COMMISSION DE
L'OCÉAN INDIEN



Etude du potentiel des biocarburants dans les Etats membres de la Commission de l'océan Indien

ENERGIES
Programme pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique
Renewable Energy and Energy Efficiency Programme

cirad

Financé par
l'Union européenne

COMMISSION DE
L'OCÉAN INDIEN

Cette publication a été produite par la Commission de l'océan Indien à travers le programme ENERGIES financé par l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité des auteurs et ne reflète pas nécessairement les opinions de la COI.



Cette publication a été produite avec le soutien financier de l'Union européenne. Son contenu relève de la seule responsabilité des auteurs et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'Union européenne.

Avant-propos

Remerciements :

Le cabinet AIDES et le CIRAD tiennent à remercier les Points Focaux Nationaux du programme ENERGIES.

Cette publication a été produite avec l'assistance de l'Union européenne. Le contenu de cette publication tient à la seule responsabilité des auteurs et ne reflète en aucun cas les opinions de l'Union européenne.

Les pays membres de la COI ont des économies et des secteurs d'énergie hétérogènes. 81% de l'énergie commercialisée est importée et provient des combustibles fossiles (pétrole et charbon) dont ils sont donc très dépendants. Les Comores et Madagascar importent 90 % de leur énergie commercialisée, à Maurice c'est 56 % de l'approvisionnement énergétique qui provient de produits pétroliers et 95% aux Seychelles. Cela a de graves répercussions sur le coût de l'énergie (en particulier l'électricité), la balance de paiements, la situation financière des compagnies d'électricité et les budgets de l'État.

Les pays de l'Océan Indien (Comores, Madagascar, Maurice, Seychelles) disposent d'un fort potentiel dans la plupart des filières renouvelables, que ce soit l'éolien, le solaire ou l'hydraulique, la géothermie, la biomasse ou les énergies marines. Ces ressources renouvelables sont pour l'instant largement sous-exploitées dans la zone.
L'indépendance énergétique est un défi commun aux économies insulaires qui s'appuient encore principalement sur d'onéreux moyens de production fossile.
Si Maurice et les Seychelles ont engagé de véritables dynamiques dans le domaine des énergies renouvelables, grâce à la mise en place d'incitations à l'investissement et à la présence d'un climat des affaires favorable, les développements semblent plus lents à Madagascar et surtout aux Comores. Les secteurs électriques de ces deux derniers pays font face à des enjeux de financement, de gestion et de gouvernance qui entravent le développement des énergies renouvelables malgré un fort potentiel notamment en ce qui concerne l'électrification rurale.
Des progrès sont à attendre dans toute la zone, à divers degrés selon les pays, en matière de développement d'un cadre règlementaire adapté et de mise en œuvre d'innovations technologiques.

Sommaire

Avant-propos **2**

Executive summary **7**

Résumé **11**

I. Introduction **15**

II. Synthèse des recommandations **17**

III. État des lieux du développement des biocarburants dans les 5 États. **20**

A. Union des Comores **20**

1. Brève présentation du pays 20
2. Examen du profil énergétique du pays 24
3. Recensement du cadre réglementaire concernant les biocarburants 27

B. Madagascar **28**

1. Brève présentation du pays 28
2. Examen du profil énergétique du pays 33
3. Recensement du cadre réglementaire et institutionnel 38
4. Les projets et programmes actuels dans la filière biocarburant 50

C. Ile Maurice **53**

1. Brève présentation du pays 53
2. Examen du profil énergétique de Maurice 56
3. Recensement du cadre réglementaire concernant les biocarburants 59
4. Recensement des expériences biocarburants et des acteurs majeurs de ces filières 63

D. La Réunion **66**

1. Brève présentation du pays 66
2. Examen du profil énergétique de la Réunion 72
3. Recensement du cadre réglementaire concernant les biocarburants 76
4. Recensement des expériences biocarburants et des acteurs majeurs de ces filières 81

E. Seychelles **82**

1. Bref présentation des Seychelles 82
2. Examen du profil énergétique des Seychelles 84
3. Stratégie de développement durable 89
4. Recensement des expériences biocarburants et des acteurs majeurs de ces filières, ... 91

F. Conclusion de l'état des lieux des biocarburants dans la COI. 92

IV. Les filières de biocarburants 94

A. Les biocarburants conventionnels ou dits de 1ère génération ou 1G. 94

B. Les biocarburants de seconde génération ou 2G 96

1. La voie biochimique : éthanol cellulosique 97

Description technique succincte 97

Contraintes techniques et enjeux de la filière 98

Revue des principaux procédés et acteurs 99

2. La voie thermochimique : la filière BtL (Biomass to Liquid) 102

Description technique succincte de la filière BtL 103

Contraintes techniques et enjeux de la filière 104

Revue des principaux procédés et acteurs 105

C. Les algocarburants ou biocarburants de troisième génération 3G. 108

1. Description technique succincte de la filière microalgues à des fins de biodiesel 108

2. Contraintes techniques de la filière 111

3. Revue des principaux acteurs 112

V. Analyse synthétique des filières de carburants avancés 2G et 3G vs carburants de 1ère génération 1G 113

A. Impact des changements d'affectation des sols (CAS) 113

B. Enjeux technico-économiques et environnementaux 114

VI. Analyse de scénarios de production de biocarburants pour la COI 119

A. Définition des scenarios 119

B. Union des Comores : 120

Les cocotiers restants donneraient la possibilité de substituer l'équivalent de la totalisé des carburants routiers ou encore 12 % de l'ensemble des produits pétroliers importés aux Comores. 121

C. Madagascar : 121

Il faudrait l'équivalent de la surface actuelle de canne à sucre pour substituer la totalité de l'essence importée 124

D. Maurice : 125

Mélasses : un potentiel de 30 ML d'éthanol qui représentent 8 % du volume d'essence importé 128

E. La Réunion 128

Mélasses : un potentiel de 5,8 ML d'éthanol qui représentent 4,6 % du volume d'essence importé 131
F. Seychelles : 132
Les cocotiers actuels apporteraient une production de biodiésel de coco autour de 90 tep, soit 0.7 % de la consommation finale de gasoil routier en 2015. 133
VII. Conclusions et recommandations finales 133
A. Conclusions de l'analyse de scénarios de production de biocarburants et intérêt pour les pays de la COI 134
B. Recommandations finales. 135
1. Comores. 136
2. Madagascar. 138
3. Maurice. 139
4. La Réunion. 140
5. Seychelles. 141
VIII. Tableaux 145
IX. Figures 145
X. Sources 148
Sources non inclues dans le texte 149
XI. ANNEXES 150
A. État de l'art sur les biocarburants de première génération. 150
B. Description technique détaillée de la filière éthanol cellulosique 166
C. Description technique détaillée de la filière BtL 170

Sigles et abréviations :

ENR : énergies nouvelles et renouvelables

RE : renewable energy

BAD : Banque Africaine de Développement

PNUD/UNDP : Programme des Nations Unies pour le Développement

CIRAD : Centre International en Recherche Agronomique pour le Développement

COI : Commission de l'Océan Indien. La COI est une organisation régionale comprenant l'Union des Comores, Madagascar, Les Seychelles, Maurice et la Réunion (France).

IEA : International Energy Agency

EMVH : Esters Méthyliques d'Huiles Végétales (ils font partie des biodiesels)

EPA : acide eicosapentaénoïque (acide gras polyinsaturé Oméga3)

DHA : acide docosahexaénoïque (acide gras polyinsaturé Oméga3)

CAS : changements d'affectation des sols

GES : Gaz à Effet de Serre

Union des Comores :

National water and electricity company (MAMWE).

PASEC : Projet d'Appui au Secteur Energie aux Comores

PARSEC : Programme d'appui aux réformes dans le secteur de l'énergie

INSEED L'Institut Nationale de la Statistique et des Études Economiques et Démographiques

SCH : société comorienne des hydrocarbures

Madagascar

INSTAT : Institut national de la Statistique

WWF : World Wide Fund for Nature

PNEC : Programme national sur l'éthanol combustible

Maurice

CEB : Central Electricity Board

MEPU : Ministère de l'énergie et des utilités publiques

La Réunion

DROM : Département et Région d'outre-mer

Seychelles

SEC : Seychelles Energy Commission

SIDS : An energy policy for a Small Island Developing State,

1 tep = 11,63 MWh

1 ktep = 11,63 GWh

Executive summary

The aim of the study is to clarify the potential of biofuels in IOC member States. The biofuels considered are liquid fuels derived from biomass, which are intended to replace fossil products in the transport and heat production, driving force and electricity sectors.

Energy independence is a common challenge for island economies, which are still relying mainly on fossil-based means of production, making them highly dependent on expensive imports.

All Indian Ocean countries have a strong potential in most renewable energies (RE) sectors, be it wind, solar or hydraulic, but also geothermal, biomass and marine energies. Progress is expected throughout the region, to varying degrees depending on the country, on the development of a suitable regulatory framework and the implementation of technological innovations.

During the surveys, it has not been identified a use or a 2nd or 3rd generation biofuel production in the IOC countries. This explains why most of the recommendation proposals are based on 1st generation biofuels, that is to say from conventional agro-industrial crops.

Analysis of production scenarios has opened up prospects for the development of biofuels in IOC states and has led to proposals for recommendations while recalling the economic and environmental issues related to the production of Biofuels.

Comoros

It is worth noting a strong political will in favor of renewable energies in a favorable economic and legal environment. But the way of biofuels is still absent from energy planning in the short and probably medium term.

First generation biofuels may need to be considered again. There would remain 1.8 million coconut trees today with a theoretical potential of almost 12 000 m3, giving the possibility of substituting the equivalent of the totality of the road fuels or 12% of all the petroleum products imported into the Comoros.

Madagascar

The new energy Policy (2015-2030) promotes energy efficiency with a view to reducing energy losses in the transport, distribution and consumption of electricity. It is worth noting the reflections and investment projects, since 2006, for the development of the sector, which led to the elaboration of a bill on bioenergy including biofuels.

Road transport consumes almost 50% of the fuels imported into Madagascar. The "Grande Ile" is able to produce bioethanol and biodiesel. The second generation certainly has an interest to be studied in detail. The third generation is undoubtedly to examine, indeed there are already examples of Spirulina productions as in Toliara.

For example, the equivalent of the current sugar cane surface (95 000 ha) could substitute all imported petrol.

Mauritius

The Long-Term Energy Strategy (LTES), prepared in 2009, defines the energy policy guidelines and priorities for the period 2009-2025. With regard to transport, the following guidelines are included in the LTES:

- Diversification of fuel supplies with the manufacture or importation of biodiesel;

- The introduction of ethanol-gasoline mixtures at the pump using E10 and passing to the E20 at a later stage.

Despite these guidelines, no biofuels are produced locally in Mauritius to date, nor even imported and distributed in petrol stations. But a roadmap has been established and is subject to regular review.

The “Transport” sector Road transport consumes 36.7% of the imported fossil fuels in Mauritius (2016) (transport in general: 53.2%) with an increasing share of petrol which now exceeds diesel. We are led to think about the bioethanol pathway and wonder: "Why not a" brazilianisation "of light vehicles (import of flex-fuel vehicles)?"

Mauritius is on track with the Long term Energy Strategy, which in a first step provides for an incorporation rate of 5% ethanol from 11 000 tons of molasses.

The electric car and the hybrid also seem to be the short-term targets. Mauritius is well adapted given the general topography.

La Reunion

Currently, the fraction of renewable energy in the transport sector is very small, with all fuels imported and of fossil origin.

The multi-annual energy programming (PPE 2016-2023) is the operational component of the energy sector of the regional climate Air Energy Scheme of La Reunion (SRCAE). As far as transport is concerned, the PPE guidelines do not concern the development of biofuels, but rather the development of clean, electric or hybrid vehicles.

Like Mauritius, one could be led to think of the "Brazilian" bioethanol pathway for light vehicles.

In La Reunion, road transport today consumes more than 64% of the imported fuels, with a larger share of diesel. The molasses currently exported represent a potential of 5.8 ML of ethanol which represents 4.6% of the volume of imported gasoline. But, the orientation is rather in favor of the electric car and the hybrid that seem to be the targets in the short term.

Seychelles

Historically, oil has been the most cost-effective way to produce electricity in the Seychelles, to provide energy for transportation and the majority of other energy services. However, the surge in oil prices in 2008 has shown that oil dependence is risky and can impact the economy. This prompted the government in 2009-2010 to develop a new energy policy for the period 2010-2030, (an energy policy for a Small Island developing State, SIDS).

The Government of Seychelles in the bioenergy sector favors the valorization of urban and livestock waste (anaerobic digestion). There is currently no strategy for the development of liquid biofuel for the production of electricity (stationary engine) or transport, but future reflections on renewable energies should integrate biofuels.

High-dependency Situation. Mahé seems suitable for electric vehicles (e-mobility) because of the short distances to be travelled. But this increases the dependence on oil if the production of electricity remains of fossil origin.

Is there a social and economic interest in developing an agricultural production sector destined for biofuel (coconut,...)?

Could the Seychelles buy biofuels produced in the IOC if this sector were to develop?

In conclusion, apart from Madagascar, none of the countries surveyed has so far developed or intends to develop biofuel streams in the field of transport (road or sea) or generation of electricity.

Indeed, it appeared that access to electricity remained a key challenge in the IOC countries. Its generation is mainly based on imported fossil fuels, therefore the broad guidelines in the field of renewable energies focus on the development of energy mix to replace the electric energy of fossil origin. As a result, Regional donor agencies strategies are geared towards the promotion of renewable energies among which biofuels are absent.

However, with transport mobilizing respectively 50%, 64% and 53% of imported fossil fuels in Madagascar, Reunion and Mauritius and, to a lesser extent, 14% and 18% in the Comoros and Seychelles, it appears that this sector contributes very significantly to the energy dependency of the five IOC States.

The gradual “electrification” of fleets of vehicles seems to have a medium or long-term interest depending on the country. In the shorter term, the advantages of a mix integrating biofuels should be examined at the level of each State as well as at the Regional level.

In the short term, the recommendations concern studies and actions devoted to the exploitation of current possibilities for the use of already available sources of biofuels.

In the medium and long term, there are two proposals for the creation of regional-level organizations to devote particular attention to energy policy and planning, renewable energies, energy efficiency and Petroleum products. This is certainly in line with the reflections already committed at IOC level, but it is important to underline the need for a roadmap already underway.

Résumé

L'étude a pour objectif de préciser le **potentiel des biocarburants dans les État membres de la COI.** Les biocarburants considérés sont des combustibles liquides issus de la biomasse, ayant vocation à se substituer aux produits fossiles dans les secteurs des transports et de la production de chaleur, de force motrice et d'électricité.

L'indépendance énergétique est un défi commun aux économies insulaires qui s'appuient encore principalement sur des moyens de production fossile les rendant fortement dépendantes d'importations onéreuses.

Tous les pays de l'Océan Indien disposent d'un fort potentiel dans la plupart des filières renouvelables, que ce soit l'éolien, le solaire ou l'hydraulique, mais également la géothermie, la biomasse et les énergies marines.

Des volontés politiques en faveur des ENR sont affirmées dans le cinq états. Des progrès sont attendus dans toute la zone, à divers degrés selon les pays, concernant le développement d'un cadre règlementaire adapté aux ENR et la mise en œuvre d'innovations technologiques.

Au cours des enquêtes, il n'a pas été identifié d'usage, ni de production de biocarburant de 2nde ou 3ème génération dans les pays de la COI. Ceci explique que l'essentiel des propositions de recommandation s'appuient sur les biocarburants de 1ère génération, c'est-à-dire issus des cultures agro-industrielles conventionnelles.

L'analyse de scénarios de production a ouvert des perspectives de développement des biocarburants dans les État de la COI et a amené à proposer des pistes de recommandation tout en rappelant les enjeux économiques et environnementaux liés à la production de biocarburants.

Union des Comores :

Il est à remarquer une volonté politique affirmée en faveur des énergies renouvelables dans un environnement économique et juridique devenant favorable. Mais la voie des biocarburants est encore absente des planifications énergétiques à court et sans doute moyen terme.

Les carburants de première génération sont peut-être à explorer à nouveau. Il resterait 1,8 millions de cocotiers aujourd'hui portant un potentiel théorique de près de 12 000 m^3, soit la possibilité de substituer l'équivalent de la totalité des carburants routiers ou encore 12 % de l'ensemble des produits pétroliers importés aux Comores.

Madagascar :

La Nouvelle Politique de l'Energie (2015-2030) promeut l'efficacité énergétique en vue d'une réduction des pertes énergétiques dans le transport, la distribution et la consommation de l'électricité. Il est à noter les réflexions et les projets d'investissement, depuis 2006, pour le développement de la filière, qui ont abouti à l'élaboration d'un projet de loi sur la bioénergie incluant les biocarburants.

Le transport routier consomme près de 50% des carburants importés à Madagascar. La « Grande Île » est en mesure de produire du bioéthanol et du biodiesel. Les carburants de seconde génération possèdent un intérêt évident qu'il convient d'étudier de façon détaillée. Les carburants de troisième génération doivent être pris en compte, en effet il existe déjà des exemples de production de spiruline, comme à Toliara.

A titre d'exemple du potentiel malgache : l'équivalent de la surface actuelle de canne à sucre (95 000 ha) serait suffisant pour substituer la totalité de l'essence importée.

Maurice :

Le Long-Term Energy Strategy (LTES), préparé en 2009, définit, pour la période 2009-2025, les orientations et priorités de la politique énergétique. Concernant le transport, les orientations suivantes figurent dans la LTES :

- la diversification des approvisionnements en carburant avec la fabrication ou l'importation de biodiesel;
- l'introduction des mélanges d'éthanol-essence à la pompe en utilisant l'E10 et en passant à l'E20 à un stade ultérieur

Malgré ces orientations, aucun biocarburant n'est produit localement à Maurice à ce jour, ni même importé. Mais une feuille de route a été établie et fait l'objet de révisions régulières.

Le transport routier a consommé 36.7 % des carburants importés à Maurice en 2016 (53 % pour l'ensemble du secteur des transports) avec une part croissante d'essence qui dépasse désormais le diesel. On est amené à penser à la voie bioéthanol et on se demande : « pourquoi pas une 'brésilianisation' des véhicules légers » ?

Maurice a emprunté cette voie avec The Long Term Energy Strategy qui prévoit dans une première étape un taux d'incorporation de 5% d'éthanol issu de 11 000 tonnes de mélasse. . Le cadre réglementaire relatif à cette filière est en cours de structuration.

A plus long terme, et en fonction de l'évolution du secteur sucrier, il est possible d'imaginer une diversification plus importante encore du marché de la canne et qu'ainsi les capacités de production de bioéthanol soient augmentées.

La voiture électrique et l'hybride semblent également être les cibles à court terme. Maurice s'y prête bien compte tenu de la topographie générale.

La Réunion

Actuellement, la fraction d'énergie renouvelable dans le secteur du transport est infime, l'intégralité des carburants étant importée et d'origine fossile.

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2016-2023) constitue le volet opérationnel « Énergie » du schéma régional « climat, air, énergie » de La Réunion (SRCAE). En ce qui concerne le transport, les orientations de la PPE ne concernent pas le développement de filières biocarburants mais plutôt le développement de véhicules propres, électriques ou hybrides.

A la Réunion, le transport routier consomme aujourd'hui plus de 64% des carburants importés, avec une part prépondérante de diesel.

L'orientation est plutôt en faveur de la voiture électrique et de l'hybride qui semblent être les cibles à court terme.

Tout comme à Maurice, on pourrait envisager la voie bioéthanol « à la brésilienne » pour les véhicules légers à partir de mélasse. Une étude de faisabilité a été faite dans ce sens en 2016. Les mélasses actuellement exportées représentent un potentiel de 5,8 ML d'éthanol

qui représentent 4,6 % du volume d'essence importé**.** Toutefois à ce jour, l'éthanol issu de mélasse est envisagé comme combustible pour la production d'électricité en pointe.

Seychelles :

Historiquement, le pétrole a été le moyen le plus rentable de produire de l'électricité aux Seychelles, de fournir de l'énergie pour le transport et la majorité des autres services énergétiques. Cependant, la flambée des prix du pétrole en 2008 a prouvé que la dépendance au pétrole est risquée et peut freiner le développement de l'économie. Cela a incité le gouvernement, en 2009-2010, à élaborer une nouvelle politique énergétique pour la période 2010-2030 (an Energy Policy for a Small Island Developing State, SIDS).

Le gouvernement seychellois, dans le secteur des bioénergies, privilégie la valorisation de déchets urbains et d'élevage (méthanisation) ; il n'existe pas à ce jour de stratégie de développement de biocarburant liquide pour la production d'électricité (moteur stationnaire) ou le transport, mais les futures réflexions sur les énergies renouvelables devraient intégrer les biocarburants.

Situation de forte dépendance. Mahé semble adaptée aux véhicules électriques du fait des courtes distances à parcourir. Mais cela accroît la dépendance au pétrole, si la production d'électricité demeure d'origine fossile.

Deux types de questions peuvent se poser :

- Y a-t-il un intérêt social et économique à développer un secteur de production agricole à destination de biocarburants (cocotier,…) ?
- Les Seychelles pourraient-elles acheter des biocarburants produits dans la COI si cette filière se développait ?

En conclusion, hormis Madagascar, aucun des pays enquêtés n'a jusqu'à aujourd'hui développé de filières de biocarburants dans le domaine des transports (routiers ou maritimes) ou de la génération d'électricité. En effet, il est apparu que l'accès à l'électricité demeurait l'enjeu fort dans les pays de la COI. Sa génération reposant essentiellement sur des carburants fossiles importés, les grandes orientations dans le domaine des énergies

renouvelables se concentrent sur le développement de « mix énergétiques » devant se substituer à l'énergie électrique d'origine fossile. En conséquence, les stratégies bailleurs à dimension régionale sont orientées vers la promotion d'énergies renouvelables génératrices d'électricité, parmi lesquelles les biocarburants sont absents.

Cependant, avec des transports mobilisant respectivement 50 %, 64 % et 53 % des carburants importés à Madagascar, La Réunion et Maurice et, dans une apparente moindre mesure, 14 % et 18 % aux Comores et aux Seychelles, il apparaît que les transports contribuent très significativement à la dépendance énergétique des 5 États de la COI. L'électrisation progressive des parcs de véhicules semble porteuse d'intérêt à moyen ou long terme selon les pays. A plus court terme, les avantages d'un mix intégrant des biocarburants sont à examiner au niveau de chaque État ainsi qu'au niveau régional.

A court terme, les recommandations concernent des études et actions consacrées à l'exploitation des possibilités actuelles d'usage de gisements de biocarburants déjà disponibles.

A moyen et long terme, Il est également présenté deux propositions de création d'organisations au niveau régional chargées de se consacrer notamment sur la politique et la planification énergétique, les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les produits pétroliers. Ceci rejoint certainement des réflexions déjà engagées au niveau de la COI mais il apparaît important de souligner la nécessité d'engager d'ores et déjà une feuille de route.

I. Introduction

- Le programme Energies de la COI a commandé cette étude en tant qu'assistance technique dans le cadre des activités du Résultat 3[1] du « Programme de développement des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les États membres de la COI ». Ce programme est doté d'un financement de l'Union européenne dans le cadre du 10ième FED.

[1] **Résultat 3** : La réglementation et l'environnement des affaires pour la production d'électricité à base de ressources renouvelables sont améliorés et les bases de données sur les ressources solaire et éolienne sont davantage développées.

Il se concentre sur l'Union des Comores, Madagascar, l'île Maurice et les Seychelles. La Réunion est intégrée au programme à travers un financement séparé du Fonds européen de développement régional (FEDER).

- L'étude a pour objectif de préciser le **potentiel des biocarburants dans les États membres de la COI.** Après une synthèse des recommandations finales, l'étude se compose de trois parties **:** un état des lieux du développement de biocarburants dans les 5 États, un panorama des filières de biocarburants conventionnels ainsi que de nouvelles générations et des recommandations d'actions à court, moyen et long terme après analyse de scénarios de production de biocarburants pour la COI.
- Les biocarburants considérés sont des combustibles liquides issus de la biomasse, ayant vocation à se substituer aux produits fossiles dans les secteurs des transports et de la production de chaleur, de force motrice et d'électricité. *La bioélectricité à partir de biomasse ligneuse fait l'objet d'une étude à part entière menée en parallèle à celle-ci*[2]*.*
- La première partie se compose de fiches par pays. Celles-ci reprennent les données générales d'intérêt pour la filière biocarburant, décrivent le profil énergétique national et recensent les potentiels activités/projets biocarburant qui ont été menées. Ceci afin d'évaluer la contribution des biocarburants identifiés, ici de 1ère génération, le cas échéant, vis-à-vis des consommations de produits fossiles.
- la seconde partie du rapport expose un panorama des filières de biocarburants de seconde et troisième génération et présente un état de l'art technique et d'avancement technologique de ces dernières. Il aborde également l'intérêt de leur développement dans les cinq États de la COI.
- La troisième partie expose les recommandations en matière de filières à développer compte tenu du contexte spécifique des cinq États. L'intérêt pour les États peut s'illustrer en examinant les secteurs de consommation de carburants importés pour les transports, par exemple, et en simulant leur taux de substitution par des biocarburants nationaux, et pourquoi pas régionaux.

[2] Étude du potentiel de valorisation énergétique (bioélectricité) de la biomasse ligneuse par conversion thermique dans les États membres de la Commission de l'Océan Indien. Ref. : COI/ENERGIE/SERV/2018/035. 2018, 112 p.

II. Synthèse des recommandations

L'étude est invitée à fournir des recommandations en matière de filières à développer compte tenu du contexte spécifique des îles, recommandations qui pourraient conduire au développement d'opérations de démonstration.

Concernant des biocarburants liquides ayant vocation à se substituer aux produits fossiles dans les secteurs des transports et de la production de chaleur, de force motrice et d'électricité, il semble possible de proposer des formulations d'actions, certaines concrètes et d'autres à consolider ; certaines dédiées à chaque pays et d'autres orientées vers une application régionale.

A court terme, les recommandations concernent des études et actions consacrées à l'exploitation des possibilités actuelles d'usage de gisements de biocarburants déjà disponibles. Au niveau de la Région COI, il peut être recommandé, si cela n'est pas déjà dans les actions programmées, la création d'une Mission d'étude dans les États insulaires du Pacifique auprès des Organisations régionales, portant sur leur cadre d'action en faveur de la sécurité énergétique. Ceci est à évaluer en terme de renforcement des missions de la COI et des activités du programme énergies.

A moyen et long terme, il est également présenté deux propositions de création d'organisations au niveau régional chargées de se consacrer notamment sur la politique et la planification énergétique, les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les produits pétroliers. Ceci rejoint certainement des réflexions déjà engagées au niveau de la COI, mais il apparaît important de souligner la nécessité d'engager d'ores et déjà une feuille de route. Car l'accès aux produits pétroliers sur des bases stables, tant au niveau prix que disponibilité, rencontrera des difficultés dans moins d'une décennie.

Le tableau suivant synthétise les intitulés des propositions développées à court et à moyen/long terme pour chaque pays mais également au niveau de la Région COI.

	Court terme	Moyen et long terme
Union des Comores	(a) « Renforcement des capacités de collecte et d'alimentation des bases de données nationales dans le secteur énergétique ». (b) « Étude de faisabilité de la production d'huile et de biodiesel de coprah carburant aux Comores». (c) «Étude du potentiel de plantes non alimentaires (jatropha curcas et autres oléagineux,…) utilisables comme carburant pour les services énergétiques ruraux ». (d) « Étude économique de l'impact de la position d'acheteur de biocarburants produit dans la COI ».	(a) « Étude prospective du développement de la filière coprah destiné à produire de l'énergie renouvelable ». (b) « Appui à l'établissement des règlements et des lois en faveur du développement de solutions renouvelables nationales ». (c) « Adhésion de l'Union des Comores au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI).
Madagascar	(d) « Étude de faisabilité de production de bioéthanol carburant issu de canne à sucre ». (e) « Appui à la finalisation de la législation incluant les biocarburants pour les transports routiers et l'électrification rurale hors grands réseaux ». (f) « Étude de l'identification des voies de production d'oléagineux à destination Biodiesel ». (g) « plan de communication sur les opportunités d'investissement dans le secteur de biocarburant afin de promouvoir les investissements »	(h) « Adhésion de Madagascar au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (i) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports nationaux dans les pays membres de la COI ».
Maurice	(j) « Mise en œuvre de la Long-Term Energy Strategy (LTES) pour l'incorporation d'éthanol dans les essences des véhicules légers ». (k) « Mise en œuvre de la Long-Term Energy Strategy (LTES) pour la fabrication ou l'importation de biodiesel ». La LTES est en cours de révision.	(l) « Adhésion de Maurice au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (m) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports nationaux dans les pays membres de la COI ».

Suite :	**Court terme**	**Moyen et long terme**
La Réunion	(n) « Étude socio-économique de l'incorporation de 5 %, avec un horizon à 10 ans de 20 %, d'éthanol dans les essences des véhicules légers ». (o) « Reprise du projet d'incorporation d'éthanol dans le secteur des transports collectifs de l'île ».	(p) « Adhésion de la Réunion au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (q) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports nationaux dans les pays membres de la COI ».
Seychelles	(r) « Étude de faisabilité de la production d'huile et de biodiesel de coprah et d'huile de friture usagée carburant aux Seychelles». (s) « Étude économique de l'impact de la position d'acheteur de biocarburants produit dans la COI ».	(t) « Adhésion des Seychelles au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (u) « Appui à l'établissement des règlements et des lois en faveur du développement de solutions renouvelables nationales ».
Région OI	(v) « Mission d'étude dans les États insulaires du Pacifique auprès des Organisations Régionales sur leur cadre d'action en faveur de la sécurité énergétique. Renforcement des missions de la COI et des activités du programme énergies. »	(w) « Adhésion au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI). (x) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports nationaux dans les pays membres de la COI.

III. État des lieux du développement des biocarburants dans les 5 États.

A. Union des Comores

1. *Brève présentation du pays*

L'Union des Comores fait partie du club des *Petits États insulaires en développement* (PIED) et des *Pays les moins avancés* (PMA).

- **Géographie**

L'Archipel des Comores est constitué de quatre îles d'origine volcanique situées à l'entrée Nord du Canal de Mozambique entre Madagascar et la côte orientale de l'Afrique. Ce rapport ne concerne que les trois îles qui sont sous la souveraineté effective de l'Union des Comores, c'est-à-dire Grande Comore, Mohéli, et Anjouan. A égale distance entre Madagascar et la côte est africaine, les 3 îles couvrent une superficie totale de 1861 km². La capitale est Moroni (Grande Comore).

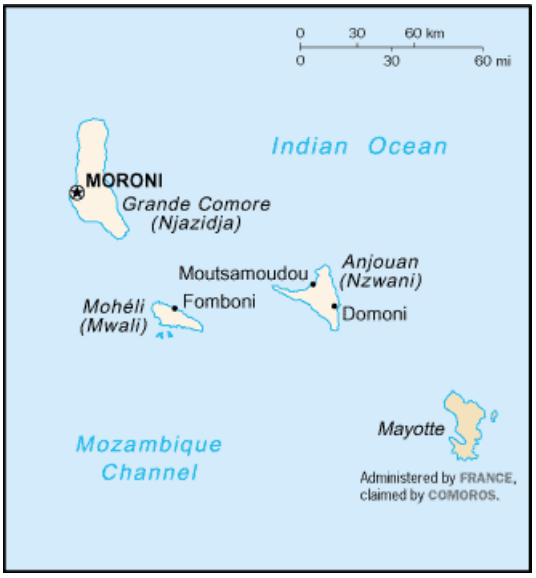


Figure 1 : Carte de l'Union des Comores

- **Climat**

Le Climat des Comores est de type tropical humide sous influence océanique, marqué par une saison chaude et pluvieuse (décembre à mai) et une saison sèche et fraîche (juin à

novembre). Les températures moyennes se situent entre 23 et 35°C, tandis que la pluviométrie moyenne peut atteindre 2500 mm dans certains endroits du pays. Ce sont donc des conditions climatiques très clémentes et surtout très favorables aux activités agricoles et touristiques. La végétation est dense, généralement verdoyante et très diversifiée. Elle est variable en fonction de la nature du sol et des microclimats assez nombreux dans les îles. Et elle est favorisée par une pluviométrie abondante et des sols d'origine volcanique généralement riches[3].

- **Démographie**

Les îles de l'Archipel des Comores ont été peuplées par des vagues successives de migrations en provenance du Golfe Persique et d'Afrique de l'Est, et se sont enrichies plus récemment d'échanges avec la population malgache. Malgré ses origines diverses, la population se caractérise par une grande homogénéité et une unité religieuse (musulmane), linguistique et culturelle.

La population comorienne était estimée à 670.000 habitants environ en 2009. Elle aurait dépassé les 800 000 habitants en 2017. Le taux de croissance démographique annuel serait de 2,1 % d'après les données du dernier recensement de 2003. L'île de **Ngazidja** (Grande Comore) concentre 52 % de la population. Le taux de croissance de la population urbaine (6,5 %) est élevé et le taux d'urbanisation serait de 40 % de la population en 2015.

Selon une hypothèse moyenne de projection de la population, les trois îles de l'Union des Comores seront peuplées à l'horizon 2050 de 1,5 millions d'habitants.

[3]il est à noter que les Comores pourraient connaître à l'avenir des périodes de sécheresse assez sévères qui affecteraient en premier lieu l'agriculture, les écosystèmes naturels et les ressources en eau.

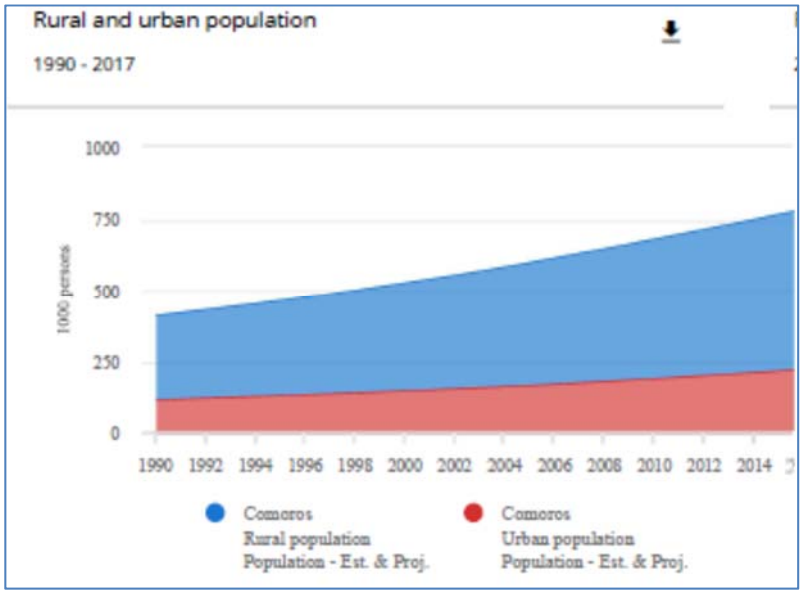


Figure 2 : Evolution de la population des Comores de 1990 à 2015

- **Economie en bref**

Monnaie : franc comorien

Croissance économique : 3 % du PIB (2017)

PIB par habitant : 1369 US$/hab. en 2015 (759 US$ selon la Banque Mondiale)

Dette publique : 46,13 % du PIB

1 Euro = 492 KMF

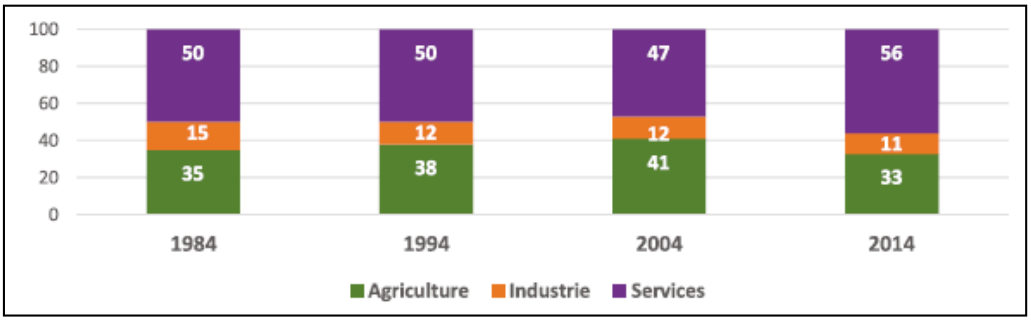


*Figure 3 : **Structure du PIB en pourcentage (source : Commission Économique pour l'Afrique. Profil 2017 : les Comores. Bureau sous-régional pour l'Afrique de l'Est).***

L'Union des Comores bénéficie depuis 2016 d'un environnement politique et économique favorable à la croissance. Celle-ci est estimée en 2017 à 3 % du PIB, après avoir été de 2,2 %

en 2016. Néanmoins, ces taux restent faibles par rapport au taux de croissance démographique qui est estimé à 2,5 %.

Le secteur primaire a été un des principaux contributeurs à la croissance du PIB en 2016 (Banque Centrale des Comores, 2017). Cela est dû à la hausse exceptionnelle des cours mondiaux de la vanille, qui constitue avec le girofle et l'ylang-ylang les principales cultures de rente. Le Gouvernement ambitionne de renforcer l'autosuffisance alimentaire des Comores, alors que 75 % des denrées alimentaires consommées sont importées.

Le secteur secondaire est dominé par de petites entreprises artisanales et représente 10 % du PIB, l'industrie manufacturière comptant pour à peine plus de 3 % du PIB. En 2016, le secteur industriel a connu une croissance forte, notamment le sous-secteur de l'électricité.

Le secteur tertiaire, qui représente la moitié du PIB des Comores, est composé en majorité de petites entreprises de commerce d'importation et de nombreuses entreprises informelles. Selon l'INSEED, le secteur informel est très développé. D'après la Chambre de Commerce et d'Industrie, l'UCCIA, les principales entreprises comoriennes sont des commerces de détail (type supermarché).

Entre 1984 et 2014, la structure de PIB semble avoir peu évoluée, la part du secteur industriel ayant eu toutefois tendance à diminuer au profit du secteur des services. Au niveau de la structure de l'emploi, le changement a été nettement plus important, la part de la population active dans le secteur agricole est de 80%[4], alors qu'il ne représente que 33% du PIB, preuve de la faiblesse de la productivité agricole et de la pauvreté du pays (il ne faut toutefois pas oublier que la production autoconsommée n'est pas comptabilisée dans le PIB).

> *« Les Comores, qui se situaient au 160e rang (sur 188) du classement de l'indice de développement humain de l'ONU en 2016, doivent surtout lutter contre la famine et la malnutrition. En 2012, près de 30 % des enfants de moins de 5 ans, souffraient de malnutrition chronique et accusaient un retard de croissance. En outre, la mortalité infantile reste élevée : en 2012, elle était de 36 pour 1 000 naissances (chez les*

[4] *Quelques données économiques des Comores,* La France en Union des Comores Ambassade de France à Moroni, https://km.ambafrance.org/Quelques-donnees-economiques-et, page mise à jour le 4/4/2018

enfants de moins de 1 an) et de 15 pour 1 000 (chez les enfants de moins de 5 ans). »[5]

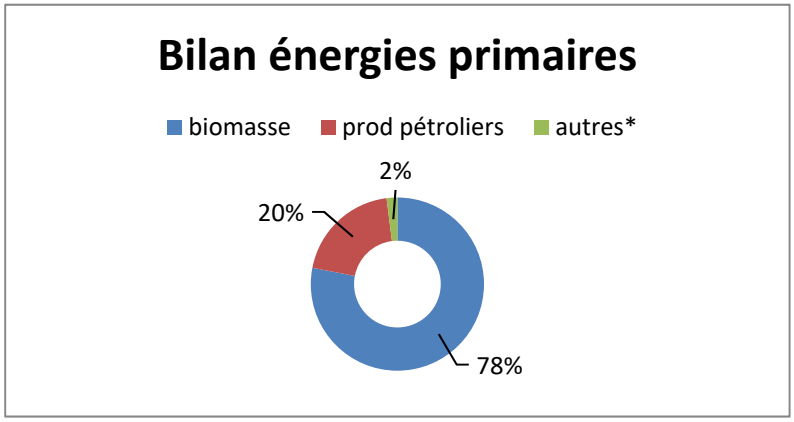
Toutefois le taux de pauvreté extrême (1,9 dollar, PPA 2011) est bien plus faible qu'à Madagascar : « Selon la dernière enquête des ménages de 2014, près de 18 % de la population vit en dessous du seuil international de pauvreté fixé à 1,9 dollar par habitant et par jour. L'incidence de la pauvreté qui varie considérablement d'une île à l'autre, semble plus forte dans les zones rurales et sur l'île de Mohéli. Les inégalités sont importantes, avec un indice de Gini de 44,9. »[6]

Par ailleurs, dotées d'un capital naturel et culturel exceptionnel, les Comores ont le potentiel pour rivaliser avec les destinations touristiques phares de l'Océan Indien que sont les Seychelles, Maurice ou Zanzibar.

2. Examen du profil énergétique du pays

- **Aperçu général du profil énergétique des Comores**

  Energie primaire : l'offre énergétique aux Comores est évaluée à 450 kTep en 2015. Comme dans de nombreux pays africains, la source d'énergie principale est le *bois énergie* (bois et charbon de bois), il représente 78 % du bilan d'énergie primaire, suivi des produits pétroliers à hauteur de 20 % ; l'électricité d'origine photovoltaïque, le gaz, les énergies renouvelables atteignant seulement 2 % du total.



Offre énergétique en ktep	
biomasse	351
hydrocarbures	90
autres*	9
* charbon, PV, éolien,…	
Total	**450**

Figure 4 : bilan des consommations en énergie primaire des Comores

[5] La Banque mondiale aux Comores : les Comores, vue d'ensemble, http://www.banquemondiale.org/fr/country/comoros/overview, consulté le 2 juin 2018

[6] *Quelques données économiques des Comores*, https://km.ambafrance.org/Quelques-donnees-economiques-et, consulté le 2 juin 2018

Les principales sources d'énergie utilisées aux Comores sont :

- Le bois de chauffe issu de la biomasse ligneuse représente 78% de l'énergie primaire. La biomasse ligneuse est utilisée en majeure partie par les ménages ainsi que par les distilleries d'ylang ylang.
- Les produits pétroliers en représentent 20%. Ils sont utilisés pour la génération d'électricité et le transport (terrestre, maritime et aérien).
- Les autres sources d'énergie, par exemple le gaz butane satisfaisant les besoins de cuisson des ménages, représentent une quantité négligeable d'environ 2 %.

On mesure les menaces qui pourraient peser sur les ressources ligneuses de ce pays dont la population devrait doubler tous les 25 ans pour atteindre une densité moyenne de 862 habitants au km^2 à l'horizon 2050, ce qui correspond à quatre fois la densité actuelle.

Consommation finale : l'État des Comores importe 100 % de son énergie commercialisée sous forme de pétrole (essentiellement) et charbon.

- **Consommations de carburants liquides par secteur d'activité**

Les chiffres sont incertains. Les carburants liquides sont majoritairement consacrés à la génération d'électricité : 75500 m^3 en 2015 (IEA). La Société Comorienne des Hydrocarbures a livré 12800 m^3 de carburant dans les stations-services en 2015.

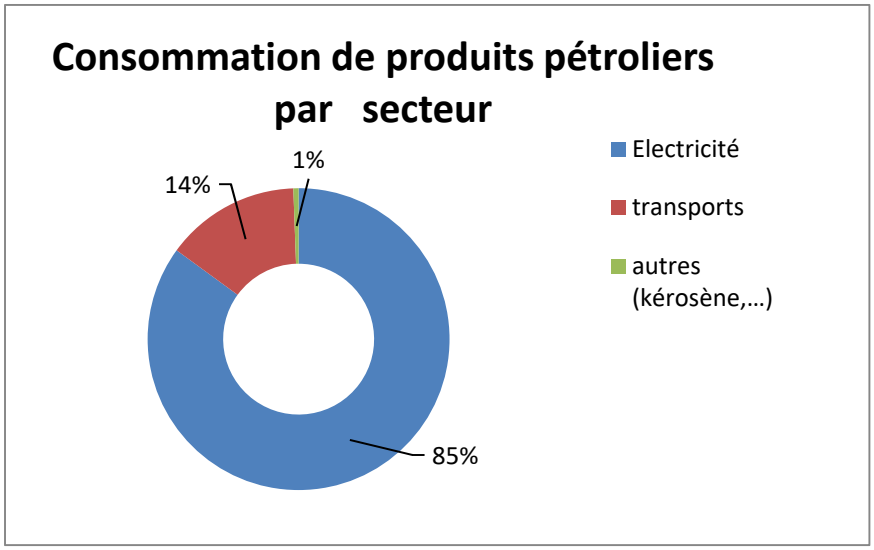


Figure 5 : répartition de la consommation de produits pétroliers

- **La production d'électricité aux Comores**

La production d'électricité est depuis longtemps marquée par des difficultés importantes. La Grande Comore est familière des crises de l`énergie dont la phase la plus critique aura été l'absence totale de courant pendant presque un an, de 1996 à 1997. Plus récemment, les

années 2014 et 2015 se seront déroulées sur fond de crise électrique affectant sérieusement le secteur productif. Ce dernier a été confronté à une grave crise qui a réduit considérablement les perspectives de croissance en 2014.

Mais des progrès significatifs ont été effectués en matière d'électrification principalement grâce à l'ajout de capacités thermiques. Les Comores ont effectué de gros efforts d'amélioration de l'accès à l'électricité de sa population (de 40% en 2000 à près de 75% en 2014). L'archipel a triplé sa production électrique en 15 ans via un mix électrique d'origine principalement fossile. Toutefois, des efforts restent à fournir tant sur la quantité que sur la qualité de l'électricité.

Le réseau n'est pas interconnecté, ce qui augmente l'ampleur des pannes en l'absence de tout moyen de basculement de la distribution d'une centrale à l'autre. Avant 2000, dans les centres urbains, la disponibilité de l'électricité variait de 4 à 8 heures par jour. Dans le reste du pays, les populations pouvaient rester sans électricité de plusieurs jours à plusieurs mois (6 mois). Ainsi, le taux d'accès réel à l'électricité était de l'ordre de 30%.

Ceci permet de comprendre pourquoi l'essentiel des efforts et des projections en matière d'énergie s'est concentré sur le secteur de l'électricité.

La Banque Africaine de Développement est le principal partenaire des Comores dans le secteur de l'énergie, à travers le projet d'appui au secteur de l'énergie (PASEC) et l'élaboration d'un Schéma directeur de développement de l'énergie.

L'assistance de la Banque BAD devrait permettre de rétablir la totalité de la puissance installée à l'horizon 2020, soit 30 MW afin de garantir une disponibilité suffisante de l'électricité, à développer le mix énergétique pour améliorer l'accès aux nouveaux abonnés par le soutien à la transition vers des énergies à faible taux d'émission de Carbone.

Le constat demeure que l'approvisionnement en électricité des Comores est assuré à quasiment 100 % par la combustion de produits pétroliers dans des centrales thermiques. La part du photovoltaïque est en cours de développement avec un environnement économique et juridique devenant favorable (source : SUNPOWER, Forum Régional des Energies Durables, Maurice, mai 2018). Mais les énergies renouvelables représentent moins de 4% de la puissance installée.

3. Recensement du cadre réglementaire concernant les biocarburants

- **Cadre réglementaire**

Il n'a pas été identifié de cadre réglementaire concernant les biocarburants.

- **Engagements en faveur des biocarburants**

Confrontés à la résolution de la crise de la production d'électricité, le gouvernement ne renonce pas au développement des énergies fossiles pour pallier l'insuffisance de l'approvisionnement électrique. Les Comores tentent cependant de diversifier leur mix énergétique en inscrivant des objectifs de déploiement des énergies renouvelables.

- ✓ Réalisations enregistrées en 2014

- *Lancement d'un programme de promotion d'équipements solaires en zones rurales et sur des sites isolés ;*
- *Lancement du projet d'électrification de 6 villages de Mohéli à l'énergie solaire ;*
- *Étude d'électrification de quelques villages de l'est de la Grande Comore au solaire ;*
- *Projet d'installation de 500 kits solaires individuels en cours de démarrage au bénéfice de familles modestes.*

- ✓ Dans le cadre de la Conférence de Paris de 2015 sur le climat, les Comores se sont engagées à devenir un puits de carbone en :
  - réduisant de 84 % leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030 ;
  - portant la part des ENR dans le mix énergétique de 3 % en 2010 à 43 % en 2030 ;
  - doublant la couverture forestière en reboisant 12 000 hectares de forêts.

Il existe des objectifs d'énergie renouvelable dont le développement est très en marge d'une augmentation de capacité principalement fossile. Toutefois, des études sur le potentiel éolien, hydroélectrique et géothermique ont été réalisées récemment.

En conclusion : les possibilités de production des énergies renouvelables sont dans les domaines suivants : les énergies éoliennes, les énergies hydrauliques, les énergies solaires ou encore l'énergie géothermique à travers l'exploitation du volcan Karthala. Des opportunités existent certainement pour la biomasse sous condition de durabilité. Des études dans ce sens seraient à réaliser.

On ne manque pas de remarquer que la voie des biocarburants est absente des planifications à court et sans doute moyen terme.

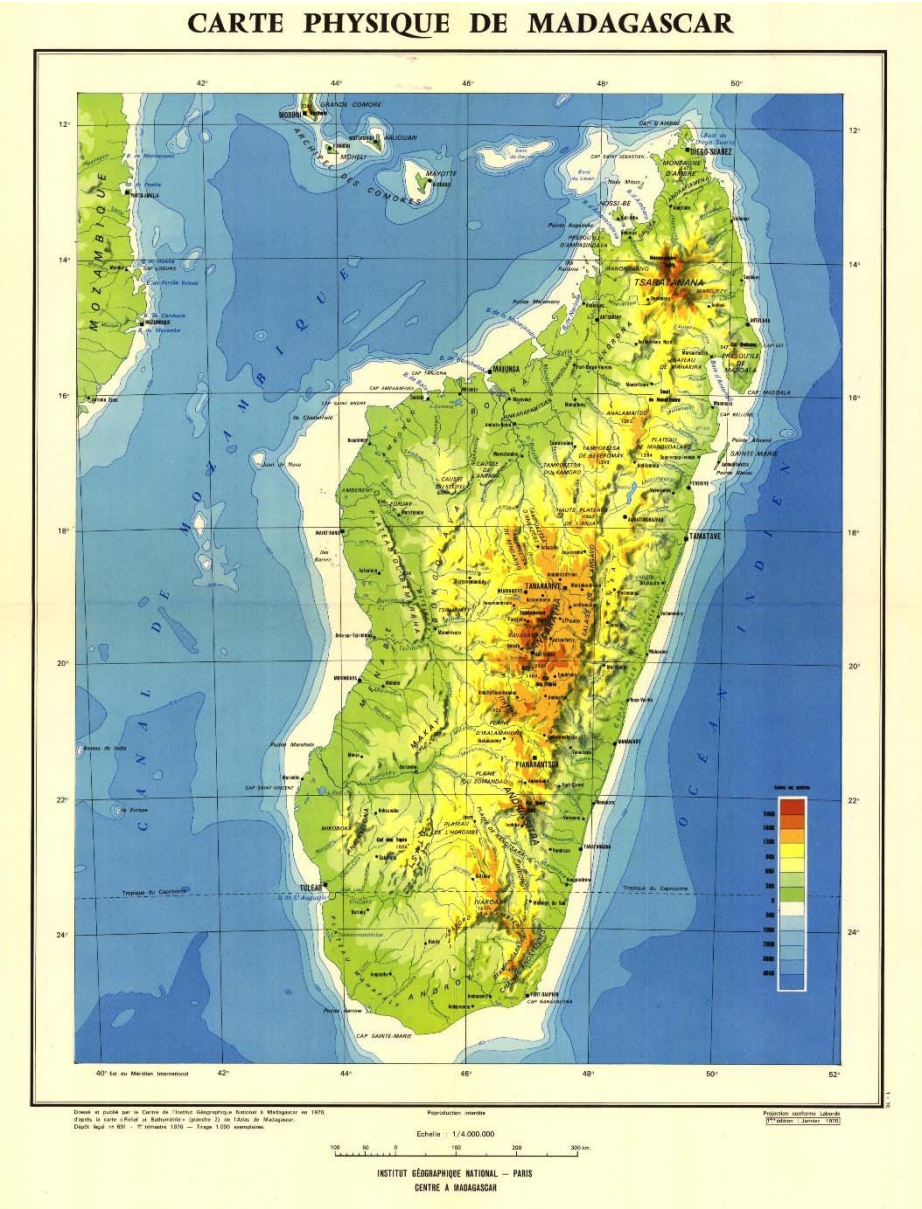
B. Madagascar

1. *Brève présentation du pays*

- **<u>Géographie</u>**

L'île de Madagascar a une superficie de 587 000 km^2. Dans son découpage administratif, le pays est réparti en 22 régions avec 119 districts, 1693 communes et 18 251 fokontany.

La situation géographique, la forme du relief, l'influence maritime et le régime des vents sont les causes des conditions climatiques très variées que l'on rencontre sur l'île.



- **Climat**

On distingue deux principales saisons : la saison sèche et fraîche du 15 avril au 15 octobre, la saison des pluies et chaude, du 15 octobre au 15 avril. Généralement, Madagascar peut être divisé en 5 régions climatiques : région du littoral Est, des Hautes terres, côte et région ouest, Extrême Sud, Sambirano. Madagascar fait partie des pays les plus vulnérables aux aléas climatiques. L'île est notamment exposée à des cyclones, inondations périodiques, sécheresses saisonnières, auxquels s'ajoutent les incendies et les invasions acridiennes.

Tableau 1 : Régions climatiques à Madagascar

Région climatique	*Caractéristiques*
Littoral Est	Type de climat chaud et humide Un maximum de pluie de 3,70m avec 260 jours à Sainte-Marie et un minimum aux extrémités nord et sud, respectivement de 1,20m et 1,70m avec 130 jours et 160 jours de pluies par an Les pluies sont particulièrement abondantes de Janvier à Avril La température moyenne annuelle décroît assez régulièrement de 26°C à 23°C d'Antsiranana à Taolagnaro. Les températures maximales moyennes sont de 31°5 C à Antsiranana et 30°C à Taolagnaro. Les températures minimales moyennes sont de 19°4 C à Antsiranana et 16°2C à Taolagnaro.
Hautes terres	Climat tropical d'altitude (un hiver froid) Pluviométrie de 0,9 m (Ranohira) et 1,50 m (Ivato). La température moyenne annuelle variant entre 16°C et 22°C
Côte et région ouest	Un été chaud et sec Température moyenne annuelle varie entre 24°C et 27°C La pluviométrie annuelle normale diminue du Nord au Sud en passant de 1,50m à 0,40m. La saison sèche s'étend de Mai à Octobre.
Extrême Sud	Climat de type semi-aride Pluviométrie de 0,5 m à 0,7 m par an Température moyenne annuelle de 24°C
Région de Sambirano	Climat de type chaud et humide avec des pluies annuelles assez abondantes Pluviométrie annuelle de 2m à 2, 30m avec 180 jours de pluies par an Période les plus pluvieux : Décembre à Mars La température annuelle moyenne est de 26°C

Source : http://www.meteomadagascar.mg/services/applications/climatologie

- **Démographie**

En 1993, la population de Madagascar présentait un taux de croissance démographique moyen annuel d'environ 2,8%. Madagascar comptait une population de 20 142 015 habitants en 2010 (INSTAT, 2010). Elle était estimée à près de 25 millions en 2016 et dépasse

les 25 millions et demi en 2017[7]. Une projection à l'horizon 2050 estime la population de Madagascar à plus de 40 millions[8].

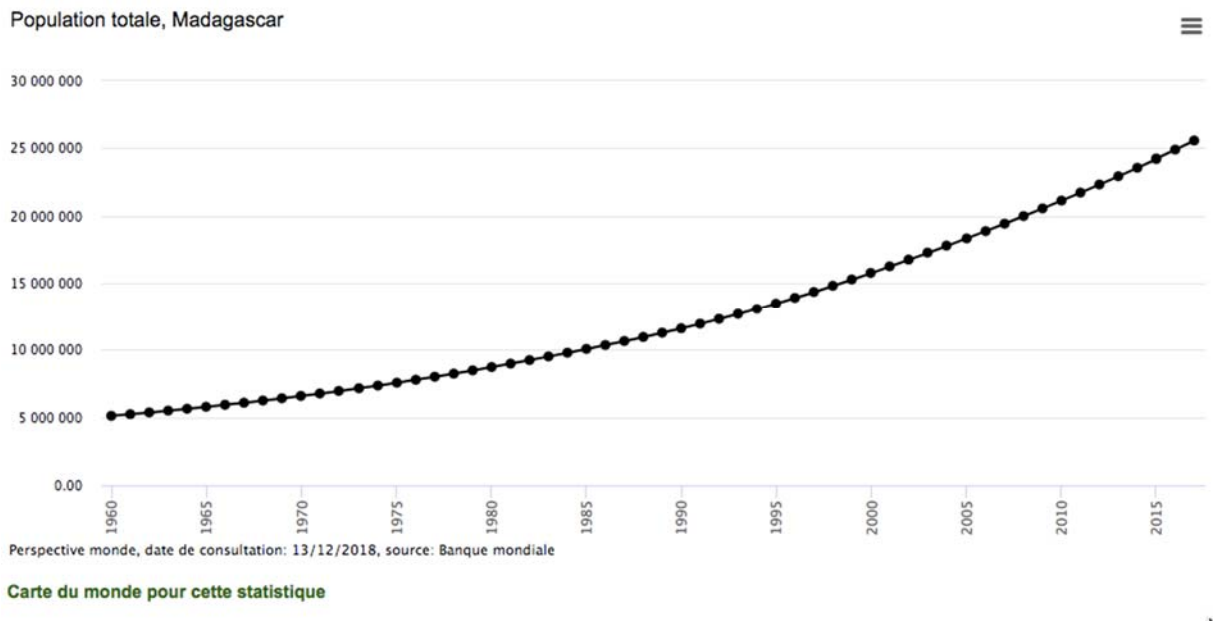


Figure 6: évolution de la population de Madagascar entre 1960 et 2017

Source : Banque Mondiale[9]

Répartie dans 22 régions, les régions Analamanga et Vakinankaratra regroupent le cinquième de la population totale, tandis que les régions de Melaky et de Betsiboka sont les moins peuplées. Environ 78% de la population habite en milieu rural.

Presque 80% de la population, soit 77,6% de la population, vit dans la pauvreté extrême[10]. « Madagascar fait partie des pays les plus pauvres d'Afrique. L'estimation la plus récente sur la période de 2005-2014 du taux de pauvreté au seuil de 1,90 USD en parité du pouvoir d'achat est de 77,8% pour Madagascar. Sur la même période, les pays qui ont des taux similaires sont le Burundi (77,7%) et la République Démocratique du Congo (77,1%). Aucun autre pays, que ce soit en Afrique sub-saharienne ou ailleurs, ne présente un taux de

[7] 24 894 551 habitants en 2016 et 25 570 895 en 2017
Banque Mondiale, https://donnees.banquemondiale.org/pays/madagascar
[8] B. GASTINEAU et F. SANDRON, « Démographie et environnement à Madagascar », *Économie rurale*, 294-295 | 2006,
[9]Perspective Monde,
http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMTendanceStatPays?codeTheme=1&codeStat=SP.POP.TOTL&codePays=MDG&optionsPeriodes=Aucune&codeTheme2=1&codeStat2=x&codePays2=COM&optionsDetPeriodes=avecNomP&langue=fr
[10] En 2012, dernier chiffre disponible sur le site de la Banque mondiale, correspondant à 1,9 dollar (PPP 2011) par jour. https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SI.POV.DDAY?end=2015&locations=1W-MG&start=1981&view=chart
L'UNDP complète : « Selon les dernières statistiques disponibles en juin 2017, le taux de pauvreté au niveau national est de 73,7 % (79,6 % en milieu rural et 50,3 % en milieu urbain). » *Rapport national sur le développement humain Madagascar 2018, Développement humain et mobilisation des ressources intérieures*, UNDP, p.18

pauvreté plus important. »[11] Avec un IDH de 0.520 en 2017 (UNDP, 2018), le pays figure à la 162e position sur 188 pays.

- **Contexte environnemental**

Madagascar est également connu pour la richesse de sa biodiversité, son territoire héberge 1,7 millions d'espèces. L'île abrite cinq familles de plantes, d'environ 14 000 espèces végétales, dont près de 90% sont endémiques. Madagascar est ainsi considéré parmi les priorités mondiales de conservation de la biodiversité. La couverture de forêts naturelles en 2010 a été évaluée à 9,2 millions d'hectares. Malheureusement, environ 40 000 hectares de forêts naturelles sont perdus chaque année dans le pays[12]. Madagascar reste ainsi dans la catégorie des pays à fort taux de déforestation. Les feux de brousses, les mauvaises pratiques agricoles (culture sur brulis) et l'exploitation non rationnelle de la ressource forestière (prélèvement de bois, production de charbon de bois) constituent les principales raisons de la déforestation.

- **Contexte économique**

Madagascar est un pays essentiellement rural, où, en 2014, le secteur agricole représentait 30 % du Produit Intérieur Brut (PIB) du pays selon la Banque Mondiale, et 43 % si l'on y intègre l'agroalimentaire. Le secteur emploie 80 % de la population active. Grâce à son climat et sol variés, différentes sortes de cultures peuvent être réalisées sur la grande Ile. La superficie cultivable s'élève à 8 millions d'hectares, soit 14% de la superficie totale. La superficie cultivée s'élève à environ 2,6 millions d'hectares, soit 4% de la superficie totale et 31% de la superficie cultivable[13]. Les agriculteurs se concentrent essentiellement sur les cultures vivrières d'autosubsistance : riz, maïs, manioc, légumineuses. Madagascar est également connu pour ses produits de rente tels que le girofle, le cacao, le poivre, le café, et la vanille dont il est le 1er exportateur mondial.

Le pays a enregistré une croissance du PIB réel de 4.1 % en 2017, une croissance tirée essentiellement par le secteur tertiaire notamment le commerce et le transport, auquel on peut ajouter la construction (secteur secondaire). L'accès à l'électricité ne concerne que 17%

[11] Rapport national sur le développement humain Madagascar 2018, Développement humain et mobilisation des ressources intérieures, UNDP, p.24
[12] Lettre de Nouvelle Politique de l'Energie de Madagascar 2015-2030
[13] http://www.fao.org/docrep/V8260B/V8260B12.htm

des ménages (milieu rural et urbain). Selon, la société nationale d'électricité Jirama, la production d'électricité a atteint 1 025 252 MWh en 2015. Le nombre d'abonnés raccordés au réseau en 2015 a atteint environ 505 000 dominés à 98% par des particuliers (ménage). Le secteur industrie ne constitue que moins de 1% des abonnées mais consomment 34% de l'électricité produite.

Le pays a enregistré une croissance du PIB réel de 4.1 % en 2017, croissance économique tirée essentiellement par le secteur tertiaire notamment la construction, le commerce et le transport et il est trop tôt pour dire si cela influera durablement sur la baisse du taux d'extrême pauvreté, compte tenu des fluctuations importantes que connaît ce dernier[14].

Tableau 2: Indicateurs de croissance par secteur - Madagascar

	2012	2013	2014	2015	2016
PRODUIT INTERIEUR BRUT					p
Produit Intérieur Brut Nominal (en milliards d'Ariary)	21 774	23 397	25 775	28 463	31 477
Taux de croissance du Produit Intérieur Brut (%)	3,0	2,3	3,3	3,1	4,0
INFLATION ANNUELLE DU PIB					
Déflateur du PIB	5,5	5,1	6,6	7,1	6,4
TAUX DE CROISSANCE PAR SECTEUR (%)					
Secteur Primaire	1,5	-6,1	3,3	-0,9	1,7
Secteur Secondaire	9,3	22,2	8,5	7,2	1,6
Secteur Tertiaire	3,0	1,3	2,3	3,4	4,3
TAUX DE CROISSANCE PAR BRANCHE D'ACTIVITE (%)					
Agriculture	3,8	-12,8	4,5	-2,9	1,6
Elevage et pêche	0,8	1,4	2,8	0,8	1,9
Sylviculture	-7,4	-1,9	-1,0	1,0	1,0
Agro-industrie	28,9	11,4	2,0	-10,1	6,4
Industrie Extractive	183,2	219,2	25,9	19,5	-9,7
Energie	3,9	5,6	4,2	3,7	7,1
Industrie Alimentaire	1,4	3,0	2,7	3,0	3,2
Industrie des Boissons	1,4	3,2	4,0	4,2	8,9
Industrie du Tabac	2,8	-12,4	3,0	3,5	3,5
Industrie du Corps gras	3,4	6,6	0,5	0,6	5,6
Industrie Textile	1,9	0,5	1,7	-1,5	3,3
Industrie du Cuir	1,4	0,6	1,4	2,1	3,5
Industrie du Bois	-3,9	3,3	3,0	6,4	11,9
Matériaux de construction	2,5	-7,7	3,3	1,8	5,2
Batiment Travaux Public	3,4	-2,2	3,1	9,4	5,9
Transports de marchandises	3,5	3,7	3,4	3,6	6,5
Transports de voyageurs	10,1	3,5	-2,6	-10,6	-10,2
Auxilliaire de Transport	7,1	3,6	2,5	9,9	1,0
Télécommunications	4,4	8,5	2,1	4,2	4,2
Commerce	1,9	-3,4	2,9	1,1	3,1
Banque	5,3	8,1	5,3	5,3	11,5
Assurances	1,4	7,8	-3,4	-5,5	5,7
Services rendus aux entreprises et aux ménages	0,8	0,8	1,2	5,0	5,5

Source : DSY/INSTAT, 2018

[14] Il est plus bas en 2017 qu'en 2012, respectivement 73,7% et 77,7%, cf. supra, mais comme le souligne le Rapport national sur le développement humain Madagascar 2018, Développement humain et mobilisation des ressources intérieures, UNDP, p.72, il est extrêmement instable.

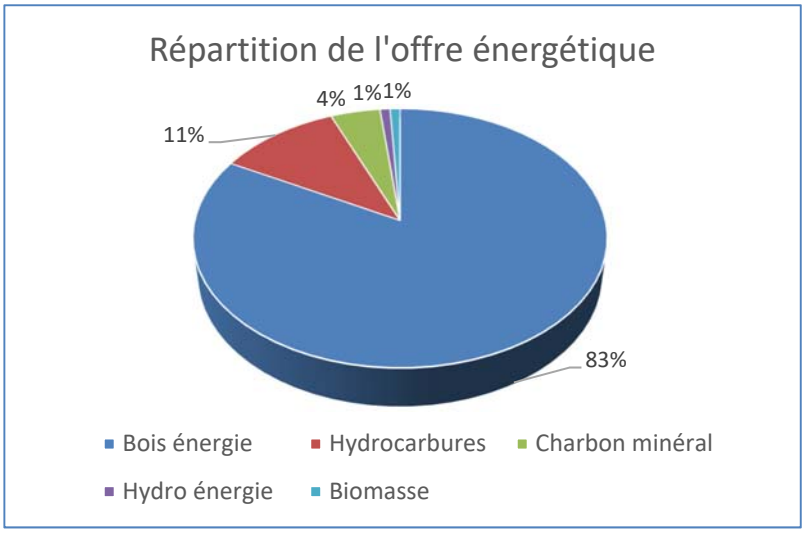
2. Examen du profil énergétique du pays

- **Aperçu général du profil énergétique de Madagascar**

Les sources d'énergie à Madagascar sont principalement constituées par le bois énergie, les hydrocarbures, le charbon minéral, l'hydro-énergie et la biomasse. Selon le Ministère en charge de l'énergie, l'offre énergétique de Madagascar est évaluée à 7 674 ktep en 2017. Du fait de son importance, le bois énergie a été traité séparément de la biomasse dans le cadre de cette étude.

Le bois énergie, c'est-à-dire le bois de chauffe et le charbon de bois, constitue toujours la principale source d'énergie dans le pays avec 6 365 ktep, soit 83% de l'offre totale. Il est prélevé en grande partie dans les ressources forestières naturelles dont dispose le pays, notamment dans les régions côtières. Le prélèvement de bois énergie à partir de forêts de reboisement se situe surtout sur les hautes terres. Il est suivi de loin par les hydrocarbures avec 835 ktep, soit 11% de l'offre, et le charbon minéral avec 338ktep, soit 4% de l'offre. Les hydrocarbures et le charbon minéral sont importés car le pays n'en produit pas malgré l'existence d'importants gisements pétroliers et miniers.

Malgré la richesse de Madagascar en cours d'eau, la contribution de l'hydro-énergie reste faible avec seulement 1% de l'offre totale. En effet, le pays ne valorise en énergie que 150MW de sites hydroélectriques sur les 7 500MW disponibles. De même, le potentiel en biomasse fourni surtout par les déchets agricoles, urbains, industriels (bois, bagasse…) n'est que faiblement valorisé avec moins de 1% de l'offre énergétique.



Offre énergétique en ktep	
Bois énergie	6365
Hydrocarbures	835
Charbon minéral	338
Hydro énergie	68
Biomasse	68
Total	7674

Figure 7 : Répartition de l'offre énergétique primaire à Madagascar 2017

La consommation d'hydrocarbures à Madagascar

Madagascar importe la totalité des hydrocarbures dont le pays a besoin avec plus de 1 million de m^3 en 2017. Le gasoil constitue plus de 62% du marché, suivi par le fuel oil et l'essence (supercarburant) représentant respectivement 15% et 14%. De tous les types d'hydrocarbures, le gasoil est le plus sollicité de tous avec une consommation environ de 630 122 MT en 2017, soit une augmentation de 40% entre 2012 et 2017.

Tableau 3: Importation d'hydrocarbures de Madagascar en m^3

	Année					
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
EA	595	492	383	452	459	372
Jet	75 231	67 058	68 051	65 161	61 826	57 894
Pétrole lampant	48 726	36 862	31 716	31 343	30 367	28 512
Supercarburant	120 089	123 331	124 817	127 986	137 439	149 363
Fuel oil	110 656	105 927	91 308	61 739	76 468	155 858
Gasoil	454 922	481 907	515 136	561 035	621 642	630 122
Total	**810 218**	**815 578**	**831 411**	**847 716**	**928 200**	**1 022 121**

Source : Office Malgache des Hydrocarbures, 2018

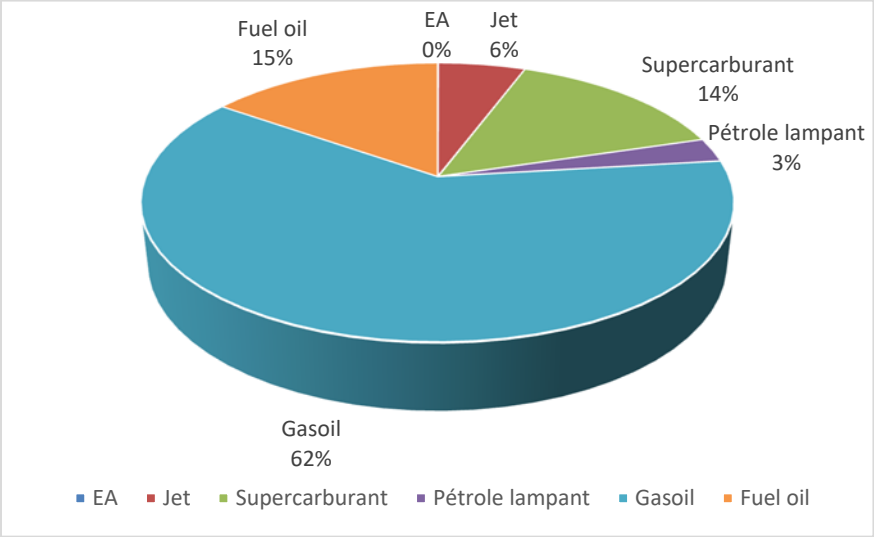


Figure 8 : Part de marché des différents types d'hydrocarbures en 2017

Les transports terrestres

Madagascar utilise les hydrocarbures fossiles pour satisfaire en totalité ses besoins dans les transports. 58% du gasoil et la quasi-totalité de l'essence sont importés par le pays en 2017. La demande pour ce marché connaît une croissance continue avec l'augmentation du parc de véhicules.

Tableau 4. Les hydrocarbures dans les transports en tonnes métriques

	Consommation dans les transports (MT)	Importation totale (MT)	%
Gasoil	366 009	630 122	58
Essence (SC)	148 180	149 363	99
Autres	0	242 636	0
Total hydrocarbures	514 189	1 022 121	50

Source : Office malgache des hydrocarbures, 2018

L'agglomération d'Antananarivo regroupe la grande partie du parc automobile à Madagascar. Selon l'INSTAT, environ 15 000 voitures sont immatriculées chaque année, ces cinq dernières années regroupant les voitures particulières, les véhicules à deux roues ou motocyclettes et les véhicules utilitaires avec respectivement de 35%, 29% et 12% en 2017. Les véhicules utilisés à Madagascar utilisent tous les carburants, gasoil et essence sans plomb pour fonctionner. Depuis les cinq dernières années, le nombre de voitures immatriculées utilisant le gasoil comme source d'énergie connaît une accélération continue de la croissance de leur part. Ainsi, 53% des véhicules sont désormais constitués par des voitures diesel en 2017, alors que les véhicules à essence composaient 61% du parc en 2013.

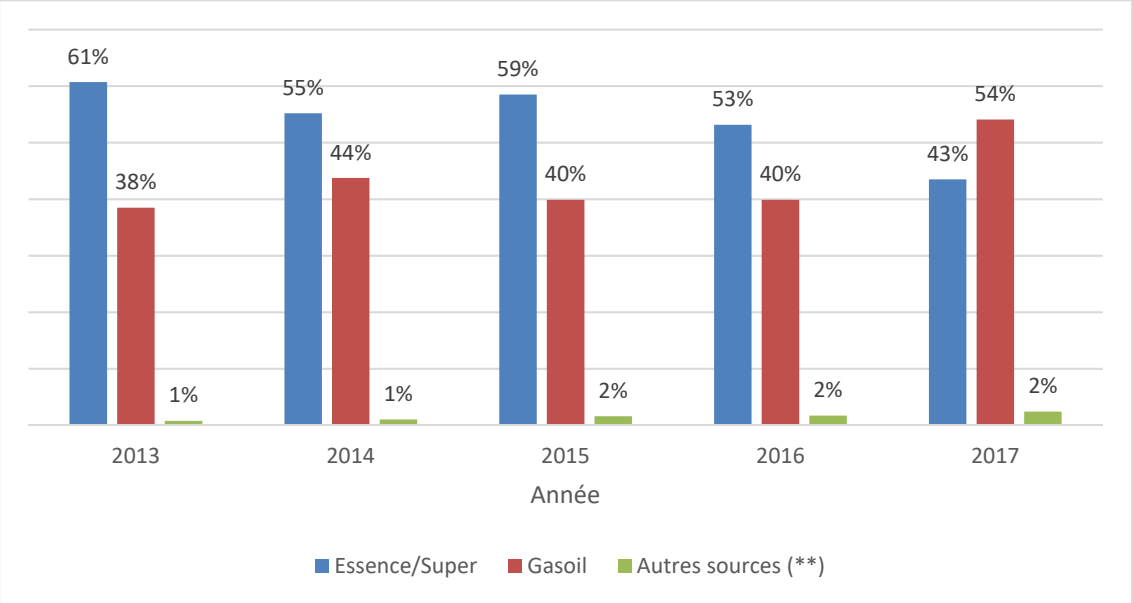


Figure 9: Évolution de la répartition des immatriculations de voitures à Antananarivo selon la source d'énergie (en %) entre 2013 et 2017

Source : INSTAT/DIR-TANA, 2018

(**) Pour les sources d'énergie, la rubrique « Autres sources » correspond aux véhicules ne consommant pas d'énergie et qui sont immatriculés (remorques).

La production d'électricité

A Madagascar, 25% des hydrocarbures importés sont utilisés pour faire fonctionner les centrales électriques thermiques. En 2017, ce secteur a utilisé 128 239 MT (tonnes métriques) de gasoil soit 20% de l'importation totale et 124 650 MT de fuel oil, soit 80% de l'importation. Avec l'orientation du pays en faveur de la valorisation des énergies renouvelables pour produire l'électricité, la consommation de gasoil dans le secteur de la production d'électricité est amenée à diminuer à moyen terme avec le remplacement progressif des centrales thermiques au gasoil par les centrales hydroélectriques, centrales solaires, éoliennes, biomasse et autres.

Tableau 5. Marché potentiel de biocarburant dans le secteur de la production d'électricité.

	Consommation (MT)	Importation (MT)	%
Gasoil	128 239	630 122	20
Fuel oil	124 650	155 858	80
Autres hydrocarbures	0	236 141	0
Total hydrocarbures	252 889	1 022 121	25

Source : Office malgache des hydrocarbures, 2018

L'accès à l'électricité ne concerne que 17% des ménages (milieu rural et urbain). Selon, la société nationale d'électricité Jirama, la production d'électricité a atteint 1 025 252 MWh en 2015. Le nombre d'abonnés raccordés au réseau en 2015 a atteint environ 505 000 dont 98% de particuliers (ménages). Le secteur industriel constitue moins de 1% des abonnées, mais consomment 34% de l'électricité produite.

Le secteur de la production d'électricité utilise en partie les centrales thermiques. Les données de la Jirama, en 2017, enregistrent une puissance disponible totale de 506 MW. Les centrales thermiques totalisent une puissance disponible de 353 MW, soit 70% de la puissance totale. Le thermique gasoil apporte une puissance de 270 MW, soit 77% de la puissance totale des centrales thermiques.

Le secteur de l'éclairage

L'électricité est utilisée par les ménages malgaches comme source d'éclairage mais ce faible accès, c'est le pétrole lampant qui reste encore la principale source utilisée par les ménages puisqu'un peu plus de huit ménages sur dix l'utilisent (soit 81,2%). Les autres sources, environ 2% des ménages, sont constituées surtout par la bougie.

Madagascar a importé 28 512 MT de pétrole lampant en 2017, dont une partie (non précisée) est consommée par les ménages pour l'éclairage, notamment en milieu rural. Néanmoins, la demande au niveau des ménages en pétrole lampant pourrait connaître une tendance à la baisse avec le développement de la pré-électrification grâce aux mini-kits solaires : lampes solaires, ampoules rechargeables. L'importation de mini-kits solaires a été multipliée par 20 en 5 ans en passant de 148 millions Ar en 2013 à 3 milliards Ar en 2017.

Tableau 6 : Source d'éclairage des ménages (en % des ménages).

	Rural	Urbain	Population totale
Electricité	4.8	39.1	15
Générateur	1.1	0.8	1
Pétrole lampant	88.9	53.8	81.2
Bougies	3.2	5.8	2
Autres	2.1	0.5	1
Total	**100**	**100**	**100**

Source : Ministère de l'Energie, 2014

Le combustible pour la cuisson

Le bois énergie constitue encore la principale source d'énergie de cuisson utilisée par les ménages malgaches, comme l'a montré le bilan énergétique ci-dessus. L'enquête de l'Instat (2010) a montré que plus de 82,2% des ménages utilisent le bois de chauffe et 17,1% utilisent le charbon de bois. Le bois énergie reste l'énergie de cuisson la plus accessible pour les ménages ; 77% des ménages n'achètent pas le bois énergie. Ces ménages se trouvent en zone rurale et satisfont leur besoin en bois pour la cuisson en ramassant le bois.

En se basant sur les données EPM 2001, 2003, 2005 et 2010, le charbon est consommé en moyenne par 18% des ménages malgaches. Si aucune mesure n'est prise, on peut considérer que cette proportion ne connaîtrait pas de changement, tandis que la consommation moyenne de charbon est de 100kg/personne. La demande en charbon a atteint 400 000 t en 2012, et si aucune mesure n'est prise avec l'augmentation du nombre de la population, elle avoisinera 496 000 t en 2020, 647 000 t en 2030 et 1 104 000 t en 2050, ce qui aggravera la déforestation.

La substitution totale de cette source d'énergie n'est pas encore envisageable, à court et moyen terme. Le bois énergie est compétitif car de toute les combustibles pour la cuisson, il est le moins cher, les ménages peuvent en acheter en petit lot et le charbon bénéficie d'un vaste système de distribution (énergie de proximité car on rencontre un vendeur dans

chaque quartier). Néanmoins, une partie des consommateurs de charbon, notamment ceux qui se trouvent en milieu urbain estimé à environ à 431 456[15] ménages en 2010, pourrait constituer un débouché pour l'éthanol combustible. Les retours d'expérience des 1ers promoteurs dans l'éthanol combustible ont évalué une consommation moyenne de 1L par jour par ménage. Ces acteurs viseraient à terme une conversion de 100 000 ménages urbains soit une consommation de 40 000 m^3 d'éthanol combustible.

3. *Recensement du cadre réglementaire et institutionnel*

- **Historique de la filière**

Un fort engouement des investisseurs nationaux et étrangers porteurs de projets biocarburants sur la filière jatropha et canne à sucre entre 2004 et 2011

Entre 2004 et 2011, Madagascar a enregistré une arrivée massive des investisseurs étrangers dans le secteur des biocarburants, attirés par la disponibilité de vastes terrains et une main d'œuvre abondante et peu onéreuse. Le contexte de la politique économique nationale et des tendances internationales a favorisé l'élan de la filière biocarburant à Madagascar pendant cette période. La percée des investisseurs a coïncidé à la période de promotion des IDE[16] mise en place par le Gouvernement en 2003, afin d'accélérer la croissance économique du pays. Tandis que sur le plan international, différents facteurs ont favorisé la recherche sur les énergies alternatives tels que le biocarburant : ont joué le contexte de la hausse des prix du pétrole, l'ampleur du souci environnemental à travers la prise d'importance du marché carbone liée à la nécessité de réduction des émissions de CO^2 et le paquet énergie-climat 3*20 de l'UE.

Des projets de plantation à grande échelle de jatropha curcas en vue de la production de biodiesel ont été entrepris dans le pays, depuis 2004, avec plus d'échecs que de réussites.

Madagascar faisait face à un développement rapide de ces investissements sans avoir disposé d'informations réelles, de vision et stratégie claire sur le secteur du biodiesel par rapport aux avantages et aux contraintes qu'il apporte au pays. Différentes initiatives de

[15] Calcul consultant sur la base des données INSTAT
[16] Investissement Direct Etranger

réflexion ont donc été mise en place concernant la mise en place d'un environnement favorable au développement de la production de biodiesel dans le pays.

Depuis 2011, la crise politique qu'a traversée le pays a eu comme conséquence le retrait ou la suspension des investissements de la plupart des promoteurs. Le développement de la filière biocarburant a alors connu un net ralentissement. Seule, la filière éthanol combustible a continué à avoir un certain dynamisme avec la poursuite de projets de petite et moyenne taille. Des unités de production ont été installées et l'éthanol combustible commence à être commercialisé dans certaines régions de Madagascar.

L'éthanol combustible est destiné à être complémentaire au bois énergie. Cette filière a connu un fort engouement des promoteurs nationaux et de nombreux projets de plantation, d'usines ont vu le jour.

Le concept de développement et de promotion de ce biocarburant combustible pour la cuisson a été préparé depuis 2002 avec l'appui de la Banque Mondiale. Cela a commencé avec l'étude comparative des matières premières locales : manioc, canne à sucre, suivie d'une étude de faisabilité, toujours pilotée par la Banque Mondiale de 2008 à 2011 avec des essais dans les villes de Vatomandry et d'Ambositra, villes à forte production de canne à sucre destinée à la production d'alcool de bouche (Toaka gasy). Par ailleurs, le projet éthanol est inséré dans le Plan de Mise en œuvre (PMO) du Plan national de développement, PMO piloté par le Premier Ministre en mars 2015. Le projet devient un projet présidentiel en avril 2015, suite à la création du Bureau National de Coordination du Programme National Ethanol Combustible (PNEC) en août 2015.

- **Situation du cadre réglementaire et institutionnel**

La nouvelle politique de l'Énergie de Madagascar (2015-2030)

La *Nouvelle politique de l'énergie* (NPE) promeut l'efficacité énergétique en vue d'une réduction des pertes énergétiques dans le transport, la distribution et la consommation de l'électricité, dans la transformation et l'utilisation énergétique de la biomasse, ainsi que la réduction de la consommation des produits pétroliers pour la production d'électricité et pour les usages commerciaux et industriels.

La stratégie de mise en œuvre du NPE a fixé les défis au niveau des trois sous-secteurs, à savoir la biomasse (production et utilisation), l'électricité, et les hydrocarbures. En ce qui

concerne le secteur hydrocarbure en particulier, cette stratégie (axe III) a pour objectif la sécurité et l'indépendance énergétique du pays, à travers la diversification du mix énergétique et la réduction des importations d'hydrocarbures. Elle affiche comme priorité l'exploitation des ressources énergétiques locales notamment celles d'origine renouvelable.

L'axe stratégique IV concerne également l'adaptation et le renforcement du cadre réglementaire et institutionnel et de l'environnement des affaires tout en assurant une coordination efficace entre les différentes entités impliquées, notamment les ministères associés à la dynamisation du secteur de l'énergie, ainsi que les partenaires publics et privés.

Le cadre réglementaire régissant les biocarburants

La création d'organisations et structures travaillant pour le développement de la filière des biocarburants depuis 2006 ont abouti à l'élaboration d'un projet de loi sur la bioénergie, projet de loi qui inclut le biocarburant

Avec l'appui des Partenaires techniques et financiers (PTF), différentes initiatives tels que des ateliers de réflexions, des études sectorielles, la mise en place de structures ou organisations pour le développement de la filière ainsi que pour le développement du cadre règlementaire ont été menées. Des acteurs publics, privés et des organisations étaient partie-prenantes dans ces initiatives qui ont permis à tous les acteurs concernés d'avoir une compréhension et connaissance de la potentialité du pays dans la filière des biocarburants, ainsi que les enjeux relatifs à son développement.

- Octobre 2006 : atelier sur les biocarburants
- Juin 2007 : atelier sur le développement durable des biocarburants
- 2011 : Réalisation d'état des lieux du secteur biocarburant à Madagascar,
- 2011 : Réalisation d'une étude sur le Potentiel de production de biocarburant durable à Madagascar, évaluation du besoin en biocarburant à l'échelle nationale.
- 2013 : Loi sur la production et commercialisation d'éthanol combustible avec décret d'application en 2014
- 2015 : Sortie de la Nouvelle politique de l'énergie de Madagascar (2015-2030)
- 2016-2017 : les démarches de consultation et élaboration de cadres règlementaire sur la bioénergie, qui inclut le biocarburant, sont entreprises et aboutissent à un projet de loi en 2018.

La réglementation sur l'éthanol combustible

Le Gouvernement a élaboré la loi 2013-013 du 14 novembre 2013 relatif à la production et la commercialisation de l'éthanol combustible. La loi a pour objectif de contribuer à la satisfaction du besoin en énergie de cuisson à Madagascar et à réduire la dégradation de la forêt en se positionnant comme une source d'énergie alternative au charbon de bois et bois de chauffe utilisé pour la cuisson, au niveau des ménages. La loi régit la production, la transformation, la commercialisation de l'éthanol combustible à Madagascar c'est-à-dire seulement l'éthanol destiné à alimenter les foyers de cuisson au niveau des ménages. Ainsi, le bioéthanol destiné au carburant des véhicules n'est pas concerné par la présente loi sur l'éthanol combustible.

Cette activité ne nécessite aucune licence mais seulement une autorisation d'implantation dans le site de production et reste ouverte aux conditions fixées par la législation en vigueur.

La loi spécifie les caractéristiques de l'éthanol combustible pour le différencier de l'éthanol de bouche et rend obligatoire la certification des réchauds éthanol vendus au public.

La loi spécifie les rôles des collectivités décentralisées (Communes, Fokontany) en tant qu'autorités assurant la délivrance des autorisations d'implantation, le recensement des fabricants, le suivi et le contrôle des producteurs dans leur circonscription.

Par ailleurs, la loi accorde une incitation fiscale, en exemptant du paiement de la TVA et des droits de douanes, l'importation des matériels utilisés pour la fabrication de l'éthanol combustible. Néanmoins, les communes sont autorisées à percevoir une ristourne sur le commerce de l'éthanol qui sort des unités de production.

Dans la pratique, il n'y a pas beaucoup d'étapes franchies, à part l'adoption de la loi sur l'éthanol combustible et ses textes d'application, qui ont le mérite de donner un cadre réglementaire aux quelques productions existantes (moins d'une dizaine de sociétés et/ou associations), mais ces textes gagneront à être améliorées.

Le projet de loi sur la bioénergie

Ce projet de loi, élaboré par le Ministère en charge de l'énergie avec la collaboration des autres départements ministériels (forêt, environnement, industrie, commerce, justice), s'applique aux différentes filières du secteur de la bioénergie à savoir la filière bois-énergie, la filière biocarburant, la filière bio-déchet et la filière biogaz.

Sont également concernées les activités suivantes :

- études et recherches sur le secteur bioénergie ;
- production et collecte de biomasse, transformation de biomasse pour la production de bioénergie
- stockage et transport de bioénergie ;
- commercialisation de bioénergie ;
- fabrication et vente d'équipements utilisant de la bioénergie ;
- importation et exportation de biomasse et de bioénergie ;
- contrôle et surveillance des activités du secteur bioénergie et des bioénergies.

Les principales dispositions de ce projet de texte concernant les biocarburants sont :

- l'exercice des activités dans la collecte, la production et la transformation des matières premières en vue de la production des biocarburants, le transport, le stockage et la distribution est soumis suivant un seuil donné (taille/volume des activités) à déclaration ou à l'obtention d'une autorisation/licence ;
- les opérateurs doivent à tout moment être en mesure de justifier de l'origine légale des biomasses et/ou des bioénergies stockés, transportés et commercialisés ;
- le biocarburant destiné au secteur du transport à Madagascar doit faire l'objet d'une incorporation avec les hydrocarbures. Les taux d'incorporation de biocarburant sont définis par voie réglementaire ;
- les opérateurs sont tenus à l'obligation d'information ;
- des dispositions générales sont établies à titre de balise.
    - Toute activité dans le secteur de la bioénergie doit se conformer aux plans d'aménagement nationaux, régionaux, communaux et sectoriels en vigueur.

- La production de biomasse ne doit pas porter atteinte à la sécurité alimentaire. Ainsi Le Ministère en charge de l'agriculture fixera une liste des cultures vivrières qui ne devront pas être valorisées en biocarburant.
- Toute activité dans le secteur bioénergie doit se soumettre aux obligations de mise en compatibilité des investissements avec l'environnement dans les conditions prévues aux dispositions de la loi n° 90-033 du 21 décembre 1990 portant Charte de l'Environnement et du décret n° 99-954 du 15 décembre 1999 relatif à la mise en compatibilité des investissements avec l'environnement (MECIE).
- Pour s'assurer du respect des règles d'occupation de la terre et éviter les risques de conflits, toute occupation, acquisition, création, aménagement et gestion des espaces ou terrains de culture pour la production de biomasse ne pourra se faire qu'après l'approbation du Comité interministériel bioénergie.

- le ministère en charge de l'énergie établit les normes de qualité et de contrôle qualité des biocarburants, des installations et des matériels de transformation, de stockage, de transport, de distribution et des équipements utilisant les bioénergies ;
- un comité interministériel bioénergie est créé et sera chargé de la coordination des actions de l'État dans le secteur bioénergie ;
- un organe de régulation est mis en place, chargé de veiller au respect des normes des installations, des bioénergies, des équipements utilisant les bioénergies ainsi que de la qualité des services dans le secteur bioénergie.

- **<u>Le cadre institutionnel</u>**

La *Nouvelle politique énergétique* (NPE) de l'État malgache est orientée vers la promotion des énergies renouvelables dont, on l'a vu, les biocarburants. Le développement des biocarburants à Madagascar repose sur l'intervention de 3 groupes d'acteurs :

- l'État avec l'implication de plusieurs ministères ;
- le secteur privé constitué par les investisseurs ;
- les structures d'appui et de soutien composées par les partenaires techniques et financiers, les ONG/Associations.

Les rôles des différents ministères impliqués sont présentés ci-après, tandis que ceux du secteur privé et des structures d'appui sont présentés dans la partie traitant de la situation actuelle de la filière biocarburant (cf C.3.).

Plusieurs départements ministériels sont impliqués dans la promotion des biocarburants :

- le ministère en charge de l'énergie dont notamment le département en charge des hydrocarbures et l'office malgache des hydrocarbures ;
- le ministère en charge de l'industrie qui s'implique particulièrement sur l'éthanol combustible ;
- le ministère en charge de l'environnement et l'office national de l'environnement (ONE) qui intervient dans l'évaluation des impacts environnementaux des projets ;

- le ministère en charge de l'aménagement du territoire et du foncier qui intervient dans le processus d'acquisition des terrains des projets de culture des plantes à vocation énergétique ;
- le ministère de l'agriculture qui intervient dans le processus d'importation des matériels végétaux (semences, …) dédiés à la production des matières premières en vue de leur transformation en biocarburant.

En ce qui concerne l'éthanol combustible, le Gouvernement a conçu un programme de promotion, le *Programme national éthanol combustible* - PNEC. Le PNEC est composé d'un comité technique et d'un organe d'exécution et est en charge de recevoir et d'instruire les demandes d'investissement et de donner les autorisations pour la réalisation des projets.

Tableau 7. Rôles et implication des ministères le long de la chaine de valeur Biocarburants

	Élaboration projet	Mise en place du projet	Exploitation du projet	Commercialisation des biocarburants
Ministère en charge de l'énergie et l'organe de régulation	Élaboration des textes réglementaires Instruction des dossiers de demande Délivrance des autorisations/Licence Collecte d'informations sur les projets	Contrôle de conformité des installations	Suivi et contrôle de conformité des installations et de l'exploitation Collecte d'informations	Élaboration des normes des biocarburants Contrôle de conformité de la qualité des biocarburants Contrôle taux d'incorporation Collecte d'informations
Ministère en charge de l'industrie et PNEC		Instruction et délivrance de l'autorisation d'opérations de l'unité de production d'éthanol combustible (cas particulier)		
Ministère en charge de l'environnement et ONE	Evaluation de l'impact environnemental Élaboration d'un cahier de charge environnemental Délivrance de permis environnemental		Suivi environnemental	
Ministère en charge du foncier	Instruction des demandes de terrains et de délivrance de bail		Suivi du respect du bail en matière de mise en valeur des terrains demandés	
Ministère en charge de l'agriculture	Délivrance des autorisations d'importation de semences, matériel végétal			
Ministère en charge des forêts			Délivrance des autorisations de collecte si les matières premières sont incluses comme des produits forestiers (cas jatropha)	

- **Situation actuelle de la filière**

Le degré de développement de la chaîne de valeur

En 2018, on l'a dit en introduction, c'est l'éthanol combustible qui est arrivé au stade de la commercialisation, c'est-à-dire qu'une filière de production, de transformation, de distribution de l'éthanol combustible est en place. Néanmoins, cette filière fonctionne encore à très petite échelle, la production reste encore faible. Le développement de certains projets dans la filière éthanol combustible intègre le financement crédit carbone avec une procédure de certification. En plus, la promotion de la filière est combinée avec le développement d'une chaîne d'approvisionnement en foyers éthanol.

En ce qui concerne le biodiesel, les investisseurs les plus en avance en sont au niveau de la phase d'extraction d'huile de jatropha. Aucun passage à la transformation de l'huile filtrée et aucune action de commercialisation n'ont été encore réalisés. Néanmoins, des essais de transformation et d'utilisation dans des moteurs diesel ont été déjà réalisés et un projet en cours de réalisation a repris cette initiative. Ainsi, la filière se trouve encore principalement au stade de la plantation de jatropha.

Pour le cas du bioéthanol, les initiatives sont encore restées au stade de projet sans une réelle réalisation sur terrain.

Tableau 8. Degré de développement actuel de la filière biocarburant

	Stade de développement				
	Projet	**Expérimentation**	**Plantation**	**Transformation**	**Commercialisation**
Ethanol combustible	→	→	→	→	→
	8 projets		Plantation paysanne	Petite distillerie (200L/jr)	Conditionnement dans bouteille de 1L Distribué dans quelques points de vente Combiné avec la vente de foyers à éthanol
Biodiesel	→	→	→	→	
	4 projets	Essai de multiplication pongamia	Plantation commerciale en régie	Plusieurs unités disponibles avec expérience dans l'extraction d'huile	
Bioéthanol	→				
	3 projets				

Les matières premières utilisées

A Madagascar, les expériences de production de bioéthanol ont été réalisées à partir de la canne à sucre, et du manioc pour le bioéthanol, tandis que le jatropha (*jatropha curcas et jatropha mahafalensis*) est la principale plante promue pour le biodiesel.

La canne à sucre est déjà exploitée pour la production de sucre de canne et des alcools de bouche. Madagascar dispose d'une importante industrie sucrière dont la matière première est la canne à sucre cultivée à une échelle industrielle ou en mode paysannat.

Le jatropha fut cultivé à grande échelle dans les années 1930, comme tuteur de la plantation de vanille et de poivre, ainsi que pour clôturer les champs. Le jatropha a l'avantage de ne pas être comestible. L'huile extraite peut être également utilisée dans la fabrication de savon ou comme source d'éclairage ou comme ingrédient dans les produits cosmétiques à Madagascar. L'utilisation du jatropha comme carburant de moteur diesel en mélange avec le diesel d'origine fossile était déjà une pratique connue pendant la 2ème guerre mondiale à Madagascar, notamment dans la partie sud du pays. Des projets d'exploitation d'autres matières premières comme les palmiers à huile ont émergé à certains moments, mais ont été abandonnés en 2009.

Les acteurs intervenant dans la filière biocarburant

Les investisseurs

De l'amont à l'aval, les investisseurs qui continuent d'intervenir dans la filière sont résumés dans les tableaux ci-après.

Tableau 9. les acteurs privés intervenant dans le sous-secteur biodiesel et bioéthanol à Madagascar

	Sociétés ou promoteurs	Régions	District	Objectif plantation en Ha	Plantation réalisée en Ha	Brève description
Biodiesel	**Phileol**	Androy	Tsihombe	ND	ND	Une société de droit malgache créée en 2008, Production et la commercialisation d'huiles végétales (filière oléagineuse). Un système d'approvisionnement direct auprès des paysans qui exploitent les cultures existantes en cours à travers le projet GEMAHA.
	Société Ikonda	Androy	Beloha Atsimo			Société créée en 2008 Matière première : jatropha État d'avancement en cours
	Fuelstock	Boeny	Marovoay	18 000	600	Société créée en 2008 Extraction d'huile de jatropha État d'avancement : en cours
	Canopy Madagascar	ND	ND	ND	ND	Société créée en 2017 Exploitation de Pongamia pour la production de biodiesel de seconde génération État d'avancement : en préparation
	Deltajatropha	Sofia	Antsohihy et Analalava	30 000	2 000	Société italienne en collaboration avec l'Eglise catholique (Frères mineurs capucines) Production de biodiesel à partir de jatropha État d'avancement : en cours
Bioéthanol	**SAIM**	DIANA	Ambilobe	5 000	120	Exploitation de la canne à sucre pour la production éthanol État d'avancement : en cours
	FP Mesic	Atsinanana		ND	ND	Exploitation de la canne à sucre pour la production éthanol combustible État d'avancement : en cours
	Obio Hamy	ND	ND	ND	ND	Exploitation de manioc pour la production éthanol combustible État d'avancement : en cours
	GREEN CO	Betsiboka	Maevatanana	5 000	80	Exploitation de la canne à sucre pour la production éthanol État d'avancement : en cours
	Green development S. A					Une société privée intervenant dans le cadre du mécanisme de développement propre. Il travaille en collaboration avec des partenaires locaux qui partagent les revenus provenant des crédits carbone générés par leurs activités Avec la collaboration de la Banque mondiale, depuis 2016, Green Development lance un programme de production d'éthanol domestique par l'exploitation de la canne à sucre qui vise la protection de l'environnement et la lutte contre la déforestation à Madagascar

Les acteurs des organisations non gouvernementales soutenant la promotion des biocarburants

Aux côtés des investisseurs et des institutions publiques (ministères), des organisations et des structures ont été parallèlement mises en place à différents niveaux pour accompagner le développement de la filière biocarburant, entre autres :

- l'OPEM au niveau des investisseurs : une organisation des producteurs d'éthanol ;
- une cellule de compétence sur la bioénergie mise en place par le Ministère de l'Énergie ;
- le Groupe de Travail pour l'Energie (GTE) qui a dynamisé pendant un certain temps le secteur des agro-carburants. Ce groupe a été renommé : Groupe de réflexion sur l'énergie regroupant les experts du secteur de l'Énergie dont le biocarburant est une filière entièrement considérée.
- La plateforme nationale agro-carburant durable (PAD) regroupant les acteurs techniques, économiques et politiques issues des PTF, du secteur public et privé local et de la recherche scientifique.
- Angovo Man'Eva, une association qui réunit les parties intéressées par le projet de l'Éthanol combustible à Madagascar (particuliers, sociétés, …)

Les différentes structures, liées directement ou non à des programmes/projets de biocarburants, ont pour objectif d'assurer le développement de la filière et ont participé directement comme indirectement à l'élaboration des propositions de loi pour régir le secteur.

Tableau 10. Les principales ONG intervenant dans la promotion des biocarburants à Madagascar

Dénomination	**Description (rôle, contribution)**
ONG Clean cooking Madagascar	Une ONG qui promeut l'énergie renouvelable auprès des ménages à Madagascar. Elle soutient le programme « Madagascar Ethanol Stove Program » tout en assurant que toutes les parties impliquées dans ce programme sont conformes aux exigences de ce programme afin d'assurer la meilleure qualité de celui-ci. L'objectif de ce programme est de vendre 100 000 réchauds à éthanol aux ménages malgaches d'ici 2020. En relation avec Association Angovo Man'Eva.
Plateforme de l'Agro-carburant durable (PAD)	Groupe de réflexion qui rassemble des acteurs de la filière des biocarburants incluant l'administration, le secteur privé et la société civile pour le cadrage règlementaire de la filière.
Association Angovo Man'Eva	Une association qui réunit les parties intéressées par le projet de l'éthanol combustible à Madagascar (les particuliers, les sociétés, …). Objectif : promouvoir et appuyer le programme éthanol combustible à Madagascar et encourager de nouveaux partenaires de ce programme.
Tany Meva	Une fondation environnementale à vocation communautaire à Madagascar intervenant dans la promotion des énergies renouvelables : promotion de l'utilisation de l'éthanol pour la cuisson, membre du groupe de travail éthanol. Tany meva et la Banque Mondiale ont lancé des projets pilotes en 2008 à Vatomandry et Ambositra, consistant à vulgariser l'usage de l'éthanol comme combustible du foyer. Ces projets de 2 ans ont prouvé leur efficacité socio-économique : la consommation d'éthanol par foyer de 6 personnes s'élève de 1 à 1,5 litres par jour.

Les partenaires techniques et financiers soutenant la promotion des biocarburants

Tableau 11. Les partenaires techniques et financiers intervenants dans la promotion des biocarburants à Madagascar

Dénomination	*Description (rôle, contribution)*
WWF	Une organisation travaillant à Madagascar depuis 1963 ayant comme mission principale la préservation durable de la particularité naturelle de certaines zones à Madagascar. Parmi son engagement, l'accompagnement du pays dans la transition énergétique propre notamment à travers la promotion des énergies renouvelables en accord avec la politique mondiale de WWF sur l'atténuation des effets du changement climatique ; l'établissement des conditions favorables intégrant l'environnement et la conservation dans les politiques sectorielles et en particulier les agro-carburants et l'énergie.
CIRAD	Avec l'appui du programme énergie de la COI, le CIRAD met en œuvre le projet GEMAHA qui consiste à la valorisation du Jatropha Mahafalensis dans le Sud de Madagascar en biocarburant.
Banque mondiale	Bailleur de fonds qui appuie les initiatives et les études en vue du lancement de l'utilisation de l'éthanol comme combustible à Madagascar. Elle travaille en collaboration avec les organismes existants au niveau national entre autres le WWF, Green Development, Tany Meva

4. Les projets et programmes actuels dans la filière biocarburant

31 projets ont été recensés dans le biodiesel en 2004, ils portaient sur une surface de 1 104 010 ha[17]. Une grande majorité de ces investissements sont restées au stade de la culture et plusieurs sociétés connues dans le domaine ne donnent pas aujourd'hui d'informations sur leur activité ou sont en arrêt d'activité ou encore ont investi dans d'autres filières agricoles.

Depuis 2016, quatre (4) principaux projets poursuivent leur investissement et/ou projettent de travailler dans le biodiesel : le projet de Canopy, GEMAHA, Fuelstock Madagascar et le projet Deltajatropha.

En ce qui concerne le bioéthanol, les projets sont suspendus ou en arrêt.

Le projet Canopy

Canopy est une firme internationale travaillant dans le secteur des énergies renouvelables. En matière de biocarburant, elle développe la culture de la Pongamia dans l'objectif de la production de biodiesel de seconde génération. Selon les études que le projet a menées

[17] Étude stratégique du secteur agrocarburant, WWF 2011

dans d'autre pays, cette plante est un arbre à croissance rapide produisant environ 40kg de graines par an avec une teneur en huile de 20%. La transformation de cette huile produit du biocarburant. Canopy a déjà une expérience de production du biocarburant à partir de la Pongamia (Low carbon Fuel) à travers le projet Investancia au Paraguay. Le rendement moyen en huile du Pongamia est de 800L/ha/an. Canopy à Madagascar est actuellement en cours de clonage de cette espèce en serre et de multiplication de pépinières. Le biocarburant ainsi produit doit être utilisé à la place du pétrole lampant et dans les générateurs diesel.

Le projet GEMAHA (génération d'électricité rurale à partir du jatropha mahafalensis)

Le projet GEMAHA est financé par la COI[18] et mis en œuvre par le CIRAD[19] en collaboration avec l'ADER[20], l'ESSA[21] et la société PHILEOL depuis Août 2017. L'objectif principal du projet est la génération d'électricité en milieu rural des zones du sud du pays (district de Tsihombe, d'Ambovombe et du plateau Mahafaly), en exploitant le biocarburant à partir de la plante Jatropha Mahafalensis afin de faire fonctionner des générateurs diesel.

Les tourteaux lors de l'extraction de l'huile seraient valorisés dans l'agriculture en tant qu'amendement organique ou utilisés dans l'alimentation animale ou comme combustible domestique. Le projet s'étalera sur 24 mois. Durant cette période, la production devrait atteindre 200 tonnes d'huile et alimenter trois groupes électrogènes, un de 50 kVA et deux de 30 kVA appartenant respectivement à Philéol, la Jirama à Tsihombe et à l'Hôpital central d'Ambovombe.

Projet de la société Delta jatropha

Le projet de la société Deltajatropha dans le biocarburant est de produire du biodiesel à travers l'exploitation de Jatropha. La société a investi dans la culture de jatropha dans la région Sofia, district Antsohihy et Analalava. La culture de jatropha atteint 2 000 ha, l'objectif

[18]COI : Commission de l'Océan Indien
[19] CIRAD : Centre de coopération Internationale en recherche agronomique pour le développement
[20] ADER : Agence de développement de l'électrification rurale
[21] ESSA : Ecole supérieures des sciences agronomiques

à terme est un objectif de 30 000 ha répartis en plusieurs lots. Le projet n'est pas encore arrivé au stade de la transformation.

La société Fuelstock

Fuelstock est une entreprise qui investit dans la culture du jatropha depuis 2008 dans la région Boeny. Depuis 2015, le jatropha en âge d'exploitation serait de 600 ha et le projet a entamé une phase expérimentale d'extraction d'huile et des tests d'utilisation dans des groupes électrogènes.

C. Ile Maurice

1. *Brève présentation du pays*

- **Géographie :**

La République de Maurice est une île du sud-ouest de l'océan Indien, située dans l'archipel des Mascareignes à environ 880 kilomètres à l'est de Madagascar et 170 kilomètres au nord-est de la Réunion. Cet État se compose de l'Île Maurice, de Rodrigues (580 kilomètres à l'est), des îles Agalega et de l'archipel de Saint-Brandon. D'une superficie de 1865 km^2, l'Île Maurice est d'origine volcanique, mais ne compte plus de volcans en activité. Elle se compose d'un plateau central qui s'élève progressivement vers le sud-ouest où l'île atteint son point le plus haut de 828 mètres au Piton de la Rivière Noire. Ce plateau est entouré de ce qui reste du cratère principal sous forme d'une chaîne de montagnes (Moka, le Corps de Garde, le Pieter Both) et quelques sommets isolés (le Piton du Milieu, la Motte à Thérèse).



Figure 10: Carte de Maurice

- **Climat :**

Maurice se caractérise par un climat de type tropical humide, tempéré par l'influence océanique des vents alizés. On distingue 2 saisons : l'été austral de novembre à avril, chaud et humide, et l'hiver austral de mai à novembre, dite saison sèche en raison de précipitations plus faibles. Au centre de l'île, la température varie de 13°C à 19°C en juillet-

août, et de 19°C à 25°C en janvier. La température côtière est supérieure d'environ cinq degrés à la température du centre de l'île.

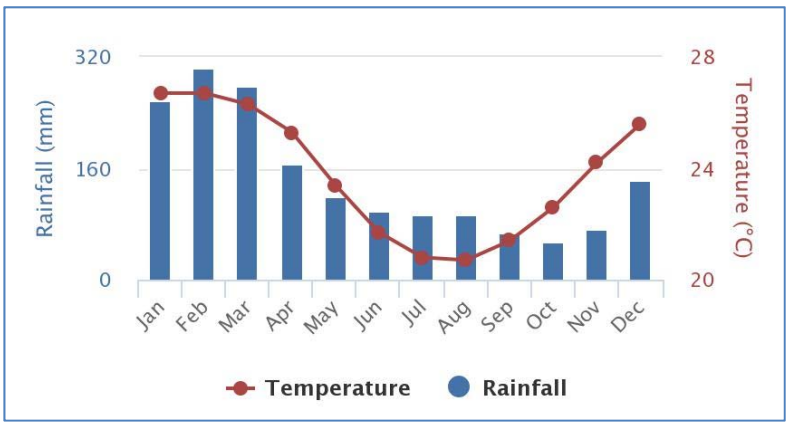


Figure 11 : Moyennes de températures et de précipitations à Maurice, 1991-2015 (source Banque Mondiale)

- **Démographie :**

La population était de 1 264 613 millions d'habitants en 2017 (en milieu d'année, source : Banque Mondiale) et la une croissance démographique est très faible ces dernières années (inférieurs à 0,1% entre 2015 et 2017). La densité de population de l'île est élevée, de 662 hab/km^2 en moyenne (2015), avec une forte concentration dans une bande très urbanisée allant de la capitale Port Louis, située au nord-ouest, jusqu'au centre du territoire où se situent autres villes principales, Quatre Bornes, Curepipe et Rose-Hill.

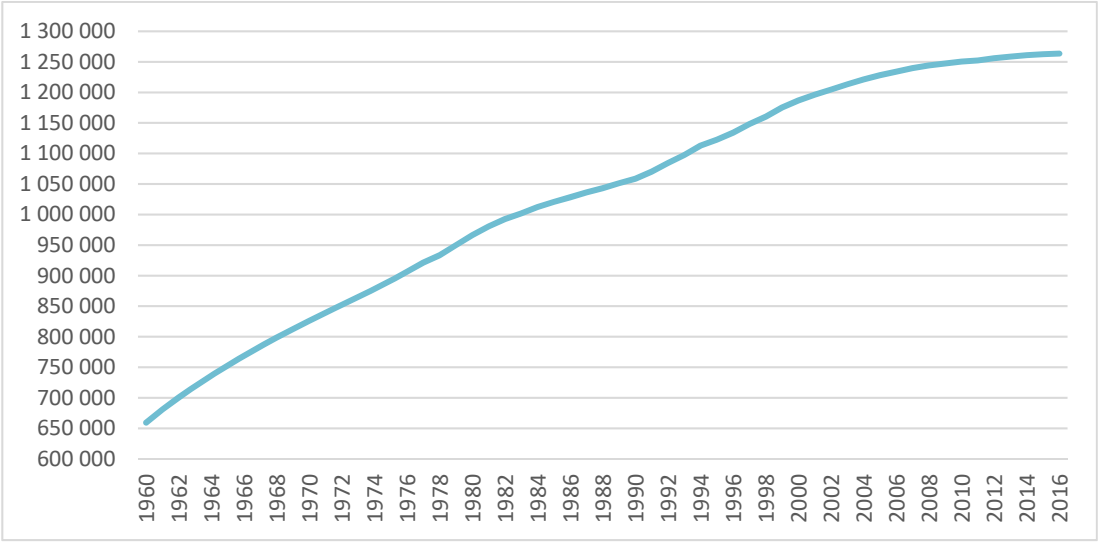


Figure 12: Evolution de la population totale à Maurice entre 1960 et 2016

(source Banque Mondiale, données, indicateur, population)

L'espérance de vie à la naissance est de 74 ans ; c'est la plus haute des pays africains. L'Indice de Développement Humain (IDH) de Maurice est de 0,781 en 2015, ce qui le situe au 64ème rang sur 188 pays (PNUD, 2016) juste derrière les Seychelles, dans la catégorie des pays à niveau de développement élevé. Le taux d'accès à l'eau potable et à l'électricité est proche de 100%. Ces données masquent cependant une augmentation du nombre de foyers au-dessous du seuil de pauvreté monétaire constaté en 2012 (Statistics Mauritius). 0,5% des individus étaient en dessous du seuil d'extrême pauvreté (1,9€ PPP 2011) en 2012

- **Contexte économique**

Depuis l'indépendance en 1968, Maurice a évolué d'une économie basée sur l'agriculture (20 % du PIB et 60 % des recettes d'exportation provenaient alors du sucre) à une économie relativement diversifiée avec une croissance soutenue mais qui s'est ralentie depuis 2008. Maurice est aujourd'hui classé par la Banque mondiale dans la catégorie des « pays à revenus intermédiaires, de la tranche supérieure » (PRITS). Le PIB en 2016 était de 12,16 Mds $ (Banque mondiale), le taux de croissance économique oscille ces dernières années entre 3,5% et 3,9%. Ces performances sont à imputer essentiellement au secteur tertiaire qui représente en 2016 74% du PIB, et en particulier à l'essor des services financiers et du tourisme. L'industrie représente 23% du PIB, l'industrie textile, le bâtiment et plus récemment le développement des télécommunications sont en tête. Enfin, l'agriculture ne représente plus que 3% du PIB et 7,5% de l'emploi total en 2016 (Statistics Mauritius).

La canne à sucre est historiquement la culture largement dominante à Maurice. Depuis la fin des quotas européens de sucre à tarifs garantis, la filière est en grande difficulté en raison d'une perte de compétitivité qui a engendré l'abandon d'une partie des terres notamment par les petits planteurs et une diminution progressive de la production, à raison de 1000 ha/an sur les 5 dernières années[22]. En 2017, la canne à sucre occupe encore 50 000 ha, soit 90% environ des surfaces cultivées et constitue 25 % des revenus du commerce extérieur

[22] la filière n'a fait qu'accumuler les difficultés depuis le début des années 2000 : « fluctuations brutales et effondrement des cours du sucre, dans les années 1990 et 2000 ; démantèlement progressif, depuis 2009, du « Protocole sucre » signé en 1975 entre l'Union européenne et 19 pays ACP (Afrique, Caraïbes, Pacifique) et qui accordait à Maurice à un accès préférentiel au marché européen via des quantités et des prix garantis ; et, enfin, annonce officielle, en 2017, de la fin des quotas sucriers européens, livrant désormais aux seules lois du marché le cours hasardeux de l'or blanc. » dans
« A Maurice, la canne à sucre dans tous ses états L'île Maurice en quête d'un second « miracle » (1/5). Production d'électricité, de carburant et de rhum : face aux aléas du cours de l'or blanc, le secteur se réinvente. », *Le Monde*, Par Olivier Piot, 22 mai 2018

(Statistics Mauritius). La production de canne à sucre a été en 2017 de l'ordre de 3,7 Mt pour 355 000 tonnes de sucre produit, ce qui représente une baisse de l'ordre de 3% par rapport à l'année précédente.

Pour faire face à cette crise, la filière canne a diversifié les marchés (sucres spéciaux, production de rhum agricole) et valorisé les sous-produits : la bagasse est déjà utilisée comme combustible dans les quatre centrales électriques mixtes charbon/bagasse de l'île ; des voies de valorisation de la mélasse sont également en cours de développement.

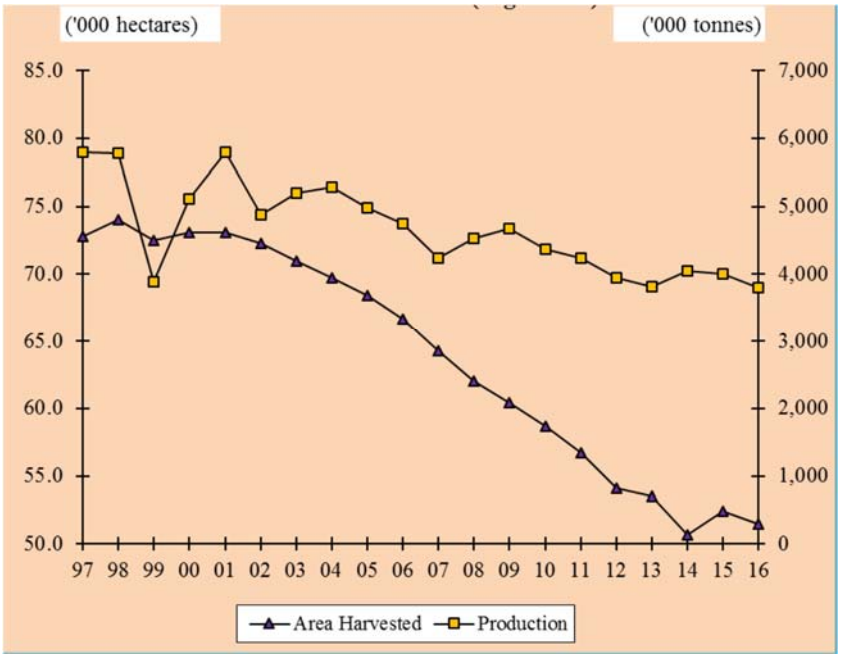


Figure 13: Surfaces cultivées et production de canne 1997-2016 (Statistics Mauritius, 2017)

2. Examen du profil énergétique de Maurice

- **Aperçu général du profil énergétique de Maurice :**

La consommation d'énergie primaire à Maurice est en 2017 de 1 603 kTEP (Statistics Mauritius 2017). Les énergies renouvelables (combustion de bagasse, hydraulique, solaire, éolien…) représentent 14% de la consommation en énergie primaire, le reste étant des ressources d'origine fossile (charbon, produits pétroliers) qui sont importées et dont Maurice reste donc fortement dépendante à ce jour (Figure 14). Sur les dix dernières années, on constate d'une part la diminution progressive de la part de la bagasse dans le mix énergétique, baisse imputable à la baisse de la production de canne à sucre évoquée plus haut, mais aussi la forte augmentation de l'importation de charbon et d'essence.

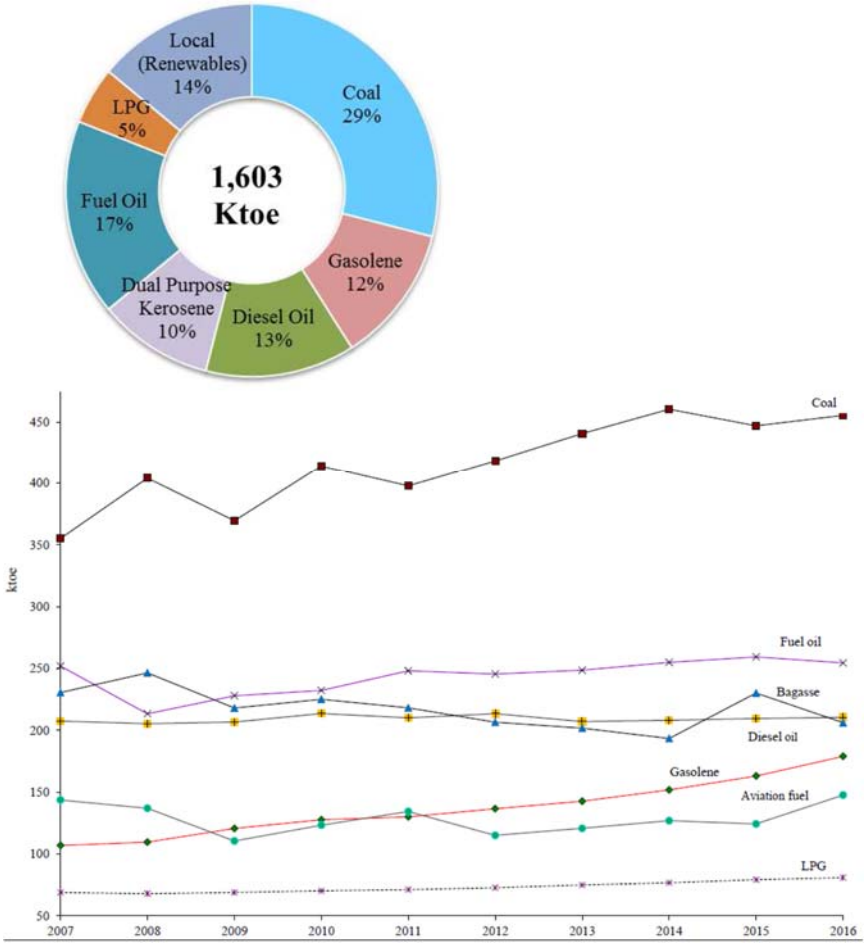
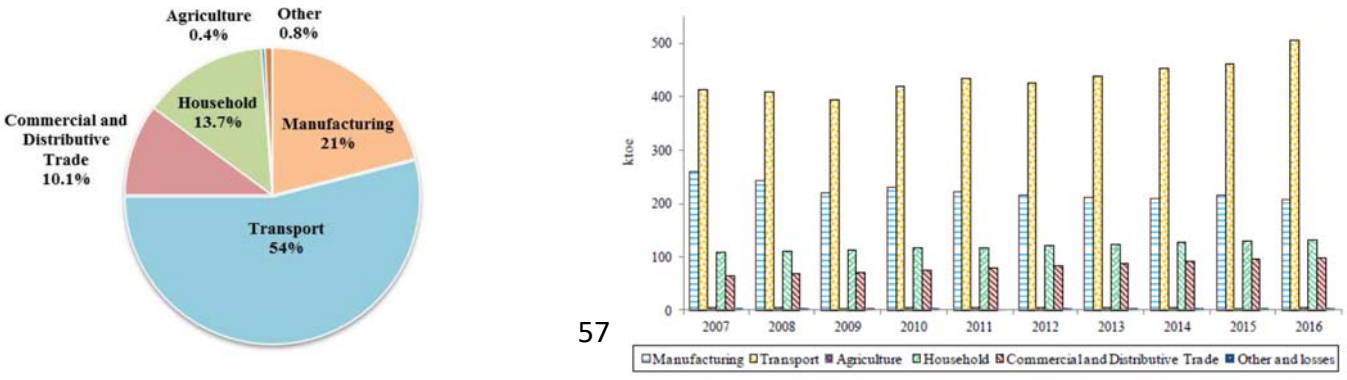


Figure 14: : Consommation en énergie primaire à Maurice en 2017 (en haut) et depuis 2007 - source : Statistics Mauritius 2017

La consommation totale en énergie finale est de 982 kTEP en 2017, le transport étant le secteur le plus consommateur (Figure 15), suivi du secteur manufacturier dont la consommation énergétique diminue légèrement ces dernières années que ce soit en électricité ou en chaleur. La consommation du secteur commercial ainsi que des ménages enregistre une progression de l'ordre de 3% par an en moyenne. L'électricité (55 %) et le gaz (41 %) sont les deux principales sources d'énergie pour les ménages.

Figure 15: Consommation d'énergie finale par secteur, 2016 et de 2007 à 2016 (source : Statistics Mauritius)



- **La production d'électricité à Maurice**

Comme illustré sur la Figure 15, la production totale d'électricité a nettement augmenté entre 2007 (2464 GWh) et 2017 (3157 GWh), conséquence de la croissance démographique et économique. L'essentiel de l'électricité est à ce jour produit à partir de fioul lourd et de charbon + bagasse durant les campagnes sucrières. 3 centrales mixtes sont liées à des usines sucrières : Savannah (sud), Union Flacq (est) et Belle Vue (nord) produisant une puissance installée totale de 200 MW. Les producteurs d'électricité indépendants (IPPs) ont produit environ 60% du total de l'électricité produite et le Central Electricity Board (CEB), les 40% restants. L'énergie thermique représentait environ 94% de la production globale.

En 2017, environ 21% de la production électrique est d'origine renouvelable, constituée principalement de la bagasse et de l'énergie hydroélectrique, et plus marginalement du photovoltaïque et de l'énergie éolienne.

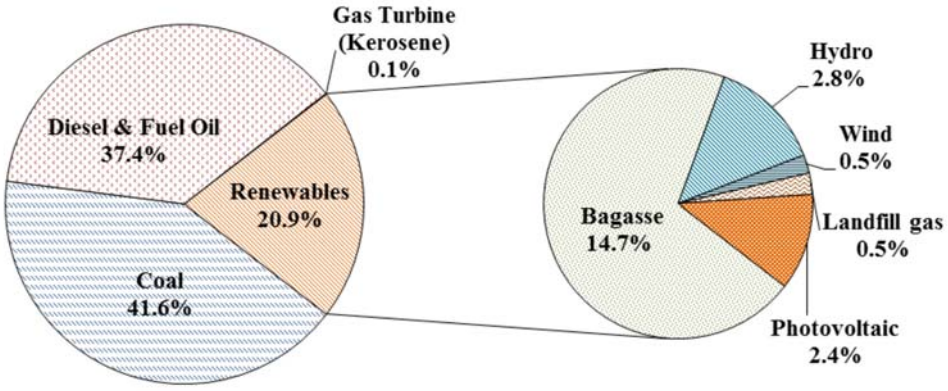


Figure 16: Production électrique renouvelable vs fossile (source : Statistics Mauritius, 2017)

- **Consommations de carburants liquides**

La consommation attachée aux transports s'est accrue de 2 %, le diesel représentant la principale énergie utilisée par ce secteur. Quant au secteur de l'aviation, sa consommation a baissé de 2 % alors que celle du transport maritime est restée stable.

Le Tableau 12 ci-dessous représente les évolutions de consommation en carburants liquides dans les transports routier, aérien et maritime. C'est essentiellement dans le secteur routier que la consommation en carburants a augmenté (taux de croissance annuel moyen de 3% depuis 2011), en corrélation avec le nombre de véhicules légers mis en circulation. Dans le secteur aérien, la consommation est fluctuante, en lien probablement avec les affluences

touristiques qui ont baissé en 2012, 2013, mais ont repris depuis 2014. En 2016, le transport routier consomme près de 59% des carburants importés à Maurice (46 % de l'ensemble des produits pétroliers), avec une part croissante d'essence qui dépasse désormais le diesel. Le secteur maritime ne consomme que 2% du carburant importé contre 28% à l'aviation. De 2016 à 2017, la consommation de carburant pour le transport terrestre est passée de 349 ktep à 361 ktep (+ 3,4%); de 148 ktep à 160 ktep (+ 8,1%) pour le carburant d'aviation et, de 9 ktep à 10 ktep (+ 11,1%) pour le transport maritime.

A signaler enfin que la fraction d'énergie renouvelable dans le secteur du transport est infime, l'intégralité des carburants étant importée et d'origine fossile.

Sectors (kTEP)	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Land	**293,1**	**304,2**	**310,1**	**319,1**	**330,8**	**348,7**
Gasoline	126,8	133,2	139,2	148,2	159,4	174,7
Diesel oil	161,5	166,3	166,5	166,8	168,0	170,2
LPG	4,9	4,7	4,4	4,0	3,4	3,8
Air Jet Fuel	**134,3**	**115,0**	**120,7**	**126,8**	**124,3**	**147,6**
Sea	**7,8**	**8,0**	**8,0**	**8,2**	**8,0**	**9,3**
Fuel Oil	3,4	3,5	3,4	3,5	3,1	3,9
Gazoline	3,3	3,4	3,4	3,5	3,7	4,2
Diesel oil	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
Total	**435,3**	**427,3**	**438,8**	**454,1**	**463,1**	**505,6**

Tableau 12: Consommation de carburant (en kTEP) du transport routier, aérien et maritime (source Statistics Mauritius, 2017)

3. Recensement du cadre réglementaire concernant les biocarburants

- **Gouvernance de Maurice en matière d'énergie**

Le Ministère de l'Énergie et des Services publics (MEPU) est responsable de la politique énergétique. Son portefeuille comprend l'énergie, l'eau et les eaux usées.

Le Central Electricity Board est habilité par la Central Electricity Board Act de 1964 à « préparer et exécuter des projets de développement ayant pour objet général de promouvoir, coordonner et améliorer la production, la transmission, la distribution et la vente de l'électricité » à Maurice. La loi de 1939 sur l'électricité (modifiée en 1991) et la loi

sur l'Office central de l'électricité fournissent le cadre législatif pour le secteur de l'électricité. La CEB produit environ 42% des besoins en électricité du pays à partir de ses 4 centrales thermiques et 4.4% de ses 8 centrales hydroélectriques, les 53.6% restants étant achetés auprès de Producteurs indépendants d'électricité, principalement des producteurs de sucre, qui produisent de l'électricité à partir de bagasse / charbon.

La State Trading Corporation (STC) est responsable de l'importation des produits pétroliers. La loi sur le pétrole comprend principalement des dispositions pour l'octroi de concessions de prospection et d'exploitation minière pour le pétrole. Cependant, à ce jour, Maurice n'a aucune source indigène connue de pétrole. La loi sur la protection du consommateur (prix et fournitures) de 1998 habilite le gouvernement à contrôler les importations et les prix des produits pétroliers.

Le Ministère de l'Environnement est responsable des normes, politiques et lois environnementales. La loi sur la protection de l'environnement et ses règlements fournissent un cadre institutionnel et législatif pour la gestion et la protection de l'environnement. Cette législation est généralement basée sur les normes européennes et les révisions sont faites si besoin.

Le Ministère de l'Agro-Industrie et de la Sécurité Alimentaire précise les engagements de Maurice dans la gestion de l'énergie et de l'environnement.

- Engagement avec l'environnement des Nations Unies (UNEP)

Maurice s'est engagé avec le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) depuis 2013 dans la mise en œuvre de l'initiative mondiale Global Fuel Economy Initiative en vue d'élaborer des stratégies et des politiques pour l'écologisation des transports. L'une des principales composantes de cette initiative en deux phases est d'élaborer des politiques et des mesures d'économie de carburant et d'efficacité des véhicules dans le but de réduire la consommation de carburant et les émissions de dioxyde de carbone des transports. Les transports à Maurice représentent 26% (ou 1032.1 Gg) des émissions totales de dioxyde de carbone.

- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)

Les contributions nationales (Nationally Determined Contributions) sont des engagements politiques que les « Parties » ont pris à la 21e conférence des Parties à la CCNUCC à Paris en

2015, afin de mettre en œuvre des programmes et des mesures pour contrôler les émissions de gaz à effet de serre et de s'adapter aux impacts des changements climatiques. Dans Le NDC de Maurice, le transport durable est l'une des mesures d'atténuation des changements climatiques qui a été identifiée.

* United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

- Engagement en matière d'énergie renouvelable « Ethanol Framework »

Afin de poursuivre les mesures visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre, le gouvernement a exprimé son ferme engagement de recourir à des énergies renouvelables. À cet égard, la Loi sur l'efficacité de l'industrie sucrière (Sugar Industry Efficiency Act) a été modifiée en 2016 pour fournir les lignes directrices et tracer la voie à la production d'éthanol à partir de la mélasse de canne et son utilisation dans le mélange avec de l'essence (MOGAS) pour les transports. Le gouvernement a récemment adopté une politique d'incorporation obligatoire à Maurice et a décidé que le niveau de mélange ne dépasserait pas 10% à ce stade. Le mélange commencerait d'abord par 5 % d'éthanol avec MOGAS.

- Production pour la consommation d'essence

La consommation d'essence des transports représente 53,2% de la consommation totale d'énergie qui est passée de 463ktoe en 2015 à 506 ktoe en 2016. La consommation de carburant pour le transport terrestre est passée de 331ktoe en 2015 à 349ktoe en 2016. La consommation prévue de l'essence pour les véhicules serait de 221 647 722 litres en 2019 et on présume qu'elle augmentera de 2% par année. Sur la base de projections linéaires de la tendance actuelle de la croissance des véhicules à Maurice, on prévoit que la flotte de véhicules va croître de 500 000 à 800 000 et bien au-dessus de 1 million en 2050. Cependant, avec la mise en œuvre du projet Metro Express, l'impact devrait être évalué. Sur la base des chiffres de consommation d'essence prévus pour 2019, le volume d'éthanol anhydre requis pour un mélange de 5% serait de quelque 11 Millions de litres et de quelque 44 000 tonnes de mélasse. En supposant un taux de croissance annuel de 2% pour la consommation d'essence, l'éthanol anhydre requis pour le mélange atteindrait quelque 14M litres par 2028 et 53 000 tonnes de mélasse.

Un Comité Directeur a été établi au niveau du ministère de l'agro-industrie et de la sécurité alimentaire composé de toutes les parties prenantes concernées pour examiner la mise en

œuvre du cadre d'éthanol (Ethanol Framework). Un plan d'action a déjà été préparé et les progrès sont surveillés de près.

- **Long-Term Energy Strategy (LTES)**

Le Long-Term Energy Strategy (LTES) préparé sous l'égide du MEPU en 2009 définit pour la période 2009-2025 les orientations et priorités en termes de politique énergétique. Outre le programme relatif à l'efficacité énergétique, le développement des énergies renouvelables (biomasse, éolien, photovoltaïque) figure parmi les priorités du plan. L'objectif global fixé par la LTES est d'atteindre un taux de 35% d'EnR dans le mix électrique d'ici 2025, dont 17% à partir de bagasse. Cet objectif a été repris dans le Plan 2012-2022 du CEB.

En ce qui concerne le transport et plus particulièrement l'approvisionnement en carburants, les orientations suivantes figurent dans la LTES :

- Diversifier les approvisionnements en carburant avec la fabrication ou l'importation de biodiesel tout en reconnaissant que la fabrication locale sera un projet à long terme car le gisement (sans référence concrète au type de ressource envisagé) était reconnu comme limité ;
- Introduire le mélange d'éthanol-essence à la pompe en utilisant l'E10 et en passant au E20 à un stade ultérieur. Environ 150 000 tonnes de mélasse sont disponibles sur une base annuelle renouvelable, dont 120 000 tonnes peuvent servir de charge dans la production de 25 millions de litres d'éthanol.

Malgré ces orientations, aucun biocarburant n'est produit localement à Maurice à ce jour, ni même importé et distribué en station-service.

- **Projet de loi sur la distribution de biocarburants**

En 2014, le gouvernement a initié une réflexion devant aboutir à un projet de loi rendant obligatoire l'essence E5[23,24] dans le cadre du déploiement à Maurice d'une filière de distribution d'éthanol reposant sur l'incorporation d'éthanol produit localement à partir de mélasse (voir ci-après). Ce projet national E5 concerne environ 12 millions de litres de bioéthanol fuel par an, qui correspondent à 5% de la consommation actuelle d'essence. Mais la loi n'a pas encore été officiellement promulguée et les dispositions ne sont pas encore connues.

[23] Communication personnelle, J. Desjardins – Omnicane – juin 2018
[24] https://www.lexpress.mu/article/249729/ethanol-bientot-le5-comme-unique-carburant-pour-vehicules

4. Recensement des expériences biocarburants et des acteurs majeurs de ces filières

- **Production de bioéthanol par Omnicane**

Le groupe Omnicane est un sucrier énergéticien exploitant la canne à sucre mauricienne. Depuis le 8 juillet 2014, ce groupe exploite une usine de production de bioéthanol située à La Baraque qui a pour objectif de produire de 22 à 25 millions de litres d'alcool surfin à partir de 90 000 tonnes de mélasse, résidu de l'industrie sucrière. Le procédé comprend les étapes suivantes (Figure 17):

- la fermentation du sucre contenu dans la mélasse en « vin » constitué de 8-9% d'éthanol et en CO_2 ;
- la distillation de l'éthanol qui comprend des opérations successives de stripping, hydrosélection, rectification et déméthylisation pour obtenir de l'éthanol neutre à 96,4 % ;
- l'éthanol est stocké dans une cuve tampon de 1000 m^3, avant le transport jusqu'à un stockage de 5500 m^3 à Mer Rouge.

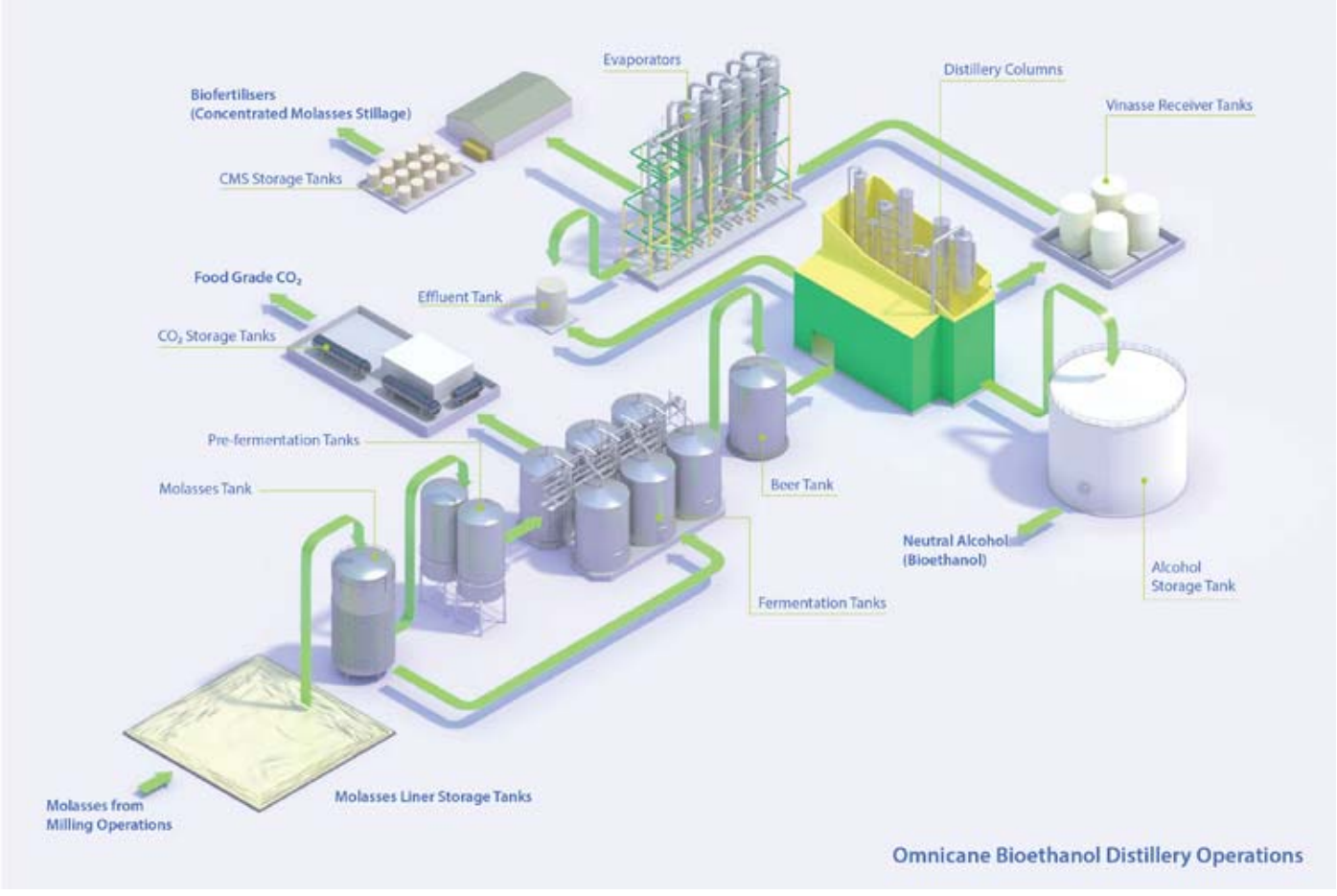


Figure 17 : Usine de production du bioéthanol à Maurice (Source : Omnicane)

A signaler que le procédé génère comme sous-produits :

- ✓ 7500 t de CO_2 (valorisable en industrie alimentaire) ;
- ✓ environ 75000 tonnes de vinasse ou CMS (Concentrated Molasses Stillage), résidu de la distillation valorisable comme fertilisant organique. Omnicane porte également un projet de méthanisation de la vinasse, qui permettra la production d'1,5 MWél.

Ce procédé a été mis en place en juillet 2014. Il a été dimensionné sur la base d'une capacité de traitement de 90 000 tonnes de mélasse, dont la moitié est issue de la sucrerie de la Baraque, et l'autre moitié d'autres sucreries.

A ce jour, faute de débouché local (filière biocarburant), la totalité de l'éthanol produit est exporté. Par ailleurs, le bioéthanol produit n'est pas déshydraté et par conséquent n'a pas le grade nécessaire pour être incorporé à l'essence (E5 ou E10). La qualité est toutefois satisfaisante en tant que combustible pour la turbine à combustion à la Réunion.

Le groupe Omnicane est préparé à investir dans une unité de déshydratation dès qu'un marché local économiquement viable émergera.

- **<u>Biodiesel : peu d'initiatives de production.</u>**

A notre connaissance, aucun projet majeur de production de biodiesel de première génération n'a vu le jour. Quelques initiatives éparses sont à signaler concernant des essais de substitution de diesel par des huiles végétales destinées à la production d'électricité.

On peut citer par exemple un projet mené en 2010[25] par l'Université de Maurice (UoM) et le Mauritius Standards Bureau (MSB), qui ont mené une étude de faisabilité sur l'utilisation de la noix de coco et d'huile végétale usagée comme alternative au diesel dans la production d'électricité. Le projet, qui était une initiative du Mauritius Research Council (MRC), en collaboration avec la Société de développement des îles périphériques (IDOC), visait à réduire la dépendance au diesel. Les tests ont été menés sur un générateur de 60 kVA de la

[25] https://business.mega.mu/2011/08/02/university-mauritius-explores-possibility-using-coconut-oil-bio-fuel/

Central Water Authority (CWA), à la station de pompage d'Ebène, avec l'utilisation d'un carburant mixte : huile de coco, huile végétale usagée et diesel.

D'une façon générale, le potentiel des ressources oléagineuses reste cependant trop marginal pour envisager le développement d'une telle filière.

D. La Réunion

1. *Brève présentation du pays*

- **Géographie**

La **Réunion** est une île du sud-ouest de l'océan Indien, située dans l'archipel des Mascareignes à environ 700 kilomètres à l'est de Madagascar et 170 kilomètres au sud-ouest de l'île Maurice. D'une superficie de 2 512 km^2, la Réunion est une île volcanique au relief très accidenté, caractérisé par

i) deux massifs, le piton des Neiges, sommet le plus élevé de l'océan Indien (3 070m) et le Piton de la Fournaise, l'un des volcans les plus actifs du monde ;
ii) trois vastes cirques creusés par l'érosion ;
iii) des plaines entre les deux massifs volcaniques ;
iv) une mince frange littorale urbanisée où se concentre une grande partie de la population ;
v) des ravines formées par l'érosion dans la roche basaltique, qui découpent ce territoire dans la hauteur.

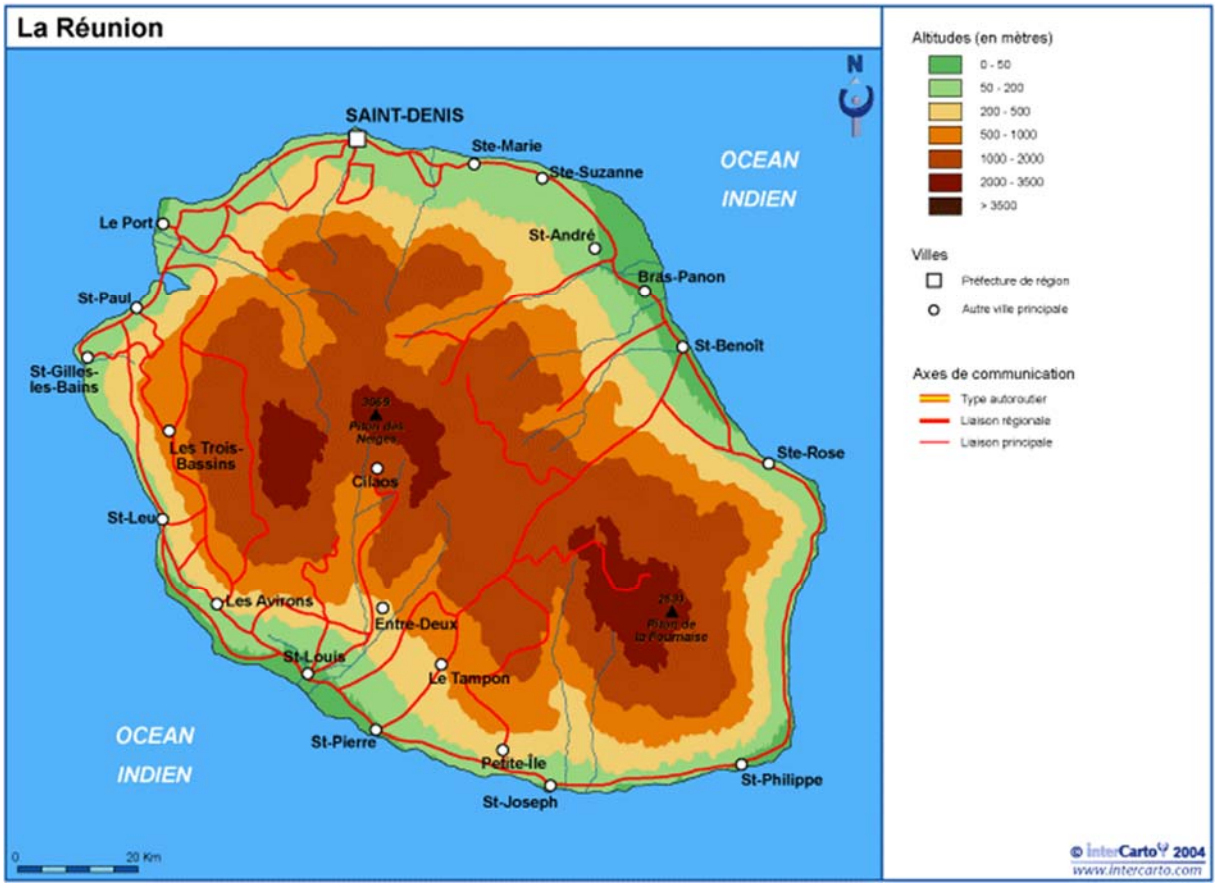


Figure 18: Carte de la Réunion

- **Climat**

La Réunion se caractérise par un climat de type tropical humide tempéré par l'influence océanique des vents alizés, mais aussi par de fortes disparités de précipitations (est/ouest), et de températures (zones côtières/zones d'altitude). On distingue 2 saisons : l'été austral de décembre à avril, chaud et humide, et l'hiver austral de juin à octobre, dite saison sèche en raison de précipitations plus faibles. Les mois d'avril/mai et novembre/décembre sont des saisons de transition. Même en saison sèche, les précipitations restent importantes sur l'est et les flancs du volcan.

Administrativement, la Réunion forme un département et région d'outre-mer français (DROM) doté d'un conseil régional et d'un conseil départemental. Du point de vue de l'Union européenne, la Réunion constitue une région ultra-périphérique. L'île est membre de la Commission de l'océan Indien.

- **Démographie et niveau de vie**

La population, de 600 000 habitants en 1990, atteint 850 700 habitants au 1er janvier 2015 (source : INSEE[26]), soit une augmentation annuelle moyenne de 1,7%, qui connaît un fléchissement depuis 2010 (+0,7% par an entre 2010 et 2015, Figure 19), et est estimé 860 815 au 1er janvier 2017[27], confirmant le fléchissement.

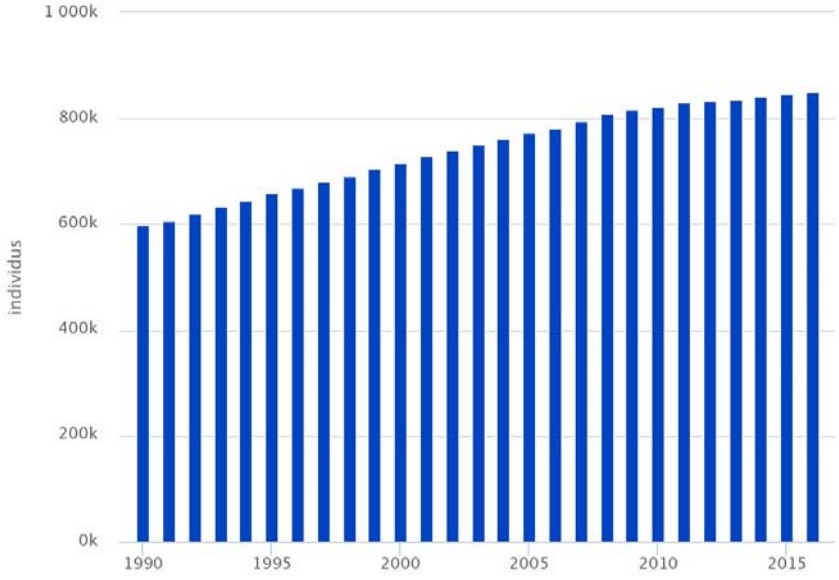
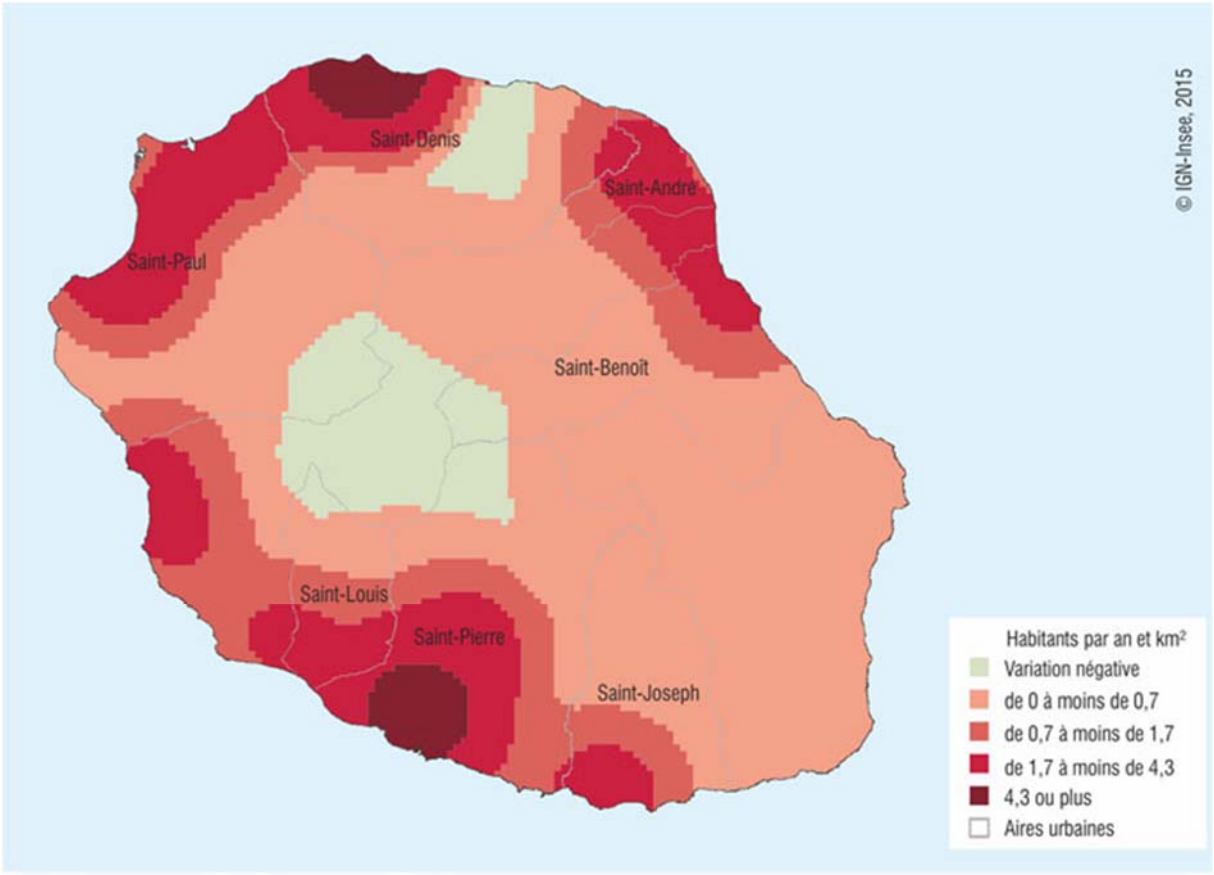


Figure 19: Evolution de la démographie à la Réunion, population totale estimée (source : INSEE, Nextat 2018)

[26] chiffres du dernier recencement https://www.insee.fr/fr/statistiques/2012730#tableau-TCRD_044_tab1_departements
[27]

La densité moyenne est élevée, de 339 hab/km^2 et surtout inégalement répartie sur le territoire (Figure 20), 75% de la population étant concentré sur le littoral ou les mi-pentes. La commune la plus peuplée de l'île est le chef-lieu Saint-Denis (près de 150000 hab.) au nord. Les deux autres principales aires urbaines sont Saint-Paul et Saint-Pierre.



Source : Insee, recensements de la population 2006 et 2011.

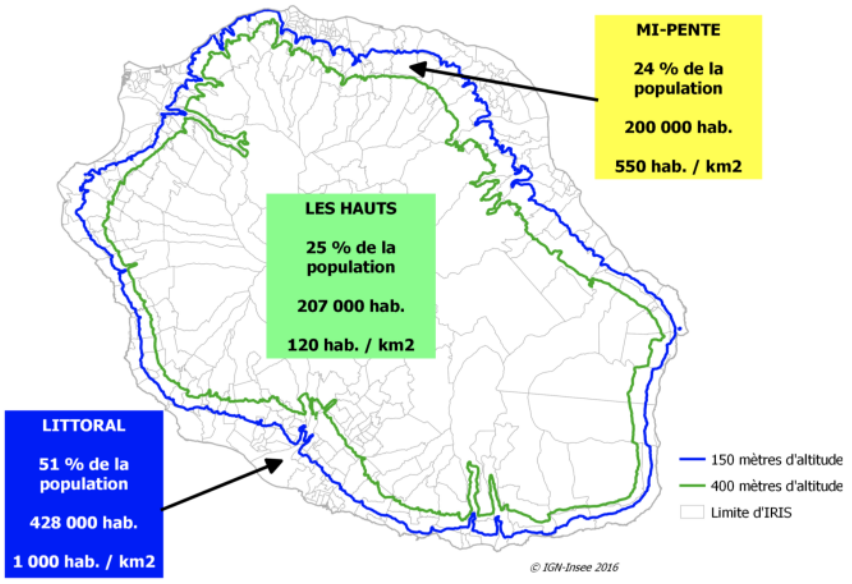


Figure 20: Répartition de la densité de population à la Réunion (source : INSEE)

Le taux de fécondité s'est stabilisé à 2,5 enfants par femme en moyenne depuis 1990. L'espérance de vie des réunionnais progresse et se rapproche de celle de la France métropolitaine (écart de 2 ans) et la structure de la population évolue sensiblement. La part des plus de 60 ans a en effet triplé depuis 1967, alors que celle des jeunes a diminué. La Réunion reste tout de même le 3ème département français le plus jeune.

- **Contexte économique**

Source : IEDOM, rapport annuel 2015 et INSEE bilan économique 2015

L**a Réunion est une des régions les plus dynamiques de France** en créations d'emplois. Malgré tout, le taux de chômage, bien qu'en diminution depuis 3 années consécutives, reste structurellement élevé **:** 23% en moyenne annuelle en 2017, année où il se stabilise[28]. Cette situation paradoxale est une conséquence de l'augmentation démographique. Les moteurs de création d'emplois ont évolué depuis 2000. La construction, contributeur important jusqu'en 2008, a été fortement touchée par la crise, et l'emploi se concentre depuis dans les activités tertiaires, marchandes et non marchandes.

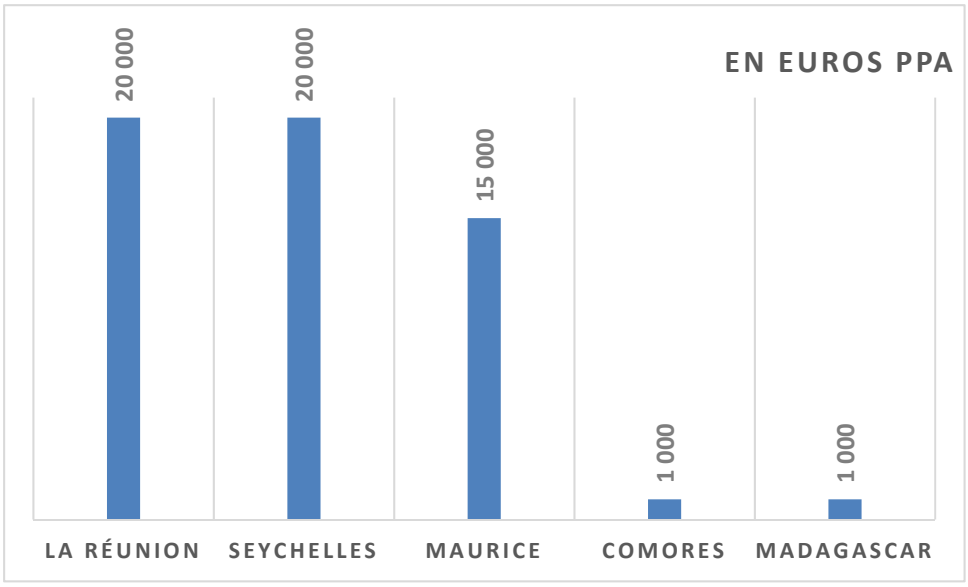


Figure 21 : Estimations de PIB par habitant en 2014 dans la zone océan Indien

Note : Les PIB sont arrondis pour tenir compte des incertitudes liées à la conversion en euros parité de pouvoir d'achat, PPA
Sources : Banque Mondiale, Organisation Internationale du Travail, Eurostat, Insee, Statistique Mauritius, Bureau des statistiques des Seychelles[29].

[28] chiffres correspondant à la définition du BIT du chômage publiés par l'INSEE : https://www.insee.fr/fr/statistiques/3534445

[29] in « L'économie réunionnaise Un secteur marchand moins développé qu'en province », Jérôme Bourgeois, Aurore Fleuret et Philippe Paillole, INSEE ANALYSES RÉUNION, No 32, Paru le : 05/06/2018, https://www.insee.fr/fr/statistiques/3553188#tableau-figure1

La croissance économique est soutenue, +3% entre 2014 et 2017, entraînant avec elle une hausse importante du pouvoir d'achat : **le revenu** disponible par habitant est de 17 300 € en 2016, soit 84% du niveau national. Le PIB reste 1,5 fois plus faible qu'en France, mais il est élevé pour la zone *Océan Indien* (Figure 21). Il faut toutefois souligner que 4 Réunionnais sur 10 vivent sous le seuil de pauvreté monétaire, contre 14,2%, moyenne de la France entière[30].

L'économie se caractérise par une forte tertiarisation, les services non marchands restent encore prépondérants avec une importante représentation des fonctions d'administration, d'enseignement et de santé.

Le tissu économique est essentiellement composé de petites entreprises, dont les créations ont tendance à baisser depuis 2010. Le niveau des exportations des entreprises réunionnaises reste faible, de même que le taux de R&D, essentiellement porté par l'administration. L'investissement privé reste faible et se situe autour de 3,5 milliards d'euros. Du fait de sa situation insulaire et de son emplacement géographique, la Réunion importe énormément : les importations représentent près de 5 milliards d'euros. La balance commerciale réunionnaise est extrêmement déficitaire, puisque les exportations sont quant à elles de 500 millions d'euros.

Agriculture

L'agriculture est le principal fer de lance de l'économie réunionnaise. Elle repose notamment sur la canne à sucre, mais également sur l'élevage, ainsi que sur l'exploitation d'autres cultures. La production locale couvre près de la moitié de la demande en produits alimentaires de l'île, le reste étant importé. La SAU (superficie agricole utile) représente près de 43 300 ha et 57 % de celle-ci est destinée à la canne à sucre. La production agricole s'élève à environ 400 millions d'euros et le secteur représente 6 % de la population active, soit près de 22 000 emplois. Le sucre et les produits de la pêche sont les deux premiers postes à l'export, avec respectivement 70 et 65 millions d'euros. Concernant la production animale, c'est le secteur de la volaille qui est le premier producteur de viande à la Réunion.

[30] hors Mayotte, La Guadeloupe et la Guyane. Seuil à 60% de la médiane des niveaux de vie. Source INSEE, Analyse de la distribution par département (2015). https://statistiques-locales.insee.fr/#c=indicator&i=filosofi.tp60&s=2015&selcodgeo=974&view=map2

Le secteur agroalimentaire est, quant à lui, le principal secteur industriel de l'île et constitue 32 % de ses emplois et 42 % de son chiffre d'affaires. Les exploitations agricoles réunionnaises sont de très petite taille, avec une moyenne de 5,8 ha par exploitation, contre 78 ha en France métropolitaine. Il y a 7600 exploitations dans le département.

La filière canne représente la première source d'emplois dans l'agriculture réunionnaise. Près de 200 000 tonnes de sucre sont produites chaque année (201 000 t en 2015, 196 000 t en 2014). En plus de production de sucre, la canne sert également à l'élaboration du rhum (à partir de la mélasse) et sa bagasse est utilisée comme source d'énergie et est transformée dans deux centrales thermiques. La canne est traitée au sein de deux usines, situées à Bois-Rouge et au Gol (propriété du groupe TEREOS Océan Indien), disposant d'une capacité de traitement d'un million de tonnes de canne. La production de canne varie selon les années entre 1,5 et 2 millions de tonnes. Cependant, la filière canne reste fragile et est soumise aux conditions météorologiques ainsi qu'aux fluctuations du marché mondial du sucre. Elle est largement subventionnée et dispose d'un dispositif d'aide face aux pertes de revenus. La filière canne fait face à l'arrêt des quotas sucriers en 2017.

La pêche

La ZEE (Zone Économique Exclusive) est de 315 000km², quasiment identique à celle de la France continentale. De plus, les pêcheurs réunionnais sont autorisés à se rendre dans la ZEE malgache, suite à un accord bilatéral entre Antananarivo et Bruxelles. Cependant, l'importance de la pêche à la Réunion décroît au fil du temps.

L'activité de la pêche à La Réunion se répartit en trois catégories : la pêche artisanale (durée <24h, à proximité des côtes), la pêche palangrière (pêche côtière et de la pêche au large, entre 24h et 4 jours) et la grande pêche industrielle. La première est destinée au marché local, tandis que les deux autres sont excédentaires et exportatrices.

Le tourisme

Le tourisme constitue une part importante et croissante dans l'économie réunionnaise. Le classement, en 2010, des pitons, cirques et remparts de l'île (qui correspondent à la zone centrale du parc national) au patrimoine mondial de l'UNESCO y a grandement contribué.

L'industrie et l'artisanat

Avec une part de 4,4 % de la valeur ajoutée totale en 2011, l'industrie occupe une place modeste dans l'économie réunionnaise par rapport au plan national (13,8 % de la VA). Les industries agroalimentaires (IAA) représentent près de la moitié de la VA créée par le secteur d'activité.

La Chambre des métiers a recensé 16 200 entreprises artisanales actives en 2015, soit 4,9 % de plus qu'en 2014. L'immense majorité d'entre elles (96%) sont des entreprises de moins de 10 salariés. La répartition par branche professionnelle montre la nette prépondérance du secteur du bâtiment (39,3 % du nombre total d'entreprises artisanales), devant celui des services (31,2 %).

2. *Examen du profil énergétique de la Réunion*

- **Aperçu du profil énergétique de La Réunion :**

La consommation d'énergie primaire à la Réunion a fortement augmenté entre les années 2000 et 2010, puis s'est stabilisée. Les énergies renouvelables (combustion de bagasse, hydraulique, solaire, éolien…) représentent 13-14% de la consommation en énergie primaire, le reste étant des ressources d'origine fossile (charbon, produits pétroliers) dont la Réunion reste fortement dépendante à ce jour. Le taux de dépendance énergétique a explosé dans les années 80-90, mais il est stabilisé, entre 86-88 %, depuis 2005 (Figure 22).

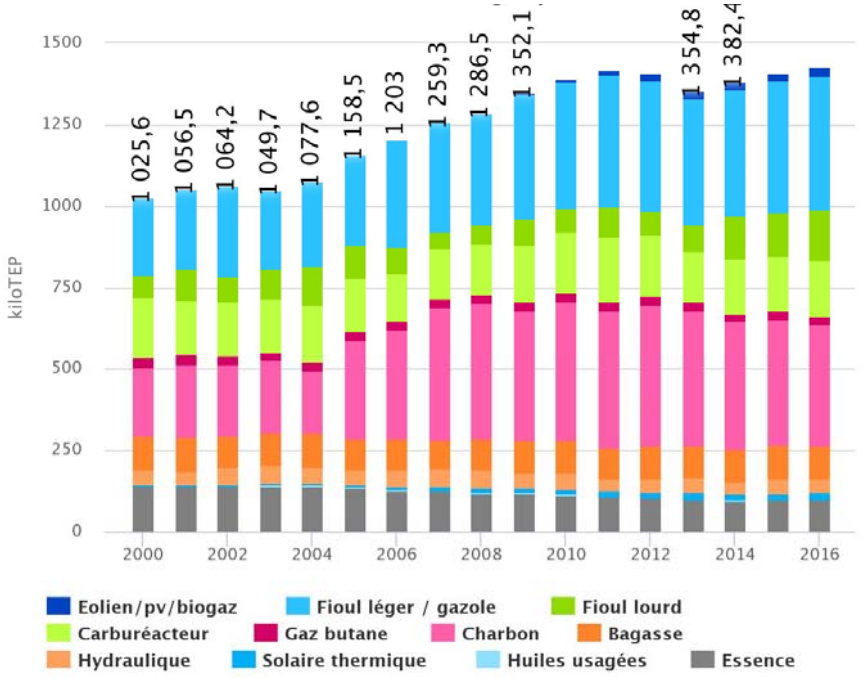


Figure 22: Evolution de la consommation en énergie primaire – La Réunion (source : SPLER, Nextat 2018)

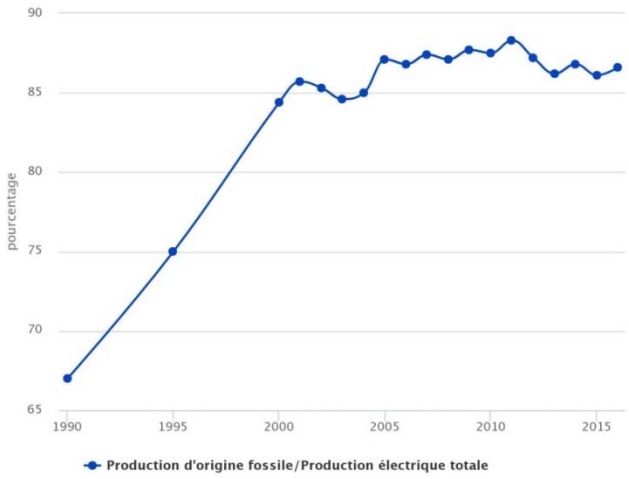


Figure 23: Taux de dépendance énergétique

(source : SPLER, Nextat 2018)

Les transports représentent 63 % de l'énergie finale consommée à La Réunion, mais cette proportion diminue au profit de l'électricité qui représente aujourd'hui 23% de l'énergie finale (Figure 23).

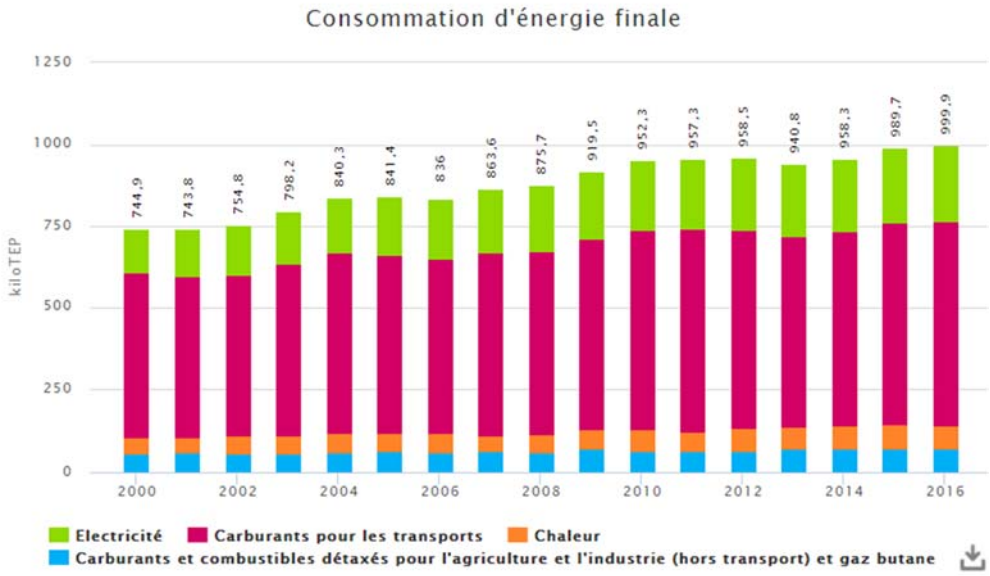
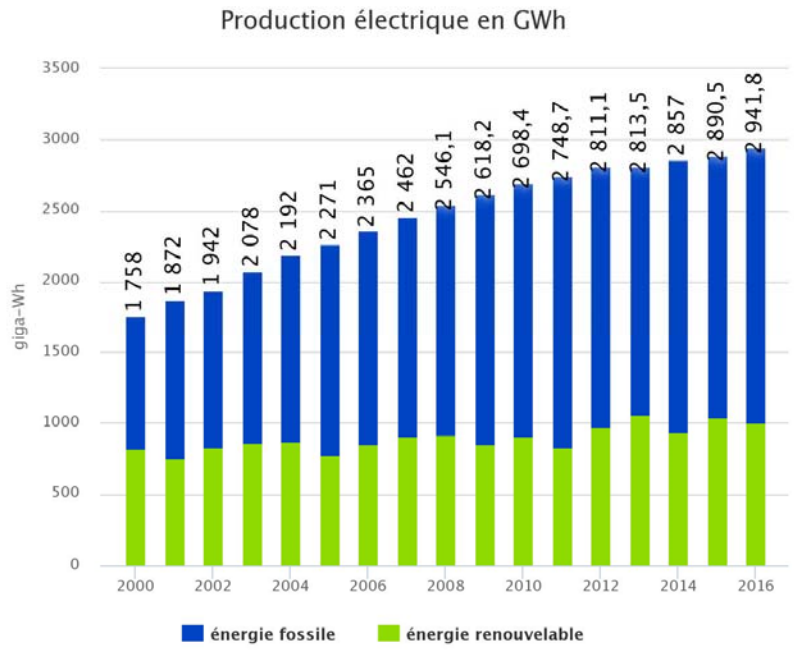


Figure 24: Consommation d'énergie finale

(source : SPLER, Nextat 2018)

- **<u>La production d'électricité à la Réunion</u>**

La Figure 25 illustre d'une part la forte augmentation de la production d'électricité depuis 2000 (croissance qui tend à se stabiliser), mais aussi l'évolution de la part renouvelable par rapport aux sources fossiles. L'équilibre entre l'offre et la demande a été assuré par une forte hausse de la consommation en charbon entre 2004 et 2010.



(source : SPLER, Nextat 2018)

Figure 25: Production électrique renouvelable vs fossile

L'essentiel de l'électricité est à ce jour produite à partir de fioul lourd (centrales turbine à combustion et moteur diesel, au Port-Est, d'une puissance installée totale de 291 MW) et de charbon + bagasse durant les campagnes sucrières (centrales thermiques Albioma du Gol et de Bois Rouge, puissance installée totale de 210 MW). En 2015, les énergies renouvelables représentaient 36% du mix électrique réunionnais, dont près de la moitié d'hydraulique. Les énergies intermittentes représentent 21% de la puissance installée des moyens de production. Depuis 2008, le parc éolien n'a pas connu d'évolution en termes de puissance installée alors que le parc des systèmes photovoltaïques augmente chaque année (+5% entre 2012 et 2013).

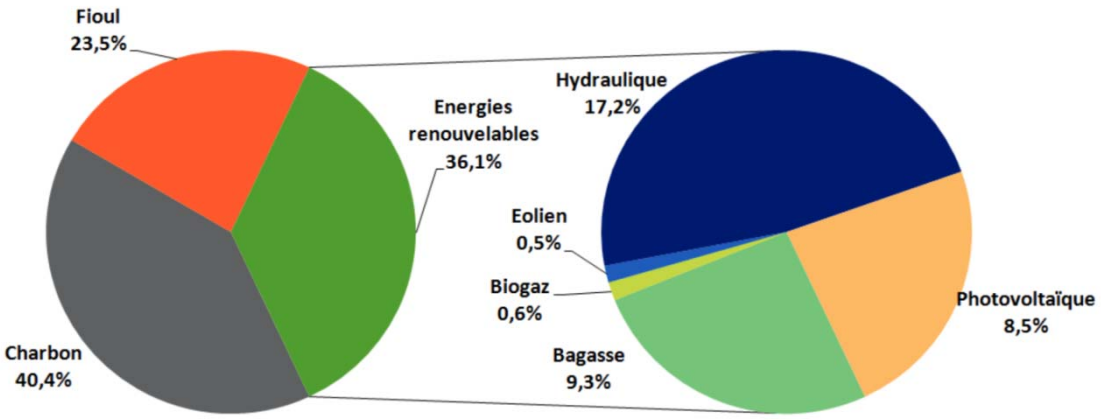


Figure 26: Production électrique par type d'énergie en 2015 (source : OER)

La diversification des ENR dans la production d'électricité figure parmi les priorités de la transition énergétique de la Réunion, avec un objectif fixé à 50% d'électricité renouvelable en 2020 et 100% en 2030.

- **Consommations de carburants liquides**

Comme illustré sur la Figure 27, c'est essentiellement dans le secteur routier que la consommation en carburants a le plus fortement augmenté (taux de croissance annuel moyen de 1% depuis 2009), en corrélation avec le nombre de véhicules légers mis en circulation. Le transport routier consomme aujourd'hui plus de 70 % des carburants importés (64 % des produits pétroliers) à la Réunion, avec une part plus importante de diesel (Figure 28), qui s'explique par la politique fiscale appliquée à la Réunion.

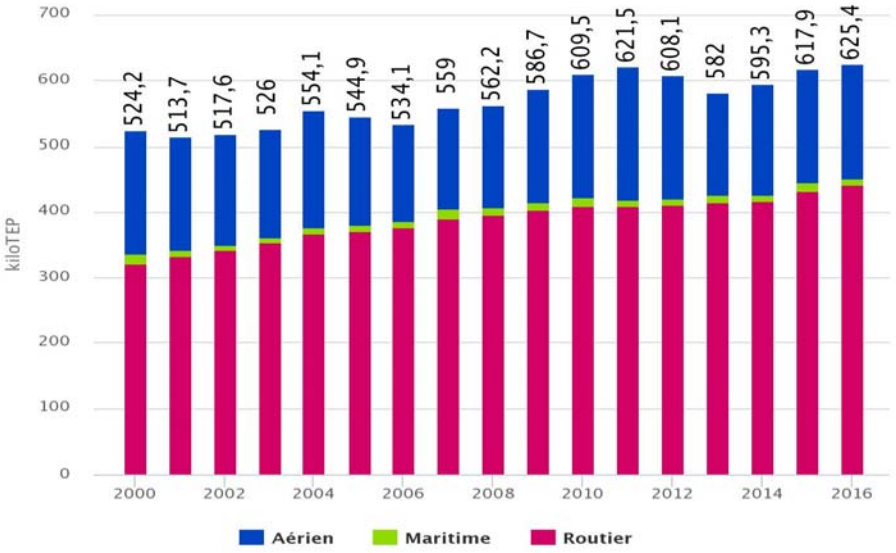


Figure 27: Consommation de carburants dans les transports (source : SPLER, Nextat2018)

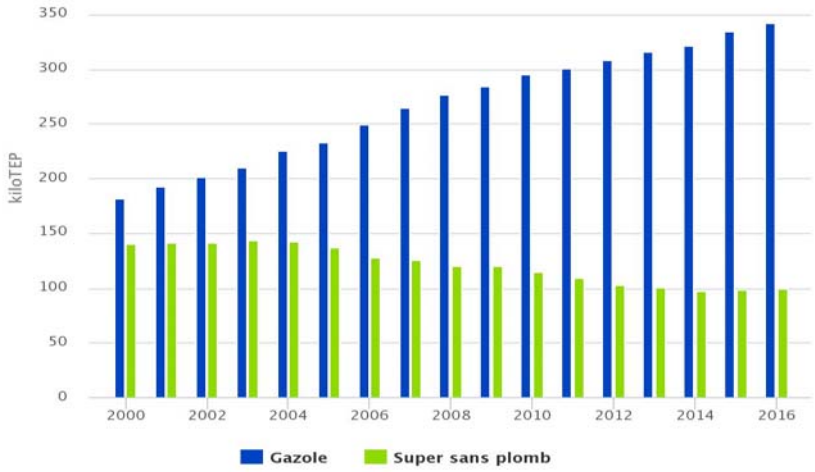


Figure 28: Consommation en carburants dans les transports routiers (source : SPLER, Nextat 2018)

A signaler que la fraction d'énergie renouvelable dans le secteur du transport est infime, l'intégralité des carburants étant importée et d'origine fossile.

3. *Recensement du cadre réglementaire concernant les biocarburants*

La Réunion est d'un côté soumise à la réglementation française et européenne, mais bénéficie d'un autre côté de dispositions spécifiques en tant que département et région d'Outre-Mer. En particulier, la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) de métropole ne s'impose pas à la Réunion qui a sa propre PPE en tant que ZNI (zone non interconnectée).

- **Réglementations et objectifs européens**

La Directive 2009/28/CE (Renewable Energy Directive dite RED) fixe un objectif d'usage de 10% d'énergie renouvelable dans les transports à l'horizon 2020.

- Pour contribuer à l'atteinte de cet objectif, un biocarburant doit être « durable », c'est-à-dire répondre à des critères définis dans la directive.
- L'un des critères porte sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre apportée par le biocarburant par rapport au carburant fossile. Pour que le biocarburant soit durable, cette réduction doit être d'au moins 35%. Cette valeur sera portée à 50% en 2017 et 60% en 2018.
- Les autres critères sont liés à la durabilité de la production agricole.

La Directive 2009/30/CE (Fuel Quality Directive dite FDQ) modifie les spécifications des carburants en autorisant l'incorporation de quantités plus importantes de biocarburants, et fixe un *objectif contraignant* de réduction des émissions de gaz à effets de serre des carburants par unité d'énergie :

- les spécifications environnementales définies par la directive indiquent une teneur maximum en biocarburant à 10% vol pour l'essence (Ethanol) et à 7% vol pour le gazole (EMAG) ;
- l'utilisation de biocarburants et autres énergies renouvelables dans les transports doit permettre une réduction de 6% en 2020 des émissions de GES des carburants par rapport à 2010.

En 2015, **la directive 2015/1513 dite « CASI » (Changement d'Affectation des Sols Indirect)** modifie les directives EnR et 2009/30/CE et précise notamment les modalités d'application suivantes :

- la directive confirme l'objectif de 10 % d'EnR dans les transports en 2020 avec
    - un plafond de 7 % pour les biocarburants en concurrence alimentaire ;
    - un objectif indicatif de 0,5 % en 2020 pour les biocarburants avancés ;
- elle définit la liste des matières premières qui permettent d'élaborer des biocarburants avancés.

Ces critères s'appliquent également aux biocarburants produits à partir de matières premières en provenance de pays tiers. Ces critères s'appliquent à toute la chaîne de production et de distribution des biocarburants, dont les étapes vont du champ jusqu'à la distribution des carburants destinés à la consommation. En cas de mélange de lots de matières premières, de produits semi-finis ou de biocarburants, les opérateurs économiques doivent mettre en œuvre un système de bilan massique. Les opérateurs économiques qui prennent part à cette chaîne doivent être en mesure de démontrer que les critères de durabilité ont été respectés, que les informations sont fiables et qu'un contrôle indépendant des informations a été mis en œuvre.

- **Législation française et dispositions fiscales**

La France a transposé fin 2011 les dispositions des directives RED er FQD et mis en place des dispositifs fiscaux visant à promouvoir l'utilisation des biocarburants.

- ✓ La défiscalisation partielle des biocarburants pour les productions issues d'usines agréées sous la forme d'une réduction de la TICPE (Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques). Il s'agit d'une exonération partielle de la TICPE destinée à assurer la compétitivité des filières de biocarburants compensant leur surcoût de production par rapport aux carburants d'origine fossile. Seuls les biocarburants produits par des entreprises agréées suite à un appel d'offre communautaire peuvent bénéficier de cette réduction. Cette défiscalisation est conforme à la Directive 2003/96/CE sur la fiscalité de l'énergie, qui permet aux États membres d'avoir une fiscalité spécifique aux biocarburants, afin d'en assurer le développement et la promotion.
- ✓ Une taxe à acquitter en cas de défaut d'incorporation : l'article 266 quindecies du Code des Douanes instaure un prélèvement supplémentaire de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) portant sur tous les volumes mis à la consommation et dont le montant est déterminé par l'application d'une valeur forfaitaire au volume correspondant à la différence entre l'objectif annuel d'incorporation et le taux d'incorporation effectivement réalisé, pour chacune des filières essence et gazole. « Son taux est fixé à 7,5 % dans la filière essence et à 7,7 % dans la filière gazole. Il est diminué à proportion de la quantité d'énergie renouvelable des biocarburants contenus dans les carburants soumis au prélèvement mis à la consommation en France, sous réserve que ces biocarburants respectent les critères de durabilité prévus aux articles L. 661-3 à L. 661-6 du code de l'énergie. » [31]

L'article 43 de la *Loi de transition énergétique pour la croissance verte*[32] prévoit qu'il convient désormais d'accorder la priorité au développement des biocarburants avancés (deuxième et troisième génération) tout en préservant les investissements réalisés dans les

[31] Article 266 quindecies du code des douanes, modifié par LOI n°2016-1918 du 29 décembre 2016 - art. 60 (V), Modifié par LOI n°2017-1837 du 30 décembre 2017 - art. 19, version en vigueur au 1 décembre 2018.
[32] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte

filières de production des biocarburants conventionnels. Les objectifs d'incorporation de biocarburants avancés dans les carburants sont définis dans le décret 2016-1442 du 27 octobre 2016 relatif à *la Programmation pluriannuelle de l'énergie*[33].

Les typologies de biocarburants hors de la Réunion

Les biocarburants sont essentiellement utilisés en mélange avec les carburants d'origine fossile. Les carburants distribués en stations-service contiennent des biocarburants :

- les supercarburants SP95 et SP98 contiennent jusqu'à 5 % en volume d'éthanol ou 15 % en volume d'ETBE (éther éthyle tertiobutyle) ;
- le supercarburant SP95-E10 contient jusqu'à 10 % en volume d'éthanol ou 22 % en volume d'ETBE ;
- le gazole contient jusqu'à 8 % en volume d'EMAG (esters méthyliques d'acide gras), plus communément appelé « biodiesel » ;
- le superéthanol E85 contient entre 65 % et 85 % en volume d'éthanol.

En dehors des carburants distribués en stations-service, les biocarburants peuvent être utilisés dans des conditions spécifiques :

- le « gazole B30 » contient jusqu'à 30 % en volume d'EMAG. Il est autorisé pour les véhicules de flottes captives disposant d'une logistique d'approvisionnement en carburant dédiée. Ce carburant n'est pas disponible à la vente au grand public, car il n'est pas compatible avec les moteurs de nombreux véhicules diesel déjà mis en circulation et qui nécessite des conditions de maintenance adaptée.
- le carburant « ED95 » contient jusqu'à 95 % d'éthanol, le reste étant composé d'additifs permettant l'auto-inflammation du mélange. Le 29 mars 2016, le Ministère de l'Environnement a posé un arrêté relatif au carburant ED 95, qui peut être utilisé à des fins professionnelles, notamment dans les transports publics, dans les transports de marchandises et dans des moteurs à allumage par auto-inflammation (de type « diesel » spécifiquement adaptés).
- les huiles végétales pures (HVP) : les agriculteurs et les pêcheurs sont autorisés à utiliser de l'huile végétale pure dans les moteurs des tracteurs et autres engins agricoles ainsi qu'à bord des navires de pêche.
- Les collectivités locales peuvent utiliser, à titre expérimental, des huiles végétales pures ou en mélange, dans leurs véhicules non destinés au transport de passagers, sous réserve d'avoir préalablement signé avec l'État un protocole précisant notamment les obligations de suivi et de contrôle régulier des véhicules.

[33] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe

Cadre réglementaire et fiscal spécifique à la Réunion

Selon l'article 266 quindecies, VI, du Code des douanes les dispositions de la directive européenne relatives à l'incorporation de 10% des biocarburants dans l'essence et le gasoil ne s'appliqueront dans les départements d'outre-mer qu'à compter du 1er janvier 2019.

Il existe plus généralement des spécificités dans la fiscalité locale appliquée à la Réunion sur les carburants, par rapport à celle pratiquée en métropole, ce qui confère aux collectivités locales une importante autonomie fiscale en matière de politique énergétique.

- la Taxe Spéciale de Consommation de carburants

L'article 266 quater du code des douanes national institue dans les DOM une taxe spéciale de consommation (TSC) sur les carburants suivants : (i) supercarburant ; (ii) essence ; (iii) gazole.

Cette taxe se substitue à la Taxe Intérieure de Consommation (TIC) applicable en métropole. Le taux de cette taxe est fixé par le Conseil Régional et ne peut dépasser les plafonds de la TIC métropolitaine. Les taux pour la Réunion étaient en 2018 de :

- 61.46 € par hectolitre pour le sans plomb 95 et le sans-plomb 98 ;
- 42.46 € par hectolitre pour le gazole.

Les bénéficiaires de cette taxe sont le Conseil Régional, le Département les Communes et l'EPCI Transport de La Réunion.

- l'octroi de mer[34]

L'octroi de mer, en vigueur dans les DROM, est applicable à la plupart des produits importés. Elle est perçue par l'administration des douanes ; le Conseil Régional est seul compétent pour décider du niveau de taxation. Elle ne s'applique pas à certains usages professionnels (BTP, agriculteurs, pêcheurs). L'octroi de mer taxe historiquement les carburants à La Réunion de manière à favoriser l'usage du gazole par rapport au sans-plomb. Ainsi les taux applicables au 1er juillet 2014 étaient :

- 22.5% (octroi de mer 20.5 % et octroi de mer régional 2%) pour le sans-plomb,
- 5% (octroi de mer 2,5% et octroi de mer régional 2,5%) pour le gazole.

[34] loi n° 2004-639 du 2 juillet 2004 relative à l'octroi de mer modifiée par la loi n° 2015-762 du 29 juin 2015

L'octroi de mer est dû au moment de la mise en consommation du produit et donc payé par le consommateur final.

- la TGAP

Prévue à l'article 266 quindecies du code des douanes, la TGAP vise à favoriser l'incorporation des biocarburants dans les essences et le gazole. Elle est due par les personnes qui mettent à la consommation en France de l'essence et du gazole. Son taux est fixé à 7, 5% dans la filière essence et à 7,7% dans la filière diesel. Elle ne sera cependant applicable à la Réunion qu'à partir du 1er janvier 2019.

- la TVA

Alors que la TVA est appliquée à taux plein sur les énergies fossiles en Métropole, elle n'est pas appliquée aux carburants importés et mis en vente à la Réunion (article 295 du code général des impôts).

- **Gouvernance de la Réunion en matière d'énergie**

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2016-2023) constitue le volet opérationnel « Énergie » du schéma régional climat air énergie de La Réunion (SRCAE), adopté en décembre 2013 en application des lois Grenelle de 2010 et 2012. Si, de par la loi, la PPE est co-élaborée par l'État et la Région, les travaux d'élaboration se sont déroulés à La Réunion sous l'égide de la gouvernance énergie de La Réunion, qui rassemble l'État, les collectivités, EDF, le SIDELEC, l'Ademe et les acteurs du domaine de l'Énergie.

La PPE précise les objectifs de politique énergétique, sur l'ensemble des usages (électricité, transport, chaleur et froid), hiérarchise ses enjeux, identifie les risques et difficultés associés et permet ainsi d'orienter les travaux dans les années à venir concernant la gestion de l'ensemble des énergies. Elle porte sur la période 2016-2023, avec une révision en 2018. La PPE prévoit que le taux d'indépendance énergétique passe de 16 à 27 %, ou, en ne considérant que l'usage électricité, de 38 à 72 %.

En ce qui concerne le transport, les orientations de la PPE ne concernent pas le développement de filières biocarburants mais plutôt le développement de véhicules propres, électriques ou hybrides ou utilisant du bio méthane (cars interurbains).

4. Recensement des expériences biocarburants et des acteurs majeurs de ces filières

- **Étude de projet pilote de transport en commun au bioéthanol**

En 2016, la Région Réunion a missionné la SPL énergies Réunion pour mener à bien une étude de faisabilité consistant en un projet pilote de transport en commun au bioéthanol carburant[35]. Le scenario évalué consistait à produire localement du bioéthanol en valorisant le gisement disponible en mélasse, générée par les usines sucrières à la Réunion et exportée. Ce gisement a été estimé à 15-20 000 tonnes, correspondant à un potentiel d'environ 3.5 à 4 millions de litres de bioéthanol, soit 3.1 ktep, soit encore 0.7% de la consommation énergétique des transports.

Néanmoins, tout le gisement disponible de mélasse produite localement approvisionnera finalement le projet de TAC *turbine à combustion* de la société Albioma, producteur indépendant d'électricité, ce qui ne permet pas a priori d'envisager de suite à cette étude.

- **Production de biocarburant par bioalgues**

BIOALGOSTRAL est une société spécialisée en biotechnologie des microalgues. Créée en septembre 2008, elle est située à Saint Denis de La Réunion sur la plateforme scientifique du CYROI. Elle se positionne plus particulièrement sur le développement d'un algo-carburant. La technologie relève plus des biocarburants de 3ème génération qui sera décrite dans le chapitre suivant de ce rapport. Néanmoins, BIOALGOSTRAL est régulièrement cité comme un acteur potentiel pour approvisionner la TAC en biocarburants sans que des objectifs quantifiés soient vraiment établis à notre connaissance.

[35] A signaler une étude bioGNV de la SPL Energies pour le compte de la Réunion, étude qui devrait être disponible avant fin 2018.

E. Seychelles

1. *Bref présentation des Seychelles*



Figure 29: Carte des Seychelles

- **Géographie**

Archipel de la partie occidentale de l'océan indien, les Seychelles comptaient 95 843 habitants au 31 décembre 2017 (Bureau national de statistiques seychellois). La République des Seychelles se compose de plus de 116 îles réparties sur 1,4 million de kilomètres carrés de mer au milieu de l'océan Indien occidental. Mahe est l'île la plus importante avec 81 800 habitants sur 455 km^2 (27 km de long et 11 km de large, altitude maximale de 905 m). Les deux autres îles d'importances majeures en termes de taille et de population sont Praslin et La Digue, à 33,6 km et 48 km de Mahé respectivement. Ces trois îles, sont de type granitique et offrent des paysages rocailleux. Elles concentrent 98% de la population. Les autres îles sont coralliennes et vouées au tourisme ou à la culture de cocotiers.

- **Climat**

le climat des Seychelles est de type tropical avec des températures qui varient entre 25°C en août et 31°C en avril. On distingue 2 saisons, l'une humide d'octobre à avril avec un climat chaud et humide, un vent faible et des pluies fréquentes et brèves. L'autre saison, de mai à

octobre, est plus sèche avec un vent de sud-est qui souffle de 15 à 25 nœuds. Les mois les moins ensoleillés (moins de 5 heures par jour) sont décembre et janvier avec des pluies généralement denses. La hauteur moyenne des précipitations est de 2200 mm/an avec cependant des variations importantes entre les îles, principalement par rapport à leur altitude et leur position. Du nord au sud, elles varient conformément à la distribution spatiale des précipitations dans l'Océan indien.

- **Démographie**

La croissance démographique dans l'archipel est dynamique. La population locale se rapproche actuellement des 100 000 habitants. Selon les statistiques publiées, la population de l'archipel est arrivée à 95 843 habitants en 2017 contre 94 677 l'année précédente. Le taux de croissance démographique est de 1,2 % par an. Cette rapide expansion de la démographie aux **Seychelles** devrait se poursuivre.

- **L'accès à l'eau et l'énergie aux Seychelles**

De façon générale, les ressources en eau souterraine sont assez limitées sur les îles granitiques comme les Seychelles. Sur les îles principales de Mahé, Praslin et La Digue, la principale ressource en eau potable provient à 92% de bassins et réservoirs alimentés par de nombreux ruisseaux et rivières. Des usines de dessalement de l'eau de mer ont été construites sur les trois îles principales afin de renforcer l'approvisionnement en eau potable (8%).

Avec plus de 96% de la population qui a accès à l'électricité, les Seychelles sont entièrement dépendantes des combustibles fossiles importés pour la production d'électricité et les transports. En 2009, l'élaboration d'une seconde politique énergétique nationale (National Energy Policy) a été décidée afin de réduire cette dépendance. De nombreuses campagnes de sensibilisation auprès du grand public ont été menées, d'abord afin d'économiser l'énergie et aussi afin de développer les énergies éolienne et photovoltaïque.

- **L'économie des Seychelles**

Avec un PIB/habitant atteignant les 15 410 $ (2016, World Bank) et une croissance économique relativement forte au cours de la dernière décennie, les Seychelles sont classées, selon le FMI, dans la catégorie des pays à revenu intermédiaire de la catégorie supérieure. En 2016, la croissance économique (5,9 %) était principalement tirée par le tourisme et la pêche. En 2017, elle reste dynamique (4,2%).

Le tourisme est la principale industrie locale, et fait vivre environ 30 % de la population. En 2016, 303 177 touristes sont venus visiter l'archipel (276 000 en 2015). Ce tourisme est principalement orienté vers le marché européen et le haut de gamme.

Faute de terres arables, **le secteur agricole** compte peu (8% de la population active), en effet sur l'ensemble des Seychelles, on dénombre seulement un total de 30 Km^2 de terres agricoles (6,5 % de la superficie totale). Le secteur est caractérisé par une production pluviale et des niveaux de productivité relativement faibles. En volume de production (en tonnes), la noix de coco, les légumes et les bananes sont les principales cultures, tandis qu'en valeur de production (en roupies seychelloises), les noix et les fruits préparés sont les principales cultures, principalement destinées à l'exportation. Entre 1999 et 2009, la production de noix de coco a diminué de 59% et la production de bananes de 11%, tandis que la production de légumes a augmenté de 26%.

Le secteur de la pêche s'est considérablement développé au cours des dernières décennies et est particulièrement important dans le secteur agricole du pays.

Le secteur manufacturier ne compte que pour 8% du PIB (principalement la conserverie de thon).

Ce pays est structurellement importateur, à la fois de biens de consommation et de fournitures liées aux investissements.

2. *Examen du profil énergétique des Seychelles*

- **Aperçu général du profil énergétique du pays**

La consommation d'énergie primaire des Seychelles est tributaire à 99,5% de produits pétroliers importés. Ces carburants sont importés et revendus par la Seychelles Petroleum Company (SEPEC), qui est en charge de la fourniture et de la logistique de ravitaillement en carburants du marché intérieur, ainsi que du ravitaillement des navires et des avions.

Comme mis en évidence Figure 30, entre 2000 et 2015 la consommation en énergie primaire est passée de 107 kTEP à 187 kTEP, avec un taux de croissance annuel moyen de 3,8%. En 2015, la facture énergétique des Seychelles a représenté 25,15% de sa facture totale d'importation.

Il convient de noter que plus de 90% des importations énergétiques sont constituées de combustibles liquides : Jet A1, essence, Gasoil et Fuel lourd.

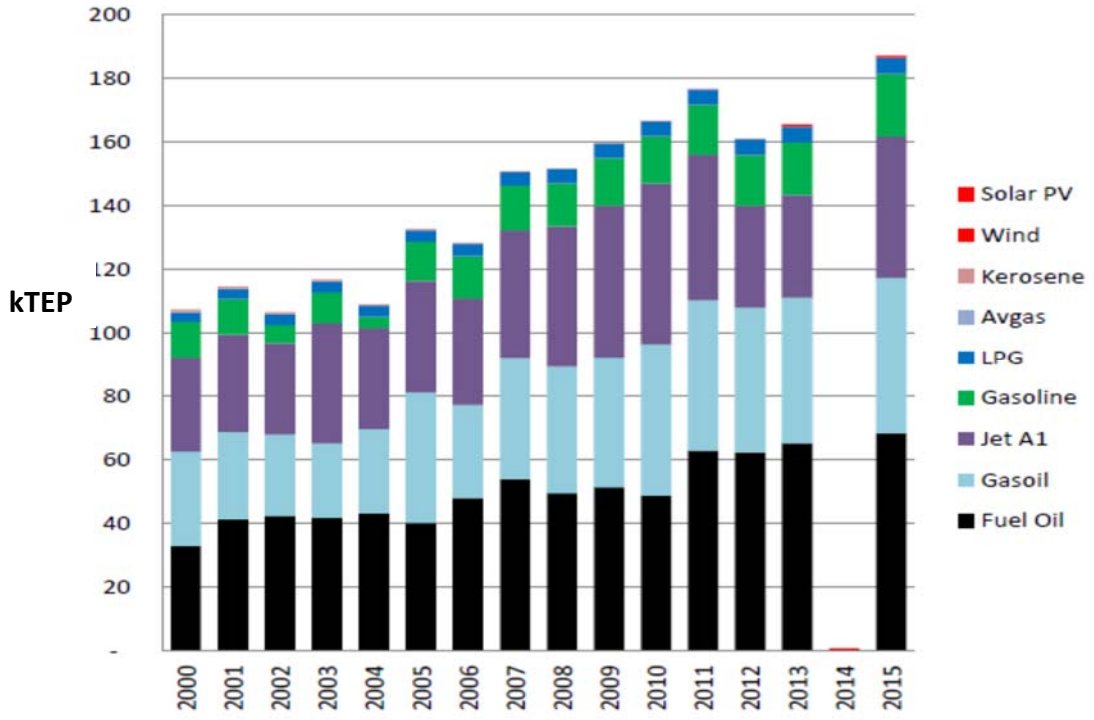


Figure 30 : évolution des consommations en énergie primaire des Seychelles entre 2000 et 2015 (données pour 2014 non disponibles) [36] [37]

La part de l'énergie renouvelable a commencé à être visible en 2013 avec l'implantation d'éoliennes et de PV Solar Home System. Du PV en toiture de 100 à 300 kWp existe et un champs photovoltaïque de 5 MWp sera mis en œuvre en 2019. Ces deux sources d'énergies renouvelables permettent de produire de l'électricité qui est injecté sur les réseaux (cf. ci-dessous B.3.).

- **<u>Consommations de carburants liquides par secteurs d'activités</u>**

Dans la Figure 31 sont reportées les évolutions de consommations d'énergie finale aux Seychelles entre 2000 et 2015, selon la nature des énergies. En comparaison avec la Figure 30, il ressort qu'une grande partie du fuel lourd et un peu de gasoil sont utilisés pour alimenter les centrales thermiques de production d'électricité.

[36] *Analysis of* seychelles energy*Seychelles Energy demand in 2000-2015*, Presentation by the Seychelles Energy Commission , Mamy Razanajatovo , Green Climate Fund Workshop at SFA on 20th, Sept 2016
[37] *Integrated Energy Study for Seychelles for 2015-2035*, Parts 1&2, Seychelles Energy Commission

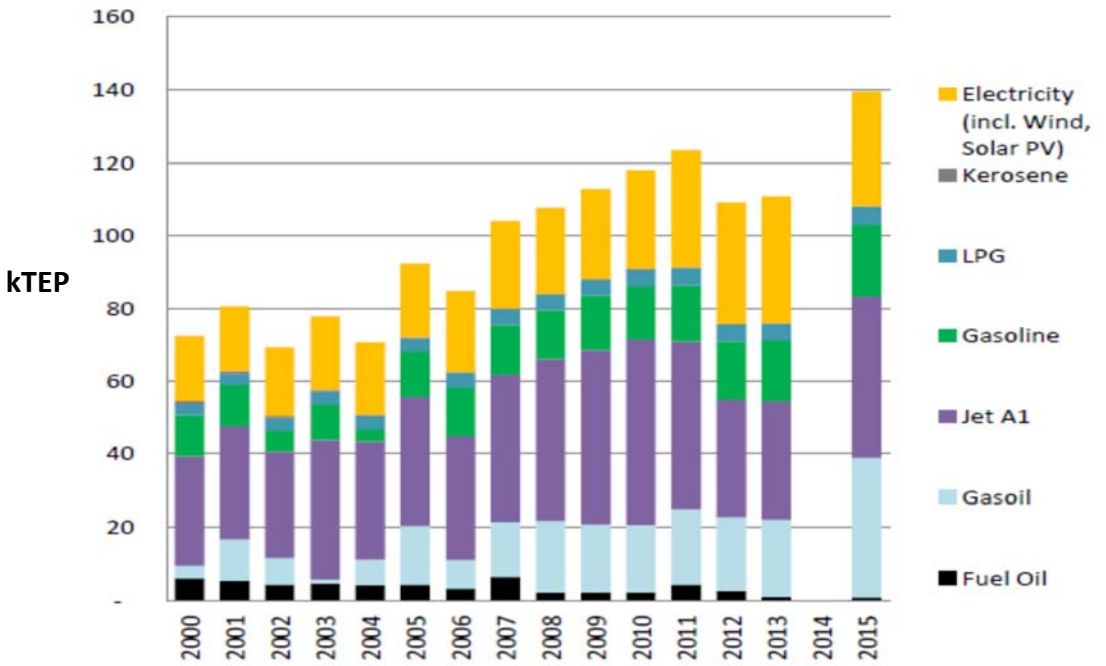
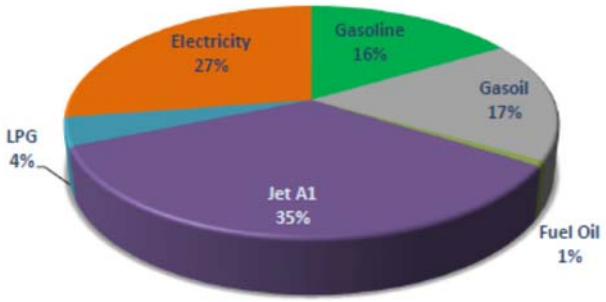


Figure 31: les évolutions de consommations d'énergie finale aux Seychelles entre 2000 et 2015

Le gaz liquéfié (LPG) est exclusivement employé aux usages domestiques (abandon de produits pétroliers de type kérosène et pétrole lampant pour de tels usages dans les années 2000). Le Jet A1 est spécifiquement dédié à l'alimentation en carburant des avions.

La majeure partie de l'énergie finale consommée par les seychellois est fournie par des combustibles liquides, soit directement comme carburant (cf Figure 32 A pour l'année 2015) sous forme de jet A1 (35%), gasoil (17%), essence (16%), et fuel lourd (1%), soit après conversion de fuel lourd (et un peu de gasoil) en électricité dans les centrales thermiques.

Le secteur du transport (cf Figure 32 B pour l'année 2015) est celui qui consomme le plus d'énergie finale (61%), devant les secteurs des services (17%), de l'industrie (11%) et le secteur domestique (10%)



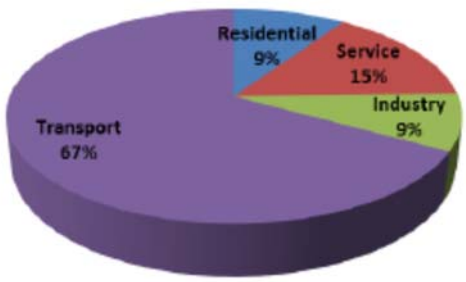


Figure 32: A) segmentation des consommations d'énergie finale aux Seychelles en 2015

B) consommations d'énergie finale aux Seychelles par secteurs d'activité en 2015

- **La production d'électricité aux Seychelles**

La quasi-totalité de l'électricité du pays est produite par la société publique Public Utilities Corporation (PUC). En 2013, la capacité installée de PUC sur Mahé était de 69,5 MW et sur Praslin de 13,8 MW.

Pour l'île de La Digue, l'électricité est fournie par Praslin via un câble sous-marin alors que pour les autres îles gérées par la Island Development Corporation (IDC) ou la Seychelles Island Foundation (SIF), de plus petits générateurs fonctionnant au gazole sont utilisés. Il y a aussi plusieurs grands hôtels qui ne sont pas connectés au réseau national et qui ont donc leur propre génération basée sur des générateurs diesel.

Deux réseaux principaux délivrent l'électricité aux Seychelles, le réseau Mahé et le réseau de Praslin. Le réseau Mahé comprend une ligne de transmission haute tension de 33 kV qui distribue l'énergie jusqu'au réseau basse tension de 410V et 240V. Les systèmes de distribution sur l'île principale de Mahé alimentent certaines des îles intérieures (Sainte Anne, île du Cerf) via un câble sous-marin. Sur Praslin, le réseau comprend une ligne haute tension de 11 kV transportant l'énergie jusqu'au réseau basse tension.

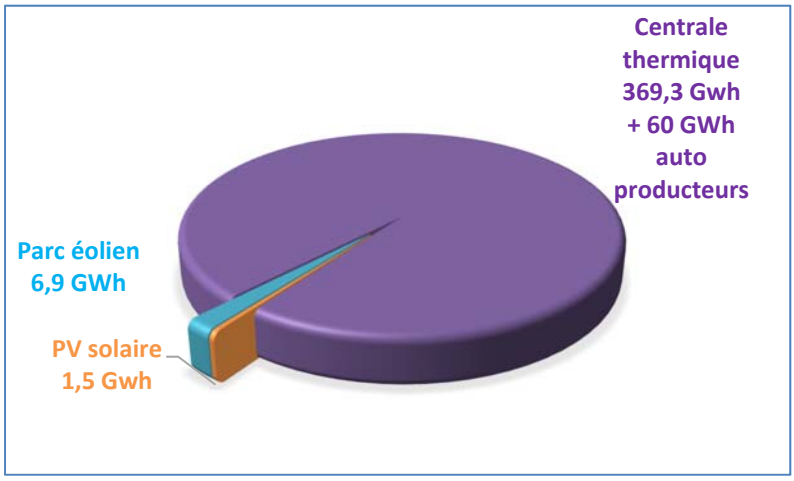


Figure 33: Production d'électricité par technologie (Mix énergétique en 2015)

L'approvisionnement en électricité des Seychelles est assuré à 97,8 % par combustion de produits pétroliers (fuel lourd et gasoil) dans les centrales thermiques de PUC (369,3 GWh en 2015). 1,8% de la production est assurée par le parc éolien et 0.4% par du photovoltaïque, soit un total d'électricité d'origine renouvelable qui n'excède pas les 2,2 % en 2015.

L'énergie électrique produite par les auto producteurs[38] n'est pas négligeable et représente 13,6 % du total national (60 GWh en 2015 sur un total de 440 GWh).

Le parc éolien a été implanté en juin 2013, encouragé par le gouvernement (au travers la Seychelles Commission de l'énergie des Seychelles, SEC). 8 éoliennes de 750 kW chacune ont été installées (5 éoliennes sur l'Ile Romainville et 3 sur l'Ile du Port) et peuvent fournir une puissance maximum de 6MW d'électricité sur le réseau, soit selon le SEC plus de 8% de la capacité de Mahé, ce qui correspond à environ 3% de l'énergie totale, et pourrait se traduire par une réduction d'environ 1,5 million de litres de carburant importé par année.

L'ensoleillement moyen sur l'archipel est de 5,8 kWh /m^2 /jour ce qui présente des possibilités de produire de l'électricité solaire (REEEP, 2012). En 2013, le gouvernement des Seychelles a mis en œuvre le programme « Promotion des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sur le toit aux Seychelles ». L'objectif étant d'augmenter l'utilisation des systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau en tant que moyen durable de production d'électricité dans les petites îles des Seychelles, en mettant l'accent sur les petits producteurs déjà connectés au réseau électrique national. À la fin de 2014, 62 installations solaires photovoltaïques étaient raccordées au réseau national de Mahé, Praslin et La Digue, d'une capacité de 904 kW.

Une puissance additionnelle de 68 kW provient de 13 systèmes indépendants du réseau, dont 25 kW à la station de recherche d'Atoll d'Aldabra, 7,5 kW dans la réserve naturelle d'Aride, 2 kW dans le parc marin national de Curieuse et 5 kW sur l'île de Cerf.[39]

Dans le cadre des engagements pris lors de la COP 21 à l'horizon 2030, les projets amorcés depuis 2015 annoncent des objectifs ambitieux. Le ministère de l'environnement, de l'Énergie et du changement climatique travaille sur un projet à l'horizon 2030 « 100% énergie durable » et à l'horizon 2035 de « 100% e-mobility » : le Seychelles'100% Renewable Energy Strategy (SeyRES 100)[40].

[38] Un auto-producteur d'électricité est une organisation ou une entreprise qui génère de l'électricité pour sa propre consommation et qui n'est pas raccordé au réseau. Il y a un peu plus de 16 auto-producteurs aux Seychelles. La plupart des auto-producteurs sont de grands hôtels sur Mahé et Praslin.

[39] Seychelles In Figures, Edition 2017, National Bureau of Statistics, SEYCHELLES.

[40] *Creating the enabling environment for Seychelles' 100% Renewable, Energy Strategy (SeyRES 100)*, Republic of Seychelles | United Nations Development Programme (UNDP), 8 February 2018

Des projets nouveaux correspondent à cette ambition.

Tout d'abord, l'installation du premier système photovoltaïque flottant (PV) sur mer d'Afrique :

> "Cela devrait contribuer à hauteur de 5,8 GWh par an. Cette nouvelle initiative contribuera également à réduire les importations de combustibles fossiles, ce qui se traduira par des économies de devises pour le pays. Cela fournira des emplois verts pendant la mise en œuvre. La phase de construction offrira également des opportunités aux entreprises locales », a déclaré M. Imaduwa, directeur général de la commission des Seychelles[41].

L'appel d'offres concernant ce projet a déjà été lancé.

Ensuite, le développement de la production de la glace dont ont besoin les pêcheurs doit emprunter la voie du photovoltaïque : la première usine de fabrication de glace à énergie solaire est en projet.

Enfin, en collaboration avec le gouvernement chinois, l'installation d'un système PV solaire sur l'île Curieuse - un parc national proche de Praslin, la deuxième île la plus peuplée et 41 écoles aux Seychelles[42].

3. *Stratégie de développement durable*

- **Energy Policy for SIDS**

Historiquement, le pétrole a été le moyen le plus rentable de produire de l'électricité aux Seychelles, de fournir de l'énergie pour le transport et la majorité des autres services énergétiques. Cependant, la flambée des prix du pétrole en 2008 a incité le gouvernement à élaborer une nouvelle politique énergétique pour la période 2010-2030, (an energy policy for a Small Island Developing State, SIDS). Les principaux éléments de la vision du développement du secteur énergétique des Seychelles d'ici 2030 mis en avant par cette politique sont résumés ci-dessous.

- Les services énergétiques de base doivent être abordables pour l'ensemble de la population.

[41] Daniel Laurence, « Les Seychelles prévoient d'installer le premier projet solaire flottant d'utilité publique d'Afrique », *Victoria, Seychelles*, traduction Rudie Bastienne, April 17, 2018, Tuesday, ACTUALITÉS NATIONALES, http://www.seychellesnewsagency.com/articles/9003/Les+Seychelles+prvoient+d%27installer+le+premier+projet+solaire+flottant+d%27utilit+publique+dAfrique

[42]

- La base énergétique sera diversifiée ; à long terme, l'approvisionnement énergétique sera 100% basé sur les énergies renouvelables ; mais l'objectif est d'atteindre 5% d'énergie renouvelable en 2020 et 15% en 2030.
- L'approvisionnement en énergie aux Seychelles reposera à la fois sur la participation et la propriété publiques et privée.
- L'approvisionnement en énergie ne doit pas donner lieu à une pollution dépassant les niveaux critiques.
- La demande de services énergétiques devrait toujours être satisfaite avec les technologies les plus efficaces énergétiquement. L'objectif est de réduire l'intensité énergétique d'au moins 10% en 2020.
- Le pétrole continuera d'être la source d'énergie prédominante pendant de nombreuses années. Pour des raisons de sécurité, le pays doit avoir accès à au moins 9 mois de stock de produits pétroliers à tout moment.
- L'énergie sera facturée aux consommateurs à son coût réel.
- Des investissements seront faits pour renforcer l'image des Seychelles en tant qu'énergie conservatrice, respectueuse de la serre et durable.
- La vision énergétique des Seychelles sera revue et ajustée en fonction de scénarios énergétiques intersectoriels.

On l'a vu, ces objectifs ont été remis en cause récemment et remplacés par des objectifs plus ambitieux : le 100% Énergie renouvelable, reposant prioritairement sur l'électricité renouvelable et la voiture électrique, ne devrait pas supprimer les besoins en biocarburants (production d'électricité, carburants pour le transport collectif, le transport routier…).

- **<u>Stratégie de valorisation énergétique des déchets</u>**

Pour accroître leur production d'énergie renouvelable, le gouvernement a dans sa politique énergétique pour la période 2010-2030, prioritairement ciblé le développement de l'éolien et du solaire et souhaite également privilégier la valorisation énergétique des déchets urbains et d'élevage.

Concernant ce dernier point, l'option envisagée par le gouvernement est celle d'une valorisation énergétique de biomasse dans le cadre d'un système de récupération intégrée des déchets. Cette réflexion s'appuie sur l'analyse menée dans le cadre de la Stratégie de développement durable des Seychelles (2012-2020), selon laquelle les Seychelles génèrent en moyenne 48 000 tonnes de déchets par an. Cela devrait augmenter de 40% au cours des dix prochaines années, ce qui est très préoccupant étant donné la disponibilité limitée des terres et le manque de capacité à traiter les déchets, en particulier les déchets dangereux.

Dans ce sens la SEC (Seychelles Energy Commission) a reçu, dès 2011, cinq propositions de projets public/privé concernant des projets de valorisation énergétique des déchets dans le

site d'enfouissement existant de Mahé : un incinérateur, deux usines de biogaz, un gazogène et une usine de gaz de décharge.

Jusqu'à présent, aucune décision n'a été prise quant à l'option qui convient le mieux aux Seychelles. En outre, le gouvernement chinois, en partenariat avec le ministère de l'Agriculture, finance des projets pilotes de biogaz dans quatre fermes d'élevage du pays.

Le gouvernement seychellois dans le secteur des bioénergies, privilégie donc la valorisation des déchets urbains et d'élevage (méthanisation) et il n'existe pas à ce jour de stratégie de développement de biocarburant liquide pour la production d'électricité (moteur stationnaire) ou le transport.

4. Recensement des expériences biocarburants et des acteurs majeurs de ces filières,

A ce jour, mise à part une seule initiative connue d'un acteur privé, il n'y a jamais eu de de production de biocarburant au Seychelles.

- **Biodiesel huile de friture – Hôtel Bayan Tree**

L'hôtel Bayan Tree (situé sur l'île de Mahé) a récemment acheté un FuelPod 2 pour convertir l'huile de cuisson usagée en biodiesel. Avec ce petit réacteur, en cinq heures 50 litres d'huile de cuisson usagée sont transformés en biodiesel. Le biodiesel est utilisé dans tous les moteurs diesel de l'hôtel. Comme Banyan Tree a commencé à manquer d'huile de cuisson usagée, ils ont offert de collecter de l'huile usagée provenant d'autres propriétés dans la région. Jusqu'à présent, ils travaillent avec deux autres hôtels, augmentant leurs huiles de base. Comme la plupart des hôtels paient généralement une entreprise pour se débarrasser de leur huile usée, ils ont soutenu l'initiative et offert librement leur huile usagée. La production totale de biodiesel serait d'environ 2 000 litres par mois, ce qui permet d'économiser environ 1 700 dollars par mois (retour sur investissement du réacteur en moins de trois mois).[43] [44]

[43] https://journeysbydesign.com/destinations/seychelles/main-islands/banyan-tree
[44] http://greenfuels.co.uk/why-green-fuels/closed-loop-systems/

- **Les biocarburants et la convention sur le changement climatique**

Même si l'État des Seychelles ne prévoit pas dans sa stratégie actuelle le développement de la production sur son territoire de biocarburants, il envisage l'éventualité d'en importer en substitution de carburants fossiles dans le secteur du transport. En effet, en septembre 2015, les Seychelles ont publié leurs intentions de *contributions* au problème climatique, (*INDCS*)[45] dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, dans lesquels il est stipulé que pour diminuer les importations de pétrole de 15% à 30% dans le secteur du transport, les priorités d'ici 2020 sont d'améliorer l'efficacité énergétique de ce secteur, la règlementation sur les importations de biocarburants et le développement des véhicules électriques et des deux-roues, idée reprise dans le Seychelles'100% Renewable Energy Strategy (SeyRES 100)[46], cf. ci-dessus, page 90.

F. Conclusion de l'état des lieux des biocarburants dans la COI.

Hormis Madagascar, aucun des pays enquêtés n'a jusqu'aujourd'hui développé de filières de biocarburants dans le domaine des transports (routiers ou maritimes) ou de la génération d'électricité. Pourtant l'accès à l'électricité demeure un enjeu fort dans les pays de la COI. Sa génération reposant essentiellement sur des carburants fossiles importés, les grandes orientations dans le domaine des énergies renouvelables se concentrent sur le développement de « mix énergétiques » devant se substituer à l'énergie électrique d'origine fossile des grands réseaux. En conséquence, les stratégies bailleurs à dimension régionale sont orientées vers la promotion d'énergies renouvelables génératrices d'électricité, parmi lesquelles les biocarburants sont absents.

Cependant, avec des transports routiers mobilisant respectivement 50 %, 64 % et 46 % des produits pétroliers importés à Madagascar, La Réunion et Maurice et, dans une apparente moindre mesure, 14 % et 18 % aux Comores et aux Seychelles, il apparaît que ce secteur

[45] Intended Nationally Determined Contribution (INDC) Under The United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC), September 2015

[46] *Creating the enabling environment for Seychelles' 100% Renewable, Energy Strategy (SeyRES 100)*, Republic of Seychelles | United Nations Development Programme (UNDP), 8 February 2018

contribue très significativement à la dépendance énergétique des 5 États de la COI. L'électrisation progressive des parcs de véhicules semble porteuse d'intérêt à moyen ou long terme selon les pays. A plus court terme, les avantages d'un mix intégrant des biocarburants est à examiner au niveau de chaque État ainsi qu'au niveau régional.

IV. Les filières de biocarburants

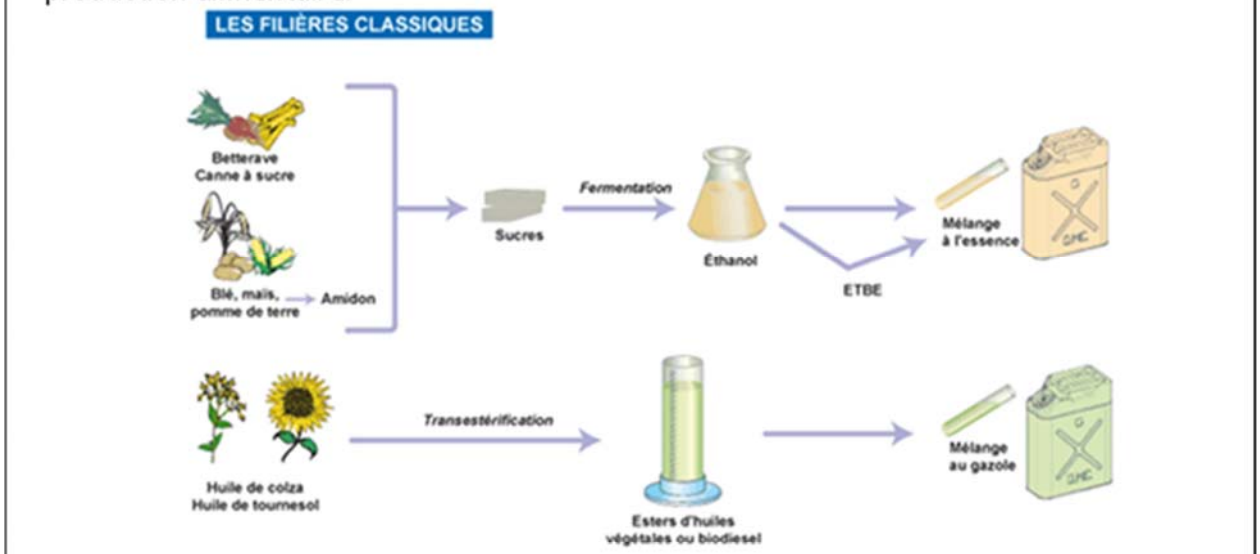
Le terme biocarburant décrit étymologiquement tous les carburants issus de la biomasse. Selon la directive européenne 2003/30/CE, on appelle biocarburant, « un combustible liquide ou gazeux utilisé pour le transport et produit à partir de la biomasse ».

En pratique, ceux-ci se classent en deux grandes familles : les biocarburants de « première génération » issues d'une partie de la plante riche en produits oléagineux ou en sucre, alors que les biocarburants de « seconde génération » valorisent toute la plante.

A. Les biocarburants conventionnels ou dits de 1ère génération ou 1G.

LES BIOCARBURANTS DE 1ère GENERATION.

Les biocarburants de « première génération » sont produits à partir de technologies matures, largement utilisées et répliquées dans le monde. Ce sont principalement : les huiles végétales pures, le biodiesel, issus d'oléagineux ou de graisses animales, et l'éthanol produit à partir de matières sucrées et amylacées. Mais ils ne peuvent être produits qu'en quantité limitée, dans la mesure où ils rentrent en concurrence avec la production alimentaire.



Une 2 e génération de biocarburants a donc été développée et élaborée à partir de végétaux non alimentaires. C'est la biomasse lignocellulosique : déchets agricoles, résidus forestiers, bois, plantes dédiées, etc. Leurs procédés de fabrication sont encore à l'étude. Une mise en production industrielle est envisagée à l'horizon 2020-2025.

Les biocarburants conventionnels, comme les huiles végétales brutes, les esters méthyliques d'huiles végétales (biodiesel) ou l'éthanol produit à partir de matières sucrées et amylacées, sont dits de « première génération ». Il s'agit de technologies matures qui depuis une vingtaine d'années sont largement utilisées et répliquées dans le monde, avec des perspectives modestes d'amélioration des rendements. Néanmoins, ces filières présentent certains inconvénients, dépendants des contextes et itinéraires techniques mis en place, qui seront discutés plus concrètement dans le chapitre suivant.

Les HVO (Hydroprocessed Vegetable Oil) également nommés HEFA (Hydroproceed Ester and Fatty Acids) pour le secteur aéronautique sont un gazole obtenu par hydrotraitement d'acides gras et peuvent être incorporés sans limite de mélange dans le gazole conventionnel. Ils mobilisent des ressources biomasses contenant des acides gras comme les cultures oléagineuses (colza, palme, soja, etc.) ou, dans une moindre mesure mais en part croissante, des huiles usagées ou des graisses animales (déchets). Le marché reste cependant encore confidentiel.

De nouvelles filières de biocarburants, dits avancés, ont été développées et se positionnent comme des alternatives possibles aux filières de première génération au regard des types de ressources à mobiliser :

- ✓ les biocarburants de seconde génération sont issus de ressources dites lignocellulosiques (telles que les résidus forestiers ou agricoles, les cultures dédiées), c'est-à-dire constituées essentiellement de lignine (15 à 20%), de cellulose (35 à 50%) et d'hémicellulose (20 à 30%). Dans ces procédés, la plante est quasi-intégralement valorisée soit en bioéthanol soit en hydrocarbure de synthèse. Ces deux filières reposent sur des technologies, respectivement par voie biochimique ou thermochimique, qui sont encore au stade de développement voire de démonstration pour optimiser leurs performances et leurs rendements ;
- ✓ une troisième génération de biocarburants avancés (dits algocarburants) repose sur la culture de micro-algues productrices d'acides gras qui peuvent être extraits et transformés en carburant de type biodiesel (EMHV). Cette voie n'est encore qu'au stade de recherche.

Les différentes filières de production de biocarburants sont résumées sur la Figure 34. L'objectif de cette partie est de présenter sommairement un descriptif et un état de l'art de

ces technologies, avant d'en discuter les avantages et inconvénients.

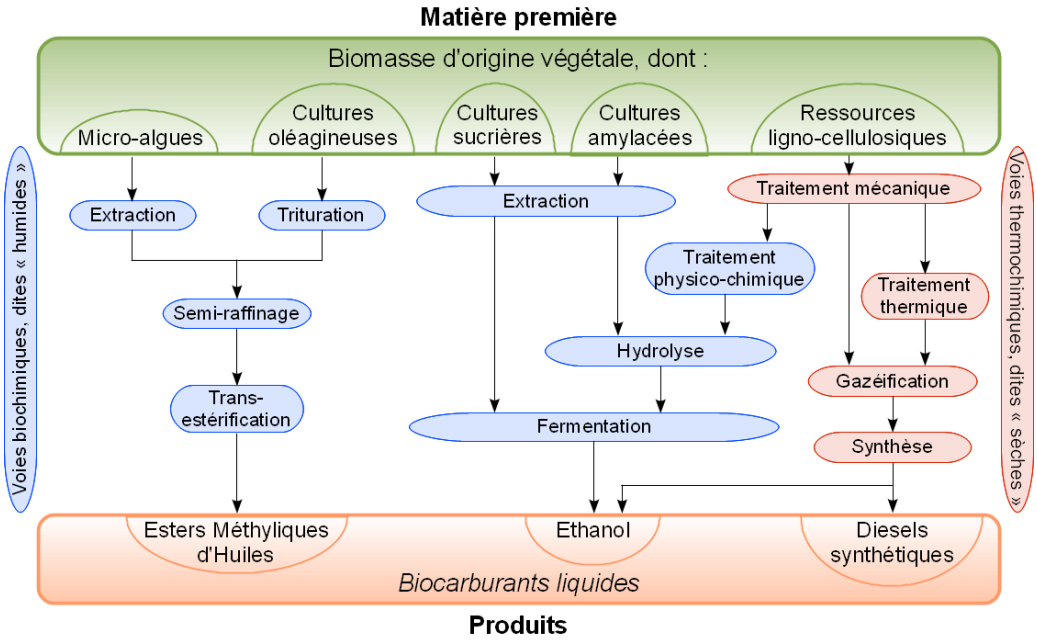


Figure 34: Panorama des principales filières de production de biocarburants (1ère, 2nde et 3ème générations) (Source [[1]])

B. Les biocarburants de seconde génération ou 2G

Les biocarburants 2G sont définis comme étant issus de la biomasse lignocellulosique (BLC) ressource non-vivrière, disponible en grandes quantités et sous différentes formes (résidus forestiers ou agricoles, co-produits d'industries du bois ou agroalimentaires, cultures dédiées voire certains déchets ligneux). Ces ressources sont constituées essentiellement de lignine (15 à 20%), de cellulose (35 à 50%) et d'hémicellulose (20 à 30%).

Deux grandes voies technologiques sont susceptibles de valoriser plus ou moins complètement ces polymères

- La **voie biochimique** désigne la filière de valorisation par hydrolyse de la lignocellulose, puis fermentation des sucres. Le produit final principal est l'éthanol dit "cellulosique", en référence à la fraction majoritairement valorisée de la biomasse. Il est de même nature que l'éthanol de 1ère génération, substituable à l'essence.
- La **voie thermochimique** consiste à dégrader, par des procédés thermiques, la matrice lignocellulosique en combustibles gazeux (gazéification) ou liquides (pyrolyse, liquéfaction), qui peuvent eux-mêmes être transformés en hydrocarbures de synthèse.

1. La voie biochimique : éthanol cellulosique

Description technique succincte

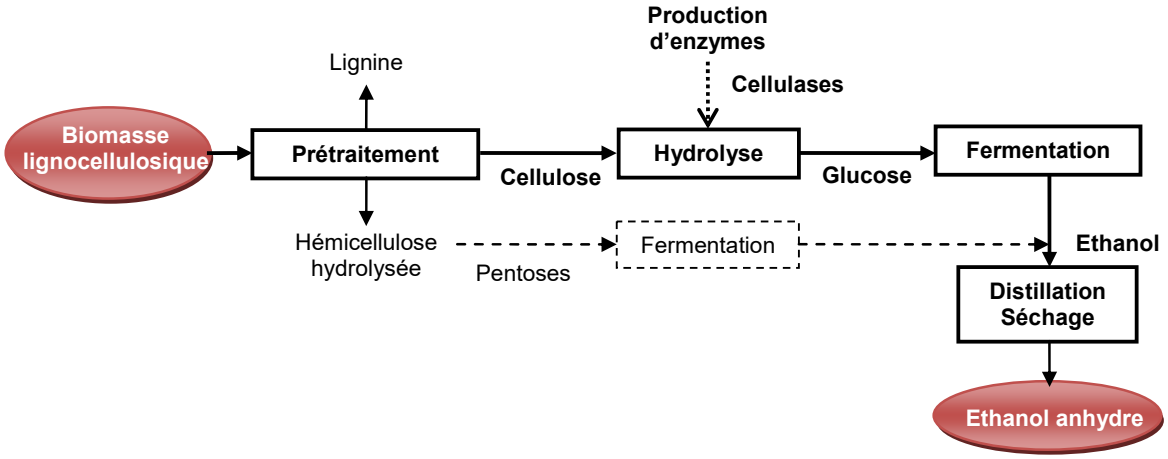


Figure 35 : Schéma de principe du procédé de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique

Le schéma générique du procédé de production d'éthanol cellulosique (Figure 35) est articulé autour de quatre étapes principales :

- ***prétraitement de la matière première***

Il s'agit d'une étape clé du processus industriel qui vise à séparer et rendre accessibles les constituants de la biomasse lignocellulosique et à libérer la fraction hydrolysable. Par action thermique et/ou chimique, la structure de la lignine est détruite, l'hémicellulose est plus ou moins hydrolysée et la cellulose modifiée. L'enjeu consiste à préparer l'hydrolyse de la cellulose tout en empêchant la formation d'inhibiteurs.

Il existe plusieurs procédés, dépendant du substrat et du type d'hydrolyse qui va suivre, les plus courants étant les procédés (i) physique : le broyage de la BLC ; (ii) physico-chimique : l'explosion à la vapeur ; (iii) chimique : pré-hydrolyse à l'acide dilué, pré-traitement en condition alcaline, extraction par des solvants organiques.

Les principaux acteurs propriétaires de technologies de prétraitement sont les sociétés autrichienne Andritz et finlandaise Valmet. Des promoteurs d'unités ont, quant à eux, leur propre technologie (POET, Abengoa, etc.) (source IFPEN, 2015).

- ***Hydrolyse de la cellulose (et de l'hémicellulose) en sucres***

Cette étape consiste à fractionner la cellulose et l'hémicellulose en sucres simples et fermentescibles (glucose, pentose, saccharose, etc.). Un acide (dilué ou concentré) ou des

micro-organismes (enzymes spécifiques) sont nécessaires comme catalyseur. L'hydrolyse enzymatique est de loin la plus répandue mais nécessite le développement d'enzymes spécifiques, les cellulases. Des recherches sont également menées afin d'optimiser la dégradation enzymatique des hémicelluloses, qui requiert une grande variété d'enzymes (recherche de nouvelles hémicellulases).

La société danoise Novozymes s'affiche comme le fournisseur d'enzymes le plus connu. L'IFPEN est également très engagé sur le sujet au sein du projet Futurol (décrit plus bas). D'autres acteurs comme DSM ou Dupont Danisco licencient leur procédé d'hydrolyse enzymatique (source IFPEN, 2015).

– ***Fermentation éthanolique et distillation***

Basée sur un principe maîtrisé depuis des siècles, l'utilisation de BLC comme substrat implique néanmoins des difficultés : les pentoses sont difficilement convertis en éthanol, des inhibiteurs de la fermentation sont créés, les rendements sont faibles et les coûts élevés. En France, la société Lesaffre s'est positionnée dans la fourniture de levures pour produire des biocarburants 2G (partenaire du projet Futurol).

– ***Distillation et séchage***

L'éthanol doit ensuite être distillé et séché pour le rendre anhydre et apte à un usage comme biocarburant. Ces opérations sont techniquement maîtrisées.

Contraintes techniques et enjeux de la filière

Les principales contraintes sont liées à :

- la composition de la biomasse lignocellulosique, dans le sens où la lignine n'est pas directement valorisable en carburant (source de limitation des rendements) et constitue une barrière physique dans les traitements ;
- la dépendance des procédés vis-à-vis de fournisseurs d'enzymes ;
- l'efficience des processus de transformation ;
- l'effet d'échelle pour assurer la rentabilité du procédé et la gestion de l'approvisionnement.

Les activités de R&D visent essentiellement à améliorer les performances des procédés et diminuer les coûts. Les enjeux concernent principalement :

- le prétraitement de la biomasse minimisant la formation d'inhibiteurs ;
- la diminution du coût de production des cellulases (enzymes d'hydrolyse de la cellulose) ;
- l'amélioration des performances de fermentation des pentoses (C5) en éthanol ;
- l'amélioration de l'intégration énergétique du procédé pour accroître sa rentabilité (valorisation des résidus ligneux, limitation des consommations...).

Revue des principaux procédés et acteurs

De nombreux procédés ont été développés depuis le début des années 2000, avec plus ou moins de réussite. En Amérique du Nord, les Canadiens ont été les pionniers de la construction de pilote d'éthanol de 2nde génération tandis que la compagnie Logen a mis en place la première unité pilote américaine en 2004 (capacité de 400 000 L/an). Depuis 2007, de nombreux projets de construction d'unités pilotes et démonstratives ont vu le jour aux États-Unis et au Canada, avec l'appui d'importantes subventions gouvernementales (DOE, Department of Energy) et le soutien des groupes producteurs d'éthanol ou d'enzymes, ou du secteur agroalimentaire. Un grand nombre de projets ont échoué pour des raisons techniques ou financières, et beaucoup de petites entreprises ont fait faillite, si bien qu'il a été difficile de suivre les développements réels de la filière. Néanmoins des avancées significatives ont été obtenues, et ont conduit au démarrage de plusieurs unités commerciales (DuPont, Abengoa, Ineosbio, KiOR et Poet).

En Europe, de nombreux projets ont été financés par les programmes successifs de la Commission Européenne pour accélérer l'implantation d'unités commerciales et gagner en compétitivité. La première unité à échelle commerciale, l'usine Beta Renewables (80 000 m3/an environ) en Italie (site de Crescentino) a été mise en service en 2013. En France, le projet Futurol (voir encadré ci-dessous, page 100) a été le 1er projet d'envergure nationale dédié à la production d'éthanol cellulosique. De nombreux projets fédérateurs comparables, associant industriels de la ressource, constructeurs, producteurs de levures/enzymes, utilisateurs etc., prévoient le démarrage d'unités commerciales d'ici 2020, ce qui atteste de la maturité naissante, mais des progrès restent à faire pour assurer leur rentabilité économique dans la durée, comme en atteste l'abandon de plusieurs projets.

Sur ce plan, il faut aussi signaler que la recherche de rentabilité économique conduit aussi les promoteurs à envisager différentes options pour faire émerger les projets. Parmi celles-ci :

- l'optimisation des coûts : l'installation d'une unité de production de bioéthanol 2G sur le site existant d'une unité de production d'éthanol 1G (mutualisation d'infrastructures et d'utilités sur site) ;
- conversion d'unités : au Brésil et aux États-Unis, il a été envisagé de convertir certaines unités pour qu'elles produisent du biobutanol et non plus de l'éthanol (GEVO, A. Process - Alpena).

Focus sur le projet FUTUROL, France

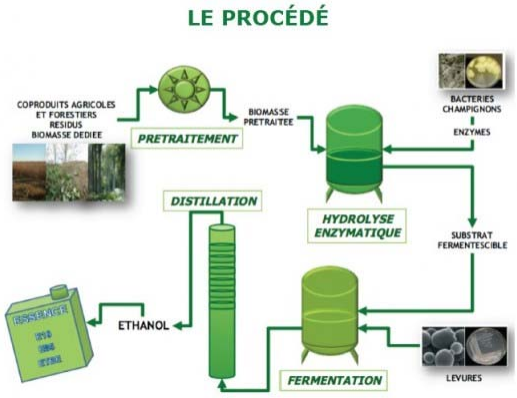
Porteur : Procethol 2G
Acteurs R&D: INRA, IFPEN, ARD, LESAFFRE
Acteurs industriels : TOTAL, ONF, TEREOS, Champagne Céréales
Financement 76,4 M€ sur 8 ans (AMI ADEME) soutien d'OSEO (BPI) de 29,9 M€.

En France, le projet Futurol lancé en 2008 (durée de 8 ans) a été le 1er projet d'envergure nationale dédié à la production d'éthanol cellulosique. Il visait le développement et la commercialisation d'une solution complète, depuis le champ jusqu'à l'obtention du produit fini, avec l'objectif d'atteindre un coût de production compétitif grâce notamment à une diversification des ressources (cultures dédiées, résidus agricoles et forestiers…) et l'optimisation d'enzymes et de levures.

Les installations pilotes du projet Futurol (100 000 l/an d'éthanol ou 1 t/j de matière sèche) tournent depuis 2011 au sein de la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle. Compte tenu de la taille déjà conséquente des installations, seules les étapes les plus critiques du process ont fait l'objet d'une validation à plus grande échelle : (étape 1) production de marc et (étape 2) de production de levures et d'enzymes. La fermentation comme la distillation ont été considérées comme des opérations « classiques », plus faciles à extrapoler.

Une unité de traitement de biomasse d'une capacité de 100 t/j a été construite sur le site de Bucy-le-Long de Tereos dont le démarrage a eu lieu en juin 2016. Cette unité doit permettre de vérifier les performances du procédé (étape 1) dans un environnement industriel.

A ce jour, le projet est en phase de commercialisation, portée par la société Axens (investissement estimé de 100 à 200 M€, avec l'objectif d'un coût compétitif par rapport à l'éthanol 1G.





La figure 36 donne un aperçu, non exhaustif, sur les principaux acteurs et porteurs de projets dans le monde.

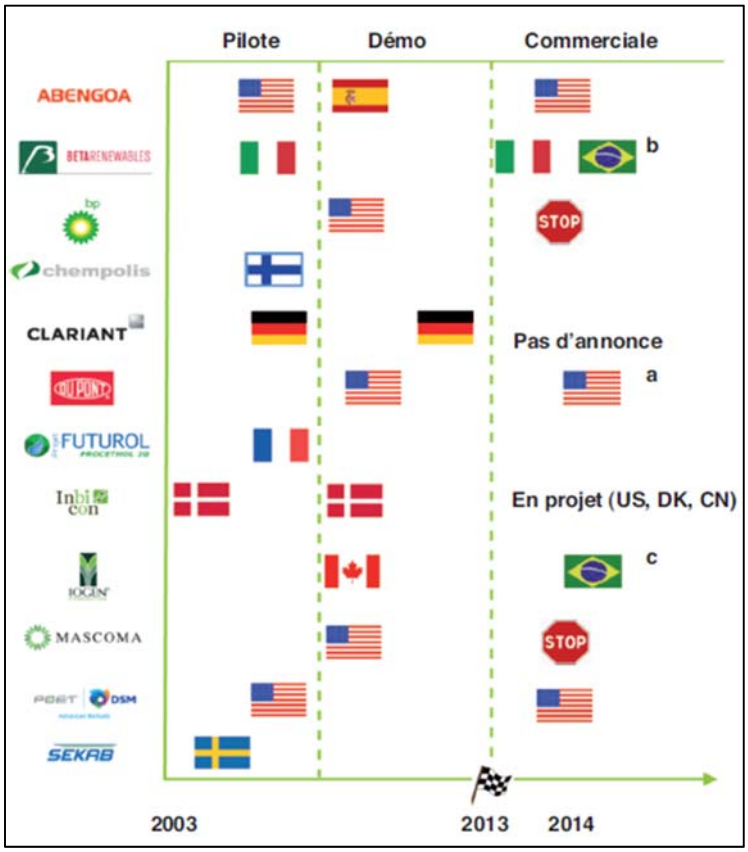


Figure 36 : Principaux acteurs la voie biochimique (source IFPEN, 2015)

2. La voie thermochimique : la filière BtL (Biomass to Liquid)

La voie thermochimique couvre un vaste ensemble de procédés permettant de décomposer la matrice lignocellulosique en combustibles solides, liquides et gazeux, destinés à des finalités multiples (chaleur, électricité, biocarburants).

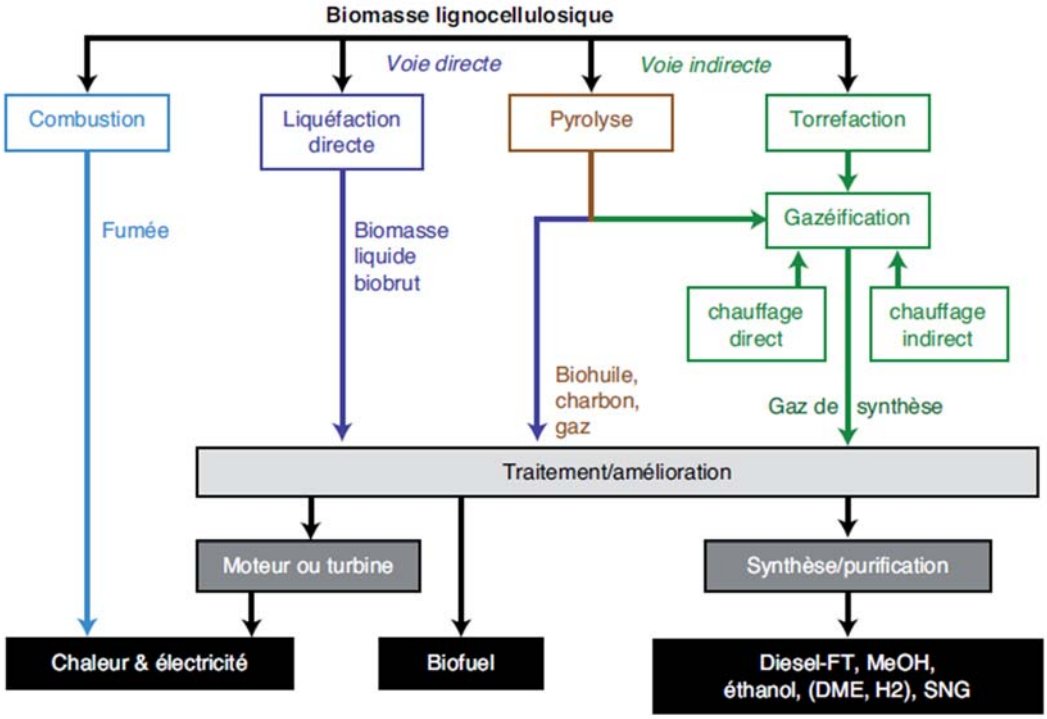


Figure 37 : Vue d'ensemble des filières de conversion thermochimique de la biomasse lignocellulosique

Trois types de procédés ont fait l'objet de travaux de R&D plus ou moins avancés pour la production de biocarburants liquides :

- La pyrolyse rapide (ou flash) produit majoritairement un liquide organique, appelé huile de pyrolyse ou bio-huile. Celui-ci peut être utilisé directement dans la production d'électricité ou de chaleur, mais nécessite diverses opérations de traitement (upgrading) pour le transformer en biocarburant. Si les procédés de pyrolyse sont au stade industriel, les procédés d'upgrading sont encore au stade de R&D.
- La liquéfaction hydrothermale (ou directe) de biomasse conduit à un produit final, appelé biocrude, plus stable que la bio-huile et convertible en substitut du diesel. Le procédé hydrothermal est toutefois techniquement moins mature que la pyrolyse.
- La gazéification produit majoritairement un gaz de synthèse, le syngas. Le gaz peut ensuite être orienté vers la production de différents carburants. La voie la plus répandue est la synthèse catalytique Fischer- Tropsch qui conduit à des carburants de type gazole

ou kérosène, de très bonne qualité (absence de soufre, indice de cétane élevé). Il est également possible de synthétiser de l'éthanol, mais aussi d'autres types de carburants comme le bioDME (DiMéthyl Ether) ou le bioSNG (ou biométhane). Mais leur nature gazeuse en conditions atmosphériques implique d'importantes contraintes d'utilisation.

La suite du document se limite à la description de la voie **BtL** qui est la plus répandue et la plus mature de la filière thermochimique.

Description technique succincte de la filière BtL

La voie BtL comprend quatre étapes principales (ci-dessous).

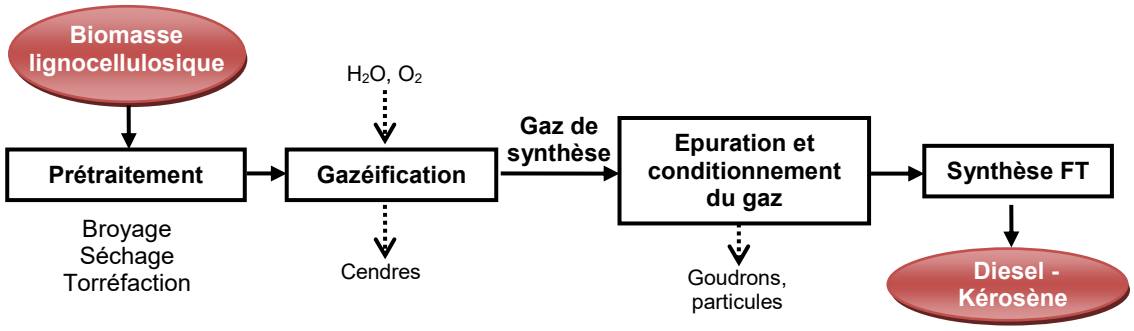


Figure 38 : Schéma de principe de la filière Biomass to Liquids (voie thermochimique par gazéification)

– ***Le prétraitement de la biomasse***

Il s'agit d'une étape clé dont l'enjeu consiste d'une part à homogénéiser la composition de la biomasse et d'autre part à répondre aux spécifications requises par le procédé de gazéification en termes de granulométrie et d'humidité. Le prétraitement comprend a minima le séchage et le broyage de la biomasse. Il peut également inclure des procédés thermiques qui visent à modifier plus ou moins la structure de la biomasse : (i) *La* torréfaction est un traitement modéré (250-280°C) qui permet de rendre la matrice lignocellulosique plus friable et limiter les besoins énergétiques du broyage ; (ii) la pyrolyse rapide permet de convertir la biomasse en liquide qui présente l'intérêt d'être plus simple à homogénéiser et pulvériser.

– ***La gazéification***

La gazéification combine des processus thermiques et chimiques à températures élevées (> 800°C). Elle produit un gaz de synthèse, dit syngaz, composé entre autres d'hydrogène (H2)

et de monoxyde de carbone (CO) qui servira à la synthèse de carburant.

Il existe trois sortes de réacteurs différents (lit fixe, lit fluidisé et réacteur à flux entraîné) qui se distinguent par des conditions opératoires, contraintes techniques et performances très contrastées. La technologie à flux entraîné est aujourd'hui la plus pertinente pour des applications biocarburants en raison de la qualité des gaz produits, mais impose des contraintes techniques assez fortes (hautes température et pression, préparation de la biomasse) et ne sont économiquement pertinents que pour de très fortes capacités.

- ***L'épuration et le conditionnement du gaz de synthèse***

L'épuration du gaz de synthèse, en aval du procédé de gazéification, est nécessaire et cruciale pour éliminer les produits indésirables tels que particules, goudrons et inorganiques, et atteindre les spécifications requises par les réacteurs de synthèse. L'épuration des goudrons peut être opérée soit par lavage humide, soit par craquage thermique et/ou catalytique. De façon à limiter les contraintes techniques sur cette étape, il y a un intérêt technique et économique à disposer d'une technologie de gazéification propre qui produirait peu ou pas de goudrons. Enfin, le conditionnement du gaz vise d'une part à ajuster le ratio H2/CO par des réactions de reformage à la vapeur et water gas shift et d'autre part à éliminer le CO2 pour améliorer l'efficacité de la synthèse.

- ***La synthèse d'hydrocarbures***

Il existe plusieurs voies de synthèses d'hydrocarbures à partir de CO/H2. La plus répandue et prometteuse est la synthèse Fisher-Tropsch (FT), car elle permet de produire à partir du gaz de synthèse épuré, des produits liquides de type gazole et/ou kérosène. Les produits finis sont de très bonne qualité (absence de soufre, indice de cétane élevé).

Le procédé est mature et bénéficie des retours d'expériences des procédés développés sur charbon et gaz naturel. La synthèse est opérée en présence de catalyseurs (T°=200-350°C, P=15-22 bars, catalyseurs Fe ou Co). Elle conduit à des coupes d'hydrocarbures très larges qui doivent être séparées et purifiées, ce qui conduit à des rendements en diesel limités (20 à 30%) et des coûts importants.

Contraintes techniques et enjeux de la filière

Les procédés de gazéification de biomasse sont aujourd'hui bien connus et maîtrisés, mais se caractérisent par une large gamme de solutions technologiques, de performance et de maturité variables. S'il existe désormais de nombreuses références à travers le monde pour

des applications en cogénération, en revanche pour des applications biocarburants, la complexité technologique place encore cette voie au stade de recherche-développement et de la démonstration. La plupart de ces projets concentrent leurs efforts de recherche sur l'étape d'élimination des goudrons après gazéification de la biomasse et la purification du gaz de synthèse.

La filière BtL a bénéficié de retours d'expériences issus des filières de synthèse de carburant à partir de gaz naturel ou de charbon, connues sous les noms de technologies GTL (Gas To Liquid) ou CTL (Coal To Liquid), qui sont industriellement matures avec de nombreuses unités en fonctionnement à travers le monde. Néanmoins, la démonstration de la faisabilité industrielle à grande échelle n'est pas encore complètement validée et implique notamment la maîtrise de la chaîne d'approvisionnement et l'optimisation des opérations de préparation de la ressource lignocellulosique.

Pour minimiser les pertes thermiques et bénéficier des économies d'échelle, la capacité de production envisagée des projets est supérieure à 100 000 tonnes de carburants. Compte tenu du rendement massique de l'ensemble de la chaîne de procédés (18 % pour un fonctionnement à 100 % à partir de biomasse lignocellulosique), la mobilisation d'une très grande quantité de biomasse, de l'ordre du million de tonnes par an, sera rendue nécessaire.

Revue des principaux procédés et acteurs

Le nombre de projets à l'échelle mondiale est plus faible que pour la filière éthanol cellulosique. L'Europe a été assez motrice sur la filière BtL, pour des raisons stratégiques liées à la place importante du diesel dans le mix carburant européen.

Deux références européennes peuvent notamment être mises en avant.

- Choren Industries, basés à Frieberg (Allemagne) a été durant 15 ans le leader dans la production de biodiesel. Il a couplé une technologie de gazéification à flux entraîné (Carbo-V) à un réacteur de synthèse Fischer-Tropsch et réalisé une installation pilote de 1 t/h (Alpha-plant). Des essais de production de biodiesel ont été réalisés avec succès et ont abouti à la construction d'une installation de 10 t/h (Béta-plant). Cependant, les investisseurs ont décidé en 2011 de stopper le financement de ce projet, le jugeant "trop risqué".
- Repotec en Autriche, l'un des leader de la gazéification pour des applications cogénération avec son installation de référence de Gussing, a mené en partenariat avec

l'université de Vienne des travaux de recherche où une fraction du gaz de synthèse produit est prélevée et convertie en gazole Fischer-Tropsch dans un laboratoire annexe à l'usine.

Après une période relativement dynamique dans les années 2005-2015, plusieurs projets européens, dont notamment ceux pilotés par Choren, Linde-Forest BtL, NSE Biofuels, sont actuellement à l'arrêt en raison de difficultés financières de leurs promoteurs.

En France, le projet BioTFuel (voir encadré) a été le 1er projet d'envergure nationale dédié à la démonstration d'une filière de production de biodiesel par voie thermochimique. Par ailleurs, le CEA a inauguré en octobre 2014 la plateforme de prétraitement par broyage de la biomasse à Bure-Saudron de son projet Syndièse.

Focus sur le projet BioTFueL, France

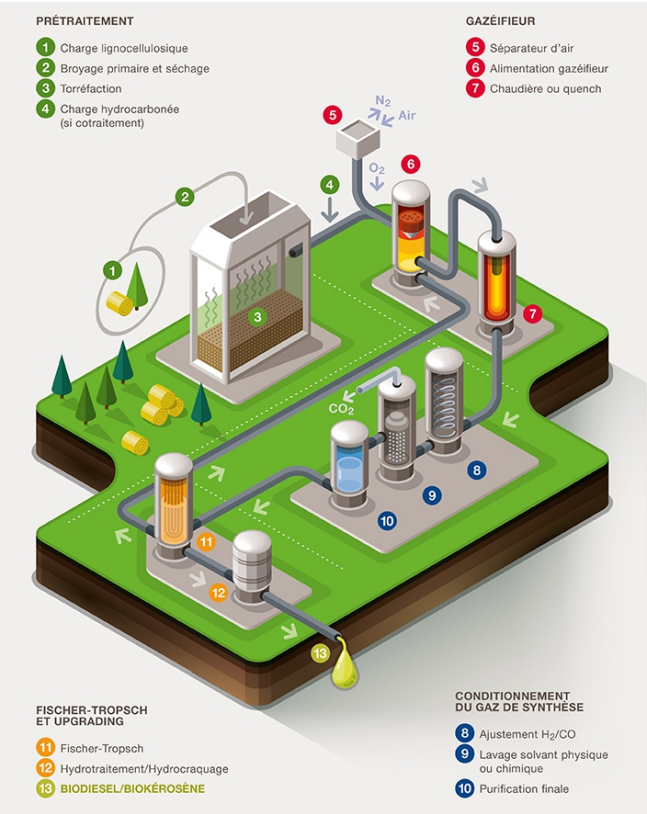
Porteur : Bionext - Partenaires : Axens, CEA, IFP Energies nouvelles, AVRIL, ThyssenKrupp Industrial Solutions, Total. Budget : 112,7 millions d'euros sur 7 ans dont 33,2 millions de financement public (Fonds démonstrateur ADEME, Région Hauts de France et FEDER).

En France, le projet BioTFuel lancé en 2010 a été le 1er projet d'envergure nationale dédié à la production de biodiesel et biokérosène de 2nde génération par la voie thermochimique. Le procédé sélectionné vise à traiter la plus large gamme de ressources biomasses (pailles, plaquettes forestières, cultures dédiées), mais aussi des charges fossiles en mélange afin d'anticiper le caractère saisonnier de la ressource.

Deux pilotes de démonstration correspondant aux étapes clés de la chaîne de production ont été démarrés :

- Un démonstrateur dédié à la préparation « amont » de la biomasse, sur le site du groupe Avril à Venette près de Compiègne. Il comprend notamment des unités de séchage, broyage et torréfaction sur lesquelles une douzaine de biomasses représentatives des ressources disponibles à travers le monde seront traitées pour répondre aux qualités requises par la gazéification.
- Un démonstrateur dédié à la gazéification et la purification du gaz de synthèse implanté sur un site mis à disposition par Total, près de Dunkerque. Il va permettre de tester, à l'échelle d'environ 3 t/h de charge (15 MW de puissance sur base PCI entrante), la gazéification, l'épuration des gaz et la synthèse Fischer-Tropsch.

Suite à quelques retards, les prévisions actuelles misent sur la commercialisation de procédés à l'horizon 2020.



C. Les algocarburants ou biocarburants de troisième génération 3G.

Le principe des biocarburants de troisième génération repose sur la production par des algues (micro ou macro-algues) de produits qui peuvent être extraits et valorisés en biocarburants. Ces biocarburants de troisième génération sont principalement produits par des microalgues.

Les micro-algues constituent une nouvelle ressource en biomasse qui permet d'obtenir ce que l'on peut appeler des « algocarburants » sous formes, soit de bioéthanol, soit de biodiesels, tous deux utilisables comme biocarburants de 3ième génération pour la production d'énergie. Les sous-produits de la technologie sont également étudiés en vue d'une valorisation permettant d'aboutir à un concept industriel « zéro déchet ».

Les microalgues présentent un potentiel important pour la production d'énergie et en particulier de biocarburants : productivité théorique très élevée, possibilité de culture sur terres non arables, coproduits d'intérêt, croissance sur effluents liquides et gazeux.

1. Description technique succincte de la filière microalgues à des fins de biodiesel

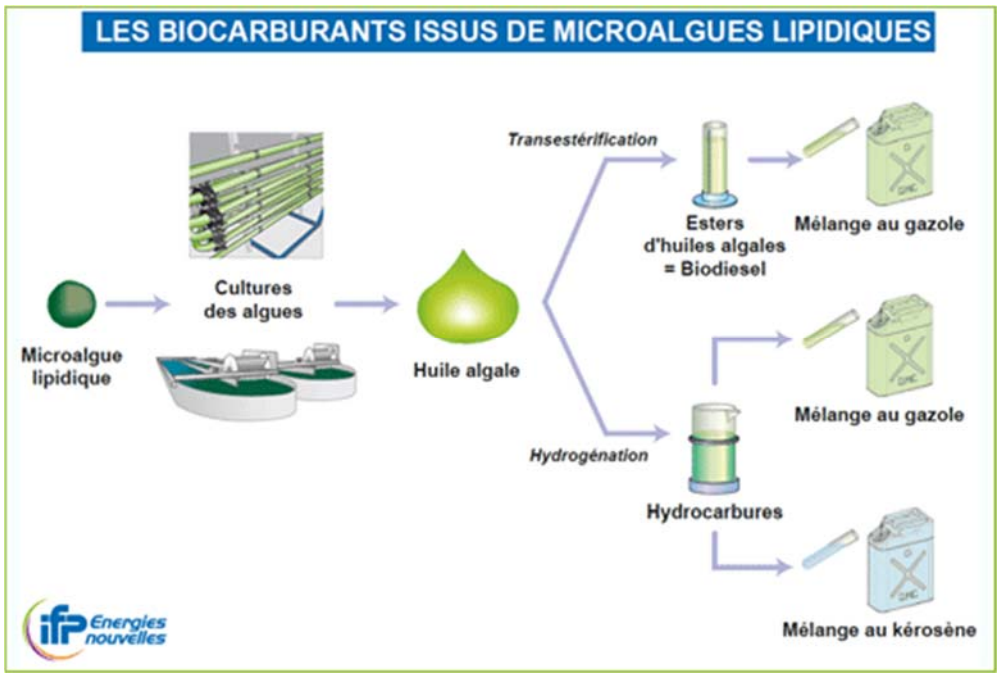


Figure 39 : Schéma des filières de productions de biocarburants issus de microalgues lipidiques.

On présentera ici la filière lipidique, destinée à l'élaboration de biodiesel, qui est la plus largement explorée et utilisée depuis 20 ans[47].

Les algues sont sélectionnées pour leur production d'acides gras (lipides) à haut contenu énergétique, qui peuvent être convertis en biocarburants de type EMHV (biodiesel), de gaz de synthèse ou de biokérozène.

Ces micro-organismes ont plusieurs avantages.

- Grâce à la photosynthèse, qui utilise la lumière solaire comme source d'énergie et le CO2 comme source de carbone, les microalgues sont capables de convertir directement du CO2 qui peut être d'origine fossile, en lipides – autrement-dit en huiles –, pouvant eux-mêmes être transformés en molécules utiles à faible empreinte carbone.
- Les microalgues sont cultivables sur des surfaces non-agricoles (photo bioréacteurs, lagunes, bassins raceway,…).
- Ces microorganismes peuvent accumuler des acides gras jusqu'à 80% de leur poids sec permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres.
- Ils ont de nombreuses applications potentielles pas seulement dans les carburants mais aussi et, aujourd'hui, surtout dans la chimie et les compléments alimentaires à haute valeur ajoutée (Oméga 3 EPA et DHA. Spiruline, qui représenterait 50 % de la production mondiale, suivie par des micro-algues vertes *Chlorella*, *Dunaliella*, *Haematococcus*, *Nannochloropsis, Schizochytrium* et la *diatomée Odontella)*.

On estime entre 200 000 et plusieurs millions le nombre d'espèces d'algues existantes, très supérieur aux 250 000 espèces de plantes supérieures recensées ; une telle diversité non exploitée constitue un réel potentiel pour la recherche et l'industrie. Comparativement aux espèces oléagineuses terrestres, ces microalgues présentent de nombreuses caractéristiques favorables à une production d'acides gras :

47 D'autres espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol et les microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz (biométhane). De nouvelles voies sont en cours d'études telles que la production d'hydrogène. Par exemple, en absence de soufre, l'algue *Chlamydomonas reinhardtii* produit de l'hydrogène.

- **Rendements de croissance et par conséquent des productions** à l'hectare supérieurs aux espèces oléagineuses terrestres (de 20 à 75 m^3 d'huile par hectare et par an selon les sources).
- **Rendement photosynthétique** beaucoup plus élevé
- **Plasticité métabolique** bien plus importante permettant plus facilement d'orienter la bioproduction vers certains acides gras
- **Maîtrise du cycle de l'azote et du phosphore** en contrôlant le recyclage des éléments nutritifs
- Pas d'apport de **phytosanitaires**
- **Nombreux sous-produits** valorisables
- Technologie exploitable dans les **pays en voie de développement**



Figure 40 : bassins de production de microalgues et photobioréacteurs.

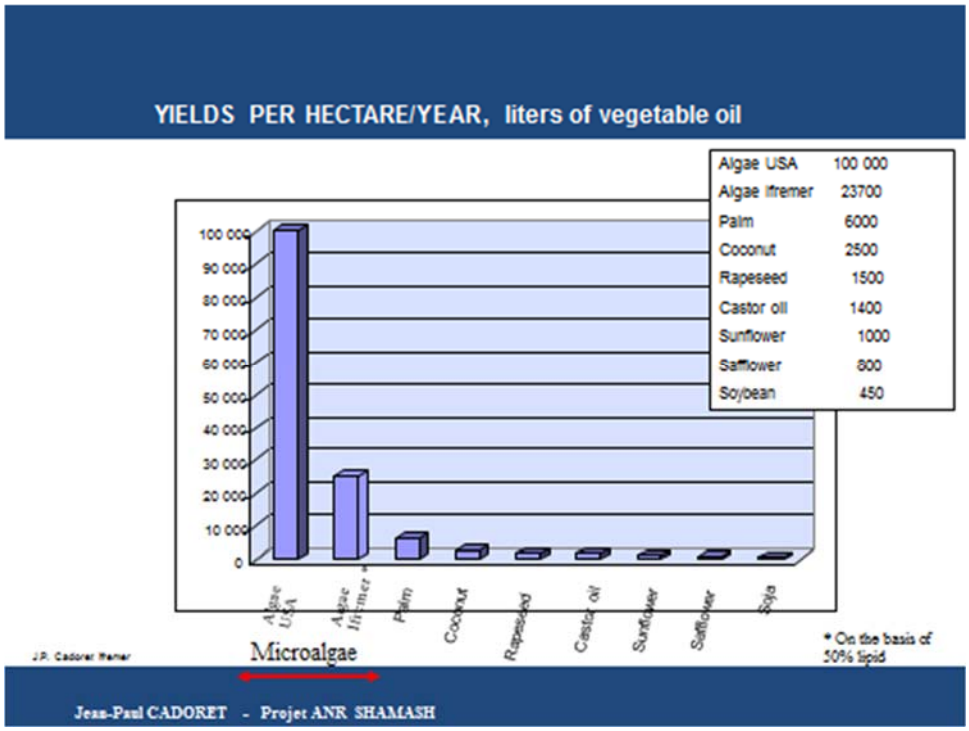


Figure 41: production théorique d'huiles végétales à destination de biocarburants issues de microalgues comparée avec les filières terrestres (en litre/hectare).

2. Contraintes techniques de la filière

Les nombreux avantages annoncés par rapport aux autres types de biocarburants sont toutefois contrebalancés par de nombreux verrous technologiques et incertitudes autour des bilans technico-économiques et environnementaux. De façon résumée, il est à noter le choix des espèces en fonction des conditions de production envisagée, car il existe des espèces marines ou d'eau douce, certaines adaptées au froid et d'autres au milieu tropical. Les conditions de stress pour **induire la synthèse de lipides** à vocation énergétique nécessitent soit un éclairement constant, soit du froid ou de la chaleur. Si les connaissances sur la physiologie ont permis de préciser les conditions expérimentales à imposer pour stimuler une synthèse transitoire de lipides, il demeure deux verrous importants : la récolte de microorganismes en milieu aqueux et l'extraction puis la purification des huiles obtenues. Plusieurs techniques ont été expérimentées comme la liquéfaction thermochimique de microalgues dont le contenu en eau était de 80% permet d'obtenir sous haute température (300-340°C et forte pression 100-200 bar) une huile de qualité comparable au diesel classique. Néanmoins, le coût énergétique de l'opération, ainsi que les émissions de NOx sont en défaveur de ce procédé. Il a également été montré qu'il est possible d'obtenir un biodiesel par pyrolyse flash (à 600 °C) d'un extrait d'algues sans eau. Des laboratoires ont utilisé des techniques de transestérification standard, après centrifugation et séchage pour produire et tester le biodiesel obtenu. Ils ont montré que la qualité obtenue était très comparable à celle d'un biodiesel issu d'espèces oléagineuses terrestres. Des essais d'extraction par CO_2 supercritique ont été réalisés sur des microalgues, ils ont démontré le potentiel de cette technique moins gourmande en énergie, et qui a aussi l'avantage de produire des acides gras à chaines plus courtes. Cependant il s'est avéré nécessaire de séparer les phospholipides (impropres à la combustion) des lipides, tous deux extraits par le CO_2 supercritique.

L'optimisation de ces procédés afin d'atteindre des coûts acceptables pour la production de biodiesel, tout en conservant un coût environnemental moindre, n'a pas encore été démontrée. C'est sans aucun doute la raison qui explique que de nombreuses entreprises internationales influentes produisent, à petite échelle, de la biomasse de microalgues pour des applications à valeur ajoutée dans les cosmétiques, les aliments nutritifs et les produits pharmaceutiques.

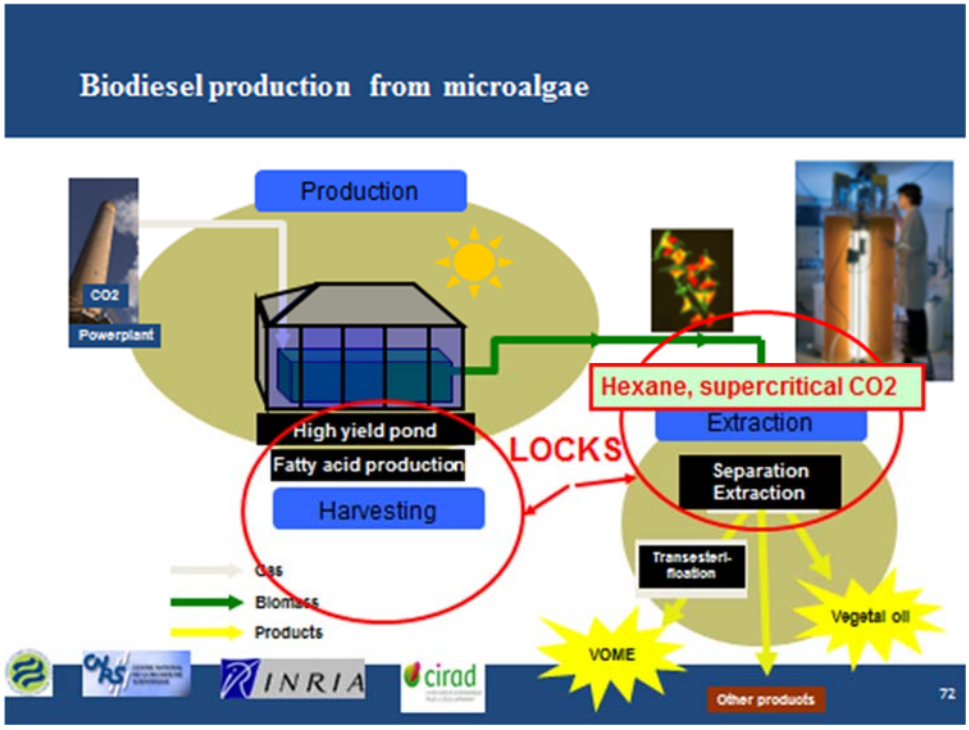


Figure 42: production de biodiesel à partir de microalgues. Les verrous technologiques.

3. Revue des principaux acteurs

Les entreprises majeures du secteur sont en capacité de produire des microalgues à destination biocarburant mais elles ne le font pas pour les raisons évoquées plus haut. On peut citer : Cyanotech (Hawaï), Seambiotic (Israël), Mera Pharma (Suisse) et FujiChemical (Japon). Sapphire Energy (USA) a achevé la construction de sa ferme algale en 2014 (Nouveau-Mexique). Une zone de 40 hectares en capacité de produire environ 1,5 millions de gallons (soit 5,7 millions de litres) par an. Malheureusement, Sapphire a fermé en 2017.

Le groupe Alltech (USA) produit des microalgues afin d'en extraire le DHA à haute valeur ajoutée.

En Europe, on peut citer des entreprises comme Alpha-Biotech, Greensea, Fermentalg,… Leur marché est celui des cosmétiques, des aliments nutritifs et des produits pharmaceutiques.

V. Analyse synthétique des filières de carburants avancés 2G et 3G vs carburants de 1ère génération 1G

Quelle est la meilleure filière dans le contexte des pays de la COI ? Afin d'apporter des éléments de réponses, il convient de comparer les trois générations en termes d'enjeux technico-économiques et environnementaux.

Il convient de rappeler, que contrairement aux filières de première génération, les technologies de production de biocarburants de deuxième génération ne sont pas encore disponibles sur le marché, celles-ci sont encore au stade soit de la recherche, soit du pilote industriel. Pour la troisième génération, si des technologies commerciales existent et sont en œuvre, elles ne le sont cependant pas pour produire des quantités massives à des coûts aujourd'hui acceptables vis-à-vis des produits pétroliers.

A. Impact des changements d'affectation des sols (CAS)

Un enjeu clé des biocarburants, qu'ils soient de première génération ou carburants « avancés », et qui affecte leurs bilans GES, est l'existence potentielle de changements d'affectation des sols (CAS). Deux facteurs principaux peuvent générer des CAS :

- la compétition d'usage des sols. Dans ce cas, le besoin de terres pour la production de biocarburants engendre un accroissement de la surface agricole cultivée, qui se fait au détriment d'autres usages non alimentaires (terres en jachère, forêts, etc.) ou d'usages destinés à la production animale (pâturages notamment) dont l'activité doit alors globalement s'intensifier. Ce phénomène est alors généralement appelé CAS direct ;

- la modification de l'offre alimentaire. Ce cas apparaît lorsque la production de biocarburants vient substituer une surface à vocation alimentaire : ceci concerne en premier lieu les surfaces cultivées mais peut aussi toucher les usages destinés à la production animale, où la diminution des pâturages va créer un accroissement de la demande en aliments du bétail. Ces modifications de l'offre alimentaire vont alors nécessiter la mise en culture de nouvelles surfaces, provoquant là encore un CAS mais qui peut se situer dans n'importe quelle région du globe capable d'accroître sa surface agricole. Cet effet est désigné sous le nom de CAS indirect.

Ces CAS jouent un rôle important pour les bilans GES des biocarburants puisque l'usage d'un sol conditionne fortement le stock de carbone accessible, tant dans le sol que dans la biomasse aérienne (arbres essentiellement). Toutefois, si l'enjeu majeur des CAS est clairement reconnu, toute la difficulté consiste à pouvoir les identifier clairement. En effet, compte tenu de la multitude et de la complexité des phénomènes régissant l'affectation globale des sols (demande alimentaire des populations, rôle des stocks de matières premières et spéculation, etc.), il est extrêmement difficile d'isoler un phénomène particulier, ici le développement des biocarburants, afin de lui attribuer de façon quantitative une responsabilité dans les mouvements existants d'affectation des sols. C'est pourquoi ce point concentre aujourd'hui l'essentiel des incertitudes et constitue certainement la source principale des débats concernant l'intérêt des biocarburants de première et deuxième génération vis-à-vis du changement climatique (*sources Benoist et al 2013*).

B. Enjeux technico-économiques et environnementaux

Les bilans environnementaux des biocarburants de deuxième génération, basés sur des descriptions prospectives de filières, possèdent un degré d'incertitude supérieur à ceux de la première génération. Toutefois, l'ensemble des études réalisées s'accorde globalement sur une réduction potentielle des impacts environnementaux associés à la deuxième génération, en comparaison avec la première. Ceci grâce à :

- une biomasse récoltée valorisée à la fois pour être transformée en carburants et pour fournir l'énergie nécessaire à cette transformation, permettant une autonomie du procédé vis-à-vis des énergies fossiles ;
- et des potentiels de production en carburants à l'hectare généralement plus élevés, du fait que la fraction valorisable de la biomasse ne se limite plus aux composants alimentaires mais à l'ensemble de la plante.

Les types de ressources potentielles étant plus diversifiées il devient possible de retenir des sources de biomasse à l'impact environnemental réduit et à la rentabilité la meilleure. Le Tableau 13 présente la synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des trois différentes générations de biocarburants.

Tableau 13 – Synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des différentes générations de biocarburants (source Benoist et al., 2013)

Types de biocarburants	Filières	Ressources	Principaux atouts	Principales limites
1ère génération	*Ethanol*	Cultures sucrières, céréales	Technologies matures Bilans énergie et GES globalement bien inférieurs à ceux de l'essence et du diesel	Forte emprise au sol, effet majeur des CAS[48] Impacts locaux liés à la phase agricole, inexistants dans le cas des filières pétrolières
	Huiles végétales et EMHV	Cultures oléagineuses		
2ème génération	*Ethanol cellulosique BTL*	Eléments non-spécifiques aux résidus ou aux cultures	Bilans énergie / GES et impacts locaux plus réduits que pour la 1ère génération	Technologies en développement (pilotes de démonstration industrielle), encore coûteuses
		Résidus forestiers ou de culture	Impacts limités de la mobilisation de résidus Pas d'emprise au sol	Potentiel limité de la ressource
		Cultures dédiées (TCR, herbacés)	Emprise au sol réduite par rapport à la 1ère génération	Risque de CAS toujours existant
3ème génération	*Huiles végétales et EMHV*	Micro-algues	Emprise au sol réduite par rapport aux 1ère et 2ème générations, avec possibilité de mobiliser des terres non fertiles Capacité de capture biologique du CO_2 industriel	Technologies matures. Forts besoins énergétiques liés à la production des micro-algues et l'extraction de l'huile

Les filières basées sur la valorisation de résidus :

Ce point est un atout important de la deuxième génération. En effet les technologies concernées peuvent permettre de valoriser des matériaux qui sont aujourd'hui des résidus voire des déchets, d'origine agricole ou forestière, et qui possèdent donc un impact environnemental réduit puisque celui-ci se limite à l'effet éventuel de leur prélèvement, à la logistique de collecte…. De plus, ce type de ressource ne nécessite pas spécifiquement de

[48] Changement d'Affectation des Sols

surfaces, ainsi sa mobilisation n'induit pas de CAS, écueil essentiel de la première génération.

Toutefois ces résidus peuvent servir non seulement à la production de carburants, mais également à la production d'énergie au sens large (chaleur, électricité), voire de matériaux.

Les filières basées sur l'exploitation de cultures dédiées :

Du fait de ces limites quantitatives du potentiel valorisable en carburants des résidus, l'exploitation de cultures dédiées est toujours envisagée, ce qui présente potentiellement les mêmes risques liés à la mobilisation des sols que ceux vus précédemment. Cependant, les cultures aujourd'hui identifiées, telles que les taillis forestiers à courte ou très courte rotation (TCR ou TTCR) ou les cultures pérennes herbacées (miscanthus ou panic érigé notamment), conduisent à des impacts environnementaux plus réduits que les cultures de première génération du fait de leur plus grande productivité et des avantages procurés par leur cycle pérenne.

Enfin, les filières de deuxième génération basées sur l'exploitation de cultures dédiées mobilisent des surfaces et jouent donc un rôle dans la problématique des CAS. Toutefois, là encore, à production égale en carburants, l'enjeu est moins fort que pour la première génération puisque les rendements en biocarburants sont globalement plus élevés, et surtout puisque, selon la conduite des TCR ou espèces pérennes, les stocks de carbone accessibles sous ces cultures peuvent être plus élevés que pour des cultures annuelles. De la même façon, la plus forte présence de ces cultures pérennes dédiées dans le maillage actuel pourrait potentiellement être favorable localement à la biodiversité.

Toute la biomasse étant potentiellement convertie en carburants, les rendements (GJ/ha) des biocarburants de seconde génération sont bien supérieurs (de deux à quatre fois la productivité par hectare) aux biocarburants de première génération, à l'exception de la canne à sucre ou de l'ester d'huile de palme, à condition d'être produits dans des conditions pédoclimatiques favorables, comme l'illustre le Tableau 14.

	Filière biocarburant	Rendement biomasse t/ha	Rendement biocarburant	
			Volumique (*l/ha)*	énergétique (*GJ/ha)*
1ère	Biodiesel de coco	2.1 -2.4 (cop)	500-600	17.3-20.8
	Biodiesel de tournesol	1.5 -2.4 (gr.)	680-1100	23.4-37.2
	Biodiesel de soja	2.6 -3.6 (gr.)	450-610	15.8- 21.4
	Biodiesel de colza	1.5-3.64 (gr.)	690-1560	23.4-52.8
	Biodiesel de graine de coton	1.3-1.7 (gr.)	260-340	9.0-11.8
	Biodiesel de jatropha	0.8-2 (gr.)	240-600	8.2-20.4
	Biodiesel de palme	7 - 15 (gr.)	3500-7500	121.8-261.0
	Ethanol de blé	6.7 - 8.3	2510-2990	53.4-63.6
	Ethanol de maïs	6 - 8.7	2160-3130	46.0-66.6
	Ethanol de betterave	56.4 - 84	3200-4800	68.1-102.2
	Ethanol de canne à sucre	50-85	3500-6500	74.5-138.3
	Ethanol de sorgho	92	5000	106.4
2nd	Ethanol de paille de blé	3.2-6.0 (ms)	1200-2270	25.6-48.3
	Ethanol cultures pérennes	12.3 (ms)	4060	86.4
	Biodiesel FT d'eucalyptus	20 (ms)	3000-5000	103.2-172.0
	Méthanol d'eucalyptus	20 (ms)	9000-11000	140-172
	DME d'eucalyptus	20 (ms)	10000	188
	Biodiesel de bagasse	11 (ms)	1650-2750	56.8-94.6

Tableau 14 – Productivités comparées des biocarburants de première et seconde générations (source : Broust et al., 2013) cop = coprah, gr = graines, ms = matière sèche.

Vu sous l'angle des surfaces nécessaires à la production d'une tonne équivalent pétrole (tep), par exemple, il est permis de mieux apprécier le potentiel des cultures utilisées en première et deuxième génération. Le tableau 15 présente les surfaces nécessaires en hectares, à la production d'un m3 et d'une tep de biocarburants de première et seconde génération. La « troisième génération » n'est pas représentée ici, avant tout pour les raisons évoquées en introduction : la production existante n'est pas adaptée à un marché de carburants destinés aux transports.

	Filière biocarburant	Surface nécessaire pour 1 m^3 de biocarburant	Surface nécessaire pour 1 tep de biocarburant*
		En hectare (ha)	En hectare (ha)
1ère	Biodiesel de coco	1.67-2	2.0-2.42
	Biodiesel de tournesol	0.91-1.47	1.12-1.80
	Biodiesel de soja	1.67-2.22	1.95-2.65
	Biodiesel de colza	0.64-1.45	0.80-1.80
	Biodiesel de graine de coton	2.94-3.85	3.54-4.64
	Biodiesel de jatropha	1.67-4.17	2.50-5.10
	Biodiesel de palme	0.13-0.29	0.16-0.34
	Ethanol de blé	0.33-0.40	0.66-0.78
	Ethanol de maïs	0.32-0.46	0.63-0.91
	Ethanol de betterave	0.21-0.31	0.41-0.61
	Ethanol de canne à sucre	0.15-0.29	0.30-0.56
	Ethanol de sorgho	0.2	0.39
2nd	Ethanol de paille de blé	0,44-0,83	0.87-1.63
	Ethanol cultures pérennes	0,25	0.48
	Biodiesel FT d'eucalyptus	0,20-0,33	0.24-0.41
	Méthanol d'eucalyptus	0,09-0,11	0.24-0.30
	DME d'eucalyptus	0,1	0.22
	Biodiesel de bagasse	0.36-0.61	0.44-0.74

* : 1 tep = 41.8 GJ

Tableau 15 – Surfaces nécessaires à la production d'un m3 ou d'une tep de biocarburants de première et seconde génération (source : Broust et al., 2013). Reprise du tableau 14.

- Le biodiesel de palme est celui qui demande le moins de surface pour une même production énergétique. Les éthanols de première génération se tiennent dans une fourchette de 0.30 à 0.91 hectare par tonne équivalent pétrole ce qui est très proche de ceux de la seconde génération : 0.25 à 0.83.
- L'aboutissement technique et économique de la filière Fischer-Tropsch appliquée à la biomasse lignocellulosique améliorerait significativement le développement de la seconde génération avec moins de 0.5 hectare par tep produite.

VI. Analyse de scénarios de production de biocarburants pour la COI

A. Définition des scenarios

Au cours des enquêtes, il est apparu, qu'hormis à Madagascar, les pays enquêtés n'ont pas encore développé de filières de biocarburants dans le domaine des transports (routiers ou maritimes). Maurice est en passe de le faire, pendant que La Réunion s'oriente vers la génération de bioélectricité. De la même façon, il n'a pas été identifié de production et d'usage de biocarburant de 2nde ou 3ème génération dans les pays de la COI.

Afin de mettre en perspective l'intérêt de produire des biocarburants, une première approche simple consiste à évaluer les quantités à mettre en œuvre pour substituer une part des carburants fossiles existants. Ceci est variable selon le pays de la COI considéré. Les aspects, et les externalités, sociaux-économiques ne seront pas abordés ici bien qu'ils aient certainement un poids dans le choix national vers des substituts locaux à des produits importés.

Quatre scénarios sont proposables pour les pays de la COI. Trois concernent les biocarburants de 1ère génération et un ceux de 2nde génération.

- **Scénario 1a** : production d'éthanol carburant à partir de mélasse.
- **Scénario 1b** : production d'éthanol carburant à partir du sucre.
- **Scénario 1c** : production de biodiesel à partir d'huile végétale (coco, jatropha,…).
- **Scénario 2a** : production annuelle de 100 000 tonnes de biocarburant 2G.

  Pour filière 2G, le scenario consiste à illustrer un exemple de production sur la base d'un seuil de rentabilité d'une usine 2G qui est estimé à environ 100 000 t (carburant)/an à l'heure actuelle. La biomasse est supposée issue de plantations dédiées. Le biodiesel d'eucalyptus obtenu à travers la voie Fischer-Tropsch est pris comme référence : 20 tonnes de matière sèche par hectare génèrent entre 2 et 4 tep de carburants de type gazole ou kérosène (tableaux 14 et 15).

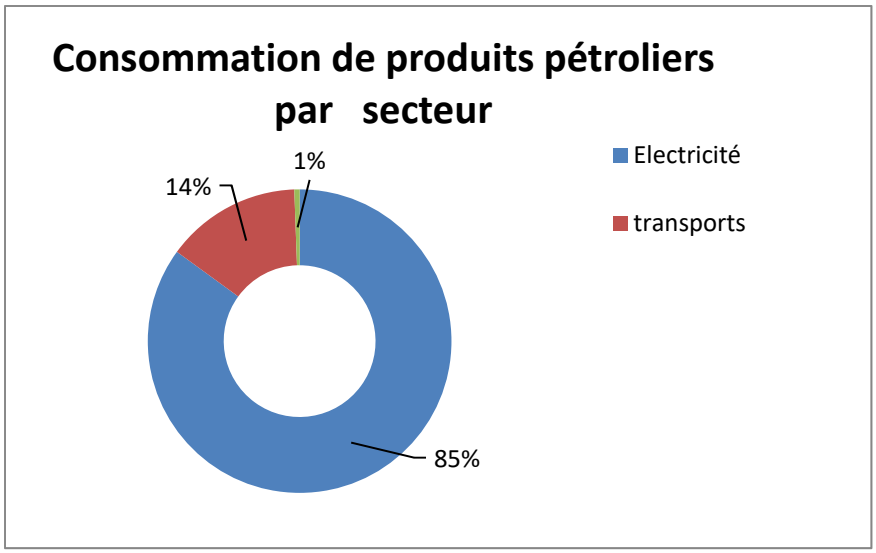
<u>Données utilisées par hypothèse :</u>

1 tonne métrique de cannes => 45 kg de mélasse = 10 litres de bioéthanol.
1 tonne métrique de cannes => 95 kg de sucre = 87 litres de bioéthanol.
1 tonne métrique d'huile végétale => 1 tonne de biodiesel.

1 hectare d'eucalyptus génère 3 tep de gazole à travers la filière 2G Fischer-Tropsch.

B. Union des Comores :

Les chiffres de consommation de carburants liquides sont incertains ; ils sont majoritairement consacrés à la génération d'électricité : 85126 m3 en 2017. Quant au transport routier, la Société comorienne des hydrocarbures a livré 12800 m^3 de carburant dans les stations-services (chiffre 2015). Ce qui représente un total d'environ 98 000 m^3 (80 000 tonnes).



La première génération est peut-être à ré-explorer.

- Le scénario 1c semble le plus abordable. A titre d'illustration, on peut prendre le cocotier : il existait 3 millions de cocotiers en 1985, et, d'après les estimations, il en reste 1,8 millions aujourd'hui. A raison de 80 à 100 arbres par hectare, une surface de 20 000 ha serait présente portant un potentiel théorique proche de de 10 000 tep ou encore 11 000 à 12 000 m^3.

On projette donc aisément que :

Les cocotiers restants donneraient la possibilité de substituer l'équivalent de la totalisé des carburants routiers ou encore 12 % de l'ensemble des produits pétroliers importés aux Comores.

On peut y ajouter un potentiel annuel en sous-produits du cocotier, filière bien connue dans l'Océan Indien : 46 800 tonnes de pétioles ; 13 300 tonnes de bourres ; 6 100 tonnes de coques potentiellement mobilisables pour la bioélectricité.

- Scénario 2a : En ce qui concerne la seconde génération, il n'a pas été identifié de prospectives à court terme. Avec un total annuel estimé de 80 000 tonnes de carburants pétroliers substitués par du **Biodiesel FT d'eucalyptus, il serait nécessaire de consacrer 27000 hectares de plantation dédiée pour un total d'environ 530000 tonnes de biomasse.** Ceci ne tient pas compte du taux de disponibilité de cette dernière ni des contraintes de son transport. L'unité de production est en deçà du seuil de rentabilité pris par hypothèse de 100 000 tonnes de carburant. Ce scénario de semble pas adapté aux Comores, une étude plus détaillée serait à mener en tenant compte de la filière bioélectricité peut être plus immédiate et rentable.
- La troisième génération peut présenter un intérêt important dans l'Union des Comores. Mais, comme déjà précisé, les coûts de production sont trop élevés et inadaptés à la situation du pays.

C. Madagascar :

À Madagascar, l'analyse de scénario et de perspectives est plus étendue et ouverte.

Examen du marché potentiel pour les biocarburants à Madagascar

Les débouchés pour les biocarburants sont principalement les transports, l'électricité et le combustible pour la cuisson. Le transport et la production d'électricité constituent le marché classique du biodiesel et du bioéthanol en étant un alternatif respectivement du gasoil et de l'essence, tandis que l'éthanol combustible peut être considéré comme un produit appartenant aux biocarburants qui s'attaque aux marchés des combustibles pour la cuisson.

Le secteur du transport terrestre

Madagascar utilise les hydrocarbures fossiles pour satisfaire en totalité ses besoins dans le secteur transport. Ce secteur consomme 58% du gasoil (**366 009 tonnes**) et la quasi-totalité de l'essence importée par le pays en 2017 (**148 180 tonnes**). La demande pour ce marché connait une croissance continue avec l'augmentation du parc de véhicules de plus en plus dominé par les véhicules diesels (53% des immatriculations en 2017).

Tableau 16. Marché potentiel de biocarburant dans les transports en tonnes métriques.

	Consommation (MT)	**Importation (MT)**	**En %**
Gasoil	366 009	630 122	58
Essence (SC)	148 180	149 363	99
Autres	0	242 636	0
Total hydrocarbures	514 189	1 022 121	50

Source : Office malgache des hydrocarbures, 2018

Le secteur de l'électricité

A Madagascar, 25% des hydrocarbures importés sont utilisés pour faire fonctionner les centrales électriques thermiques. En 2017, ce secteur a utilisé **128 239 MT** (tonnes métriques) de gasoil soit 20% de l'importation totale et **124 650 MT** de fuel oil soit 80% de l'importation. Avec le choix du pays de privilégier la valorisation des énergies renouvelables pour produire l'électricité, la consommation de gasoil dans le secteur de la production d'électricité va diminuer à moyen terme, du fait du remplacement progressif des centrales thermiques au gasoil par les centrales hydroélectriques, centrales solaires, éoliennes, biomasse et autres.

Tableau 17. Marché potentiel de biocarburant dans le secteur de la production d'électricité.

	Consommation (MT)	Importation (MT)	%
Gasoil	128 239	630 122	20
Fuel oil	124 650	155 858	80
Autres hydrocarbures	0	236 141	0
Total hydrocarbures	252 889	1 022 121	25

Source : Office malgache des hydrocarbures, 2018

Le secteur de l'éclairage

Madagascar a importé **28 512 tonnes** de pétrole lampant en 2017, dont une partie (non précisée) est consommée par les ménages pour l'éclairage, notamment en milieu rural. Madagascar peut profiter de la valorisation de la plante *Jatropha curcas* pour produire l'huile brute qui est un alternatif au pétrole lampant. Néanmoins, la demande au niveau des ménages en pétrole lampant pourrait connaître une tendance à la baisse avec le développement de la pré-électrification.

Le combustible pour la cuisson

L'enquête de l'Instat (2010) a montré que plus de 82,2% des ménages utilisent le bois de chauffe et 17,1% utilisent le charbon de bois. La substitution totale de cette source d'énergie n'est pas encore envisageable, à court et moyen terme. Le bois énergie est compétitif, néanmoins, une partie des consommateurs de charbon pourrait constituer un débouché pour l'éthanol combustible. Les promoteurs de l'éthanol combustible ont évalué une conversion de la consommation de 100 000 ménages urbains, soit 40 000 m^3 (**32 000 tonnes**) d'éthanol combustible.

Les autres débouchés

Les secteurs d'activité sont des consommateurs modestes qui utilisent le gasoil (135 874 m^3 ou **112 775 tonnes**) ou le fuel-oil (31 208 m^3 ou **25 900 tonnes**) pour faire fonctionner leurs équipements et machines. La consommation dans le secteur des mines, de l'industrie et des travaux (construction) peut fluctuer en fonction du contexte : existence de projets d'infrastructure routière, de projets immobiliers, développement des investissements miniers et industriels.

Tableau 18. Part des différents secteurs dans la consommation de gasoil.

	Gasoil		Fuel oil	
Secteur	Quantité (m^3)	Pourcentage	Quantité (m^3)	Pourcentage
Travaux	21 975	3%	0	0%
Marine	33 674	5%	2 385	2%
Ménage et Industrie	37 674	6%	13 624*	9%
Mines	42 551	7%	15 199	10%
Total importation	**630 122**	**100%**	**155 858**	**100%**

Source : Office Malgache des Hydrocarbures, 2018

Le bilan fait apparaitre que les transports ont consommé 514 189 tonnes de carburants, l'électricité 252 889 tonnes, le secteur de l'éclairage 28 512 tonnes, le combustible pour la cuisson 32 000 tonnes (estimation) et les autres usages 138 675 tonnes. Ceci représente un équivalent en **éthanol** de **277 000 tonnes** (pour l'essence et l'éthanol combustible) et **922 000 tonnes** d'équivalent **biodiesel**.

- Le scénario 1a de production d'éthanol carburant, à partir de la mélasse issue des 3 millions de tonnes de cannes produites annuellement, amènerait à la substitution de 10 % de l'essence importée.
- Le scénario 1b, qui transforme toute la canne en éthanol, produirait l'intégralité énergétique de l'essence importée sur une surface de 95 000 hectares équivalente à l'existante.

Il faudrait l'équivalent de la surface actuelle de canne à sucre pour substituer la totalité de l'essence importée.

- Pour le scénario 1c de production de biodiesel, le tableau 14 indique des surfaces nécessaires en oléagineux allant de 740 000 à 2 440 000 hectares afin de substituer la totalité des fuels et gasoil importés. Ces perspectives sont à évaluer dans le long terme et peut être dans une approche d'approvisionnement des pays de la COI. En revanche, l'utilisation d'huile de coprah ou de jatropha destinées à la production locale d'électricité ou de biodiesel présente de l'intérêt. Notamment en raison du

contexte malgache : pays très étendu, faible accès à l'électricité en lieu rural, difficulté de transport des carburants pétroliers sur un réseau routier dégradé par endroit. Le projet GEMAHA *(voir : B. § 4. Les projets et programmes actuels dans la filière biocarburant)*, financé à travers la COI, tente d'apporter les données techniques, économiques et environnementales en vue d'une dissémination à Madagascar et aux Comores.

- Le scénario 2a apparait, compte tenu des quantités considérées, comme potentiellement applicable à Madagascar. Un peu plus d'un million de tonnes de carburant sont importés ce qui donne du sens à la filière des biocarburants 2G. Avec un total annuel estimé de 922 000 tonnes de carburants type gasoil à substituer par du **Biodiesel FT d'eucalyptus, il serait nécessaire de consacrer 310 000 hectares de plantation dédiée pour un total d'environ 6 millions de tonnes de biomasse.** Ceci est à mettre en perspective avec une problématique du bois de feu très sensible dans la Grande Ile. La filière 2G étant encore en développement, il est prévisible que la bioélectricité se développe à moyen terme venant en concurrence sur la ressource biomasse.

  Il demeure que c'est une perspective à prendre en considération pour cette Grande Île qu'est Madagascar, et ceci parmi beaucoup d'autres possibilités à plus long terme comme la troisième génération.

D. Maurice :

La consommation d'énergie primaire à Maurice est en 2016 de 1 555 kTEP (Statistics Mauritius). Les énergies renouvelables (combustion de bagasse, hydraulique, solaire, éolien…) représentent 14% de la consommation en énergie primaire, le reste étant des ressources d'origine fossile (charbon, produits pétroliers) qui sont importées et dont Maurice reste donc fortement dépendante à ce jour (Figure 43, Figure 44)

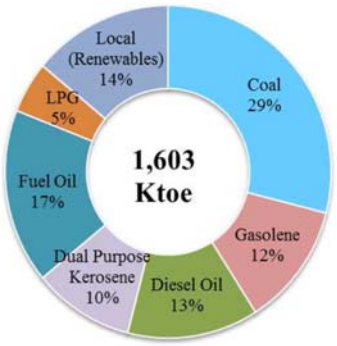


Figure 43: Consommation en énergie primaire à Maurice en 2017

source : Statistics Mauritius

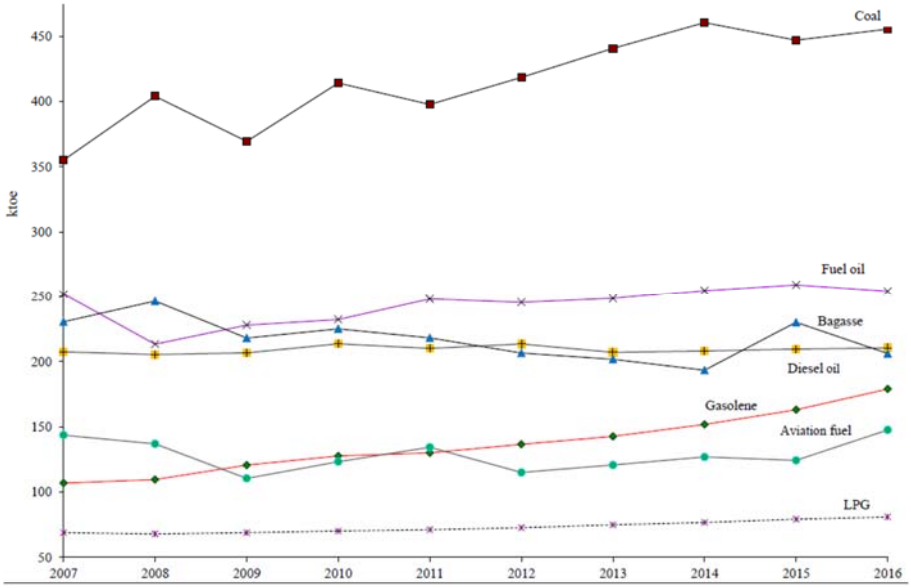


Figure 44: Évolution en énergie primaire à Maurice entre 2007 et 2016

source : Statistics Mauritius

- La consommation des transports s'est accrue de 2 %, le diesel représentant la principale énergie utilisée. Le Tableau 19 représente les évolutions de consommation en carburants liquides dans les transports routier, aérien et maritime. C'est essentiellement dans le secteur routier que la consommation en carburants a le plus augmenté (taux de croissance annuel moyen de 3% depuis 2011), en corrélation avec le nombre de véhicules légers mis en circulation. En 2016, le transport routier consomme près de 70% des carburants importés à Maurice, avec une part croissante d'essence qui dépasse désormais le diesel. Le secteur maritime ne consomme que 2% du carburant importé contre 28% à l'aviation.

A signaler enfin que la fraction d'énergie renouvelable dans le secteur du transport est infime, l'intégralité des carburants étant importée et d'origine fossile.

Sectors (kTEP)	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Land	**293,1**	**304,2**	**310,1**	**319,1**	**330,8**	**348,7**
Gazoline	126,8	133,2	139,2	148,2	159,4	174,7
Diesel oil	161,5	166,3	166,5	166,8	168,0	170,2
LPG	4,9	4,7	4,4	4,0	3,4	3,8
Air Jet Fuel	**134,3**	**115,0**	**120,7**	**126,8**	**124,3**	**147,6**
Sea	**7,8**	**8,0**	**8,0**	**8,2**	**8,0**	**9,3**
Fuel Oil	3,4	3,5	3,4	3,5	3,1	3,9
Gasolene	3,3	3,4	3,4	3,5	3,7	4,2
Diesel oil	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
Total	**435,3**	**427,3**	**438,8**	**454,1**	**463,1**	**505,6**

Tableau 19: Consommation de carburant (kTEP) des transports (source Statistics Mauritius, 2017)

Analyse du potentiel de production de bioéthanol à l'échelle de l'île Maurice.

Le Tableau 20 présente l'évolution de la production annuelle en canne à sucre, sucre et mélasse sur la période 2014-2017. Outre la diminution régulière de la production de canne, ce tableau permet de fixer un ordre de grandeur de potentiel pour la production d'éthanol.

	2014	2015	2016	2017
Surface (ha)	50 694	52 387	51 476	49 973
Production de canne (k t)	4 044	4 009	3 798	3 713
Rendement canne / ha	79,8	76,5	73,8	74,31
Production de sucre (t)	400 173	366 070	386 277	355 213
Rendement sucre / CAS (%)	9,91	9,14	10,18	9,57
Rendement sucre (t/ha)	7,89	6,99	7,50	7,11
Production de mélasse (t)	138 441	132 244	118 144	122 273

Tableau 20 : Production de la filière canne à sucre à Maurice 2014-2017 (source Statistics Mauritius, 2017)

Les transports seuls consomment 505 600 tonnes de carburants, avec des transports routiers qui consomment près de 70% des carburants importés. Ceci représente un équivalent en **éthanol** de **293 000 tonnes** en substitution de l'essence, et **175 300 tonnes** d'équivalent **biodiesel en remplacement des** fuels et gasoils (LPG et Air jet fuel non compris).

Pour l'île Maurice dans le secteur des carburants dédiés au transport, on pense naturellement à la filière bioéthanol.

- Le scénario 1a : à partir des 122 273 tonnes de mélasse (2017), il est possible de produire 28 500 m^3 d'éthanol représentant 14 000 tonnes d'équivalent énergétique en essence. Soit 5 % de l'essence consommée annuellement (la substitution volumique est de 8 %). Ce qui correspond aux objectifs de la Long-Term Energy Strategy (LTES) de Maurice.

  Remarque : sur ce gisement de mélasses, 90 000 tonnes sont utilisées pour la production d'éthanol par Omnicane. Le reste, environ 30 à 40 000 tonnes, servent à la production de rhum, de fertilisant liquide et d'aliment pour le bétail.

Mélasses : un potentiel de 30 ML d'éthanol qui représentent 8 % du volume d'essence importé.

- Le scénario 1b transforme toute la canne en éthanol : 323 000 m3 d'éthanol seraient produits par les 3,713 millions de tonnes de cannes. Ce qui représente 157 600 tonnes en équivalent énergétique d'essence ou 54 % de l'essence importée chaque année. Ou encore, une substitution volumique de 83 % des importations en essence.
  LÎle Maurice, si elle le souhaite, peut devenir productrice d'éthanol carburant pour ses propres besoins et celles de ses voisins de la COI.

Il n'apparait pas d'autres scénarios sur Maurice, le gisement en oléagineux est très réduit et les surfaces nécessaires à des plantations dédiées orientées 2G sont trop limitées.

E. La Réunion

La consommation d'énergie primaire à la Réunion a fortement augmenté entre les années 2000 et 2010 avant de se stabiliser. Les énergies renouvelables (combustion de bagasse, hydraulique, solaire, éolien…) représentent 13-14% de la consommation en énergie primaire, le reste étant des ressources d'origine fossile (charbon, produits pétroliers) dont la Réunion reste fortement dépendante à ce jour. Le taux de dépendance énergétique a explosé dans les années 80-90, mais il est aujourd'hui stabilisé, entre 86-88 % depuis 2005.

Les transports représentent 63 % de l'énergie finale consommée à La Réunion, mais cette proportion diminue au profit de l'électricité qui représente aujourd'hui 23% de l'énergie finale.

Comme illustré sur la Figure 45, c'est essentiellement dans le secteur routier que la consommation en carburants a le plus fortement augmenté (taux de croissance annuel moyen de 1% depuis 2009), en corrélation avec le nombre de véhicules légers mis en circulation. Le transport routier consomme aujourd'hui plus de 70% des carburants importés à la Réunion, avec une part plus importante de diesel, qui s'explique par la politique fiscale appliquée à la Réunion. A signaler que la fraction d'énergie renouvelable dans le secteur du transport est infime, l'intégralité des carburants étant importé et d'origine fossile.

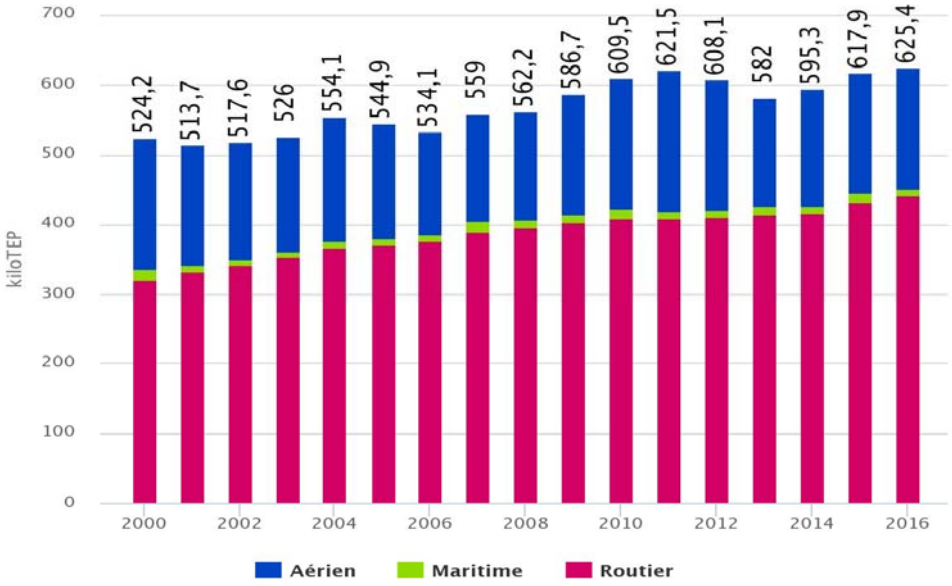


Figure 45 : Consommation de carburants dans le secteur transport (source : SPLER, Nextat2018)

- Perspectives à La Réunion :

On pouvait penser qu'à côté de l'utilisation et du développement de la production d'électricité hydraulique et de celle d'origine biomasse (combustion bagasse), les transports routiers étaient déjà l'objet d'incorporation partielle de biocarburants, à l'image de la Métropole. En réalité, il n'en est rien, la voiture électrique et l'hybride semblent plutôt les cibles à court terme. Cependant, il y a clairement une volonté de réduire les consommations de carburant d'origine fossile : ainsi, le Conseil régional va expérimenter en 2019 l'utilisation

du bio méthane issu de la production de la station d'épuration du Grand Prado dans les cars jaunes interubains, ce qui n'entre pas dans la catégorie des biocarburants "liquides"

Un potentiel de bioéthanol plutôt orienté vers la génération d'électricité.

- **Turbine à Combustion – Bioéthanol (BioTAC)**

Une centrale de production électrique d'une puissance de 41 MW a été installée dans la zone industrielle n°3 de Saint-Pierre. Il s'agit d'une turbine à combustion (technologie de l'aéronautique) fonctionnant majoritairement au bioéthanol, dont la production sera sollicitée en renfort des moyens de production existants notamment durant les pics de consommation électrique en période de pointe, avec un fonctionnement de base de 800 h/an. Albioma, producteur indépendant d'électricité, est en charge de la construction, de l'exploitation et de la maintenance. Il s'agit de la première installation de ce type en France ; elle a été labellisée EcoSite. La mise en service de la turbine à combustion est prévue en 2018. L'investissement global est de 60 millions d'euros et le résultat d'exploitation attendu de 6 millions d'euros par an.

La turbine sera alimentée à 80 % par du bioéthanol issu de la mélasse produite localement par la distillerie Rivière-du-Mât, propriété du groupe COFEPP-La Martiniquaise, qui exporte actuellement 25 000 tonnes de mélasse et pourra désormais la commercialiser sous forme de bioéthanol. A signaler que le cahier des charges du bioéthanol alimentant la TAC est moins contraignant que celui des transports, notamment en termes de déshydratation : l'alcool à 95% produit par les distilleries réunionnaises est directement utilisable dans la TAC.

Il est également prévu, qu'à terme, du bio-carburant produit à partir de micro-algues et développé par la société Bioalgostral puisse également servir de combustible (partenariat signé avec Nexa, l'agence de développement de La Réunion).

Le fioul léger sera utilisé uniquement lors des phases de démarrage et d'arrêt de la centrale (environ 10 min), qui demandent des qualités lubrifiantes qui lui sont propres.

- **Troisième génération : production de biocarburant par bioalgues**

BIOALGOSTRAL est une société spécialisée en biotechnologie des microalgues. Créée en septembre 2008, elle est située à Saint Denis de La Réunion sur la plateforme scientifique du CYROI. Elle se positionne plus particulièrement sur le développement d'un algo-carburant. La technologie relève plus des biocarburants de 3ème génération. Néanmoins, BIOALGOSTRAL est régulièrement cité comme un acteur potentiel pour approvisionner en biocarburants la TAC sans que des objectifs quantifiés soient vraiment établis à notre connaissance.

Les transports maritimes et routiers consomment environ 440 000 tonnes de carburants (2016), avec des transports routiers qui consomment près de 70% des carburants importés. Le gazole est majoritaire avec 340 000 tonnes, l'essence totalise 100 000 tonnes annuelles. Le remplacement de l'essence par de l'**éthanol** nécessiterait un volume totale d'environ **200 000 m3** en équivalence énergétique.

- Le scénario 1a : à partir des 25 000 tonnes de mélasse exportées (2017), il est possible de produire 5 800 m^3 d'éthanol représentant 2 800 tonnes d'équivalent énergétique en essence. Soit 3 % de l'essence consommée annuellement (la substitution volumique est de 4,6 %).

Mélasses : un potentiel de 5,8 ML d'éthanol qui représentent 4,6 % du volume d'essence importé.

- Le scénario 1b transforme toute la canne en éthanol. Pour atteindre une substitution énergétique de 50 % de l'essence importée, il serait nécessaire de produire près de 98 000 m3 d'éthanol. Ceci mobiliserait 1,1 millions de tonnes de cannes à sucre, soit de 50 à 70 % des cannes produites actuellement.

  Ce scénario parait peu réaliste mais la même approche en considérant 15 % de substitution énergétique (20 % en volume) amène à une mobilisation de 15 à 20% de cannes. Ce qui semble plus atteignable comme objectif.

Il n'apparait pas d'autres scénarios sur La Réunion. Comme pour Maurice, le gisement en oléagineux est très réduit et, avec une SAU (surface agricole utile) de 43 000 hectares, des

plantations dédiées orientées 2G ne sont pas imaginables. Par ailleurs, le développement de la bioélectricité viendra en concurrence sur les ressources biomasse.

F. Seychelles :

La consommation d'énergie primaire des Seychelles est tributaire à 99,5% de produits pétroliers importés. La quasi-totalité de l'énergie finale consommée par les Seychellois est fournie par des combustibles liquides, soit directement comme carburant (2015) sous forme de jet A1 (32%), gasoil (27%), essence (14%), et fuel lourd (1%), soit après conversion de fuel lourd (et un peu de gasoil) en électricité dans les centrales thermiques.

Le secteur du transport est celui qui consomme le plus d'énergie finale (61%), devant les secteurs des services (17%), de l'industrie (11%) et le secteur domestique (10%).

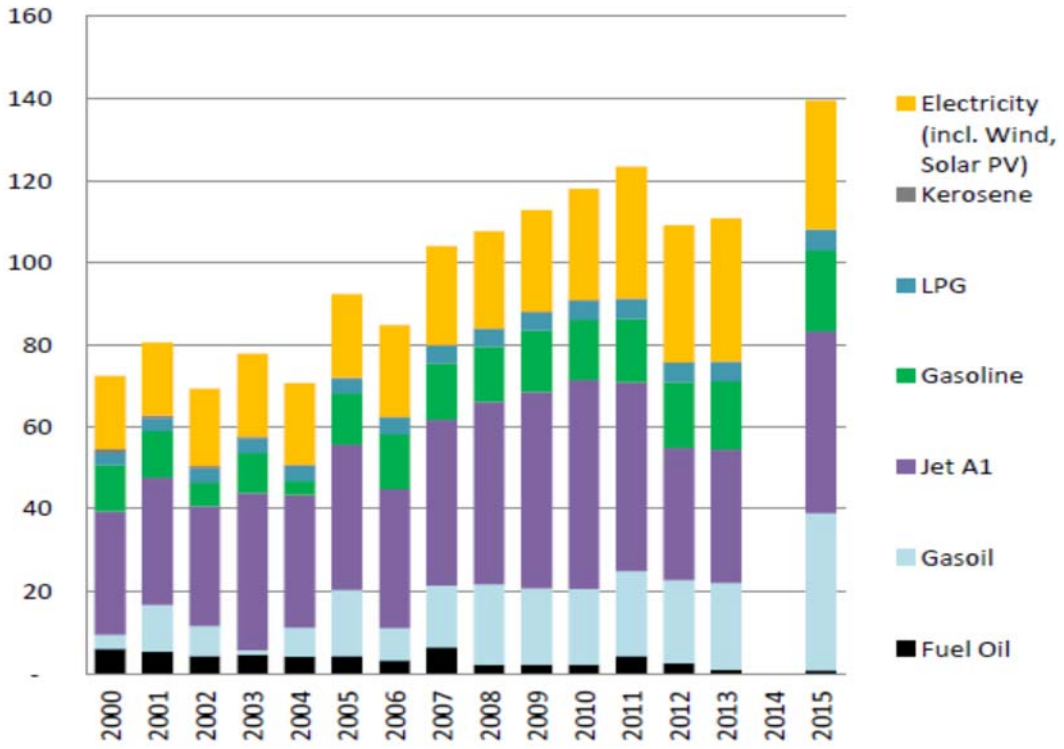


Figure 46 : les évolutions de consommations d'énergie finale aux Seychelles entre 2000 et 2015 (en ktep)

Dans la Figure 46 sont reportées les évolutions de consommations d'énergie finale aux Seychelles entre 2000 et 2015.

Une perspective, là encore à titre d'illustration, basée sur une ressource cocotier de 14 400 cocotiers. En effet, à l'époque coloniale, la noix de coco était l'un des piliers économiques des Seychelles. Celle-ci alimentait une filière de production d'huile de coprah, source

d'emplois et de revenus. Comme l'ensemble de l'activité agricole, celle-ci a été progressivement abandonnée avec l'avènement du tourisme (entre 1999 et 2009, la production de noix de coco a diminué de 59%).

- Seul un scénario 1c semble envisageable aux Seychelles. Il n'y a pas de ressources cannes à sucre et les terres disponibles sont très limitées. Dans l'état actuel :

  Les cocotiers actuels apporteraient une production de biodiésel de coco autour de 90 tep, soit 0.7 % de la consommation finale de gasoil routier en 2015.

Ceci est bien entendu faible et a priori peu incitatif à lancer cette filière. D'autant qu'avec le développement du tourisme, il est possible qu'il y ait de moins en moins d'espaces disponibles pour relancer la culture de cocotiers.

VII. Conclusions et recommandations finales

Au regard de la comparaison de filières de biocarburants, deux grands types de questions peuvent être posés :

• « Quelles productions de biocarburants présentent les meilleures performances environnementales pour une utilisation dans les transports ? »,

et

• « Quelle est la mobilisation des sols la plus efficace afin d'atténuer le changement climatique et de réduire la dépendance énergétique ? »

La majorité des études réalisées aujourd'hui, ainsi que les tendances exprimées plus haut, répondent au premier type de questions. Le point de vue adopté est alors celui des transports et les carburants sont comparés sur la base de leur contenu énergétique en mégajoules (MJ) ou de distances parcourues. Dans le second type de questions, le point de vue adopté est celui de l'aménagement du territoire et les filières sont comparées sur la base de l'hectare mobilisé. Entre ces deux questions, deux paramètres interviennent alors d'une façon importante : le rendement en biocarburant final des différentes cultures et la

capacité des filières à produire, via la valorisation des coproduits (des aliments du bétail, par exemple) permettant de libérer des surfaces par ailleurs.

Il est à remarquer que ces questions, si elles demeurent pertinentes dans la COI, font face à des contextes insulaires et de surcroît différents, lorsqu'on considère Madagascar vis-à-vis des autres îles.

A. Conclusions de l'analyse de scénarios de production de biocarburants et intérêt pour les pays de la COI

En préalable à la partie des recommandations, les scénarios d'intérêt de production de biocarburants pour la COI sont succinctement rappelés ci-dessous.

Union des Comores

La filière des biocarburants de première génération est peut-être à ré explorer. Il resterait 1,8 millions de cocotiers aujourd'hui portant un potentiel théorique de près de 10 000 tep ou encore 11 000 à 12 000 m^3, soit la possibilité de substituer l'équivalent de la totalité des carburants routiers ou encore 12 % de l'ensemble des produits pétroliers importés aux Comores.

Madagascar

Madagascar est en mesure de produire du bioéthanol et du biodiesel. La seconde génération possède certainement un intérêt qu'il convient d'étudier de façon approfondie. La troisième génération est sans doute à examiner, en effet il existe déjà des productions de spiruline comme à Toliara.

Rappelons, qu'il faudrait seulement l'équivalent de la surface actuelle de canne à sucre (95000 ha. Source : FAO 2016) pour substituer la totalité de l'essence importée en 2017.

La Grande Île possède un réel potentiel avec des débouchés intérieurs et peut-être également extérieurs, dans la mesure où les pays voisins de la COI peuvent se porter acquéreurs de biocarburants malgaches.

Maurice

Le transport routier consomme près de 59% des carburants importés à Maurice (2016) avec une part croissante d'essence qui dépasse désormais le diesel. On est amené à penser à la

voie bioéthanol et on se demande : « pourquoi pas une « brésilinisation » des véhicules légers » ?

Le gisement en mélasse potentiellement valorisable est de l'ordre de 120-130 000 tonnes ces 4 dernières années. Ce gisement représente un potentiel théorique de 30 ML d'éthanol qui représente autour de 8 % du volume d'essence importé.

La voiture électrique et l'hybride semblent également être les cibles à court terme. Maurice s'y prête bien compte tenu de la topographie générale.

Réunion

Tout comme à Maurice, on peut envisager la voie bioéthanol « à la brésilienne » pour les véhicules légers. A la Réunion, le transport routier consomme aujourd'hui plus de 70% des carburants importés, avec une part plus importante de diesel. Les mélasses actuellement exportées représentent un potentiel de 5,8 ML d'éthanol qui représentent 4,6 % du volume d'essence importé**.**

L'orientation est plutôt en faveur de la voiture électrique et de l'hybride qui semblent être les cibles à court terme.

Seychelles

Situation de forte dépendance. Mahé semble adaptée aux véhicules électriques à cause des courtes distances à parcourir. Mais cela accroît la dépendance au pétrole, si la production d'électricité demeure d'origine fossile.

Y a-t-il un intérêt social et économique à développer un secteur de production agricole à destination biocarburant (cocotier…) ?

Les Seychelles pourraient-elles acheter des biocarburants produits ailleurs, comme à Madagascar, si cette filière se développait ?

B. Recommandations finales.

Recommandations en termes d'opportunité de développement des biocarburants dans l'intérêt propre des États membres de la COI

Concernant des biocarburants liquides ayant vocation à se substituer aux produits fossiles dans les secteurs des transports et de la production de chaleur, de force motrice et d'électricité, il semble possible de proposer des formulations d'actions, certaines concrètes et d'autres à consolider. Certaines dédiées à chaque pays et d'autres orientées vers une application Régionale.

Un tableau synthétise les intitulés des propositions développées à court et à moyen/long terme pour chaque pays mais également au niveau de la Région COI.

A court terme, au niveau de la Région COI, il peut être recommandé, si cela n'est pas déjà dans les actions programmées, la création d'une Mission d'étude dans les États insulaires du Pacifique auprès des Organisations Régionales, portant sur leur cadre d'action en faveur de la sécurité énergétique. Ceci est à évaluer en terme de renforcement des missions de la COI et des activités du programme énergies.

1. Comores.

L'accès à des données récentes et consolidées apparaît difficile dans le secteur de l'énergie, sauf peut-être en qui concerne l'électricité en réseau. Pour cette raison, l'une de premières recommandations porte sur le renforcement du renseignement des bases de données statistiques nationales dans ce secteur, toute énergie considérée.

Dans l'union des Comores, 80 % de la population vit en zone rurale. Or le secteur de l'agriculture ne représente que 33 % du PIB (2014). Ainsi, il semblerait possible de poser des prospectives à moyen/long terme basées sur l'utilisation de produits et de sous-produits agricoles.

- **Court terme :**

  (a) « Renforcement des capacités de collecte et d'alimentation des bases de données nationales dans le secteur énergétique ».

  Remarque : il doit être fait mention des objectifs de la CEA (Commission Economique pour l'Afrique) qui inclue la mise en place de bases de données. La CEA a pour objectif

d'être la référence pour les pays Africains recherchant des données de première source pour informer les orientations politiques. Son objectif à long terme est de servir comme centre régional de service de données économiques, sociales, démographiques et environnementales en Afrique. L'étude proposée devra prendre en compte ce dernier point.

(b) « Étude de faisabilité de la production d'huile et de biodiesel de coprah carburant aux Comores ».

Remarque : cette étude à court terme s'appuiera sur la cocoteraie actuellement existante. Un de ses objectifs sera de définir et dimensionner une action de production d'huile de coprah et de biodiesel de coco, destinés aux transports ou à l'électrification rurale, et incluant l'incorporation dans les fiouls des centrales électriques thermiques. Elle apporterait des indicateurs indispensables à la prospective à moyen terme « coco biocarburant aux Comores ».

(c) « Étude du potentiel de plantes non alimentaires (jatropha curcas et autres oléagineux,…) utilisables comme carburant pour les services énergétiques ruraux ».

Remarque : il s'agit d'identifier les plantes disponibles et de dimensionner leur potentiel. La destination est a priori l'électrification en micro-réseaux.

(d) « Étude économique de l'impact de la position d'acheteur de biocarburants produit dans la COI ».

Remarque : quels avantages ou coûts économiques pour les Comores si l'Union devenait acheteuse des biocarburants produits dans la zone COI ?

- **Moyen/long terme :**

(a) « Étude prospective du développement de la filière coprah destiné à produire de l'énergie renouvelable ».

Remarque : les transports et l'électrification rurale sont concernés par la voie liquide et par les voies bioélectricité à partir des résidus coques et bourre. Le même type d'approche peut s'appliquer à la canne à sucre à destination bioéthanol et/ou bioélectricité.

(b) « Appui à l'établissement des règlements et des lois en faveur du développement de solutions renouvelables nationales ».

(c) « Adhésion de l'Union des Comores au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI).

Remarques : ces deux précédentes propositions s'appuient sur l'exemple des États et Territoires insulaires océaniens qui se sont dotés, à travers l'organisation régionale CPS (Secrétariat général de la Communauté du Pacifique), d'un *Département énergie* responsable de la coordination et de la mise en œuvre du cadre d'action en faveur de la sécurité énergétique dans le Pacifique, suite à la décision prise par les Ministres de l'énergie des pays océaniens et des organes directeurs des Organisations Régionales (SOPAC, PROE, CPS et les dirigeants des pays membres du Forum Pacific). Ce *Département énergie* se concentre notamment sur la politique et la planification énergétique, les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et les produits pétroliers. En particulier, « Le conseiller pétrolier du *Département* » est tenu d'apporter son aide en matière de sécurité d'approvisionnement à des coûts rentables. Dans l'océan Indien, il semble que ceci s'inscrive dans les missions de la COI et qu'il s'agisse de poursuivre et renforcer les activités du programme énergies.

Réf : Plan stratégique de la Division Développement Economique : 2013-2015. (http://edd.spc.int/)

2. *Madagascar.*

- **Court terme :**

(a) « Étude de faisabilité de production de bioéthanol carburant issu de canne à sucre ».

Remarque : les données 2016-2017 indiquent qu'avec environ 95 000 hectares, soit l'équivalent de la surface actuelle de cannes industrielles, l'éthanol produit couvrirait l'intégralité des besoins en essence.

(b) « Appui à la finalisation de la législation incluant les biocarburants pour les transports routiers et l'électrification rurale hors grands réseaux ».

Remarques : dans le secteur de l'électricité, la loi 026-2017 du 27 septembre 2017 portant Code de l'électricité à Madagascar régit les régimes appliqués aux centrales à

biomasse en électrification rurale décentralisée ; ce qui devrait concerner les biocarburants. En revanche, il s'agirait de finaliser le dispositif législatif en cours sur les transports routiers, en appuyant le processus actuel dans la rédaction de la loi sur la bioénergie menée sous l'égide du Ministère en charge de l'énergie. L'appui devrait continuer vers l'élaboration des textes d'application en particulier pour les biocarburants.

(c) « Étude de l'identification des voies de production d'oléagineux à destinations Biodiesel ».

(d) Nous proposons également un « plan de communication sur les opportunités d'investissement dans le secteur de biocarburant afin de promouvoir les investissements ». Les cas de « success stories » peuvent conduire à une augmentation de l'investissement.

- **Moyen/long terme :**

(a) « Adhésion de Madagascar au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ».

Remarque identique à celle développée pour l'Union des Comores.

(b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».

Remarque : il s'agit d'une approche prospective. Madagascar, La Réunion et Maurice pourraient-elles produire des biocarburants (bioéthanol et biodiesel) afin d'alimenter des taux d'incorporation croissants pour leurs besoins routiers et également pour l'Union des Comores et les Seychelles ?

3. Maurice.

- **Court terme :**

(a) « Mise en œuvre de la Long-Term Energy Strategy (LTES) pour l'incorporation d'éthanol dans les essences des véhicules légers ».

Remarque : le projet national E5 concernerait environ 12 millions de litres de bioéthanol par an, qui correspondent à 5% de la consommation actuelle d'essence.

Mais la loi n'a pas encore été officiellement promulguée et les dispositions ne sont pas encore connues. Les orientations de la LTES prévoient d'introduire le mélange d'éthanol-essence à la pompe en utilisant l'E10 et en passant au E20 à un stade ultérieur.

(b) « Mise en œuvre de la Long-Term Energy Strategy (LTES) pour la fabrication ou l'importation de biodiesel ».

Remarque : la LTES reconnaît que la fabrication locale sera un projet à long terme, car le gisement oléagineux est reconnu comme limité et doit être mieux identifié.

- **Moyen/long terme :**

(a) « Adhésion de Maurice au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ».

Remarque identique à celle développée pour l'Union des Comores.

(b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».

Remarque : il s'agit d'une approche prospective. Madagascar, La Réunion et Maurice pourraient-elles produire des biocarburants (bioéthanol et biodiesel) afin d'alimenter des taux d'incorporation croissants pour leurs besoins routiers et également pour l'Union des Comores et les Seychelles ?

4. La Réunion.

- **Court terme :**

(a) « Étude de l'incorporation de 5 %, avec un horizon à 10 ans de 20 %, d'éthanol dans les essences des véhicules légers ».

Remarque : l'électrisation du parc de véhicules légers dans un avenir à court/moyen terme risque de s'effectuer avec un taux de croissance limité par le surcoût des modèles de voitures et utilitaires électriques, sauf si un mécanisme conséquent de subventions était mis en place.

(b) « Reprise du projet d'incorporation d'éthanol dans le secteur des transports collectifs de l'île ».

Remarque : en 2016, la région Réunion a commandé une étude de faisabilité concernant un projet pilote de transport en commun au bioéthanol valorisant le gisement disponible en mélasse exporté hors de la Réunion.

- **Moyen/long terme :**

(a) Adhésion de la Réunion au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ».

Remarque identique à celle développée pour l'Union des Comores.

(b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».

Remarque : il s'agit d'une approche prospective. Madagascar, La Réunion et Maurice pourraient-elles produire des biocarburants (bioéthanol et biodiesel) afin d'alimenter des taux d'incorporation croissants pour leurs besoins routiers et également pour l'Union des Comores et les Seychelles ?

5. *Seychelles.*

- **Court terme :**

(a) « Étude de faisabilité de la production d'huile et de biodiesel de coprah et d'huile de friture usagée carburant aux Seychelles ».

Remarque : cette étude à court terme s'appuiera sur les cocotiers existants. Le potentiel est explicitement limité (0.7 % de la consommation finale de gasoil routier). La prise en compte des huiles de friture usagée ne devrait pas avoir un fort impact sur une production de biodiesel national. Elle apporterait des indicateurs indispensables à la prospective à moyen terme « Biocarburants importés aux Seychelles ».

(b) « Étude économique de l'impact de la position d'acheteur de biocarburants produit dans la COI ».

Remarque : quels avantages ou coûts économiques pour les Seychelles si la république devient acheteuse des biocarburants produits dans la zone COI ?

- **Moyen/long terme :**

  (a) Adhésion des Seychelles au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ».

  Remarque identique à celle développée pour l'Union des Comores.

  (b) « Appui à l'établissement des règlements et des lois en faveur du développement de solutions renouvelables nationales ».

  Remarque : il s'agit de poursuivre les activités du programme énergies de la COI.

Tableau synthétisant les propositions de recommandations

	Court terme	Moyen et long terme
Union des Comores	(c) Renforcement des capacités de collecte et d'alimentation des bases de données nationales dans le secteur énergétique ». (d) « Étude de faisabilité de la production d'huile et de biodiesel de coprah carburant aux Comores ». (e) « Étude du potentiel de plantes non alimentaires (jatropha curcas et autres oléagineux…) utilisables comme carburant pour les services énergétiques ruraux ». (f) « Étude économique de l'impact de la position d'acheteur de biocarburants produit dans la COI ».	(g) « Étude prospective du développement de la filière coprah destiné à produire de l'énergie renouvelable ». (h) « Appui à l'établissement des règlements et des lois en faveur du développement de solutions renouvelables nationales ». (i) « Adhésion de l'Union des Comores au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI).
Madagascar	(a) « Étude de faisabilité de production de bioéthanol carburant issu de canne à sucre ». (b) « Appui à la finalisation de la législation incluant les biocarburants pour les transports routiers et l'électrification rurale hors grands réseaux ». (c) « Étude de l'identification des voies de production d'oléagineux à destinations Biodiesel ». (d) « plan de communication sur les opportunités d'investissement dans le secteur de biocarburant afin de promouvoir les investissements »	(a) « Adhésion de Madagascar au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».
Maurice	(a) « Mise en œuvre de la Long-Term Energy Strategy (LTES) pour l'incorporation d'éthanol dans les essences des véhicules légers ». (b) « Mise en œuvre de la Long-Term Energy Strategy (LTES) pour la fabrication ou l'importation de biodiesel ».	(a) « Adhésion de Maurice au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».

Suite :	**Court terme**	**Moyen et long terme**
La Réunion	(a) « Étude socio-économique de l'incorporation de 5 %, avec un horizon à 10 ans de 20 %, d'éthanol dans les essences des véhicules légers ». (b) « Reprise du projet d'incorporation d'éthanol dans le secteur des transports collectifs de l'île ».	(a) « Adhésion de la Réunion au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».
Seychelles	(a) « Étude de faisabilité de la production d'huile et de biodiesel de coprah et d'huile de friture usagée carburant aux Seychelles». (b) « Étude économique de l'impact de la position d'acheteur de biocarburants produit dans la COI ».	(a) « Adhésion des Seychelles au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI) ». (b) « Appui à l'établissement des règlements et des lois en faveur du développement de solutions renouvelables nationales ».
Région OI	(a) Mission d'étude dans les États insulaires du Pacifique auprès des Organisations Régionales sur leur cadre d'action en faveur de la sécurité énergétique. Renforcement des missions de la COI et des activités du programme énergies.	(a) « Adhésion au Groupement d'achat de Produits Pétroliers de l'Océan Indien (GAPPOI). (b) « Projet de production de biocarburants destinés aux transports pour les besoins nationaux et pour les pays membres de la COI ».

VIII. Tableaux

Tableau 1 : Régions climatiques à Madagascar 29
Tableau 2: Indicateurs de croissance par secteur - Madagascar 32
Tableau 3: Importation d'hydrocarbures de Madagascar en m^3 34
Tableau 4. Les hydrocarbures dans les transports en tonnes métriques 35
Tableau 5. Marché potentiel de biocarburant dans le secteur de la production d'électricité. 36
Tableau 6 : Source d'éclairage des ménages (en % des ménages). 37
Tableau 7. Rôles et implication des ministères le long de la chaine de valeur Biocarburants 45
Tableau 8. Degré de développement actuel de la filière biocarburant 46
Tableau 9. les acteurs privés intervenant dans le sous-secteur biodiesel et bioéthanol à Madagascar 48
Tableau 10. principales ONG intervenant dans la promotion des biocarburants à Madagascar 49
Tableau 11. Les partenaires techniques et financiers intervenants dans la promotion des biocarburants à Madagascar 50
Tableau 12: Consommation de carburant (en kTEP) du transport routier, aérien et maritime (source Statistics Mauritius, 2017) 59
Tableau 13 – Synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des différentes générations de biocarburants (source Benoist et al., 2013) 115
Tableau 14 – Productivités comparées des biocarburants de première et seconde générations (source : Broust et al., 2013) cop = coprah, gr = graines, ms = matière sèche. 117
Tableau 15 – Surfaces nécessaires à la production d'un m3 ou d'une tep de biocarburants de première et seconde génération (source : Broust et al., 2013). Reprise du tableau 14. 118
Tableau 16. Marché potentiel de biocarburant dans les transports en tonnes métriques. 122
Tableau 17. Marché potentiel de biocarburant dans le secteur de la production d'électricité. 123
Tableau 18. Part des différents secteurs dans la consommation de gasoil. 124
Tableau 19: Consommation de carburant (kTEP) des transports (source Statistics Mauritius, 2017) 127
Tableau 20 : Production de la filière canne à sucre à Maurice 2014-2017 (source Statistics Mauritius, 2017) 127

IX. Figures

Figure 1 : Carte de l'Union des Comores 20
Figure 2 : Evolution de la population des Comores de 1990 à 2015 22
Figure 3 : Structure du PIB en pourcentage (source : Commission Économique pour l'Afrique. Profil 2017 : les Comores. Bureau sous-régional pour l'Afrique de l'Est). 22
Figure 4 : bilan des consommations en énergie primaire des Comores 24
Figure 5 : répartition de la consommation de produits pétroliers 25
Figure 6: évolution de la population de Madagascar entre 1960 et 2017 30
Figure 7 : Répartition de l'offre énergétique primaire à Madagascar 33
Figure 8 : Part de marché des différents types d'hydrocarbures en 2017 34
Figure 9: Évolution de la répartition des immatriculations de voitures à Antananarivo selon la source d'énergie (en %) entre 2013 et 2017 35
Figure 10: Carte de Maurice 53

Figure 11 : Moyennes de températures et de précipitations à Maurice, 1991-2015 (source Banque Mondiale) 54
Figure 12: Evolution de la population totale à Maurice entre 1960 et 2016 54
Figure 13: Surfaces cultivées et production de canne 1997-2016 (Statistics Mauritius, 2017) 56
Figure 14: : Consommation en énergie primaire à Maurice en 2017 (en haut) et depuis 2007 - source : Statistics Mauritius 2017 57
Figure 15: Consommation d'énergie finale par secteur, 2016 et de 2007 à 2016 (source : Statistics Mauritius) 57
Figure 16: Production électrique renouvelable vs fossile (source : Statistics Mauritius, 2017) 58
Figure 17 : Usine de production du bioéthanol à Maurice (Source : Omnicane) 63
Figure 18: Carte de la Réunion 66
Figure 19: Evolution de la démographie à la Réunion, population totale estimée (source : INSEE, Nextat 2018) 67
Figure 20: Répartition de la densité de population à la Réunion (source : INSEE) 68
Figure 21 : Estimations de PIB par habitant en 2014 dans la zone océan Indien 69
Figure 22: Evolution de la consommation en énergie primaire – La Réunion (source : SPLER, Nextat 2018) 72
Figure 23: Taux de dépendance énergétique 73
Figure 24: Consommation d'énergie finale 73
Figure 25: Production électrique renouvelable vs fossile 74
Figure 26: Production électrique par type d'énergie en 2015 (source : OER) 74
Figure 27: Consommation de carburants dans les transports (source : SPLER, Nextat2018) 75
Figure 28: Consommation en carburants dans les transports routiers (source : SPLER, Nextat 2018) 75
Figure 29: Carte des Seychelles 82
Figure 30 : évolution des consommations en énergie primaire des Seychelles entre 2000 et 2015 (données pour 2014 non disponibles) 85
Figure 31: les évolutions de consommations d'énergie finale aux Seychelles entre 2000 et 2015. 86
Figure 32: A) segmentation des consommations B) consommations d'énergie finale aux 86
Figure 33: Production d'électricité par technologie (Mix énergétique en 2015) 87
Figure 34: Panorama des principales filières de production de biocarburants (1ère, 2nde et 3ème générations) (Source [[1]]) 96
Figure 35 : Schéma de principe du procédé de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique 97
Figure 36 : Principaux acteurs la voie biochimique (source IFPEN, 2015) 101
Figure 37 : Vue d'ensemble des filières de conversion thermochimique de la biomasse lignocellulosique 102
Figure 38 : Schéma de principe de la filière Biomass to Liquids (voie thermochimique par gazéification) 103
Figure 39 : Schéma des filières de productions de biocarburants issus de microalgues lipidiques. 108
Figure 40 : bassins de production de microalgues et photobioréacteurs. 110
Figure 41: production théorique d'huiles végétales à destination de biocarburants issues de microalgues comparée avec les filières terrestres (en litre/hectare). 110
Figure 42: production de biodiesel à partir de microalgues. Les verrous technologiques. 112
Figure 43: Consommation en énergie primaire à Maurice en 2017 126
Figure 44: Évolution en énergie primaire à Maurice entre 2007 et 2016 126
Figure 45 : Consommation de carburants dans le secteur transport (source : SPLER, Nextat2018) 129

Figure 46 : les évolutions de consommations d’énergie finale aux Seychelles entre 2000 et 2015 (en ktep) 132

X. Sources

[1] Benoist A., Van de Steene L., Broust F., Helias A.. 2012. Enjeux environnementaux du développement des biocarburants liquides pour le transport. Sciences, Eaux et Territoires (7) : p. 66-73.

[2] Broust F., Girard P., Van de Steene L. 2013. Biocarburants de seconde génération et bioraffinerie. Techniques de l'Ingénieur. Bioprocédés : 17 p.

[3] Ballerini D., Les biocarburants 2006– État des lieux, perspectives et enjeux du développment. IFP publications, Edition Technip

[4] Kees Daey Ouwens, George Francis, Ywe Jan Franken, Winfried Rijssenbeek, Arthur Riedacker, Nikolaus Foidl, Raymond Jongschaap, 2007 - Position Paper on Jatropha curcas-State of the Art, Small and Large Scale Project Development FACT Jatropha seminar.

[5] Van Thuijl E., Roos C.J. and Beurskens L.W.M., 2003, "An overview of biofuel technologies, markets and policies in Europe" - ECN-C-008 January 2003.

[6] Hamelinck C. N., 2004, "Outlook for advanced biofuels" Utrecht University ISBN: 90-393-3691-1.

[7] Techniques de l'Ingénieur. 30 septembre 2009 par La rédaction dans Environnement

[8] Projet ANR- PNRB SHAMASH. 2006-2010. Production de biocarburant lipidique par des microalgues. INRIA, CNRS, IFREMER, Univ. Nantes, CEA-CNRS, CIRAD, Univ. Aix-en-Provence, Alpha Biotech.

Sources non inclues dans le texte

Union des Comores

- Commission Économique pour l'Afrique. Profil 2017 : les Comores. Bureau sous-régional pour l'Afrique de l'Est.
- Groupe de la Banque Africaine de Développement – Union des Comores – Document de stratégie pays 2016-2020 - DEPARTEMENT EARC Mars 2016
- http://comores2016-2021.org/comores-pays-dans-lurgence-energetique-et-pourtant-fort-potentiel-en-energies-propres/
- Préparation de la 3ème Conférence Internationale sur le Développement Durable des Petits États Insulaires en Développement - *Rapport National de l'Union des Comores*

Madagascar

- http://www.meteomadagascar.mg/services/applications/climatologie

Maurice

- https://business.mega.mu/2011/08/02/university-mauritius-explores-possibility-using-coconut-oil-bio-fuel/

Réunion

- IEDOM, rapport annuel 2015 et INSEE bilan économique 2015
- SPLER, Nextat 2018

Seychelles

- Analysis of seychelles energy demand in 2000-2015, Presentation by the Seychelles Energy Commission , Mamy Razanajatovo , Green Climate Fund Workshop at SFA on 20th, Sept 2016
- Integrated Energy Study for Seychelles for 2015-2035, Parts 1&2, Seychelles Energy Commission
- Seychelles In Figures, Edition 2017, National Bureau of Statistics, SEYCHELLES
- http://greenfuels.co.uk/why-green-fuels/closed-loop-systems/
- https://journeysbydesign.com/destinations/seychelles/main-islands/banyan-tree
- Intended Nationally Determined Contribution (INDC) Under The United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC), September 2015

Sources générales :

- ***C. Defard, J. Hamann et B. Gauthier. Mai 2018 :*** **Situation, enjeux et perspectives sur le marché des énergies renouvelables dans l'Océan Indien (Comores, Madagascar, Maurice, Seychelles).** ***AMBASSADE DE FRANCE AU KENYA - SERVICE ECONOMIQUE REGIONAL .***
- IEA International Energy Agency : Key World Energy Statisctics, 2017.

XI. ANNEXES

A. État de l'art sur les biocarburants de première génération.

Le terme biocarburants décrit étymologiquement tous les carburants issus de la biomasse[32]. Selon la directive européenne 2003/30/CE[33], on appelle biocarburant, « un combustible liquide ou gazeux utilisé pour le transport et produit à partir de la biomasse ».
En pratique, ceux-ci se classent en deux grandes familles: les biocarburants de « première génération » issues d'une partie de la plante riche en produits oléagineux ou en sucre, alors que les biocarburants de « seconde génération » valorisent toute la plante.

Les biocarburants de « première génération » sont produits à partir de technologies matures, qui depuis une vingtaine d'années sont largement utilisées et répliquées dans le monde. Ce sont principalement : les huiles végétales pures, le biodiesel et l'éthanol produit à partir de matières sucrées et amylacées.
Les biocarburants de « seconde génération » sont très peu développés pour des raisons de rentabilité économique et de maîtrise de la technologie de production. C'est le cas par exemple de l'éthanol cellulosique (produit à partir de résidus agricoles comme les pailles de céréales, de résidus forestiers etc.) ou les carburants BTL (biomass to liquid) qui sont des hydrocarbures de synthèse produits à partir des gaz issus des procédés de gazéification et du craquage thermique de biomasses. Des travaux de recherche et développement sont nécessaires pour optimiser les performances et les rendements de ces procédés industriels. Les acteurs de la filière biocarburants estiment que ces procédés ne seront pas disponibles et rentablement optimisés avant 15 à 20 ans.

Ce chapitre présente l'état de l'art sur la production et l'utilisation des biocarburants de première génération.

1. Les huiles végétales pures

1.1 Production des huiles végétales pures[34]

Les huiles végétales carburants (HVC), aussi connue sous les noms d'huiles végétales pures (HVP) ou huiles végétales brutes (HVB) peuvent être utilisées (jusque 100 %) comme carburant par tous les moteurs diesel (inventés à l'origine pour ce type de carburant), sous réserve de

[32] La biomasse, une des formes de captation de l'énergie solaire, désigne au sens large l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale. Selon la Directive Européenne 2003/30/CE, la biomasse désigne : « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et de ses industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux ».

[33] **DIRECTIVE 2003/30/CE** du Parlement Européen et du Conseil de l'Europe, mai 2003.

[34] Huile produite à partir de plantes oléagineuses par pression, extraction ou procédés comparables, brute ou raffinée, mais sans modification chimique (Directive Européenne 2003/30/CE).

respecter certaines précautions et d'apporter parfois quelques modifications mineures en fonctions du type de moteur et des applications.
Elles sont également la matière première brute qui sert à la fabrication du biodiesel qui est un ester alcoolique utilisé aujourd'hui incorporé directement dans le gazole.
Les huiles végétales sont obtenues par simple pressage de biomasses oléagineuses. Chimiquement elles sont essentiellement constituées à environ 95% de triesters nommés triglycérides à liaisons insaturées (doubles liaisons carbone/carbone) et à 5% d'acides gras libres. Classiquement, en fonction des contextes et des applications, on distingue deux principales filières de production d'huiles végétales : la filière industrielle et la filière artisanale.

1.1.1 La filière industrielle

Les installations industrielles d'huileries peuvent avoir des capacités de trituration (pressage) de plusieurs milliers de tonnes de graines par jour.
Dans ces installations, les graines ou amandes subissent en général dans un premier temps les opérations de séchage, de nettoyage et de décorticage. Il s'ensuit les phases de pression, d'extraction et de raffinage.

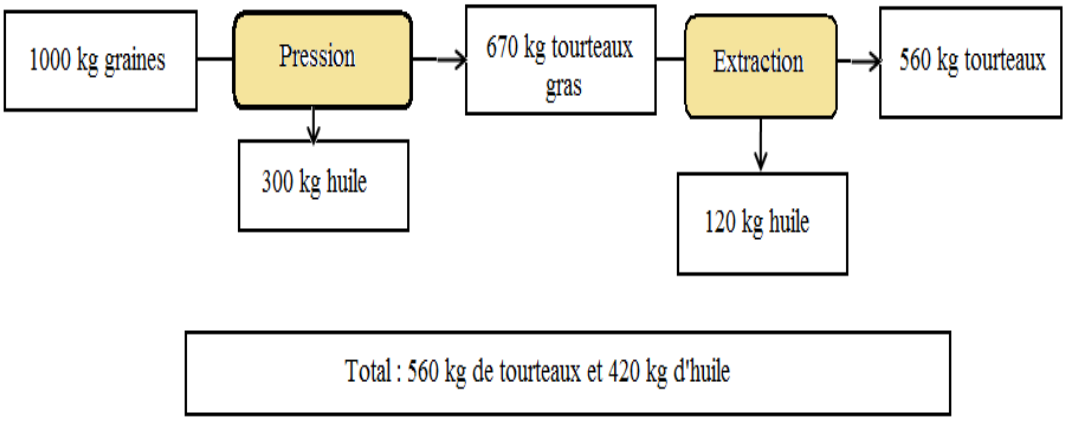
La phase de pression

Généralement les graines sont aplaties (opération de broyage-laminage) puis portées à une température de 80°C en présence de vapeur d'eau (opération de cuisson) avant d'être pressées. On obtient l'huile de première pression et le tourteau de pression (contenant 12 à 20% d'huile pour le colza et le tournesol, figure A1).

La phase d'extraction

Elle consiste à extraire l'huile résiduelle contenue dans le tourteau de pression à l'aide d'un solvant. Le solvant couramment utilisé est l'hexane : un mélange d'huile et d'hexane (miscella) est ensuite séparé par distillation. L'huile obtenue est une « huile brute d'extraction ». Le solvant est condensé puis réutilisé dans la chaîne.
Le tourteau obtenu est séché sous vide à 100°C et peut être utilisé comme aliment pour le bétail, fertilisant pour les sols ou comme combustible dans les chaudières.

Figure A1 : Description du process et rendement de la trituration pour une unité de



trituration de colza[35]

[35] État du développement de la filière diester en France préparé par VERMEERSCH et présenté par LIENNARD **LIENNARD A.**, Session de formation sur les biocarburants, 2IE, Ouagadougou 14-17 mars 2007

La phase de raffinage

Elle consiste à éliminer les impuretés, certains pigments, odeurs etc., contenus dans l'huile brute. Cette phase comporte les opérations de :

- dégommage ou démucilagination : élimination des mucilages (phospholipides) par précipitation grâce à de l'eau pure ou de l'eau acidulée, suivi d'une décantation ou d'une centrifugation.
- neutralisation-lavage-séchage : élimination des acides gras libres par ajout d'une solution basique (soude) avec brassage suivi d'un lavage à l'eau. Le mélange d'eau et de savons (« soap stock ») issus de la neutralisation, est séparé de l'huile par décantation ou centrifugation. L'huile obtenue est séchée sous vide à 100 °C.
- le « décirage » : élimination des cires contenues dans certaines huiles (tournesol par exemple). Il se fait par diverses méthodes : « winterisation », centrifugation, démucilagination à froid etc.

Une fois désodorisée et décolorée, l'huile issue de ces différentes opérations est de qualité alimentaire.

1.1.2 La filière artisanale

Cette filière est beaucoup plus simple que la première. Elle comporte une phase de pression à froid[36] suivi d'une décantation et d'une filtration.

La pression à froid

Sur colza par exemple, cette opération produit 1/3 d'huile de première pression et 2/3 de tourteau. Elle est optimisée pour un taux d'humidité compris entre 5 et 8%[37]. La pression peut se faire manuellement (pression par cric hydraulique, vis de vérin, bras de levier avec une capacité inférieure à 10 litre par heure) ou de façon motorisée (presses à vis). Les capacités des presses à vis utilisées vont de 4 à 1800 kg par heure suivant les cas. On distingue en général les presses à vis à barreaux (40kg/h à plus de 2 000 kg/h) et les presses à vis à cage percée (< 50 kg/h).

Selon le type de presse, on obtient des tourteaux avec des teneurs en matières grasses allant de 7 à 25 %. Le rendement d'extraction quant à lui, est lié à la vitesse de rotation de la vis et au diamètre de la buse de sortie[38] : plus la vitesse de rotation est faible et le diamètre de la buse réduit, plus le rendement d'extraction est élevé. Toutefois dans ce cas, le rendement horaire décroît.

La décantation et la filtration

L'huile obtenue subit une décantation à l'issue de laquelle les sédiments sont retirés. Cette opération dure entre 3 à 7 jours. Elle a l'inconvénient de conduire à des pertes importantes d'huile dans les sédiments. La filtration peut être effectuée avant la décantation (en sortie de presse) ou effectuée après la décantation. Pour un usage comme

[36] Pression sans passer par l'étape de cuisson. La pression est dite « à chaud » dans le cas contraire

[37] **VAITILINGOM G., BATTAIS L., DEFAYE S.,** Perspectives de développement de l'utilisation des huiles végétales pures hors utilisations biocarburant, Rapport final, DEBAT/ CIRAD, (2006)

[38] **Tests de Valbiom**, cités par MH. NOVAK et JM. JOSSART (2004) ; « Diversification agricole : guide pour la production et les débouchés d'huile et de tourteau de colza à la ferme ». Juin 2004

combustible, une filtration de 10 µm minimum est exigée pour des applications moteurs. On distingue plusieurs types de filtres : les filtres à cartouches (particules > 1 µm), les filtres à plaques, et les filtres à membranes (particules de 100 à 1 µm). L'huile obtenue n'est pas de qualité alimentaire (sauf pour certaines huiles : huiles « concrètes ») mais elle peut être utilisée comme carburant dans les moteurs diesel ou comme combustible dans les brûleurs. Toutefois, elles doivent contenir moins de 500 ppm de particules après une filtration à 10 microns, moins de 50 ppm de phosphore et moins de 500 ppm de cires[39]; sinon une filtration supplémentaire de minimum de 5 µm est nécessaire qui peut être encore améliorée jusqu'à 1 µm[40].

Les principales huiles végétales alimentaires et non alimentaires, utilisées aussi bien dans la filière industrielle que la filière artisanale, sont données par le tableau T1 ci-dessous.

Nom botanique	Nom commun	Huile/Graine (%)
Zea mays	Maïs	-
Cocos nucifera	Cocotier	60
Elaesis guineensis	Palme et palmiste	20 et 50
Orbignya speciosa	Babassu	60
Juglan regia	Noix	-
Brassica campestris	Colza	41
Arachis hypogaeasis	Arachide	50
Linium usitatissimun	Lin	38
Carthamus tinctorius	Carthame	35
Aleurites fordii	Tung	60
Ricinus communis	Ricin	49
Jatropha curcas	Pourghère	30
Gossypium hirsitum	Coton	36
Simmondsia chinensis	Jojoba	60
Butyrospermum parkii	Karité	30
Olea europa	Olive	
Sesamum indicum	Sésame	52
Heliantus annuus	Tournesol	40
Glycine max	Soja	25

Tableau T1 : Principales huiles végétales (alimentaires et non alimentaires) [41]

[39] **VAITILINGOM G**. Extraction, conditionnement et utilisation des Huiles Végétales Pures Carburant, Rapport final, octobre 2007.

[40] **VAITILINGOM G., BATTAIS L., DEFAYE S.,** Perspectives de développement de l'utilisation des huiles végétales pures hors utilisations biocarburant, Rapport final, DEBAT/ CIRAD, (2006)

[41] **VAITILINGOM G**., Huiles végétales – biocombustibles diesel : influence de la nature des huiles et en particulier de leur composition en acides gras sur la qualité-carburant, thèse de doctorat, Université d'Orléans, 1992.

1.2 Usages énergétiques des huiles végétales pures

Les huiles végétales peuvent être utilisées pures ou en mélange au gazole pour la carburation automobile (transport), ou dans des applications spécifiques (« circuits-courts ») : les moteurs diesel à poste fixes (pompage, irrigation, électrification etc.), les brûleurs (chauffage, séchage…), les installations de cogénération (production combinée d'électricité et de chaleur).

Les conditions d'utilisation des huiles végétales pures dans les moteurs diesel ou dans les brûleurs sont étroitement liées aux propriétés physico-chimiques des huiles, et aux conditions thermiques dans la chambre de combustion du moteur ou du brûleur (qui dépend de la technologie du moteur). Le tableau II donne les principales caractéristiques physiques et chimiques de quelques huiles végétales. En effet, les huiles végétales diffèrent fondamentalement du gazole par :

- leur nature chimique (composition chimique) : pour des faibles températures dans la chambre de combustion (< 500 °C), les délais d'inflammation[42] et les temps d'évaporation des gouttes d'huiles sont plus longs que dans le cas du gazole. On assiste à la formation de dépôts sur certains organes du moteur (piston, injecteur, culasse etc.) suite à une polymérisation de l'huile. Au-delà de cette température (500 °C) les temps d'évaporation et les délais d'inflammation sont quasi-identiques et on n'observe pas plus de dépôts que dans le cas du gazole.
- leur viscosité : la viscosité plus élevée des huiles (10 à 15 fois plus que celle du gazole) provoque des problèmes de pompage (rupture possible de la pompe d'injection), d'atomisation et de pulvérisation. Cela nécessite un préchauffage à des températures atteignant 120 °C pour l'huile pure. Cette température de préchauffage varie suivant la proportion d'huile dans le cas des mélanges huile/gazole.

	Carburant				(*) viscosité à 20 °C
	Colza	coton	tournesol	Jatropha	gazole
Densité à 20 °C (kg/m^3)	916	919	925	920	836
Viscosité à 40 °C (mm^2/s)	35,7	35,7	58(*)	55(*)	3,3
Point éclair (°C)	320	230	316	240	63
Pouvoir calorifique inférieur (kJ/kg)	36800	36400	38100	38850	43700
Indice de cétane	37	38	37	45	50
Résidu Conradson (%)	0,41	0,41	-	1,31	0,08
C (%)	77,73	77,39	76.9		85.1
H (%)	11,92	11,90	11.7		14.9
O (%)	10,76	11,10	11.4		-

Tableau T2 : Caractéristiques physico-chimiques de quelques huiles végétales[43]

[42] Intervalle de temps entre le début de l'injection et le début de la combustion. .

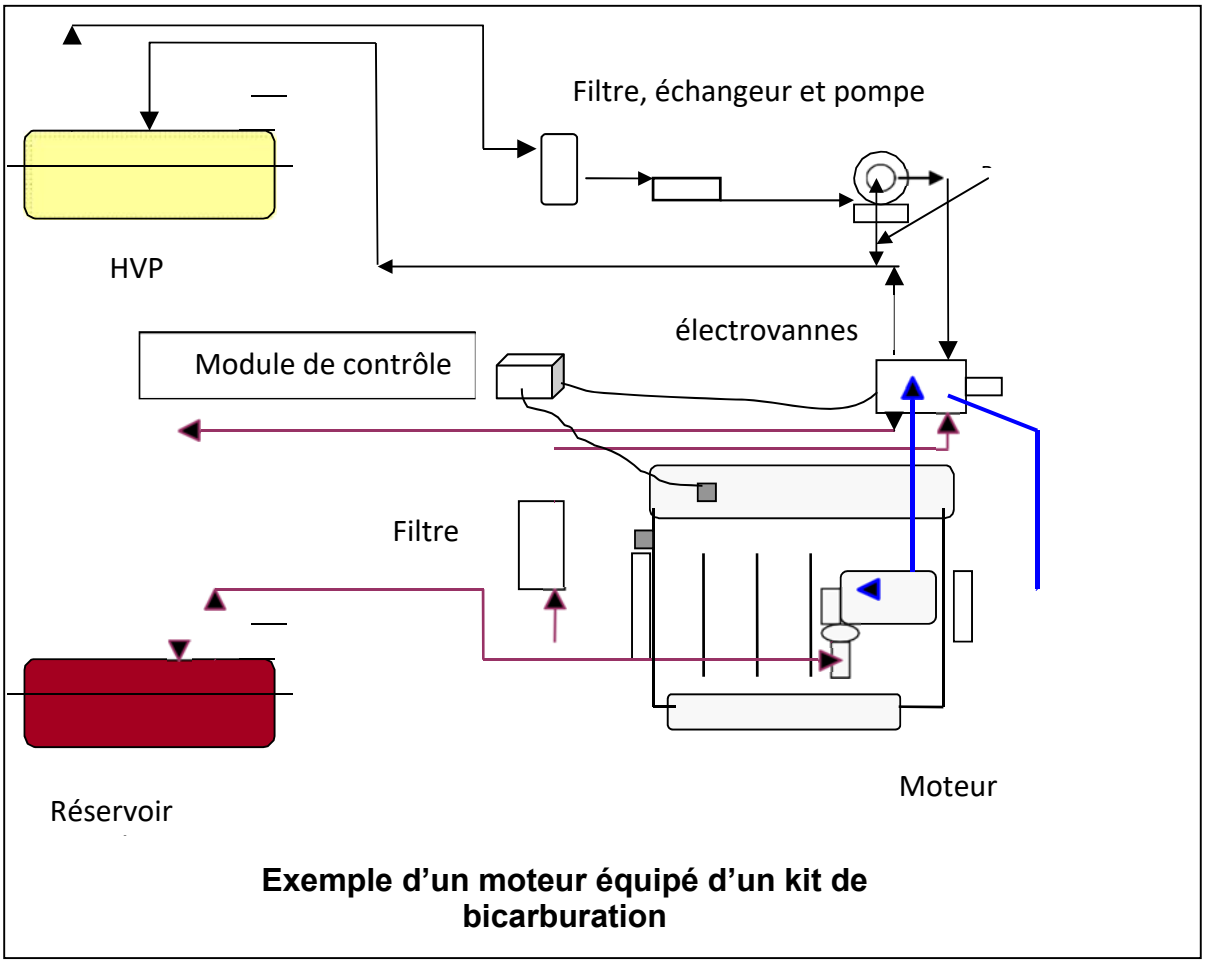
[43] **DAHO T.**, Contribution à l'étude des conditions optimales de combustion des huiles végétales dans les moteurs diesel et sur les brûleurs : cas de l'huile de coton, thèse de doctorat, Université de Ouagadougou, 2008.

Pour les moteurs diesel, il existe deux principales technologies :

- **les moteurs à injection indirecte** : Ils sont caractérisés par une préchambre de combustion où la combustion est initiée et une chambre principale où se poursuit la combustion par diffusion. Ils équipent les véhicules automobiles, certains moteurs industriels. Ces derniers tolèrent les huiles végétales pures (moyennant une bonne filtration). Mais les tendances des 20 dernières années les ont rendus minoritaires face aux injections directes.

- **les moteurs à injection directe : L'injection et la combustion du carburant sont effectuées dans une chambre de combustion unique.** Les puissances vont de 0,5 kW jusqu'au mégawatt. Sans modifications, ceux-ci n'acceptent pas les huiles végétales pures. Lorsqu'ils sont alimentés avec des huiles végétales pures à des charges inférieures à 50%de leur charge maximale (chambre de combustion à basse température), on assiste à la formation de dépôts charbonneux à l'intérieur du moteur et une forte dispersion cyclique pouvant conduire à des dégâts mécaniques parfois importants[44]. Dans ce cas, les températures dans la chambre de combustion sont inférieures à 500 °C. L'utilisation de mélanges significatifs d'huile végétale et de fioul (contenant plus de 10 % d'huile) ne résout pas les problèmes d'encrassement tant que la charge reste inférieure à 50%. L'encrassement existera toujours, seul le temps de formation est fonction du taux d'huile végétale. Pour assurer une température de la chambre de combustion supérieure à 500 °C, on réalise un fonctionnement en bicarburation en utilisant un kit de bicarburation, sans modification mécanique du moteur. Ce type de kit permet de démarrer le moteur froid avec du gasoil et d'alimenter le moteur avec 100% d'huile végétale une fois que les conditions de température dans la chambre de combustion sont suffisantes (supérieure à 500 °C).

[44] VAITILINGOM G. **Extraction, conditionnement et utilisation des Huiles Végétales Pures Carburant, Rapport final, octobre 2007.**



Exemple d'un moteur équipé d'un kit de bicarburation

L'électrovanne est pilotée par une information sur la charge instantanée du moteur (température des gaz d'échappement ou vitesse de rotation).
L'utilisation des huiles végétales pures ou en mélange au fioul dans des applications thermiques avec des brûleurs nécessite, en plus des exigences de filtration des huiles, une adaptation qui consiste :

- à intégrer dans le circuit d'alimentation du brûleur, un dispositif de réchauffage et de recirculation du combustible permettant d'obtenir des températures du combustible d'environ 140 °C pour une bonne pulvérisation ;

- à effectuer un choix adapté du gicleur et à effectuer des réglages adaptés de la pression de pulvérisation et du débit d'air.

En résumé : les huiles végétales pures peuvent être utilisées dans les moteurs diesel ou dans les brûleurs (surtout orientés pour des applications spécifiques : « circuits-courts ») mais compte tenu de leurs spécificités par rapport au gazole ou au fioul, leur utilisation nécessite :

une bonne filtration : contenir moins de 500 ppm après une filtration à 10 microns, moins de 50 ppm de phosphore et moins de 500 ppm de cires.

un préchauffage pour pallier les problèmes d'injection ou de pulvérisation liée à leur viscosité plus élevée que celle du gazole

une température de chambre de combustion suffisante qui passe par l'utilisation d'un kit de bicarburation ou la modification de certaines pièces du moteur.

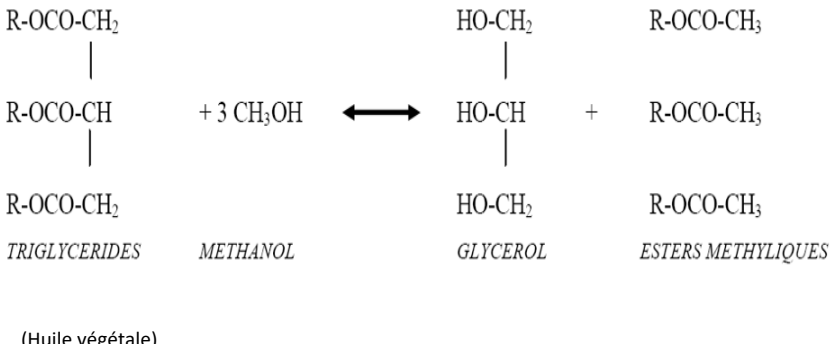
Une fois les conditions favorables à une bonne combustion des huiles végétales remplis, les performances et les émissions sont très comparables à celles obtenues avec le gazole ou le fioul.

2. Le biodiesel : esters d'huiles végétales

L'avantage des biodiesels, c'est qu'ils ont des caractéristiques physico-chimiques très proches de celles du gasoil (en particulier la viscosité), si bien qu'ils peuvent substituer ce dernier à 100% sans problème pour le moteur (sauf quelques modifications et entretiens sur les joints et caoutchoucs en général). Pour produire du biodiesel, l'huile subit une trans-estérification en présence d'alcool et d'un catalyseur (généralement basique), et génère un ester (biodiesel) et de la glycérine. Les différents composants de cette « soupe » sont ensuite séparés par centrifugation ou décantation. Les esters obtenus sont appelés biodiesel ou diester.

Selon le type d'alcool (méthanol ou éthanol) utilisé, des esters méthyliques ou éthyliques sont obtenus. La plupart des esters préparés aujourd'hui sont des esters méthyliques (E.M.H.V. pour esters méthyliques d'huiles végétales). Ces derniers sont faciles à synthétiser et préparés à partir de Méthanol (réactif peu cher et issu de la filière pétrochimique).

La réaction de trans-estérification se présente comme suit :



(Huile végétale)

Les propriétés physico-chimiques des esters obtenus sont proches de celles du gazole (Voir tableau 10).

Caractéristique	Gazole	Ester méthylique de colza	Ester éthylique de coton	Ester méthylique de soja
Masse volumique à 20 °C (kg/m^3)	836	880	885	885
Viscosité à 40 °C (mm^2/s)	3,3	6,7	4	4,1
PCI (kJ/kg)	43 700	37 700	37 500	37 300
Point éclair (°C)	63	171	110	171
Indice de cétane	50	49	52	51
Point de trouble (°C)	<-5	-3	1	2

Tableau T3 : Caractéristiques physico-chimiques de quelques esters d'huiles[42]

2.1 Procédés de production des esters méthylique

Pour la synthèse de biodiesel méthylique on distingue :

- les procédés en discontinu utilisés surtout pour les petites capacités. On y rencontre des installations avec de petits réacteurs pouvant produire 150 litres de biodiesel par jour (ou moins), des installations de taille moyenne avec des capacités pouvant aller jusqu'à 2500 litres par jour (ou plus). Généralement, il est considéré qu'une unité d'estérification de ce type est rentable au delà de 20 000 tonnes de biodiesel par an (effet d'échelle qui se traduit par une baisse des coûts de productions) et la limite de ce type de procédés en discontinu
  est de 80 000 tonnes par an (soit un réacteur de 15 M^3).
- les procédés en continu, très souvent choisis dans les productions industrielles actuelles. Les capacités de production des installations industrielles actuelles peuvent dépasser 100 000 tonnes par an.

On distingue par ailleurs deux principales techniques de catalyse : homogène et hétérogène.

- **La catalyse homogène** : La trans-estérification est effectuée suivant le principe général décrit ci-dessus en utilisant un catalyseur basique. Les principaux catalyseurs utilisés dans ce procédé sont la soude, la potasse et le méthylate de sodium. Dans les procédés en continu utilisant la catalyse homogène, la trans-estérification a généralement lieu dans deux réacteurs en série (figure A2). On obtient à la sortie du deuxième réacteur l'ester méthylique qui est lavé (pour éliminer les traces de catalyseur, de glycérine et de méthanol) puis séché à 140 °C sous pression réduite. Les rendements en esters de ce procédé sont compris entre 98,5 et 99,4 %.

La glycérine (glycérol) issue du procédé est purifiée en neutralisant les sels basiques provenant du catalyseur à l'aide d'un acide minéral.

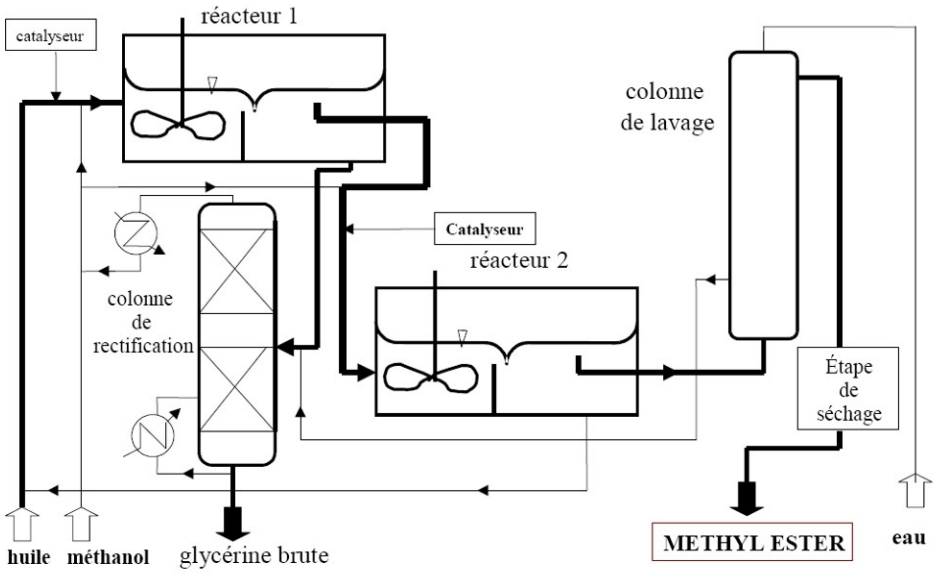


Figure A2: Schéma de principe d'un procédé continu de production d'esters méthyliques par catalyse homogène (société Lurgi)

- **La catalyse hétérogène** : Ce procédé utilise un catalyseur en général solide non miscible aux huiles (utilisé généralement dans les procédés en continu). Il a l'avantage de produire de la glycérine qui ne nécessite pas des traitements coûteux de purification (car ne contient pas les sels basiques comme dans le cas de la catalyse homogène) et de permettre une réutilisation du catalyseur. L'un de ces catalyseurs le plus utilisé est un aluminate de zinc de formule $ZnAl_2O_4$, (aucune perte d'activité n'est observée après 1 an de fonctionnement, et on observe une bonne résistance à l'attrition[45]). Dans le procédé continu par catalyse hétérogène, on utilise comme précédemment, deux réacteurs en série (figure A3). La teneur en esters avec ce procédé est supérieure à 98 % en poids. La glycérine obtenue présente une pureté supérieure à celle obtenue par les procédés fonctionnant en catalyse homogène (pureté > 98%).

[45] **DANIEL BALLERINI**, Les biocarburants de première génération : l'éthanol et le biodiesel, État de l'art, novembre 2007.

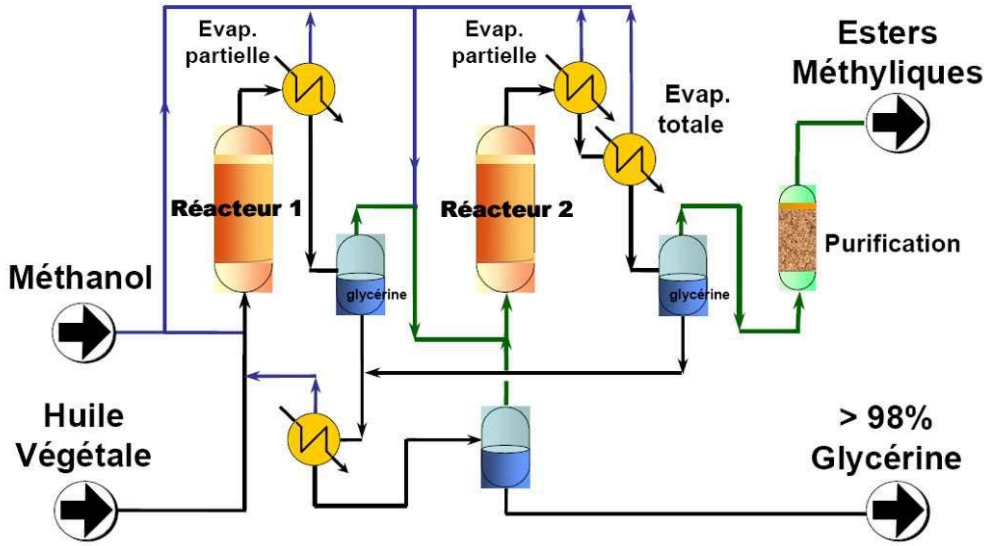


Figure A3: Schéma de principe d'un procédé continu de production d'esters méthyliques par catalyse hétérogène

2.2 Procédés de production des esters éthyliques

De l'éthanol peut être utilisé à la place du méthanol. Cependant la catalyse homogène, est très délicate. En effet, la distillation nécessaire de l'alcool à la sortie du premier réacteur (pour favoriser la séparation de la glycérine avant l'entrée dans le second réacteur) est difficile à mettre en œuvre dans le cas de l'éthanol. On peut produire à nouveau des glycérides (réaction inverse) avec la présence du catalyseur, encore actif. Ce problème ne se présente pas en catalyse hétérogène avec l'éthanol.
Un autre inconvénient de l'éthanol est sa pureté (teneur en eau). L'obtention d'éthanol pur, indispensable à la réalisation correcte de la trans-estérification, est beaucoup plus délicate et coûteuse que dans le cas du méthanol. En termes de rendements, ils sont plus faibles que dans le cas du méthanol du fait de la faible réactivité de l'éthanol par rapport au méthanol.
La maîtrise de la production optimisée d'esters éthyliques fait toujours l'objet de recherches. La catalyse hétérogène se présente comme une option intéressante.

2.3 Utilisation des esters d'huiles et des sous-produits de la trans- estérification

Les principaux produits issus de la réaction de trans-estérification sont les esters et la glycérine (ou glycérol).
La glycérine est utilisée dans de nombreuses applications :

- dans la chimie (peintures glycérophtaliques, synthon pour diverses synthèses chimiques d'éthers, d'acétals ou de carbonates) ;
- dans les médicaments (sirops, suppositoires etc.) ;
- dans l'alimentation (vin) ;
- dans la cosmétique (solvant, hydratant, pâte dentifrice etc.) ;

Les esters obtenus sont utilisés principalement comme carburant dans les moteurs diesel et sont désignés couramment par le terme biodiesel.

Le biodiesel est utilisable pur ou en mélange au gazole dans tout type de moteur diesel (injection directe et injection indirecte). Il est utilisé :

- soit en mélange au gazole : des teneurs de 2%, 5%, 20%, 30% sont généralement incorporées au gazole suivant les pays et selon les types de flottes (voitures particulières, véhicules utilitaires etc.). On parle alors de carburant respectivement B2 (pour biodiesel 2%), B5, B20 et B30.

- soit pur (B100) dans certains pays (Allemagne, Italie, France etc.) dans des véhicules ayant fait l'objet d'adaptations de certains matériaux (en caoutchouc notamment).

Les performances obtenues sont très comparables à celles obtenues avec le gazole. Une synthèse des résultats de la littérature en termes d'émissions de CO (monoxyde de carbone), de HC (hydrocarbures imbrûlés), de particules, de HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), sont en général favorables aux esters d'huiles végétales ; tandis que, les émissions de NO_x et d'aldéhydes leurs sont défavorables[46]. On observe un bon comportement en endurance de l'ester. Les dépôts sont très faibles, généralement inférieurs à ceux observés avec le gazole. Toutefois, l'ester doit être bien purifié. A ce titre, le biodiesel est soumis généralement à des spécifications particulières[47] .
Parmi les inconvénients liés à l'utilisation d'esters purs d'huiles végétales dans les moteurs diesel, on peut citer la corrosion de certains composants, notamment les matériaux en caoutchouc. Cela nécessite l'utilisation de matériaux adaptés. Aussi, ces esters se comportent comme des solvants pour les peintures et les revêtements. Par ailleurs, ils sont hygrophiles et présentent une légère instabilité par oxydation

3. L'alcool : le bioéthanol

Le bioéthanol est l'éthanol d'origine biologique et agricole obtenu par fermentation du sucre extrait de la plante sucrière ou par hydrolyse enzymatiques de l'amidon contenu dans les céréales. Il est utilisé comme biocarburant dans les « moteurs à essence ».

Les végétaux contenant du saccharose (betterave, canne à sucre…) ou de l'amidon (blé, maïs…) peuvent être transformés pour donner du bioéthanol, On parle généralement de filière "sucre" pour désigner cette filière de production du bioéthanol.

Cet éthanol d'origine végétale n'est rien d'autre que de l'alcool éthylique, le même que celui que l'on trouve dans toutes les boissons alcoolisées. Il peut être mélangé à l'essence en des proportions allant de 5 à 85 %, on parle alors de carburant E5 (éthanol 5%) a E85. Au-delà de 10 %, des adaptations aux moteurs de voitures sont souvent nécessaires.

Les tableaux T4 et T5 donnent respectivement les principales matières premières utilisées pour la production d'éthanol avec les rendements de production d'éthanol.
La figure A4 donne une représentation schématique des différentes voies de production d'alcool à partir de la biomasse.

[46] **GUIBET J.C., FAURE E.,** Carburants et Moteurs, tome 2 , ed. Technip, Paris 1997.

[47] norme EN 14214 en Europe, norme ASTM D6751-01 aux USA

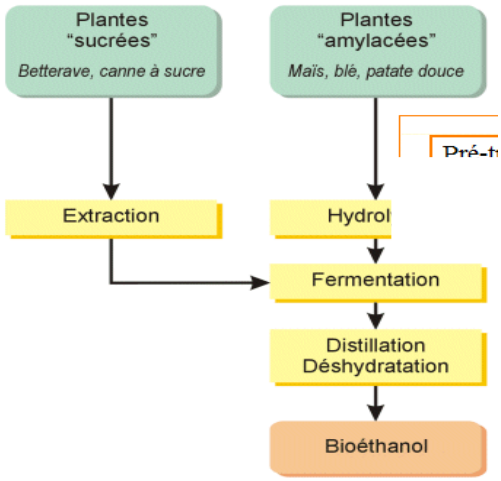


Figure A4: Différentes voies conduisant à la fabrication d'alcool de première génération à partir de biomasse sucrée ou amylacée

Plante sucrière	Rendement éthanol l/t plante	Rendement énergétique TEP/ha
Betterave	92	3,3-3,5
Canne à sucre	85	3,5-4
Sorgho sucrier	80	2-2,5

Tableau T4 : Rendements des plantes sucrières et leur potentiel alcooligène

Céréale	Rendement éthanol l/t grain	Rendement énergétique TEP/ha
Blé	370	1,4-1,6
Maïs	400	1,5-1,7
Orge	320	0,8-1,2

Tableau T5: Rendements en alcool des céréales et leur potentiel alcooligène[47]

3.1 Production d'éthanol

Pour les matières sucrières, la première opération consiste à extraire le glucose (et le fructose) qui est le substrat carboné à partir duquel on obtient l'éthanol. Lors de l'opération d'extraction du saccharose contenu dans ces matières premières on obtient :

- du glucose et du fructose (jus sucré) par lavage avec de l'eau dans le cas de la betterave et par pressage dans le cas de la canne à sucre
- des pulpes dans le cas de la betterave et des bagasses dans le cas de la canne à sucre.

Pour les matières amylacées et cellulosiques, on effectue une hydrolyse par voie enzymatique ou par voie chimique (après nettoyage, broyage et liquéfaction) pour obtenir le glucose. Les sucres fermentescibles obtenus sont soumis à une fermentation. L'éthanol obtenu est ensuite distillé.

3.1.1 La fermentation

Les sucres fermentescibles sont convertis en éthanol en présence de micro-organismes (levures et bactéries) en anaérobiose partielle, à 32-33°C, en milieu acide à pH constant. L'opération s'effectue le plus souvent en continu. Les levures sont séparées de l'éthanol en fin de cycle puis recyclées à plus de 80%. Les distilleries actuelles se caractérisent par des rendements de 90 à 92% du rendement théorique (environ 46 kg d'éthanol pour 100 kg de sucre initial).
Pendant très longtemps, la fermentation a été opérée en discontinu ou semi-continu. Cette mise en œuvre simple se justifiait par les petites tailles des installations industrielles. C'est la technologie de fermentation continue en cascade qui s'est imposée de nos jours, en particulier pour la construction de grosses unités, entrainant des effets d'échelle qui se traduisent par une baisse des coûts de productions.
En Europe, les unités de production de bioéthanol à partir de betterave sucrière et de blé sont d'une taille moyenne de l'ordre de 20 000 tonnes/an et ces dernières années, toutes les nouvelles installations de production d'éthanol à partir de maïs aux États-Unis ont des capacités de productions de plus de 100 000 t/an.

3.1.2 L'extraction de l'éthanol par distillation

L'éthanol étant produit en phase aqueuse il est extrait par distillation du jus issu de la fermentation. Cette phase consomme beaucoup d'énergie. Elle comprend deux distillations successives :

- une première distillation, qui est une distillation classique, permet d'obtenir de l'éthanol à environ 95% (une teneur voisine de l'azéotrope)
- une deuxième distillation azéotropique qui conduit à de l'éthanol pratiquement anhydre (99,8% en volume). Elle s'effectue avec des solvants entraîneurs (cyclohexane, le diéthyléther etc.) ou par déshydratation sur tamis moléculaires, utilisant la technologie PSA (« Pressure Swing Adsorption »).

3.1.3 Les effluents et coproduits

Les principaux coproduits et effluents issues de la production d'éthanol varient selon la matière première utilisée. Ainsi, on a :

- Pour la fabrication d'éthanol à partir de **betteraves sucrières** on obtient :
  - des pulpes sèches à 90 % de MS, utilisées en alimentation animale (une tonne de betteraves conduit à la production de 0,78 t pulpes/t éthanol).
  - les vinasses (riches en sels et contenant encore des matières organiques non fermentescibles en éthanol) récupérées au pied de la colonne de distillation conventionnelle. Elles peuvent être épandues en tant qu'amendement sur les terres agricoles, à raison de 3 tonnes maximum par hectare. Elles sont aussi concentrées pour être utilisées dans les formulations alimentaires animales, ou bien méthanisées.

- Pour la **canne à sucre et sorgho** on obtient :
  - les vinasses
  - la bagasse, résidu solide des étapes de broyage-pressage de la canne à sucre. Elle est principalement utilisée à des fins énergétiques pour couvrir les besoins en énergie de l'étape de distillation et la fourniture d'électricité au niveau de l'usine et du réseau voisin
- **Pour les plantes céréalières** (maïs, blé), le «dry milling» qui est la technologie la plus employée à l'heure actuelle, permet de traiter le grain entier. On obtient :
  - ➢ des vinasses dont une partie est recyclée à l'étape de liquéfaction et une autre partie est concentrée
  - ➢ des matières solides (drèches) qui sont mélangées à la phase concentrée des vinasses puis séchées. Ces drèches (encore désignées sous l'abréviation DDGS, Distiller's Dried Grain Solubles) sont utilisées en alimentation animale.

3.2 Utilisation de l'éthanol comme carburant dans les moteurs

L'éthanol peut être utilisé comme carburant dans les moteurs sous différentes formes (en mélange ou pur) et dans diverses technologies moteurs (moteurs classiques, « flex-fuel-vehicle »…). Ses caractéristiques physico-chimiques sont proches de celles de l'essence mais il présente quelques spécificités qui nécessitent des conditions d'utilisation particulières. Le tableau T6 donne les principales caractéristiques de l'éthanol. En tant que carburant pour les moteurs à « essence », ses principaux avantages et inconvénients sont décrits ci-dessous :

- Avantages :
  - ➢ Indice d'octane[48] plus élevé, de l'ordre de 110, contre environ 90 à 98 pour l'essence,
  - miscibilité en toutes proportions avec les essences,
  - densité proche de celle des essences,
  - présence d'oxygène dans la structure qui favorise la combustion,
  - chaleur latente de vaporisation élevée qui améliore l'efficacité du remplissage de la chambre de combustion.

- Inconvénients :
  - contenu énergétique plus faible dû à la présence de l'oxygène,
  - augmentation de la pression de vapeur conduisant à une augmentation des émissions par évaporation, et un risque élevée de formation de bouchon de vapeur par temps très chaud et en haute altitude (dans le cas des mélanges),
  - attaques de certains matériaux (caoutchouc, matériaux oxydables…). Il est recommandé d'utiliser pour les moteurs de véhicules roulant à l'éthanol des matériaux tels que l'acier inoxydable et le bronze, et de prohiber le magnésium, le laiton, le zinc ou encore le cuivre,
  - émission d'aldéhydes.

48 caractérise la résistance à l'auto-inflammation des essences et donc la résistance du moteur au cliquetis, un risque capital pour sa longévité

	Essence	Bioéthanol (95)
Densité (kg/dm^3)	0,75	0,79
Pouvoir Calorifique Inférieur (kJ/kg)	44 000	26 900
Pouvoir comburivore (g air/g carburant)	14.60	8.9
Point d'ébullition (°C)	27-225	78
Pression de vapeur à 38 °C (kPa)	48-103	15,9
Point éclair (°C)	- 43	13
Point d'autoinflammation (°C)	257	423
Indice d'Octane (Indice d'octane recherche)	98	106

Tableau T6 : Quelques caractéristiques physico-chimiques de l'éthanol et de l'essence[49]

3.2.1 Utilisation des mélanges éthanol anhydre/essence

L'éthanol **anhydre** peut être incorporé à l'essence à des proportions variant :

- **de 5 et 10%** (comme en Europe (5% maximum) ou aux État-Unis (10% maximum)) ou même entre 20 et 24% (comme c'est le cas au Brésil). Ces mélanges sont utilisables dans les moteurs à « essence » classiques sans aucune modification
- **de 0 à 85%** dans les moteurs utilisant la technologie FFV (« Flex Fuel Vehicle »). Cette technologie permet d'utiliser indifféremment de l'éthanol ou de l'essence ou un mélange des deux en toutes proportions. Elle est répandue au Brésil, aux État-Unis en Suède, en France etc. Son emploi suppose l'utilisation de nouveaux moteurs adaptés. Pour conserver les performances, en maintenant l'agrément de conduite et en respectant les exigences réglementaires en terme de rejets polluants, cette technologie a pris en compte les caractéristiques les plus éloignées des essences et de l'éthanol (contenu énergétique et en oxygène du carburant, caractéristiques de vaporisation et d'initiation de la combustion, interaction carburant-matériaux). Au stade de développement actuel de ces modèles, un véhicule FFV consomme en moyenne 28% (en volume) de plus qu'un modèle similaire à essence.

3.2.2 Utilisation de l'éthanol hydraté

L'éthanol peut être utilisé pur dans des moteurs ayant fait l'objet d'adaptations particulières (débits plus importants des organes d'alimentation, taux de compression élevés etc.). Dans ce cas, l'éthanol peut contenir 6 à 8% d'eau (éthanol hydraté). Ces types d'applications ont été développés au Brésil depuis les années 1975 suite au programme « proalcool » du gouvernement brésilien. Les difficultés relatives aux inconvénients de l'éthanol carburant sont prises en compte dans ces types d'applications.

B. Description technique détaillée de la filière éthanol cellulosique

(a) Prétraitement

Les procédés de prétraitement visent à séparer les constituants intimement liés de la matière lignocellulosique de façon à rendre la cellulose accessible à son hydrolyse ultérieure, en diminuant sa cristallinité et en augmentant la surface spécifique du matériau. Par action thermique et/ou chimique, la structure de la lignine peut également être détruite et l'hémicellulose plus ou moins hydrolysée. On retrouve ainsi dans la phase liquide la lignine solubilisée et les produits d'hydrolyse de l'hémicellulose, et dans la phase solide la cellulose et les résidus de lignine et d'hémicellulose. Les principales contraintes de cette étape sont d'éviter la perte ou la dégradation des sucres qui conduit à une baisse du rendement et de limiter la formation de produits inhibiteurs de la fermentation tels que le furfural ainsi que les rejets comme le glycérol.
Il existe de nombreuses technologies de prétraitement qui présentent chacune leurs avantages et inconvénients, et sont à différents stades de développement. Le choix de la technologie dépend en général du substrat (paille, bois) mais surtout des impacts qu'elle a sur les coûts et performances des étapes ultérieures d'hydrolyse et de fermentation.

Le **prétraitement mécanique** consiste en un broyage de la matière lignocellulosique en fragments de quelques mm. Il vise essentiellement à augmenter les surfaces accessibles. Bien que dépendante de la matière première (plus ou moins fibreuse), l'énergie nécessaire au broyage pour rompre la structure de la lignocellulose est trop importante pour envisager une application industrielle. Le broyage est plutôt utilisé comme préparation préalable de la charge à l'étape de prétraitement proprement dite.

<u>Prétraitements physico-chimiques</u>

La **thermohydrolyse** est un procédé discontinu qui consiste en une cuisson à l'eau (200-230°C) sous forte pression (50 bar) pendant 15 à 60 minutes. Etudiée essentiellement à l'échelle laboratoire, elle a démontré de bons taux de solubilisation des hémicelluloses (80 à 100%) et des rendements d'hydrolyse supérieurs à 90%. Malgré divers attraits tels que l'absence d'inhibiteurs et de faibles rejets, la forte pression rend les applications industrielles difficiles.

L'**explosion à la vapeur** est l'un des procédés de prétraitement les plus matures à ce jour. Il consiste à porter le matériau à haute température (entre 160 et 270°C) par injection de vapeur saturée sous haute pression (entre 10 à 50 bar) pendant un temps court (quelques secondes à quelques minutes), puis à pratiquer une détente brutale jusqu'à pression atmosphérique. Cette technique conduit à une déstructuration importante de la matrice lignocellulosique ainsi qu'à l'hydrolyse partielle de l'hémicellulose et à un début de transformation de la lignine du fait des conditions sévères imposées. Les meilleures efficacités sont obtenues en trouvant un compromis entre température et temps de contact (1 min à 270°C ou 10 min à 190°C).

Des procédé discontinus (Lotech) et continus (Stake et Iogen) ont été développés et mis en œuvre jusqu'au stade industriel. Leurs points forts sont d'être moins gourmands en énergie et en réactifs chimiques, et de générer peu de rejets. Cette technique est en outre bien adaptée aux particules de grande taille, limitant les besoins en broyage préalable, mais elle conduit à une solubilisation limitée de l'hémicellulose (inférieure à 60% du maximum théorique) et à une dégradation importante des pentoses et de la lignine, d'où la formation de produits inhibiteurs de fermentation.

Des variantes ont été développées plus récemment pour augmenter les rendements et éviter la formation d'inhibiteurs, par ajout d'acide (H_2SO_4 ou SO_2) ou de CO_2. La plus prometteuse est l'explosion à la vapeur en conditions acides douces (150-200°C, 16 bar, 2,5 minutes, 0,1N d'H_2SO_4). Ce procédé, utilisé dans le procédé d'Iogen, est bien adapté avant une hydrolyse enzymatique.

Le **procédé AFEX** Ammonia Fiber Explosion, opéré avec une solution d'ammoniaque liquide à haute

température (90-180°C) et sous pression (7-40 bars), offre l'avantage de moins dégrader les sucres que l'explosion vapeur classique. Il est plus efficace sur les biomasses herbacées que sur les biomasses riches en lignine, telles que les bois tendres.

Prétraitements chimiques

La **préhydrolyse acide** consiste à mettre la matière végétale en contact avec de l'acide dilué (de 0,3 à 2% par rapport à la matière sèche de substrat) à une température modérée (de l'ordre de 150 °C) pendant 15 à 20 minutes environ. Cette technique permet d'hydrolyser jusqu'à 90% de l'hémicellulose et de solubiliser partiellement la lignine. Elle présente l'inconvénient de former des produits de dégradation des sucres obtenus tels que le furfural qui inhibe la fermentation ultérieure. Ce prétraitement est bien adapté pour l'hydrolyse enzymatique, et peut constituer la première étape d'une hydrolyse acide. Mais de par la consommation d'acide associée, il est plus coûteux que les prétraitements physico-chimiques.

Le **prétraitement en condition alcaline** (8-12% de NaOH à 80-120°C pendant 30 à 60 minutes) dont le principe est issu du procédé Kraft de fabrication de pâte à papier, a l'avantage de solubiliser quasi-totalement la lignine et de diminuer la cristallinité et le degré de polymérisation de la cellulose. L'efficacité de délignification est dépendante de la teneur en lignine du substrat**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. L'utilisation de soude est cependant trop coûteuse et son recyclage trop difficile pour que ce procédé soit viable.

Enfin, le **procédé Organosolv**, issu de l'industrie papetière, consiste en l'extraction de la lignine et de l'hémicellulose par des solvants organiques (éthanol, acétone). A 150-200°C et en conditions acides, la cellulose et l'hémicellulose sont également hydrolysées (procédé ACOS, Acid Catalyzed Organosolv Saccharification). Ce procédé est prometteur mais limité par le coût et le besoin de recyclage du solvant.

Hydrolyse

L'étape faisant suite au prétraitement consiste à convertir les molécules de cellulose en glucose (réaction 1) : c'est l'hydrolyse.

$$\left(C_6H_{10}O_5\right)_n + nH_2O \longrightarrow nC_6H_{12}O_6 \qquad (1)$$

Si l'hémicellulose est facilement hydrolysable, parfois dès le prétraitement, l'hydrolyse de la cellulose en glucose est une opération difficile, du fait de sa structure, de sa cristallinité et de son association avec la lignine et les hémicelluloses encore présents malgré le prétraitement. L'hydrolyse doit donc être catalysée soit par un acide (dilué ou concentré), soit par des enzymes spécifiques appelées cellulases.

Hydrolyse chimique

L'**hydrolyse à l'acide dilué** se fait généralement en deux étapes. La première est semblable au prétraitement acide vu plus haut et permet de digérer les hémicelluloses et de solubiliser les sucres qui en sont issus. Après séparation, la fraction solide riche en cellulose est soumise à une nouvelle hydrolyse qui peut être optimisée indépendamment de la première, en augmentant le rendement global en sucres et en évitant leur dégradation. Les sucres sont ensuite fermentés ensemble ou séparément. Les rendements en glucose sont compris généralement entre 50 et 80% selon les conditions d'hydrolyse (généralement 190-215°C ; 5-10 min ; H_2SO_4 < 1%).

Le NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) a développé ce procédé (avec hydrolyse et fermentation séparées des hémicelluloses et de la cellulose) en collaboration de Cellunol (BCI) qui l'exploite commercialement.

L'**hydrolyse à l'acide concentré** est généralement opérée en deux étapes, comme dans le procédé développé aux État-Unis par Masada Resource Group et Arkenol : une première étape de décristallinisation de la cellulose à l'acide sulfurique concentré (40% de H_2SO_4 à 60°C), puis une seconde étape d'hydrolyse par de l'acide plus dilué (20-30% à 100°C).

Ce type de procédé offre de meilleurs rendements (plus de 95%) à des températures moindres, et limite la formation de co-produits nuisibles. Il a néanmoins des inconvénients technologiques (corrosion des réacteurs) et économiques (besoin d'un recyclage très efficace et coûteux de l'acide) qui ont conduit à l'abandon progressif de cette voie, au profit de l'hydrolyse enzymatique.

Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse de la cellulose par voie enzymatique est considérée par de nombreux acteurs comme beaucoup plus prometteuse que la voie acide et a fait l'objet de nombreux travaux de recherche depuis les années 70. Elle a l'avantage de générer peu d'effluents à traiter et les conditions réactionnelles (45-50°C, pH 4,8) beaucoup moins rudes qu'en hydrolyse acide permettent d'éviter les problèmes de corrosion et serait économiquement plus rentable que l'hydrolyse chimique sur le long terme. Néanmoins, cette voie nécessite le développement d'enzymes spécifiques, les cellulases. Celles-ci sont produites grâce à la culture de bactéries ou de champignons cellulolytiques. Parmi ces derniers, *Trichoderma reesei* présente à ce jour le meilleur potentiel en termes de concentrations et d'activité des cellulases sécrétées, et a été exploité industriellement. Mais, le coût de production des cellulases reste élevé et impacte énormément sur le coût de revient de la production d'éthanol cellulosique.
Le coût de production industrielle des cellulases a déjà été baissé de façon significative par l'utilisation de technologies de fermentation performantes et l'amélioration génétique des souches de *Trichoderma reesei* utilisées. Cette amélioration a d'abord été obtenue par des techniques classiques de mutagénèse/sélection, puis par l'utilisation de techniques du génie génétique.
Les mutants hyper cellulolytiques obtenus peuvent sécréter jusqu'à 50 g/L de cellulases et ces souches sont utilisées au stade industriel. Les leaders du marché des enzymes sont Genencor (USA), Novozymes (Danemark) et Iogen (Canada).
Des progrès significatifs ont également été réalisés sur la connaissance des très complexes mécanismes de la cellulolyse enzymatique en vue de son amélioration. *Trichoderma* produit toute une gamme de cellulases qui sont capables d'hydrolyser les liaisons b-1,4-glycosidiques présentes dans la cellulose et ses dérivés. Ces cellulases ont été classées en différentes familles selon leurs structures et leurs activités respectives qui ont été mieux identifiées. Des détails sur ces mécanismes sont disponibles dans les références.
Des recherches sont également menées afin d'optimiser la dégradation enzymatique des hémicelluloses, qui requiert une grande variété d'enzymes (recherche de nouvelles hémicellulases). D'autre part le développement et l'utilisation industrielle d'enzymes lignolytiques (ligninases) est envisagé afin d'améliorer le rendement global de conversion en éthanol.

L'hydrolyse par voie acide devient marginale par rapport à la voie enzymatique qui est sans conteste la voie d'avenir. C'est maintenant une étape clé du procédé, porteuse d'enjeux très importants qui génèrent de nombreuses activités de recherche et dont dépendent vraisemblablement la viabilité à long terme de la filière éthanol cellulosique.

Fermentation éthanolique

Si la fermentation du glucose en éthanol ($C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$) est une réaction bien connue et exploitée depuis des siècles, l'utilisation de matériaux lignocellulosiques comme substrat initial implique des difficultés spécifiques qui justifient des efforts de recherche conséquents.

D'une part, des composés toxiques et inhibiteurs de fermentation (furfural surtout) peuvent être formés durant l'hydrolyse voire le prétraitement, diminuant significativement les rendements de conversion. Le

glycerol est également un sous-produit majoritaire obtenu au cours de la fermentation dont on doit minimiser la production.

D'autre part, la conversion des pentoses tels que le xylose en éthanol ($3C_5H_{10}O_5 \longrightarrow 5C_2H_5OH + 5CO_2$) ne peut pas être effectuée par les organismes classiquement utilisés en fermentation. Si certaines levures permettent de convertir les pentoses, elles sont très sensibles aux inhibiteurs et peu performantes. On leur préfère les bactéries, dont certaines souches créées par les biotechnologies génétiques sont capables de convertir à la fois le glucose et les pentoses avec de bons rendements, et de résister aux inhibiteurs ; les souches de Zymomonas mobilis et de Escherichia coli en sont un bon exemple. Ces développements récents n'en sont toutefois qu'au stade de R&D.

De nombreux développements sont encore attendus afin d'améliorer les rendements de conversion en éthanol et de réduire les coûts. Il est notamment envisagé :

- d'effectuer l'hydrolyse enzymatique et la fermentation *en une seule étape*, au sein du même réacteur. C'est le principe du procédé SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation). L'avantage est de supprimer l'étape d'hydrolyse préalable et d'éviter l'inhibition des cellulases par le glucose qui est consommé au fur et à mesure par les micro-organismes. Il reste à optimiser des aspects tels que la concentration en matière sèche initiale.
- d'utiliser un seul et même micro-organisme pour réaliser simultanément la fermentation et la production d'enzymes nécessaires à l'hydrolyse de la cellulose (voie DMC, Direct Microbial Conversion). Néanmoins, cette voie n'est susceptible de déboucher qu'à plus long terme.

Valorisation de la lignine et intégration énergétique du procédé

Si la lignine ne peut être convertie en éthanol et donc contribuer à l'obtention d'un meilleur rendement massique sur la filière, elle peut en revanche être récupérée et valorisée énergétiquement par combustion, voire gazéification. L'énergie produite, éventuellement par l'intermédiaire d'un cycle vapeur, est suffisante pour subvenir aux besoins énergétiques de l'installation, notamment pour le prétraitement et la distillation, gros consommateurs d'énergie. Cette voie de co-valorisation de la lignine rend ces procédés auto-suffisants et améliorent donc le bilan CO_2 de la filière par rapport aux filières de 1ère génération, canne à sucre exclue (valorisation de la bagasse).

Avec certaines matières premières très ligneuses, comme le bois, il est envisageable d'avoir à disposition un excédent énergétique qui peut être distribué localement sous forme d'électricité.

C. Description technique détaillée de la filière BtL

(a) Gazéification

Principe

La gazéification met en jeu un ensemble de transformations thermochimiques [19]. La biomasse après séchage passe par une étape de pyrolyse où elle est convertie en composés hydrocarbonés gazeux (matières volatiles) et en résidu carboné (charbon). Cette transformation, très sensible à la température, démarre significativement à partir d'une température d'environ 250 ^{o}C. Par la suite, les matières volatiles subissent diverses réactions de craquage homogène, de combustion (si présence d'un gaz oxydant) et de reformage à la vapeur qui produit de l'hydrogène et du monoxyde de carbone. Le charbon peut être partiellement oxydé puis est gazéifié par une réaction hétérogène entre le carbone et la vapeur d'eau/dioxyde de carbone pour produire également H_2 et CO.

En sortie du réacteur de gazéification, le gaz contient de l'hydrogène et du monoxyde de carbone, et en quantité plus faibles des hydrocarbures légers (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6), de l'azote, du dioxyde de carbone, et des composés indésirables tels que des goudrons (voir encadré) et des inorganiques dans des proportions variables. Sa composition (**tableau** 4) dépend principalement de la nature du gaz oxydant (air, oxygène, vapeur d'eau) et du type de technologie.

Les **goudrons** représentent un ensemble de composés organiques formés pendant l'étape de pyrolyse et encore présents dans les gaz de gazéification. Ils sont classés en 4 catégories [20] selon leurs poids moléculaires : primaires, secondaires, tertiaires alkyle et ter- tiaires condensables. Les points de rosée de ces composés sont plus ou moins élevés et peuvent atteindre 350 à 400 ^{o}C pour certains d'entre eux. Leur présence perturbe le bon fonctionnement des procédés de gazéification en raison de l'encrassement que cause leur condensation en aval du réacteur (tuyauteries, filtres, vannes, catalyseur....). Leur élimination presque complète (concentration inférieure à 1 ppmv) est une condition nécessaire à la valorisation du gaz de synthèse en biocarburant.

Technologies

Les technologies de gazéification [19] [20] [21] sont généralement classées selon différents critères. Le choix de ces critères dépend de plu- sieurs facteurs comme l'application visée, la taille de l'installation, la nature de la biomasse, ou encore la maturité des technologies. Les principaux critères sont :

– le **type de technologie** qui peut se décliner en : lit fixe, lit fluidisé, lit entraîné, ou encore des variantes de ces trois principes ;
– la **nature du gaz réactif** qui peut être de l'air, de l'oxygène ou de la vapeur d'eau. Seuls les procédés utilisant de l'oxygène ou de la vapeur d'eau sont développés pour des applications biocarburants en raison de la richesse nécessaire du gaz en hydrogène et en monoxyde de carbone ;
– la **pression** est un critère de sélection important dans le dimensionnement d'un réacteur de gazéification généralement imposé par le type d'application et la taille de l'installation. Pour des applications biocarburants, la pression est une condition aujourd'hui privilégiée car notamment la réaction de synthèse se fait à des pressions élevées ;
– **l'apport d'énergie** dans le procédé. Un pro- cédé de gazéification nécessite un apport énergétique pour les phénomènes endothermiques que sont le chauffage, le séchage, le reformage des goudrons, l'oxydation à la vapeur d'eau ou au dioxyde de carbone du carbone. Dans les procédés les plus courants, dits autothermiques, cette énergie est apportée par oxydation partielle de la bio- masse. Dans les procédés dits allothermiques, l'énergie provient d'une source externe.

La **technologie à lit (ou flux) entraîné** est aujourd'hui la plus pertinente pour des applications biocarburants en raison de la qualité des gaz produits. Elle a été développée pour la gazéification de charbon minéral ou de déchets (boues). Elle requiert un prétraitement spécifique pour des applications biomasse. La biomasse peut être soit torréfiée avant d'être finement broyée (< 100 mm), soit transformée en huiles par pyrolyse rapide. Ainsi conditionnée, la biomasse est injectée en partie haute d'un réacteur et mélangée au gaz réactif (oxygène et/ou vapeur d'eau). Des niveaux de température élevés (> 1 300 ^{O}C), nécessaires car le temps de séjour des particules (ou gouttes) est faible (< 1 s), permettent d'obtenir un gaz propre par un craquage thermique efficace des goudrons. Ces réacteurs présentent néanmoins l'inconvénient de former une quantité importante de suies (particules solides composées essentiellement de carbone) formées par des réactions de craquage des goudrons. Les technologies à lit entraîné [23] peuvent être à parois réfractaires ou refroidies

Épuration et conditionnement du gaz

L'**épuration du gaz**, en aval du procédé de gazéification, est nécessaire pour éliminer les produits indésirables tels que particules, goudrons, et inorganiques, et atteindre les spécifications des réacteurs de synthèse.
Pour les particules, le système de filtration associe un séparateur grossier de type cyclone à une filtration plus fine par filtre de masse (à lit granulaire) ou filtre à manches (céramiques, métalliques) ; les filtres électrostatiques sont aussi parfois utilisés dans les procédés de gazéification.
En ce qui concerne les goudrons, leur élimination peut se faire par craquage thermique ou catalytique, ou bien par lavage humide. Le craquage thermique (T > 1 200 ^{o}C) en aval du réacteur de gazéification est très efficace mais son coût énergétique réduit considérablement son intérêt. Le traitement catalytique consiste à effectuer la réduction des polluants à travers une surface poreuse dont les matériaux internes (généralement à base de nickel) ont des propriétés catalytiques. Les réacteurs (ou reformeurs) catalytiques sont cependant peu répandus et n'ont pas encore atteint la maturité industrielle ; la désactivation rapide des catalyseurs liée à l'encrassement et à la présence de poisons est le principal verrou technologique.
Le lavage humide, courant et efficace dans les procédés industriels de nettoyage de gaz est également très répandu en gazéification. Les effluents du lavage peuvent être réinjectés dans le gazéifieur ou rejetés en usine de traitement des eaux usées après éventuellement un traitement spécifique d'épuration.
Cette complexité d'élimination des goudrons montre tout l'intérêt technique et économique de disposer d'une technologie de gazéification propre qui produirait peu ou pas de goudrons.
Les inorganiques (composés azotés et soufrés, alcalins, métaux lourds) peuvent, pour leur part, être éliminés également par voie humide (lavage), ou bien par voie sèche pour laquelle de nombreux réacteurs et adsorbants industriels ont été développés pour d'autres applications.

Le **conditionnement du gaz** vise à obtenir le gaz de synthèse, c'est-à-dire un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone le plus pur possible et avec un ratio H_2/CO supérieur à 2. Dans ce but, le reformage à la vapeur du méthane et des autres hydrocarbures permet de maximiser la quantité d'hydrogène alors que la réaction du gaz à l'eau (*water gas shift*) permet-elle d'optimiser le ratio H_2/CO. Ensuite, l'élimination du CO_2 par des techniques de séparation est réalisée afin de limiter la teneur en gaz inerte dans le gaz dont la présence limite l'efficacité de la synthèse et augmente les volumes des réacteurs en aval.

Synthèse d'hydrocarbures liquides

Les gaz de synthèse produits par gazéification permettent l'élaboration de carburants tels que méthanol, diméthyléther (DME), gaz naturel de synthèse (GNS), éthanol et gazole Fischer-Tropsch.

La **synthèse de méthanol** à partir de gaz naturel ou charbon est la plus répandue en raison des

nombreuses applications en chimie industrielle mais son utilisation en tant que carburant est très critiquée en raison de sa toxicité.

Le **diméthyléther** et le **gaz naturel de synthèse** sont gazeux à pression atmosphérique et nécessitent une adaptation spécifique des véhicules de la part des constructeurs.

L'**éthanol** est plus compatible avec le marché actuel mais sa synthèse est encore au stade de la recherche et les rendements annoncés par voie thermochimique ne sont pas meilleurs que ceux par voie fermentaire.

La **synthèse Fischer-Tropsch** est la plus prometteuse car elle permet la production d'un **biodiesel** très pur, compatible avec les moteurs actuels, doté d'un bon indice de cétane (70 à 75), et ne contenant ni soufre, ni composés aromatiques, contrairement au gazole issu du pétrole. En 2008, les rendements en liquides attendus sont de l'ordre de 15 à 25 % massique et 30 à 45 % énergétique ; ces derniers restent très difficiles à estimer en raison de la multitude des produits formés dont certains ne sont pas systématiquement convertis en gazole mais destinés à d'autres applications (chimie notamment) pour des raisons économiques.

Gazole Fischer-Tropsch

La synthèse Fischer-Tropsch convertit le gaz de synthèse (mélange H_2/CO) en un mélange d'hydrocarbures de différentes longueurs de chaîne carbonée selon les réactions suivantes :

$$\left(n + \frac{m}{2}\right)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_m + nH_2O$$

$$2H_2 + CO \rightarrow -CH_2- + H_2O$$

Ces réactions chimiques catalysées par le fer ou le cobalt s'opèrent à des pressions élevées (10 à 40 bar) et des températures modérées (200 à 350 °C). Les produits de cette transformation constituent un ensemble de composés carbonés comprenant :
des hydrocarbures légers (C_1 et C_2) ;
des gaz de pétrole liquéfiés (C_3-C_4) ;
des naphtas (C_5-C_{11}) ;
des gazoles (C_{12} à C_{20}) ;
des cires (> C_{20}).
Les procédés sont généralement optimisés pour la production de cires, qui peuvent par la suite être transformées en diesel par hydrocraquage. Le rendement massique de la conversion du gaz de synthèse en hydrocarbures liquides est d'environ 65 % ; le gaz de synthèse non convertie ainsi que les produits C_1-C_4 peuvent servir à la production d'électricité.

Spécifications du gaz de synthèse

Les catalyseurs utilisés dans la synthèse Fischer-Tropsch sont très sensibles à certains composés organiques et inorganiques qui, même à faible concentration, peuvent être des poisons (désactivation des catalyseurs). Bien qu'il n'existe pas de données figées quant aux teneurs limites des impuretés dans le gaz de synthèse, les valeurs avancées sont extrêmement faibles (**tableau** 5). Concernant les goudrons, la valeur limite est fixée par les températures de condensation de chacun des composés organiques présents dans le gaz à la pression du réacteur. Pour les inorganiques, cette valeur est liée à une durée de vie et une efficacité acceptable des catalyseurs d'un point de vue économique.

Au-delà des impuretés ou poisons, les spécifications du gaz concernent également sa composition et le

rapport H_2/CO (> 2). Les concentrations en gaz inertes vis-à-vis de la synthèse de Fischer-Tropsch (N_2 , CO_2 , CH_4) doivent être aussi faibles que possible bien que des teneurs de l'ordre de 15 % soient acceptables d'un point de vue purement technique.

Blue Tower, 4ème étage, Rue de l'Institut,
Ébène, Maurice
Tel: (+230) 402 6100
Fax: (+230) 466 0160
www.coi-ioc.org