



**POLYTECH<sup>®</sup>**  
**TOURS**

Département  
Aménagement et Environnement

**CITERES**  
UMR 6173  
Cités, Territoires,  
Environnement et Sociétés

**un**iversité  
de **TOURS**

**Equipe IPA-PE**  
Ingénierie du Projet  
d'Aménagement, Paysage,  
Environnement

**Projet de Fin d'Etudes**

## **Le potentiel énergétique de la région du Nordeste du Brésil en vue d'initier une production d'énergies renouvelables locale**

**2018**

**Directeur de recherche**  
**VERDELLI Laura**



**SEVILLA Manon**  
**SIMONIN Mathilde**



Le potentiel énergétique de la région du Nordeste du Brésil en  
vue d'initier une production d'énergies renouvelables locale

**Directeur de recherche**  
**Verdelli Laura**  
**2017-2018**

**Sevilla Manon**  
**Simonin Mathilde**

# **AVERTISSEMENT**

---

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

# Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à:

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

**Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.**

# REMERCIEMENTS

---

Nous remercions Laura Verdelli, notre tutrice qui nous a accompagnées tout au long de ce projet et qui nous a permis de le réaliser au Brésil.

Sur place, le Laboratoire d'Énergie et de Gaz de l'école Polytechnique à l'Université Fédérale de Bahia et particulièrement Peter De Jong, théiste sur l'intégration et le stockage de la production d'énergie renouvelable dans le Nordeste. Ils nous ont très bien accueillies et nous tenions à les remercier. Ils nous ont partagés leurs connaissances et expériences et nous ont donné accès à plusieurs documents phare. Leur esprit scientifique a aussi été très enrichissant dans le cadre d'un tel exercice.

Nous souhaitons aussi remercier les élèves de l'école d'architecture de l'Université Fédérale de Bahia et d'autres connaissances personnelles brésiliennes (dont Caio Barbosa Nascimento) qui nous ont donné de leur temps et confié leurs données énergétiques.



# SOMMAIRE

---

Introduction .....	9
I- La production d'énergie renouvelable du Nordeste : riche mais des potentialités insuffisamment exploitées. ....	11
A. La production de gaz et d'autres combustibles.....	11
B. Les énergies renouvelables .....	11
1. L'hydroélectricité : un bassin surexploité et une production vouée à diminuer...11	
2. La biomasse et le biogaz : des installations urbaines actuellement incompatibles.....	13
3. L'éolien : un énorme potentiel à exploiter. ....	15
4. Le photovoltaïque : potentiel unique trop peu étudié.....	17
II- Vers une maîtrise de la consommation énergétique .....	19
A. La consommation électrique : une énergie d'avenir .....	20
1. Une consommation électrique miroir de la situation économique du pays.....	21
2. L'électricité : une énergie consommée sans limite .....	22
B. Le gaz : une énergie encore beaucoup consommée par les ménages.....	23
1. Le Gaz de Pétrole Liquéfié, un gaz utilisé pour cuisiner. ....	24
2. Vers un avenir incertain .....	25
C. Vers une disparition du bois de chauffage dans les ménages Brésiliens. ....	25
D. Vers un avenir énergétique prometteur.....	27
Partie 2 :	
I. Vers une catégorisation des types de logements .....	30
A. Catégorisation de la population de Salvador associées aux manières d'habiter.....	30
1. Caractéristiques et méthodes .....	31
II. Implanter des modes de production d'énergie.....	34
A. La Norme de l'ANEEL.....	34
1. Choix des énergies primaires .....	36
B. Simulations et calculs des équipements nécessaires pour répondre à un besoin énergétique	41

# Introduction

Le Brésil est le 5ème plus grand pays du monde à la fois en termes de superficie (12.6fois celle de la France) et de démographie avec ses plus de 206 millions d'habitants. Economiquement, le pays est une grande puissance émergente, et est actuellement considéré comme la 7ème puissance mondiale. De telles caractéristiques impliquent d'importants enjeux concernant la gestion énergétique et le coût d'approvisionnement. Aujourd'hui le Brésil est indépendant au niveau du pétrole, mais il est aussi le troisième pays mondial producteur d'énergies renouvelables. En effet, pionniers des agro-carburants avec le bioéthanol issu de la canne à sucre, l'hydroélectricité reste la principale source renouvelable : 63.2% de l'électricité du pays en 2014 (ce qui l'a classé deuxième producteur mondial). Toutefois l'exploitation des fleuves est déjà considérée comme maximale. Et comme le montre Lucena dans son mémoire "The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil.", le changement climatique va réduire la pluviométrie, provoquer des périodes de sécheresses plus fréquentes. Il est donc nécessaire de réfléchir à d'autres alternatives. L'augmentation du coût des énergies fossiles associées aux enjeux de la transition énergétique ont fait que le Brésil a lancé une politique de diversification de la matrice énergétique, en orientant ce développement autour de la production d'électricité renouvelable. D'une part, le programme PROINFA est lancé en 2002, dont les objectifs sont les suivants : +3300MW d'énergie renouvelable d'ici 2007 puis +10% annuellement jusqu'en 2027. Le programme n'a cependant pas analysé les potentialités propres à chaque région. D'autre part, l'ANEEL a promulgué en 2012 une loi autorisant l'implantation de mini-structures de production d'énergie renouvelable directement chez le consommateur.



Le Nordeste possède un des plus gros potentiels éoliens et solaires (Atlas Eolica et Atlas Solar de Bahia 2013) du pays. Forte de ses 54 millions d'habitants, elle abrite ¼ de la population brésilienne, est constituée de 9 Etats, la principale ville étant Salvador (Etat de Bahia) avec ses 3 millions d'habitants. La région a prévu plusieurs implantations d'infrastructures énergétiques tels que des parcs éoliens et solaires dans les années à venir (ANEEL). Pour autant on ne voit pas l'application de la loi ANEEL 2012.

Etant donné les potentialités de la région, on peut se demander quels seraient les résultats si les habitants du Nordeste implantaient directement chez eux des sources de production d'énergie.

Pour répondre à cette question, nous allons dans un premier temps faire un état de l'art de la production d'énergies renouvelables dans le Nordeste (potentialités, politiques) puis étudier la consommation énergétique du secteur résidentiel. Pour constituer cette partie, nous avons étudié les résultats et programmes des acteurs énergétiques du Brésil : l'ANEEL (Agence Nationale de l'Energie Electrique), l'ONS (Opérateur National du Système Electrique) et l'EPA (Entreprise de Recherche Energétique), ainsi que l'institut statistique national ; l'IBGE. Ensuite nous avons lu plusieurs mémoires et thèses qui traitent de la question énergétique dans le Nordeste.

Ces résultats nous aideront à mesurer nos leviers d'actions dans une seconde partie. Cette dernière sera constituée de propositions visant à produire l'énergie directement chez le consommateur, en tenant compte des spécificités de l'habitat. Etant donné la superficie de la région, nous nous concentrerons sur la ville de Salvador.

## **I- La production d'énergie renouvelable du Nordeste : riche mais des potentialités insuffisamment exploitées.**

D'après les estimations de Marengo (2008b), c'est le Nordeste qui devrait subir les impacts les plus importants, suites au réchauffement climatique.

Comme expliqué dans l'introduction nous nous concentrons sur le secteur résidentiel. Ce dernier utilise plusieurs types d'énergies dont majoritairement : du gaz et de l'électricité. Ainsi nous pouvons, dans un premier temps, nous interroger sur la production de ces énergies.

### **A. La production de gaz et d'autres combustibles**

Le Brésil a la chance de posséder l'autonomie pour ce qui est du pétrole. En effet le pays possède plusieurs réserves, dont les dernières ont été découvertes en 2006. Ainsi la majorité du gaz produit est issu du pétrole : c'est le Gaz de Pétrole Liquéfié.

Il est aussi le premier producteur mondial de bioéthanol à partir de la canne à sucre. Ainsi, en moyenne 15% des carburants sont issus du bioéthanol d'après les résultats publiés d'Eletrobras (2015).

### **B. Les énergies renouvelables**

#### **1. L'hydroélectricité : un bassin surexploité et une production vouée à diminuer.**

Cette production couvre plus de 60% des besoins électriques du pays. Avec ses 1273 exploitations, le pays cumule presque 102 GW de potentiel énergétique. Cela représente 64.16% de l'énergie totale produite par le pays.

Dans le Nordeste, la production hydroélectrique était de 23,75 TWh en 2016, d'après BEN<sup>1</sup>. Le bassin principal exploité est celui de Sao Francisco. Long de 634 000km<sup>2</sup>, soit 1/10 du territoire français, couvre 7.5% du territoire brésilien.

---

<sup>1</sup> Balance Energétique Brésilienne

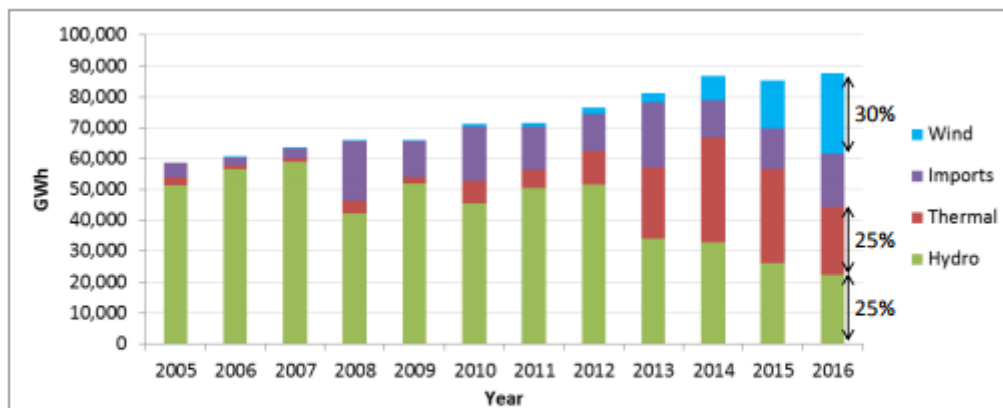


Figure 3: Sources of the Northeast's Electricity. "Thermal" electricity generation in the NE is from fossil fuels & biomass. "Imported" consists mostly of hydro from other Brazilian regions. From 2005-2007, hydro was responsible for more than 87% of the NE's electricity supply. Source: ONS (2017).

Figure 1: Répartition des sources d'électricité du Nord-Est Source: ONS, 2017

Quand on regarde les données de l'ONS, le bassin Sao Francisco permettait de couvrir jusqu'à 70% des besoins en électricité, une longue sécheresse en 2012 a entraîné une baisse de la production au point de ne pouvoir couvrir que 42%, 39%, 31% puis 25% pour les années respectives 2012, 2013, 2014 et 2015. Ce manque a été compensé par l'importation d'électricité d'origine fossile.

Comme l'explique Marengo dans son mémoire (2012), aujourd'hui il est exploité au maximum. 15 infrastructures sont installées le long de ce bassin, dont deux parmi les plus importantes du Brésil : le complexe Paulo Alfonso et l'usine Xingo. Ces exploitations totalisent une capacité de production de **11,966 GW**.

Selon Lucena (2009), les tendances observées par l'ONS (illustrées par le schéma ci-dessus) ne devraient pas changer puisque les prévisions météorologiques estiment une augmentation de 4 à 5°C d'ici 2070 et une réduction de la pluviométrie de 25 à 50%. Cela va provoquer d'importantes sécheresses et donc une réduction de la production d'hydroélectricité.

Pieter de Jong (2009) confirme avec des estimations affirmant que l'hydroélectricité ne pourra plus répondre qu'à 10-15% des besoins d'ici 2030. Pour que l'alimentation électrique du Nord-Est reste majoritairement d'origine renouvelable, il est nécessaire de diversifier les sources d'approvisionnement pour pallier la perte d'hydroélectricité.

L'hydroélectricité possède un rôle aujourd'hui essentiel à l'approvisionnement électrique du Nordeste. Toutefois le bassin principal est déjà exploité au maximum, et le changement climatique va indéniablement réduire la production.

L'enjeu pour la région est donc de mettre en place des sources complémentaires pour parer cette baisse de production et continuer à diversifier la matrice électrique.

## 2. La biomasse et le biogaz : des installations urbaines actuellement incompatibles.

D'après les définitions de actu-environnement, la biomasse est définie par l'ensemble de la matière organique végétale ou animale. Cette matière contient une forte proportion de méthane (50% en moyenne), et possède donc un fort potentiel calorifique et énergétique. Le processus pour créer le biogaz copie la méthanisation qui est la dégradation naturelle de la matière organique en gaz dans des conditions quasi anaérobies (sans oxygène).

La biomasse est utilisée essentiellement pour produire de l'énergie thermique. Celle-ci peut être gazeuse ou transformée en électricité. En moyenne, chaque m<sup>3</sup> de biogaz possède un pouvoir calorifique de 6kWh. La conversion en électricité ne produit que 2kWh et le reste est transformé en chaleur (pertes).

Il est donc intéressant de penser à la cogénération qui permet de récupérer la chaleur perdue pour l'utiliser en tant qu'énergie thermique tout en produisant de l'électricité.

D'après l'Agence Nationale de l'Energie Electrique (ANEEL), le Brésil produit 42.8 GW d'énergie thermique, dont 8.82% sont issus de la biomasse.

Le Nordeste produit à lui tout seul 24% de l'énergie thermique issue du biogaz, soit 904MW.

La source de cette biomasse est principalement la canne à sucre. Malheureusement il nous a été impossible de trouver le pourcentage d'exploitations utilisé pour produire cette biomasse. Nous ne savons pas quel est le potentiel total de l'exploitation de la canne à sucre dans le Nordeste.

Nous savons que l'électricité produite par les cannes à sucre s'élevait à 2 320 GWh en 2016, selon BEN.

### Les potentialités :

Le biogaz peut être créé à partir de déchets végétaux, industriels, domestiques et urbains (égouts). Nous allons évoquer les potentialités de toutes ces sources, mais nous développerons plus en détails la source domestique c'est sur celle-ci que nous auront une marge de manœuvre par la suite.

Nous avons utilisé la thèse de Zanette et al pour les sources domestiques, urbaines et industrielles, et celles de Lima Junior et al et Gárdos et al pour la source végétale.

- Biogaz issu de source végétale :

Lima Junior et al (<http://www.btdt.ufpe.br/handle/123456789/10160>) ont démontré que parmi les espèces végétales les plus présentes dans le Nordeste, la canne à sucre est celle qui possède le meilleur potentiel énergétique avec 710kWh/m<sup>2</sup> (contre 439kWh/m<sup>2</sup> pour le second meilleur potentiel).

Gárdos et al [34] ont démontré qu'il existait la même complémentarité entre la production d'énergie hydroélectrique et celle issue de la biomasse : la récolte des cannes à sucre se fait d'avril à octobre, ce qui correspond à la saison sèche.

- Biogaz issu des déchets industriels :

Les résultats ne sont pas des chiffres de production de biogaz mais un tableau des potentiels selon les types de déchets et les quantités correspondantes. Le papier, l'éthanol et le sucre sont en tête.

- Biogaz issu des déchets urbains :

Zanette et al ([http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette\\_luiz.pdf](http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/zanette_luiz.pdf)) a étudié le potentiel de production du biogaz issus des effluents urbains.

La situation actuelle fait que le Brésil possède un taux de collecte et traitement des égouts inférieurs à la moyenne des pays développés ou en développement. Ainsi dans le Nordeste, seuls 30% des égouts sont traités. C'est pourquoi il est difficile d'évaluer précisément le potentiel énergétique du biogaz.

- Biogaz issu des déchets domestiques :

Zanette et al ont réalisé des calculs, prenant en compte les paramètres suivants :

- Production de matière organique biodégradable par personne (entre 55 et 68g/jour (d'après HENZE et al., 1997)
- Les spécificités des processus anaérobies et aérobies avec digestion anaérobies (rendements des machines, efficacité d'extraction de la biomasse parmi les déchets collectés). La différence est la suivante :

Pour une population de 100000 personnes, les résultats suivants sont obtenus : pour un traitement anaérobie 9600kWh d'électricité, pour une digestion anaérobie après traitement aérobie : 460kWh. (\* d'après [http://www.electrigaz.com/faq\\_fr.htm](http://www.electrigaz.com/faq_fr.htm)) Sachant que le Nordeste possède une population de 57 millions d'habitants, cela correspond respectivement à 5.5GWh (plus de 3 fois la production actuelle) et 262MWh selon les modes de traitement.

Pour obtenir de tels résultats il faudrait changer le fonctionnement de collecte des déchets qui ne permet pas, ou très peu, le tri actuellement.

Cette étude s'est concentrée sur la production d'énergie électrique à partir de biogaz.

Le potentiel est là aussi intéressant, même s'il demande des changements conséquents dans le domaine de la collecte des déchets et effluents urbains.

#### La politique :

En 2008 le Ministère des Mines et de l'Energie a lancé le premier plan d'action exclusivement consacré à la biomasse. Cela a résulté en 2010 de 31 installations et 321MW de biogaz. Ces infrastructures ont été implantées dans le Sud-Est et le Centre-Ouest.

### 3. L'éolien : un énorme potentiel à exploiter.

Les vents de la région Nordeste représentent un gros potentiel quant au développement de l'éolien sur ce territoire. En 2016, la production d'électricité par cette source était de 28,35 TWh<sup>2</sup>.

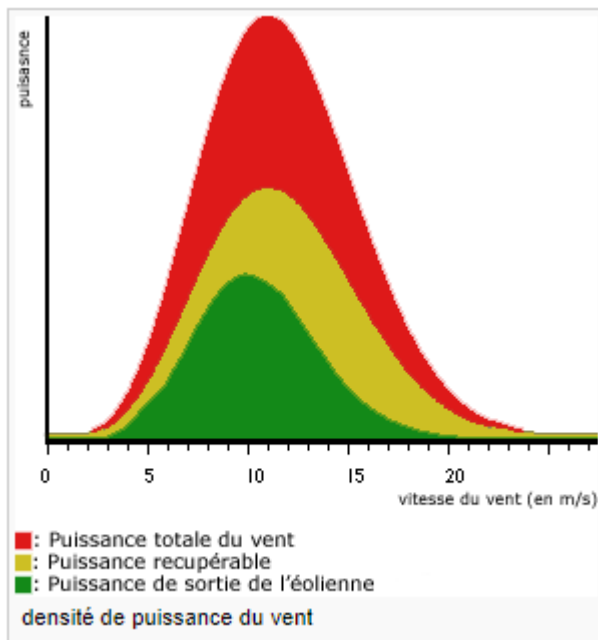
#### *UNE POLITIQUE GOUVERNEMENTALE INCITATIVE*

Comme vu dans l'introduction, le Brésil possède une politique de diversification de sa matrice énergétique, qui s'est traduit par le programme PROINFA en 2002. Suite à cela, le Ministère des Mines et de l'Energie a établi la Seconde Loi de l'Energie de Réserve. Cette loi promeut l'installation de l'équivalent de 1805MW dans tout le pays, **dont 390MW dans l'Etat de Bahia**. Ces réformes ont permis l'installation d'entreprises de fabrication d'éoliennes et de faire baisser le prix du marché éolien brésilien. Aujourd'hui, quand on regarde les données de l'ANEEL, on compte 731 sites d'implantations éoliennes dans le Brésil construits ou en constructions.

Depuis ces décisions, l'Etat de Bahia est devenu un pôle majeur pour le pays en gestion de l'énergie éolienne. Ainsi entre 2009 et 2013, des contrats de plus de 2GW ont été signés.

Pour permettre l'implantation de ces nouveaux projets, le gouvernement brésilien a réalisé plusieurs études. La plus récente et la plus complète est L'Atlas Eolien de Bahia de 2013. Ce document visait à remettre à jour une étude réalisée par la Compagnie Electrique de l'Etat de Bahia (COELBA) réalisée en 1994. Ainsi cette version étudie les vitesses jours/nuits des vents selon des hauteurs différentes, calcule les incertitudes, fait des simulations, diversifie plus ses données que l'ancienne version.

Ainsi ressort de cette étude que Bahia possède véritablement un potentiel éolien non négligeable : vents adéquats, zones prometteuses...



Ce schéma montre la puissance produite par une éolienne selon la vitesse du vent. Ainsi on voit que les éoliennes ne peuvent pas gérer les vitesses extrêmes (en-dessous de 5m/s et au-dessus de 16m/s).

Figure 2: Puissance produite par une éolienne selon la vitesse du vent. Source: WIKIEOLIENNE, Etude théorique d'une éolienne, 2017. [https://eolienne.f4jr.org/eolienne\\_etude\\_theorique](https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique) (Consulté en novembre 2017)

<sup>2</sup> Source : BEN 2016

L'Atlas a analysé les vents de Bahia en tenant compte des paramètres suivants :

1. L'évolution des vitesses des vents selon les hauteurs,
2. L'évolution des vitesses des vents selon les saisons
3. La pluviométrie
4. Les températures
5. Les incertitudes

Il ressort que la hauteur optimale étant donné les sites concernés (de types accidentés ou plaines, dans des zones peu habitées), est de 100m.

Ainsi cette étude démontre que, en analysant les vents et les hauteurs, le potentiel éolien installé est de 70GW à 100m de hauteur pour des vitesses supérieures à 7m/s. Cela correspond à 273TWh/an. Alors qu'en 2012, le parc éolien brésilien cumulait 592.8TWh/an. **Cela suffirait à remplacer la part de l'énergie qui est actuellement importée dans la région, et celle issue de sources fossiles.**

### COMPLEMENTARITE ENTRE LA PRODUCTION EOLIENNE ET HYDROELECTRIQUE

Des études ont montré une coïncidence entre les périodes où les débits des bassins hydrographiques sont les plus faibles et les périodes de meilleures intensités des vents. Le tableau suivant montre les débits d'un affluent du fleuve Sao Francisco avec la production éolienne estimée d'une centrale hypothétique de 8GW.

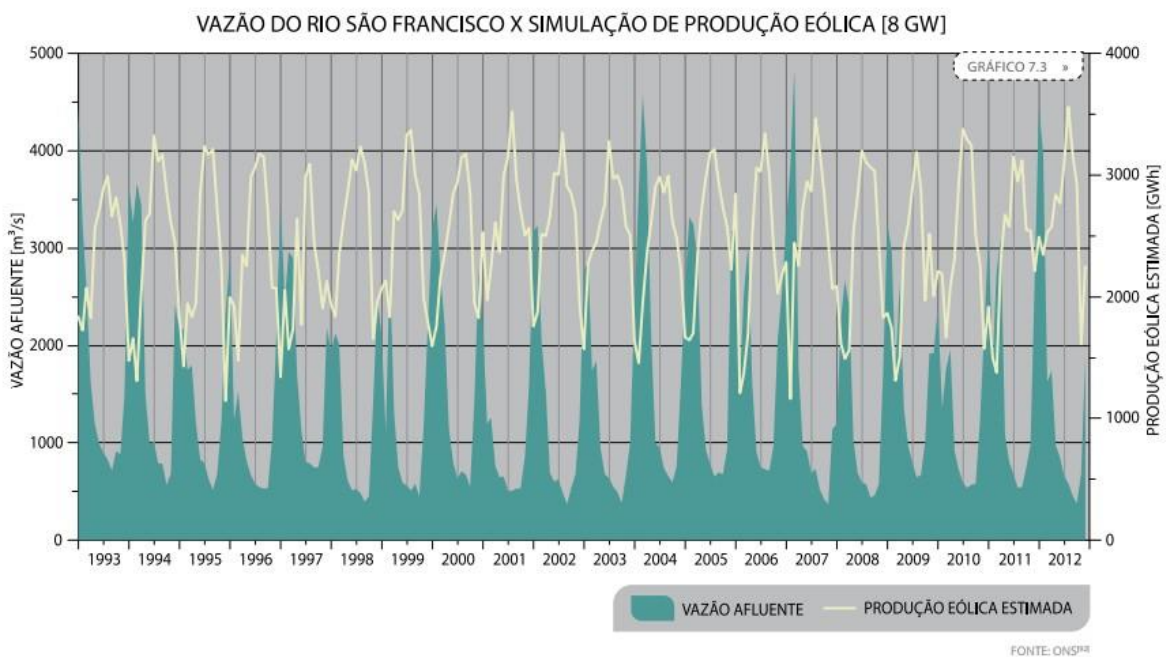


Figure 3: Débits d'un affluent du fleuve Sao Francisco. Source: Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil-Pieter de Jong-2017

La courbe en bleu représente le débit de l'affluent en m<sup>3</sup>/s et la courbe blanche la production éolienne estimée en GWh. La complémentarité apparaît très nettement : lorsque la production éolienne est à son maximum, le débit de l'affluent est très faible (et réciproquement).

Ainsi on peut observer cette complémentarité. La crise électrique de juillet 2013, où les réservoirs hydroélectriques se sont retrouvés historiquement vides, a provoqué la mise en place d'un rationnement énergétique. Depuis une politique d'utilisation et d'implantation d'usines thermoélectriques, pour éviter de nouvelles crises.

Comme l'explique Pieter de Jong, l'énergie éolienne est sensiblement moins chère et possède un potentiel concentré dans Bahia qu'il serait plus économique et renouvelable d'en faire une alternative pour la sécurité énergétique du Nord-Est.

Etant donné l'important potentiel dans cette région, associé au fait que le coût est relativement faible et à la politique incitative de la région, on peut s'attendre à une augmentation de ce type d'implantations.

Toutefois il n'y a aucune étude qui concerne l'implantation d'éoliennes dans les villes. Or les toits sont des surfaces disponibles potentielles, et la loi de l'ANEEL 2012 autorise ce type d'installations. Cela économiserait des coûts d'infrastructures de stockage et de transport.

Toutefois, il ne faut pas oublier que le solaire et l'éolien sont des technologies variables. Ces ressources ne sont pas forcément adaptables à la demande. La difficulté principale est alors d'intégrer cette électricité verte dans le réseau électrique.

La solution pour intégrer ces ressources intermittentes est d'impliquer le développement de multiples techniques comme les réseaux intelligents, stockage etc.

#### 4. Le photovoltaïque : potentiel unique trop peu étudié.

D'après l'Atlas Solar de Bahia 2013, le Nordeste possède les moyennes de radiations solaires les plus importantes du Pays : 5.9kWh/m<sup>2</sup> (en France, elle se situe autour de 3.5kWh/m<sup>2</sup>). Un réseau de panneaux solaires dans les zones urbaines pourrait répondre la demande électrique liée à la climatisation. Cela est dû à sa position géographique entre l'Equateur et le tropique du Capricorne et à la faible pluviométrie.

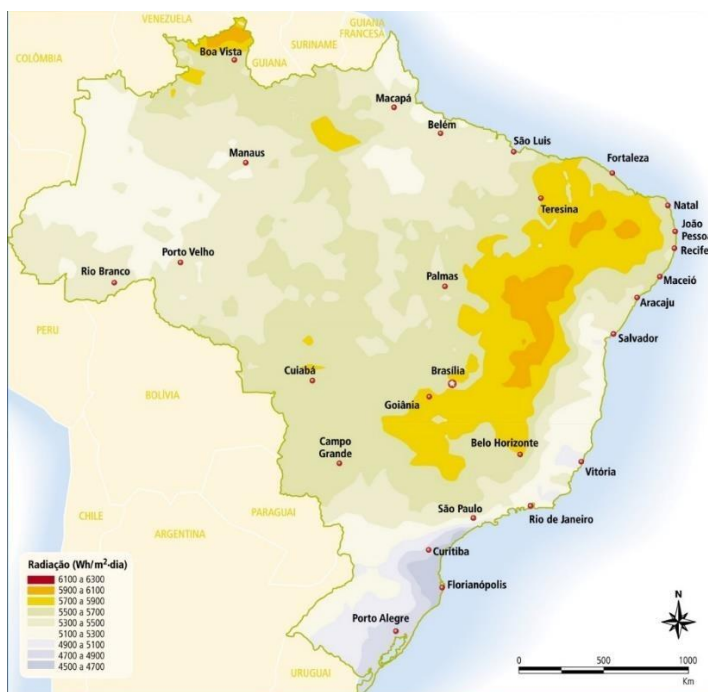


Figure 4 : Répartition des radiations en Wh/m<sup>2</sup>-jour. Source: Atlas Energia Solar –ANEEL-2003

D'après l'ANEEL, seuls 15MW d'électricité photovoltaïque étaient connectés au réseau national avant 2013, mais que des contrats de 2180MW ont été signés durant les deux années suivantes.

Il est aussi intéressant de relever que le Nord-Est possède d'importantes ressources en silice, qui est un matériau utilisé pour la création de panneaux photovoltaïque.

Ainsi le Nordeste possède un important potentiel photovoltaïque. Mais ce potentiel pour la production d'électricité reste majoritairement inexploré, à l'exception de quelques petits systèmes dans les zones reculées. La production d'énergie photovoltaïque n'est pas autant étudiée que pour l'éolien, ainsi les données sont plus rares et difficiles à trouver. On sait qu'il y a au Brésil 150 sites d'implantations photovoltaïques en construction ou déjà construits et que le Nordeste a produit la moitié de l'énergie photovoltaïque du Brésil en 2016 soit 40GWh<sup>3</sup>.

. La capacité associée varie selon les sources. Nous estimons que l'incertitude des données est en partie due à l'existence de nombreuses installations photovoltaïques ponctuelles dans les régions rurales/isolées. Selon les études certaines apparaissent, d'autres non.

Ainsi, en plus de pouvoir être un leader en termes d'énergie éolienne, le Nordeste a largement les possibilités de devenir un leader de la production d'électricité photovoltaïque. Malheureusement on observe encore un coût élevé pour les importations de matériel nécessaire ainsi qu'un manque d'initiatives gouvernementales. En effet, il existe quelques subventions, incitations fiscales, mais cela reste faible, et il n'existe pas de prix définis pour le développement d'énergies solaire ou éolienne. Mais en 2012, l'ANEEL a approuvé une loi qui autorise le consommateur à avoir des micro/mini sources d'énergies renouvelables connectées au réseau national, et à échanger cette énergie contre des crédits avec le distributeur local.

En définitive, nous pouvons résumer les chiffres clés concernant la production d'électricité dans le Nordeste dans le tableau ci-dessous. Ces données vont ensuite être insérées dans notre toaster.

Source de production électrique	Hydroélectrique	Eolienne	Solaire	Thermo	Canne à sucre
<b>Production en TWh (2016)</b>	23,75	28,35	0,04	40,93	2,32

Finalement, nous l'avons compris, le Brésil a beaucoup de potentiel et peut produire énormément d'énergie à partir de sources renouvelables. Repenser la production n'est pas la seule solution pour optimiser l'énergie. En effet, il est important de comprendre comment l'énergie résidentielle est consommée, utilisée, pour pouvoir ensuite proposer des solutions adaptées.

---

<sup>3</sup> Source : BEN 2016

## II- Vers une maîtrise de la consommation énergétique.

Fort de ces 205 millions d'habitants, le Brésil est aujourd'hui le huitième consommateur d'énergie au monde. Comme nous l'illustre la figure 6, il utilise principalement du pétrole, de l'électricité, et de l'énergie provenant des cannes à sucre tous secteurs confondus.

**Consumo final de energia por fonte (Total: 195.909x10<sup>3</sup> tep - BEN/2006)**

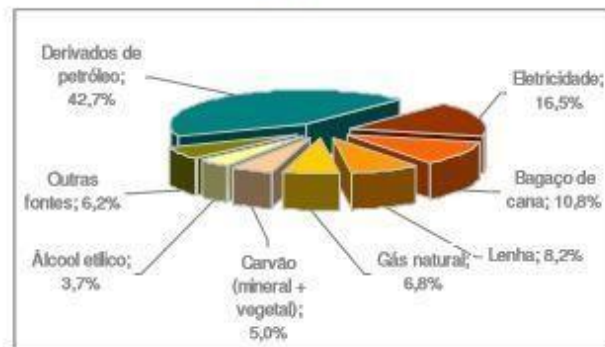


Figure 5 : Consommation finale d'énergie par source. Source: BEN, 2006

A noter que "Bagasse de sucre de canne" est le résidu solide obtenue après le passage des cannes à sucre dans un moulin.

Comme expliqué dans l'introduction, nous allons ici nous concentrer sur le secteur résidentiel, qui comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous, représente 11% de la consommation finale du Brésil en 2016, avec près de 290 TWh d'énergie consommée.

**Consumo final de energia por setor (Total: 195.909x10<sup>3</sup> tep - BEN/2006)**

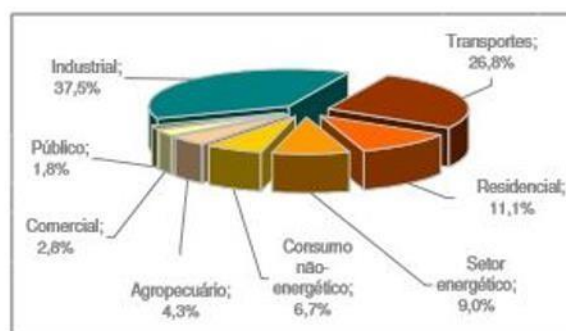


Figure 6 : Consommation d'énergie par secteur. Source : BEN, 2006

La consommation d'énergie dans ce secteur a beaucoup évolué au cours du temps. En effet, elle est en lien direct avec notre manière de vivre. Elle peut refléter la situation économique du pays. Elle est sensible aux crises, aux changements de la société.

Le graphique ci-dessous, montrant l'évolution des consommations finales dans le secteur résidentiel, utilise l'unité « tep » qui signifie « Tonne d'équivalent pétrole ». Il s'agit du pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole, soit environ 42 GJ. Dans ce rapport, il est plus adapté de parler en kWh. On estime alors que 1 tep correspond à 11 630 kWh<sup>4</sup>

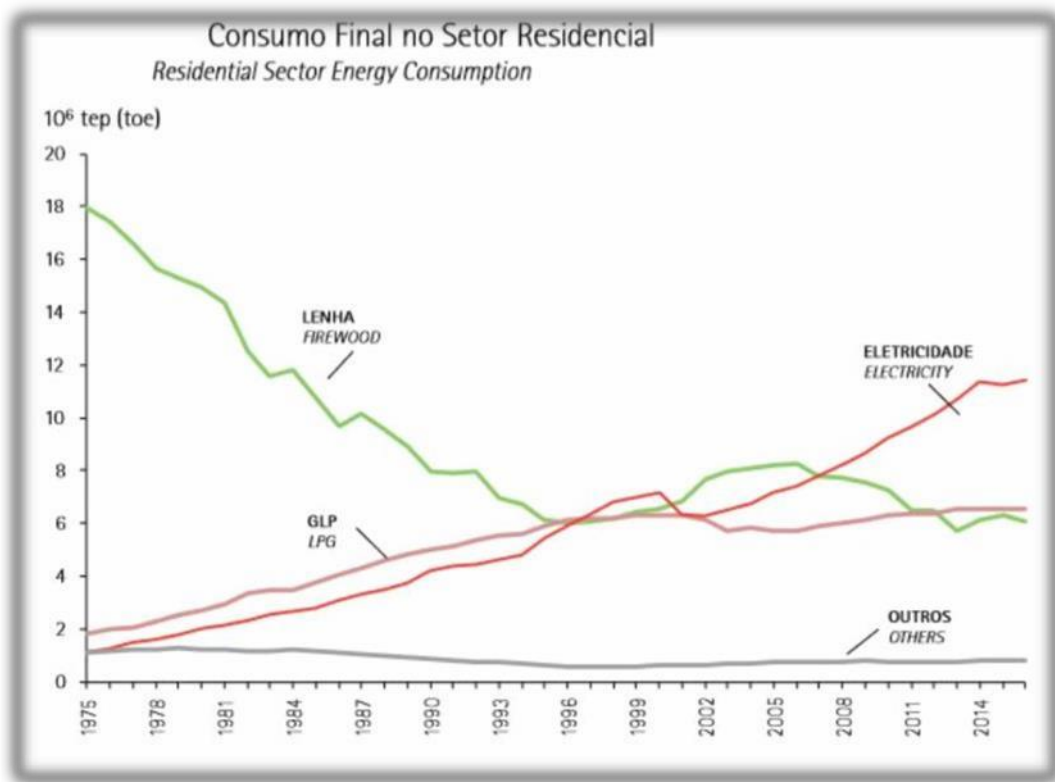


Figure 7 : Consommation résidentielle finale par source d'énergie. Source: BEN, 2016

Ici, nous pouvons clairement observer l'évolution des différentes sources d'énergie utilisées par le secteur résidentiel entre 1975 et 2014. Ce que l'on entend sous « les autres » sont principalement de l'énergie végétale et le gaz naturel. Alors que le bois de chauffage était très populaire dans les années 80, aujourd'hui les brésiliens consomment principalement de l'électricité.

### A. La consommation électrique : une énergie d'avenir.

En 2016, d'après « le bilan énergétique nationale », la consommation électrique brésilienne s'élève à environ 133 TWh, soit 46% de la consommation totale d'énergie dans le secteur résidentiel.

La région Nordeste est la deuxième région plus consommatrice d'énergie électrique du Brésil, représentant 20.2% de la consommation totale. En 2016, environ 27 TWh ont été consommé au sein du secteur résidentiel, dont près de 7 TWh par l'Etat de Bahia.

<sup>4</sup> D'après l'agence internationale de l'énergie.

### 1. Une consommation électrique miroir de la situation économique du pays.

Le secteur résidentiel représente près de 22% de la consommation finale d'énergie électrique au Brésil, après l'industrie (46.7%). D'après la figure 8, la consommation finale d'énergie électrique est en constante augmentation jusqu'en 2013. Cependant aujourd'hui elle tend à diminuer. Pour comprendre cela, il est bon de lier l'évolution de la consommation d'électricité à celle de la société.

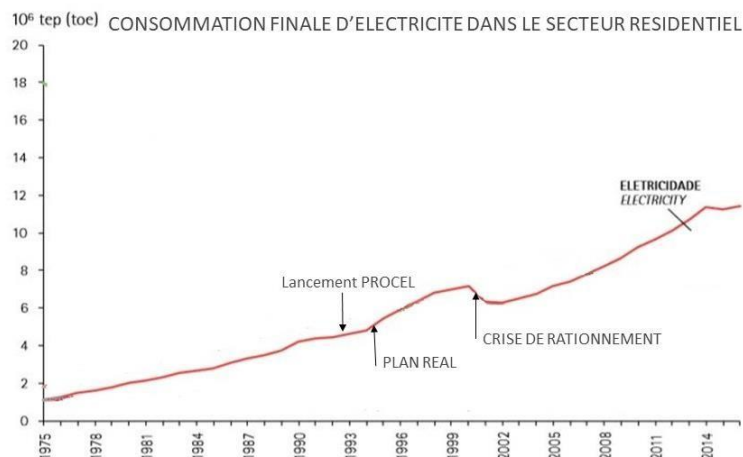


Figure 8: Consommation finale d'électricité dans le secteur résidentielle Source: BEN personnalisé, 2016

Entre le milieu des années 1980 et 1994 le Brésil a connu une faible croissance : il a subi de grandes hyperinflation où le pays enregistrait un taux d'inflation moyen d'environ 1 % par an. Les salaires n'ayant pas été réajustés, les familles ont perdu leur pouvoir d'achat, ce qui a limité leur consommation.

Dès 1993, PROCEL<sup>5</sup> a développé un programme national visant à « guider le consommateur dans l'acte d'achat, en lui indiquant des produits qui présentent les meilleurs niveaux d'efficacité énergétique dans chaque catégorie, permettant ainsi de réaliser des économies sur leur facture d'électricité. » Les équipements considérés efficaces, sont classés et labellisés avec l'étiquette « A ». Cependant, une grande partie de la population ne connaît pas ce processus. Dans un sondage mené par PROCEL en 2005, interrogeant plus de 10 000 consommateurs, plus de la moitié (53,2%) ont répondu ne pas connaître le label PROCEL. Dans le même sens, l'année suivante, en 1994, un plan économique est lancé : le Plan Real. Il favorise le crédit et la réduction de l'inflation. Il crée une augmentation des ventes d'appareils électroménagers. L'effet est immédiat : la consommation électrique dans les ménages augmente directement. A partir de ce moment, typique pour un pays émergent, le Brésil s'est développé très vite. Avec plus de pouvoir d'achat, les brésiliens peuvent se permettre plus de confort. Les nouvelles manières de vivre et de travailler font que, de plus en plus, ils font l'acquisition d'un ordinateur, d'équipements électriques... D'où l'impact direct sur la consommation électrique. La chute de la consommation en 2001, s'explique par la grande crise de rationnement de l'électricité. Provoquée par une importante sécheresse, la production d'électricité par les centrales hydroélectrique a été bloquée. Ainsi, entre le milieu de l'année et le début de 2002, le gouvernement fédéral a posé l'objectif de réduire la demande d'électricité de 20%.

<sup>5</sup> Programme National de Conservation de l'Energie Electrique

D'après la société de recherche sur l'énergie (EPE), la demande moyenne d'électricité résidentielle, était de 123 kWh/mois/domicile soit 14% de moins que l'année précédente. L'année suivante, il y a eu une réduction supplémentaire de 4%, au niveau minimum de 126 kWh/mois/domicile. C'est aussi en 2001, qu'une loi a mis en place des indices minimum d'efficacité énergétique pour les nouveaux appareils électroniques, afin de compléter le programme PROCEL. Ainsi, au cours des années, des produits moins énergivores, plus modernes, ont été vendus, et ont progressivement remplacé les équipements non efficaces dans les maisons. Cette loi a participé à réduire la demande.

Aujourd'hui la population brésilienne commence seulement à prendre conscience de l'enjeu du développement durable, mais elle n'en fait pas une priorité, loin de là.

Il est donc nécessaire de comprendre comment l'électricité est consommée par les ménages, afin que les solutions proposées dans notre deuxième partie soient adaptées à ce public.

## 2. L'électricité : une énergie consommée sans limite.

Pour nous, certaines habitudes, manière de vivre sont acquises depuis longtemps en faveur du respect de l'environnement. Ici, les brésiliens ne se soucient guère de cette problématique. Nous pouvons le voir par ce graphique qui nous expose la répartition générale des appareils électroménagers consommant de l'électricité.

### - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial na região

#### Nordeste

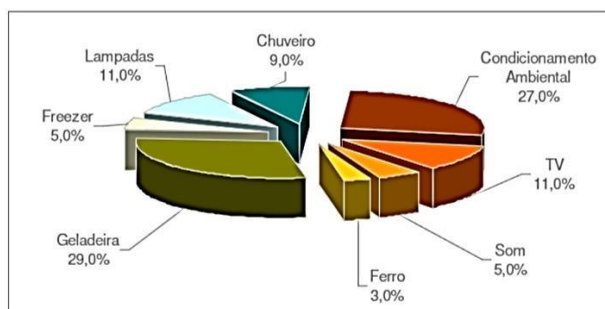


Figure 9: Répartitions des installations électriques dans la consommation résidentielle dans la région du Nord-Est. Source: . PROCEL, (Eletrobras). Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: classe residencial relatório Brasil- 2007

Dans la région de Bahia, le climat est semi-aride et les températures varient entre 22°C et 30°C toute l'année. De plus, par expérience, les brésiliens sont assez adeptes de la climatisation, et n'hésitent pas à la régler sur 16°C. Nous pouvons aussi les voir sortir leur frigo dehors, sur la terrasse, pour pouvoir avoir des bières, et tout ce qu'il faut pour un bon barbecue à portée de main.

Le programme Procel et Eletrobras ont publié en 2007 un rapport sur la possession d'équipements et les habitudes d'utilisation au sein du secteur résidentiel au Brésil<sup>6</sup>. Ainsi les informations suivantes résultent d'une collecte de données nationale auprès des habitants par le biais de 9 847 questionnaires très complet réparties dans 16 états et le district fédéral.

Nous pouvons donc observer que plus de 93.4% des ménages du Nord-Est possèdent au moins un réfrigérateur. Cependant, nous avons pu constater que les familles ne sont pas vraiment préoccupées par la consommation électrique de leurs appareils.

<sup>6</sup> PROCEL, (Eletrobras). Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: classe residencial relatório Brasil- 2007

La plupart des réfrigérateurs ont plus de 10 ans, et elles n'imaginent pas encore l'intérêt d'acheter un nouveau, plus efficace énergétiquement, ou ne connaissent le système des étiquettes d'efficacité énergétique.

Un autre point important dans cette consommation électrique est la douche. En effet, il s'agit donc de douches électriques. (Lorsque vous touchez le robinet de douche, il n'est pas rare de prendre une petite décharge). Aujourd'hui, 73% des ménages brésiliens disposent d'une douche électrique, ce qui représente 24% de l'électricité. Nous verrons avec la consommation du gaz que ces douches électriques ne sont vraiment pas la meilleure solution. D'autant plus qu'elles demandent une grande quantité d'énergie aux heures de pointes. Cela pose alors des problèmes au niveau de la production, du transport, et de la distribution d'énergie.

En vue de la date de ce rapport, il est bon de préciser que ces chiffres illustrent une tendance et non la situation actuelle.

L'utilisation de l'électricité a tendance à augmenter avec l'électrification des maisons. En effet, en 2010, l'utilisation de l'électricité captive représentait 30% de la demande totale d'énergie d'un ménage, soit 6% de plus que la part en 2005.

Cependant, on observe une stagnation de la consommation d'énergie pour des fins thermique, comme pour la cuisson où le chauffage de l'eau. En effet, cet usage utilise principalement du gaz.

## B. Le gaz : une énergie encore beaucoup consommée par les ménages.

Il existe aujourd'hui de nombreuses formes de gaz. Le secteur résidentiel utilise majoritairement du Gaz de pétrole liquéfié (GPL), comme nous le prouve le graphique ci-dessous. La région du Nord-Est est la deuxième plus grosse consommatrice de GPL, représentant 27% de la consommation finale de gaz du Brésil, derrière le Sud (42%).

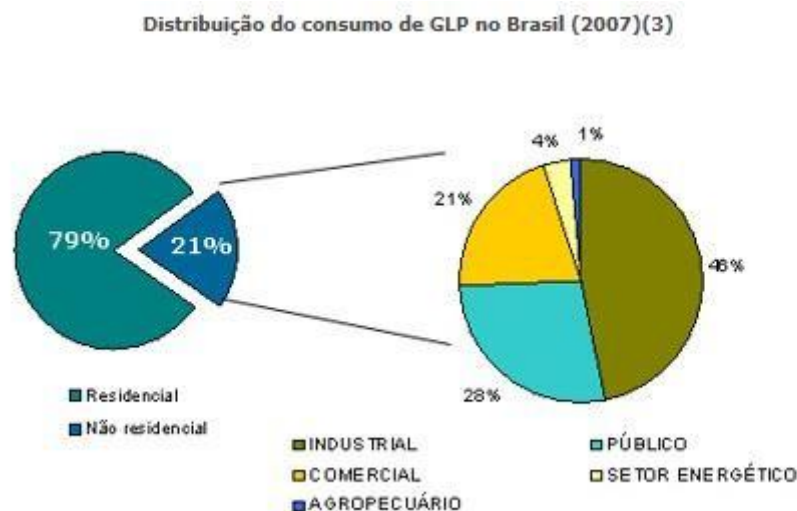


Figure 10: Distribution de la consommation de GPL au Brésil. Source: [www.liquigas.com.br](http://www.liquigas.com.br) -2007

En 2016, le Brésil a consommé plus de 76 TWh<sup>7</sup> de GPL, soit 26,5 % de la consommation totale d'énergie dans le secteur résidentiel. Le GPL, est un mélange d'hydrocarbures, principalement de propane et de butane. Il est stocké à l'état liquide et est issu du raffinage du pétrole pour 40% et du traitement du gaz naturel pour 60%. Il est connu sous le nom de gaz de cuisine et présente de nombreux avantages :



Figure 11: Avantages du Gaz de pétrole liquéfié (GPL). Source: Personnel

En plus de ne pas se détériorer pendant le stockage, son principal avantage est qu'il est facilement transportable, il peut donc être distribué dans les régions les plus reculées, rurales ou urbaines. Au Brésil, il couvre 100% du territoire et garantit l'approvisionnement de 95% des ménages.

#### 1. Le Gaz de Pétrole Liquéfié, un gaz utilisé pour cuisiner.

En 2016, le Nord-Est représente 27% de la consommation résidentiel du Brésil. Comme son surnom l'indique, le GPL est un gaz énormément utilisé dans la cuisine, pour la cuisson des aliments. En effet, en plus des avantages cités ci-dessus, il produit une flamme propre, et contrôlable et devient ainsi un gaz idéal pour cuisiner. Il permet aussi de chauffer l'eau. Il est même plus économique que l'électricité, et jusqu'à 25% moins cher.

Sans oublier bien sûr les barbecues. Comme nous avons pu le constater, le barbecue fait partie de la culture brésilienne. Nombreux sont les ménages qui en possèdent. Ainsi, ils utilisent les conteneurs à gaz, qui est bien mieux pour la santé que le charbon puisqu'il ne libère pas de particules nocives. De la même manière, il est courant de pouvoir manger des

« Acarajes » dans la rue. Ce plat typique nécessite de faire frire une pâte. Ainsi, les bahianaises transportent des bouteilles de gaz, et installent leur stand.

<sup>7</sup> BEN, 2006

## 2. Vers un avenir incertain...

Aujourd'hui, l'arrivée des équipements de cuissons électriques entraine évidemment une baisse de la consommation de GPL. Aussi, nous avons pu remarquer que les appartements consomment moins de GPL que les maisons. Ce fait est à prendre en compte surtout pour les années à venir. L'expansion des villes va augmenter la proportion de ménages logés dans des appartements, et ainsi réduire la consommation de gaz. De plus, le prix d'une bouteille de gaz pèse trop dans le budget des familles plus pauvres. Une bouteille classique de 13kg coûte en moyenne au Brésil 32Rls, soit 9.14% de salaire minimum ! Il serait alors judicieux d'ajuster ce prix au niveau de vie de la population surtout que la région du Nordeste concentre environ la moitié des familles pauvres du pays...

Le GPL est aujourd'hui sous-estimé. Il est vu comme une énergie « ancienne », alors qu'il peut s'avérer très utile pour la cogénération. (cf deuxième partie). Cependant, aujourd'hui il existe d'autres gaz plus en accord avec le développement durable et c'est pourquoi le gouvernement encourage davantage l'utilisation du gaz naturel.

### *Le gaz naturel*

Le gaz naturel est un combustible fossile, constitué d'un mélange d'hydrocarbure gazeux, dont 90 % de méthane. Il est considéré comme une source d'énergie plus propre que le charbon ou les produits pétroliers par exemple. En tant que nouvelle source d'énergie, le gaz naturel a ses inconvénients, en particulier la difficulté de transport du fait qu'il occupe plus de volume, même sous pression. Il n'est également pas facile à liquéfier. Il faut atteindre des températures de l'ordre de -160°C.

D'après l'agence de gaz, Bahiagas, leur nombre de clients résidentiels consommant du gaz naturel a augmenté de façon exponentielle. La société est passée de 1 934 clients en 2007 à plus de 60 000 clients sous contrat, dont plus de 50 000 consomment déjà de l'énergie. Cette évolution est le résultat d'une concentration des investissements dans le développement de ce secteur. Cependant, il a encore du mal à se développer, car il est difficile pour l'instant de fournir ce gaz dans les quartiers plus reculés. De plus, il est presque impossible pour l'instant d'assurer une alimentation ininterrompue et de stocker le gaz naturel.

A l'heure actuelle, il ne représente que 1,4% des énergies utilisées dans le secteur résidentiel. Son prix diminue avec la quantité consommée. Ainsi le consommateur est invité à calculer sa consommation de gaz pour comprendre dans quelle gamme il se situe, et ainsi définir quel est le plus rentable pour lui.

Bien que le gaz naturel soit présent au Nordeste, il est bien plus abondant dans d'autres régions du pays et ainsi plus développé. C'est pourquoi, dans ce rapport, nous n'allons pas nous attarder sur cette source d'énergie.

## C. Vers une disparition du bois de chauffage dans les ménages Brésiliens.

Le bois de chauffage vient compléter d'autres sources d'énergie. Avec 70 TWh consommés en 2016, le bois de chauffage représente 24.4% de la consommation totale d'énergie dans le secteur résidentiel. En effet, si l'on reprend la courbe de l'évolution des sources d'énergie pour le secteur résidentiel, le bois avait beaucoup de succès. Surtout en 2002, suite aux changements du système de subvention pour l'énergie, le prix du GPL a augmenté de 20% ! C'est pourquoi une partie de la population a opté pour le bois de chauffage au détriment du GPL.

Cette source d'énergie a longtemps été utilisée par les ménages pour la cuisine. Cependant, aujourd'hui, la consommation de GPL et de gaz naturel est plus importante que le bois. En effet, les poêles au bois de chauffage se font de plus en plus rares, laissant place à des plus modernes, nécessitant du GPL ou du gaz naturel, comme nous avons pu le constater dans ce chapitre. Le bois est encore utilisé dans les zones rurales, mais sa combustion est bien moins efficace.

En plus d'être un problème pour l'environnement en vue du nombre important d'arbres à couper, le bois de chauffage a un autre inconvénient. En effet, brûler du bois dans une maison ou un espace fermé provoque l'émission de CO2 et de particules nocives. L'inhalation de ces substances provoque des maladies pulmonaires comme la bronchite et la pneumonie.

Pour résumer :

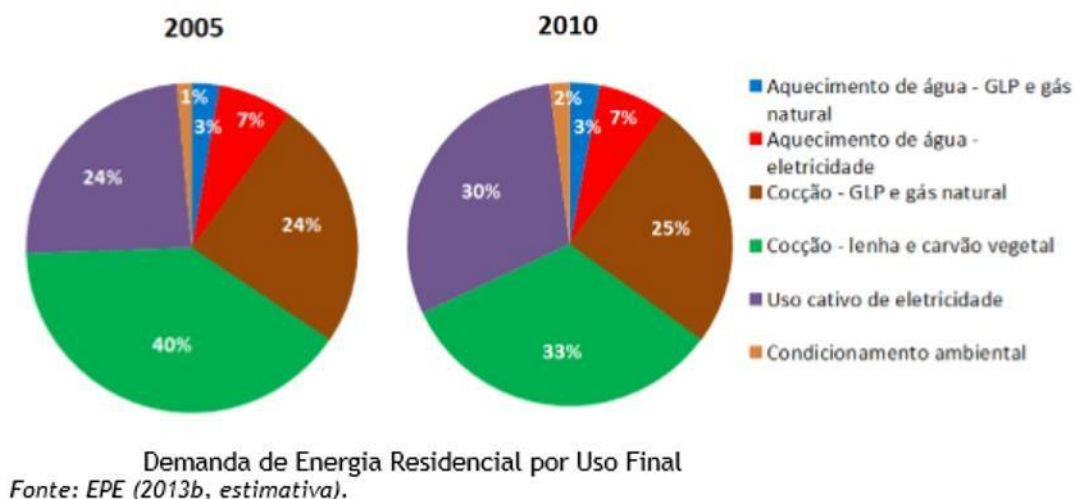


Figure 12: Demande d'énergie résidentielle par usage final. Source: EPE- 2013

En clair, chaque source d'énergie est associée à un ou plusieurs usages. La cuisine prend une grande part dans la consommation d'énergie. Elle utilise le bois mais aussi le gaz (GPL ou naturel). Le chauffage de l'eau est assuré en grande partie par l'électricité. Enfin, l'énergie électrique est dépensée dans les appareils électroménagers ainsi que dans les climatisations.

On peut aussi résumer les chiffres clés dans le tableau ci-dessous. Ce sont les données du Nordeste qui seront insérées dans notre toaster.

Consommation en 2016	Electrique	GPL	Bois de chauffage
Au Brésil	133 TWh	76 TWh	71 TWh
A NordEst	27 TWh	3 TWh	Abs de données

## D. Vers un avenir énergétique prometteur

Nous l'avons compris, le Brésil est une terre d'avenir pour la production d'énergie. Ces projets, et ceux que nous allons proposer par la suite doivent répondre aux nouveaux enjeux énergétiques mondiaux et surtout être efficaces sur le moyen et long terme. Pour cela il est bon de s'interroger sur les tendances futures de la population et la société brésilienne, afin d'être le plus cohérent possible.

Pour cela, l'EPE a publié un rapport proposant une projection de la demande électrique au Brésil sur une période de 10 ans (2016-2026). Le premier but étant de stimuler des subventions pour des études. Ils ont réalisé des analyses prospectives des facteurs socio-économiques et démographiques sur cette période. Même si leur méthode de travail est fiable, il ne s'agit que de tendance, et de projections. EPE de décharge de toutes responsabilités en cas de projets basés sur leurs résultats. [Pour de plus d'informations sur la méthode cf *Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017- 2026) – EPE*]

Ainsi, d'après ce rapport, dans le secteur résidentiel, le nombre de raccordements au réseau électrique dépend de variables démographiques, telles que la population, le nombre de ménages et le nombre d'habitants par ménage. C'est pourquoi, afin d'anticiper les tendances de la consommation d'énergie, il est nécessaire d'étudier les différents aspects de l'évolution démographique et leurs effets sociaux et économiques.

Dans les dix prochaines années, les prévisions estiment une augmentation de la population totale du Nordeste de 0.5% atteignant ainsi 59 millions d'habitants en 2026.

Le nombre de ménages est estimé à travers la relation habitant / domicile, dont l'évolution est obtenue dans les recensements de la population par l'IBGE. Il est alors prévu que le nombre de ménage augmente de 1,3% au Nordeste, en 2026. La consommation d'énergie va ainsi, elle aussi prendre de l'ampleur. La consommation électrique résidentielle au Brésil prévoit de s'accroître avec une expansion annuelle moyenne de 3,9% sur la période 2017- 2026. Cela peut être considéré comme l'effet combiné d'une croissance moyenne de 2,5% par an du nombre de consommateurs et la croissance moyenne de 1,4% par an de la consommation par consommateur résidentiel.

A l'échelle du Nordeste, la consommation électrique devrait augmenter d'environ 4,5% c'est-à-dire atteindre environ 37 TWh en 2026.

Cependant, la situation économique brésilienne est difficile, le chômage va continuer d'augmenter. Il va donc falloir une plus grande stabilité politique et économique afin de permettre l'augmentation des investissements et de la consommation. S'il en est ainsi, le PIB devrait augmenter en moyenne de 2% au cours des cinq prochaines années.

# Conclusion

Maintenant que nous avons vu les grandes tendances de production et de consommation résidentielle énergétiques au Brésil, il est temps de se concentrer sur comment améliorer la situation. Les enjeux du changement climatique impliquent de réfléchir à des modes de production d'énergies durables, mais aussi à des modes de consommations plus raisonnés. Le Brésil a déjà l'avantage de posséder une matrice énergétique relativement variée. Mais ce quasi-monopole de l'hydroélectricité ne sera bientôt plus viable, il est donc urgent de trouver des modes alternatifs. Nous avons vu qu'en ce qui concerne le Nordeste, il y a énormément de potentiel solaire et éolien.

Nous avons aussi vu dans la première partie qu'il existe une loi autorisant l'installation de mini (jusqu'à 1MW) ou micro (jusqu'à 100kW), installations de production d'énergie renouvelable. Cette loi a été mise en place par l'ANEEL (Agence Nationale de l'Energie Electrique) en 2012. Elle s'applique à tout habitant possédant un foyer de résidence. L'énergie produite utilisée directement par le consommateur. S'il y a un reste, il sera introduit dans le système de distribution et le consommateur recevra en échange des « crédits » permettant de réduire la consommation de l'énergie issue du système de production les mois suivants.

Cette loi va nous aider à proposer des solutions pour que l'énergie résidentielle soit plus durable et plus diversifiée.

Nous allons alors imaginer la mise en place d'équipements de production d'énergie au sein même des habitations et ainsi le potentiel que cela pourrait représenter. Nous obtiendrons une production d'énergie optimisée sur laquelle nous aurons fait des simulations en faisant varier plusieurs leviers.

# Méthodologie

Nos différentes recherches nous ont permis d'approfondir nos connaissances dans les énergies renouvelables et surtout sur la situation énergétique du Brésil.

Nos recherches personnelles nous ont amené au Laboratoire d'Energie et de Gaz de l'école Polytechnique à l'Université Fédérale de Bahia. Très bien accueillies, nous avons alors rencontré Pieter de Jong réalisant sa thèse sur « *Prévision, intégration et stockage de la production d'énergie renouvelable dans le Nord-Est du Brésil* ». En plus de nombreuses données, il nous a apporté son esprit scientifique dans le cadre d'un exercice comme celui-ci. Après plusieurs rendez-vous, il nous a aussi mises en relation avec d'autres scientifiques et théistes du laboratoire.

Nous avons ensuite complété ces données par l'analyse de plusieurs dossiers et d'études disponibles en ligne et dans les bibliothèques de l'université.

Nous avons lu tous les documents, pris des notes, traduits les articles de l'anglais ou du portugais. Le croisement et la synthèse de ces informations nous ont permis de cibler, de préciser notre sujet. Nous avons ainsi dégagé le « point manquant de la littérature » : ici, l'absence d'équipement individuel producteur d'énergies renouvelables.

C'est pourquoi, à partir de ce constat, nous avons retracé les types de production d'énergies renouvelables et l'analyse de la consommation résidentielle.

A partir de nos résultats il en a découlé de délimiter notre terrain d'étude à la région du Nordeste. En effet, travailler à l'échelle du Brésil représentait un espace trop grand, et se restreindre à l'étude de la ville de Salvador n'était pas possible par manque de données.

Notre travail a surtout consisté à récolter un maximum de données, en particulier numériques. Ce qui n'a pas été facile en vue du manque de fiabilité de certains résultats. En effet, des chiffres pouvaient varier d'une source à l'autre. Nous avons donc opté pour faire un ensemble théorique de références, et de trouver certains résultats par nos propres calculs.

Aujourd'hui nous avons assez de données pour continuer, et répondre à notre hypothèse qui est d'identifier le potentiel énergétique du Nordeste si l'on insère des productions d'énergies renouvelables directement à la source, c'est-à-dire au niveau des logements.

# Introduction

A l'issue de la partie précédente, nous avons compris la nécessité de diversifier la matrice énergétique renouvelable brésilienne, étant donné l'épuisement des ressources hydroélectriques et des enjeux mondiaux concernant le développement durable. A l'issue de nos études sur les potentiels des différentes sources renouvelables, nous avons pu conclure que les principales énergies renouvelables intéressantes d'un point de vue des ressources disponibles ainsi que de la viabilité appliquée aux infrastructures brésiennes sont l'éolien et le photovoltaïque.

D'après l'IBGE, 85.9% de la population totale brésilienne vit en milieu urbain, et l'énergie résidentielle représente 11.1% de la consommation énergétique de l'état fédéral. Ce secteur représente un enjeu de taille, où les mêmes techniques de valorisation énergétique et de diversification de la matrice peuvent s'appliquer sur un ensemble d'habitations répondant aux mêmes critères. Alors que pour les secteurs de l'industrie et du transport, la technique ou le procédé utilisé devra s'adapter chaque fois aux particularités de l'entité étudiée.

C'est pour cela que nous avons focalisé notre recherche sur le domaine résidentiel, l'objectif étant d'établir et d'évaluer les marges de manœuvre de la diversification énergétique. Pour ce faire, la première étape est de relever des catégories de logements, chacune avec des critères différents, pour ensuite étudier les marges de manœuvre et adapter des types d'installations renouvelables. En parallèle, nous construisons notre logigramme toaster à partir des critères ressortis et des types d'installations choisies. Etant donné que la première partie s'est portée sur les potentiels des énergies renouvelables dans la région Nordeste du Brésil, nous avons choisi d'axer notre seconde partie sur la ville de Salvador, dans l'Etat de Bahia. Troisième plus grande mégapole brésilienne, c'est aussi la plus grande ville du Nordeste, regroupant près de 3 millions d'habitants. Etant donné l'importance de la ville, nous avons l'assurance de voir représentés tous les types d'habitats existants au Brésil (à l'exception des logements isolés, mais qui représentent des exceptions minoritaires dans le pays, et qui auraient dû faire l'objet d'une étude à part entière).

Nous allons donc voir dans un premier temps la méthode pour effectuer une catégorisation de logements, pour ensuite s'intéresser aux différents types d'installations existants, et la pertinence de chacun selon les cas.

# Partie II

La première partie nous a donné beaucoup d'informations à l'échelle de Bahia. Désormais, nous voulons estimer les différentes sources de production d'énergie que l'on peut implanter dans la ville de Salvador. Pour cela nous allons tout d'abord étudier, et caractériser les logements existants à Salvador pour ensuite choisir des systèmes de production adaptés.

## I. Vers une catégorisation des types de logements

Avec ses presque 3 millions d'habitants, Salvador est la troisième plus grande ville du Brésil, sa première capitale historique, ainsi que la capitale actuelle de l'Etat de Bahia.

Comme toutes les villes du pays, plusieurs types d'habitations bien contrastés cohabitent ; allant du quartier de favelas auto-construites aux très luxueuses résidences dont la simple taxe de copropriété s'élève à plusieurs fois le salaire minimum local.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à la consommation énergétique résidentielle et à la production énergétique à la source.

**Nous avons donc besoin de connaître les différents types de logements et dans quelles proportions ils sont représentés dans la ville afin de pouvoir évaluer plus précisément la consommation.**

Il n'existe actuellement pas de recensement suffisamment précis et fiable faisant un état de l'habitat et de la situation énergétique résidentielle à Salvador. C'est pour cela que nous avons décidé d'étudier la population et son niveau de vie, afin d'arriver à une compréhension de l'habitat et des manières d'habiter. Dans cette partie, nous allons donc nous intéresser à la population et certaines de leurs caractéristiques nous permettant d'évaluer leur niveau de vie. Ensuite nous verrons les principaux types de logements pour enfin faire une évaluation de leur capacité énergétique.

### A. Catégorisation de la population de Salvador associées aux manières d'habiter

Alors que nous pensions initialement pouvoir disposer facilement des données sur les différents types ou catégories de logements, l'équivalent de l'INSEE, l'IBGE ne possède pas de documents fiables explicitant ces données recherchées. Nous avons adapté notre méthode selon les données mises à notre disposition. Pour cela, nous avons donc utilisé plusieurs indicateurs existants afin d'établir nous-mêmes notre propre catégorisation, en commençant par l'étude de la population. En effet, l'étude des caractéristiques de la population nous permet de mieux comprendre leur manière d'habiter.

Les caractéristiques choisies dans cette partie sont : la densité démographique, le salaire moyen mensuel du chef de ménage, le niveau d'infrastructure du quartier, le type d'habitation, ainsi que le statut du ménage vis-à-vis de leur logement (propriétaire, locataire ou attribué).

Les termes à définir ici sont :

- Logement particulier improvisé : Désigne un bâtiment inapproprié à l'habitation d'après la loi (car il ne possède pas les équipements essentiels) mais qui répond tout de même à cette fonction. Cette manière d'habiter se rapproche de la précarité, à la différence que le bâtiment a normalement eu un permis de construire, et se trouve donc référencé dans le cadastre.
- Logements précaires : Généralement auto-construits "à la sauvage", dans les parties les plus périphériques, ces logements ne possèdent pas ou peu d'infrastructures urbaines (approvisionnement et récolte des eaux et des déchets).

Il manque une part des données sur les logements. Cela concerne principalement les habitats précaires ou improvisés car le recensement est plus délicat. Toutefois, nous n'en tenons pas compte dans notre analyse, et nous n'en tiendrons pas compte dans nos calculs par la suite. Chaque donnée est comparée avec la moyenne de Salvador, ainsi qu'avec celle des autres quartiers correspondants, puis les

conclusions sont tirées. Le tableau d'analyse obtenu est fourni en annexe.

Grâce à ces quelques informations on observe déjà d'importants contrastes dans la ville, très caractéristiques des villes brésiliennes.

Ainsi on remarque trois quartiers types :

- Le quartier "aisé" : Quartier côtier abritant une population aux revenus moyens- hauts, un taux d'infrastructures urbaines très satisfaisant, une densité moyenne, les indices de développement humain les plus forts. Les habitants sont majoritairement propriétaires, beaucoup possèdent des logements mais n'y vivent pas de manière permanente et s'en servent comme résidence de vacances. C'est aussi le type de quartier pour lequel les informations sont les plus complètes.
- Le quartier "moyen" : Quartier derrière les quartiers côtiers, le niveau d'infrastructures urbaines et l'indice de développement humain sont satisfaisants. Une importante partie des logements ne sont pas permanents (résidence de vacances). Les habitants sont majoritairement propriétaires.
- Le quartier "moyen-pauvre" : quartier en périphérie de la ville. Une majorité est auto-construite, ce sont ce qu'on appelle les favelas. Le niveau d'infrastructures urbaines, le revenu mensuel moyen, et l'indice de développement humain sont généralement en-dessous de la moyenne municipale. C'est le quartier où les habitats précaire et improvisé sont les plus représentés. C'est le quartier où les informations sont les moins complètes.

## 1. Caractéristiques et méthodes

Pour notre étude nous allons donc conserver ces trois types de logements et en faire des catégories types.

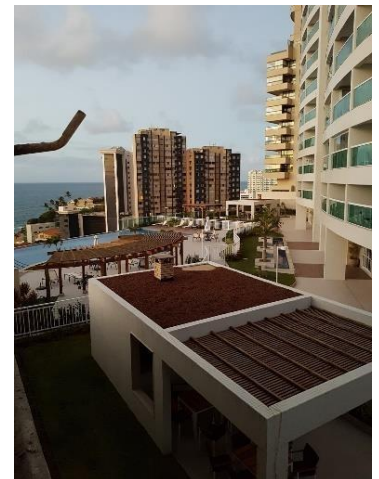
Ci-après les trois catégories principales de logements :

### **Catégorie 1 :**

Un logement "aisé" est un appartement dans un immeuble luxueux, où l'on peut trouver plusieurs services comme une salle de sport, une piscine...

Techniquement, l'appartement possède de grandes baies vitrées laissant entrer un maximum de lumière naturelle. L'immeuble mesure plus de 100m de haut, proche de l'océan.

Nous fixons aussi que les équipements d'une famille riche sont étiquetés PROCEL, la famille est consciente de sa consommation d'énergie, adopte une manière de vivre responsable, et fait attention à sa manière de consommer.



*Source : personnelle*



Source : *personnelle*

### **Catégorie 2 :**

Un logement “**intermédiaire**” est une maison, sur deux ou trois étages, constituée de plusieurs petites pièces.

Techniquement, il ne possède pas de grandes ouvertures, seulement une fenêtre par pièce. Les habitants ne se soucient que peu de leur manière de consommer et ne sont pas forcément équipé PROCEL.

### **Catégorie 3 :**

Un logement “**précaire**”, est comme nous l’avons dit, “sauvage”. L’espace est assez petit. Il ne possède presque pas d’ouverture vers l’extérieur. Les habitants récupèrent certains équipements de bases mais finalement ne consomment très peu.



Source : *brasilecola.com.br*

Maintenant que nous avons catégorisé trois types de logements, nous devons nous intéresser à leur consommation énergétique.

### **Répartition énergétique de la ville de Salvador :**

D’après l’Atlas Eolico de Bahia 2013, la consommation électrique de Salvador en 2010 est de 3719 GWh/an, soit **309,92 GWh/mois**. Cette valeur est la base de notre toaster. Elle est un repère quant à l’énergie électrique qu’il faut produire.

Pour les données suivantes, nous nous sommes fiées au Plan Directeur Municipal de l’Habitat de Salvador qui a principalement utilisé les résultats de l’Institut de la Vie Publique. Ainsi, le nombre d’habitants à Salvador sur la période 2010 - 2015, s’élève à **2 959 000 habitants**<sup>8</sup> et le nombre moyen de personnes par domicile est de **3,08**.

Nous pouvons donc déduire qu’en 2015, la ville de Salvador comptait **960 714 ménages**.

---

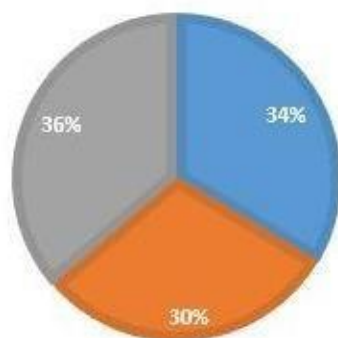
<sup>8</sup> Chiffres pris à la fin de la période

## Mise en lien avec les catégories d'habitations :

D'après le Plan Municipal de l'Habitat et nos conclusions précédentes, nous pouvons établir que :

### RÉPARTITION DES LOGEMENTS À SALVADOR PAR CATÉGORIE

■ Logement riche   ■ Logement intermédiaire   ■ Logement précaire



Source : personnelle, d'après le Plan Municipal de l'Habitat

Nous pouvons observer une répartition assez homogène des catégories de logements au sein de la ville.

Avec le nombre total de ménages et la proportion de chacun des logements, nous pouvons en déduire qu'il y a :

- **326 643 logements "aisés" à Salvador**
- **288 214 logements intermédiaires à Salvador**
- **345 857 logements précaires.**

Maintenant que nous avons les différentes catégories de logements ainsi que leurs proportions, nous pouvons nous intéresser à leurs consommations énergétiques.

## Méthode : Établir la consommation d'un logement

Dans un premier temps, nous avons cherché les méthodes existantes<sup>9</sup> pour établir la consommation énergétique d'un logement. Nous les avons adaptées à notre cas. Pour la majorité, elles consistaient à répertorier les équipements consommateurs d'électricité dans les logements, établir leur consommation en fonction de leur potentiel et leur temps d'utilisation pour finir par les sommer. Cependant, par manque de données, ou à cause de chiffres sans source, notre résultat n'était pas assez fiable.

De plus, peu d'études concernant la consommation énergétique par foyers ont été faites.

Nous avons donc cherché à mesurer la consommation énergétique de chaque catégorie d'habitation au moyen des méthodes existantes utilisables et de nos expériences et connaissances.

<sup>9</sup> METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA PARA O SETOR RESIDENCIAL: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA Maria Andrea Triana; Roberto Lamberts et Casa Eficiente\_ LABEEE\_ Florianópolis UFSC 2010

Pour le cas des logements “précaires”, des études<sup>10</sup> ont été faites, dans le but d’améliorer les conditions de vie des habitants. Grâce aux diagnostics de ces projets, nous savons que la consommation d’un logement précaire est d’environ 50 kWh/mois.

D’après nos connaissances personnelles, nous savons qu’un logement aisé paie environ 2600 R\$/an soit 216,67 R\$/mois. Cette valeur est variable, ainsi que le prix de l’énergie. Aujourd’hui le prix actuel de l’électricité à Salvador s’élevant à 0,443R\$/kWh, la famille consomme 489 kWh/mois.

Ayant le résultat final de la consommation de Salvador et un ordre d’idée des consommations pour les logements précaires et aisés, nous avons fait une estimation de la consommation par domicile intermédiaire. C’est-à-dire que nous avons jugé qu’à Salvador, nous habitons dans un logement intermédiaire. Nous avons obtenu deux valeurs de consommation. La première s’élève à 208 kWh/mois. Il s’agit de la consommation du mois de février 2018, pour un grand logement accueillant 6 personnes.

Nous obtenons donc l’équation suivante :

$$50 \cdot 345\,857 + x \cdot 288\,214 + 489 \cdot 326\,643 = 309\,920\,000$$

$$17\,292\,850 + x \cdot 288\,214 + 159\,728\,427 = 309\,920\,000$$

$$X = 461,11 \text{ kWh/mois}$$

Un logement « intermédiaire » consomme 461,11 kWh/mois

### **Résultats :**

**Un logement “aisé” consomme : 489 kWh/mois.**

**Un logement “intermédiaire” consomme : 461,11kWh/mois.**

**Un logement “pauvre” consomme 50 kWh/mois.**

Dans cette partie nous avons établi des profils de logements ainsi que les consommations énergétiques associées.

Maintenant, nous voulons étudier la possibilité d’implanter des productions d’énergies renouvelables décentralisées dans la ville.

Pour cela, nous allons nous baser sur l’ensemble des données obtenues au cours de ce travail, sur l’étude de la loi brésilienne donnant cette possibilité, ainsi que sur des simulations calculatoires.

## **II. Implanter des modes de production d’énergie**

### **A. La Norme de l’ANEEL**

L’idée dégagée dans la première partie est de produire de l’électricité pour le secteur résidentiel à partir d’énergie primaire renouvelable. En effet, l’Agence Nationale de l’Énergie Électrique, qui s’occupe de commercialiser l’énergie électrique conformément aux normes et directives du gouvernement fédéral, a mis en place en 2012 une nouvelle norme de production énergétique pour le secteur résidentiel. C’est le **système de compensation de l’énergie électrique**.

---

<sup>10</sup> - AVALIAÇÃO DA INSTALAÇÃO DE ABERTURAS EM HABITAÇÕES POPULARES DE SALVADOR VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA Ana Christina Romano Mascarenhas  
- PROJETO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CONJUNTO HABITACIONAL POPULAR CONDOMÍNIO RECANTO DAS ILHAS, BAIRRO DE SÃO MARCOS EM SALVADOR Íngara Lorena de Jesus Sousa 1

L'innovation réside dans le fait qu'il est désormais possible d'installer des centrales de production énergétique d'origines renouvelables directement sur les unités résidentielles. L'énergie produite est insérée dans le réseau local.

Nous allons dans cette partie décrire les paramètres encadrant cette norme (selon les dernières modifications datant de 2015), afin de mieux comprendre quelles seront nos marges de manœuvre par la suite.

- Pourquoi?

La production décentralisée d'énergie est, par définition, locale. Ainsi, le transport se trouve réduit, ce qui signifie une réduction des pertes ainsi que du coût d'utilisation et de la capacité des réseaux de transport.

La création de petites centrales de production permettra aussi de diversifier efficacement la matrice énergétique, puisque le type d'énergie produit va varier selon les cas.

- Quelles sources primaires?

C'est au consommateur de choisir quelle énergie primaire il va utiliser entre la biomasse, l'éolien et l'énergie solaire au moment de faire l'analyse coûts/bénéfices.

Avec sa source primaire, le consommateur peut décider de produire uniquement de l'électricité, ou de l'énergie électrique et thermique s'il choisit de faire de la cogénération.

- Quelles quantités?

Deux types de centrales peuvent être construits : les microcentrales et les minicentrales. La microcentrale a un potentiel inférieur ou égal à 75kW, tandis que la minicentrale a un potentiel compris entre 75kW et 5MW.

- Pour qui?

On désigne plusieurs types de consommateurs :

- La génération partagée : plusieurs consommateurs se réunissent à l'intérieur d'une même aire de concession ou de permission, au moyen d'un groupement ou d'une coopérative, composée de personnes physiques ou juridiques qui possèdent une unité de consommation avec une mini ou microcentrale dans un lieu différent des unités de consommations où l'énergie excédante sera compensée.
- Auto-consommateur lointain : les unités de consommation d'une même personne juridique ou physique possédant une unité de consommation avec mini/microcentrale n'étant pas localisée près des unités de consommation mais dans la même aire de concession/permission où l'énergie excédante sera compensée.
- Projet avec plusieurs unités de consommation (type résidence) : utilisation de l'énergie électrique de manière indépendante, où chaque fraction représente un usage individuel et donc une unité de consommation. Les installations communes représentent aussi une unité de consommation distincte. La responsabilité revient à la résidence et à l'administration ou le propriétaire du projet de micro/minicentrale.

- Comment?

Cette norme donne la liberté au consommateur de gérer sa propre énergie électrique à partir des sources renouvelables solaire, éolienne et biomasse ou de la cogénération qualifiée, et de donner l'excédent au réseau de distribution de sa zone.

Quand la quantité d'énergie injectée dans le réseau est supérieure à la quantité d'énergie consommée, le consommateur reçoit un crédit énergétique valide durant 60 mois. Il peut ensuite utiliser ce crédit pour réduire sa facture.

C'est le consommateur qui doit réaliser l'analyse coûts/bénéfices des centrales. Les facteurs sont le type d'énergie primaire utilisé, la technologie des équipements, la localisation, les tailles de l'unité de consommation et de la centrale.

Pour titulariser et légaliser la présence de centrales de production, est nécessaire le remplissage par le consommateur, et l'approbation par la compagnie gérant l'électricité dans la zone concernée, du formulaire de Sollicitation d'Accès.

Aussi, un système de mesure bidirectionnel doit être installé afin de mesurer la consommation et la production. Cette installation, ainsi que la maintenance sont obligatoirement prises en charge par la compagnie de distribution qui s'engage aussi à fournir les données à l'ANEEL.

Subventions:

- L'ICMS (Impôt sur la Circulation des Marchés et Services) est une taxe propre à chaque Etat qui s'applique pour l'électricité. Certains Etats sont adhérents au CONFAZ (Conseil National de politique Financière), ce qui implique que l'ICMS ne considérera pas l'énergie produite par la centrale, et le consommateur paiera l'impôt basé sur la quantité totale parvenant à l'unité de consommation. Pour les Etats non- adhérents au CONFAZ, l'impôt est calculé d'après la différence entre l'énergie consommée totale et l'énergie produite par la centrale.
- La loi n°13.169/2015 a fait passer l'impôt concernant l'énergie dans les établissements sociaux, à la seule différence entre l'énergie consommée et l'énergie produite dans les centrales. Cette loi est fédérale, elle est donc applicable dans tous les Etats.

Cette norme permet donc d'installer une petite centrale de production d'énergie renouvelable, sur des maisons privées ainsi que sur des résidences. L'installation implique le consommateur qui va décider quelle centrale et quel mode de production il souhaite, et la compagnie locale de distribution de l'électricité, qui va approuver la demande et financer le système de mesure. L'avantage pour le consommateur est qu'il ne paie plus que la différence entre l'énergie qu'il consomme et l'énergie qu'il produit. L'inconvénient majeur réside dans le fait que le projet doit être subventionné par le consommateur lui-même. Or des projets énergétiques comme ceux proposés par cette norme sont généralement chers, et ne sont donc pas accessibles à l'ensemble de la population. Cet argument s'applique d'autant plus au cas du Brésil, étant donné les énormes inégalités, et la proportion de la population vivant en-dessous du seuil de pauvreté.

Etant donné que le choix de l'énergie primaire revient au consommateur, nous allons maintenant analyser quels choix sont les plus judicieux selon les cas.

## 1. Choix des énergies primaires

### i) **Si on croise les résultats sur les logements et ceux de la première partie, quels types d'énergies sont préférables et pourquoi ?**

Maintenant que nous connaissons les conditions et spécificités de la Norme ANEEL, nous pouvons nous intéresser aux types de production d'énergie qu'il serait intéressant d'implanter.

Nous avons dégagé à l'issue de notre première partie que les énergies possédant les plus gros potentiels, tant d'un point de vue des ressources disponibles que de la faisabilité, sont l'éolien et le photovoltaïque. Pour cela, nous allons nous focaliser sur ces modes de production d'énergie.

### **Analyse du choix de l'énergie primaire éolienne :**

Nous avons vu précédemment que l'État du Nordeste, donc Salvador, est sur la trajectoire de vents dont les caractéristiques sont optimales pour l'exploiter au moyen d'éoliennes.

Caractéristique du vent à Salvador :

- Direction : Sud-Est
- Vitesse moyenne : 5m/s
- Probabilité d'occurrence du vent par jour : 40%

Nous allons ici étudier les différents types d'éoliennes ainsi que leurs caractéristiques, afin d'analyser la faisabilité.

Il existe des gammes d'éoliennes domestiques, conçues pour une production de proximité, d'une puissance moyenne (entre 100W et 30kW), et d'une hauteur de mât maximale de 12 mètres.

Le tableau suivant résume et analyse les principaux types d'éoliennes domestiques :

	Rendement	Relation au vent	Production	Prix	Bruit	Maintenance	Installation sur les bâtis
Verticale	++	Bonne adaptation aux changements de direction et de puissance des vents	max 10 kWh	++	++	++	Oui
Horizontale	+++	Peu résistante aux vents trop faibles et trop forts, faible adaptation aux changements de directions,	[2-20]kWh	+++	+++	+++	Non
De toit	+	Excellente adaptation aux changements de direction et de puissance des vents	[1,5-4]kWh	++	Faible	Faible	Oui

Source : personnelle 1

Nous souhaitons installer des éoliennes au niveau du bâti, sans gêner les habitants. Il apparaît donc que les éoliennes horizontales ne sont pas adaptées à ce projet.

Les deux autres types, les éoliennes verticales et les éoliennes de toit, doivent être judicieusement installées selon les types d'habitations.

**Pour les immeubles, il serait plus intéressant d'installer des éoliennes verticales.** En effet, les habitants ont un niveau de vie plus élevé, donc peuvent payer plus cher. Le rendement étant meilleur, le bruit ne gênera pas étant donné que les aérogénérateurs seront installés sur les toits, on ne les entendra donc pas d'en bas de l'édifice.

**Pour les habitats précaires, nous pensons plus judicieux les éoliennes de toit.** Plus petites, moins chères, plus discrètes, elles ont la meilleure capacité d'adaptation aux vents. C'est un élément important à considérer, puisque ces habitats ne sont généralement pas hauts (3 étages maximum). Cela signifie que le vent va être altéré par l'ensemble du bâti alentour. Mais ces éoliennes s'adaptent grâce à leurs caractéristiques que nous décrivons ci-dessous :

#### **La turbolienne Elena :**

Avantages : capacité d'adaptation plus importante, format plus adapté à une production de proximité (peut être posée sur le toit), rendement très satisfaisant du fait de sa technologie innovante (deux hélices qui tournent dans le sens opposé) qui fait qu'un vent de 6m/s va produire un flux d'air de 15m/s dans l'éolienne, et à l'inverse, si les vents sont trop forts, la turbolienne va freiner le flux d'air, rendant ainsi possible la production d'électricité quelle que soit la puissance du vent.

Potentiel : 1m de diamètre pour une puissance de 1,5kW, soit 13140 kWh/an.

#### **L'éolienne WT6500 Wind Turbine :**

Avantages : Idéale pour les vents faibles (donc les milieux urbains à faible hauteur), petite taille : moins de 2m de diamètre et coûte environ 7000 euros d'installation.

Potentiel : 1500 kWh/an.

## **Analyse du choix de l'énergie primaire solaire :**

Nous l'avons vu, le Nordeste possède les moyennes de radiations solaires les plus importantes du Brésil associées à un fort potentiel photovoltaïque.

Pour utiliser l'énergie solaire il existe deux types d'équipements : des panneaux photovoltaïques ou thermiques, selon si l'on souhaite de l'électricité ou de la chaleur. Ici, nous rappelons que nous ne nous concentrons que la production d'électricité.

### **Types d'équipements :**

Il existe plusieurs types de panneaux photovoltaïques.

Les principaux sont ceux composés de cellules en silicium monocristallin, qui ont un très bon rendement, de l'ordre de 12 à 20%, mais un coût élevé. Les panneaux qui présentent aujourd'hui le meilleur rapport qualité prix sont ceux composés de **cellules de silicium polycristallin**, qui possèdent un rendement de 11% à 15%.

D'après PROCEL, la surface des panneaux photovoltaïques varie entre 1m<sup>2</sup> et 2m<sup>2</sup> et peuvent produire entre 12 kWh/mois et 42 kWh/mois et sont, pour la plupart, polycristallins. Nos calculs vont établir une tendance, c'est pourquoi, il est plus judicieux de faire une moyenne.

Prenons donc une surface de panneau photovoltaïque égale à **1,5m<sup>2</sup>** et une production de **27 kWh/mois**.

### **Emplacement :**

Dans l'idéal, un panneau solaire doit être incliné de 30°. Ainsi soit le logement présente une pente de toit, soit il faudra ajouter un support pour poser le panneau.

Il existe aussi des panneaux solaires positionnés sur les façades des bâtiments mais cela n'est pas le plus efficace.

### **Pour quels types de logements ?**

Le logement "aisé" présente une grande surface libre sur les toits, idéale pour les équipements éoliens et solaires. En effet, les immeubles "aisés" sont bien plus hauts dans le paysage urbain. Ils ne se trouvent pas face à des obstacles qui sont susceptibles de gêner la production (ombre, ...).

Le logement intermédiaire peut avoir un toit plat comme un toit incliné. L'installation de panneaux solaires se prête mieux aux toits inclinés. Cependant il faudra faire attention à l'orientation, afin que le panneau soit un maximum ensoleillé.

Le logement précaire n'apparaît pas, dans un premier temps, comme idéal pour l'insertion d'énergies renouvelables. En effet, dans une favela les logements sont construits très proches les uns des autres. Mais ils sont généralement installés sur une colline, en périphérie de la ville, ce qui fait que les toits sont dégagés.

Il faudra tout de même prendre en compte que le toit est la plupart du temps en tôle. Aménager des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques dessus, nécessitera une solidification de ce dernier.

Finalement, ces résultats nous permettent de comprendre quels équipements sont plus adaptés à chaque catégorie de logement, et ainsi de réaliser plusieurs scénari à l'aide de notre toaster que nous détaillerons plus bas.

## ii) Etude d'exemples

Pour vérifier la faisabilité de notre étude, nous avons voulu étudier des cas déjà existants. Finalement nos catégories de logement s'articulent autour de logement individuel ou collectif. Nous avons cherché en priorité des cas brésiliens, mais nous n'en avons pas trouvé pour le cas des logements collectifs. Il ne semble d'ailleurs pas exister de projet complet quant à un logement collectif entièrement autonome. C'est pourquoi nous avons pris trois exemples dont on peut s'inspirer.

### ➤ Logement individuel

Nous allons nous intéresser à un exemple d'application de cette norme sur une maison brésilienne de Florianopolis. Cette maison a joué le rôle de laboratoire durant 2 ans, et a vu l'Université Fédérale de Santa Catarina, ELETROSUL et ELETROBRAS venir faire des expérimentations et des mesures d'efficacité énergétique.

Dans le cas de notre étude, nous allons uniquement nous focaliser sur l'utilisation d'énergie renouvelable pour produire de l'électricité.

Sur le toit de la maison, a été posé un ensemble de 30 panneaux solaires au potentiel nominal de 2,25kWp (75Wp pour chaque panneau). Il est relié au réseau électrique de la maison ainsi qu'au réseau de distribution local (de manière à ce que l'excédent soit envoyé dans le réseau électrique public).

### ➤ Logement collectif

Notre projet ne cherche pas à construire de nouveaux bâtiments mais plutôt à adapter ces derniers pour qu'ils soient autonomes.

Un projet à Arras a fait diminuer les charges des habitants en rendant les parties communes énergétiquement autonomes. La résidence est constituée de trois immeubles de 11 étages, construits en 1975. Le bailleur a alors déconnecté les parties communes du réseau EDF et a installé 9 panneaux solaires (de 240 Wc<sup>11</sup>), et 2 éoliennes (de 500Wc). L'énergie produite est stockée grâce à un bassin de rétention d'eau de 60 m<sup>3</sup> sur le toit et une turbine hydraulique de 450 Wc est installée en sous-sol. Les parties communes des 240 logements sont ainsi énergétiquement autonomes.



Source : <http://www.alec-grenoble.org/>

<sup>11</sup> Puissance maximale

Les bâtiments Green Office, qui sont pour la plupart des bâtiments de bureau, assurent une production d'énergie capable de compenser la consommation. Pour cela plusieurs techniques, plusieurs sources d'énergies complémentaires sont utilisées, et nous pouvons adapter certaines pour nos immeubles d'habitations.

Par exemple, il utilise l'énergie solaire pour produire de l'électricité. Les panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques sont installés sur la toiture, directement sur la façade, ou encore sur des abris de parking.

Les "Green Office" sont aussi équipés d'une chaudière à cogénération qui produit simultanément de la chaleur et de l'électricité. Comme expliqué dans la première partie de ce rapport, ce système de biomasse fonctionne par combustion de matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique.

Les solutions de production d'énergie classique paraissent donc adaptables à l'échelle d'un immeuble. Il n'existe pas encore beaucoup de projets à l'échelle de bâtiments collectifs. Seules des éoliennes tripales ont été intégrées entre deux tours du World Trade Center de Bahreïn, dans le royaume du golfe Persique.



*Source: ecosources.info*

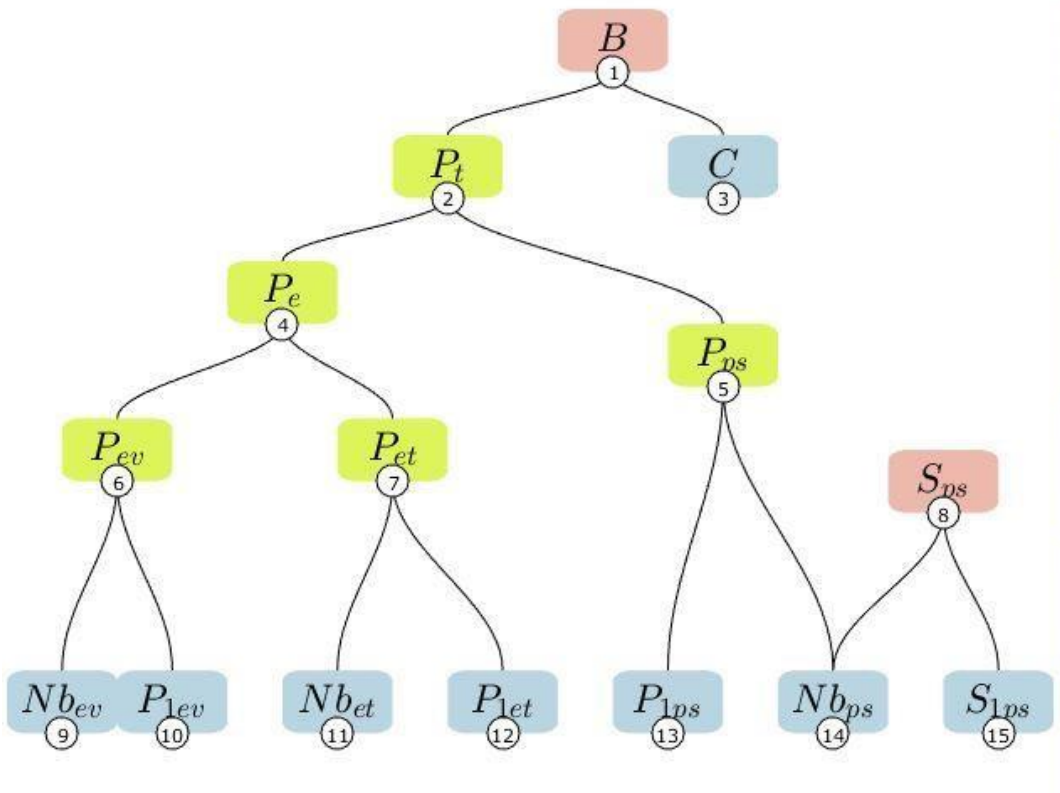
Ces éoliennes environ 30m de diamètre permettent de répondre de 10% à 15% à la consommation énergétique des deux bâtiments, en produisant plus de 1 000 MWh par an. Nous pouvons particulièrement nous inspirer de cette technique car, les tours sont situées face à la mer, et la forme des bâtiments forme comme un gouffre pour le vent.

## B. Simulations et calculs des équipements nécessaires pour répondre à un besoin énergétique

Maintenant que nous savons la production d'une éolienne et d'un panneau solaire, nous pouvons estimer le nombre moyen de ces équipements nécessaires pour répondre aux besoins de la population dans le cas de plusieurs scénarios :

- Scénario 1 : Répondre entièrement à la consommation électrique de Salvador
- Scénario 2 : Répondre à 75% de la consommation électrique de Salvador
- Scénario 3 : Répondre à 50% de la consommation électrique de Salvador
- Scénario 4 : Répondre à 25% de la consommation électrique de Salvador
- Scénario 5 : Tous les logements aisés sont équipés.
- Scénario 6 : Tous les logements intermédiaires et pauvres sont équipés.

Pour cela, nous avons créé le système de calcul Toaster suivant qui nous permet de faire varier les valeurs (nombre d'éolienne et nombre de panneaux solaire) afin de répondre à nos différents objectifs.



Dans tous les scénarios nous allons garder en tête qu'il est stratégique d'avoir plus de panneaux solaires, car contrairement aux éoliennes, ils ne produisent pas de nuisances sonores et sont plus faciles à la maintenance.

Nous rappelons aussi que les éoliennes verticales sont plus adaptées aux logements "aisés" et celles de toits pour les habitats "précaires"

En rentrant cette valeur dans "C, notre objectif sera rempli si  $B=C-P=0$ .

Scénario 1 :

La consommation totale de Salvador est de **309,92 GWh/mois**.

Pour ce scénario, on garde l'idée d'avoir plus de panneaux solaires, et autant d'éoliennes verticales que de toits.

Ainsi, nous trouvons que pour subvenir au besoin électrique d'une ville telle que Salvador, nous avons besoin de :

- 28 480 éoliennes de toits
- 28 480 éoliennes verticales
- 3 200 000 panneaux solaires soit 4 800 km<sup>2</sup> de surface.

Il est certain que ces chiffres sont énormes. En effet il faut rappeler que nous parlons de répondre aux besoins d'une ville de 3 millions d'habitants, ce qui n'a jamais été fait.

Scénario 2 : Répondre à 75% de la consommation électrique de Salvador Cela revient à répondre à un besoin de **232,44 GWh/mois**.

On obtient alors :

- 22750 éoliennes de toits
- 22750 éoliennes verticales
- 2 000 000 panneaux solaires soit 3 000km<sup>2</sup> de surface.

Scénario 3 : Répondre à 50% de la consommation électrique de Salvador Cela revient à répondre à un besoin de **154,96 GWh/mois**.

On obtient alors :

- 16310 éoliennes de toits
- 16310 éoliennes verticales
- 1 000 000 panneaux solaires soit 1 500km<sup>2</sup> de surface.

Scénario 4 : Répondre à 25% de la consommation électrique de Salvador Cela revient à répondre à un besoin de **77,48 GWh/mois**.

On obtient alors :

- 8840 éoliennes de toits
- 8840 éoliennes verticales
- 300 000 panneaux solaires soit 450 km<sup>2</sup> de surface.

Scénario 5 : Tous les logements aisés sont équipés.

Sachant qu'un "logement aisé" consomme 489 kWh/mois, et qu'il y en a environ 326 643 Cela revient à répondre à un besoin de **159,72 GWh/mois**. Il faut aussi prendre en compte que qu'il faudra privilégier les panneaux solaires et les éoliennes verticales.

On obtient alors :

- 10 310 éoliennes de toits
- 22 310 éoliennes verticales
- 1 000 000 panneaux solaires soit 1500 km<sup>2</sup> de surface.

Scénario 6 : Tous les logements intermédiaires et précaires sont équipés. Sachant qu'un "logement intermédiaire" consomme 461,11 kWh/mois, et qu'il y en a environ 288 214 et qu'il y a environ 345 857 logements précaires qui consomment chacun 50 kWh/mois, cela revient à répondre à un besoin de **150,19 GWh/mois**. Il faut aussi prendre en compte que qu'il faudra privilégier les panneaux solaires et les éoliennes de toit.

On obtient alors:

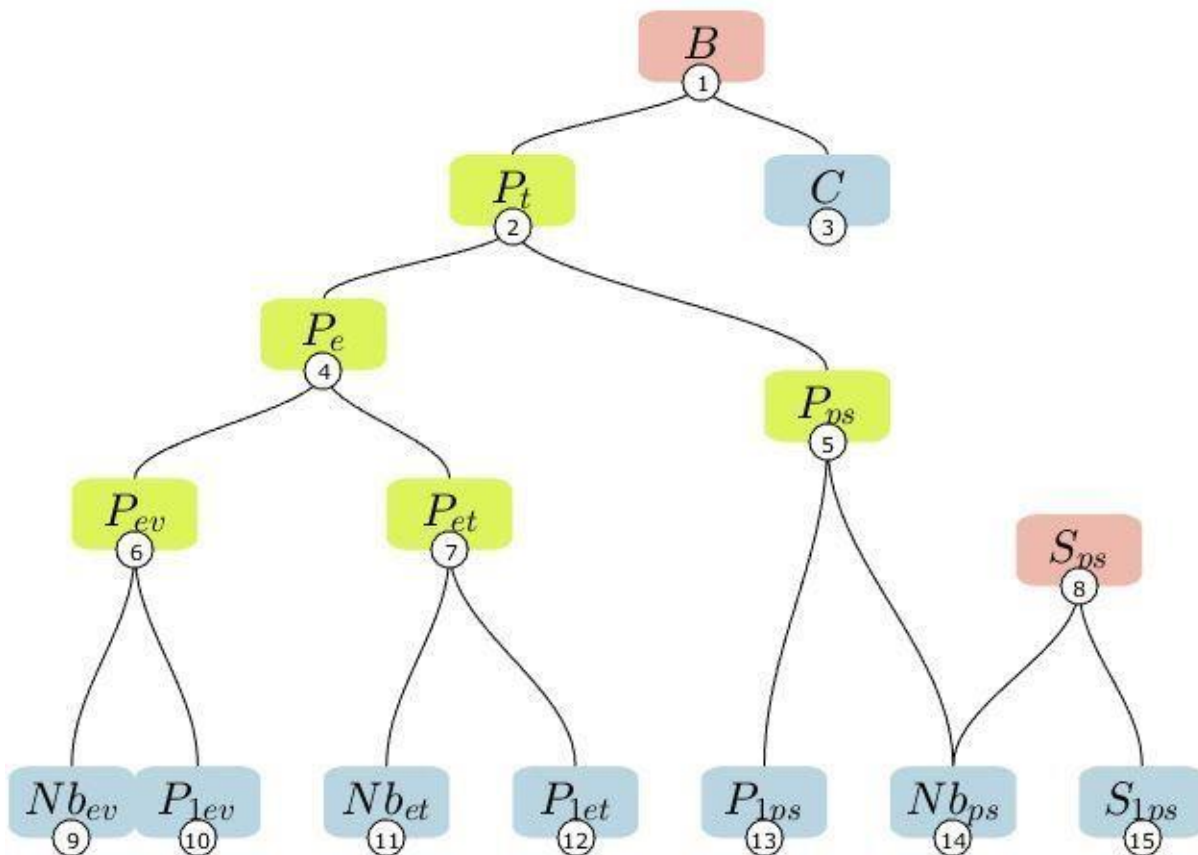
- 17 310 éoliennes de toits
- 6 310 éoliennes verticales
- 1 000 000 panneaux solaires soit 1500 km<sup>2</sup> de surface.

Ces résultats donnent un aperçu de la quantité de panneaux solaires et d'éoliennes nécessaires. Par manque de données nous n'avons pas pu traiter ces cas avec de chiffres parfaitement correctes, mais nous avons réussi à établir une logique qui permettra où il suffit d'introduire les bonnes valeurs.

Les résultats à l'échelle de Salvador peuvent paraître démesurés mais il est important de rappeler que nous parlons d'une ville de 3 millions d'habitants et aujourd'hui, un tel projet à cette échelle n'a jamais vu le jour.

Au contraire, répondre déjà à 25% de la demande semble raisonnable et réaliste.

Détails Toaster :



Ce toaster a pour but de nous donner le nombre d'éoliennes verticales et de toit, et le nombre de panneaux photovoltaïques.

L'avantage de ce système est qu'il s'adapte aux différents scénari : nous entrons la consommation totale d'électricité à laquelle nous voulons répondre; ce qui équivaut à la valeur de la production attendue. Toaster nous permet alors de faire varier le nombre d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques jusqu'à obtenir B=0.

Enfin, il est plus judicieux de parler de surface que de nombre de panneaux solaires C'est pourquoi, en obtenant le nombre de panneaux, et ayant la surface d'un panneau il est facile de conclure.

<p>B : Bilan en kWh/mois</p> <p>1 <math>B = C - P_t</math></p>	<p><math>S_{ps}</math> : Surface de panneaux solaires en m<sup>2</sup></p> <p>8 <math>S_{ps} = Nb_{ps} \cdot S_{1ps}</math></p>
<p><math>P_t</math> : Production totale d'électricité en kWh/mois</p> <p>2 <math>P_t = P_e + P_{ps}</math></p>	<p><math>Nb_{ev}</math> : Nombre eoliennes verticales en eoliennes verticales</p> <p>9 <math>0 \leq Nb_{ev} \leq 10000000</math></p>
<p>C : Consommation totale à Salvador en kWh/mois</p> <p>3 <math>C = 309920000</math></p>	<p><math>P_{1ev}</math> : Production d'une eolienne verticale en kWh/mois</p> <p>10 <math>P_{1ev} = 5840</math></p>
<p><math>P_e</math> : Production eolienne en unité kWh/mois</p> <p>4 <math>P_e = P_{ev} + P_{et}</math></p>	<p><math>Nb_{et}</math> : Nombre eoliennes toit en eoliennes toit</p> <p>11 <math>0 \leq Nb_{et} \leq 100000000</math></p>
<p><math>P_{ps}</math> : Production panneaux solaires en kWh/mois</p> <p>5 <math>P_{ps} = Nb_{ps} \cdot P_{1ps}</math></p>	<p><math>P_{1et}</math> : Production d'une eolienne toit en kWh/mois</p> <p>12 <math>P_{1et} = 2007.5</math></p>
<p><math>P_{ev}</math> : Production eoliennes verticales en kWh/mois</p> <p>6 <math>P_{ev} = Nb_{ev} \cdot P_{1ev}</math></p>	<p><math>P_{1ps}</math> : Production d'un panneau solaire en kWh/mois</p> <p>13 <math>P_{1ps} = 27</math></p>
<p><math>P_{et}</math> : Production eoliennes toit en kWh/mois</p> <p>7 <math>P_{et} = Nb_{et} \cdot P_{1et}</math></p>	<p><math>Nb_{ps}</math> : Nombre de panneaux solaires en panneaux solaires</p> <p>14 <math>0 \leq Nb_{ps} \leq 10000000</math></p>
<p><math>S_{1ps}</math> : Surface d'un panneau solaire en m<sup>2</sup></p> <p>15 <math>S_{1ps} = 1.5</math></p>	

# Conclusion :

Notre première partie s'est concentrée sur l'étude territoriale des différents potentiels d'énergie renouvelables, en termes des ressources disponibles et de législation. Nous avons dégagé que les énergies les plus pertinentes dans l'immédiat sont le solaire et l'éolien. Mais notre recherche s'est aussi intéressée à la consommation énergétique résidentielle, et nous a permis de comprendre ses spécificités (utilisation du gaz, des douches électriques, de l'équipement). C'est en étudiant la législation que nous avons découvert l'existence d'un arrêté incitatif à l'installation de centrales de production énergétiques décentralisées, directement installées au niveau de la source de consommation.

Notre seconde partie avait pour objectif d'établir des catégories de logements et d'étudier les différentes technologies existantes pour les énergies éolienne et photovoltaïque. Cela nous a ensuite permis d'établir des situations où nous appliquons telle technologie pour tel logement.

Ainsi les résultats sont les suivants :

Logements aisés : éoliennes verticales et panneaux photovoltaïques

Logements précaires: éoliennes de toit uniquement

Logements intermédiaires: éoliennes verticales ou de toit, panneaux photovoltaïques si le toit est incliné, et pas et ne reçoit pas d'ombre dû à la présence d'autres logements plus hauts.

En parallèle de nos recherches, nous avons pu compléter le logigramme établi dans la première partie. Une fois rempli, nous avons établi différents scénarios, chacun demandant un pourcentage de la consommation énergétique compensé par la production renouvelable résidentielle. Par exemple, pour répondre à 75% de la consommation totale de la ville, ce qui correspond à une demande de 232.44GWh/mois, il faut 22750 éoliennes de toit, 22750 éoliennes verticales ainsi que 3000km<sup>2</sup> de panneaux solaires. L'ensemble de nos résultats peuvent paraître pharamineux, il faut toutefois se rappeler que Salvador regroupe une population 3 fois supérieure à celle de Paris.

Notre principal obstacle durant tout cet exercice de recherche a été la difficulté d'obtenir des données exactes. En effet, selon les sources officielles (IBGE, ANEEL, sites gouvernementaux, etc...) les chiffres varient. D'autant plus que pour ce qui concerne la catégorisation de l'habitat, le Brésil possède un taux important de logements dits « sauvages » qu'il est donc difficile de recenser. Nous avons fait face à ces obstacles en adaptant nos méthodes. Et là où les données devaient nous apporter des réponses, notre exercice s'est transformé en exercice méthodologique pour obtenir ces données. Cela n'en reste pas moins très intéressant, et enrichissant car nous avons pu mesurer en partie la difficulté d'organisation du pays, ainsi que les inégalités internes demeurant.

Nous trouvons aussi essentiel de nuancer nos résultats ainsi que la faisabilité des installations précitées. Il nous aurait fallu des plans de la ville plus précis que ceux que nous avons trouvé, ainsi qu'une connaissance des zones périphériques (là où se trouvent la majorité des logements « sauvages ») pour pouvoir établir les capacités d'installations de chacune des technologies présentées. De même qu'il faudrait que l'Etat apporte d'importantes aides financières pour permettre l'installation de ces centrales de production sur les logements intermédiaire et précaire. Pour l'instant, seuls les logements les plus riches peuvent bénéficier de l'arrêté de l'ANEEL. Or cela soulève une autre question, plutôt éthique. En effet, cette installation permet à la fois de diversifier la matrice énergétique, mais aussi de faire des économies sur l'énergie sur le long terme. Or ne faudrait-il pas aider les moins aisés à économiser un argent déjà rare ?

# Bibliographie :

## Ouvrages électroniques:

- Adriano Loureiro (Sindicatos), Aurélio Ferreira (Sindicatos) Edmilson Moutinho dos Santos(IEE-USP) Felipe de A.Sgarbi(IEE-USP). Determinantes do Consumo Residencial de Gas LP: Analises Regionais. 2015 [Octobre-December 2017]
- ANEEL Cadernos Temáticos ANEEL Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica [en ligne] Mars 2016  
[www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigerao+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161](http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigerao+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161)
- Camargo-Schubert Engenheiros Eolica. Atlas eólico: Bahia. Bresil: Editora Grafica Burti, 2013.  
[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlaseolicobahia2013.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlaseolicobahia2013.pdf)
- CONDER-CompanhiadeDesenvolvimento UrbanodoEstadodaBahia. Painel de Informações Dados Socioeconômicos do Município de Salvador por Bairros e Prefeituras-Bairro. Salvador. [en ligne] Août 2016. [Mars 2018] [http://www.informs.conder.ba.gov.br/wp-content/uploads/2016/10/1\\_INFORMS\\_Painel\\_de\\_Informacoes\\_2016.pdf](http://www.informs.conder.ba.gov.br/wp-content/uploads/2016/10/1_INFORMS_Painel_de_Informacoes_2016.pdf)
- EPE: Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017- 2026). Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia,2017 [Janvier 2018]
- Ministério das Cidades (Secretaria Nacional de Habitação). Plano Nacional de Habitação. [en ligne] Décembre 2009. [Mars 2018]
- Ministério de Minas e Energia. Consumo Residencial de Energia Elétrica na Regiao Nordeste. Rio de Janeiro: Ministerio de minas e Energia, 2008.[Octobre-Décembre 2017]
- Ministério de Minas e Energia. Anuario Estatístico de Energia electrica 2016. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia,2016.[Octobre-Décembre 2017]
- Ministério de Minas e Energia: Balanço Energético Nacional. Brasilia : EPE : Empresa de Pesquisa Energética 2017.
- Ministério de Minas e Energia Consumo de Energia no Brasil: Analises Setoriais. Rio de Janeiro, 2014 [Octobre-December 2017].
- Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão Instituto Brasileiro de Geografiae Estatística – IBGE . Censo Demográfico 2010 : Resultados Preliminares do Universo Conceitos e Definições – Tabelas Adicionais. Rio de Janeiro, 2011. [Mars 2018].
- Préfecture municipale de Salvador. “ Plano Municipal de Habitação deSalvador 2008-2025”. [en ligne] Janvier 2008 [Mars 2018]  
[https://issuu.com/cidadeaberta/docs/sehab\\_plano\\_municipal\\_de\\_habitacao\\_](https://issuu.com/cidadeaberta/docs/sehab_plano_municipal_de_habitacao_)
- PROCEL, (Eletrobras). Avaliação do mercado de eficiencia energética no Brasil: classe residencial relatorio Brasil. Rio de Janeiro: Grafica da ELETROBRAS, 2007 [Octobre-December 2017]
- Roberto Lamberts, EneDir Ghisi, Claudia Donald Pereira, Julianan Oliverira Batista. Casa eficiente: Consumo e geração de Energia.Florianopolis UFSC 2010. [Octobre- Décembre 2017]

- UFSC LabEEE. Casa eficiente : consumo e geração de energia. Florianópolis, Roberto Lamberts, 2010. [Mars 2018]

## Thèse:

- Alexandre UHLIG. Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo. Thèse : Universidade de Sao Paulo, 2008.  
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-14052008-113901/pt-br.php>
- Pieter de Jong. Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil. Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil. Thèse : Universidade Federal da Bahia-UFBA Escola Politecnica 2017 [www.pei.ufba.br/site/upload/Tese/DE%20JONG%2C%20Pieter%20-%20Forecasting%2C%20integration%2C%20and%20storage%20of%20renewable%20energy%20generation%20in%20the%20Northeast%20of%20Brazil.pdf](http://www.pei.ufba.br/site/upload/Tese/DE%20JONG%2C%20Pieter%20-%20Forecasting%2C%20integration%2C%20and%20storage%20of%20renewable%20energy%20generation%20in%20the%20Northeast%20of%20Brazil.pdf)
- Lucena A F P, Szklo A S, Schaeffer R, Dutra R M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. Renewable Energy 2010; 35: 904-12. Marengo, J A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI / José A. Marengo – Brasília: MMA - Ministério do Meio Ambiente 2007. 2a edição. Available at:  
[http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod\\_probio/Livro2\\_completo.pdf](http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Livro2_completo.pdf)

## Sites web

- [aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br/) [Octobre-Décembre 2017] <http://www.aneel.gov.br/>
- [actu-environnement.com](https://www.actu-environnement.com) [Janvier 2018] <https://www.actu-environnement.com>
- [Epe.gov.br](http://www.epe.gov.br/pt) [Octobre – Décembre 2017] <http://www.epe.gov.br/pt>
- Ecosources [Mars 2018] Disponibilité et accès [https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne\\_urbaine\\_batiment](https://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_urbaine_batiment)
- Electronique mag. [Mars 2018]. Disponibilité et accès <http://www.electronique-mag.com/article3891.html>
- Eolienne particulier. [Mars 2018] Disponibilité et accès <https://www.eolienne-particulier.info/eolienne-de-toit/>
- Green Office [Mars 2018] Disponibilité et accès <http://www.green-office.fr/fr/comment-ca-marche/production-d-energies-renouvelables>
- IBGE [Mars 2018] Disponibilité et accès [https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados\\_preliminares/tabelas\\_adicionais.pdf](https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_preliminares/tabelas_adicionais.pdf)
- Panneaux solaires [ Mars 2018]. Disponibilité et accès <http://www.panneaux-solaires-france.com/les-differents-panneaux-solaires>
- Quelleenergie. [ Mars 2018] Disponibilité et accès <https://www.quelleenergie.fr>
- Researchgate.net [Octobre – Décembre 2017] [https://www.researchgate.net/publication/257548394\\_Solar\\_and\\_wind\\_energy\\_production\\_in\\_relation\\_to\\_the\\_electricity\\_load\\_curve\\_and\\_hydroelectricity\\_in\\_the\\_northeast\\_region\\_of\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/257548394_Solar_and_wind_energy_production_in_relation_to_the_electricity_load_curve_and_hydroelectricity_in_the_northeast_region_of_Brazil)

- Webarcondicionado [Mars 2018] Disponibilité et accès  
<http://www.webarcondicionado.com.br/tarifa-de-energia-eletrica-kwh-valores-e-ranking-cidades>
- Windfinder [Mars 2018]. Disponibilité et accès.<https://pt.windfinder.com/windstatistics/salvador>

## **Articles:**

- E.L- Le Moniteur “ Les parties communes d’un HLM rendues énergétiquement autonomes”. Le Moniteur “Bâtiment” 2012 Mis à jour 2013.[Mars 2018].  
<https://www.lemoniteur.fr/article/les-parties-communes-d-un-hlm-rendues-energetiquement-autonomes-19569393>

# Table des illustrations

Figure 1: Répartition des sources d'électricité du Nord-Est Source: ONS, 2017.....	12
Figure 2: Puissance produite par une éolienne selon la vitesse du vent. Source: WIKIEOLIENNE, Etude théorique d'une éolienne, 2017. <a href="https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique">https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique</a> (Consulté en novembre 2017).....	15
Figure 3: Débits d'un affluent du fleuve Sao Francisco. Source: Forecasting, integration, and storage of renewable energy generation in the Northeast of Brazil-Pieter de Jong- 2017.....	16
Figure 4 : Répartition des radiations en Wh/m <sup>2</sup> -jour. Source: Atlas Energia Solar –ANEEL-2003 .	17
Figure 5 : Consommation finale d'énergie par source. Source: BEN, 2006.....	19
Figure 6 : Consommation d'énergie par secteur. Source : BEN, 2006.....	19
Figure 7 : Consommation résidentielle finale par source d'énergie. Source: BEN, 2016 .....	20
Figure 8: Consommation finale d'électricité dans le secteur résidentielle Source: BEN personnalisé, 2016.....	21
Figure 9: Répartitions des installations électriques dans la consommation résidentielle dans la région du Nord-Est. Source: . PROCEL, (Eletrobras). Avaliação do mercado de eficiencia energética no Brasil: classe residencial relatório Brasil- 2007 .....	22
Figure 10: Distribution de la consommation de GPL au Brésil. Source: <a href="http://www.liquigas.com.br">www.liquigas.com.br</a> -2007 .....	23
Figure 11: Avantages du Gaz de pétrole liquéfié (GPL). Source: Personnel .....	24
Figure 12: Demande d'énergie résidentielle par usage final. Source: EPE- 2013 .....	26

# Annexes:

Quartier	Densité (hab/ha)	Nombre d'habitants en 2010	Salarié moyen mensuel en 2010 (R\$)	Type d'habitations			Mode d'habitation			Infrastructures urbaines			Indice de Développement humain
				Particuliers permanents	Particuliers improvisés	Précaires	Propriétaire	Locataire	Attribué	Approvisionnement en eau	Récolte eaux usées	Collecte déchets	
Centro - Brotas	160,64	287088	2710	33,21	0,07	0,45	72%	24,50%	3%	99,39	97,56	98,26	0,7925
Subúrbio/Ilhas	102	283415	906	30,48	0,04	17,57	82,50%	13,50%	3%	98,13	85,12	94,6	0,7366
Cajazeiras	89,36	198005	1142	48,15	0,06	9,06	81,50%	15%	3%	99,09	78,12	96,23	0,6968
Itapuã/Ipitanga	36,26	340450	2998	25,38	0,03	8,39	75,00%	22%	3%	97,73	87,6	97,68	0,7676
Cidade Baixa	222,58	180432	1604	52,83	0,12	8,61	76%	20%	3,60%	99,3	96,15	97,13	0,7385
Barra/Pituba	155,73	316616	2998	27,29	0,01	9,42	76,50%	21%	2,50%	99,45	98,68	98,61	0,8135
Liberdade/São Caetano	265,64	384095	1185	24,82	0,03	8,18	75%	21%	3%	99,29	95,86	95,9	0,7521
Cabula/Tancredo Neves	145,38	374013	1394	23,10	0,02	14,04	77%	20%	3%	99,21	94,85	95,78	0,77
Pau da Lima	92,84	184795	1414	51,59	0,02	13,90	79%	18%	3%	99,07	77,18	95,11	0,7663
Valéria	32,25	81747	844	30,16	0,01	6,09	81%	13,50%	3%	96,04	66,86	94,71	0,6793
<b>Salvador</b>	<b>88,14</b>	<b>2675656</b>	<b>1452</b>	<b>32,10</b>	<b>0,06</b>	<b>10,32</b>	<b>75,17%</b>	<b>21,50%</b>	<b>3%</b>	<b>98,88</b>	<b>90,79</b>	<b>96,64</b>	<b>0,75132</b>

## Loi ANEEL:

L'ANEEL, Agence Nationale de l'Énergie Électrique, est l'équivalent de l'EDF en France. Elle s'occupe de commercialiser l'énergie électrique conformément aux normes et directives du gouvernement fédéral

En 2012, elle a mis en place une nouvelle norme de production énergétique pour le secteur résidentiel. La nouveauté réside dans le fait qu'il est désormais possible d'installer des centrales de production énergétique d'origines renouvelables directement sur les unités résidentielles. L'énergie produite est insérée dans le réseau local

Nous allons dans cette partie décrire les paramètres encadrant cette norme, afin de mieux comprendre quelles seront nos marges de manoeuvre par la suite. Nous présentons ci-après les aspects intéressants de cette norme (selon la dernière révision, faite en 2015).

1. Des centrales de micro-générations au potentiel inférieur ou égal à 75kW, utilisant la cogénération ou des sources renouvelables. Ces centrales sont connectées au réseau de distribution.
2. Des centrales de mini-générations au potentiel compris entre 75kW et 5MW, utilisant la cogénération ou des sources renouvelables. Ces centrales sont connectées au réseau de distribution.
3. Système d'indemnisation de l'énergie électrique: l'énergie active injectée dans les unités consommatrices qui possèdent des centrales de micro ou mini-générations est cédée gratuitement sous la forme d'un prêt, au distributeur local et sera compensée par la consommation de l'énergie créée.

4. Progrès: Installations, substitutions ou réparations des équipements installés, ou l'adéquation de ces installations pour maintenir la prestation de service adéquat de l'énergie électrique.
5. Renforcement: Installations substitution ou travaux pour les équipements installés, ou l'adéquation de ces installations, pour augmenter la capacité de distribution, de fiabilité du système de distribution, de vie utile ou pour les connections des usagers.
6. Projet avec plusieurs unités consommatrices, qui peuvent être divisées en plusieurs fractions avec des usages individuels. Chaque fraction peut être considérée comme une unité consommatrice individuelle distincte, de même que les installations pour répondre aux besoins des espaces communs peuvent aussi être considérées comme une unité consommatrice distincte.
7. Génération partagée: caractérisée par la réunion de consommateurs dans une même aire de concession/permission, au moyen d'un groupement/coopérative, composée par une personne physique ou juridique, qui possède une unité consommatrice pourvue de micro ou mini-génération dans un lieu différent des unités consommatrices dans lesquelles l'énergie excédante produite sera compensée.
8. Autoconsommation lointaine: caractérisée par des unités consommatrices titularisées par une même personne juridique, incluses dans la matrice et la filiale, ou bien une personne physique qui possède des unités consommatrice avec mini ou micro-génération, dans la même aire de concession/permission dans lesquelles l'énergie excédante sera compensée.

#### Article 4:

Est dispensée la signature de contrats d'usage et de connexion en tant que centrale génératrice pour les participants du système d'indemnisation de l'énergie électrique, dans les termes du Chapitre 3, considérant suffisant l'émission par la Distribuidora do Relacionamento Operacional pour la micro-génération et la célébration de l'Acordo Operative pour la mini-génération.

Paragraphe 1: Le potentiel installé de la micro-génération et de la mini-génération distribuée reste limité au potentiel disponible par unité consommatrice où la centrale génératrice sera connectée.

Paragraphe2: Dans le cas où le consommateur souhaite installer une centrale génératrice au potentiel supérieur à la limite établie ci-dessus, il doit augmenter le potentiel disponible. Paragraphe3: Est accordée la division de la centrale génératrice en unités de plus petite portée pour rentrer dans les limites fixées. Le distributeur doit, dans ce cas, identifier ces cas, solliciter la re-adéquation de l'installation et si la nouvelle installation ne respecte pas les limites, nier son adhésion au Système de Compensation de l'Énergie Électrique.

Paragraphe 4: Pour la détermination de la limite du potentiel installé de la centrale génératrice d'un projet de multiples unités consommatrices, doit être considéré le potentiel disponible par la distribution et la réussite du projet.

Paragraphe 5: Pour la sollicitation de l'approvisionnement initial d'unité consommatrice incluant la micro ou mini-génération, le distributeur doit observer les délais établis pour émettre l'information ou l'accès, tout comme les délais d'exécution des travaux prévus.

Paragraphe 6: Pour les cas de projet aux multiples unités consommatrices et de génération partagée, la sollicitation d'accès doit être accompagnée de copie de l'instrument juridique qui comprend le compromis de solidarité entre les parties intégrantes.

#### Article 5:

Paragraphe 1: Les coûts d'éventuelles améliorations ou renforcement du système de distribution en fonction de l'exclusive connection de micro-génération ne doivent pas faire partie du calcul de la participation financière du consommateur, qui seront totalement couverts par le distributeur (sauf dans les cas de génération partagée)

Paragraphe 2: Les coûts d'éventuelles améliorations ou renforcement du système de distribution exclusivement en fonction de la connexion de mini-génération distribuée doivent faire partie du calcul de la participation financière du consommateur

Article 6: Peuvent adhérer au système de compensation de l'énergie électrique les consommateurs responsables par unité de consommation:

1. De micro/mini-génération
2. Intégrant un projet de multiples unités consommatrices
3. Caractérisée comme génération partagée
4. Caractérisée comme auto-consommateur distant

Paragraphe 1: Pour des fins de compensation, l'énergie active injectée dans le système de distribution pour l'unité de consommation sera cédée au titre de projet gratuit pour le distributeur, donnant à l'unité un crédit sous forme de quantité d'énergie active devant être consommée dans un délai de 60 mois.

Paragraphe 2: L'adhésion au système de compensation d'énergie électrique ne s'applique pas aux consommateurs libres ou spéciaux.

Art.6-A Le distributeur ne peut pas inclure les consommateurs dans le système de compensation d'énergie électrique dans les cas où, dans le document qui prouve que le propriétaire possède le bien (la centrale de micro/mini-génération), figure que le consommateur ait loué des lots ou propriétés avec un loyer en Reais/unité d'énergie électrique.

ART7: La facturation de l'unité consommatrice du système de compensation de l'énergie électrique doit suivre les paramètres suivants:

1. La valeur référant au coût de disponibilité pour le consommateur du groupe B, ou de la demande contractée pour la consommation du groupe A, est la valeur minimale à couvrir
2. Pour le cas de l'unité consommatrice avec micro/mini-génération, la facturation doit considérer l'énergie consommée, déduite de l'énergie injectée et éventuellement de l'énergie accumulée dans les cycles antérieurs de facturation (tous les tarifs doivent être en R\$/MWh)
3. Dans le cas de l'unité consommatrice de micro/mini-génération, la tarification doit considérer l'énergie consommée, déduite de l'énergie excédante attribuée à l'unité et éventuellement le crédit d'énergie accumulée dans les cycles antérieurs de facturation (tous les tarifs doivent être en R\$/MWh)
4. L'excédent d'énergie est la différence positive entre l'énergie injectée et celle consommée, excepté pour les projets de multiples unités consommatrices, où l'excédent est égal à l'énergie injectée.
5. Quand le crédit d'énergie accumulée dans des cycles antérieurs est utilisé pour compenser la consommation, un montant équivalent d'énergie ne doit pas être débité du solde actuel.
6. L'excédent d'énergie qui n'a pas compensé son unité de consommation peut être utilisé pour compenser la consommation d'autres unités de consommations, comme pour les projets de multiples unités consommatrices, ou ceux de générations partagées ou encore les auto-consommateurs lointains.
7. Dans le cas d'unité consommatrice localisée séparément de la génération, la facturation doit prendre en compte l'énergie consommée, déduite du pourcentage de l'énergie excédante loué à cette unité consommatrice et un éventuel crédit d'énergie accumulée durant les cycles antérieurs de facturation (tous les tarifs doivent être en R\$/MWh)

8. Le titulaire de l'unité consommatrice où se trouve l'installation de la micro/mini- génération doit définir par écrit le pourcentage d'énergie excédante qui sera destinée à chaque unité consommatrice participante du système, au moins 60 mois à l'avance. Pour les cas de projets avec de multiples unités consommatrices ou de génération partagée, il faut un document copie de l'instrument juridique prouvant le compromis de solidarité entre les parties intégrantes.
9. Pour chaque unité consommatrice participante du système de compensation d'énergie électrique, on inclut la compensation d'énergie à l'intérieur même du cycle de facturation, les crédits restants doivent rester dans l'unité concernée.
10. Quand l'unité consommatrice où la production excédante est facturée selon les modalités conventionnelles, les crédits doivent être considérés comme production durant heures creuses.
11. Dans chaque unité consommatrice, l'indemnisation doit se donner premièrement selon la table tarifaire du générateur, et plus tard selon les autres tarifs, devront être observés la relation des valeurs tarifaires d'énergie - TE (R\$/MWh) publiées dans les Résolutions Homologuées qui approuvent les processus tarifaires.
12. Les crédits d'énergie expirent 60 mois après la date de facturation et seront reversés en faveur de l'entité tarifante sans que le consommateur touche une quelconque forme d'indemnisation après ce délai
13. D'éventuels crédits d'énergie existants durant la fermeture de la relation contractuelle du consommateur doivent être comptabilisés par le distributeur au nom du titulaire de l'unité consommatrice dans un délai de 60 mois après la date de facturation, excepté s'il y a une autre unité consommatrice sous le même titulaire et dans la même aire de concession. Dans ce cas seront autorisés le transfert des crédits restants.
14. Additionnellement, les informations définies dans la Résolution Normative de 2010, la facture des consommateurs qui possèdent le micro/mini-générateur doit compter, à chaque cycle de facturation:
  - L'information de la participation de l'unité consommatrice dans le système de compensation de l'énergie électrique
  - Le solde antérieur de crédits en kWh
  - L'énergie électrique active consommé, par niveau tarifaire
  - L'énergie active injectée par niveau tarifaire
  - L'historique de l'énergie électrique active consommée et de celle injectée dans les derniers 12 cycles de facturation
  - Le total de crédits utilisés dans le cycle de facturation, détaillés par unité consommatrice
  - Le total de crédits expirés dans le cycle de facturation Le solde actualisé de crédits
  - La prochaine tranche du solde actualisé de crédits à expirer et le cycle de facturation à venir
15. Les informations du l'item précédent peuvent être fournies au consommateur, sur le critère de la distribution, au moyen d'un démonstratif spécifique annexe à la facture, courrier électronique ou disponible via internet, dans un espace d'accès restreint, la facture devant contenir, dans ces cas, au minimum les informations énumérées dans les alinéas a, b, c, d, e et h de l'item précédent.
16. Pour les unités consommatrices enregistrées dans le système de compensation de l'énergie électrique que ne possèdent pas de micro/mini-génération distribuée, installée, hormis l'information de sa participation dans le système de compensation de l'énergie, la facture doit contenir le total de crédits utilisés dans l'unité consommateur correspondante par tranche tarifaire.

17. Pour les unités consommatrices desservies en tension primaire avec des équipements de mesure installés dans les seconds transformateurs, la perte de la transformation de l'énergie injectée doit être déduite, selon les termes de l'article 94 de la Résolution Normative n°414 du 9 septembre 2010.

18. Les crédits sont déterminés en termes d'énergie électrique active, elle n'est pas sujette aux altérations dans les tarifs de l'énergie électrique.

19. pour les unités consommatrices classifiées dans la sous-classe résidentielle de basse rente, doit être premièrement appliquées, les règles fondamentales de facturation prévus dans cette article, et en suivant, concéder les réductions conformément établies dans la Résolution Normative n°414 de 2010.

Par1: Les effets tarifaires découlants du système de compensation seront indiqués dans les Procédés de Régulation Tarifaire - PRORET.

Par2: La couverture des plages tarifaires doit être effectuée selon la consommation d'énergie électrique active à être facturée dans les termes de cet article.

Les modifications de l'article 7 concernant l'article 8 de la Résolution Normative n°482 de 2012, qui devient:

Article 8: La distribution est responsable technique et financière du système de mesure pour la micro-génération distribuée, selon les spécifications technique du PRODIST.

Par1: Les coûts d'adéquation du système de mesure pour la connection de mini- génération distribuée et de gestion partagée sont la responsabilité de l'intéressé.

Par2: Les coûts de l'adéquation auxquels se réfèrent le paragraphe 1 correspondent à la différence entre les coûts des composants du système de mesure requis pour le système de compensation d'énergie électrique et des composants du système de mesure conventionnel utilisés dans les unités consommatrices de même niveau de tension.

L'article 8 modifie l'article 10 de la Résolution Normative n°482 de 2012, qui devient:

Art10: La distribution devra mettre le système de mesure en adéquation et initier le système de compensation d'énergie électrique dans le délai d'approbation du point de connexion, conformément aux procédés et délais établis dans la section 3.7 du Module 3 du PRODIST.

L'article 9 modifie l'article 13 qui devient:

Article 13: La distribution est responsable de la collecte d'informations des unités consommatrices participantes au système de compensation de l'énergie électrique et de l'envoi des données pour les registres de l'ANEEL, selon le modèle disponible dans le site de l'Agence (ANEEL).

Paragraphe Unique: Les données pour les registres doivent être envoyées jusqu'au jour 10 de chaque mois, contenant les données des unités consommatrices avec micro/mini- génération distribuée qui sont entrées en opération le mois précédent.

Article 10 : inclure l'article 13 d'après la rédaction suivante:

Article 13-A: La distribution doit rendre disponible, à partir du 1 janvier 2017, le système électronique qui permet au consommateur et l'envoi de la sollicitation d'accès, de tous les documents énumérés dans les annexes de la Section 3.7 du module du PRODIST, et l'accompagnement de chaque étape du procédé.

Article 11. Inclure l'article 13-B de la Résolution Normative n°482 de 2012, d'après la rédaction suivante:

Article 13-B: S'appliquent aux unités consommatrices participantes au Système de compensation de l'énergie électrique, les dispositions de la Résolution Normative n°414 de 2010.

Article 12: L'article 15 de la Résolution Normative n°482/2012 devient: Article 15: L'ANEEL révisera cette résolution avant le 31 décembre 2019.

Article 13: Sont approuvées les révisions 6 du Module 3 et 9 du module 1 du Procédés de Distribution - PRODIST, qui entrent en vigueur le 1 mars 2016.

Article 14: Les distributions doivent réviser et publier d'après son adresse électronique, jusqu'au 1 mars 2016, les normes techniques qui traitent de l'accès de micro/mini-génération distribuée utilisant comme référence le Module 3 du PRODITS.

Article 15: Cette résolution entrera en vigueur le 1 mars 2016.

<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>

# (4 ème de Couverture)

CITERES

*UMR 7324  
Cités, Territoires,  
Environnement et  
Sociétés*

*Equipe IPA-PE  
Ingénierie du Projet  
d'Aménagement,  
Paysage,  
Environnement*



35 allée Ferdinand de Lesseps BP  
30553  
37205 TOURS cedex 3

**Directeur de recherche :**

**Verdelli Laura**

**Sevilla Manon  
Simonin Mathilde  
Projet de Fin d'Etudes  
DA5  
2017-2018**

## **Le potentiel énergétique de la région du Nordeste du Brésil en vue d'initier une production d'énergies renouvelables locale**

**Résumé :** Le Brésil est au cœur de la transition énergétique. Il est le géant des énergies renouvelables principalement par hydroélectricité. Cependant, cette source d'énergie est en train d'atteindre ses limites et le Brésil cherche alors à se diversifier.

Les conditions climatiques de la région Nordeste sont particulièrement idéales pour produire de l'énergie à partir du vent et du soleil. Les grands groupes en énergie en sont conscients et commencent déjà à installer des structures. La Loi Aneel 2012 permet à la population d'être elle aussi un acteur dans cette transition. En effet, elle autorise la mini production d'énergie localement. Ce rapport étudie donc la consommation et la production d'énergie dans la région du Nordeste et évalue des solutions adaptées pour que la population de Salvador produise sa propre énergie.

**Mots Clés :** Énergie renouvelable\_ Salvador de Bahia \_ Brésil\_ mini et micro production