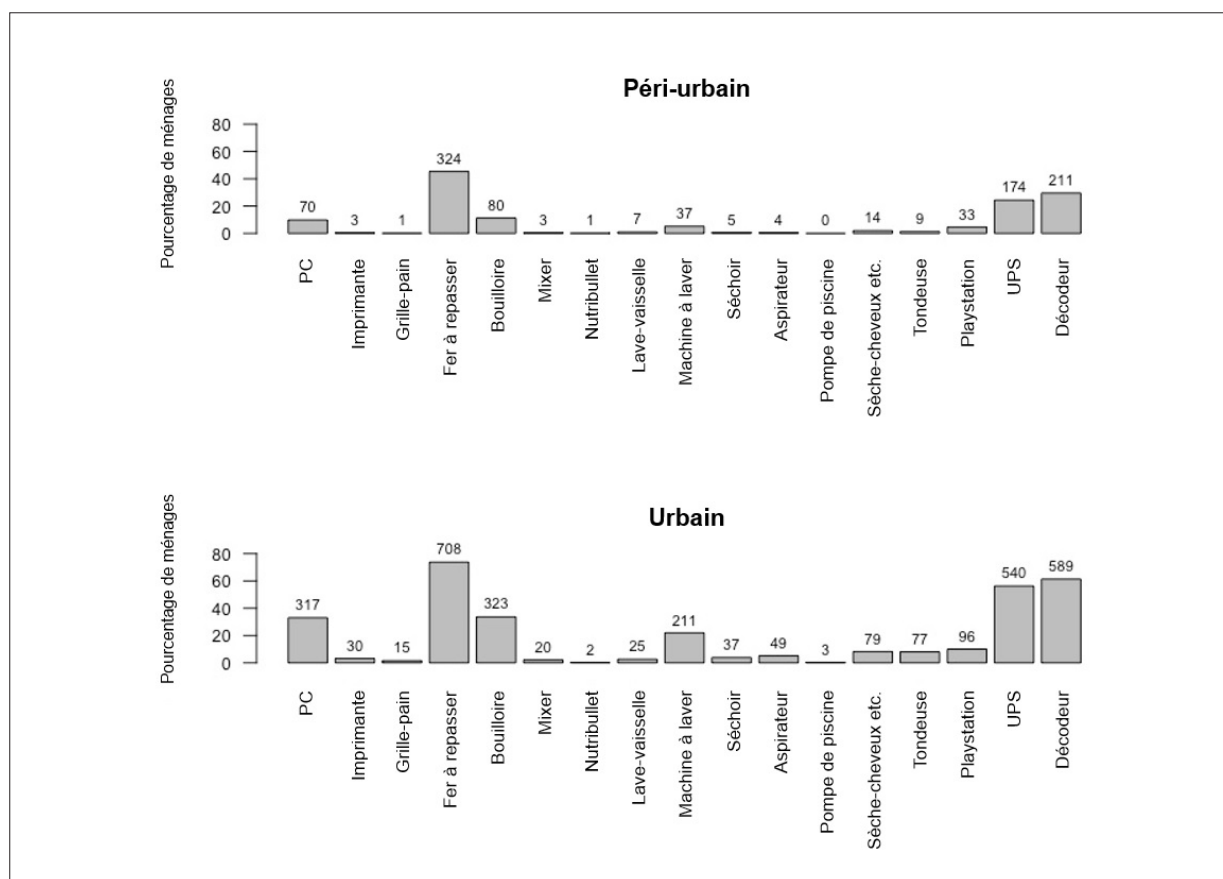


Figure 5.19 Usage d'appareils électrique dans les zones péri-urbaines et urbaines

Ces pourcentages évoluent de façon spectaculaire en zones urbaines, où près de 70 % des ménages possède un fer à repasser, près de la moitié des sondés possède également un décodeur, un onduleur, et environ 30 % un ordinateur et une bouilloire. Par ailleurs, près de 20 % des sondés en zones urbaines possède une machine à laver, un appareil qui consomme beaucoup d'électricité—alors qu'ils n'étaient qu'une poignée en zones péri-urbaines.

5.5 Discussion

Dans la section à venir, nous examinons les résultats préliminaires présentés plus haut à la lumière d'autres études existantes sur le sujet.

5.5.1 Diversité géographique dans l'accès et l'usage de l'électricité : l'impératif d'élargir les cibles de l'électrification

Les données présentées plus haut sur les types de ménages, notamment en zones rurales, correspondent à la littérature existante sur le sujet, dans la mesure où la majorité des ménages n'a pas accès à l'électricité (Kefalidou A. and Vener J. 2014). Dans ces zones, l'accès à l'éclairage, à la cuisson et aux médias (les principaux usages énergétiques) ne dépend pas forcément de l'électrification. La cuisson par exemple, s'effectue grâce au bois de chauffe ou au charbon de bois. Ces informations coïncident avec celles du FAO par exemple, qui mentionnait en 2017 que pour plus de 2,4 milliards de personnes (un tiers de la population mondiale), la cuisson reposait principalement sur l'énergie dérivée du bois. En Afrique, plus de 60 % de la population dépend du bois comme combustible de cuisson.

Pour ce qui est de l'éclairage, notre étude démontre que la population utilise surtout des lampes de poche avec piles électriques rechargeables. Pour avoir accès aux médias, la population utilise des téléphones, parfois rechargés grâce à un petit panneau solaire ou une batterie—des résultats d'ailleurs étayés par Rebecca R. (2017). Ces données soulignent que sans électricité, il est impossible pour un ménage d'avoir un téléphone, une télévision ou une radio non-alimenté par batterie.

La présente étude consacrée aux usages de cuisson, d'éclairage et d'accès aux médias dans une zone rurale non-électrifiée de Kinshasa semble corroborer avec les conclusions de Dutta (2003, p. 17) : dans la plupart des ménages ruraux ayant accès à l'électricité, celle-ci est uniquement utilisée pour l'éclairage, la télévision et la radio. Une étude menée parmi des villageois indiens a révélé qu'une fois que les ménages avaient accès à l'électricité, ils s'en servaient principalement pour trois usages, à savoir l'éclairage, les divertissements (radio et télé) et le ventilateur, pour rafraîchir leur foyer (Barnes et Sen, 2004).

La plupart des villes africaines font actuellement face au problème de la croissance démographique, dont l'une des principales causes est l'exode rural (Zarma et al., 2013).

Il est donc important que les initiatives d'électrification se concentrent sur les populations rurales, dans la mesure où l'accès à l'électricité pourrait contribuer à ralentir le phénomène d'exode rural et faciliter la transformation des produits agricoles. L'électrification pourrait également permettre d'augmenter les revenus des populations rurales, qui sont généralement très faibles. Thilakasiri (2015) confirme ce postulat en déclarant qu'il est impossible de lutter contre la pauvreté sans énergie.

En Afrique centrale, le bois représente la source énergétique majoritaire des ménages (85 % en République démocratique du Congo (RDC)). A Kinshasa par exemple, la population consomme cinq millions de tonnes de bois par an, vraisemblablement issues de l'exploitation d'environ 60 000 hectares de forêts naturelles situées en milieu péri-urbain. Avec la croissance rapide de la population urbaine (celle de Kinshasa a doublé en une génération), la pression sur les forêts naturelles s'intensifie et engendre des effets négatifs sur l'économie, la société et l'environnement (Cirad, 2018).

L'amélioration de l'accès à des services énergétiques fiables et au coût abordable pour la cuisson est donc indispensable dans les pays en développement, notamment en RDC, afin de réduire les impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement causés par la combustion de la biomasse traditionnelle (Mala and Govinda, 2014).

Contrairement au milieu rural, nos résultats dans les zones péri-urbaines témoignent d'une nette augmentation de l'accès aux services énergétiques. Cette évolution correspond à l'augmentation de l'usage électrique, lui-même favorisé par la proximité avec le centre-ville et le réseau électrique. Toutefois, la majorité des personnes interrogées utilisent plusieurs sources et technologies pour répondre à leurs besoins énergétiques (cuisson, éclairage, alimentation d'appareils).

Par exemple, la plupart des ménages sondés utilisent des lampes de poche pour s'éclairer, et du bois de chauffe pour cuisiner. Cette diversité d'usage soulève l'importante question de la fiabilité de l'accès à l'électricité en zones péri-urbaines. Cet usage « multi-énergies » (*fuel stacking*) a largement été décrit dans la littérature sur l'accès à l'énergie : il s'agit d'une part d'un mécanisme d'adaptation au manque de fiabilité du réseau électrique, mais également d'un moyen de satisfaire ses besoins énergétiques en fonction de la disponibilité et de l'accessibilité économique des différents combustibles (Voir e.g. van der Kroon et al. 2013). Cette étude et tant d'autres font le rapprochement entre le statut socio-économique d'un ménage et son accès, notamment financier, aux différentes sources de combustible.

L'environnement urbain de Kinshasa se caractérise principalement par des appartements et des maisons de plain-pied, comme dans la plupart des villes africaines. Ce type de structures d'habitation s'étend

également aux zones péri-urbaines, auparavant dominées par les maisons simples et quelques immeubles. Cette évolution est un signe d'expansion urbaine, mais aussi un indicateur de l'augmentation de la demande énergétique. Sans surprise, le taux d'électrification des ménages péri-urbains est largement supérieur à celui des zones rurales.

De nombreux pays africains (Afrique du sud, Zambie, RDC) souffrent de délestages fréquents en raison de leur incapacité à satisfaire la demande électrique. Cette faiblesse a également été citée comme l'une des principales justifications de l'usage du bois. D'après ces résultats dans le contexte congolais, une question s'impose. Que doit-on privilégier : l'amélioration des connexions existantes, ou l'expansion de l'approvisionnement électrique afin d'en démocratiser l'accès et atteindre les objectifs nationaux d'électrification ? Ou bien une combinaison de ces deux options ? Il est crucial d'aborder cette question dans le contexte de l'électrification de la DRC au niveau rural, mais également péri-urbain et urbain.

La demande énergétique à Kinshasa demeure un problème important car l'énergie disponible ne répond pas aux besoins de la population. Dans la prochaine phase de notre étude, nous approfondirons la disponibilité, la fiabilité énergétique et la perception des ménages vis-à-vis de l'énergie et de son approvisionnement.

5.5.2 Revenus, accessibilité économique et demande

Les résultats de notre enquête à Kinshasa démontrent que l'environnement urbain bénéficie d'un taux d'accès à l'énergie largement supérieur aux zones rurales. Ils soulignent également les plus hauts revenus des ménages urbains par rapport aux populations des zones péri-urbaines et rurales. Ces données soulèvent plusieurs questions : si l'électricité était fournie aux ménages, dans quelle mesure pourraient-ils se l'offrir ? Qu'en est-il de leur consentement à payer cet accès ? Quelle est la demande anticipée en énergie (électricité ou autres combustibles) dans les zones péri-urbaines et rurales, et quels seraient les services énergétiques alimentés ?

Une conclusion fondamentale de notre enquête est qu'en dépit d'un accès important à l'électricité en zone urbaine, l'usage de bois pour la cuisson demeure courant. Cela soulève différentes interrogations sur :

- La qualité de l'électricité fournie pour un éventail d'utilisations finales ;
- La fiabilité de l'électricité fournies ;
- La connexion au réseau ;
- L'accessibilité économique de l'électricité pour les ménages urbains.

L'électrification rurale fait partie des priorités du gouvernement congolais. Le ministère de l'Energie a par exemple créé une agence dédiée à l'électrification des zones rurales (l'ANSER, créé par le décret 16/014 en 2016). Néanmoins, les ressources financières sont insuffisantes pour que l'agence soit totalement opérationnelle.

L'électrification rurale reste un défi de taille dans l'ensemble des initiatives d'électrification à travers le monde. Le Rapport sur la situation mondiale des énergies renouvelables de 2013 indique que parmi les personnes vivant sans électricité, quatre personnes sur cinq habitent dans les zones rurales d'Asie du sud ou d'Afrique subsaharienne. Le Cadre de suivi mondial (2013) révèle qu'à peine 1 % de la population rurale des pays suivants a accès à l'énergie : Burundi, Burkina Faso et Liberia. Ces données reflètent parfaitement la réalité congolaise, où moins d'un pour cent de la population rurale a actuellement accès à l'électricité.

Kefalidou et Vener (2014), pour ne citer qu'eux, mettent en évidence les difficultés à accéder aux sources d'énergie dans les zones rurales. Le développement de réseaux électriques ruraux est relégué au second plan en raison du coût élevé de l'expansion des réseaux sur de longues distances et vers des zones à faible densité. De plus, l'argument économique soutenant l'électrification des zones rurales a moins de poids

qu'en zone urbaine — les revenus des populations rurales sont plus faibles, tout comme le nombre de clients et le volume de demande — ce qui renforce les freins à l'électrification rurale.

Néanmoins, l'accès à l'électricité est un moteur clé du développement des pays africains, ce qui suffit à justifier que l'électrification rurale demeure une priorité des plans nationaux d'électrification.

5.5.3 Distinguer source et service énergétique

En termes d'accès à l'énergie, la distribution est largement inégalitaire entre les trois zones de notre enquête (zones rurales non électrifiées, et zones péri-urbaines et urbaines électrifiées), mais l'on observe d'importantes similitudes dans les services énergétiques (utilisation finale de l'énergie) et les sources de combustibles. Par exemple, dans les trois environnements (urbain, péri-urbain et rural), on constate une utilisation du bois et du charbon de bois pour la cuisine ; cela laisse penser que les ménages de Kinshasa ne disposent pas d'un approvisionnement constant ou suffisant en combustibles de cuisson. Il s'agit également d'un indicateur d'insatisfaction par rapport aux sources énergétiques actuellement utilisées par les sondés dans les trois zones. Cette information soulève des questions importantes sur l'amélioration de la qualité de l'accès, par opposition à la fourniture d'un accès de base aux services énergétiques. Le gouvernement congolais s'est par exemple fixé l'objectif d'améliorer l'accès à l'énergie à 30 % de la population d'ici 2023.

Pour atteindre cet objectif, la qualité de l'accès et le niveau de services fournis, mais aussi le nombre de ménages connectés doivent être pris en compte. La négligence de ces facteurs dans d'autres pays d'Afrique a engendré des niveaux élevés de ménages « connectés » au réseau électrique de façon théorique, alors que seule une minorité d'entre eux l'étaient en réalité, en raison du manque de fiabilité, de la mauvaise qualité de l'accès ou d'un coût peu abordable, entre autres. Toutefois, en termes d'usage énergétique des ménages, et particulièrement pour les pratiques de cuisson, il est essentiel de prendre en considération les pratiques et préférences de l'utilisateur final.

Nous avons par exemple observé qu'en dépit d'un accès généralisé à l'électricité dans les zones urbaines, les ménages utilisaient toujours largement le charbon de bois et le bois pour cuisiner. Cela peut s'expliquer par la facilité d'utilisation, le goût et la qualité des mets préparés, l'habitude, etc. L'usage d'une diversité de combustibles a déjà été observé dans de nombreuses études. Les ménages dans les pays en développement utilisent souvent des combustibles solides, du biogaz et du gaz de pétrole liquéfié (GPL) pour cuisiner. Etant donné l'importance des besoins énergétiques associés à la cuisine, ces combustibles représentent une part non négligeable de leur consommation énergétique globale. Le kérosène est surtout utilisé pour la cuisson et l'éclairage, tandis que le gaz naturel est plutôt utilisé pour la cuisson et le chauffage, mais ils représentent tous deux une part minoritaire de la consommation globale des ménages. Au contraire, l'électricité est surtout utilisée pour l'éclairage et les appareils électriques, mais peu pour cuisiner (Mala and Govinda, 2014).

Plusieurs études mettent en avant l'importance de la préférence de l'utilisateur et de la qualité des plats cuisinés avec des sources d'énergie traditionnelles. Les autres facteurs identifiés sont les revenus du ménage, la préférence culturelle, les conditions météorologiques habituelles/saisons de l'année, le type d'habitation, le prix des combustibles de cuisson, la proximité des sources et les habitudes du ménage par rapport à une source énergétique donnée pour la cuisson (Voir Olugbire et al. 2016 ; Mohlakoana et al. 2019). Cet aspect sera approfondi dans la phase 2 de cette étude.

➤ 5.6 Réflexions et conclusion

Le présent chapitre a détaillé la conduite et les résultats initiaux d'une enquête par questionnaire. Nous avons mené cette enquête en milieux rural, péri-urbain et urbain à Kinshasa et dans ses environs afin d'obtenir

une meilleure compréhension des usages énergétiques dans la région de la capitale congolaise. Ce chapitre a également permis de présenter une première analyse des données sur certaines des variables étudiées.

Cette enquête exploratoire nous a non seulement permis de mieux cerner les usages énergétiques actuels, mais aussi d'explorer les aspects de la suffisance, des préférences et de la perception des ménages vis-à-vis des sources énergétiques. Comme pour toute étude, notre enquête a été conduite dans les limites des ressources disponibles (ex. ressources financières, humaines et facteurs sociopolitiques, comme le soutien des autorités) et des facteurs géographiques (notamment l'accessibilité à certaines zones, et les contraintes saisonnières).

Notre enquête a été conduite dans tous les quartiers de Kinshasa et fournit une vue d'ensemble nécessaire sur les usages énergétiques des différentes zones de la province de Kinshasa, qui faisait jusqu'à présent défaut. Plusieurs réflexions émergent de la conduite de la phase 1 de cette enquête :

- Elle offre un aperçu de l'usage énergétique à un instant T. Une estimation « annuelle » de l'usage énergétique pourrait être obtenu à l'aide d'enquêtes récurrentes (menées à plusieurs reprises pendant l'année) ou d'un suivi continu de certains ménages pendant un mois (ex. grâce à un journal de bord énergétique distribué à un plus petit échantillon, ou à des questions d'enquête diffusées par téléphone portable dans les zones connectées).
- Pendant la phase 2, d'autres enquêtes et entretiens avec les autorités en charge de l'énergie, des acteurs du secteur privé ou de la société civile permettraient de croiser les données, et de mieux approfondir les tendances émergentes.
- Il serait extrêmement intéressant de mener d'autres travaux sur la compréhension de l'usage énergétique, les aspirations, l'accessibilité économique et le consentement à payer dans d'autres territoires de RDC en dehors de Kinshasa ; cela permettrait d'élargir nos connaissances sur la demande énergétique au-delà de la capitale.

Les principales conclusions de ce chapitre sont les suivantes :

- Le modèle de « **multi-énergies** » (***fuel stacking***) est la principale stratégie répondant aux besoins énergétiques. L'écrasante majorité des sondés utilise un éventail de combustibles pour répondre à ses besoins énergétiques quotidiens. La principale source de combustible de cuisson des personnes interrogées — qu'il s'agisse du bois, du charbon de bois ou de l'électricité — est considérée comme largement insatisfaisante. De même, les ménages utilisent en parallèle un éclairage électrique et des lampes de poche pour répondre à leur besoin en éclairage.
- Un écart important a été observé dans l'**accès à l'électricité** entre les ménages des zones urbaines, largement électrifiées, les zones péri-urbaines, où l'accès est plus limité, et les zones rurales, où il est demeure très rare.
- Nous avons également mis en évidence de **grandes disparités dans les usages d'appareils électriques** entre les zones urbaines, où leur utilisation est importante, et les zones péri-urbaines et rurales. Même si cette conséquence est prévisible, il convient de préciser que les usages énergétiques évoluent énormément avec l'accès à l'électricité (la population adopte de nombreux nouveaux appareils qui leur étaient auparavant inaccessibles) ; il importe donc de tenir compte de ces évolutions à venir pour toute planification et estimation de demande d'électrification.

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les conclusions préliminaires de notre enquête par questionnaire. Dans la phase 2, nous analyserons d'autres variables afin d'obtenir des informations détaillées sur les coûts, la suffisance et la demande énergétique, mais aussi sur les aspirations et attitudes vis-à-vis d'une série d'aspects liés aux énergies renouvelables — notamment la perception de leur fiabilité, accessibilité économique, suffisance et qualité des services énergétiques.

Références

Sustainable Energy for All (2013), Cadre de suivi mondial, Rapport annuel Energie durable pour tous, p. 262. Disponible sur : http://www.se4all.org/wpcontent/uploads/2013/09/11-gtf_data_annex.pdf

Barnes, D. F. et Sen, M. (2004), The Impact of Energy on Women's Lives in Rural India. Washington, DC, Programme conjoint PNUD-Banque mondiale d'assistance de gestion du Secteur énergétique. Disponible sur : <https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/The%20Impact%20of%20Energy%20on%20Women%27s%20Lives%20in%20Rural%20India.pdf>

Cirad (2010), Projet Makala. Gérer durablement la ressource bois énergie. Disponible sur : http://makala.cirad.fr/le_projet_makala

Dutta, S. (2003), "Mainstreaming Gender in Energy Planning and Policies." Document de travail de la reunion du groupe d'experts, projet UNESCAP pour le renforcement des capacités sur l'intégration de l'énergie et la planification du développement rural. Disponible sur : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.465.1532&rep=rep1&type=pdf>

FAO (2017), Sustainable wood fuel for food security. A smart choice: green, renewable and affordable. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, p. 42.

Kefalidou, A. et Vener, J. (2014), A Survey of International Activities in Rural Energy Access and Electrification (Division du Développement durable, Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies), p. 104.

Mala, S. and Govinda, R. (2014) "Household Cooking Fuel Choice and Adoption of Improved Cookstoves in Developing Countries: a review". Equipe environnement et énergie du Groupe de recherche sur le développement (Banque mondiale).

Mohlakoana, N., de Groot, J., Knox, A. et Bressers, H. (2019) "Determinants of Energy Use in the Informal Food Sector", Development Southern Africa 36.4: 476–90.

Rewald, Rebecca. (2017) "Energy and Women and Girls: Analysing the Needs, Uses, and Impacts of Energy on Women and Girls in the Developing World," Oxfam. Série Research Backgrounder ; Disponible sur : <https://www.oxfamamerica.org/explore/research-publications/energy-women-girls>

REN21 (2013), Renewables 2013 – Rapport sur la situation mondiale des énergies renouvelables (Global Status Report) Disponible sur : https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2013_Full-Report_English.pdf

Thilakasiri, S. (2015), Speaking truth to power in energy for all. Politics of poverty. Oxfam.

Van der Kroon, B., Brouwer, R., van Beukering, P.J.H. (2013) The energy ladder: Theoretical myth or empirical truth? Results from a meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 20, pp. 504–513.

Zarma, I. H., Ganda Y.M. and Danshehu, B. G. (2013), "The role of renewable energy in improving energy access to rural areas in Nigeria". Research Gate. 22^{ème} Congrès mondial de l'énergie, Conseil mondial de l'énergie, Daegu 2013.

Conclusions

Lors de la phase 1 du projet, nous avons mené une étude détaillée du contexte, des données disponibles et des outils de modélisation appropriés pour la planification de l'électrification en RDC. Cette étude, ainsi que la conduite de consultations avec diverses parties-prenantes nous ont permis d'élaborer un cadre pour les outils de modélisation qui seront développés en phase 2. Cette étude a également été l'occasion de mener des consultations avec les partenaires du projet afin de constituer une équipe solide pour mener les travaux de la phase 2 et d'attribuer les rôles et responsabilités de chaque partenaire en vue d'atteindre les objectifs du projet. Lors de cette première phase, nous avons également conduit une enquête sur les usages et la perception de l'électricité. Les consultations et les travaux réalisés nous ont doté de la confiance nécessaire pour atteindre nos objectifs.

L'étude contextualisée de l'énergie et des mesures politiques liées indique qu'en dépit d'évolutions encourageantes en faveur de l'électrification en RDC, l'atteinte des ambitions gouvernementales ne sera pas aisée. Les obstacles à l'électrification sont multiples : faible taux d'électrification, faibles capacités de production électrique, mauvais état des infrastructures de production, de transmission et de distribution, forte utilisation d'une énergie informelle tirée de la biomasse.

Malgré ces défis, de récentes réformes politiques ont fait de l'électrification une priorité absolue. Aujourd'hui, des acteurs privés peuvent légalement participer à la production, la transmission et la distribution d'électricité. Le haut potentiel des énergies renouvelables (notamment les ressources hydrauliques, solaires, éoliennes, bioénergétiques et même géothermiques) représente un moyen économique de fournir une électricité fiable. Les avancées technologiques font également des mini-réseaux et autres systèmes autonomes des alternatives intéressantes, économiques et durables au réseau électrique central. Tous ces éléments mettent en avant le besoin impérieux d'améliorer la planification de l'électrification sur l'ensemble du territoire congolais.

Toutefois, une telle planification est un chemin semé d'embûches. A l'heure actuelle, il n'existe aucune stratégie, et le manque de connaissances sur le marché (préférences, accessibilité économique) est à déplorer. Les difficultés à obtenir des données de qualité est d'ailleurs l'un des principaux obstacles à l'élaboration d'un plan d'électrification en RDC ; en effet, les données sont rares, leur collecte n'est pas systématique, et même lorsque ces données existent, il n'est pas toujours évident d'y accéder. Enfin, les principales bases de données sont souvent obsolètes ou de piètre qualité.

Les données sont donc limitées, mais elles demeurent utiles. Elles révèlent par exemple que les besoins en électricité du secteur informel sont souvent faibles. Même si les données minières sont incomplètes, il est possible de s'appuyer sur les données existantes pour estimer la demande en fonction de la croissance du

secteur. Nous avons ainsi identifié plusieurs moyens de combler les écarts lorsque des données importantes font défaut — ils seront mis en œuvre dans la deuxième phase du projet.

Les données satellitaires sont une nouvelle source d'informations très prometteuse. Elles offrent plusieurs options en vue d'estimer la population, l'occupation des sols, etc. Il s'agit d'un travail méthodologique continu ; pour que les données soient toujours d'actualité, il importera au cours des prochaines phases de suivre les évolutions des jeux de données utilisés pour la représentation géospatiale des ménages et de leur statut d'électrification.

D'autres sources peuvent être utilisées pour estimer la demande énergétique des ménages et des activités productives, notamment des données macroéconomiques (estimations du PIB national et régional, taux d'inflation et taux de change, enquêtes auprès des ménages et des entreprises au niveau national, régional ou infrarégional). L'étude de ces jeux de données a démontré que la qualité des données était extrêmement variable. Il sera donc nécessaire d'appliquer des mesures visant à garantir l'utilisation des meilleures données disponibles tout en comblant les lacunes identifiées à l'aide d'hypothèses transparentes. De la même manière, une autre priorité de la phase 2 sera de définir une méthodologie d'utilisation des données pour l'estimation de la demande énergétique des ménages, des activités productives et des équipements publics. L'élaboration de données représentatives de la demande des ménages représente par exemple un défi de taille ; en effet, les différentes enquêtes menées auprès des ménages congolais entre 2000 et 2017 offrent des données limitées, et les multiples méthodes d'échantillonnage utilisées excluent toute comparaison. Pour ne rien arranger, le dernier recensement national officiel remonte à 1984.

La production électrique est actuellement dominée par l'énergie hydroélectrique (98 %), mais d'autres pistes sont envisageables. La phase 1 s'est également intéressée à l'identification de sources de données sur les énergies renouvelables (solaires, éoliennes et) hydrauliques. Les données sur les ressources solaires et éoliennes sont de plus en plus précises, en plus d'être disponibles en haute résolution grâce à des modèles satellite et atmosphériques adaptés à notre projet cartographique — ce qui présente aussi l'avantage de se passer de données mesurées sur le terrain. Resource Matters a d'ores et déjà constitué une base de données compilant les sites hydroélectriques, laquelle sera exploitée et étoffée dans la phase 2 du projet. En outre, nous devrions accéder aux informations tirées de l'étude de SHER, que nous comptons intégrer autant que possible dans la deuxième phase du projet.

Lors de notre étude documentaire, nous avons fait l'impasse sur le gaz naturel (méthane ou CH₄) et ne nous sommes pas attardés sur la biomasse en tant que source énergétique potentielle. Nous approfondirons ces deux angles lors de la phase 2, car il est vraisemblable que des réserves de méthane soient disponibles à l'échelle de la RDC. En revanche, le gaz naturel est un combustible fossile et devra être traité en tant que tel. La viabilité de cette ressource sera peut-être remise en cause ; en effet, dans le cadre des accords sur le réchauffement climatique, un nombre croissant d'organisations internationales a retiré son soutien au développement de nouvelles infrastructures liées aux combustibles fossiles. Les bioénergies sont un autre sujet sensible compte tenu de leurs multiples applications, définitions (cultures énergétiques, déchets, huile, bois, animaux...) et de leurs interactions complexes avec l'alimentation, les terres, l'eau et autres problématiques de durabilité

L'étude des méthodes et outils de modélisation nous a confirmé la pertinence de la modélisation géospatiale et de l'optimisation à des fins de planification des solutions d'électrification. En dépit des nombreux outils à notre disposition, notre analyse a démontré qu'aucun modèle ne répondait parfaitement à nos besoins. Nous avons déterminé que les plateformes en open-source, flexibles et facilement supportées seraient nos principaux critères de sélection. Deux modèles ont ainsi été retenus pour la phase 2 : OnSSET et OSeMOSYS. Ils nous permettront de planifier l'approvisionnement électrique grâce à des technologies de réseau centralisé à grande échelle (OSeMOSYS) tout en y combinant des mini-réseaux et systèmes autonomes pour compléter le réseau central dans les zones reculées (OnSSET). Les réalités d'accès de chaque communauté

étant uniques, une telle combinaison permettra de créer un plan d'électrification plus réaliste et réalisable, qui tiendra compte des différentes demandes et ressources de chaque région congolaise.

Certaines caractéristiques de l'algorithme d'extension du réseau sur OnSSET que l'on s'y attarde, par exemple les coûts topographiques et d'autres aspects liés au tracé du réseau. Par ailleurs, le modèle ne permet pour l'instant pas de raccorder plusieurs mini-réseaux entre eux ou au réseau central. Cet aspect semble particulièrement pertinent en RDC, où les infrastructures électriques et les populations sont extrêmement dispersés, et où les options de mini-réseaux pourraient être privilégiées. On peut également envisager que des mini-réseaux ou systèmes autonomes soient utilisés dans un premier temps, avant d'être combinés afin d'approvisionner une solution d'électrification plus robuste. Il nous semble donc important de s'attaquer à ces problèmes méthodologiques dans la phase 2 en améliorant l'algorithme d'extension du réseau sur OnSSET. Ces améliorations trouveront d'autres applications pour la planification d'électrification d'autres pays à faible couverture électrique, en Afrique ou ailleurs dans le monde.

Lors de la phase 1, nous avons développé un premier modèle OnSSET grâce auquel nous avons pu identifier d'importants écarts en termes de données — d'où le besoin d'approfondir nos travaux méthodologiques. Ce premier essai a également constitué une précieuse expérience de renforcement de capacités qui nous a permis de gagner en assurance. Ce test nous a en effet fait prendre conscience du temps nécessaire pour véritablement maîtriser le logiciel et les compétences nécessaires. Nous avons également gagné en confiance dans la mesure où notre équipe est parvenue à entrer les données nécessaires et à tester le modèle avec très peu d'aide extérieure.

L'équipe a tiré plusieurs enseignements de cet exercice de modélisation : l'impact des hypothèses de demande sur les solutions optimales d'approvisionnement ; l'impératif d'obtenir de meilleures données démographiques ; et la nécessité d'améliorer la représentation du réseau existant et de ces extensions. Les acteurs consultés ont également formulé de précieux commentaires et suggestions pour l'amélioration de nos travaux.

L'enquête auprès des ménages conduite pour notre projet visait justement à combler certains manques de données, principalement liés à la modélisation de la demande. L'enquête présente un aperçu des usages énergétiques à un instant T grâce à la compilation de données socio-démographiques et économiques, mais aussi liées au statut d'électrification, aux dépenses consacrées à l'énergie et à l'usage énergétique des ménages en fonction de différents services énergétiques. Elle nous a également donné l'opportunité d'étudier la perception des ménages sur le niveau d'énergie jugé suffisant ainsi que sur leurs préférences — particulièrement par rapport aux énergies renouvelables. Menée dans tous les quartiers de Kinshasa, cette enquête a permis de révéler les usages énergétiques de différentes zones de la province-capitale.

Sans surprise, les résultats de l'enquête indiquent que les ménages ayant accès à l'électricité sont toutefois limités dans leur usage en fonction de leur possession d'appareils électriques et de leurs revenus. On y apprend également que les ménages utilisent plusieurs combustibles pour satisfaire leurs besoins énergétiques quotidiens (notamment du bois, du charbon de bois et des lampes de poche). L'accès à l'électricité est plus généralisé parmi les populations les plus urbanisées, tandis que la consommation électrique augmente proportionnellement aux revenus et à la possession d'appareils (elle-même liée au niveau de revenus). La planification de l'électrification et l'estimation de la demande dans les modèles devront donc intégrer les changements importants d'usage énergétique induits par un meilleur accès à l'électricité — les ménages pouvant, par exemple, acheter et utiliser de nouveaux appareils électriques. Les enquêtes nous fournissent des données pour quantifier cette augmentation, ce qui pourra grandement améliorer la précision des hypothèses formulées pour estimer la demande en électricité.

Toutefois, il existe certains obstacles à la traduction de ces données sur la demande en données exploitables par le modèle. Lors de la phase 2, nous gagnerions à mener d'autres enquêtes et entretiens avec les

autorités en charge de l'énergie, les acteurs du secteur privé et de la société civile afin de croiser les données et de mieux approfondir les tendances émergentes. D'autre part, il serait extrêmement intéressant de conduire d'autres travaux sur la compréhension de l'usage énergétique, les aspirations, l'accessibilité économique et le consentement à payer dans d'autres territoires de RDC en dehors de Kinshasa ; cela permettrait d'élargir nos connaissances sur la demande énergétique en dehors de la capitale.

Pour que notre projet atteigne ses objectifs, l'élaboration du modèle et des données doit impérativement s'inscrire dans la durée. Il est donc fondamental d'assurer le renforcement des capacités locales en matière d'analyse des systèmes énergétiques et de planification de l'électrification. L'implication des acteurs, favorisée lors de la phase 1, a mis en lumière des aspects intéressants (nécessité d'une diversité d'acteurs en RDC, éventuelle manifestation obstacles, etc.) permettant d'assurer que le modèle reflète fidèlement les réalités congolaises. Afin de garantir la viabilité du projet, il importera de collaborer avec ces acteurs tout au long du processus de planification, de recherche et de conception dans les phases 2 et 3. Des initiatives concrètes de renforcement de capacités des experts locaux et futurs utilisateurs des outils seront également incontournables.

Le renforcement de capacités affiche un double objectif. Grâce à ces activités, nous cherchons tout d'abord à créer un groupe d'experts locaux du secteur énergétique congolais, qui ferait office de « gestionnaire et créateur » afin de poursuivre le processus de modélisation et de gérer la plateforme de visualisation développée dans le cadre du projet. Ainsi, la viabilité des outils et des capacités locales pour la planification de l'électrification en RDC serait assurée. Il s'agira d'autre part de renforcer les capacités des « utilisateurs et consommateurs » afin qu'ils comprennent et utilisent les résultats du projet, mais aussi qu'ils fassent la promotion du projet et favorisent la mobilisation d'autres acteurs. Au vu des institutions universitaires impliquées, des étudiants auront l'opportunité de mener des travaux de recherches appliqués à notre projet. Ils pourront ainsi développer des compétences et qualifications avancées, directement applicables à ce type de projet en RDC ou ailleurs dans le monde.

Parmi les groupes de développeurs d'outils en open-source, KTH et RLI disposent d'un code très axé sur la recherche et ont déjà participé à divers projets de planification d'électrification en Afrique. Pour la deuxième phase de notre projet, ils collaboreront avec Resource Matters et l'Université du Cape Town.

Les principales activités prévues pour la phase 2 sont les suivantes :

- Renforcement des capacités et des compétences transversales pour toutes les institutions et acteurs afin d'assurer la viabilité, l'adhésion au projet et la compréhension des résultats ;
 - ▶ Renforcement des compétences requises pour le bon usage, la gestion, la cocréation et maintenance/mise à jour des outils par un groupe restreint d'experts locaux en RDC, mais également par l'équipe projet (grâce à l'organisation de formations, d'ateliers, de détachements, de bourses de recherche ou autre type d'échanges, etc. ;
 - ▶ Renforcement des capacités d'un large panel d'acteurs (gouvernementaux, société civile, investisseurs, grand public) pour favoriser la compréhension et l'adhésion des utilisateurs et consommateurs aux résultats du projet.
- Poursuite du développement et de l'amélioration des méthodologies, modèles et jeux de données, notamment :
 - ▶ Poursuite de la validation et de la collecte de jeux de données (en ligne et auprès d'acteurs locaux) pour alimenter les modèles centralisés et décentralisés ;
 - ▶ Création d'un modèle d'optimisation des investissements pour les infrastructures centralisées, représentatif des diverses régions/pôles du réseau congolais et des

interconnexions électriques avec les pays voisins et leurs pôles de commerce énergétique respectifs ;

- ▶ Elaboration d'un modèle d'estimation de la demande électrique transcendant l'ensemble des secteurs congolais (intégrant notamment les résultats des enquêtes menées en phase 1 dans la modélisation de la demande des ménages) afin d'alimenter les résultats du modèle de la demande dans OnSSET et OSeMOSYS ;
 - ▶ Combinaison des modèles d'OnSSET et d'OSeMOSYS afin de développer un lien plus précis et harmonisé entre les investissements centralisés et décentralisés ;
 - ▶ Améliorations du mode planification géospatiale d'OnSSET, notamment actualisation de l'algorithme d'extension du réseau afin d'y inclure une représentation plus précise des réalités géographiques/topographiques ; et
 - ▶ Modélisation des mini-réseaux à l'aide de données représentatives des communautés afin de mieux comprendre et de refléter plus fidèlement les éléments pesant sur une modélisation et une optimisation plus pertinente des systèmes de mini-réseaux — par exemple, la combinaison hybride de systèmes solaires, hydrauliques, éoliens, batteries et diesel pour mieux répondre à la demande énergétique fluctuante des communautés. Après étude des données nécessaires et de la faisabilité de cette option, nous analyserons peut-être le potentiel d'inclusion du biodiesel dans ces systèmes 100 % renouvelables.
- Création d'une plateforme internet de visualisation interactive des résultats, des scénarios et des données entrantes, permettant :
 - ▶ Le partage en accès libre et en toute transparence des données, méthodologies, code et résultats de la modélisation ;
 - ▶ L'utilisation d'une interface intuitive et facile d'utilisation, vulgarisant les principaux concepts à un grand public ; et
 - ▶ La déclinaison en une version hors-ligne, ou version optimisée pour les connexions bas-débit (pour les utilisateurs sans accès, ou avec accès limité à internet).
 - Implication continue et diffusion des résultats auprès des acteurs congolais, par le biais d'ateliers nationaux, de réunions ciblées, d'échanges en ligne, etc. afin de promouvoir le projet ; partage des outils/résultats, des données recueillies et des connaissances acquises ; recueil de commentaires et critiques en vue d'une amélioration constante ;
 - Diffusion des résultats et examen par les pairs lors de la présentation des travaux dans le cadre de conférences, symposiums, webinaires etc., et de la publication d'articles universitaires soumis à un comité de lecture dans des journaux de renommée en accès libre, ou encore dans des actes de conférences, le cas échéant.

ANNEXE 1. Paramètres technologiques de performance et coûts utilisés sur OnSSET.

Tableau A.1 Paramètres technologiques sur OnSSET

Paramètre	Unité	Valeur supposée
Extension du réseau centralisé		
Coût de l'électricité du réseau	US \$/kWh	0,13
Coût de l'augmentation de capacité d'une centrale électrique centralisée	Capacité installée en US \$/kWh	2 000
Pertes moyennes de transmission et distribution combinées	Pourcentage	20 %
Réseau centralisé — coût de fonctionnement du système de transmission et de distribution	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	10 %
Coût de raccordement des ménages	US \$/ménage	150
Lignes de transmission et de distribution		
Coût d'une ligne de transmission (HT)	US \$/km	53 000
Coût d'une ligne de distribution ⁴⁸ (MT)	US \$/km	9 000
Coût d'une ligne de distribution (BT)	US \$/km	5 000
Coût de transformation de HT à MT	US \$/kW	5 000
Réseau centralisé — coût de fonctionnement du système de transmission et de distribution	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	10 %
Mini-réseaux (MR)		
Ensemble des MR — coût du raccordement des ménages	US \$/ménage	100
Ensemble des MR — pertes de distribution	Pourcentage	10 %
Ensemble des MR — coût de fonctionnement du système de distribution	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	5 %

⁴⁸ Nous faisons la même hypothèse pour les coûts d'investissement du système de distribution dans le cas de l'extension du réseau centralisé et des options de mini-réseaux.

Paramètre	Unité	Valeur supposée
Mini-réseaux diesel		
MR diesel — coût d'investissement	Capacité installée en US \$/kWh	721
MR diesel — coût opérationnel de production	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	10 %
MR diesel — durée de vie du système	Années	15
MR diesel — efficacité (moyenne)	Pourcentage	33 %
MR diesel — coût du combustible diesel ⁴⁹ (coût moyen en zone urbaine congolaise)	US \$/litre	1,5
Mini-réseaux solaires		
MR solaire ⁵⁰ — coût d'investissement	Capacité installée en US \$/kWh	4 300
MR solaire — durée de vie du système	Années	20
MR solaire — coût opérationnel de production	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	2 %
Mini-réseaux hydrauliques		
MR hydro — coût d'investissement	Capacité installée en US \$/kWh	5 000
MR hydro — facteur de charge moyen	Pourcentage	50 %
MR hydro — durée de vie du système	Années	30
MR hydro — coût opérationnel de production	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	2 %
Mini-réseaux éoliens		
MR éolien — coût d'investissement	Capacité installée en US \$/kWh	3 000
MR éolien — durée de vie du système	en années	20
MR éolien — coût opérationnel de production	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	2 %
Systèmes autonomes (SA⁵¹) — solaire		
SA solaire — coût d'investissement	Capacité installée en US \$/kWh	5 780
SA solaire — durée de vie du système	en années	10
SA solaire — coût de fonctionnement	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	5 %

⁴⁹ Il s'agit d'une hypothèse du « prix à la pompe » de la ville la plus proche, utilisé comme prix de base, tandis que les coûts supplémentaires liés au transport du diesel vers chaque localité sont calculés à l'aide du jeu de données « temps de trajet vers la ville la plus proche ».

⁵⁰ Les coûts des systèmes de mini-réseaux solaires et éoliens comprennent le coût des éventuels systèmes de batteries nécessaires dans les « valeurs supposées » indiquées.

⁵¹ Les systèmes autonomes n'ont pas besoin de système de distribution, et les coûts de raccordement individuel aux ménages sont inclus dans les coûts d'investissements du système.

Paramètre	Unité	Valeur supposée
Systèmes autonomes (SA) — diesel		
SA diesel — coût d'investissement	Capacité installée en US \$/kWh	938
SA diesel — durée de vie du système	en années	10
SA diesel — efficacité (moyenne)	en pourcentage	28 %
SA diesel — coût de fonctionnement	Pourcentage des coûts d'investissements initiaux, par an	10 %

Source : Valeurs par défaut d'OnSSET KTH en 2018, analyse personnelle des auteurs

ANNEXE 2. Appel pour le recrutement des enquêteurs



resource matters

AVIS À MANIFESTATION D'INTERET

RESOURCE MATTERS (Kinshasa-RDC) Recrutement d'assistants de terrain

La République démocratique du Congo contient d'innombrables ressources énergétiques. Cependant, la plupart des régions du pays restent non électrifiées. La population dépend du charbon de bois pour la cuisson et le pétrole comme source d'énergie.

Resource Matters est une organisation qui vise à atténuer le paradoxe de la pauvreté généralisée dans les pays riches en ressources naturelles. Pour ce faire, Resource Matters a lancé une série de projets de recherche sur le problème de l'énergie en République Démocratique du Congo dans le but d'améliorer l'accès de la population à l'électricité.

Resource Matters, en collaboration avec l'Université du Cap Town, entend mener une recherche pour quantifier : (i) les besoins en énergie (électrique) des ménages, des industries et de l'agriculture ; (ii) les modes de consommation actuels dans la ville de Kinshasa ; (iii) les besoins et aspirations énergétiques futurs attendus. Nous recherchons des chercheurs dynamiques et engagés pour cette enquête de terrain.

Lieu de travail : les enquêteurs travailleront dans la ville-Province de Kinshasa

Durée : 2-3 mois

Un salaire : 500 dollars (cinq cents dollars des États-Unis / mois)

Sous la supervision du coordonnateur du projet, les enquêteurs auront pour fonction principale de collecter les informations sur l'énergie électrique dans différentes municipalités de la ville-province de Kinshasa.

Tâches et responsabilités

Sous la supervision du coordonnateur de projet, les assistants de terrain devront

- Contribuer à l'élaboration de la méthodologie à utiliser pour la collecte de données sur le terrain ;
- Contribuer à l'élaboration de questionnaires de terrain ;
- Participer à des formations sur la façon d'administrer les enquêtes ;
- Recueillir des données sur l'énergie dans les ménages des zones urbaines, périurbaines et rurales de Kinshasa ;
- Recueillir des données sur l'énergie auprès des (petites et moyennes) entreprises situées dans la ville de Kinshasa ;
- Contribuer à la vérification et à la validation des données ;
- Recueillir tout autre document, informations contribuant à une meilleure compréhension des problèmes énergétiques dans la ville-province de Kinshasa ;



- Mener des entretiens avec des agents de la SNEL, des cadres universitaires et des particuliers sur les solutions ou méthodes nécessaires pour améliorer les problèmes énergétiques à Kinshasa.
- Participer à d'autres activités de programme pertinentes, en accord avec le coordonnateur du projet ;

Profil

Qualifications requises

- Diplôme universitaire en électricité, cartographie, sciences sociales et politiques, sciences agronomiques, foresterie ou autres disciplines connexes ;
- Expérience confirmée dans la conduite des enquêtes sur le terrain ;
- Compétence avérée sur la rédaction de rapport ;
- Bonne expression écrite et orale en français et en lingala ;
- Connaissance dans l'utilisation de la technologie, l'ordinateur (ordinateur portable, téléphone Android)
- Bonne connaissance des outils informatiques courants (Word, Excel, Internet) ;

Compétences requises

- Courtoisie (essentielle) ;
- Sens élevé de l'organisation et du travail en équipe ;
- Capacité de travailler avec les communautés ;
- Sens de l'initiative, l'analyse et la prise de décision ;
- Être capable de travailler seul et sous pression ;
- Être capable de marcher à pied pendant la journée et parfois dans des conditions difficiles ;
- Être capable de travailler dans les zones rurales de la ville de Kinshasa ;
- Adhérer aux valeurs d'éthique de Resource Matters qui sont : compétence, Optimisme, détermination et efficacité (obligatoire).

Soumission des candidatures :

Resource Matters invite les personnes intéressées à présenter une demande pour les services décrits ci-dessus. Les candidats intéressés qui remplissent les conditions ci-dessus sont priés d'envoyer une lettre de motivation avec un CV mis à jour et trois personnes de référence à l'attention du coordonnateur de Resource Matters à l'adresse suivante : info@resourcematters.org.

Les manifestations d'intérêt doivent être rédigées en français et doivent être envoyées par e-mail à l'adresse ci-dessus avant le 10 Septembre 2019 à 17h00 et doivent impérativement, de manière très claire porter le titre de la position : « Candidature Enquête Terrain Kinshasa 2019 ».

Seuls les candidats retenus seront contactés.



Resource Matters

Resource Matters / Coordonnateur du projet RDC
14, Avenue Moke Sergent, Kinshasa / Ngaliema
République Démocratique du Congo
Téléphone : 081 364 7771
Email : info@resourcematters.org

Glossaire des acronymes

AFREC	Commission africaine de l'énergie
AICD	Diagnostic des infrastructures nationales en Afrique
AIE	Agence internationale de l'énergie
AIKP	Programme de connaissances de l'infrastructure en Afrique
AIMS	<i>Asia Pacific Integrated Model</i>
AMDA	Association des Développeurs des Mini-réseaux en Afrique
ANAPI	Agence Nationale pour la Promotion des Investissements
ANSER	Agence nationale d'électrification et de service énergétique en milieu Rural
APD	Aide publique au développement
ARE	Alliance pour l'électrification rurale
BM	Banque mondiale
CAID	Cellule d'Analyses des Indicateurs de Développement
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDSUNIKIN	Chaire de Dynamique sociale
CE	Commission européenne
CI	Cellule Infrastructures
CIESIN	<i>Centre for International Earth Science Information Network</i> (Université de Columbia)
CVS	format CVS (valeurs séparées par des virgules)
DFID	Département britannique pour le développement international
DIAF	Direction des Inventaires et Aménagement Forestiers
DNB	Bande jour/nuite (<i>Day-night band</i>)
DNI	Rayonnement normal direct
DTU	Université technique du Danemark
EGC	Equilibre général calculable
EMP-A	Plateforme de modélisation énergétique pour l'Afrique
EOG	<i>Earth Observations Group</i>
ER	Energie renouvelable

ESA	Analyse des systèmes énergétiques
ESPK	Ecole de Santé Publique de Kinshasa
ESSOR	Rapport de Prévision de la Demande
ETSAP	<i>Energy Technology System Analysis Programme</i>
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEC	Fédération des Entreprises du Congo
FEEM	<i>Fondazione Eni Enrico Mattei</i>
FMI	Fonds monétaire international
GAMS	<i>General Algebraic Modelling System</i>
GECO	<i>Geology for an ECONomic sustainable development</i>
GEOSIM	<i>Geospatial Simulation</i>
GEP	<i>Global Electrification Platform</i>
GHSL	Couches mondiales des établissements humains (<i>Global Human Settlement Layers</i>)
GLC-SHARE	Base de données <i>Global Land Cover Share</i>
GOGLA	Association mondiale pour l'éclairage hors-réseau (<i>Global Off-grid Lighting Association</i>)
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
GW	Gigawatts
HIVA	Institut de Recherche pour le Travail et la Société
HOMER	<i>Hybrid Optimisation of Multiple Energy Resources</i>
IED	<i>Innovation Energie Développement</i>
IGC	<i>International Growth Centre</i>
IIASA	Institut international d'analyse des systèmes appliqués
IPIS	<i>International Peace Information Service</i>
IRENA	Agence internationale pour les énergies renouvelables
JRC	Centre commun de recherche (<i>Joint research centre</i>)
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
KTH	Institut royal de technologie, Suède
LEAP	Planification à long-terme des énergies alternatives
MAED	Modèle pour l'analyse de la demande énergétique
MARKAL	MARKet ALlocation (répartition des marchés)
MEDD	Ministère de l'Environnement et du Développement durable
MESSAGE	<i>Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts</i>
MNE	Modèles numériques d'élévation
MONUSCO	Mission de l'Organisation des Nations Unies pour la stabilisation en République démocratique du Congo
MRAC	Musée royal de l'Afrique centrale

MTF	Cadre multi-niveaux
mVAM	Projet d'analyse et de cartographie de la vulnérabilité fondé sur la téléphonie mobile (<i>mobile Vulnerability Analysis and Mapping</i>)
NASA	Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (USA)
NBD	<i>Nile Basin Discourse</i>
NELSAP	Programme d'action subsidiaire des lacs équatoriaux du Nil
NEMS	Système national de modélisation énergétique (<i>National Energy Modelling System</i>)
NRECA	Projet de l'Association des coopératives d'électricité rurale nationale
NREL	Laboratoire national sur les énergies renouvelables (<i>National Renewable Energy Laboratory</i>)
OCHA	Bureau des Nations Unies pour la coordination des affaires humanitaires
ODD	Objectifs pour le développement durable (ONU)
ODR	Office des Routes
OEMOF	<i>Open Energy Modelling Framework</i>
OFAC	Observatoire des Forêts d'Afrique Centrale
OMD	Objectifs du millénaire pour le développement
OnSSET	<i>Open-Source Spatial Electrification Tool</i>
ONU-DAES	Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies
OPTA	Inclinaison optimale du module photovoltaïque pour maximiser le rendement annuel
OSeMOSYS	Système de modélisation énergétique en open-source (<i>Open Source energy Modelling SYStem</i>)
OSFAC	Observatoire Satellital des Forets d'Afrique Centrale
PAM	Programme alimentaire mondial
PIB	Produit intérieur brut
PYPSA	<i>Python for Power System Analysis</i>
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RBINS	Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique
RDC	République démocratique du Congo
REM	<i>Reference Electrification Model</i>
RESOLVE	<i>Renewable Energy Solutions Model</i>
RGC	Référentiel géographique commun
RLI	Reiner Lemoine Institute
RM	Resource Matters
SEDAC	Centre des données et d'applications socioéconomiques de la NASA (<i>Socioeconomic Data and Applications Centre</i>)
SE4ALL	Energie renouvelable pour tous (<i>Sustainable Energy for All</i>)

SIG	Système d'information géographique
SNEL	Société Nationale d'Électricité
SNIS	Système National d'Information Sanitaire
SPSS	<i>Statistical Product and Service Solutions</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWITCH	Solar and wind energy integrated with transmission and conventional sources
TEMBA	Modèle de base de l'énergie électrique en Afrique
TEMOA	<i>Tools for Energy Model Optimisation and Analysis</i>
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TIMES	Système intégré MARKAL-EFOM
UCM	Unité de Coordination et de Management
UCT	Université du Cap
UL	<i>Underwriters Laboratories</i>
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
UNICEF	Fonds des Nations Unies pour l'enfance
UNJLC	Centre logistique commun des Nations unies
UNMACC	Centre de Coordination des Nations unies pour le déminage
UNOPS	Bureau des Nations unies pour les services d'appui aux projets
UPS	Système d'alimentation sans interruption (onduleur)
USAID	Agence des États-Unis pour le développement international
VIIRS	Suite de radiomètres pour imageurs dans l'infrarouge et le visible (<i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite</i>)
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>
ZIC	Zones d'Intérêt Cynégétiques
ZICGC	Zones d'Intérêt à gestion communautaire
ZoVIC	Zones villageoises de chasse



resource matters

Resource Matters
www.resourcematters.org
info@resourcematters.org



Energy Systems Research Group,
University of Cape Town
<http://www.epse.uct.ac.za/esrg>