



Production locale d'électricité

*vs*

Réseau maillé

*Eléments de comparaison*

Rapport présenté au

Réseau de Transport d'Electricité

par la

Société de Calcul Mathématique SA

*En application de la commande RTE 4500442553/R088 du 31/12/2011*

Version 2

## Résumé Opérationnel

Pour comparer un "réseau maillé" (comme l'est le réseau en France métropolitaine) et une production locale d'électricité, il est d'abord nécessaire de disposer d'indicateurs objectifs, permettant cette comparaison. Les trois plus pertinents sont :

- le coût de production de l'électricité ;
- l'impact environnemental ;
- la qualité du service.

D'autres indicateurs complémentaires sont possibles et ceux-ci pourraient être affinés et consolidés : il ne s'agit ici que d'une approche méthodologique, et, dans un certain nombre de cas, les données disponibles ne permettent pas des conclusions absolument fiables.

Sur la base de ces trois indicateurs, nous effectuons deux transpositions :

- Nous transposons le réseau de l'Ile de la Réunion vers la Bretagne. Cette transposition est pertinente, parce que le système électrique de la Bretagne a des caractéristiques semblables celui de l'Ile de La Réunion, que ce soit en termes de consommation, de production ou de configuration du réseau. La Bretagne est une "région isolée", qui actuellement importe 92% de son électricité.
- Nous transposons le réseau de l'Ile de la Réunion vers l'ensemble du territoire métropolitain.

La valeur des trois indicateurs est donnée dans le tableau ci-dessous, ramenée à 100 000 habitants.

	Système électrique avec production locale de La Réunion	Système électrique avec production locale transposé à la Bretagne	Système électrique avec production locale extrapolé à la France métropolitaine
Coût de production (M€) / 100 000 habitants	38,5	82,5	97
Emissions de CO2 (kT) / 100 000 habitants	205	439	516
Electricité non distribuée (MWh) (coupures longues) / 100 000 habitants	320	690	813

*Tableau I : Indicateurs de performance d'un système de production locale d'électricité*

Les trois indicateurs étant déterminés pour le système extrapolé à la l'ensemble du territoire français, ils sont ensuite comparés avec les indicateurs du système actuel de la France métropolitaine. Voici les résultats :

	Système électrique actuel de la France métropolitaine	Système électrique avec production locale extrapolé à la France métropolitaine	Rapport entre le système extrapolé et le système actuel
Coût de production (M€) / 100 000 habitants	35,5	97	2,7
Emissions de CO2 (kT) / 100 000 habitants	90	516	5,7
Electricité non distribuée (MWh) (coupures longues) / 100 000 habitants	317	813	2,5

*Tableau II : Comparaison du système actuel de la France métropolitaine avec le système extrapolé à partir du système de production locale d'électricité de La Réunion*

Les conclusions d'une transposition du système électrique de La Réunion à l'ensemble de la France métropolitaine sont les suivantes :

- le coût global de la production d'électricité nécessaire pour répondre à la demande serait multiplié par 2,7 ;
- les émissions de CO2 liées à cette production seraient multipliées par 5,7 ;
- les coupures longues d'électricité seraient multipliées par 2,5. Même si cela n'est pas chiffrable, les coupures brèves seraient beaucoup plus importantes.

Rapprocher la production d'électricité des zones de consommation ne ferait que dégrader les performances du système électrique. Le réseau électrique maillé est donc bien plus adapté aux caractéristiques de la France métropolitaine : il est moins cher, il est plus respectueux de l'environnement et, surtout, il est beaucoup plus robuste. La mise en commun des ressources est l'élément clé de cette robustesse ; à l'inverse, la localisation se traduit par une fragilité.

## Sommaire

Résumé Opérationnel.....	2
I. Introduction.....	6
II. Mise en place d'indicateurs objectifs .....	6
A. Le coût de production .....	6
B. La qualité du service .....	6
C. Impact environnemental.....	6
III. Traitement d'un exemple insulaire : La Réunion .....	7
A. Modes de production .....	7
1. Mix énergétique.....	7
2. Evolution de la part des énergies renouvelables .....	8
3. Scénarios de prévision de consommation.....	11
B. Coût de production de l'ensemble du dispositif .....	12
1. Coût des différents modes de production.....	12
2. Evaluation du coût de la production totale d'électricité en 2010 .....	14
C. Impact environnemental.....	14
D. Chiffrage de la qualité de service.....	15
1. Conception du réseau électrique.....	15
2. Isolement du réseau électrique .....	16
3. Conflit sociaux.....	17
4. Conclusion sur la qualité du service .....	17
IV. Extrapolation au territoire métropolitain.....	18
A. Transposition de La Réunion vers la Bretagne .....	18
1. Caractéristiques du réseau électrique de la Bretagne .....	18
1.1. Consommation électrique .....	18

1.2. Production électrique .....	19
1.3. Configuration du réseau électrique .....	20
2. Transposition du système de La Réunion vers la Bretagne.....	20
B. Extrapolation à l'ensemble de la France métropolitaine.....	21
1. Evolution de la consommation en France métropolitaine.....	21
2. Extrapolation des indicateurs de performance.....	22
V. Comparaison avec le réseau existant .....	23
A. Caractéristiques du réseau électrique existant .....	23
1. Evolution de la production électrique en France métropolitaine.....	23
2. Evaluation du coût de production et des émissions de CO2.....	25
3. Qualité de service du système de la France métropolitaine.....	25
B. Comparaison des deux systèmes électriques .....	26
VI. Remarques complémentaires.....	27
VII. Références .....	28

## I. Introduction

Le présent document est remis à RTE en application de la commande RTE 4500442553/R088 du 31/12/2011 ; la SCM est seule responsable des données recueillies et des conclusions tirées.

## II. Mise en place d'indicateurs objectifs

La comparaison entre un système de production locale d'électricité et un réseau maillé doit se faire sur la base d'indicateurs factuels et objectifs, tenant compte de toutes les contraintes économiques et environnementales, et garantissant la meilleure qualité de service possible. L'utilisation de ces indicateurs doit permettre d'établir le bilan technico-économique des deux systèmes comparés ; il sera communiqué aux décideurs pour leur permettre de prendre les meilleures décisions.

### A. *Le coût de production*

L'indicateur prépondérant dans la comparaison de deux systèmes est le coût de production totale d'électricité nécessaire pour alimenter de manière permanente une zone géographique donnée.

L'indicateur de coût devra tenir compte des coûts de production et des coûts de transport d'électricité. Les coûts de production doivent être déterminés pour chaque type de production en tenant compte de l'ensemble du cycle de production.

### B. *La qualité du service*

La prise de décision concernant le type de système à mettre en place doit prendre en compte le point de vue du consommateur. La comparaison doit s'appuyer sur le respect d'un contrat de qualité. Un tel contrat est un ensemble de contraintes que l'on s'impose, du type "pas plus de telle durée d'interruption, pour tant de personnes, avec telle probabilité, par an".

Avec ce type d'indicateur de qualité de service, il est alors possible de comparer entre elles différentes zones géographiques, indépendamment de leur surface et de leur population.

### C. *Impact environnemental*

Les sources d'approvisionnement énergétiques ne rejettent pas seulement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), mais également d'autres gaz à effet de serre (GES), tels que le méthane (CH<sub>4</sub>), ou le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Cependant, nous limiterons l'étude à la comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> des deux systèmes : nous n'avons pas d'informations quant aux autres GES.

### III. Traitement d'un exemple insulaire : La Réunion

Pour traiter un exemple de système de production locale d'électricité, La Réunion est un très bon laboratoire, car l'île possède les caractéristiques suivantes :

- Le fait qu'il s'agisse d'une île éloignée de tout continent impose la production de 100% de l'électricité consommée localement ;
- Le réseau électrique est peu maillé et possède peu d'interconnexions, ce qui impose que la production réponde à la demande en électricité, quels que soient le jour de l'année ou l'heure de la journée ;
- L'île jouit d'un potentiel élevé de ressources renouvelables. Il s'agit d'un critère important pour limiter l'impact environnemental des différentes productions locales d'électricité. Cependant, ce type d'énergie a tendance à fragiliser l'ensemble du réseau, comme on le verra plus loin.

#### A. Modes de production

##### 1. Mix énergétique

Le tableau et l'histogramme ci-dessous présentent le mix énergétique de l'île de La Réunion de l'année 2010 (Sources : EDF <sup>[1]</sup>, Observatoire Energie Réunion <sup>[2]</sup>) :

	Production électrique (GWh)	% du mix
Charbon	1315	48,69%
Hydraulique	542	20,07%
Fioul lourd / Gazole	473	17,51%
Bagasse	269	9,96%
Photovoltaïque	76	2,81%
Eolien	17	0,63%
Biogaz	9	0,33%
TOTAL	2701	100,00%

*Tableau 1 : Mix énergétique de La Réunion en 2010  
(Sources : EDF <sup>[1]</sup>, Observatoire Energie Réunion <sup>[2]</sup>)*

En 2010, la production à partir de charbon, de fioul lourd et de gazole a représenté plus de 66% de la production totale d'électricité sur l'île de La Réunion.

La forte dépendance aux énergies fossiles pose des problèmes environnementaux, mais également de continuité de production en cas de rupture d'approvisionnement.

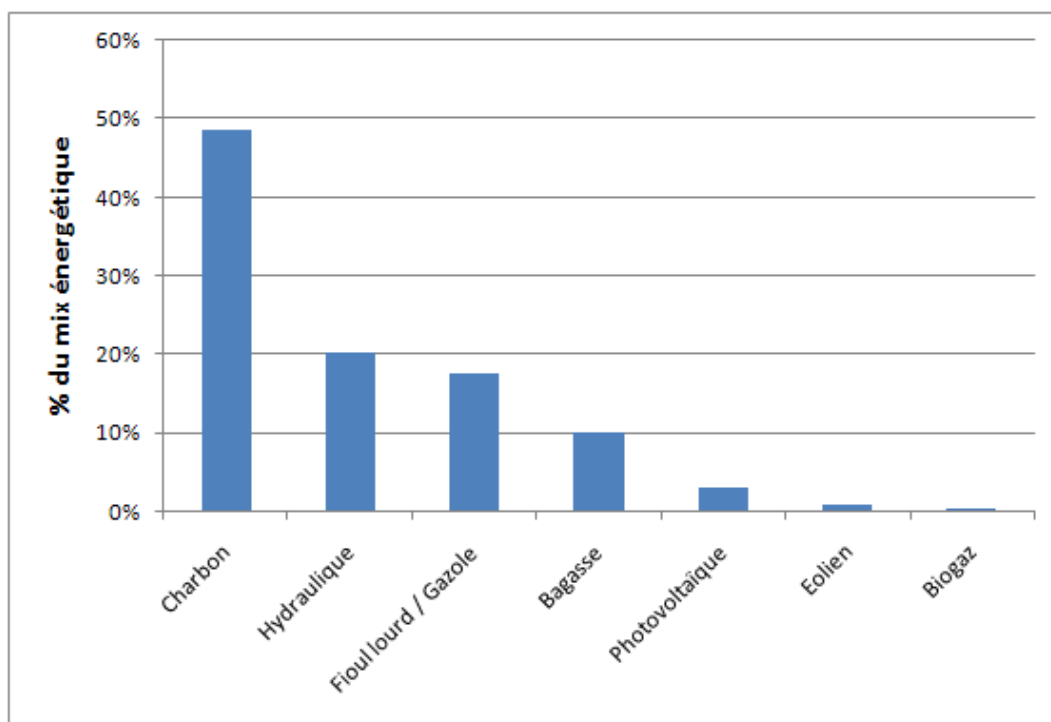


Figure 1 : Pourcentage des différents modes de production d'électricité en 2010  
(Sources : EDF <sup>[1]</sup>, Observatoire Energie Réunion <sup>[2]</sup>)

## 2. Evolution de la part des énergies renouvelables

La dépendance aux énergies fossiles est un phénomène qui a moins de 30 ans. En effet, comme on le remarque sur la courbe ci-dessous, la production des centrales hydrauliques permettait de répondre à la demande jusqu'en 1985 (Sources : EDF <sup>[1]</sup>, Observatoire Energie Réunion <sup>[2]</sup>, Académie de La Réunion <sup>[3]</sup>).



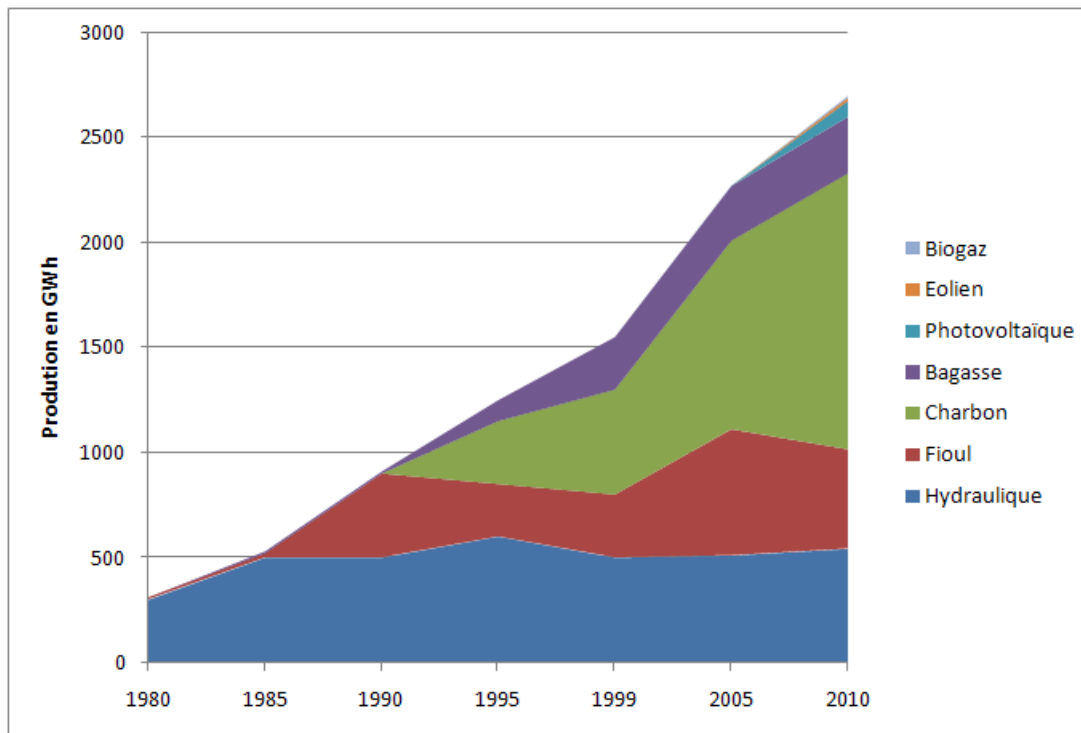
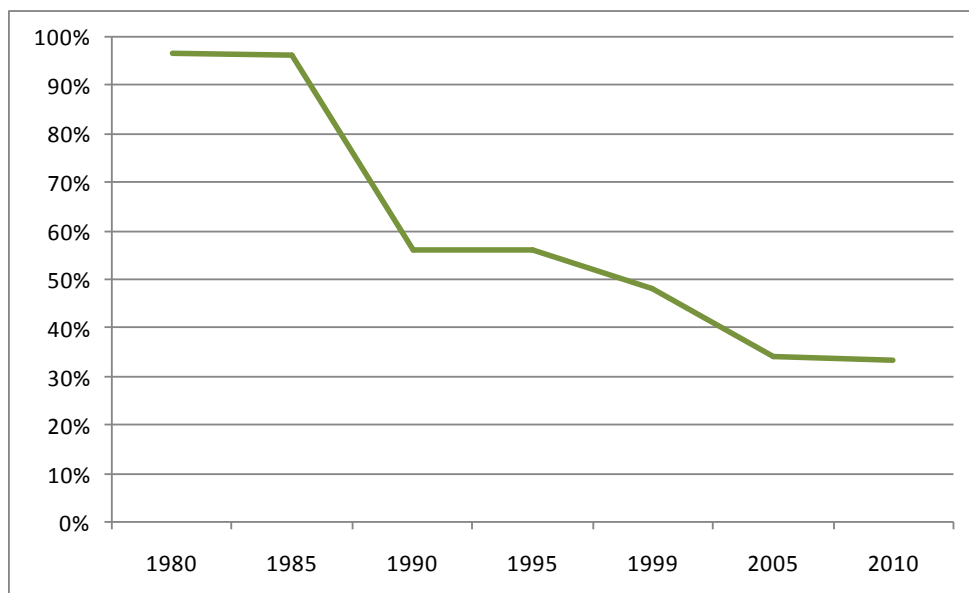


Figure 2 : Evolution du mix énergétique entre 1975 et 2010  
 (Sources : EDF <sup>[1]</sup>, Observatoire Energie Réunion <sup>[2]</sup>, Académie de La Réunion <sup>[3]</sup>)

Les contraintes du relief et de l'hydrologie limitent la production électrique à environ 500 GWh par an. Cependant, la figure 2 montre que la consommation électrique de l'île est en constante augmentation ces 30 dernières années, atteignant 2 700 GWh en 2010.

La production à partir d'énergies fossiles s'est alors avérée nécessaire pour satisfaire la demande. Des centrales à fioul ont été installées à partir de la fin des années 1980. Puis, à partir de l'année 2000, les centrales à charbon sont devenues la première source de production de l'électricité de l'île.

La production locale de bagasse (résidu de canne à sucre) est, quant à elle, limitée à environ 250 GWh par an depuis l'année 2005. Les autres énergies renouvelables représentent moins de 5% de la production. Au total, l'ensemble de la production à partir d'énergies renouvelables (hydraulique, bagasse, solaire, éolien) est très insuffisant pour combler l'augmentation de la demande. Sur la figure ci-dessous, on constate que la part des énergies renouvelables est en constante diminution depuis plus de 30 ans.



*Figure 3 : Pourcentage des énergies renouvelables dans la production de l'électricité de La Réunion entre 1975 et 2010*

*(Sources : EDF <sup>[1]</sup>, Observatoire Energie Réunion <sup>[2]</sup>, Académie de La Réunion <sup>[3]</sup>)*

En 2010, les énergies renouvelables représentaient 33% de la production totale d'électricité. Les centrales à fioul et à charbon nécessitant l'importation de matières premières extérieures à l'île, la production d'électricité réellement locale ne représente qu'un tiers de la consommation de La Réunion.

### 3. Scénarios de prévision de consommation

L'augmentation de la consommation électrique dans l'île de La Réunion pose un problème très important. Malgré un fort potentiel, on constate que le développement des énergies renouvelables est beaucoup plus lent que l'augmentation de la demande.

Différentes études ont été menées pour prévoir la consommation de l'île dans les années à venir. Nous nous appuyons sur ces études.

Un rapport réalisé par l'Agence régionale de l'énergie Réunion (ARER <sup>[4]</sup>) en 2009 envisage deux scénarios :

- Un scénario tendanciel : il prévoit une augmentation de 69% de la consommation en 2030 par rapport à l'année 2007, soit une consommation annuelle atteignant 3 792 GWh ;
- Un scénario volontariste : il prend en compte des actions de maîtrise de l'énergie dans le résidentiel, le tertiaire et l'industrie. Ce scénario prévoit une augmentation de seulement 24% de la consommation en 2030 par rapport à l'année 2007, soit une consommation annuelle atteignant 2 871 GWh. Ce résultat paraît très optimiste sachant que la consommation a déjà dépassé 2 700 GWh en 2010.

Une étude réalisée par EDF SEI en 2008 rapportée au parlement par le ministère de l'écologie de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire <sup>[5]</sup> envisage quatre scénarios d'évolution de la consommation d'électricité à La Réunion : scénario haut, médian, bas et MDE (Maîtrise de la Demande en Energie). La figure ci-dessous représente les prévisions des quatre scénarios à l'horizon 2020.

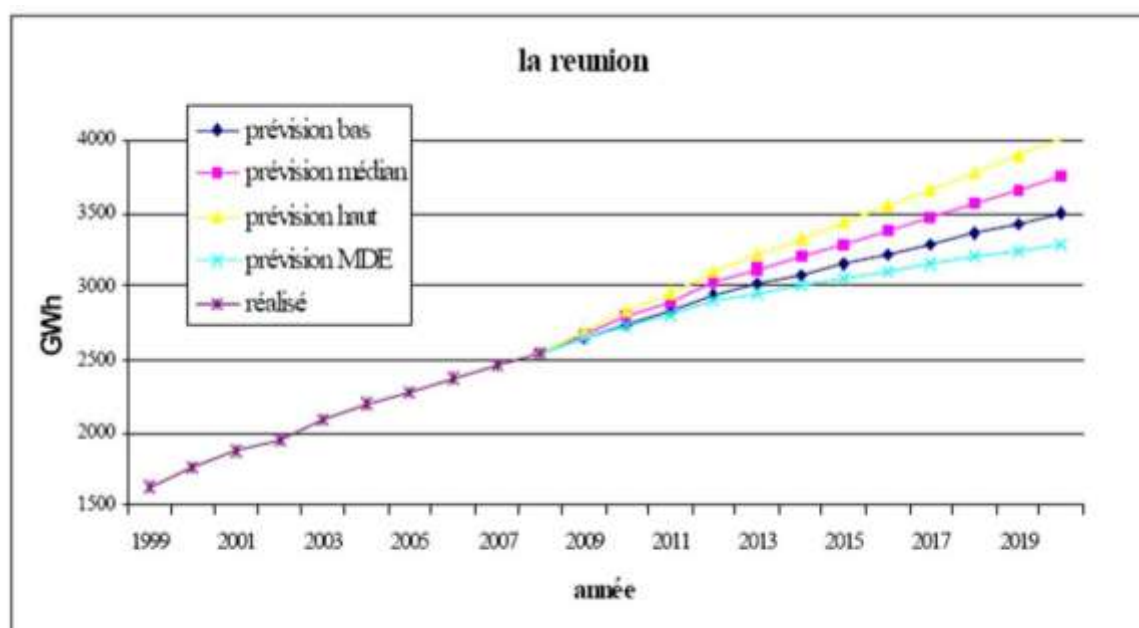


Figure 4 : Consommation électrique à La Réunion selon les scénarios haut, médian, bas et MDE (Source EDF SEI <sup>[5]</sup>)

Les résultats de l'étude prévoient donc une consommation atteignant entre 3 300 et 4 000 GWh par an dès l'année 2020. Cette étude est moins optimiste que celle de l'ARER, mais elle paraît plus réaliste.

Quoi qu'il en soit, on peut estimer grossièrement que la consommation atteindra 3 500 GWh par an à l'horizon 2020 - 2030. Sachant que les énergies renouvelables produisent moins de 1 000 GWh par an en 2010, il reste plus de 2 500 GWh à produire chaque année. La croissance des énergies renouvelables étant limitée, une grande partie de cette production devra très vraisemblablement être effectuée à partir d'énergies fossiles.

### *B. Coût de production de l'ensemble du dispositif*

Un critère important dans l'évaluation de la performance du système de production d'électricité est le coût.

#### **1. Coût des différents modes de production**

Pour évaluer le coût global de la production électrique à La Réunion, il est nécessaire de déterminer le coût de chacun des modes de production présents sur l'île.

Une étude réalisée par le Commissariat au Plan intitulée « Etude Energie 2010 – 2020 »<sup>[6]</sup> a évalué le coût des principaux modes de production (voir tableau ci-dessous).

	Nucléaire	Charbon	Gaz	Pétrole	Eolien	Solaire
Coût en €/ MWh	33	37	36	60	61	450

*Tableau 2 : Coût des principaux modes de production de l'électricité  
(Source Etude Energie 2010 -2020 du Commissariat au Plan<sup>[6]</sup>)*

Une étude réalisée en 2008 par la DGEC<sup>[7]</sup> permet d'obtenir le coût des moyens de production décentralisés (voir figure ci-dessous).

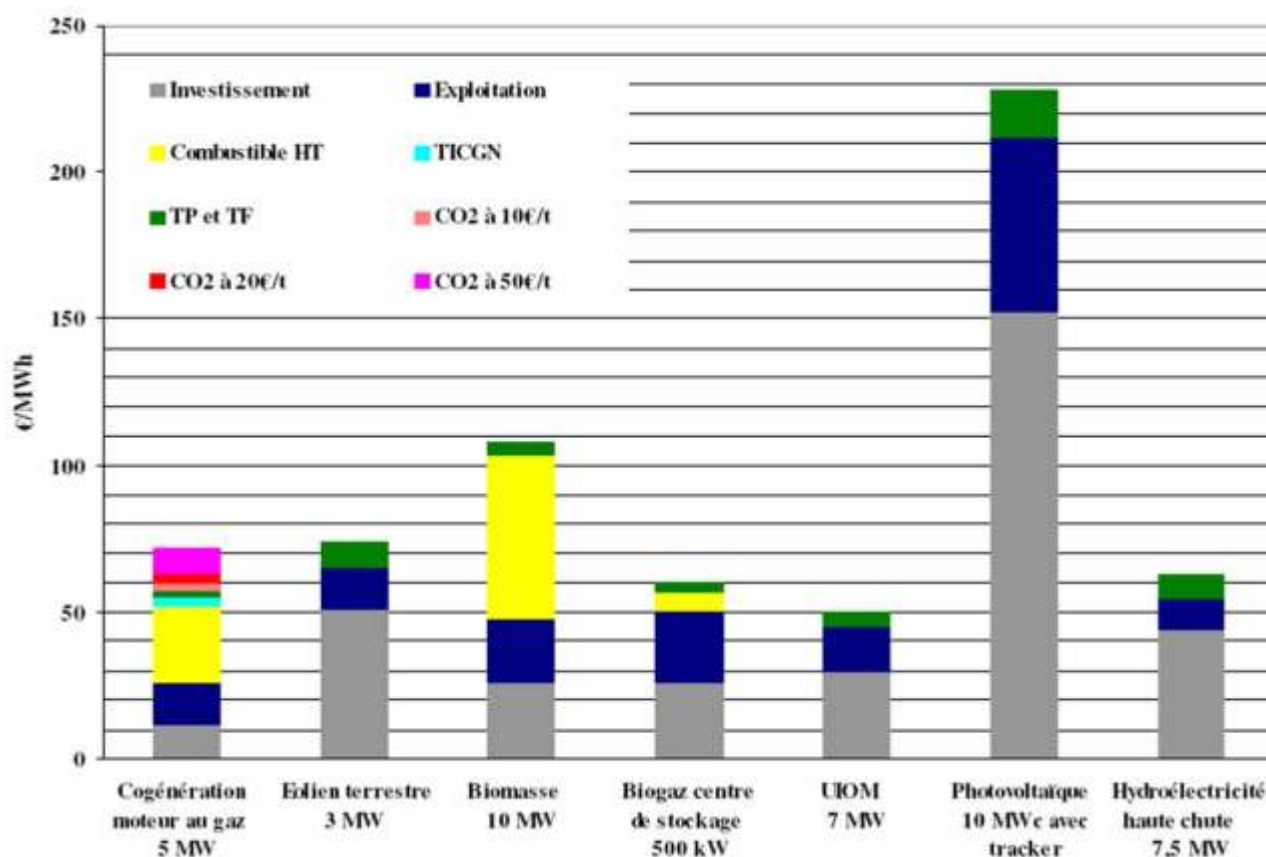


Figure 5 : Coût de production des moyens de production décentralisés  
(Source DGEC [7])

Les coûts déterminés par les deux études sont globalement proches sauf pour l'énergie solaire où l'on constate un facteur 2 entre les estimations.

Nous n'avons pas trouvé de chiffres précis concernant le coût local des différents modes de production sur l'île de La Réunion. Cependant, EDF précise sur son site internet [8] que les systèmes insulaires ont un surcoût de production directement lié à leur isolement :

« Chaque région doit produire sur place la totalité de l'électricité qu'elle consomme. D'où un surcoût élevé en comparaison des coûts de production courants en métropole continentale. Ainsi, en Corse et en outre-mer, le coût de revient de l'électricité est, dans le meilleur des cas, deux fois plus élevé que son prix de vente au tarif garanti par la péréquation tarifaire ».

À ce stade, il est important de se donner une valeur grossière des différents coûts de production. À partir de ces deux études, nous déterminons les coûts des différents modes de production que nous retenons ici (voir tableau ci-dessous) en doublant les coûts moyens.

	Charbon	Hydraulique	Fioul	Bagasse	Solaire	Eolien	Biogaz
Coût moyen en € / MWh	75	120	120	200	600	130	120

Tableau 3 : Coût des modes de production d'électricité présents à La Réunion (évaluation SCM)  
(Sources : Commissariat au Plan [6], DGEC [7], EDF [8])

## 2. Evaluation du coût de la production totale d'électricité en 2010

À partir du mix énergétique de la production d'électricité à La Réunion et du coût des différents modes de production, nous déterminons dans le tableau ci-dessous le coût total de l'ensemble du dispositif.

	Production électrique (GWh)	Coût moyen en € / MWh	Coût en €	% du coût
Charbon	1315	75	98 625 000	30,5
Hydraulique	542	120	65 040 000	20,1
Fioul lourd / Gazole	473	120	56 760 000	17,6
Bagasse	269	200	53 800 000	16,7
Photovoltaïque	76	600	45 600 000	14,1
Eolien	17	130	2 210 000	0,7
Biogaz	9	120	1 080 000	0,3
TOTAL	2701		323 115 000	100

Tableau 4 : Evaluation de coût de la production totale d'électricité à La Réunion en 2010 (SCM)

Cette estimation grossière donne un coût total d'environ 323 M€ pour l'ensemble du dispositif de La Réunion.

La répartition du coût n'est pas la même pour les énergies fossiles et renouvelables. En effet, alors que les énergies renouvelables ne représentent qu'un tiers de la production, elles représentent 52% du coût total.

En tenant compte des 840 000 habitants de La Réunion, le coût du système électrique revient à 38,5 M€ pour 100 000 habitants.

### C. Impact environnemental

La performance d'un système de production d'électricité doit tenir compte de son impact environnemental. Nous retenons comme indicateur principal les émissions de dioxyde de carbone.

À partir d'une étude EDF (Etude ACV – DRD) <sup>[9]</sup> répertoriant les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> des différents modes de production, nous déterminons les émissions totales de CO<sub>2</sub> dues au parc de production électrique de la Réunion (voir tableau ci-dessous).

	Production électrique (GWh)	Emissions moyennes de CO2 en g / kWh	Emissions de CO2 en T
Charbon	1315	978	1 286 070
Hydraulique	542	4	2 168
Fioul lourd / Gazole	473	891	421 443
Bagasse	269	0	0
Photovoltaïque	76	100	7 600
Eolien	17	15	255
Biogaz	9	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>2701</b>		<b>1 717 536</b>

*Tableau 5 : Emissions de CO2 du parc de production électrique de La Réunion  
(Source EDF [9])*

L'estimation globale des émissions de CO2 est d'environ 1 700 000 T. La quasi-totalité de ces émissions est due aux centrales thermiques utilisant des énergies fossiles.

En tenant compte des 840 000 habitants de La Réunion, les émissions de CO2 du système électrique s'élèvent à 205 kT pour 100 000 habitants.

#### *D. Chiffrage de la qualité de service*

Comme cela a été évoqué précédemment, l'indicateur le plus objectif permettant d'évaluer la qualité du service est un contrat de qualité. Avec la mise en place d'un tel contrat, on peut déterminer le pourcentage de particuliers et d'entreprises pour lesquels le contrat est respecté chaque année.

Cependant, ce type d'information n'est pas disponible pour le réseau électrique de La Réunion. Il est en revanche possible d'identifier les éléments du réseau, susceptibles de dégrader la qualité du service.

### **1. Conception du réseau électrique**

La figure ci-dessous représente un schéma du parc de production d'électricité de la Réunion.



Figure 6 : Parc de la production électrique de La Réunion  
(Source Mines ParisTech 2010 <sup>[10]</sup>)

Le critère principal de fragilité du réseau est directement lié à sa conception. Le relief très important au centre de l'île n'a pas permis de mettre en place un réseau maillé possédant plusieurs interconnexions. En cas de coupure de ligne, il est impossible d'utiliser d'autres zones du réseau pour alimenter les communes affectées. Cette difficulté est particulièrement ressentie à La Réunion, l'île pouvant être balayée par de très forts cyclones.

Deux événements récents permettent de chiffrer l'impact des cyclones sur les coupures de courant :

- en février 2007, le cyclone Gamède a provoqué des coupures d'électricité pendant environ 24 h pour environ 100 000 des 310 000 foyers de La Réunion soit environ 30% des habitants ;
- en février 2012, le cyclone Giovanna a provoqué des coupures de 24 h pour 14 000 foyers soit environ 5% de la population de l'île.

## 2. Isolement du réseau électrique

L'autre critère de fragilité du réseau est lié à son isolement. A chaque instant, la production électrique doit être capable de satisfaire la demande. Contrairement à un réseau continental où des imports et exports d'électricité peuvent être effectués, le parc de production doit être capable de répondre aux besoins, même lors des pics de consommation. Aucune solution de



stockage n'étant opérationnelle actuellement, l'augmentation des énergies intermittentes comme l'éolien ou le photovoltaïque a tendance à fragiliser le réseau lors des pics de consommation.

### **3. Conflit sociaux**

Un dernier critère de fragilité est lié aux risques élevés de grèves dans les différents sites de production. L'import d'électricité étant impossible, les conséquences d'un blocage d'une ou plusieurs centrales thermiques peuvent être catastrophiques.

Au cours de l'année 2011, lors d'un conflit social, la société privée Séchilienne-Sidec qui assure 60% de la production totale d'électricité de l'île a interrompu à plusieurs reprises sa production :

- du 2 au 4 janvier 2011, une large majorité des 310 000 foyers de la Réunion a été affectée par des coupures d'électricité de plusieurs heures ;
- les 26 et 27 mars 2011, environ 100 000 foyers ont été privés d'électricité.

### **4. Conclusion sur la qualité du service**

En supposant que chaque année, un événement majeur peut se produire à La Réunion (cyclone ou conflit social), on peut estimer grossièrement qu'un tiers de la population subit une coupure longue de 24 h. Ces coupures longues représentent à elles seules 0,1% de la consommation qui n'est pas distribuée aux habitants de l'île. En tenant compte des 840 000 habitants de La Réunion, la quantité d'électricité non distribuée s'élève à 320 MW pour 100 000 habitants.

Il faut y ajouter l'ensemble des coupures courtes dues aux pannes et aux travaux. Nous n'avons pas pu obtenir de données sur ces coupures, pour l'ensemble de l'île.

## IV. Extrapolation au territoire métropolitain

A partir des caractéristiques de système de production locale d'électricité sur l'île de La Réunion, nous cherchons à extrapoler ce même type de système en France métropolitaine.

Dans un premier temps, le système de La Réunion est extrapolé à la Bretagne. En effet, cette région est, de nos jours, une fraction isolée du réseau métropolitain ; elle a des caractéristiques semblables au système de production d'électricité de La Réunion.

### A. Transposition de La Réunion vers la Bretagne

#### 1. Caractéristiques du réseau électrique de la Bretagne

Le système électrique de la Bretagne a des caractéristiques semblables celui de l'île de La Réunion, que ce soient en termes de consommation, de production ou de configuration du réseau.

##### 1.1. Consommation électrique

Comme pour l'île de La Réunion, la consommation d'électricité en Bretagne est en forte augmentation ces dernières années. Sur la figure ci-dessous, on voit que cette consommation est passée de 18 TWh en 2003 à presque 21,9 TWh en 2010 (Source Ecowatt <sup>[11]</sup>).

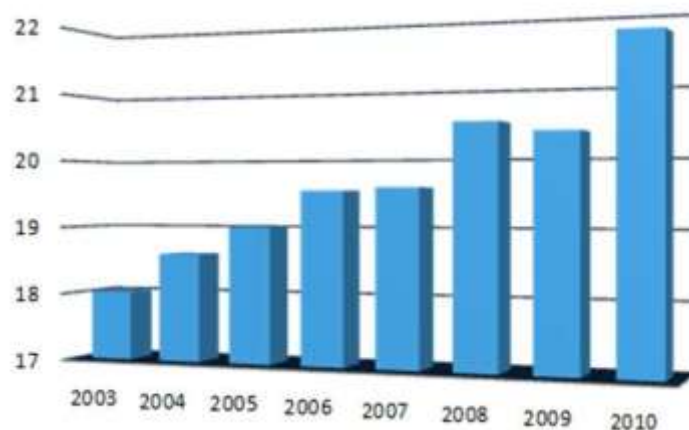


Figure 7 : Evolution de la consommation électrique en Bretagne (en TWh)  
(Source Ecowatt <sup>[11]</sup>)

La consommation a augmenté de 15,3% entre 2005 et 2010. Sur l'île de La Réunion, l'augmentation est de 18,9% sur la même période. Les deux régions ont le même ordre de grandeur d'évolution de leur consommation. Les perspectives d'augmentation dans les années à venir sont également identiques.

## 1.2. Production électrique

La production locale d'électricité ne permet pas du tout de répondre à la demande de la région. En effet, les sites localisés en région Bretagne ne produisent que 8% de la consommation. (Source Ecowatt <sup>[12]</sup>)

Les sites de production sont les suivants :

- la centrale de Cordemais d'une puissance disponible de 1 160 MW à partir de charbon et de 1 300 MW à partir de fioul ;
- le Cycle Combiné Gaz (CCG) de Montoir-de-Bretagne de puissance disponible de 480 MW ;
- cinq turbines à combustion au gaz (TAC) sur les sites de Brennilis et Dirinon (Finistère) d'une puissance totale de 480 MW ;
- l'usine marémotrice de la Rance (Côtes d'Armor) d'une puissance de 240 MW avec une disponibilité dépendante des horaires de marées ;
- une production éolienne répartie sur 92 sites avec une puissance totale de 660 MW ;
- une production par des équipements thermiques sur des sites industriels raccordés au réseau d'une puissance totale de 300 MW ;
- une production hydraulique d'une puissance totale de 30 MW.

À partir des puissances disponibles sur les différents sites, le mix énergétique de la production électrique en Bretagne pour l'année 2010 est répertorié dans le tableau ci-dessous.

	Puissance électrique (MW)	% du mix
Fioul	1300	27,96%
Charbon	1160	24,95%
Gaz	960	20,65%
Eolien	660	14,19%
Thermique indus	300	6,45%
Marée	240	5,16%
Hydraulique	30	0,65%
TOTAL	4650	100,00%

Tableau 6 : Mix énergétique de la Bretagne en 2010  
(Source Ecowatt <sup>[12]</sup>)

Au total en 2010, les énergies renouvelables représentent 20% du mix énergétique de la Bretagne. Cette part est moins importante qu'à La Réunion, où elle atteint 33%. Cependant, contrairement à La Réunion, elle est en augmentation grâce au développement de nombreux projets dans le secteur éolien.

### 1.3. Configuration du réseau électrique

Comme sur l'île de La Réunion, le réseau électrique en Bretagne est fragile et le risque de coupures de courant est important, principalement pour deux raisons :

- À cause de sa faible capacité de production, la Bretagne doit importer 92% de l'électricité qu'elle consomme. Cette importation doit se faire sur de longues distances, à partir du réseau métropolitain, ce qui entraîne des chutes de tension, notamment lors des pics de consommation.
- On remarque sur la figure ci-dessous que le réseau a les mêmes points faibles qu'à La Réunion : il est peu maillé avec peu d'interconnexions, notamment entre le nord et le sud. Ainsi, le réseau est fortement sensible aux pics de froid et aux tempêtes, une grande partie de la région pouvant être isolée lors d'une coupure de courant.



Figure 8 : Réseau de transport d'électricité de la Bretagne  
(Source Ecowatt <sup>[13]</sup>)

## 2. Transposition du système de La Réunion vers la Bretagne

La différence essentielle entre les systèmes de production électrique des deux régions est que l'insularité de La Réunion lui impose de produire 100% de sa consommation alors que la Bretagne en importe 92%.

En imaginant la Bretagne auto-suffisante en électricité, nous transposons les caractéristiques du système de La Réunion vers la Bretagne.

Cette transposition est faite à partir de la consommation observée au cours de l'année 2010, soit 2,7 TWh pour La Réunion et 21,9 TWh pour la Bretagne.

Les résultats des trois indicateurs de performance du système de production locale d'électricité sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

	Système électrique de La Réunion	Système électrique transposé à la Bretagne
Production électrique (TWh)	2,7	21,9
Coût de production (€)	323 115 000	2 620 821 667
Emissions de CO2 (T)	1 717 536	13 931 125
Electricité non distribuée (%) (coupures longues)	0,1	0,1

*Tableau 7 : Transposition du système électrique de La Réunion vers la Bretagne*

En transposant le système électrique de La Réunion vers la Bretagne, le coût de production permettant de satisfaire la demande est évalué à 2 620 M€ avec 13,9 MT d'émissions de CO2. Les conditions de transposition étant similaires, le pourcentage d'électricité non distribuée est supposé identique.

En tenant compte des 3 175 000 habitants de la Bretagne, le coût du réseau transposé revient à 82,5 M€ pour 100 000 habitants, les émissions de CO2 s'élèvent à 439 kT pour 100 000 habitants et la quantité d'électricité non distribuée correspond à 690 MW pour 100 000 habitants.

## *B. Extrapolation à l'ensemble de la France métropolitaine*

### **1. Evolution de la consommation en France métropolitaine**

L'évolution de consommation électrique en France métropolitaine entre 2000 et 2010 est représentée sur la figure ci-dessous (Source RTE 2010 <sup>[14]</sup>).

La consommation est globalement en augmentation avec une progression moyenne de 5,5% sur la période 2000 – 2010.

Sur la période 2005 – 2010, la progression en France est de 6,4% alors qu'elle est de 15,3% en Bretagne et 18,9% à La Réunion.

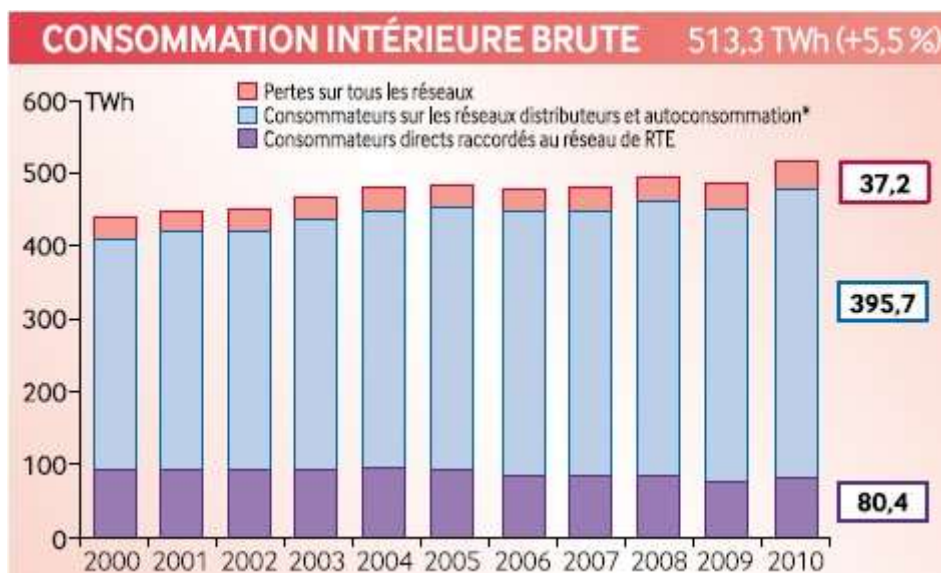


Figure 9 : Evolution de la consommation électrique (TWh)  
(Source RTE 2010 <sup>[14]</sup>)

## 2. Extrapolation des indicateurs de performance

Nous basons l'extrapolation à la France métropolitaine sur les consommations de l'année 2010.

Avec 513,3 TWh, la France métropolitaine a une consommation 23,4 fois supérieure à celle de la Bretagne. Pour simuler la France métropolitaine composée uniquement de systèmes électrique indépendants, il faut décomposer le territoire en 23,4 systèmes de production locale du type de celui obtenu pour la Bretagne, par transposition de La Réunion.

Ainsi, on obtient dans le tableau ci-dessous les résultats des trois indicateurs de performance extrapolés à la France métropolitaine composées de 23,4 systèmes indépendants.

	Système électrique transposé à la Bretagne	Système électrique transposé à la France métropolitaine
Coût de production (€)	2 620 821 667	61 327 227 000
Emissions de CO2 (T)	13 931 125	325 988 333
Electricité non distribuée (%) (coupures longues)	0,1	0,1

Tableau 8 : Extrapolation des indicateurs de performance du système de production électrique locale à l'ensemble de la France métropolitaine

Avec un territoire métropolitain composé de systèmes électriques indépendants, le coût de production annuelle s'élève à 61,3 milliards d'€ avec 326 MT d'émissions de CO2. Les coupures longues d'électricité peuvent potentiellement représenter 500GWh non distribués.

En tenant compte des 63 140 000 habitants de la France métropolitaine, le coût du réseau transposé revient à 97 M€ pour 100 000 habitants, les émissions de CO2 s'élèvent à 516 kT pour 100 000 habitants et la quantité d'électricité non distribuée correspond à 813 MW pour 100 000 habitants.

## V. Comparaison avec le réseau existant

Après avoir évalué les caractéristiques d'un système électrique métropolitain composé de plusieurs systèmes indépendants de production électrique locale, nous le comparons avec le système électrique actuel à partir des trois indicateurs de performance.

### A. Caractéristiques du réseau électrique existant

#### 1. Evolution de la production électrique en France métropolitaine

Le tableau et la figure ci-dessous représentent le mix énergétique de la production électrique de la France métropolitaine en 2010 (Source RTE 2010 <sup>[14]</sup>).

	Production électrique (TWh)	% du mix
Nucléaire	407,9	74,12%
Hydraulique	68,0	12,36%
Thermique	59,4	10,79%
Eolien	9,6	1,74%
Autres EnR	5,4	0,98%
TOTAL	550,3	100%

Tableau 9 : Mix énergétique de la France métropolitaine en 2010  
(Source RTE 2010 <sup>[14]</sup>)

On remarque que le mix énergétique est totalement différent de La Réunion : en métropole, le nucléaire représente à lui seul 75% de la production, les énergies renouvelables 15% et les énergies fossiles seulement 10%.

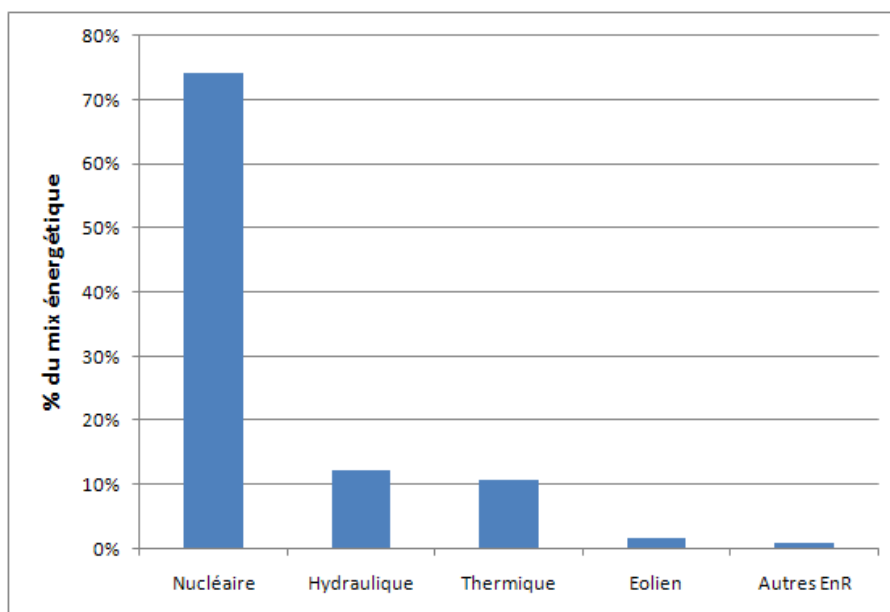


Figure 10 : Pourcentage des différents modes de production d'électricité en 2010  
(Source RTE 2010 <sup>[14]</sup>)

Avec une production annuelle de 550 TWh en 2010, la production électrique française est environ 200 fois supérieure à celle de la Réunion (2,7 TWh). Cependant, cette production est relativement stable ces dernières années avec une augmentation de seulement 6% entre 2000 et 2010.

La figure ci-dessous représente l'évolution des différents modes de production d'électricité en France métropolitaine entre 2000 et 2010.

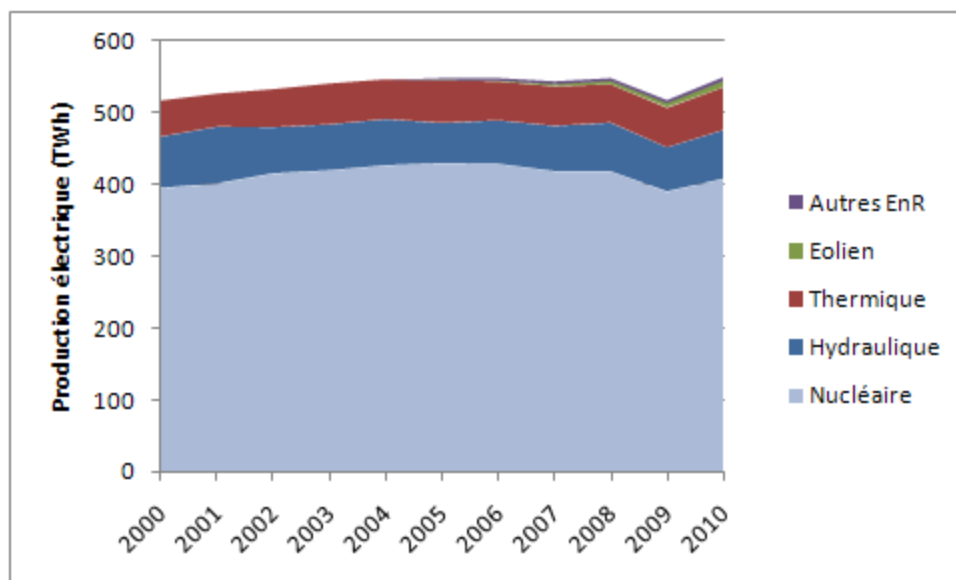


Figure 11 : Evolution du mix énergétique entre 2000 et 2010  
(Source RTE 2010 <sup>[14]</sup>)



## 2. Evaluation du coût de production et des émissions de CO2

Le coût moyen des différentes sources d'énergie en France métropolitaine est évalué à partir des deux études analysées au paragraphe II.B.1. Les quantités moyennes de CO2 émissent par les différentes sources d'énergie sont évaluées à partir de l'étude analysée au paragraphe II.C.

Les indicateurs du coût de production et des émissions de CO2 du système électrique métropolitain actuel sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	Production électrique (TWh)	Coût moyen en € / MWh	Coût en €	Emissions moyennes de CO2 en g / kWh	Emissions de CO2 en T
Nucléaire	407,9	33	13 460 700 000	6	2 447 400
Hydraulique	68,0	60	4 080 000 000	4	272 000
Thermique	59,4	60	3 564 000 000	900	53 460 000
Eolien	9,6	65	624 000 000	15	144 000
Autres EnR	5,4	100	540 000 000	100	540 000
TOTAL	550,3		22 268 700 000		56 863 400

Tableau 10 : Performances du réseau existant

En tenant compte des 63 140 000 habitants de la France métropolitaine, le coût du réseau existant revient à 35,5 M€ pour 100 000 habitants et les émissions de CO2 s'élèvent à 90 kT pour 100 000 habitants.

## 3. Qualité de service du système de la France métropolitaine

La qualité de service est évaluée par le Temps de Coupure Equivalent (TCE) qui est un indice caractérisant l'ampleur des coupures en considérant le volume d'énergie non distribuée ramené à la puissance moyenne distribuée au cours d'une année.

Le TCE est exprimé en minutes et calculé en effectuant le rapport entre l'Energie Non Distribuée (END) lors des coupures longues et la puissance moyenne distribuée, pour l'ensemble des consommateurs industriels et distributeurs.

La figure ci-dessous représente le Temps de Coupure Equivalent en France métropolitaine sur la période 1994 – 2010 (Source RTE <sup>[15]</sup>).

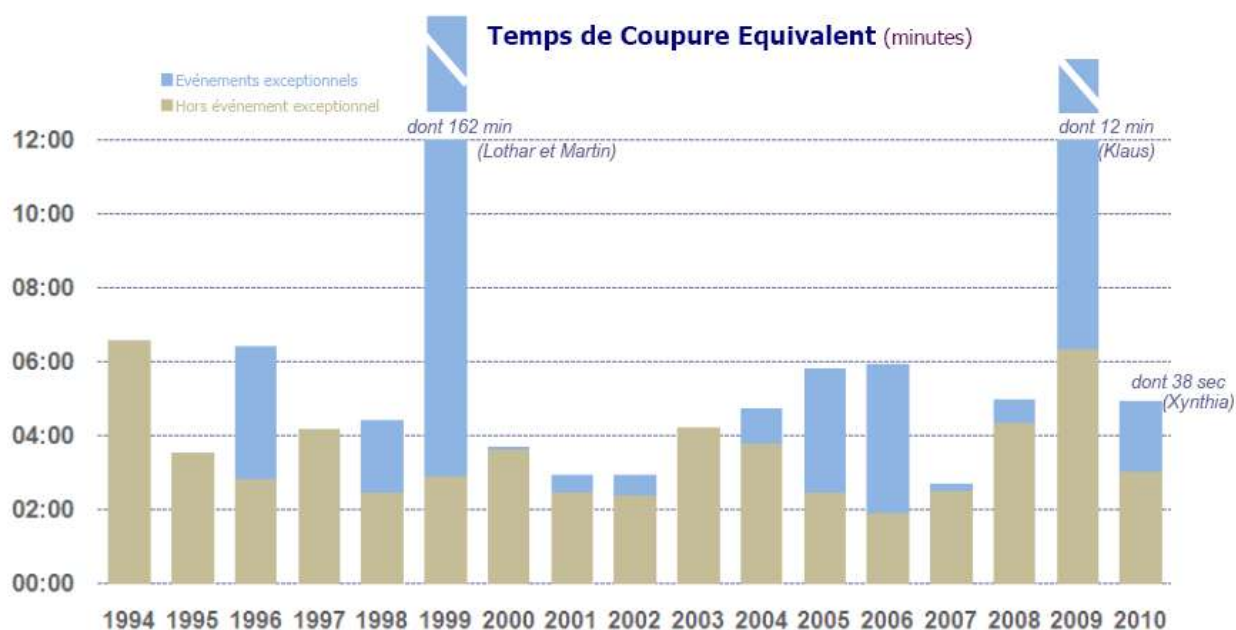


Figure 12 : Temps de Coupure Equivalent en France métropolitaine  
(Source RTE [15])

Le Temps de Coupure Equivalent permet d'exprimer l'électricité non distribuée en minutes équivalentes. Chaque minute correspond à 1,2 GWh non distribués.

Hors tempêtes exceptionnelles, le TCE est d'environ 5 min, soit 6 GWh non distribués. Mais en 1999, 200 GWh n'ont pas été distribués à causes des tempêtes hivernales. Nous retiendrons ce dernier chiffre de 200 GWh pour comparer avec la qualité de service du système extrapolé.

En tenant compte des 63 140 000 habitants de la France métropolitaine, la quantité d'électricité non distribuée s'élève à 317 MW pour 100 000 habitants.

### B. Comparaison des deux systèmes électriques

La comparaison des deux systèmes électriques est faite dans le tableau ci-dessous.

	Système électrique actuel de la France métropolitaine	Système électrique avec production locale extrapolé à la France métropolitaine	Rapport entre le système extrapolé et le système actuel
Coût de production (€)	22 268 700 000	61 327 227 000	2,7
Emissions de CO2 (T)	56 863 400	325 988 333	5,7
Electricité non distribuée (GWh) (coupures longues)	200	500	2,5

Tableau 11 : Comparaison entre le système électrique actuel de la France métropolitaine et le système extrapolé à partir du système de La Réunion

Les conclusions d'une transposition du système électrique de La Réunion à l'ensemble de la France métropolitaine sont les suivantes :

- Le coût global de la production d'électricité nécessaire pour répondre à la demande serait multiplié par 2,7. Cette augmentation du coût est principalement liée au surcoût de chaque source dans un contexte de production locale et isolée.
- les émissions de CO2 liées à cette production seraient multipliées par 5,7. La très forte augmentation des émissions est due à une part importante des énergies fossiles dans le mix énergétique d'un système de production locale d'électricité.
- les coupures longues d'électricité seraient multipliées par 2,5. Même si cela n'est pas chiffrable, les coupures brèves seraient beaucoup plus importantes.

Approcher la production d'électricité des zones de consommation ne ferait que dégrader les performances du système électrique. Le réseau électrique maillé est donc bien plus adapté aux caractéristiques de la France métropolitaine.

## **VI. Remarques complémentaires**

- Les données que nous avons pu recueillir sont plus précises et plus fiables pour la France métropolitaine que pour l'île de La Réunion.
- Pour étudier convenablement la répartition de la consommation sur un territoire donné, le bon concept serait celui de "Carte d'Archimède", décomposition du territoire en sous-territoires d'égale consommation ; voir [16].

## VII. Références

- [1] Electricité De France, *Bilan Prévisionnel de l'Equilibre Offre / Demande d'électricité – Ile de la Réunion*, 2011.
- [2] Observatoire Energie Réunion, *Bilan énergétique 2010 de l'île de la Réunion*, 2011.
- [3] Académie de La Réunion, *L'énergie à La Réunion*, 2004.
- [4] Agence Régionale Energie Réunion, *Plan Economique de Transition et de Relance via des Energies 100% Locales à l'île de La Réunion – Prospective et Mix énergétique de La Réunion aux horizons 2020 - 2030*, 2009.
- [5] Ministère de l'écologie de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, *Rapport au parlement - Programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité - Période 2009 - 2020*, 2009.
- [6] Commissariat au Plan, *Etude Energie 2010 – 2020*, 2010.
- [7] Direction Générale de l'Energie et du Climat, *Synthèse publique de l'étude des coûts de référence de la production électrique*, 2008.
- [8] Electricité De France, *Particularités des systèmes insulaires*, <http://sei.edf.com/nos-engagements/particularites-des-systemes-insulaires-47782.html>.
- [9] Electricité De France, *Etude ACV – DRD*, Revue Générale Nucléaire N°1/200.
- [10] Mines Paristech, *Modélisation du système électrique de l'île de la Réunion avec TIMES*, 2010.
- [11] Ecowatt, *Consommation d'électricité*, <http://www.ecowatt-bretagne.fr/electricite-dans-l-Ouest/consommation-electricite-bretagne.php>.
- [12] Ecowatt, *Production d'électricité*, <http://www.ecowatt-bretagne.fr/electricite-dans-l-Ouest/production-electricite-bretagne.php>.
- [13] Ecowatt, *Transport d'électricité*, <http://www.ecowatt-bretagne.fr/electricite-dans-l-Ouest/transport-electricite-bretagne.php>.
- [14] Réseau de Transport d'Electricité, *Bilan énergétique*, 2010.
- [15] Réseau de Transport d'Electricité, *Rapport annuel sur la Qualité de l'Électricité*, 2010.
- [16] Bernard Beauzamy : Archimedes' Modern Works.  
[http://scmsa.eu/archives/SCM\\_Archimedes\\_order.htm](http://scmsa.eu/archives/SCM_Archimedes_order.htm)