

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

Nikolaos Papastefanakis*,
Valentin Russeil**, Sandrine Selosse*

@ 75302

Mots-clés : prospective, autonomie alimentaire, autonomie électrique, conflit d'usage des sols, système électrique

La loi de transition écologique de 2015 vise l'autonomie énergétique pour les zones non interconnectées (ZNI), dont La Réunion, pouvant affecter l'autonomie alimentaire à cause notamment de contraintes foncières. Il est donc essentiel de définir des politiques d'aménagement du territoire pour optimiser ces objectifs d'ici 2050. Cette étude croise le modèle TIMES-Réunion avec un modèle de dynamiques d'usages des sols et des biomasses disponibles pour simuler 4 scénarios allant d'une priorisation de l'autonomisation alimentaire à l'autonomisation électrique. Un scénario optimal pour l'autonomie électrique est défavorable à l'autonomie alimentaire et vice versa, ce qui rend l'atteinte de l'équilibre optimal complexe.

Introduction

L'île de La Réunion constitue à la fois un département et une région d'outre-mer français. Ce territoire isolé est situé dans l'ouest de l'océan Indien et au sud-est de l'Afrique, il compte une population de 867 000 habitants [OER, 2022]. La demande d'électricité augmente depuis les années 2000, entraînée par la croissance économique et démographique, atteignant 2806 GWh en 2021. L'île bénéficie par ailleurs d'un important potentiel d'énergie renouvelable mais qui reste encore insuffisamment exploité. Cela conduit à d'importantes importations de ressources fossiles et à un taux de dépendance énergétique qui était de 88,2 % en 2021 [OER, 2022]. En effet, le mix électrique réunionnais est principalement nourri

par les ressources fossiles, à hauteur de 71,8 % (le charbon représentant 30,2 % et le pétrole 41,6 %), puis par la bagasse à hauteur de 7,0 %, l'hydraulique avec 11,6 % et les autres énergies renouvelables (EnR) pour 9,4 %.

La Réunion, en tant que zone non interconnectée (ZNI) *i.e.* une zone non connectée au réseau électrique métropolitain, vise une autonomie énergétique en 2030, objectif fixé par la loi de transition énergétique pour la croissance verte [Légifrance, 2022]. C'est dans ce cadre que des études prospectives sur le système électrique réunionnais et des scénarios visant l'autonomie ont été établis [ADEME, 2018; Selosse et al., 2018]. Parallèlement, alors que la part des produits alimentaires importés n'a cessé d'augmenter au cours des dernières décennies [DAAF Réunion, 2017], le département et la Chambre d'agriculture de La Réunion ont choisi de faire de l'autonomie

* Mines Paris – PSL, CMA – Centre de Mathématiques Appliquées.

** INRAE – UMR Innovation.

alimentaire un objectif pour la politique agricole locale [Chambre d'agriculture Réunion, 2020]. Concrètement, il s'agit d'accroître la production des filières végétales alimentaires (légumes, fruits) et animales (bovine, porcine, etc.), d'assurer la santé économique des exploitations et créer des emplois, de maintenir un foncier agricole suffisant, de mieux substituer les importations par des produits locaux [Département de La Réunion, 2020]. On inclut également dans le périmètre de l'autonomisation alimentaire deux intrants de production : l'alimentation du cheptel (fourrage et concentrés) ainsi que le besoin en fertilisation azotée. En effet, à l'exception des fourrages, ces deux intrants sont largement importés sur l'île [Kleinpeter et al., 2023] et plusieurs études soulignent l'importance de les prendre en compte pour évaluer le degré d'autonomie alimentaire d'un territoire [CIRAD et al., 2020; Leung Pah Hang et al., 2016; O'Hagan, 1976]. L'état actuel de dépendance aux importations de l'île sur le plan alimentaire est explicité dans le Tableau 1.

Ce travail s'inscrit dans les réflexions de planification territoriale actuelles, au croisement de ces ambitions d'autonomisation, et vise plus particulièrement à discuter la capacité de l'île à atteindre une autonomie énergétique du secteur électrique

d'ici 2050, l'objectif fixé pour 2030 étant considéré comme irréalisable. Le modèle utilisé, TIMES-Réunion, a déjà été employé dans des études portant sur la stabilité du système électrique réunionnais à l'horizon 2030 ainsi que sur l'intégration maximale des énergies renouvelables variables [Drouineau, 2011; Maïzi et al., 2018; Selosse et al., 2018]. L'enrichissement de ce modèle se concentre sur 4 filières : le photovoltaïque (PV), les biomasses agricoles (coproduits de culture et effluents d'élevage), les biomasses industrielles et urbaines, qui représentent des potentiels locaux pouvant être davantage exploités [SPL Horizon Réunion, 2017; Tapachès et al., 2019], ainsi que sur la mise à jour de toutes les données de consommation des matières premières, de production d'électricité, des prix et des potentiels technologiques (calibrées sur l'année 2021). Mais ces filières se traduisent souvent par une emprise au sol alors même que le territoire s'inscrit dans un contexte de foncier valorisable limité. Un arbitrage apparaît ainsi inévitable entre objectifs d'autonomie alimentaire et d'autonomie électrique [Russeil et al., 2023]. Néanmoins, à l'heure actuelle, cet arbitrage n'est pas officiellement posé par les décideurs locaux qui prévoient plutôt une croissance simultanée de l'autonomisation alimentaire et électrique à horizon 2030, par une augmentation

Ressource du système alimentaire	Production locale	Importations	Exportations	Taux de couverture	Sources
Alimentation humaine (toutes denrées confondues et avec estimation d'autoproduction)	197 643 tMB	493 775 tMB	11 852 tMB	31,1 %	[Russeil, 2023] (simulation)
Alimentation animale (fourrages)	126 029 tMS	2 709 tMS	0	97,9 %	[Russeil, 2023] (simulation); douanes
Alimentation animale (concentrés)	2 500 tMS	72 665 tMS	0	0,03 %	[Kleinpeter et al., 2019]; douanes
Matières fertilisantes (minérales ou organiques)	1 180 téq NH ₃	5 000 téq NH ₃	0	23,6 %	[Russeil, 2023] (simulation); [Kleinpeter et al., 2023]

Tableau 1. Niveaux de dépendance aux importations du système alimentaire de La Réunion

tMB : tonnes matière brute; tMS : tonnes matière sèche; téq NH₃ : tonnes équivalent engrais azoté (ammoniac); les données des douanes ont été moyennées sur la période 2016 à 2019.

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

à la fois des productions cannières et alimentaires [Préfecture de La Réunion, 2021]. L'objet de cette étude est de questionner ces projections par une évaluation de la capacité d'autonomisation de l'île à plus long terme (horizon 2050) et ainsi de contribuer à définir les politiques d'aménagement du territoire qui permettraient une optimisation entre autonomisation électrique et alimentaire de l'île de La Réunion.

1. Modèle et scénarios prospectifs

1.1. Principes de fonctionnement et calibrage du modèle TIMES-Réunion

Les modèles prospectifs *bottom-up* de la famille TIMES (ETSAP/IEA) sont des outils largement utilisés pour fournir des options plausibles de développement à long terme des systèmes électriques et énergétiques. Ils offrent une vision détaillée en termes de technologies du système représenté où chaque processus est défini par un ensemble d'attributs économiques et technologiques (comme les coûts d'investissement, la durée de vie, les facteurs de disponibilité, les capacités résiduelles, etc.) tout comme les différentes sources d'énergie, qu'elles soient importées ou domestiques. Un modèle TIMES possède donc une représentation du système électrique initial qui est, ensuite, enrichi par de nouvelles technologies que le modèle peut installer à partir d'une certaine année et suivant certaines conditions le cas échéant.

Le modèle minimise le coût total actualisé du système sous contraintes (limites techniques, de capacité et d'activité, etc.) étant piloté par une demande exogène sur un horizon temporel défini. Ce coût inclut les coûts d'investissement, d'opération et maintenance, d'importation, d'extraction des matières premières, etc. Ainsi, le modèle vise à fournir des services énergétiques au coût global minimum en prenant simultanément des décisions sur l'investissement et l'exploitation des équipements, et sur la fourniture d'énergie à chaque pas de temps. Différentes trajectoires à long terme sont formalisées et analysées suivant diverses contraintes énergétiques auxquelles ont

été associées des contraintes liées à des objectifs à atteindre (environnementaux par exemple).

Le modèle TIMES-Réunion est calibré à partir de l'année de référence 2008, au cours de laquelle 2546 GWh d'électricité ont été générés, issus majoritairement de combustibles fossiles, bien que l'hydroélectricité et la bagasse soient également bien représentées. Plus précisément, 64 % de la production d'électricité provenait du charbon et du pétrole (76 % des capacités installées étaient des centrales thermiques, soit un total de 476 MW), tandis que 36 % provenaient de sources renouvelables. L'hydroélectricité représentait près de 25 % de la production d'électricité (20 % des capacités installées, réparties entre des barrages, à hauteur de 109,4 MW, et des installations au fil de l'eau, pour 12,4 MW) et 69 % de l'électricité renouvelable. Environ 550 000 tonnes de bagasse sont produites et récupérées par les deux centrales électriques chaque année, représentant 10 % de production d'électricité. En 2008, les capacités installées des sources d'énergie renouvelable étaient de 16,8 MW pour l'énergie éolienne, 10 MW pour l'énergie solaire et une centrale de 2 MW était alimentée par les déchets municipaux. Enfin, 11 MW de capacités de stockage sont inclus dans le mix électrique. Notons que les années 2015 et 2020 ont également été calibrées selon les données de l'Observatoire Énergie Réunion afin de rester cohérent avec la situation énergétique réunionnaise. De plus, le potentiel supplémentaire d'hydroélectricité est estimé à 60 MW [Conseil régional, 2022a]. Les autres énergies renouvelables de l'île sont supposées avoir les potentiels suivants selon [ADEME, 2018] : 189 MW pour l'énergie éolienne (dont 139 en installation *onshore* et 50 en *offshore*), 10 MW pour l'énergie thermique des mers, 5 MW pour l'énergie des vagues océaniques et 15 MW pour les sources géothermiques.

Concernant les transformations des centrales existantes, les installations diesel sont considérées converties au bioliquide dès 2023 [EDF, 2022]. Également, selon les hypothèses d'EDF, l'une des centrales à turbine à combustion (TAC) (41 MW) va fermer en 2033 et la centrale de Port-Est (211 MW) en 2038. De plus, en 2019, une TAC fonctionnant au bioéthanol a été installée, elle a donc

été intégrée au modèle. Ensuite, les installations fonctionnant au charbon ont été converties dès 2023 à la biomasse solide et aux pellets de bois, leur durée de vie est prolongée sur l'horizon de l'étude [Albioma, 2023]. Enfin, le Schéma Régional Biomasse (SRB) voit des perspectives sur la valorisation de la biomasse pour la méthanisation, avec des projets démonstratifs [Conseil régional, 2022a].

Les caractéristiques de la filière biomasse ont été affinées dans le modèle TIMES-Réunion suivant 2 aspects. Premièrement, les résultats issus d'un « modèle alimentaire » conçu pour analyser les objectifs d'autonomie alimentaire de l'île de La Réunion ont été utilisés pour calibrer les ressources valorisables implémentées dans TIMES-Réunion. Ce modèle alimentaire sera présenté dans la section suivante (1.2). Les objectifs de développement de ces ressources valorisables ont ensuite suivi le plan de référence pour le développement de la filière sur le territoire [Conseil régional, 2022b, 2022c]. Ces ressources sont issues de la filière cannière (bagasse, paille de canne, canne fibre, vinasse, mélasse), de l'élevage (fumiers et lisiers spécifiques), des zones urbaines (boues municipales ou industrielles, biodéchets, déchets verts, bois palette, etc.) et de zones forestières (bois énergie). L'introduction de cultures énergétiques dédiées n'a guère été plébiscitée par les acteurs du territoire, que ce soit dans les stratégies officielles [Préfecture de La Réunion, 2021] comme dans les enquêtes lors de la co-construction de scénarios [Russeil, 2023]. Cependant, suivant les projections du SRB, une expérimentation de canne fibre a été intégrée au modèle mais reste marginale (4 MW). Deuxièmement, pour ces ressources, 3 voies de valorisation électrique ont été retenues : combustion, méthanisation et gazéification [Audouin, 2016 ; Bao et al., 2022]. De plus, le modèle ne prenant pas en compte la filière gazière (le système représenté étant le système électrique), l'hypothèse que 100 % du biogaz est utilisé pour la production d'électricité a été posée. La commodité chaleur n'est pas modélisée ici.

L'évolution du parc photovoltaïque suit les évolutions constatées par l'Observatoire Énergie Réunion (OER) et les installations répertoriées dans le bilan prévisionnel de 2022 [EDF, 2022 ; OER, 2022].

Ainsi, la période 2008-2012 a connu un véritable essor de l'installation de solaire photovoltaïque, avec en moyenne 38 MW ajoutés par an durant cette période [OER, 2010]. Le développement du solaire a ensuite ralenti sur la période 2012-2021 [OER, 2020, 2015]. Le photovoltaïque en toiture représente le plus gros potentiel exploitable d'énergie solaire ; et à la différence des installations au sol, il n'entre pas en conflit avec les usages du sol dédiés à l'autonomie alimentaire de l'île. Le potentiel disponible du solaire photovoltaïque sur toute l'île atteint 994 MW tous types d'installation (toiture, sol, parking) confondus [ADEME, 2018]. De plus, une transformation majeure du mix électrique a lieu en 2023 avec la substitution du charbon par des pellets de bois ainsi que du fioul lourd par du biocarburant : néanmoins, aucune de ces mesures ne représente une avancée pour l'autonomisation électrique, ce qui témoigne que la politique énergétique locale est d'abord dirigée vers la décarbonation.

Enfin, concernant l'évolution de la demande d'électricité de l'île, 2 scénarios d'EDF [EDF, 2022] ont été utilisés : les scénarios Azur et Émeraude (Figure 1).

La demande Azur prend en compte l'avancée des EnR et une augmentation modérée de la demande liée aux véhicules électriques, là où la demande Émeraude se positionne de manière plus optimiste quant à l'intégration des EnR, des véhicules électriques et du ralentissement de la croissance de la demande énergétique de l'île. Parallèlement, le scénario Azur considère une trajectoire haute de croissance de la population ainsi que du PIB par habitant. Le scénario Émeraude quant à lui s'aligne sur l'évolution tendancielle de la population et une évolution baissière du PIB par habitant. Les 2 scénarios décrits couvrant la période de 2022 jusqu'à 2038, une extrapolation jusqu'à 2050 a donc été nécessaire.

1.2. Intégration des résultats du modèle alimentaire au modèle TIMES-Réunion

Comme indiqué précédemment, les hypothèses posées sur la biomasse sont les résultats de scénarios simulés dans un modèle de

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

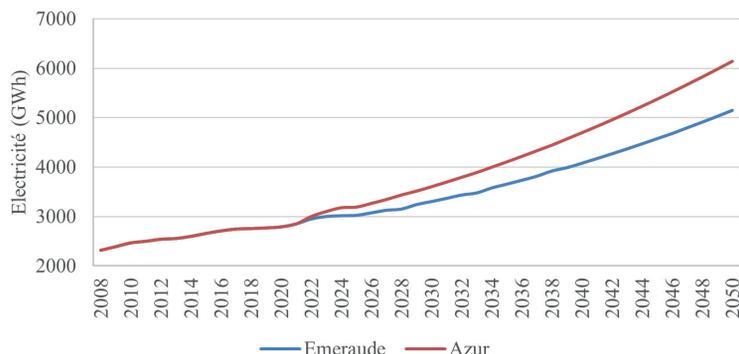


Figure 1. Consommation d'électricité à La Réunion selon les scénarios d'EDF

Source : [EDF, 2022]

dynamiques spatiales territoriales élaboré par Russeil [2023] (qu'on nommera ici « modèle alimentaire »). Comme décrit sur la Figure 2, le modèle alimentaire permet de simuler l'évolution de gisements de biomasses valorisables en bioélectricité en fonction (i) de changements d'usages du sol et (ii) d'hypothèses dépendantes du scénario. Différentes trajectoires à long terme sont formalisées et analysées suivant diverses contraintes énergétiques auxquelles ont été associées des contraintes liées à l'utilisation des sols et aux enjeux d'autonomie alimentaire.

Sur le volet alimentaire, cette étude mobilise 3 taux de couverture : (i) le taux de couverture en alimentation humaine globale (TC_{ahg}) qui correspond à la part massique de toutes les denrées produites localement (animales comme végétales) sur l'ensemble des denrées consommées chaque année, (ii) le taux de couverture en alimentation globale du cheptel (TC_{acg}) qui regroupe la part massique de fourrage et d'ingrédients nécessaires aux aliments concentrés produits localement, le tout rapporté à l'ensemble des aliments consommés par le cheptel (polygastrique et monogastrique) et (iii) le taux de couverture en fourrages ($TC_{fourrages}$) qui détaille l'indicateur précédent en ciblant spécifiquement la part de fourrage local à destination du cheptel polygastrique. En revanche, la couverture des besoins en fertilisation azotée n'est pas suivie par un indicateur, mais est indirectement prise en compte dans le modèle alimentaire puisqu'en fonction des scénarios,

certains gisements de biomasses sont plutôt orientés vers la fertilisation des cultures que vers une valorisation bioélectrique. Les simulations des taux de couverture alimentaire (TC_{ahg} , TC_{acg} et $TC_{fourrages}$) correspondant aux 4 scénarios analysés dans cette étude (voir 1.3) sont tirées de [Russeil, 2023], à l'exception du scénario ALIM dont les hypothèses sur les habitudes de consommation des ménages ont été alignées sur les 3 autres scénarios afin de faciliter leur comparaison dans le cadre de la question de recherche de cette étude qui est centrée sur l'usage des sols et l'arbitrage des gisements de biomasses.

1.3. Quatre scénarios d'usage des sols et de répartition des biomasses

Dans cette étude, quatre scénarios ont ainsi été élaborés pour être simulés dans l'ensemble formé par le modèle alimentaire et le modèle TIMES-Réunion (voir Figure 2). Les hypothèses de ces scénarios sont présentées dans le Tableau 2.

Un premier scénario, *business as usual* (« BAU »), constitue une extrapolation linéaire des dynamiques spatiales actuelles : 1,4 %/an de diversification de la canne vers les cultures horticoles et la prairie principalement, des biomasses d'origine animale valorisées uniquement en fertilisation et des biomasses végétales suivant les tendances actuelles. Le scénario de la demande Azur établi par EDF a été choisi dans ce cadre. L'importation de charbon et de fioul est autorisée

seulement dans ce scénario. Il faut noter que cette hypothèse est faite afin de montrer les conséquences qui résulteraient de ces choix.

De plus, Russeil [2023] a établi 3 scénarios tendanciels dans son travail de thèse et calibré ces derniers à dire d'acteurs. Le premier scénario, nommé «ALIM», correspond à une orientation tendancielle des politiques d'aménagement territorial privilégiant l'autonomie alimentaire. Les ressources locales visées pour la production d'électricité sont ainsi limitées. Le deuxième

scénario, nommé «BIOELEC», oriente les surfaces préférentiellement pour l'objectif d'autonomie électrique. Une contrainte d'objectifs pour la filière biomasse est ainsi fixée quant aux capacités de combustion de bioéthanol, de gazéification et de méthanisation. Enfin le troisième scénario, nommé «PLAN», s'inscrit dans une trajectoire suivant en même temps les objectifs de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et du SRB en termes de capacité installée et d'activité. De plus, des subventions à l'investissement comprises entre 10 et 20 % ont été

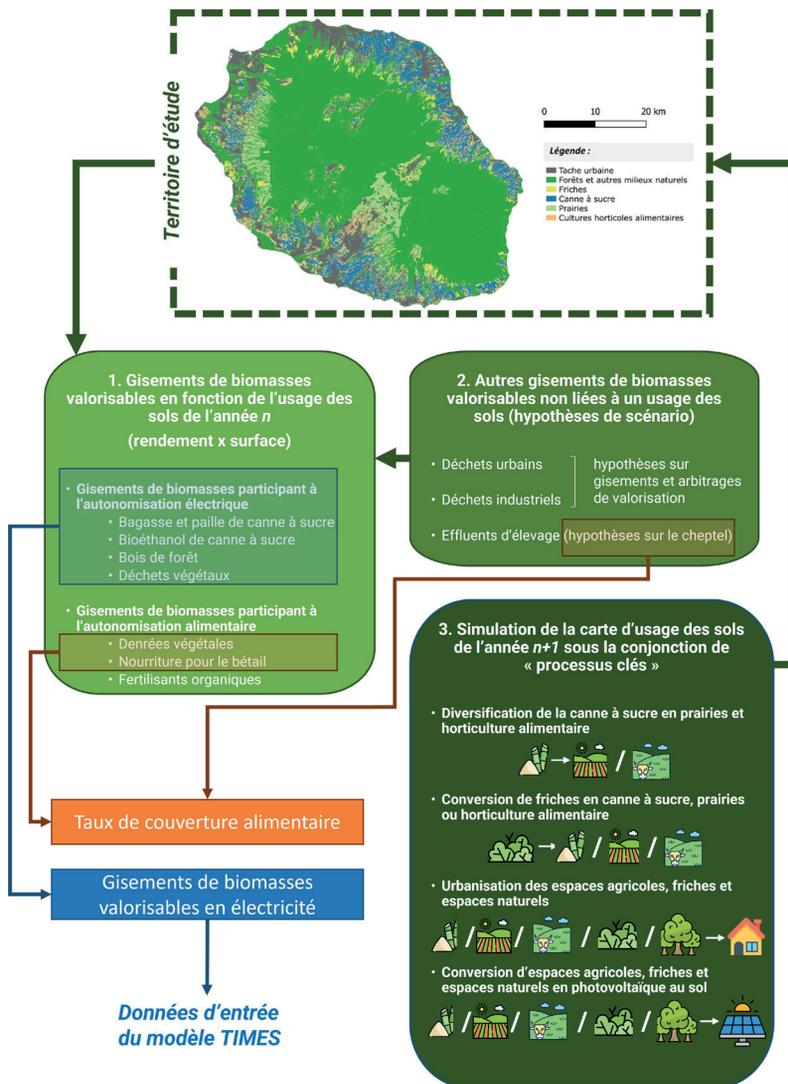


Figure 2. Fonctionnement général du modèle alimentaire et mise en relation de ses résultats avec le modèle TIMES-Réunion

Source : auteurs

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

modélisées pour la méthanisation et la gazéification. Tous les scénarios suivent également la PPE concernant les énergies renouvelables hors biomasse, néanmoins, dans les scénarios «ALIM» et «PLAN», l'installation de PV au sol n'est pas autorisée. Pour l'analyse de ces trois scénarios, le scénario de demande suivi est Émeraude, ce qui suppose que des actions orientées demande sont appliquées. Enfin, il faut noter que l'importation de la biomasse n'est pas modélisée pour l'instant, mais les importations de biocarburant, de bioéthanol et des granulés de bois sont quant à elles incluses.

2. Résultats du modèle TIMES-Réunion

Les moyens de production d'électricité étant déterminants pour les trajectoires vers un système autonome, que ce soit du point de vue énergétique ou alimentaire, nous analysons l'impact des différentes orientations possibles sur le système électrique. La question est alors de déterminer comment la priorité donnée à l'autonomie énergétique ou alimentaire impactera la production d'électricité à partir de la filière biomasse et des autres énergies renouvelables.

Dans le scénario de référence (BAU), le mix électrique a recours à des combustibles fossiles jusqu'en 2050 pour satisfaire la hausse des besoins électriques, comme le montre la Figure 3. En 2030, il y a une importante augmentation des capacités de la filière biomasse, conséquence de deux phénomènes : (i) la conversion des centrales charbon-biomasse vers du 100 % biomasse, et (ii) l'ouverture de la nouvelle TAC alimentée en bioéthanol, comme annoncé dans la PPE [Conseil régional, 2022a]. Le solaire se développe également, davantage que l'éolien.

Les centrales biomasse sont nourries par les bagasses en exploitant tout le potentiel disponible. En revanche, après 2030, malgré une implémentation continue du solaire, les investissements sont plutôt orientés vers de nouvelles centrales au charbon et au fioul, jusqu'à atteindre 58 % des capacités installées en 2050. Globalement, les importations de ressources primaires énergétiques sont d'abord en baisse en 2030 puis, en 2050, elles reviennent au même niveau qu'en 2020 (Figure 5). Néanmoins, le mix électrique contient 560 MW de PV, 90 MW d'éolien et 2,5 MW de centrales biogaz. Cette évolution indique qu'en l'absence de contraintes supplémentaires pour promouvoir de manière maintenue l'autonomie

Paramètres	BAU	ALIM	BIOELEC	PLAN
Diversification cannière (PMA)	Moyenne	Forte	Faible	Faible
Conversion nette de friches (PMA)	Nulle	Moyenne	Moyenne	Forte
Contrôle de l'urbanisation (PMA)	Faible	Faible	Faible	Fort
Installation de photovoltaïque au sol (PMA/PMT)	Moyenne	Faible	Forte	Faible
Demande électrique (PMA/PMT)	Azur	Émeraude	Émeraude	Émeraude
Subventions à l'investissement (PMT)	Non	Non	Méthanisation et gazéification (10-20 %)	Méthanisation et gazéification (10-20 %)
Contrainte d'objectifs (PMA/PMT)	Charbon et fioul autorisés	PPE	PPE	PPE et SRB

Tableau 2. Synthèse des hypothèses sur les paramètres principaux pour les 4 scénarios simulés

Source : auteurs

PMA : paramètre du modèle alimentaire ; PMT : paramètre du modèle TIMES-Réunion.

Le calibrage quantitatif des PMA est décrit dans [Russeil, 2023].

PROSPECTIVE

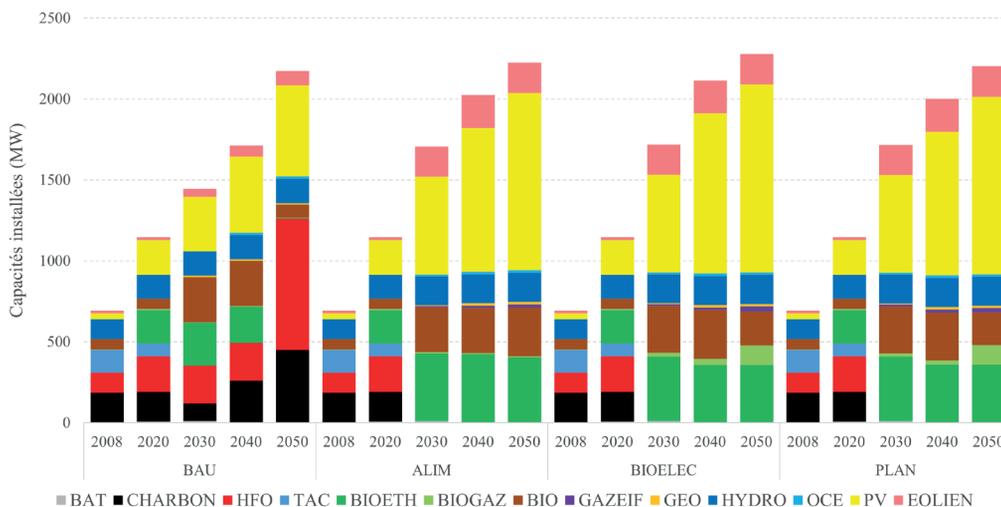


Figure 3. Évolution des capacités installées selon les différents scénarios

Source : auteurs

BAT : batteries; HFO : *Heavy Fuel Oil* (fioul lourd); TAC : turbine à combustion; BIOETH : bioéthanol; BIO : combustion de biomasse; GAZEIF : gazéification; GEO : géothermie; HYDRO : hydraulique; OCE : énergies des océans.

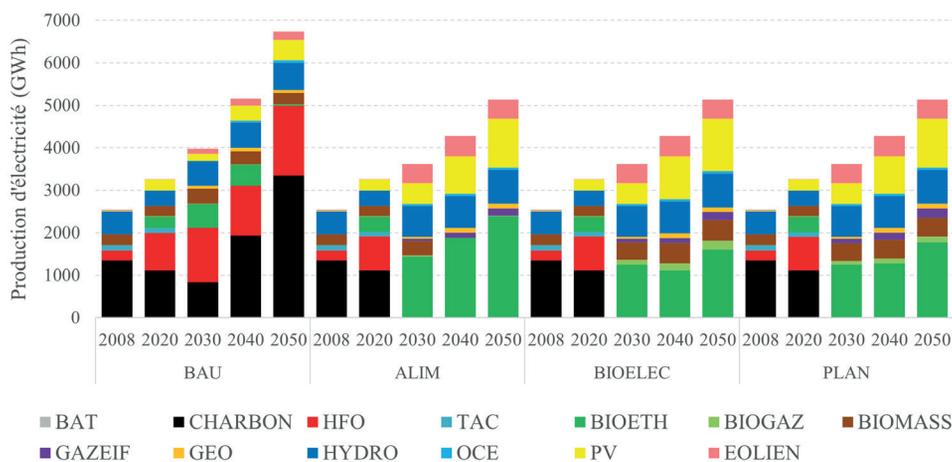


Figure 4. Évolution de la production d'électricité à partir de chaque source énergétique selon les différents scénarios

Source : auteurs

électrique, le mix électrique restera marqué par un développement des centrales à charbon et au fioul (HFO – *Heavy Fuel Oil*, fioul lourd). De plus, la contribution des énergies renouvelables et de la filière biomasse locale dans le mix électrique en 2050 (respectivement à hauteur de 22 et 4 %) souligne que la transition vers un système 100 % renouvelable ne peut pas être atteinte

sans contrainte de politique énergétique. Il faut noter que la production d'électricité à partir des déchets, du bioéthanol local et du biogaz est comprise dans la filière biomasse locale.

Dans le scénario ALIM, biomasses et surfaces sont dédiées au secteur alimentaire, donc les ressources naturelles disponibles pour le mix

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

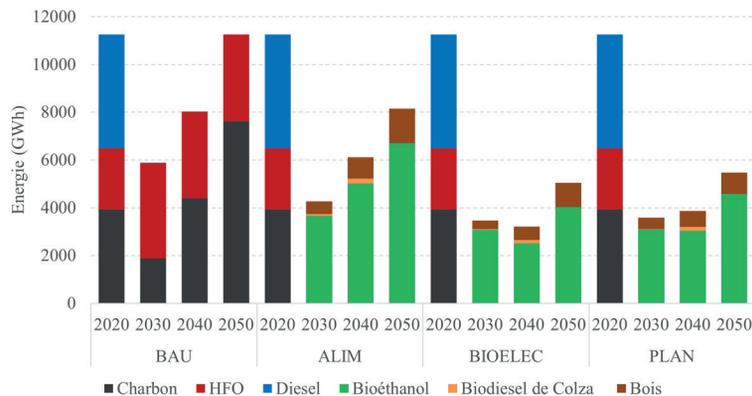


Figure 5. Importations des ressources primaires énergétiques dans les différents scénarios

Source : auteurs

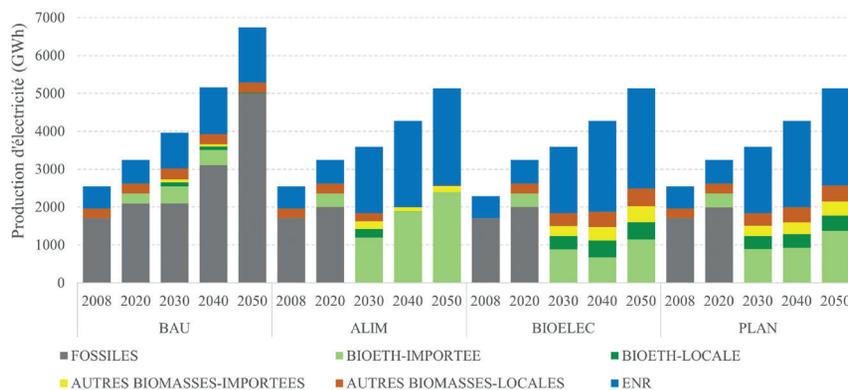


Figure 6. Évolution de la production d'électricité à partir de différentes sources d'énergie locales et importées

Source : auteurs

électrique sont plus limitées. Il en résulte un niveau plus important de capacités installées de centrales fonctionnant au bioéthanol par rapport aux autres scénarios sur tout l'horizon de l'étude, à savoir environ 400 MW en 2050 dans le scénario ALIM contre 358 MW dans le scénario BIOELEC et 359 MW dans le scénario PLAN. De plus, les ressources locales pour produire du bioéthanol apparaissent insuffisantes. L'importation de bioéthanol est d'ailleurs bien supérieure dans le scénario ALIM que dans les autres scénarios, comme le montre la Figure 5. En 2050, les centrales biomasse ne produiront plus d'électricité, même si elles ne sont pas encore en fin de vie, en revanche, des centrales de gazéification et de

méthanisation seront installées. Les capacités de biogaz en 2050 sont au même niveau qu'en 2020, à savoir 6 MW, mais des capacités de gazéification sont installées progressivement dès 2025 jusqu'à atteindre 20 MW en 2050. Des importations importantes sont alors nécessaires pour ces centrales fonctionnant au bois (Figure 5). Enfin, à l'horizon 2050, 50 % de la demande électrique est satisfaite par valorisation de biomasses importées (bois et bioéthanol), le reste du mix provenant d'autres EnR hors bioélectricité (Figure 6).

Comme dans les autres scénarios, dans les scénarios BIOELEC et PLAN, de nouvelles capacités sont installées à horizon 2050 dans tous les

secteurs pour compenser la fin de vie d'un certain nombre de centrales (bioéthanol et biomasse) et faire face à l'augmentation de la demande. Plus précisément, les capacités de photovoltaïque, d'éolien, de géothermie et d'énergie des mers sont entièrement exploitées. Il faut noter que le secteur PV inclut les installations sur les ombrières de parking, sur les toitures et au sol. De plus, les éoliennes *onshore* et *offshore* sont regroupées, ainsi que l'énergie thermique des mers et l'énergie des vagues. Ensuite, concernant la filière biomasse, 210 MW de capacités de centrales à combustion de biomasse, 85 MW de biogaz (120 en total) et 15 MW de gazéification (30 en total) sont ajoutés au scénario BIOELEC, représentant un total de 718 MW de la filière en 2050. Dans le scénario PLAN, moins de capacités de gazéification sont installées, mais davantage de bioéthanol. Plus précisément, 359 MW de centrales à bioéthanol sont installés, 200 MW de centrales à combustion de biomasse, 97 MW de biogaz (s'ajoutant aux 25 MW déjà installés) et 7 MW de gazéification (s'ajoutant aux 20 MW installés), soit un total en 2050 de 732 MW de capacités installées pour la filière biomasse. En d'autres termes, d'ici 2050 dans ces scénarios, environ 50 % de la production électrique provient de la filière biomasse, la plupart étant importée. En effet, environ 17 % de la production provient de la biomasse locale (pour les 2 scénarios) et 30 % de la biomasse importée pour BIOELEC (34 % pour PLAN) (Figure 6).

Quel que soit le scénario étudié, l'approvisionnement énergétique du territoire réunionnais demeure fortement dépendant des importations : ses ressources locales se montrent insuffisantes pour couvrir la demande. Dans tous les scénarios, bien que l'ensemble des biomasses valorisables locales soient toujours entièrement mobilisées, des importations de bois et de biodiesel de colza restent nécessaires (Figure 5).

Enfin, si on considère le coût total actualisé de la production d'électricité à La Réunion, on peut noter qu'il est le plus élevé dans le cas du scénario ALIM qui constitue donc la trajectoire la plus coûteuse en raison du niveau élevé des importations constatées. Suivent les scénarios PLAN et

BIOELEC et enfin, le scénario BAU, ce dernier étant le moins coûteux.

3. Discussion

L'évolution croissante de la demande, atteignant environ 5 600 GWh en 2050, contre 3 089 GWh en 2021, implique le déploiement de moyens additionnels de production. Bien que le scénario BAU présente la plus forte demande (Azur), le niveau des capacités installées est légèrement plus important dans les autres scénarios. Cela est principalement dû au fait que les EnR présentent des facteurs de charge plus faibles que les centrales thermiques. De plus, les ressources de biomasse dépendant de la saison, ces centrales présentent aussi des facteurs de charge plus faibles. Par contre, le fonctionnement de ces centrales peut être considéré comme celui d'une centrale de base, autrement dit, elles sont capables d'offrir de la flexibilité au réseau électrique [Drouineau et al., 2015]. Cela pourrait signifier que des scénarios plus intensifs en termes d'intégration des renouvelables pourraient alors être envisagés même si des importations de biocarburants et de bois restent nécessaires dans tous les scénarios et montrent la dépendance énergétique de l'île.

En revanche, alors que le scénario ALIM permet l'accroissement le plus important des taux de couverture en alimentation humaine (voir Figure 7) et en alimentation du cheptel (voir Figure 8), c'est ce même scénario qui souligne que l'autonomisation alimentaire volontariste impose une dépendance encore plus forte aux ressources énergétiques importées. Au contraire, un mix électrique fortement basé sur une culture valorisée en bioélectricité (canne à sucre dans BIOELEC) serait le plus défavorable à l'autonomisation alimentaire du territoire. Cependant, il faudrait noter que la teneur en sucre et le pouvoir calorifique inférieur (PCI) changent selon la variété de canne, allant de la canne fibre qui est faible en sucre, mais considérée comme une culture énergétique dédiée, jusqu'aux cannes à forte teneur en sucre. Ainsi, nous pourrions imaginer l'accroissement de la production bioélectrique par culture de la canne fibre au lieu de la canne à

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

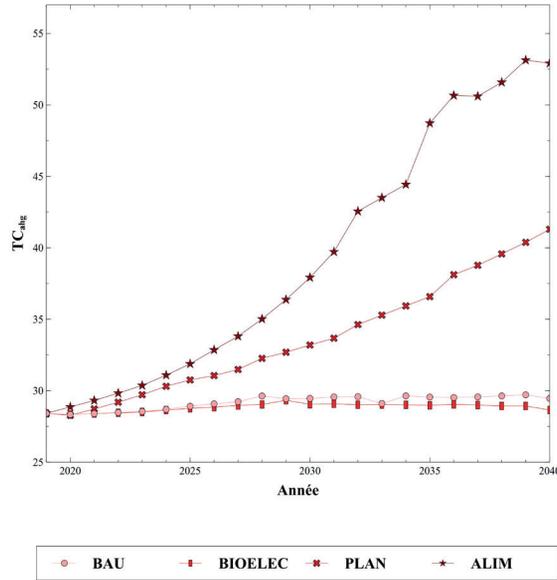


Figure 7. Évolution du taux de couverture en alimentation humaine globale (TC_{ahg}) selon les simulations des 4 scénarios étudiés dans le modèle alimentaire à horizon 2040

Source : [Russeil, 2023]

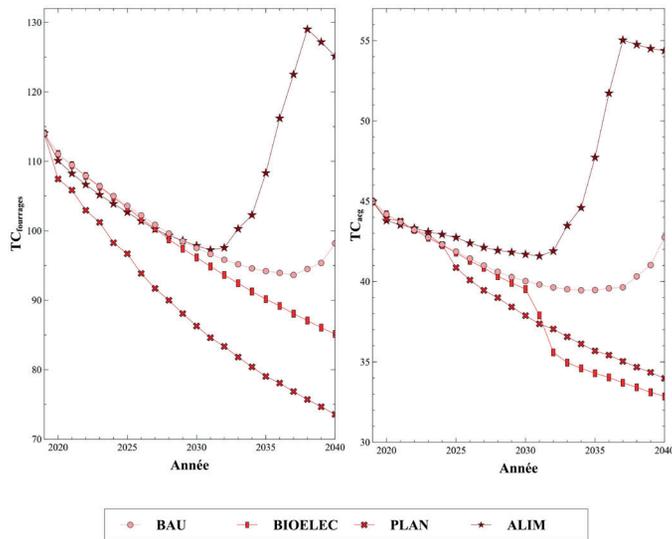


Figure 8. Évolution des taux de couverture en alimentation du cheptel global (TC_{acg}) avec un focus sur le taux de couverture en fourrages dans l'alimentation des polygastriques ($TC_{fourrages}$), selon les simulations des 4 scénarios étudiés dans le modèle alimentaire à horizon 2040

Source : [Russeil, 2023]

$TC_{fourrages}$ est supérieur à 100 % sur beaucoup de points des courbes car il s'agit d'un potentiel annuel qui masque d'importantes variations saisonnières de la ressource : un taux voisin de 115 % correspond en réalité à une demande satisfaite avec des tensions.

sucre dans des scénarios alternatifs d'autonomisation énergétique. Enfin, le scénario PLAN semble permettre un certain équilibre entre les enjeux d'autosuffisance alimentaire et énergétique en limitant la dépendance aux ressources énergétiques importées tout en augmentant l'autosuffisance alimentaire. Néanmoins, la Figure 8 montre que ce scénario conduit au ratio de couverture le plus bas pour l'alimentation animale, dimension essentielle de l'autonomisation alimentaire.

En parallèle, dans tous les scénarios, des capacités additionnelles sont installées en 2050 en raison de la fermeture de la centrale biomasse bagasse et de la TAC en bioéthanol en 2045. S'agissant des centrales à bioéthanol, bien que l'île dispose d'un potentiel important de ressources pouvant être valorisées pour en produire, ces dernières ne suffisent pas et des importations sont donc nécessaires.

Le fait que l'île de La Réunion dispose de diverses sources d'énergies renouvelables suggère qu'un plan vert pour le secteur énergétique doit s'appuyer sur des engagements substantiels et de soutien de la part des décideurs politiques publics. Pour cette raison, dans les scénarios BIOELEC et PLAN, des subventions à l'investissement ont été appliquées, afin d'observer le rôle de ces types d'incitations. Les résultats montrent que l'exploitation des énergies renouvelables locales apparaît comme étant le plus rentable au vu des conditions qui ont été à ce stade intégrées dans le modèle. Cette analyse s'est concentrée sur le mix électrique et elle a pris en compte une demande accrue d'électricité due au développement des véhicules électriques, l'une des solutions pour décarboner le secteur des transports. Mais penser la mobilité uniquement sous l'angle de la décarbonation élude la nécessité d'aller vers une politique alternative des transports, c'est-à-dire : réduire le recours à la voiture individuelle et non pas uniquement passer à la voiture électrique ce qui alourdirait fortement la facture électrique [Russeau, 2023]. Une telle politique représenterait un gisement considérable de sobriété. Or, cette dernière demeure malheureusement un angle mort des politiques publiques de l'énergie [Villalba & Semal, 2018]. Un autre facteur pourrait

infléchir les scénarios de demande utilisés par les décideurs locaux : ces trajectoires reposent sur la projection « haute » du scénario INSEE alors que les derniers recensements situent la croissance démographique juste en deçà (0,2 %) du scénario bas [EDF, 2022; INSEE, 2018].

Conclusion

L'île de La Réunion est confrontée à un défi crucial concernant l'avenir de son aménagement territorial. Ainsi, l'orientation vers l'autonomie énergétique ou alimentaire est déterminante pour l'évolution de moyens de production d'électricité. Sur la base d'une comparaison de scénarios alternatifs, cette analyse vise à illustrer l'impact du choix politique sur la production d'électricité à partir de la filière biomasse et des énergies renouvelables à l'île de La Réunion d'ici 2050. Les résultats du modèle d'optimisation *bottom-up* TIMES-Réunion mettent en évidence que la filière biomasse peut couvrir une part significative de la demande en électricité de l'île dans les années à venir, ainsi que les énergies renouvelables. Bien que cette analyse puisse mettre en évidence les compromis entre les secteurs alimentaire et électrique, trouver un équilibre optimal dans l'allocation des ressources ne peut être que partiellement satisfait. En effet, selon nos indicateurs, un scénario de compromis semble se situer quelque part autour du scénario PLAN, qui tend à limiter le coût énergétique, bien que pas autant que BIOELEC, tout en permettant une production alimentaire locale substantielle, même si elle reste bien en deçà d'ALIM. En revanche, les importations des ressources primaires énergétiques, présentées sur tout l'horizon des scénarios, montrent la dépendance énergétique persistante de l'île. Au-delà des efforts pour augmenter la production électrique locale sans empiéter de trop sur la capacité d'autonomisation alimentaire, ce travail illustre également l'importance d'infléchir davantage les scénarios de consommation électrique par davantage d'efficacité mais surtout de sobriété. Même si les directives du climat concernant la décarbonation du système électrique ne peuvent pas être isolées d'une étude du système énergétique dans son ensemble, au risque de passer à côté des effets réciproques des

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

changements dans les différents secteurs, cette analyse est cruciale dans le contexte actuel car elle met en évidence les défis à relever concernant les politiques d'aménagement et les potentiels de développement des différentes options, dont certaines sont en concurrence. Les scénarios étudiés invitent à enrichir de futures simulations à l'interface alimentation-énergie par l'exploration de nouvelles hypothèses, en particulier pour la production de scénarios de rupture : l'introduction de cultures énergétiques dédiées sur la sole agricole (canne fibre, canne sucrière dédiée au bioéthanol, cultures oléagineuses), une intégration supérieure de batteries-système pour augmenter la pénétration de moyens de production intermittents renouvelables ainsi que des scénarios de demande (alimentaire et énergétique) plus ambitieux en termes de sobriété. Des investigations supplémentaires sont également nécessaires afin de prendre en compte l'ensemble du système énergétique de l'île de La Réunion.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a bénéficié du soutien de la Chaire Modélisation prospective au service du développement durable portée par Mines Paris – PSL, l'École des ponts ParisTech et soutenue par l'ADEME, EDF, GRTgaz, RTE, Schneider Electric, TotalEnergies et la DGEC. Nous tenons également à remercier vivement Robin Nizou et Hubert Zendron, élèves du cycle ingénieur civil de Mines Paris – PSL, pour leur contribution aux développements apportés au modèle TIMES-Réunion pendant le stage de recherche qu'ils ont effectué au CMA.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, 2018. Vers l'autonomie énergétique en zone non interconnectée à l'horizon 2030.

Albioma, 2023. « Fin 2023, La Réunion abandonnera définitivement le charbon » [WWW Document], URL <https://www.albioma.com/magazine/fin-2023-la-reunion-abandonnera-definitivement-le-charbon> (accessed 6.1.23).

Audouin, S., 2016. Analyse des filières de gazéification pour le CFPPA de Piton Saint-Leu et à l'échelle régionale, île de La Réunion, CIRAD.

Bao, K., Bieber, L.-M., Kürpick, S., Radanielina, M.H., Padsala, R., Thrän, D., Schröter, B., 2022. "Bottom-up assessment of local agriculture, forestry and urban waste potentials towards energy autonomy of isolated regions: Example of Réunion", *Energy for Sustainable Development* 66, 125–139, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.002>.

Chambre d'agriculture Réunion, 2020. Contrat d'objectifs et de performance 2019-2025.

CIRAD, FAO, DEVCO, 2020. Food systems assessment: Assembling the puzzle [WWW Document], URL <https://www.slideshare.net/francoisstepman/webinar-food-systems-assessment> (accessed 9.4.23).

Conseil régional, 2022a. Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2019-2028 (No. 111875), Ministère de la Transition écologique, Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de La Réunion.

Conseil régional, 2022b. Schéma Régional Biomasse de La Réunion – Rapport d'état des lieux (No. 111875), Ministère de la Transition écologique, Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de La Réunion.

Conseil régional, 2022c. Schéma Régional Biomasse de La Réunion – Document d'orientation (No. 111875), Ministère de la Transition écologique, Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement de La Réunion.

DAAF Réunion, 2017. 2007-2016 : La part de la production agricole locale se maintient sur le marché du frais, mais les importations continuent leur progression, (No. 104).

Département de La Réunion, 2020. Agripei 2030, Agir ensemble pour l'agriculture réunionnaise de demain – 39 actions pour un modèle réunionnais responsable [WWW Document], URL <https://www.departement974.fr/actualite/agripei-2030-un-modele-agricole-ambitieux-pour-reunion> (accessed 9.4.23).

Drouineau, M., 2011. Modélisation prospective et analyse spatio-temporelle : intégration de la dynamique du réseau électrique (Manuscrit de thèse), École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Drouineau, M., Assoumou, E., Mazauric, V., Maïzi, N., 2015. "Increasing shares of intermittent sources in Reunion

Island: Impacts on the future reliability of power supply”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46, 120–128, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.024>.

EDF, 2022. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité à La Réunion.

Kleinpeter, V., Alvanitakis, M., Vigne, M., Wassenaar, T., Lo Seen, D., Vayssières, J., 2023. “Assessing the roles of crops and livestock in nutrient circularity and use efficiency in the agri-food-waste system: A set of indicators applied to an isolated tropical island”, *Resources, Conservation and Recycling* 188, 106663, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106663>.

Kleinpeter, V., Vayssières, J., 2019. Inventaire et quantification des flux de biomasses locales valorisées ou valorisables en agriculture à La Réunion, Rapport technique du projet GABiR, 68 p., <https://agritrop.cirad.fr/602724/>.

Légifrance, 2022. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, 2015-992.

Leung Pah Hang, M.Y., Martinez-Hernandez, E., Leach, M., Yang, A., 2016. “Designing integrated local production systems: A study on the food-energy-water nexus”, *Journal of Cleaner Production* 135, 1065–1084, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.194>.

Maïzi, N., Mazauric, V., Assoumou, E., Bouckaert, S., Krakowski, V., Li, X., Wang, P., 2018. “Maximizing intermittency in 100% renewable and reliable power systems: A holistic approach applied to Reunion Island in 2030”, *Applied Energy* 227, 332–341, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.058>.

Ministère de la Transition écologique, 2022. Bilan énergétique de la France pour 2020 [WWW Document], URL <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2020/partie1-prix-energie.php> (accessed 12.18.23).

OER, 2010. Bilan énergétique de l'île de La Réunion, Observatoire Énergie Réunion, Agence régionale énergie Réunion, ARER.

OER, 2015. Bilan énergétique de l'île de La Réunion, Observatoire Énergie Réunion, Agence régionale énergie Réunion, ARER.

OER, 2020. Bilan énergétique de l'île de La Réunion, Observatoire Énergie Réunion, Agence régionale énergie Réunion, ARER.

OER, 2022. Bilan énergétique de l'île de La Réunion, Observatoire Énergie Réunion, Agence régionale énergie Réunion, ARER.

O'Hagan, J.P., 1976. “National self-sufficiency in food”, *Food Policy* 1, 355–366, [https://doi.org/10.1016/0306-9192\(76\)90071-3](https://doi.org/10.1016/0306-9192(76)90071-3).

Préfecture de La Réunion, 2021. Synthèse des travaux et propositions du comité de transformation de l'agriculture réunionnaise, Saint-Denis, 28 juin 2021.

Russeil, V., 2023. Perspectives d'autonomisation alimentaire-électrique de l'île de La Réunion : enseignements de la modélisation spatiale dynamique et de l'anticipation participative (Manuscrit de thèse), Université de la Réunion.

Russeil, V., Lo Seen, D., Broust, F., Bonin, M., Praene, J.-P., 2023. “Food and electricity self-sufficiency trade-offs in Reunion Island: Modelling land-use change scenarios with stakeholders”, *Land Use Policy* 132, 106784, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106784>.

Selosse, S., Ricci, O., Garabedian, S., Maïzi, N., 2018. “Exploring sustainable energy future in Reunion Island”, *Utilities Policy* 55, 158–166, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2018.10.006>.

SPL Horizon Réunion, 2017. Schéma Régional Biomasse de La Réunion (Région Réunion, Rapport d'état des lieux).

Tapachès, E., Perez, R., Lauret, P., Perez, M., David, M., 2019. Mitigation of the Variability of a PV Fleet via Geographical Dispersion and Energy Storage Systems on the Reunion Island Non-Interconnected Grid, in: 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Presented at the 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 2082–2086, <https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8981214>.

Villalba, B., Semal, L., 2018. *Sobriété énergétique. Contraintes matérielles, équité sociale et perspectives institutionnelles*, Paris, Quae, coll. «Indisciplines», 201 p., ISBN : 978-2-7592-2882-9.

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

Annexes

Tableau 3. Coûts totaux annualisés du système électrique

Scénario	BAU	ALIM	BIOELEC	PLAN
Fonction objectif (Md€)	4,535	5,553	5,203	5,262

Tableau 4. Évolution du parc électrique à partir de la filière biomasse, des fossiles et des déchets

Scénario	Année	Type de technologie (MW)						
		Bioéthanol	Biogaz	Biomasse	Charbon	Gazéification	HFO	TAC
BAU	2008	-	2	65	185	-	125	140
	2020	206	6	65	185	-	220	80
	2030	265	2	280	110	0,03	233	-
	2040	224	2	280	260	0,1	234	-
	2050	3	2	80	450	0,2	812	-
ALIM	2008	-	2	65	185	-	125	140
	2020	206	6	65	185	-	220	80
	2030	419	6	279	-	7	-	-
	2040	424	6	279	-	14	-	-
	2050	404	7	300	-	21	-	-
BIOELEC	2008	-	2	65	185	-	125	140
	2020	206	6	65	185	-	220	80
	2030	399	24	291	-	10	-	-
	2040	358	37	303	-	15	-	-
	2050	358	120	210	-	30	-	-
PLAN	2008	-	2	65	185	-	125	140
	2020	206	6	65	185	-	220	80
	2030	400	19	289	-	13	-	-
	2040	359	25	296	-	20	-	-
	2050	359	122	201	-	27	-	-

Tableau 5. Évolution du parc électrique à partir des énergies renouvelables

Scénario	Année	Type de technologie (MW)					
		Batteries	Géothermie	Hydraulique	OCE	PV	Éolien
BAU	2008	-	-	122	-	36	16
	2020	6	-	147	-	215	16
	2030	10	10	150	-	375	50
	2040	-	10	150	15	469	70
	2050	-	10	150	15	561	90
ALIM	2008	-	-	122	-	36	16
	2020	6	-	147	-	215	16
	2030	10	5	180	10	605	185
	2040	-	15	180	15	889	203
	2050	-	15	180	15	1095	189
BIOELEC	2008	-	-	122	-	36	16
	2020	6	-	147	-	215	16

	2030	10	5	180	10	605	185
	2040	-	15	180	15	989	203
	2050	-	15	180	15	1162	189
PLAN	2008	-	-	122	-	36	16
	2020	6	-	147	-	215	16
	2030	10	5	180	10	605	185
	2040	-	15	180	15	889	203
	2050	-	15	180	15	1095	189

Tableau 6. Importations des ressources primaires énergétiques

<i>Scénario</i>	<i>Année</i>	<i>Importations des ressources primaires énergétiques (GWh)</i>					
		Charbon	Gazole	HFO	Biodiesel de colza	Bioéthanol	Bois
BAU	2020	3936	4759	2461	-	-	-
	2030	1879	4	1934	-	-	-
	2040	4400	-	1965	-	-	-
	2050	7615	-	2249	-	-	-
ALIM	2020	3936	4759	2461	-	-	-
	2030	-	-	-	66	3671	526
	2040	-	-	-	198	5019	896
	2050	-	-	-	-	6711	1439
BIOELEC	2020	3936	4759	2461	-	-	-
	2030	-	-	-	32	3073	361
	2040	-	-	-	142	2509	560
	2050	-	-	-	-	4032	1008
PLAN	2020	3936	4759	2461	-	-	-
	2030	-	-	-	17	3089	481
	2040	-	-	-	157	3043	672
	2050	-	-	-	-	4569	896

Tableau 7. Production d'électricité à partir de différents types d'énergie

<i>Scénario</i>	<i>Année</i>	<i>Production d'électricité par source (GWh)</i>					
		Fossiles	EnR	Bioéthanol importé	Bioéthanol local	Autres biomasses importées	Autres biomasses locales
BAU	2008	1711	580	0	0	0	255
	2020	2092	629	270	0	0	258
	2030	2098	939	449	112	72	289
	2040	3107	1232	401	91	59	266
	2050	4988	1453	0	27	0	274
ALIM	2008	1711	580	0	0	0	255
	2020	2092	629	357	0	0	258
	2030	-	1753	1191	233	204	216
	2040	-	2278	1880	2	109	12
	2050	-	2567	2397	0	161	14

Autonomie énergétique et alimentaire face aux tensions d'usage des sols : application à La Réunion

BIOELEC	2008	1711	580	-	-		
	2020	2092	629	357	0	0	258
	2030	-	1753	886	351	266	340
	2040	-	2403	672	448	355	403
	2050	-	2651	1143	461	418	466
PLAN	2008	1711	580	-	-		
	2020	2092	629	370	0	0	258
	2030	-	1753	887	348	278	330
	2040	-	2278	928	357	310	408
	2050	-	2567	1371	406	368	427

Tableau 8. Production d'électricité à partir de chaque source énergétique et la demande d'électricité pour les différents scénarios

Scénario	Année	Production d'électricité par source (GWh)													
		BAT	Charbon	HFO	TAC	Bioeth	Biogaz	Biomasse	Gazeif	Géo	Hydro	OCE	PV	Éolien	Demande électrique
BAU	2008	-	1343	240	128	-	-	255	-	-	542	-	8	30	2317
	2020	18	1102	878	112	270	17	241	-	-	358	-	264	6	2790
	2030	18	819	1279	-	561	11	349	0	74	583	-	165	117	3602
	2040	-	1936	1171	-	493	11	313	1	74	594	53	350	161	4692
	2050	-	3351	1637	-	27	10	262	2	74	641	53	488	197	6135
ALIM	2008	-	1343	240	128	-	-	255	-	-	542	-	8	30	2317
	2020	18	1102	791	112	357	17	241	-	-	358	-	264	6	2790
	2030	18	-	-	-	1424	29	335	56	37	741	35	500	440	3302
	2040	-	-	-	-	1882	4	3	114	112	752	53	875	487	4078
	2050	-	-	-	-	2397	4	10	162	112	799	53	1155	449	5145
BIOELEC	2008	-	1343	240	128	-	-	255	-	-	542	-	8	30	2317
	2020	18	1102	791	112	357	17	241	-	-	358	-	264	6	2790
	2030	18	-	-	-	1237	104	421	81	37	741	35	500	440	3302
	2040	-	-	-	-	1120	160	480	118	112	752	53	1000	487	4078
	2050	-	-	-	-	1605	208	485	190	112	799	53	1239	449	5145
PLAN	2008	-	1343	240	128	-	-	255	-	-	542	-	8	30	2317
	2020	18	1102	778	112	370	17	241	-	-	358	-	264	6	2790
	2030	18	-	-	-	1236	87	414	108	37	741	35	500	440	3302
	2040	-	-	-	-	1285	110	447	161	112	752	53	875	487	4078
	2050	-	-	-	-	1777	133	447	215	112	799	53	1155	449	5145

Tableau 9. Prix d'importation des ressources primaires énergétiques

Source : [Ministère de la transition écologique, 2022]

Prix d'importation (k€/TJ)			
Année	2008	2015	2020
Charbon	3,16	2,76	3,04
FOD	13,04	11,63	13,42
HFO	4,89	8,75	9,82
Bioéthanol	19,05	19,05	18,31
Biodiesel de colza	28,017	28,017	28,017

Tableau 10. Prix d'importation du bois

Source : [Ministère de la transition écologique, 2022]

Prix d'importation (k€/t)			
Année	2008	2015	2020
Bois	0,4	0,15	0,15

Tableau 11. Relation entre la biomasse importée et locale selon les différents scénarios

Scénario	Année	Biomasse		Ratio imp/loc (%)
		Importée (t)	Locale (t)	
ALIM	2030	37881	433719	9 %
	2040	64512	11036	585 %
	2050	103637	7378	1405 %
BIOELEC	2030	25997	560277	5 %
	2040	40320	591785	7 %
	2050	72576	619019	12 %
PLAN	2030	34663	521606	7 %
	2040	48384	522270	9 %
	2050	64512	520974	12 %

BIOGRAPHIES

NIKOLAOS PAPASTEFANAKIS est un ingénieur de recherche et il suit actuellement un programme de troisième cycle en optimisation des systèmes énergétiques au Centre de Mathématiques Appliquées (CMA) de MINES Paris – PSL à Sophia Antipolis, en France. Il a un diplôme en génie mécanique et aéronautique de l'Université de Patras, Grèce. Actuellement, il travaille sur la modélisation prospective des systèmes énergétiques insulaires, notamment l'île de La Réunion, la République de Maurice, et aussi une île grecque (Eubée) dans le cadre du projet européen *Geographical Islands Flexibility* (GIFT).

Dr. **VALENTIN RUSSEIL** est ingénieur agronome et actuellement chercheur postdoctorant à l'INRAE (UMR Innovation) où il évalue les dynamiques d'écologisation et d'autonomisation de plusieurs systèmes alimentaires insulaires européens. Ses recherches de thèse en modélisation spatiale et anticipation participative ont porté plus particulièrement sur les compromis

d'usages des sols et des biomasses à l'échelle de l'île de La Réunion, dans une perspective d'autonomisation alimentaire-électrique.

Dr. **SANDRINE SELOSSE** est chercheuse au CMA de Mines Paris – PSL dans les domaines de la modélisation long terme des systèmes énergétiques et l'évaluation des politiques énergie-climat, notamment avec le modèle mondial TIAM-FR (*TIMES Integrated Assessment Model*). Ses recherches concernent les solutions pour atteindre la neutralité carbone, le CCUS, les CDR (*Carbon Dioxide Removal*), l'hydrogène, les bioénergies, incluant les questions liées à l'eau et les conflits d'usages des sols (alimentation). Elle joue aussi un rôle central dans la gestion de la Chaire Modélisation prospective pour le développement durable depuis 2008.