

---

# SIMULATION & OPTIMISATION DU MIX ÉNERGÉTIQUE

Collaboration sur la simulation et  
optimisation des besoins  
d'architecture à Madagascar

Résumé

**Approches**

3

Idées générales

Modélisation

**Méthodologie**

7

Intégration des données

Choix des contraintes

Simulation et optimisation

**Annexes**

9

Structures des classes

---

## RÉSUMÉ

Ce rapport contient nos premières analyses du mix énergétique de Madagascar. Il présente les bases d'une simulation de la production électrique centrée sur le coût de production.....

Notons que les informations dans ce document sont sujettes à des modifications selon la progression du travail en cours.

---

# Approches

Dans le cadre de l'optimisation du réseau de transport, il est essentiel d'analyser les interconnexions existantes afin de les évaluer selon les besoins de la population. Il existe actuellement trois Réseaux Inter-connectés (RI) distincts (Toamasina, Antananarivo, Fianarantsoa) qui forment chacun un réseau de transport alimenté par plusieurs centrales. Par ailleurs, plusieurs autres sources qui fournissent en énergie électrique les autres régions de Madagascar n'y sont pas raccordées. D'après les données fournies par l'EDBM (l'Economic Development Board of Madagascar), on constate 77,46% d'énergies fossiles et 22,53% d'énergies renouvelables composées majoritairement de centrales hydroélectriques réparties dans tout le pays. Dans ce contexte, il est intéressant d'analyser l'impact de ces centrales hydroélectriques sur la performance du mix.

Pour ce faire, on se posera pour objectif premier d'étudier la pertinence du mix énergétique raccordé sur chaque Réseaux Inter-connecté à travers son coût de production. Nous allons donc développer notre approche dans l'analyse et la résolution de la problématique. Ensuite, nous allons mettre en évidence les moyens utilisés ainsi que les données nécessaires à cette étude.

## IDÉES GÉNÉRALES

Un mix électrique représente la répartition des différentes sources d'énergies primaires dans le but de produire de l'électricité pour alimenter une région ou un pays. Par abus de langage, on considère souvent un mix énergétique comme étant un mix électrique.

Le système à modéliser doit simuler la production d'électricité d'une région donnée sur une période  $t$  et doit prendre en compte en entrée les caractéristiques des centrales et la courbe des demandes des consommateurs afin d'en déduire en sortie le coût de production et l'impact environnementale du mix.

L'étude de l'état du système composé d'installation de conversion (centrales électriques) doit passer par la définition des variables afin de décrire le comportement de celui-ci[LK91]. Une installation est caractérisée par sa puissance installée  $\alpha$  et sa puissance instantanée  $\beta$  (puissance produite à l'instant  $t$  ou dans un intervalle donné). Comme le rôle du système est de satisfaire la demande à tout instant  $t$ , il existe des centrales dites pilotées (centrales thermiques) qui peuvent varier leur puissance instantanée produite pour assurer la demande. Le coefficient d'utilisation est le facteur le plus simple qui permet de représenter cette variation. D'autre part, les centrales qui fournissent des énergies dites subites telles que l'éolienne, le solaire sont alimentées par des sources intermittentes (touchées par des périodes d'interruptions non volontaires).

Pour commencer, nous posons l'hypothèse que les puissances produites par les centrales à énergies subites sont estimées durant la période  $t$  selon les données de la région.

De manière générale, il est question de trouver les meilleurs coefficients d'utilisation des centrales pilotées, pour un intervalle de temps donné, pour produire l'électricité à moindre coût tout en respectant certaines contraintes.

**Les principales contraintes prises en compte ( ce qui peut évoluer au fur et à mesure de l'évolution du projet) sont :**

- l'empreinte environnementale de la production du mix énergétique (du moins la politique adoptée par le pays)
- la disponibilité des ressources
- le taux de variation spontanée supportée
- la demande en énergie de la zone couverte par le Réseau Inter-connecté

Ces contraintes respectées, on cherche à minimiser le coût de production de l'électricité.

[RT18]

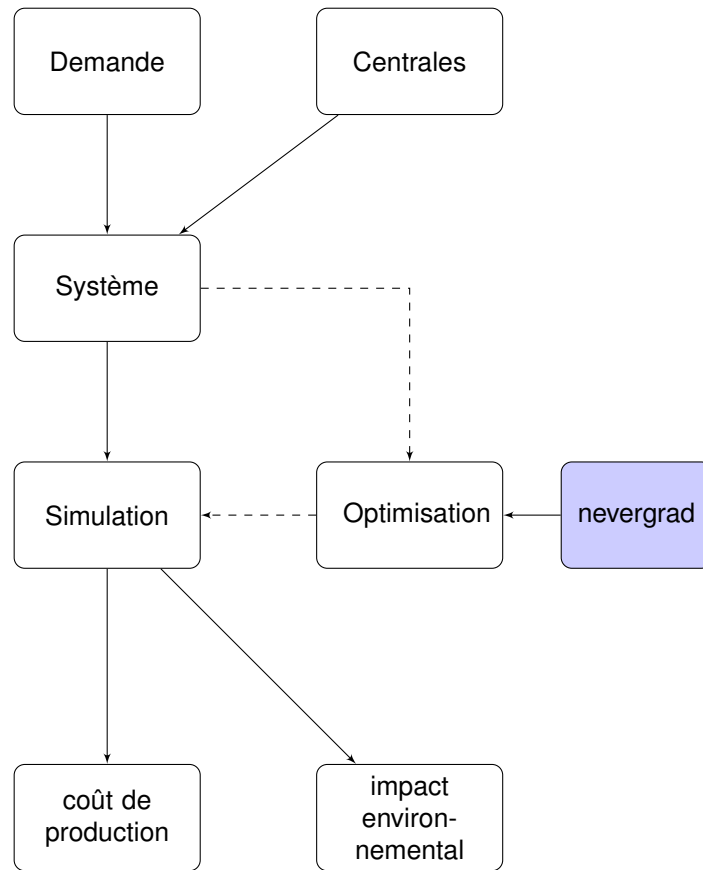


FIGURE 1 – Structure du modèle

## MODÉLISATION

### Contrainte au niveau de la disponibilité

La disponibilité se traduit par la quantité d'énergie maximale qu'une centrale peut fournir dans un intervalle de temps donné. Dans le cas des centrales hydroélectrique, on constate celles « à accumulation » qui permet de stocker une quantité d'énergie potentielle (volume d'eau) dans un réservoir. Par contre, celles « au fil de l'eau » ne peuvent que varier faiblement leur production et dépendent fortement des conditions climatiques (intermittence des sources)

$$St_{t+1,i} = St_{t,i} + (apport_{t+1,i} - production_{t+1,i})$$

où  $St_{t,i}$  = stock d'énergie (MW)

$apport_{t+1,i}$  = source d'énergie intermittente (MW)

$production_{t+1,i}$  = énergie utilisée pour la production (MW)

(1)

Dans le cas générale, chaque centrale possède un seuil de disponibilité a un temps  $t$  donné. La contrainte suivante doit donc en sus être respectée.

$$K_{t,i} \leq Disponibilité_{t,i}$$

tel que  $K_{t,i}$  = coefficient d'utilisation de la centrale  $i$  au temps  $t$

(2)

## Contrainte liée à la variation (par unité de temps) maximale

Les centrales flexibles (dont on peut modifier le coefficient d'utilisation), malgré leur appellation, ont tout de même une certaine limite qui leur sont propres : la variation maximale (par unité de temps).

$$|K_{t,i} - K_{(t+1),i}| \leq MaxVar_i$$

## Contrainte liée à la demande

La principale contrainte d'un mix énergétique est la satisfaction de la demande. La demande doit absolument être satisfaite à tout prix (proprement parlé), en prenant en considération une perte généralisée qui regroupe les pertes par rapport à l'énergie active et réactive. Mathématiquement, cela se formule de la sorte :

$$\left( \sum_{i=1}^{nombredecentrale} K_{t,i} \times PuissanceNominale_i \right) - P_g = Demande_t$$

$$P_g = Perte\ généralisée$$

$$K_{t,i} \times PuissanceNominale_i = \text{énergie produite par la centrale } i$$

(3)

## Contrainte environnementale

Selon les politiques environnementales des pays, il est possible de se fixer des limitations sur l'émission de carbone. Ceci peut constituer une autre contrainte à satisfaire par le mix. Soit  $c$ , cette limitation en (g/MWh), on obtient alors, sous forme d'inégalité, la contrainte suivante :

$$\frac{\sum_{i=1}^{nombredecentrale} K_{t,i} \times emissionCarboneNominale_i}{\sum_{i=1}^{nombredecentrale} K_{t,i} \times puissanceNominale_i} \leq c$$

## Fonction objective : minimisation des coûts de production

En satisfaisant les contraintes citées plus haut, l'objectif est de minimiser au mieux le coût de production de l'électricité (Ar/MWh). Pour ce faire, on peut considérer deux scénarios par rapport à l'expression de la fonction objective qui représente le coût de production du MWh :

### – 1<sup>er</sup> scénario

[Bon18]

Soit  $d$  le nombre d'heure de fonctionnement du mix énergétique,  $nb\_centrale$  le nombre de centrales présentes dans le mix. On peut définir le coût de production comme suit :

$$\sum_{t=1}^d \sum_{i=1}^{nb\_centrale} (prixCarburant_i \times Consommation_i \times K_{t,i} \times PuissanceNominale_i) + (coutSalarie_{t,i} + valeurAmortie_{t,i})$$

avec  $K_{t,i} \leq Disponibilite_{t,i}$

En regroupant les coûts variables et les coûts fixes en une seule variable pour obtenir le coût par MWh approximatif d'une centrale  $i$ , on obtient un coût de production classique formulé comme ceci :

$$\sum_{t=1}^d \sum_{i=1}^{nb\_centrale} CoûtParMWh_i \times K_{t,i} \times PuissanceNominale_i$$

$$\text{où } CoûtParMWh_i = CoûtFixeParMWh_i + CoûtVariablesParMWh_i \quad (4)$$

### – 2<sup>e</sup> scénario

[Al-+15]

Dans le cas où  $t$  est très grand (plus de 20 ans), on considère l'actualisation des coûts de l'énergie. Le LCOE ou "Levelized Cost of Energy" est une fonction couramment utilisée pour calculer le prix complet d'une énergie sur la durée de vie de l'équipement qui la produit. Ainsi on peut également déterminer le coût de production d'une centrale en variant  $E_t$  selon les résultats du premier scénario. En posant  $H$  le nombre d'heures dans une année, on définit ainsi le LCOE ou LCE comme suit :

$$LCE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

$$\text{avec } E_t = \sum_{h=1}^H K_{t_h} \times PuissanceNominale$$

$K_{t_h}$  = coefficient d'utilisation de la centrale à la  $h$  ème heure de l'année  $t$   
(en considérant l'intervalle de temps en heure)

$I_t$  = dépenses d'investissement durant la période  $t$  (en année)

$M_t$  = dépenses d'opération et de maintenance durant la période  $t$  (en année)

$F_t$  = dépenses de combustible durant la période  $t$  (en année)

$E_t$  = électricité produite durant la période  $t$  (en année)

$r$  = taux effectif de réduction annuel

$n$  = durée de vie du système.

(5)

**Remarque :** On constate que le coût de production du 1<sup>er</sup> scénario n'est autre que  $M_t + F_t$ .

---

# Méthodologie

**Remarque :** Cette section est en cours de développement

Pour déterminer le coût de production, le simulateur applique une règle de priorité des sources. (par défaut pour l'instant). On sépare en deux groupes les centrales renouvelables et non renouvelable, puis on essaie de satisfaire la demande avec la quantité disponible d'énergie renouvelable avant de chercher à utiliser les sources fossiles de façon optimales.

## INTÉGRATION DES DONNÉES

L'optimisation devra prendre en compte les types de centrales à optimiser (avec leurs caractéristiques techniques) ainsi que les données sur les demandes. L'intégration des données des centrales peut se faire, soit statiquement (construction d'objet central un par un en codant), soit de façon plus générique en lecture de fichier au format csv. Les informations du fichier csv sont toutefois tenues de respecter certaines normes (nom des colonnes et unités). Dans le cas de l'utilisation d'un dataset issu d'un fichier csv, les noms des colonnes qui doivent être disponibles sont : "tuneable (boolean), green(boolean), centrals (identification), fuel\_consumption (g/MWh), availability (%), fuel\_cost (\$/g), init\_value (\$), lifetime (years), carbon\_production (g/MWh), raw\_power (MW), nb\_employees, mean\_salary(\$), demand (MWh), lost (MWh)".

- tuneable : la centrale est elle pilotable ou non ?
- green : est-ce une centrale à énergie renouvelable ?
- fuel\_consumption : consommation de carburant (dans le cas d'une centrale à énergie fossile)
- availability : disponibilité de la centrale
- fuel\_cost : prix du carburant utilisé
- init\_value : investissement initiale dans la mise en place de la centrale
- lifetime : durée de vie de la centrale
- carbon\_production : taux d'émission de  $CO_2$  de la centrale
- raw\_power : puissance nominale de la centrale
- nb\_employees : nombre d'employés au niveau de la centrale
- mean\_salary : salaire moyen des employés de la centrale
- demand : demande en électricité
- lost : perte électrique arbitraire à d'autre niveau (ie : réseau de transport)

Il faut noter que les unités des données d'entrée déterminera l'unité de sortie.

## CHOIX DES CONTRAINTES

Le framework sera construit avec un nombre conséquent de contraintes préétablies (celles mentionnées plus haut). Cependant selon les cas d'utilisation, certaines pourront ne pas être appliquées. Ainsi le choix des contraintes à utiliser sera spécifié par l'utilisateur comme paramètre de l'optimisation (ex : dans une optimisation avec contrainte écologique, il définira `optimize(carbon_cost_limit=taux_d_émission_maximale)`, et dans le cas contraire `optimize()`).

**Jusqu'à présent la liste des contraintes disponibles ( ce qui peut évoluer au fur et à mesure de l'évolution du projet) sont :**

- le seuil d'émission de carbone acceptable
- la disponibilité des ressources (obligatoirement appliquées)
- la demande en énergie de la zone couverte par le Réseau Inter-connecté (obligatoirement appliquée)

## SIMULATION ET OPTIMISATION

Dans cette partie, on définit les fonctionnalités principales du simulateur dans le but de résoudre le problème. Le simulateur fonctionne sur deux approches distinctes qui sont la simulation simple et la simulation optimisée basé sur Nevergrad (voir figure 1), ajouté à cela la possibilité de comparer les

résultats sous différentes angles.

### **Simulation simple :**

L'utilisateur peut proposer les paramètres d'utilisation des centrales lui même et voir ensuite les différents indices d'efficacité de ces paramètres (le taux de satisfaction par rapport a la demande, l'impact écologique, etc...). Pour ce faire, le taux d'émission de carbone, la quantité d'énergie produite, le coût de production, seront tous simplement calculés et retournés.

### **Optimisation :**

Le simulateur peut aussi recommander des paramètres d'utilisation des centrales fournies en entrée en utilisant ses « optimizers » afin de réduire la fonction objective définie précédemment en respectant les contraintes choisies par l'utilisateur. La classe Optimizer a pour but d'adapter les optimiseurs de nevergrad pour les besoins du simulateur en proposant des paramètres automatiques (dimension) et des étapes de pré-processing indispensables pour la gestion des contraintes.

- Le premier « optimizer » disponible utilise l'algorithme de stratégie évolutif  $ES(\mu + \lambda)$  (avec  $\mu = 1$  et  $\lambda = 1$ ) obtenu à partir de la fonction OnePlusOne[Asm16] de nevergrad.

### **Comparaison des résultats :**

On propose de comparer les résultats obtenu via la simulation simple et l'optimisation en présentant un benchmarking adapté et évolutif selon les optimiseurs et les configurations.



---

# Annexes

## STRUCTURES DES CLASSES

Liste des classes qui constitue le simulateur :

- MixSimulator.py : Base du système (Simulation avec/sans optimisation)
- SegmentOptimizer.py : Initier l'optimisation appropriée et les centrales ( Définit la fonction objectif et les contraintes ; Gère les entrées des données ; Calcule la valeur des variables explicatives)
- nevergradBased/Optimizer : Adaptation des optimiseurs Nevergrad au projet + auto-paramétrisation
- centrals/PowerCentral : Rassemble tous les paramètres communs des unités de contrôle (central)
- data/ : Regroupe les datasets disponibles

L'arborescence des classes est présentée dans Figure 2

On peut accéder à l'intégralité du code source sur <https://github.com/Foloso/MixSimulator> .

D'autres informations sont disponibles sur MixSimulator Readme .

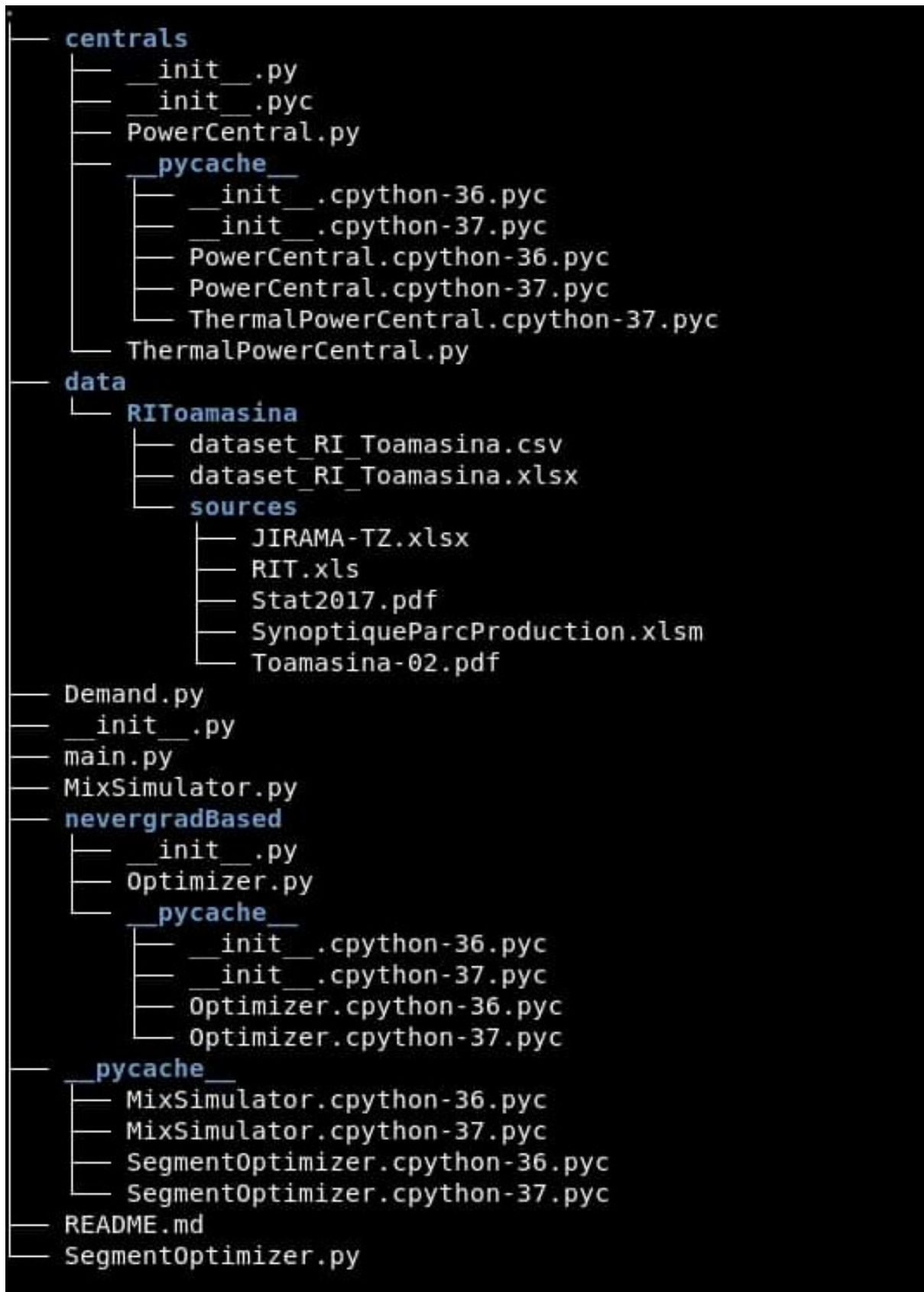


FIGURE 2 – Arborescences des classes

---

# Références

- [LK91] Averill M. LAW et W. David KELTON. « SIMULATION MODELING AND ANALYSIS ». In : McGraw-Hill book, 1991. Chap. 1.2.
- [Al-+15] Abduallah AL-MASHHADANI et al. « Optimization of UK generation mix for 2030 ». In : 3 (2015), p. 27.
- [Asm16] Nikolaus Hansen ASMA ATAMNA Anne Auger. « Analysis of Linear Convergence of a (1 + 1)-ES with Augmented Lagrangian Constraint Handling ». In : (2016).
- [Bon18] Bernard BONIN. « Présentation du logiciel "MIXOPTIM" ». In : (2018), p. 19.
- [RT18] J. RAPIN et O. TEYTAUD. *Nevergrad - A gradient-free optimization platform*. <https://GitHub.com/FacebookResearch/Nevergrad>. 2018.