

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

**Présentation de trois études
d'approvisionnement en énergie
pour le Mali de 2017 à 2040**

B. D. Sacko, B. S. Kante, T. M. Sidibe, S. Sanogo,
A. Ba, O. A. Maiga



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v6i1.253

Présentation de trois études d'approvisionnement en énergie pour le Mali de 2017 à 2040

Bakamba dite Djeneba Sacko⁽¹⁾, Boubacar Sidiki Kante⁽¹⁾, Thierno Madani Sidibe⁽¹⁾,
Souleymane Sanogo⁽²⁾, Abdramane Ba^(1,2), Oumar Alassane Maiga⁽³⁾

⁽¹⁾ Hybrid Renewable Energy Laboratory, (HREL), Université des Sciences, des Techniques
et Technologies de Bamako, Bamako, Mali

⁽²⁾ Laboratory of Optic Spectroscopy and Sciences of Atmosphere, (LOSSA) Université des
Sciences, des Techniques et Technologies de Bamako, Bamako, Mali

⁽³⁾ Direction National of Energy/SIE-Mali

rarsus.semali@gmail.com

Résumé – Au Mali, les énergies issues des combustibles ligneux (78%) et des produits pétroliers importés (17%) couvrent l'essentiel des besoins en énergie pour les ménages, les industries et le secteur tertiaire. Le Mali est un pays sahélien et non producteur de pétrole. L'utilisation de ce type de ressources énergétiques a un impact négatif sur l'économie en raison des importations et de l'utilisation de la couverture végétale comme source de combustible ligneuse. Afin de réduire l'utilisation du bois, et des produits pétroliers dans la consommation d'énergie, et ainsi aider les décideurs Maliens, nous présentons trois scénarios d'approvisionnement dans ce travail. Le premier est un scénario de base, qui présente la situation actuelle et sert de référence (scénario 1), le second scénario (scénario 2) postule que l'utilisation des ressources du bois-énergie (bois et charbon de bois) et des produits pétroliers dans la production d'électricité est maintenue et le troisième scénario (scénario 3) suppose une diminution de l'utilisation des produits pétroliers dans la production d'électricité tout en maintenant l'utilisation du bois grâce à l'augmentation de l'usage des énergies renouvelables. Dans cet article nous présentons une estimation de la consommation d'énergie finale de 2017 à 2040 basée sur le taux de progression de chaque source d'énergie (bois-énergie, produits pétroliers et électricité). Les trois scénarios envisagés permettent d'augmenter la production d'électricité dans le bilan énergétique. Dans les scénarios 2 et 3, l'augmentation de la production de biomasse de type déchets et bioéthanol permettrait de diminuer la consommation du bois et de charbon de bois comme source d'énergie et aussi de réduire l'utilisation des produits pétroliers notamment dans la production d'électricité. Ainsi, le développement de ses sources d'énergie permettrait au Mali de mettre en valeur ses ressources énergétiques locales (résidus, biocarburants, déchets, solaire) et d'être de plus en plus indépendant vis-à-vis des importations de produits pétroliers. Ce développement vertueux permettrait aussi de préserver l'environnement et plus particulièrement la végétation au Mali.

Mots clés : Déforestation, Approvisionnement en énergie, énergie.

DOI : 10.18145/jitipee.v6i1.253

Introduction

Les contraintes environnementales, comme le réchauffement climatique ou la pollution, imposent aux états et à la population de trouver de nouvelles solutions pour subvenir à leur besoin énergétique. La diversification de ces ressources énergétiques notamment par l'utilisation des énergies renouvelables semblent être prometteur pour les pays sahéliens. Plus particulièrement au Mali, l'énergie consommée en 2014 provient à 76% de la biomasse, à 20% des produits pétroliers et à 4% d'électricité [1]. Nous notons une forte pression sur les ressources du pays et une dépendance vis-à-vis de l'importation des produits pétroliers. La fluctuation des prix du Baril de pétrole et une tendance à la hausse se reporte négativement sur la balance nationale des paiements. Par ailleurs, au fur et à mesure que la population croît et que l'activité se développe, le problème d'approvisionnement en énergie se pose de plus en plus. Dans ce contexte, si des dispositions adéquates ne sont pas prises, le développement socioéconomique du pays sera probablement ralenti. En conséquence, afin de contribuer à la lutte contre le changement climatique et garantir la sécurité en approvisionnement énergétique durable, le développement des ressources d'énergies renouvelables est une nécessité. Afin de renforcer et de diversifier l'offre énergétique pour satisfaire une demande d'énergie croissante de l'ordre de 14% par an ces dernières années (dont 10% pour l'électricité), le gouvernement Malien a adopté une Politique d'Energie Nationale (PEN) depuis 2006 [2]. Cette politique a pour vocation de servir de référence à tous les projets et programmes mis en œuvre dans le secteur de l'énergie. L'approche principale utilisée est une valorisation importante des ressources d'origine renouvelable. C'est dans ce cadre que cette étude est réalisée.

Le Mali dispose d'un potentiel très important de ressource d'énergie renouvelable. Le potentiel hydroélectrique est estimé à environ 1150 MW, seulement 27% de ce potentiel sont aménagés et une capacité de 226 MW sur 5 sites ont été attribuée à des investisseurs en 2019 [3]. L'éclairement solaire par unité de temps est de l'ordre de 5 à 7 KWh/m²/jour tout au long de l'année, bien répartie sur le territoire national et disponible pendant 5 à 10 heures/jour selon l'endroit et la saison. Avec un vent soufflant de 3 à 7 m/s, le potentiel éolien est surtout favorable dans les zones sahéliennes et sahariennes du pays [4]. La biomasse est caractérisée par une quantité importante de résidus agricoles et agro industriels (tiges de cotonnier, bagasse de canne à sucre, balle de riz et de résidus d'autres céréales) [5]. De surcroît, le Mali dispose d'un potentiel important de production d'huile végétale de substitution (jatropha) et d'éthanol [6].

Depuis 2006, le gouvernement au travers de son ministère des mines de l'énergie et de l'eau incite au développement des énergies renouvelables. Les objectifs visés suivant le type d'énergie sont d'accroître la part [2]:

- i.** Des énergies renouvelables dans le bilan énergétique passant de 1% en 2004 à 10% en 2033.
- ii.** Des énergies renouvelables dans la production d'électricité passant de 5% à 25% en 2033.
- iii.** De la bioénergie dans les énergies renouvelables passant de 1% à 10% en 2033.

Dans cet article nous proposons de simuler l'évolution de la production d'énergie suivant trois scénarios. Le premier postule (scénario 1) que la situation actuelle reste inchangée et sert de référence, le second scénario (scénario 2) postule que l'utilisation des ressources du bois et des produits pétroliers dans la production d'électricité est maintenue et le troisième scénario

(scénario 3) suppose une diminution de l'utilisation des produits pétroliers tout en maintenant l'utilisation du bois dans la production d'électricité grâce à l'augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables.

Dans une première partie, nous détaillerons la méthodologie adoptée pour établir nos scénarios puis nous commenterons nos résultats dans une seconde partie.

1. Méthodologies et données pour l'estimation de la production d'énergie au Mali.

Afin d'établir nos scénarios, nous avons compilé plusieurs sources de donnée qui sont parfois parcellaires pour le Mali sur une période allant de 2007 à 2017 afin d'établir les taux d'évolution moyen. Les chiffres de la consommation électrique sont tirés du rapport national sur l'état de l'environnement au Mali [7] pour la consommation de 2007 à 2016, et les chiffres clés du secteur de l'électricité au Mali de 2015 [8]. Pour, la consommation de produits pétroliers de 2007 à 2016 et la consommation de bois-énergie de 2007 à 2016 nous avons utilisé les données provenant du rapport national sur l'état de l'environnement au Mali 2017 [7]. Pour la production de déchets municipaux et de résidus agricole nous utilisons les données des références [3] et [5]. Pour les chiffres de la production de jatropha et d'éthanol nous prenons les données de [1].

Afin de proposer des choix politiques aux décideurs afin de favoriser des voies de production, nous avons établi trois scénarios d'étude :

- Le scénario de référence (scénario 1) présente la situation actuelle, en considérant que le Mali continuera sur sa lancée d'importation de produits pétroliers et de consommation de bois-énergie.
- Le scénario 2 a pour but de maintenir constante la production de bois-énergie (bois et charbon de bois) et des produits pétroliers dans la production d'électricité à partir de 2020 tout en produisant plus d'électricité (à partir des installations hydroélectriques, photovoltaïques et thermiques à des résidus agricoles et déchets) et de bioénergie.
- Le troisième scénario (scénario 3) consiste à diminuer la part des produits pétroliers dans la production d'électricité tout en maintenant constante la production de bois-énergie à partir de 2020 et à augmenter les productions d'énergie renouvelables.

Ces scénarios ont été établis en utilisant un taux d'évolution moyen propre à chaque source d'énergie. Dans nos estimations, afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique du Mali avec l'aide de ressources d'énergie renouvelable et locales, nous supposons une progression de la production d'énergie de 2017 à 2040. Nous estimons celle-ci avec la formule du taux d'évolution moyen [Annexe]:

$$T_M = (1 + T)^{1/n} - 1 \text{ où } T = \frac{V_f - V_0}{V_0} \quad (1)$$

Avec : T_M le taux d'évolution moyen, T le taux d'évolution globale, n le nombre d'année, V_f la valeur finale et V_0 la valeur initiale.

Nous appliquons cette relation aux données de la consommation finale d'énergie de 2007 à 2016 dont le taux d'évolution est estimé à 10% par an. De la même manière, nous établissons un taux d'évolution moyen de la production d'énergie pour chaque source : biomasse, produits pétrolier et électricité en fonction des scénarios retenus (**Tableau 1**).

	<i>Scénario 1</i>	<i>Scénario 2</i>	<i>Scénario 3</i>
<i>Biomasse</i>	9 %	7 %	8 %
<i>Produits pétroliers</i>	12 %	12 %	10 %
<i>Électricité</i>	10 %	15 %	18 %

Tableau 1. Taux d'évolution moyen T_M de la production d'énergie en fonction du type de source et des scénarios étudiés.

2. Résultats

2.1. Scénario de référence (scénario 1)

2.1.1. Approvisionnement en énergie du scénario de référence

La simulation de l'approvisionnement d'énergie du scénario de référence de 2017 à 2040 est représentée sur la Figure 1 ainsi que sa répartition en fonction du type de production en 2040.

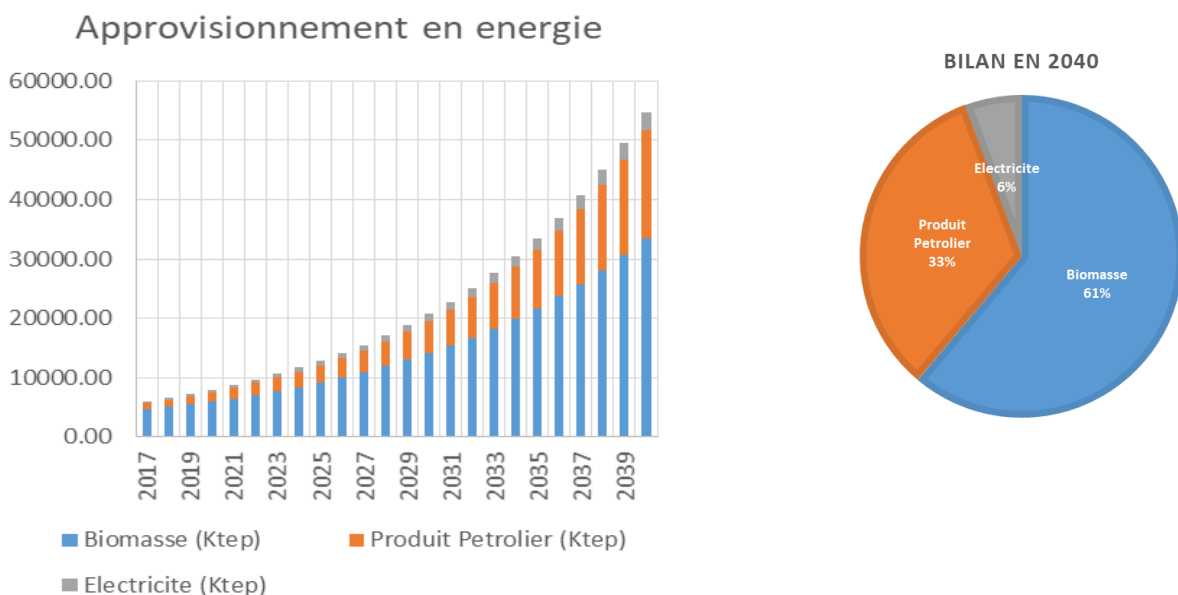


Figure 1: Approvisionnement en énergie du Mali avec le scénario de référence de 2017 à 2040 et bilan pour l'année 2040.

On constate une très forte croissance de l’approvisionnement finale en énergie, qui passe de 6 050 Ktep en 2017 à 54 741 ktep en 2040. Dans ce bilan, en 2040, on peut noter que 61% de l’approvisionnement en énergie serait représenté par la biomasse (bois-énergie), 33% par les produits pétroliers et 6% par de l’électricité. Ces estimations indiquent une forte augmentation de l’approvisionnement en produits pétroliers en raison principalement d’une forte croissance du parc d’automobile et de la production d’électricité thermique. La baisse de la consommation de bois et du charbon de bois 76% en 2016 à 61% en 2040 est attribuée à la hausse de la consommation du gaz butane. En effet en raison de l’amélioration de l’habitat dans les grandes villes, son utilisation serait de plus en plus répandue. On observe une hausse de 1% seulement de la consommation d’électricité par rapport à 2016. Cette faible hausse peut s’expliquer dans cette estimation par les habitudes de la population d’utiliser du bois et du charbon de bois ainsi que des produits pétroliers.

Nous pouvons noter que ce scénario ne permet pas d’apporter un réel changement au niveau de la diversification des ressources énergétiques et de la mise en valeur des ressources locales. Cependant, il semble donner une estimation assez fiable de la quantité d’énergie nécessaire et à approvisionner afin de satisfaire les demandes futures.

2.1.2. Approvisionnement en électricité à l’aide du scénario de référence

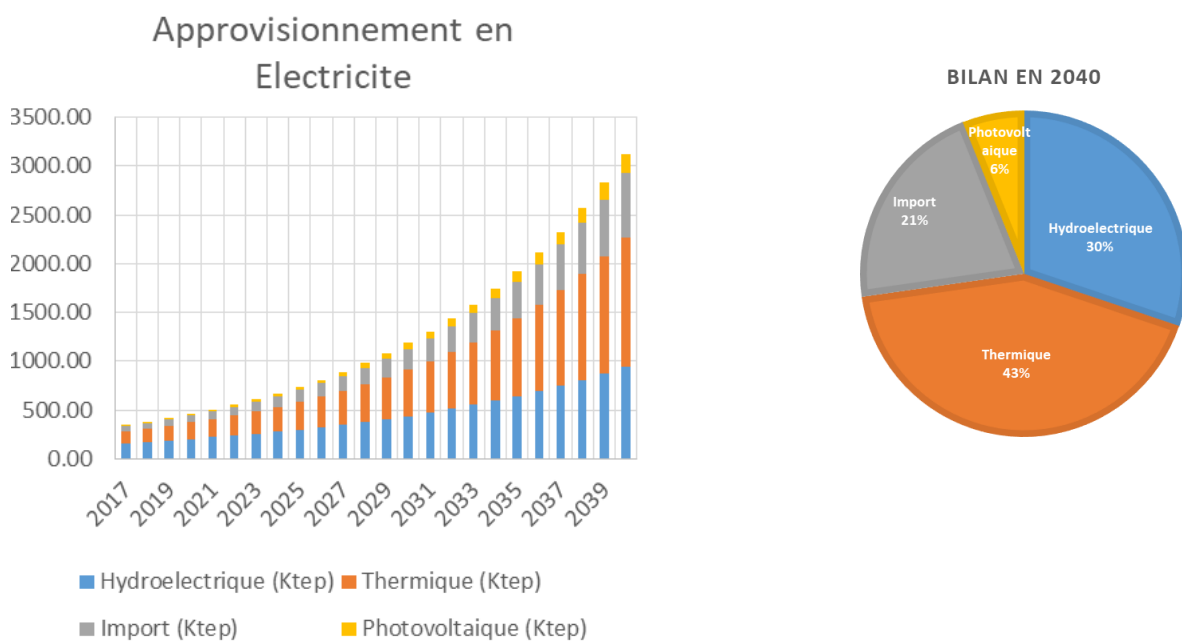


Figure 2: Approvisionnement en électricité avec le scénario de référence de 2017 à 2040 et répartition du type de production pour l’année 2040.

Dans ce scénario, prenant en compte la progression actuelle en approvisionnement en électricité et en admettant que l’hydroélectricité et la photovoltaïque n’augmentent pas assez, la production thermique à base des produits pétroliers et les importations d’électricité (interconnexion avec les pays voisins) augmenteraient considérablement pour combler le déficit. La production d’électricité thermique passerait de 125 ktep en 2017 à 1 327 ktep en 2040 tandis que l’électricité importée passerait de 49 ktep en 2017 à 661 ktep en 2040. La photovoltaïque passe de 14 ktep en 2017 à 189 ktep en 2040 pendant que l’hydroélectricité ira à 160 ktep (2017) à 941 ktep en 2040. La production totale d’électricité passerait de 348 ktep en 2017 à 3 118 ktep en 2040. Ce système d’approvisionnement ne garantit pas la

sécurité et l'indépendance d'énergie électrique du Mali, de plus la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité serait diminuée.

2.2. Scénario 2

2.2.1. Approvisionnement en énergie du scénario 2

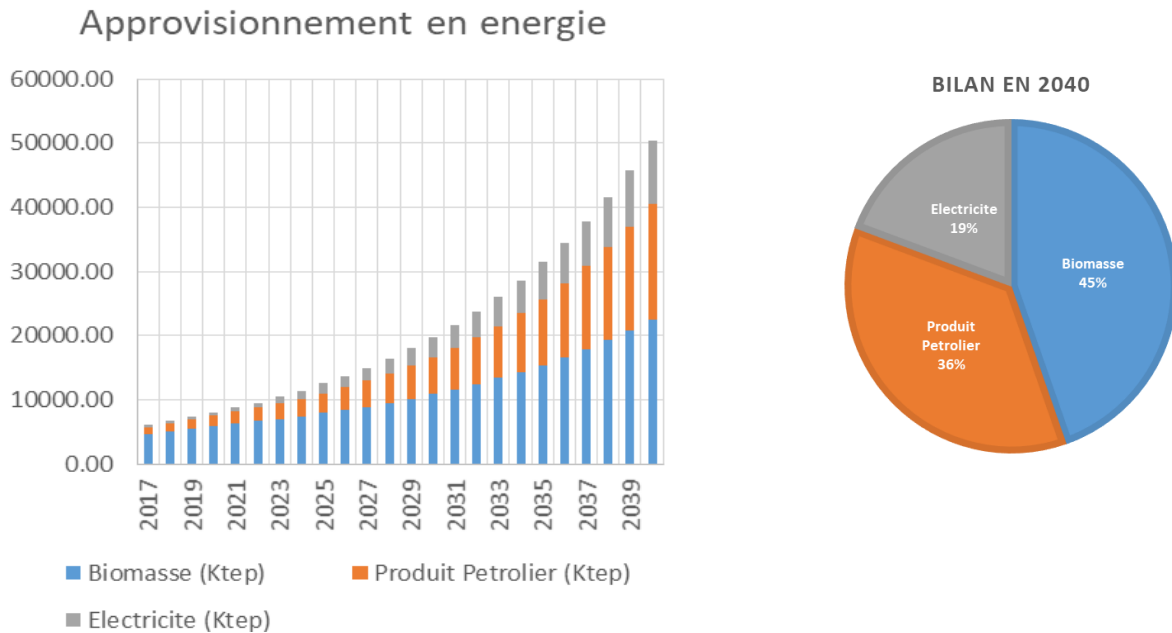


Figure 3 : Approvisionnement en énergie du Mali avec le scénario 2 de 2017 à 2040 et bilan pour l'année 2040.

Avec ce scénario, on constate une baisse de l'approvisionnement en biomasse au profit de l'électricité au cours des années (Figure 3). L'approvisionnement en biomasse passerait de 4 609 ktep en 2017 à 22 456 ktep en 2040 et représenterait 45% de l'approvisionnement en énergie. L'approvisionnement en produit pétrolier serait de 36% de l'approvisionnement en énergie totale en 2040 ; on constate une légère augmentation par rapport au 33% du scénario de référence. En ce qui concerne l'approvisionnement en électricité elle augmenterait, en 2040, passant de 6% de l'approvisionnement final en énergie avec le scénario de référence à 19%.

2.2.2. Approvisionnement en énergie provenant de la biomasse du scénario 2

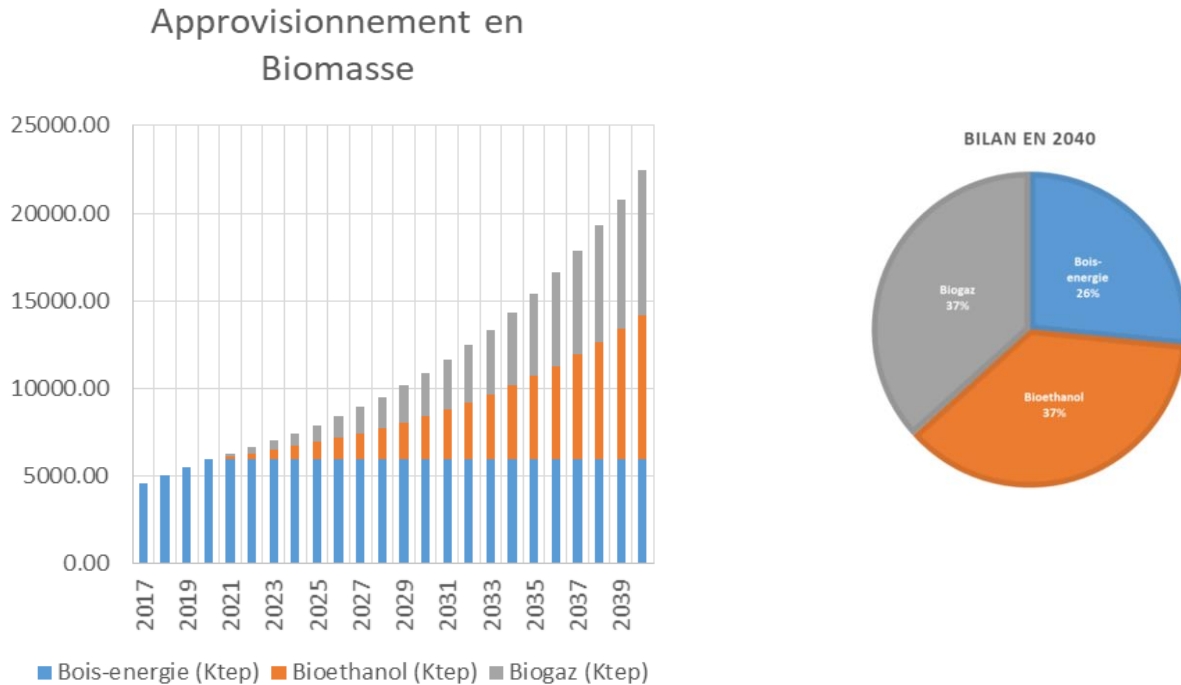


Figure 4: Répartition de l'énergie provenant de la biomasse de 2017 à 2040 pour le scénario 2 en fonction du type de production et bilan pour l'année 2040.

Pour étudier la répartition de type d'énergie qui concerne l'énergie provenant de la biomasse, nous avons pris en compte le biogaz, le bois-énergie (bois et charbon de bois) et l'éthanol. Nous avons représenté les résultats sur la Figure 4. Avec ce scénario (scénario 2), nous notons que l'approvisionnement en bois-énergie resterait constant 5 968 ktep à partir de 2020 et représenterait 26% seulement de l'approvisionnement en énergie provenant de la biomasse en 2040. En revanche, la production de gaz à partir des déchets pour la cuisson et l'utilisation du bioéthanol dans les réchauds passerait de 0% en 2020 à 37% en 2040.

2.2.3. Approvisionnement en électricité à l'aide du scénario 2

Avec le scénario 2, la manière de produire de l'électricité devrait évoluer considérablement (Figure 5). Elle passerait de 348 ktep en 2017 à 9 714 ktep en 2040 avec une contribution moyenne annuelle de l'ordre de 18% à l'approvisionnement en énergie totale. De plus, on note une diversification des moyens de production. L'approvisionnement en électricité photovoltaïque représenterait 42% de l'approvisionnement d'électricité total en 2040 contre environ 4% seulement en 2017. Avec une production annuelle estimée à 520 800 tonnes (paille de riz et tige de coton) en 2009 [3], les centrales thermiques à résidu agricole participeraient à 6% de la production d'électricité en 2040. Cette même année, on évalue la part de production d'électricité issu de l'hydroélectricité à 37% de l'approvisionnement d'électricité total, à 13 % d'électricité importé et 2% d'électricité produite grâce aux centrales thermiques fonctionnant à base de produit pétrolier

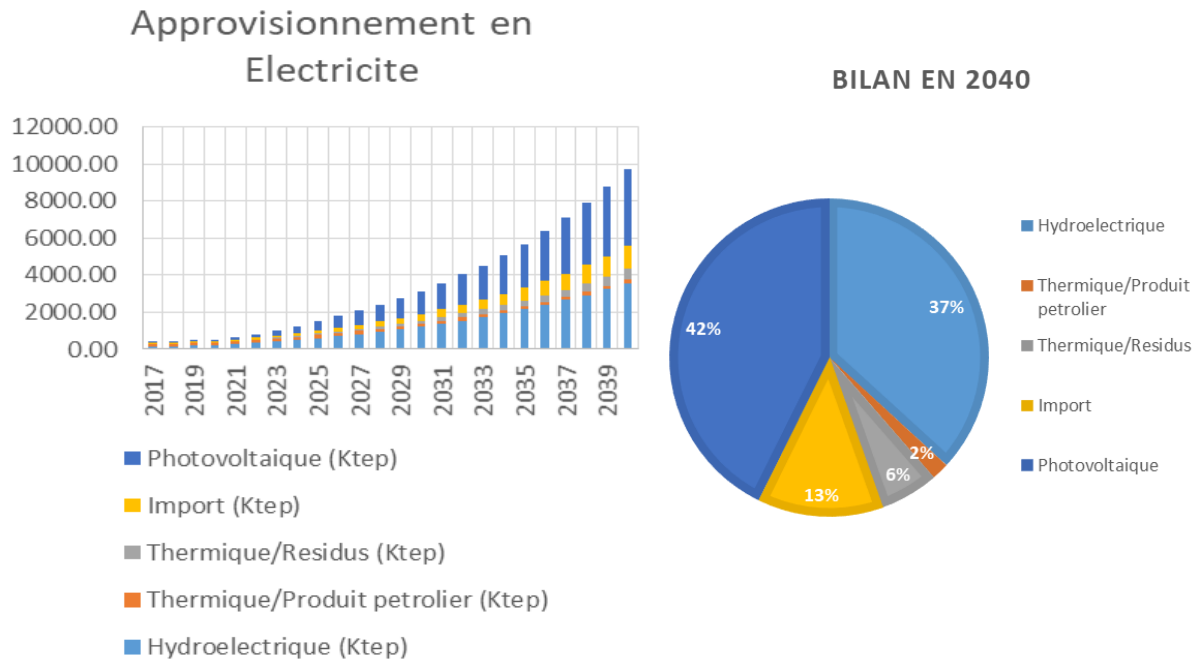


Figure 5: Approvisionnement en électricité avec le scénario 2 de 2017 à 2040 et répartition du type de production pour l'année 2040.

2.3. Scénario 3

2.3.1. Approvisionnement en énergie du scénario 3

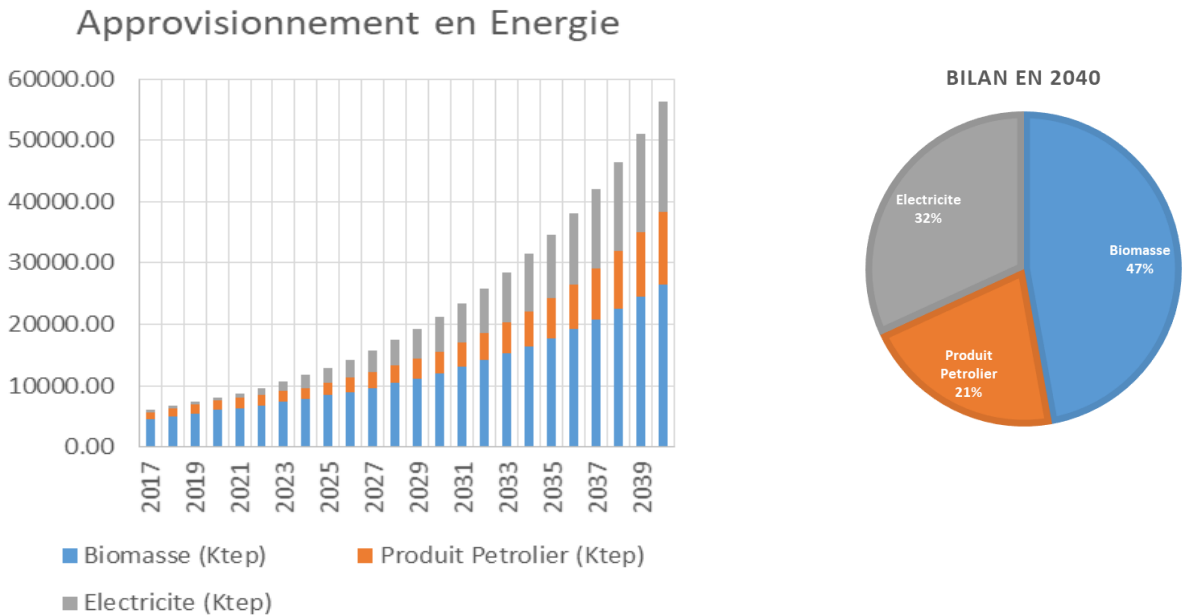


Figure 6 : Approvisionnement en énergie du Mali avec le scénario 3 de 2017 à 2040 et bilan pour l'année 2040

Sur la base des hypothèses retenues pour le scénario 3 (§ 1), l’approvisionnement en énergie de 2017 à 2040 passerait de 6 050 ktep à 56 350 ktep. Avec ce scénario, l’utilisation de la biomasse comme source d’énergie passerait en 2017 de 76% de l’approvisionnement totale en énergie à 47% en 2040. Alors que dans le même temps la production d’électricité augmenterait passant de 6% à 32% de l’approvisionnement totale en énergie. Quant à l’utilisation des produits pétroliers, ils passeraient de 18% à 21% de l’approvisionnement totale en énergie durant les années considérées.

2.3.2. Approvisionnement en énergie provenant de la biomasse du scénario 2

L’évolution de la production d’énergie à basse de biomasse est similaire à celle du scénario 2. Par hypothèse, nous avons pris en compte une répartition entre trois sources (bois-énergie, déchets municipaux et bioéthanol) avec des taux d’évolution identiques à ceux du scénario 2. Les résultats sont donc similaires.

2.3.3. Approvisionnement en électricité à l’aide du scénario 3

Approvisionnement en électricité

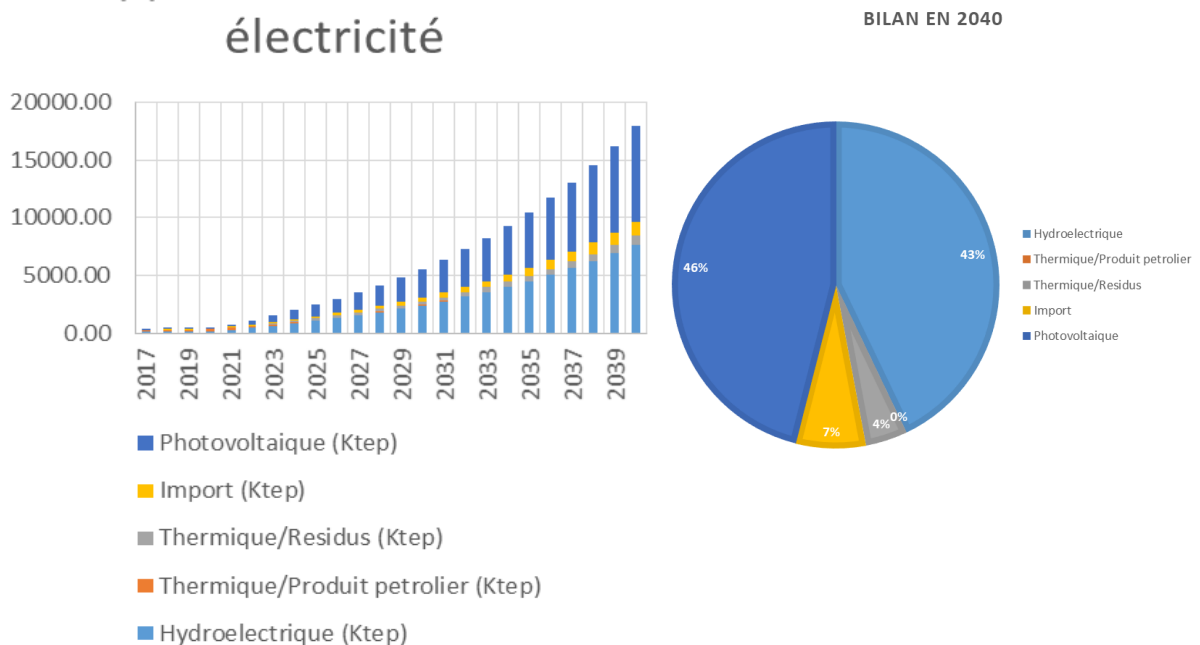


Figure 7: Approvisionnement en électricité avec le scénario 2 de 2017 à 2040 et répartition du type de production pour l’année 2040.

Avec le scénario 3, l’approvisionnement en électricité photovoltaïque passerait de 4% en 2017 à 46% en 2040. Les centrales thermiques à résidu agricole représenteraient 4% de la production d’électricité en 2040. Avec ce scénario, on estime qu’en 2040, la part de production d’électricité issue de l’hydroélectricité serait aux alentours de 43% de l’approvisionnement d’électricité total. Les importations d’électricité représenteraient 7% de l’approvisionnement d’électricité total. Celle produite grâce aux centrales thermiques fonctionnant à base de produit pétrolier aurait disparu.

2.4. Discussions

Dans le scénario de référence (scénario 1), la biomasse est composée uniquement de bois-énergie (bois et charbon de bois). Pour les deux autres scénarios, elle est répartie entre trois sources (bois-énergie, déchets municipaux et bioéthanol). La quantité de déchets ménagers, estimée à environ 2 millions de tonnes/an en 2017 pour Bamako seulement, serait utilisé pour produire du biogaz. Le bioéthanol dont la production est estimée à 37 010 tonnes/an d'ici 2030 serait brûlé dans les réchauds à l'éthanol afin de diminuer la déforestation et ses conséquences.

On constate une forte croissance de la production d'électricité qui s'explique par une forte introduction des centrales photovoltaïques et thermiques à résidus agricole dans les scénarios 2 et 3. Cela exprime la volonté affichée, dans ces scénarios, de l'abandon des ressources d'énergie électrique conventionnelles et des importations au profit de sources d'énergie renouvelables et disponibles sur le territoire national.

Pour le scénario 2, le bilan énergétique en 2040 serait composé de 52% d'énergie renouvelable, hormis l'énergie provenant du bois et du charbon de bois, contre 2% pour le scénario de référence. Ainsi, ce scénario montre une net amélioration par rapport au scénario de référence. Il en est de même pour la part des sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie hydroélectrique, dans la production d'électricité serait de 98% en 2040 contre 46% pour le scénario de référence.

Pour le scénario 3, la forte croissance de l'approvisionnement en électricité serait due à la volonté de renforcer les capacités du réseau de l'EDM-SA (société de distribution de l'électricité au Mali). En 2040, les énergies d'origine renouvelable, photovoltaïque, résidus agricole et hydroélectrique, occuperaient environ 100% de la production d'électricité dans ce scénario contre 46% pour le scénario de référence. La production d'énergie électrique représenterait 64% dans le bilan énergétique globale contre 2% pour le scénario de référence.

Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié le bilan d'énergie finale du Mali afin de proposer des scénarios de transition énergétique d'ici 2040. Outre un scénario de référence basé sur le type de production actuelle, deux autres scénarios d'approvisionnements ont ainsi été développés sur la base des ressources d'énergies renouvelables disponibles au Mali.

Les résultats développés dans cet article prouvent que le Mali peut diminuer sa dépendance à l'importation des produits pétroliers et diminuer son impact environnemental en intégrant les ressources d'énergies locales (résidus agricoles, bio-carburants ou encore les déchets solides). Ces énergies renouvelables locales sont déjà disponibles et seront à long terme moins coûteuse que les énergies d'origine fossile. Cependant, la chaîne d'approvisionnement doit être optimisée et améliorée en prenant en compte les caractéristiques énergétiques et économiques et les nombreuses contraintes administratives.

Remerciements : Nous voudrions remercier les gouvernements Allemand et Suédois à travers la BMBF et le SIDA (ISP) pour leur soutien matériel et financier.

Références

- [1] B. Diarra, E. Blaustein, (2015) « Plan d'Action National d'Énergies Renouvelables (PANER) du Mali », Ministère de l'Energie et de l'Eau du Mali.
https://www.se4all-africa.org/fileadmin/uploads/se4all/Documents/Country_PANER/Mali_Plan_d_Actions_National_pour_les_Energies_Renouvelables_.pdf
- [2] Ministère des Mines de L'Energie et de l'Eau (2006) Politique Energétique du Mali
<http://www.creemali.ml/documents/Politique%20energetique%20nationale%20mali.pdf>
- [3] Conseil des ministres (Janvier 2019), Bamako, Mali.
- [4] J Badger, F. Kamissoko, R. Olander, L. Mads; E. Søren Ejling; N. Guidon, L.B. Hansen, L. Dewilde, P. Nørgård, I. Nygaard (2012), « Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali », DTU
https://orbit.dtu.dk/files/58036202/Applications_d_energie_eolienne_et_solaire.pdf
- [5] I. Nygaard, B. Beck, O.F. Traoré, F. Dembélé, I. Dao, A. Mariko, N. Coulibaly, F. Kamissoko, R. Borgstrøm, (2012), « Résidus agricoles pour la production d'énergie au Mali », DTU
https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/58036184/Residues_agricoles.pdf
- [6] P. Bouffaron, F. Castagno, S. Herold, (2012), « Straight vegetable oil from Jatropha curcas L. for rural electrification in Mali : A techno-economic assessment », Biomass and Bioenergy, V37, P 298-308.
Doi : <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.11.008>
- [7] Agence de l'environnement et du développement durable, (2018) « Rapport national sur l'état de l'environnement au Mali. Edition de 2017 »
<https://chm.cbd.int/api/v2013/documents/8E2BC5FA-301B-557F-6C14-8202C5A68A02/attachments/PROJET%20REE%202017%20.pdf>
- [8] CREE, (2017), « les chiffres clés du secteur de l'électricité au Mali de 2015. », Edition 2015, Commission de la régulation de l'eau et de l'électricité, Bamako, Mali.
https://www.creemali.ml/documents/CC_ELEC_2015.pdf

Annexe

Soit une grandeur passe successivement d'une valeur V_0 aux valeurs V_1, V_2, \dots, V_n et soit T le taux global d'évolution qui concerne la variation relative de V_0 , à V_n .

On peut le calculer de trois façons :

- à partir de V_0 et de V_n : $T = \frac{V_n - V_0}{V_0}$
- à partir du coefficient multiplicateur k permettant de passer de V_0 à V_n : $T = \frac{V_n}{V_0} - 1 = k - 1$
- à partir des taux d'évolutions successifs : si l'on passe successivement de V_0 aux valeurs V_1, V_2, \dots, V_n avec des taux d'évolution t_1, t_2, \dots, t_n , alors le taux d'évolution globale de V_0 à V_n : est donné par $T = (1 + t_1)(1 + t_2)(1 + t_3) \dots (1 + t_n) - 1$

Si l'on passe successivement de V_0 aux valeurs V_1, V_2, \dots, V_n , le taux d'évolution moyen T_M est le nombre tel que $T = (1 + T_M)^n - 1$ avec T le taux global d'évolution.