

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I. CONTEXTES ENERGETIQUES.....	2
I.1. GENERALITES SUR L'ENERGIE	2
I.2. SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE [14]	2
I.3. PRODUCTION ET CONSOMMATION MONDIALES	4
I.3.1. Energies consommées par les grandes puissances en 1996 [14]	4
I.3.2. Production et consommation des grandes puissances en 2004 [14]	4
I.3.3. Essor énergétique mondiale [14]	5
I.4. SITUATION ENERGETIQUE DE MADAGASCAR [1][12][13][14].....	7
I.4.1. Répartition des énergies produites	7
I.4.2. Potentialités en ressources énergétiques renouvelables.....	7
I.4.3. Problèmes.....	10
I.5. DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE DURABLE (DED) – ENERGIES RENOUVELABLES	11
I.5.1. Concept du Développement Energétique Durable (DED).....	11
I.5.2. Objectifs du DED	12
I.5.3. Stratégies.....	12
I.5.4. Plans d'action.....	12
I.5.5. Propositions dans les ateliers du colloque de La Réunion [1]	14
I.5.6. Proposition de solutions pour le DED à Madagascar [1].....	15
I.6. ELECTRIFICATION DECENTRALISEE	16
I.6.1. Introduction.....	16
I.6.2. Le système hybride	16
CHAPITRE II. LES DIFFERENTS MOYENS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE	18
II.1. INTRODUCTION.....	18
II.2. LA CENTRALE THERMIQUE	18
II.2.1. Le moteur d'entraînement	18
II.2.2. L'alternateur	20
II.2.3. La cogénération - la trigénération [7]	21
II.2.4. Impact environnemental	22
II.3. LA CENTRALE HYDROELECTRIQUE	23
II.3.1. Les centrales hydroélectriques à retenue d'eau.....	23
II.3.2. Les centrales hydroélectriques au fil de l'eau.....	23
II.3.3. Les centrales marémotrices [14]	24
II.3.4. Les turbines hydrauliques.....	25
II.3.5. Impact environnemental	25
II.4. L'INSTALLATION DE BIOGAZ [13][15].....	25
II.4.1. Le biogaz agricole.....	26
II.4.2. Le biogaz industriel	26
II.4.3. Le biogaz de station d'épuration.....	27
II.4.4. Le biogaz ménager	27
II.4.5. La filière bois énergie	28
II.4.6. Le biocarburant.....	28

II.4.7.	Le complexe bagasse charbon	29
II.4.8.	Impact environnemental	30
II.5.	L'ENERGIE EOLIENNE [14][17]	31
II.5.1.	Historique	31
II.5.2.	Principe de l'aérogénérateur	32
II.5.3.	Impact environnemental	32
II.6.	L'ENERGIE NUCLEAIRE.....	33
II.6.1.	La fission nucléaire.....	33
II.6.2.	La fusion nucléaire	34
II.6.3.	Les éléments fonctionnels d'une centrale nucléaire.....	36
II.6.4.	Impact environnemental	36
II.7.	L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE [2]	37
II.7.1.	Ressources énergétiques du soleil	37
II.7.2.	Effet photovoltaïque	37
II.7.3.	Schéma équivalent d'une cellule PV	37
II.7.4.	La photopile	38
II.7.5.	Réalisation de générateurs photovoltaïques.....	40
II.7.6.	La régulation	40
II.7.7.	Impact environnemental	41
CHAPITRE III. CONCEPTION D'UN SYSTEME HYBRIDE.....		43
III.1.	NOTIONS DE BASE.....	43
III.1.1.	Aspect général.....	43
III.1.2.	Les étapes de la conception [5]	43
III.2.	METHODES DE CONCEPTION.....	45
III.2.1.	Classification des besoins.....	45
III.2.2.	Classification des sources d'énergie	45
III.2.3.	Principales combinaisons source-utilisation	46
III.2.4.	Dimensionnement	47
III.3.	LES METHODES D'OPTIMISATION.....	47
III.3.1.	La Programmation Linéaire	47
III.3.2.	La méthode du LPSP	47
CHAPITRE IV. PROGRAMMATION LINEAIRE METHODE DU SIMPLEXE		52
IV.1.	CONDITIONS D'APPLICATION DE LA PROGRAMMATION LINEAIRE	52
IV.2.	NOTATIONS.....	52
IV.3.	NOTATION MATRICIELLE	54
IV.4.	METHODE DE RESOLUTION (Optimisation) [11]	54
IV.4.1.	Exposé général de la méthode	54
IV.4.2.	Base réalisable.....	55
IV.4.3.	Solution du système	55
IV.4.4.	Expression en fonction des variables hors base	56
IV.4.5.	Coûts marginaux.....	56
IV.4.6.	Base réalisable initiale	56
IV.4.7.	La méthode en deux phases.....	57
IV.4.8.	Amélioration d'une solution de base.....	58
IV.4.9.	Conditions d'optimalité	60

IV.5. REGLES OPERATOIRES	60
IV.6. EXEMPLE D'ILLUSTRATION	60
CHAPITRE V. DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE HYBRIDE PAR LA PROGRAMMATION LINEAIRE.....	68
V.1. BUT ET PRINCIPE	68
V.2. CHOIX DES SOURCES « BIOGAZ – SOLAIRE - DIESEL »	68
V.2.1. Choix du biogaz	68
V.2.2. Choix du solaire.....	69
V.2.3. Choix du diesel.....	69
V.2.4. Choix de la pompe à eau électrique	69
V.2.5. Remarques.....	69
V.3. MODELISATION ECONOMICO-MATHEMATIQUE [3][4][5][6][9][10]	70
V.3.1. Les sources d'énergie utilisées.....	70
V.3.2. Les formes d'énergie et produits disponibles	70
V.3.3. Structure Paramétrique du modèle	70
V.3.4. Formulation de la fonction objectif.....	72
V.3.5. Formulation des contraintes.....	73
V.4. CARACTERISTIQUES DU VILLAGE DONNE EN EXEMPLE.....	76
V.5. LES EQUIVALENTS ENERGETIQUES	77
V.5.1. Equivalent énergétique du biogaz (R_1) [6] [13].....	77
V.5.2. Equivalent énergétique du Groupe Electrogène (R_2) [7] [8].....	77
V.5.3. Equivalent énergétique du solaire photovoltaïque (R_3) [1] [4] [10].....	78
V.5.4. Equivalent énergétique du solaire thermique (R_4).....	78
V.5.5. Equivalent énergétique de la station de pompage (R_5) [4] [6]	78
V.5.6. Résumé.....	79
V.6. RENDEMENT DE CHAQUE COMBINAISON	79
V.6.1. Biogaz – Courant Alternatif [5].....	79
V.6.2. Biogaz – Thermique cuisson	79
V.6.3. Biogaz – Eau chaude.....	79
V.6.4. Groupe électrogène – CA	79
V.6.5. Groupe électrogène – Thermique cuisson.....	80
V.6.6. Groupe électrogène – Eau chaude	80
V.6.7. Solaire PV – CA.....	80
V.6.8. Solaire thermique – Eau chaude	80
V.6.9. Pompage – Eau potable.....	80
V.6.10. Résumé	80
V.7. EVALUATION DES COUTS SPECIFIQUES.....	81
V.7.1. Calcul des coefficients de charge k_{ij}	81
V.7.2. Calcul des coûts spécifiques de la puissance installée P_{ij}	81
V.7.3. Calcul des coûts spécifiques de l'énergie produite C_{ij}	82
V.8. MISE EN EQUATIONS ET INEQUATIONS.....	83
V.8.1. Résolution du système	83
V.8.2. Résultats du dimensionnement	84
V.9. CONSLUSIONS ET REMARQUES	84
CHAPITRE VI. ETUDE D'UN CAS PRATIQUE - LE VILLAGE D'AMBATOFOOTSY	85

VI.1.	LE VILLAGE D'AMBATOFOOTSY.....	85
VI.2.	LE PROJET	85
VI.3.	CARACTERISTIQUES DE LA CENTRALE HYBRIDE D'AMBATOFOOTSY.....	86
VI.3.1.	Les champs photovoltaïques.....	86
VI.3.2.	Disposition des panneaux et branchement des modules	86
VI.3.3.	Le parc à batteries	87
VI.3.4.	Le groupe électrogène	88
VI.4.	SCHEMA D'INSTALLATION DE LA CENTRALE HYBRIDE	90
VI.5.	LE REGULATEUR ENERPAC.....	92
VI.5.1.	Fonctions de l'ENERPAC.....	92
VI.5.2.	L'importance du régulateur sur le PV	93
VI.6.	EVALUATION DE LA CHARGE D'AMBATOFOOTSY.....	94
VI.6.1.	Evaluation de la puissance consommée	94
VI.6.2.	Evaluation de l'énergie débitée.....	95
VI.6.3.	Coefficient de simultanéité	95
VI.6.4.	Profil des charges	98
VI.6.5.	Redimensionnement de la centrale d'Ambatofotsy.....	98
CONCLUSION GENERALE.....		101
LISTE DES FIGURES		102
LISTE DES TABLEAUX.....		103
ANNEXES.....		104
Annexe 1 :	Références bibliographiques et informatiques.....	105
Annexe 2 :	Acronymes	107
Annexe 3 :	Glossaire des terminologies propres au secteur de l'énergie.....	108
Annexe 4 :	Nomenclature	109



INTRODUCTION

L'accroissement rapide de la population Malagasy dont l'espérance de vie ne cesse d'augmenter, risque d'impliquer une augmentation considérable de la consommation d'énergies fossiles, notamment le pétrole et le bois, dans les années à venir.

Cependant, la réserve mondiale de pétrole est déjà en train de s'épuiser à un rythme vraiment rapide, alors que la survie de l'humanité dépend de plus en plus de la disponibilité de l'énergie. D'autre part, le manque d'autres sources d'énergie que le bois a entraîné une déforestation de déficit 10 000ha /an à Madagascar [1]. De plus, l'insuffisance d'emplois dans le milieu rural entraîne la ruée vers les grandes villes, ce qui crée un déséquilibre du développement socio-économique et de l'environnement.

Pour les pays en développement comme Madagascar, l'électrification rurale classique avance mais très lentement, vu la capacité de leurs gouvernements à investir pour ces genres de travaux. L'utilisation adéquate des ressources d'énergies renouvelables, exploitables et disponibles localement dans les zones rurales éloignées mais riches, peut faciliter la création d'emplois et résoudre les problèmes susmentionnés.

Mais les énergies renouvelables ont les caractéristiques suivantes :

- flux énergétique aléatoire,
- densité énergétique faible,
- coût d'investissement élevé.

L'utilisation combinée de quelques ressources d'énergies renouvelables pour la production de différentes formes d'énergie à la fois, et la recherche d'une méthode pour minimiser le coût de la centrale électrique nous ont incité à choisir ce sujet intitulé : « Optimisation du dimensionnement des équipements d'une centrale hybride *diesel - solaire - biogaz* par la programmation linéaire ».

Le but global de ce travail est de trouver les puissances des équipements composant le système hybride diesel – solaire - biogaz, donnant le coût minimum d'investissement et d'assurer un approvisionnement énergétique d'une unité de production agro-industrielle des zones rurales riches enclavées.

Voici le plan général suivant lequel nous avons mené notre travail:

- La première partie parle de la situation énergétique globale au niveau mondial, et en particulier dans le cas de Madagascar, suivie de l'introduction à la notion de développement énergétique durable ;
- Le chapitre suivant donne les différentes techniques de production d'électricité exploitées actuellement ;
- Ensuite, nous allons expliquer la conception d'un système hybride utilisant plusieurs sources d'énergie ;
- Nous avons jugé nécessaire de consacrer un chapitre à la programmation linéaire qui est une méthode d'optimisation des fonctions économiques ;
- Après cela, nous entamerons la modélisation économico-mathématique du système hybride biogaz – diesel – solaire, et procèderons au calcul d'optimisation de ce système par la programmation linéaire ;
- Pour compléter notre étude, la dernière partie traitera le cas d'Ambatofotsy, un village typiquement malagasy qui a récemment bénéficié d'électricité.



Chapitre I. CONTEXTES ENERGETIQUES

I.1. GENERALITES SUR L'ENERGIE

L'énergie est définie comme étant la quantité de matière échangée lors de l'interaction de deux corps statiques ou en mouvement. Elle peut se présenter sous différentes formes et le passage d'un état à un autre se fait par l'intermédiaire de convertisseurs d'énergie.

Parmi ces diverses formes d'énergie exploitables, on distingue principalement :

- l'énergie électrique
- l'énergie thermique
- l'énergie nucléaire
- l'énergie éolienne
- l'énergie hydraulique
- l'énergie mécanique
- l'énergie chimique
- l'énergie rayonnante.

L'énergie devient un sujet de plus en plus intéressant, tant pour les scientifiques chercheurs que pour les exploitants industriels, qui vont de pair pour puiser le maximum des ressources que la nature nous réserve. On ne cesse de chercher des nouveaux processus et des moyens efficaces pour produire de l'énergie dans toutes ses formes.

On ne peut pas nier que l'énergie électrique est actuellement la principale préoccupation des dirigeants partout dans le monde, afin de parvenir à satisfaire les besoins occasionnés par le développement technologique.

Certes, les grandes industries, dont la plupart sont des usines agroalimentaires, textiles ou métallurgiques, ne cessent de se multiplier et on sait qu'elles ont besoin d'une grande quantité d'énergies, le plus souvent électrique, mécanique et thermique, pour pouvoir fonctionner. Il y a aussi les ménages qui ont du mal à se priver d'électricité même pendant quelques heures, ne serait-ce que pour le chauffage pendant l'hiver, ou pour faire fonctionner les appareils électroménagers et audiovisuels qui sont devenus presque une nécessité, ou bien tout simplement pour s'éclairer la nuit.

I.2. SITUATION ENERGETIQUE MONDIALE [14]

Entre 1950 et 1990, la production et la consommation mondiales d'électricité sont passées d'un peu moins d'un milliard de kilowattheures (kWh) à plus de 11,5 milliards de kWh. La répartition des modes de production de l'énergie électrique a également évolué :

- en 1950, près des deux tiers de l'électricité étaient issus de sources thermiques classiques (pétrole, gaz, charbon) et un tiers, de sources hydroélectriques ;
- en 1990, les sources thermiques étaient toujours à l'origine des deux tiers de l'électricité mondiale, les centrales hydrauliques en produisaient 20 % et l'énergie nucléaire environ 15 %. Depuis, la croissance de l'énergie nucléaire a ralenti dans certains pays pour des raisons de problèmes de sécurité et de traitement des déchets.

La plus grande partie de l'électricité mondiale est produite dans des usines thermiques alimentées au charbon, au fioul, à l'énergie nucléaire ou au gaz et, en de plus petites proportions, au diesel et autres installations à combustion interne, ou dans des usines hydroélectriques.

Les différentes sources d'énergie peuvent être classées selon leur capacité calorifique : c'est pourquoi on les convertit en tonnes équivalent pétrole (tep). Par exemple, 1 kg de pétrole produit 10 000 kilocalories (kcal), alors que la même masse de charbon cède 7 000 kcal et que 1 kg de gaz naturel fournit environ 8 000 kcal. La tonne équivalent pétrole (tep) est l'unité permettant de comparer les sources d'énergie au pétrole brut. Par convention, 1 t de pétrole correspond à 1,5 t de charbon ou à 1 000 m³ de gaz naturel. On estime que 1 tep équivaut à 11 600 kWh environ.

En ce qui concerne le thermique classique, les recherches se portent plus particulièrement sur des projets de centrales à charbon à lit fluidisé circulant, car ce sont celles qui offrent les plus grandes garanties pour l'environnement. Des partenariats européens se sont créés autour de projets d'installations de gazéification du charbon intégrées à un cycle combiné, ou encore des cycles combinés au gaz naturel.

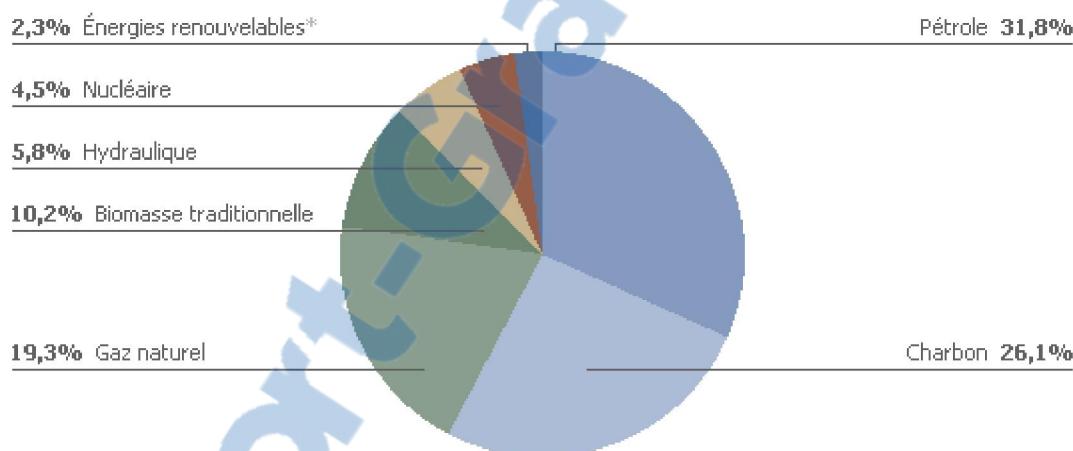


Figure N° 1 : Sources d'énergie sur la planète ; Répartition des ressources énergétiques utilisées en 2000

- 77 % provient des combustibles fossiles, qui sont en définitive le résultat de l'action de l'énergie solaire, mais ont été accumulés pendant des millions d'années.
- 18 % provient de sources renouvelables d'origine solaire (bois, biomasse, hydraulique, éolienne, solaire,...).
- 5% provient de sources non solaires, mais renouvelables (énergie nucléaire, énergie marémotrice et géothermique).

I.3. PRODUCTION ET CONSOMMATION MONDIALES

I.3.1. Energies consommées par les grandes puissances en 1996 [14]

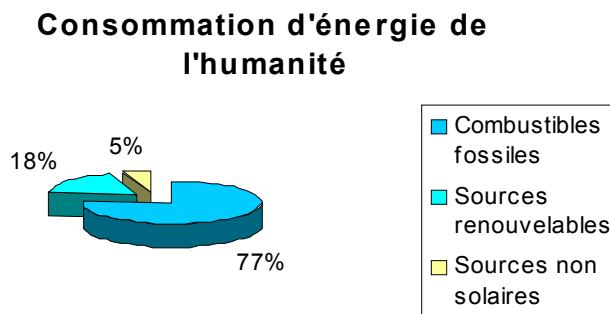


Figure N° 2 : Consommation énergétique globale

En 1996, les deux tiers de la consommation de la planète concernaient un peu moins de 20 % de la population mondiale.

Pays	Consommation (Mtep)
Etats-Unis	1 407
Japon	316
Allemagne	243
France	152
Grande Bretagne	152
Italie	122
Espagne	63

Tableau N° 1 : Consommation énergétique des pays développés en 1996

I.3.2. Production et consommation des grandes puissances en 2004 [14]

Pays	Production (TWh)	Consommation (TWh)
Etats-Unis	3 211,0	2 873,9
Japon	855,5	796,6
Canada	515,8	431,4
Allemagne	487,7	467,2
France	450,6	356,2

Tableau N° 2 : Production et Consommation énergétiques des pays développés en 2004



I.3.3. Essor énergétique mondiale [14]

a) Evolution de l'éolienne

On estime que, vers le milieu du XXI^e siècle, près de 10 % de l'électricité mondiale pourrait être fournie par des générateurs éoliens, ou aérogénérateurs. Ces aérogénérateurs sont parfois regroupés, notamment en Californie, où des groupes d'éoliennes peuvent produire jusqu'à 1200 MW. Les coûts de production de ces aérogénérateurs sont largement compétitifs par rapport à d'autres générateurs.

Le Danemark produit actuellement plus de 2 % de son électricité grâce à des turbines éoliennes. Celles-ci sont également utilisées pour accroître l'alimentation en électricité dans les communautés vivant sur des îles ou sur d'autres sites isolés. La France est l'un des rares pays européens à ne pas avoir développé de programme en matière d'énergie éolienne.

Au niveau mondial, l'utilisation des générateurs éoliens devient de plus en plus répandue. Ceci est dû à l'amélioration du système mécanique intégré, ce qui a augmenté considérablement le rendement global d'un aérogénérateur.

b) Situation du pétrole

La consommation mondiale d'hydrocarbures représente plus de 37% de la consommation totale d'énergie primaire.

Les gisements ne sont pas répartis sur la planète, entraînant ainsi des conflits géopolitiques autour de la ressource.

Au niveau mondial, le choc pétrolier actuel est caractérisé par :

- La croissance de la demande (Chine, Asie du Sud-Est),
- La saturation de la production de l'OPEP,
- La concentration de l'industrie pétrolière,
- La guerre de l'Irak,
- La spéculation,
- La forte tension géopolitique au Moyen orient (Arabie Saoudite 25% de la production),
- Les cyclones dans le Golfe,
- La prépondérance des produits pétroliers dans le bilan énergétique primaire et l'augmentation de la part de l'électricité dans le bilan énergétique final des pays développés,
- pression croissante du secteur énergétique sur l'environnement local et l'environnement global.

Avec ces facteurs négatifs, le pétrole sera délaissé d'ici 25 ans, vu que l'exploitation des énergies renouvelables prend beaucoup plus d'ampleur.



c) L'exploitation de l'énergie hydraulique

Au début des années 1990, le Canada et les États-Unis étaient les premiers producteurs d'énergie hydroélectrique dans le monde. Au Canada, 62 % de l'énergie électrique est de source hydroélectrique.

Dans le monde, l'énergie hydraulique représente environ un quart de l'énergie totale produite et prend une part de plus en plus importante. C'est la principale source d'énergie électrique pour un grand nombre de pays tels que la Norvège (99 % de son énergie électrique), la République Démocratique du Congo (97 %) et le Brésil (96 %).

La centrale d'Itaipú sur le fleuve Parana, entre le Brésil et le Paraguay, inaugurée en 1982, a la plus grande capacité de production du monde (12 600 MWh/an à plein rendement). Parmi les plus grandes installations, on peut également citer le barrage de Grand Coulée aux États-Unis : il fournit environ 7 000 MWh/an.

La France, dont l'énergie électrique est d'origine thermique, hydraulique et surtout nucléaire, possède environ 80 centrales hydrauliques, situées pour la plupart dans les Alpes, sur le Rhin et sur le Rhône.

Bref, on devrait se pencher davantage vers l'hydroélectrique car c'est l'avenir du secteur énergie.

d) Développement du solaire photovoltaïque

L'Europe compte aujourd'hui plus de 600 MWc installé, assurant près de 2 GWh de production. Le marché mondial croît de près de 10% par an.

Sous un bon ensoleillement, 100 Wc soit 1m² de capteur, assure la production de 0,5 kWh d'électricité utile par jour en site isolé.

Le coût moyen unitaire du solaire installé pour une production sur le réseau est d'environ 5 USD/Wc, soit un coût général actualisé (CGA) d'environ 0,25 USD/kWh.

En site isolé, le coût unitaire d'un générateur solaire autonome est de l'ordre de 10 USD/Wc. Sous un ensoleillement moyen, le CGA peut dépasser 0,85 USD/kWh utile.

Comme l'éolienne, le solaire PV est aussi disponible partout et ses ressources sont loin d'être insuffisantes. De plus, il est exploitable toute l'année, moyennant quelques fluctuations pendant certaines saisons.

e) Valorisation de la biomasse

La biomasse est une source très énergétique mais encore mal exploitée. Elle peut être utilisée directement en milieu rural ou transformée pour la production de biogaz

Plusieurs millions d'hectares de forêts sont exploitées pour le bois énergie. Elles sont gérées de manière durable à l'échelle mondiale, montrant que cette ressource peut être considérée comme renouvelable.



Les fermes représentent des ressources de grande quantité et totalement renouvelables.

La valorisation de la biomasse est donc à prioriser dans le développement énergétique durable, surtout dans les milieux ruraux qui sont loin des réseaux de distribution nationaux, mais qui ont pourtant une forte potentialité énergétique et économique.

Les installations de biogaz ont été développées dans les pays en voie de développement et dans les îles, à l'exemple de La Réunion qui a adopté une politique d'électrification de tous les villages dès qu'ils présentent assez de ressources (déchets de ferme et d'agriculture).

I.4. SITUATION ENERGETIQUE DE MADAGASCAR [1][12][13][14]

Le secteur énergie à Madagascar est sous la tutelle du ministère de l'énergie et des mines (MEM). Il est en charge de 3 secteurs : le secteur minier, le secteur énergie, le secteur de l'eau et de l'assainissement.

Le Système électrique national est composé de réseaux interconnectés et de centres autonomes

I.4.1. Répartition des énergies produites

La Puissance totale installée est de 253 MW dont :

- 129 MW hydraulique (51%)
- 124 MW thermique (49%).

En 2003, le taux d'accès à l'électricité au niveau national était de 22,70%, dont :

- 3,2% en milieu rural
- 68,2% en milieu urbain

RESSOURCES PRIMAIRES	Quantité (en MTEP)	Quantité (en %)
Bois de feu	2047	76,4
Charbon de bois	201	7,5
Bagasse	64	2,4
Produits pétroliers	318	11,8
Electricité	41	1,5
Charbon minéral	8	0,3
TOTAL	2679	100 %

Tableau N° 3 : Répartition de la Production à Madagascar en 2004

I.4.2. Potentialités en ressources énergétiques renouvelables

Les potentiels en énergie solaire, énergie éolienne, et énergie hydraulique sont très importants.



a) Energie solaire

- Il existe plus de 2.800 heures d'ensoleillement annuel.
- L'énergie incidente est de l'ordre de 2.000 kWh/m²/an presque dans toute l'Ile.
- L'énergie solaire est souvent la seule alternative pour de nombreux sites isolés.
- Une quinzaine de programmes solaires photovoltaïques a vu le jour à Madagascar depuis 1990, soit plus de 1000 systèmes installés essentiellement en zones rurales pour des usages communautaires.
- La puissance totale installée et fonctionnelle est d'environ 300 kWc.

Cette énergie est actuellement exploitée à Madagascar pour :

- Le chauffage de l'eau,
- Le séchage des produits agricoles,
- La génération d'électricité pour télécommunication et éclairage,
- La conservation des médicaments et le pompage.

Le problème de l'énergie solaire photovoltaïque est le coût de l'électricité produite qui est de l'ordre de 2 US \$ par kWh produit auquel s'ajoute l'investissement initial minimum de l'ordre de 700 US \$.

La majorité des réalisations en matière d'électrification solaire à Madagascar viennent en appui aux activités sectorielles de développement social et communautaire en milieu rural. Le solaire devient une composante essentielle des programmes de santé mis en œuvre par l'Etat, les ONG et les bailleurs de fonds.

Cette filière trouve de plus en plus sa place dans les projets d'éducation. L'environnement, l'adduction d'eau, les télécommunications y ont recours pour leurs besoins d'électricité en sites isolés, parfois loin de toutes perspectives d'électrification.

b) Energie éolienne

A Madagascar, les applications de l'éolien concernent la production d'électricité distribuée sur les réseaux nationaux, mais également l'électrification rurale sur des zones isolées via des centrales hybrides éolien/diesel.

La puissance installée est très faible, environ 50 kW, dont une partie seulement est opérationnelle aujourd'hui.

Le potentiel s'avère excellent sur les zones côtières du Nord et du sud de l'île, mais le risque cyclonique est un argument limitant.

Les Vitesses du vent sont favorables pour des éoliennes d'aérogénérateurs ou de pompage d'eau :

- dans la Zone Nord : Vitesses moyennes annuelles du vent de 6 à 8m/s à 50m de hauteur
- dans la Zone Centre : Vitesses moyennes annuelles du vent entre 6 et 6,5m/s à 50m de hauteur
- dans la Zone Sud : Vitesse moyenne supérieure à 6 – 6,5m/s à 50 m de hauteur
- dans l'Extrême Sud: Taolagnaro, Tsihombe, Itampolo, Androka et Tanjona Vohimena, la vitesse moyenne du vent est supérieure à 8 – 9m/s à 50m.



c) Energie hydraulique

Le potentiel hydraulique du pays est de l'ordre de 7800 MW, mais seulement environ 105,5 MW sont exploités (2004). La production hydroélectrique est essentiellement répartie sur les réseaux interconnectés de Toamasina (6,8 MW), Antananarivo (91,4 MW) et Fianarantsoa (5,9 MW). La centrale d'Andekaleka est la plus importante avec une puissance nominale de 58 MW, parmi les 12 centrales en service raccordées au réseau de la Jirama.

Quelques centrales micro et pico hydrauliques sont en fonctionnement dans le pays, à destination de l'électrification rurale. On tient à citer l'exemple de la centrale autonome d'Antetezambato, d'une puissance de 42 kW.

Aucune nouvelle installation hydraulique raccordée au réseau national n'a vu le jour ces 10 dernières années, alors que la demande en électricité n'a cessé de croître. Face à cette demande, la réponse apportée fut la construction de centrales thermiques ; la part de l'électricité hydraulique ne cesse ainsi de décroître dans le bilan électrique national.

Confrontée à la hausse des prix des hydrocarbures dans un contexte économique national encore fragile, l'hydro-électricité regagne actuellement d'intérêt, et la stratégie nationale intègre à nouveau le développement de la filière. Elle prévoit ainsi un plan d'équipement de plusieurs centaines de MW hydrauliques répartis en 6 nouvelles centrales, dans le respect des objectifs du Programme d'Expansion à Moindre Coût (PEMC). Plusieurs opérateurs nationaux et internationaux étudient actuellement ces opportunités pour la mise en œuvre concrète des projets.

Grâce au relief marqué et la forte pluviométrie dans certaines zones, Madagascar regorge de rivières, fleuves et chutes d'eau, pouvant se traduire en un potentiel hydroélectrique énorme présent dans la majorité des régions. Une infime partie de ce potentiel reconnu est exploitée depuis plusieurs dizaines d'années. Le pays a ainsi développé un savoir-faire dans la technologie, qui présente aujourd'hui l'avantage d'être parfaitement maîtrisée localement et de produire une électricité peu coûteuse, couvrant plus de 65% des besoins.

Ces aspects confirment la pertinence du développement de cette filière pour répondre à court, moyen et long terme à une demande en électricité actuellement en forte croissance (près de 7% par an) et pour permettre le développement des zones rurales par l'accès aux services de l'électricité.

Le coût de fonctionnement est compétitif mais le coût du kW installé est très élevé (entre 2000 – 3000 US\$ / kW). L'électricité hydraulique est de loin la moins coûteuse, avec des coûts globaux actualisés de production entre 100 et 200 Ar/kWh.

- Les applications à Madagascar concernent la production d'électricité distribuée sur les réseaux nationaux (PDE : Production Décentralisée d'Electricité), ainsi que l'électrification rurale décentralisée sur des zones isolées (ERD : Electrification Rurale Décentralisée).
- La part de l'hydroélectricité dans la production nationale diminue de 76% à 65% pour la période 1998-2004.
- La technologie est fiable et parfaitement maîtrisée localement.



d) La biomasse

Les ressources en biomasse de Madagascar sont nombreuses, si on ne cite que le bois énergie, les déchets d'agriculture et de fermes.

A Madagascar, le bois énergie est utilisé quotidiennement par plus de 90% des habitants et représente plus de 75% de la consommation d'énergie primaire du pays.

On compte plus de 100 000 ha/an de déforestation pour le bois énergie à Madagascar ; et seulement 4 000 à 5 000 ha/an de reboisement depuis 1988 pour compenser cette consommation excessive.

La consommation de bois énergie pour la cuisson à Madagascar a été estimée en 2002 à 2273 ktep, les ressources ligneuses évaluées à 12 000 000 ha. Au rythme actuel de déforestation et en intégrant la croissance démographique ainsi que l'augmentation des besoins, cette ressource pourrait être amenée à disparaître dans quelques dizaines d'années si aucune mesure d'envergure n'est entreprise. La balle de riz est utilisée pour la cuisson des briques de construction.

Utilisé en électricité et pour la cuisson, le biogaz est une solution qu'on devrait développer à court terme.

La production de biogaz, issu des déchets d'origine animale et végétale, reste marginale mais est à encourager de part sa facilité d'accès en milieu rural.

Les ressources primaires pour ce faire ne sont pas en manque car nous disposons de grandes capacités en milieu rural. Madagascar possède de nombreuses fermes réparties dans tout le pays ; dans chaque région, on compte pas moins de centaines de milliers de têtes de bœufs et de porcs. De plus, l'agriculture promet de fournir régulièrement une quantité suffisante de déchets pour la production de biogaz et d'électricité.

I.4.3. Problèmes

- Les plantations en bois d'énergie n'arrivent pas à suivre la demande qui est toujours croissante (10 000 ha de déficit par an) ;
- Secteur principal de consommateurs d'énergie : Secteur résidentiel 64,6% ;
- L'offre en électricité fournie par la JIRAMA est quasi stationnaire depuis dix ans ;
- Faible utilisation de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne (photovoltaïque)
- L'accroissement des besoins en électricité a été satisfait par les importations des hydrocarbures.
- Le Coût de l'énergie est encore trop élevé ;
- Les Infrastructures électriques sont insuffisantes et vétustes ;
- La demande est en augmentation et difficile à satisfaire ;
- L'électrification rurale est ainsi une priorité nationale ;
- La solution de mise en place de systèmes thermiques dans les centres isolés est encore en cours.



Désignation	Basse tension	Moyenne et Haute Tension
Prime fixe	62 cents/ kWh/mois	6.2 à 8.2 USD / kWh/mois
Redevance Mensuelle	2.1 USD	27.4 à 42.5 USD
Coût de l'énergie	55 cents/kWh	2.8 à 4.8 cents kWh

Tableau N° 4 : Coût de l'électricité à Madagascar

I.5.DEVELOPPEMENT ENERGETIQUE DURABLE (DED) – ENERGIES RENOUVELABLES

I.5.1. Concept du Développement Energétique Durable (DED)

Conçu dans les années 1980 en réaction aux dommages causés à l'environnement naturel et humain par des modèles de développement irrespectueux des limites des systèmes, le concept de développement durable (DD) résulte de 40 ans de réflexion et d'analyses.

Son promoteur, la Commission mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED), le définit comme « un développement qui répond aux besoins des générations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ».

De nombreux secteurs de la société ont accaparé ce concept, chacun le mettant en valeur selon sa propre vision du monde et des affaires.

Entre le Sommet de Stockholm 1972 et celui de Johannesburg 2002, le monde a connu d'importants changements qui ont rendu plus harmonieuses les relations entre le développement (D) et l'environnement (E) :

- adoption de lois pour lutter contre la pollution et d'une réglementation afférente,
- mise en place des structures et D des capacités locales en matière de gestion de l'E et de DD,
- élaboration d'un nouveau mode de gouvernance fondé sur la participation, la transparence et la responsabilité aux échelles mondiales jusqu'à locales,
- transformation des modes de production industrielle s'orientant de plus en plus vers la réduction à la source des ressources et la mise en valeur des matières résiduelles,
- élaboration et mise en application des plans d'action environnementale et d'Agendas 21 nationaux et locaux.

L'évaluation environnementale, en particulier l'EIE, figure parmi les outils reconnus et essentiels permettant de tendre vers un DD.

Le secteur énergie figure parmi les plans d'action en matière de DD, c'est pourquoi on a mis en place un nouveau concept qui est le Développement Energétique Durable



(DED). Le DED travaille pour la gestion de l'exploitation des ressources énergétiques mondiales et locales.

I.5.2. Objectifs du DED

Les objectifs du développement durable pour le secteur énergie sont :

- La garantie de l'approvisionnement en électricité (meilleures conditions de sûreté et de prix) ;
- L'accélération de l'électrification urbaine et rurale;
- L'accroissement de l'accès à l'électricité en partenariat avec le privé (PARTENARIATS PUBLIC-PRIVE (PPPs)) ;
- La promotion des ressources d'énergies renouvelables (solaire, biogaz, éolienne et hydraulique).

I.5.3. Stratégies

Les stratégies mises en œuvre comprennent :

- La mise en place d'une loi portant sur la Réforme du secteur électricité
- L'utilisation des énergies renouvelables en remplacement progressif des énergies traditionnelles
- L'utilisation d'autres sources d'énergie autres que le pétrole (gaz butane, biomasse, solaire, éolienne et hydroélectricité)
- La Participation du secteur privé, conjuguée avec celle de l'Etat, par la mise en place d'octrois de concessions et le lancement d'Opérations de Production Privée d'Electricité (IPPs : Independant Power Producer's) par l'aménagement de nouvelles centrales hydroélectriques
- L'élaboration du Programme de développement de l'énergie hydraulique.

I.5.4. Plans d'action

Le plan d'actions mis en œuvre depuis 1998 comprend :

a) A court terme

Finalisation des différents textes sur la réforme du secteur énergie.

Mise en place de l'Office de Régulation de l'Electricité (ORE) qui sera chargé entre autres:

- d'assurer la régulation, le contrôle et le suivi des activités relatives au secteur de l'électricité
 - la mise en œuvre, le suivi et l'application des tarifs dans le respect des méthodes et procédures fixées par la législation et ses textes pris pour son application
 - de promouvoir la concurrence et la participation du secteur privé en matière de production et de distribution d'énergie électrique dans des conditions objectives, transparentes et non discriminatoires



- de veiller au respect par les opérateurs du secteur de l'électricité, des conditions d'exécution des contrats de concession et d'autorisation.

Cas de Madagascar :

- Mise en place du Fonds National de l'Electricité (FNE) créée par la Loi N° 2002-001 du 7 octobre 2002 qui sera destiné à financer en partie les programmes de développement de l'Electrification Rurale et sur lequel seront prélevées des subventions d'investissements accordées aux exploitants titulaires d'Autorisation ou de Concession, pour un montant n'excédant pas 70% du total des investissements.
- Mise en place d'une Agence pour le Développement de l'Electrification Rurale (ADER) qui aura pour rôle principal de :
 - promouvoir la fourniture de services tels que l'électricité, la téléphonie, la télévision ... exécutée par des opérateurs privés
 - superviser et financer les projets d'Electrification Rurale grâce aux ressources du FNE
 - fournir une assistance technique aux opérateurs
 - assurer le suivi et l'évaluation socio-économique et environnementale des projets
 - inciter et promouvoir l'émergence et la structuration du secteur.
- Restructuration de l'entreprise JIRAMA pour faire face à la concurrence.
- Démarrage du programme d'électrification rurale avec l'appui du FNE et de l'ADER : électrification d'environ 150 villages par an.
- Lancement des opérations de Production Privée d'électricité (IPPs) : aménagement des nouvelles centrales hydroélectriques.

b) A moyen terme

Renforcement des actions à faire instaurer la vérité des prix des produits pétroliers en libéralisant totalement les activités d'importation, de raffinage et de commercialisation et en stimulant la concurrence pour éliminer toute forme de protection, de subvention sur toute la chaîne de l'activité pétrolière ;

Normalisation des impôts sur les produits pétroliers ;

Mise en oeuvre d'un programme visant à promouvoir le gaz et le pétrole lampant pour la cuisson et l'éclairage en milieu rural au titre d'énergie de substitution au bois ;

Amélioration de l'exploitation, la transformation, l'utilisation et le commerce du bois énergie.



Cas de Madagascar :

- Extension du projet Programme Pilote Intégré de Mahajanga (PPIM) et du Programme National d'Économie de Bois d'Énergie (PNEBE) dans les autres Provinces Autonomes afin de :
 - rationaliser l'exploitation forestière grâce à la politique volontariste d'aménagement des forêts existantes
 - maîtriser la demande en bois d'énergie grâce à la vulgarisation et à la diffusion des foyers économies, et à la promotion d'énergie de substitution : gaz, pétrole lampant, valorisation des déchets.
- Développement d'un programme d'utilisation rationnelle de l'énergie (PURE) comme la vulgarisation de la lampe à basse consommation, la co-génération dans les usines de sucrerie,...
- L'introduction de la concurrence à moyen et long terme (production, transport, distribution et commercialisation)
- La mise en œuvre de nouvelles bases de fixation des prix de l'électricité, à savoir :
 - les Prix à la production sont déterminés par la concurrence
 - les Prix au niveau du transport et de la distribution sont réglementés avec fixation de prix plafonds.

I.5.5. Propositions dans les ateliers du colloque de La Réunion [1]

- Un programme commun de coopération des îles, des régions et départements autonomes en énergie, sur la période 2005 – 2050 ;
- Partager toutes les connaissances par le biais d'une plateforme technique et stratégique commune ;
- Etat et perspectives des filières technologiques, des métiers, formations et activités de Recherche & Développement dans les domaines solaire thermique, biomasse et solaire PV ;
- Régulation des systèmes énergétiques insulaires ;
- Maintenir un équilibre Production = Consommation dans les îles pour le développement à grande échelle des sources d'énergie intermittentes (sécurisation des réseaux insulaires) ;
- Planifier le déploiement de la production décentralisée d'énergie à grande échelle,
- Besoin de stockage d'énergie pour sécuriser le réseau, nécessité des études comparatives pour évaluer les options de stockage ; technologie Hydrogène, batterie de puissance, ressource hydraulique (en couplage avec des sources d'énergies renouvelables),
- Suivre de près les progrès de la recherche dans le domaine de la régulation des moyens de production décentralisés par des boucles de commande et de contrôle de la production et de la consommation électrique en quasi temps réel.
- Aménager, construire et transporter pour effacer la croissance annuelle de la demande en énergie.



- Limiter les consommations d'énergie dans les constructions et les transports
- L'aménagement du territoire doit prendre en compte la maîtrise de l'énergie et les énergies renouvelables
- Jouer sur l'Eco-conditionnalité des subventions : fournir de l'énergie de bonne condition environnementale
- Favoriser les transports en commun et défavoriser les véhicules particuliers
- Développer les biocarburants,
- Mettre en place des plans de déplacement (entreprises et écoles),
- Création d'une centrale « mégawatts », pour effacer annuellement au moins la moitié de la croissance de la demande en énergie de l'île ;
- Mise en oeuvre d'une centrale à énergies renouvelables diversifiées et décentralisées, dont la puissance installée croît chaque année à minima de 10 MW ;
- Promotion des investisseurs privés.

I.5.6. Proposition de solutions pour le DED à Madagascar [1]

D'après les expériences des îles de la planète et pour faire face à la situation critique de l'approvisionnement énergétique à Madagascar, nous proposons :

- La gestion rationnelle et durable de l'énergie à Madagascar ;
- Préoccupations pour tous : citoyens, universitaires, décideurs publics, opérateurs privés, bailleurs de fonds ;
- Mise en place d'un Plan énergétique National d'Utilisation Rationnelle de l'Energie et d'Exploitation des Energies renouvelables ;
- Gestion des plantations bois – énergie ;
- Rationalisation de la filière bois énergie dans toutes ses étapes ;
- Intensifier la diffusion de foyers économies déjà réalisés (LAFATRA métallique, MITSITSY, DAGO mixte... ;
- Briquettes de biomasse ;
- Cuiseurs solaires ;
- Diversifier les sources électriques (substituer progressivement les énergies renouvelables aux combustibles fossiles importés) ;
- Diminuer les pertes techniques et commerciales ;
- Les projets de biocarburants ;
- Diminuer la consommation du secteur résidentiel :
- Atteindre la maîtrise de la demande en électricité
- Projet d'utilisation des lampes basses consommations
- Disséminer des bonnes pratiques énergétiques et environnementales ;
- Soutenir les projets d'investissement dans le secteur des économies d'énergie et des énergies renouvelables ;
- Autonomie énergétique.

Au niveau national, Madagascar a choisi la relance de l'économie libérale, se traduisant par l'ouverture aux investisseurs et le désengagement de l'Etat dans le domaine de l'énergie.



I.6.ELECTRIFICATION DECENTRALISEE

I.6.1. Introduction

Un des grands problèmes qui freine le développement industriel dans le milieu rural est l'absence d'électricité. Ce handicap concerne toutes les parties isolées ou éloignées des réseaux électriques existants et risque d'affecter, à long terme, l'économie de la région et même du pays tout entier.

Certes, le manque d'énergie électrique empêche les investisseurs d'implanter leurs usines dans ces zones qui en ont pourtant besoin, pour pouvoir transformer sur place les produits locaux afin d'en tirer meilleur profit.

L'établissement de nouvelles lignes de transport vers ces zones éloignées engendre des coûts assez élevés. Par ailleurs, l'utilisation des centrales actuellement en service, notamment celles de la JIRAMA, pour satisfaire tous les besoins au niveau national, n'est pas possible car la puissance installée n'est pas en mesure de satisfaire toutes les demandes en électricité.

La seule solution réalisable à court terme est donc d'établir des systèmes d'électrification décentralisée dans les milieux qui en ont le plus besoin et qui présentent un potentiel économique élevé.

Il y a déjà beaucoup d'études faites par les acteurs du développement énergétique quant aux moyens de réaliser ce premier pas vers l'industrialisation des milieux ruraux. Certaines de ces recherches ont été réalisées avec succès, d'autres en cours d'amélioration ou en attente d'un financement. Mais la plupart des systèmes d'électrification mis en place récemment sont uniquement à titre d'essai, pour inciter les dirigeants, qui hésitent encore à donner de l'élan au secteur énergie, à financer ces projets qui sont pourtant une bonne voie vers le développement durable.

I.6.2. Le système hybride

a) Concept

La nouvelle politique énergétique développée actuellement est de réduire autant que possible l'utilisation des anciennes sources d'énergie fossile comme le pétrole, le charbon et le bois, mais de s'orienter plutôt vers les sources d'énergies renouvelables. Cette approche met en évidence la possibilité d'utiliser à la fois plusieurs sources d'énergies renouvelables disponibles sur un site donné.

Les principales raisons de cette nouvelle politique sont :

- Les anciennes sources d'énergie utilisées auparavant deviennent de plus en plus rares et n'arriveront plus à satisfaire les demandes en énergie, qui ne cessent de s'accroître, dans quelques années ;



- Les énergies renouvelables existent en de très grandes quantités et ne risquent pas d'être épuisées ;
- Elles sont moins polluantes (préservation de l'environnement).

b) Mise en place des systèmes hybrides

Nous avons vu plus haut qu'une des raisons qui retardent l'électrification des communautés rurales est le manque de financement de la part du gouvernement. Ainsi, afin d'accélérer le développement et la mise en œuvre des infrastructures nécessaires à l'approvisionnement en électricité des régions éloignées, il a été adopté une nouvelle stratégie pour réduire le coût des investissements, sans poser de problèmes sur la satisfaction de la demande.

Cette stratégie consiste à combiner deux ou plusieurs sources d'énergie pour fournir de l'électricité, et éventuellement d'autres formes d'énergies secondaires, sur un même site. Ce complexe est appelé « système hybride ».

La base du concept est d'utiliser toutes les ressources disponibles du milieu considéré, notamment les énergies renouvelables, pour satisfaire les demandes de la population. Le but général étant de garder le rapport production/consommation sensiblement égal à l'unité.

L'application des systèmes hybrides est diversifiée et est adaptée aussi bien à la vie paysanne que pour les banlieues non encore électrifiées. Ces centrales sont utilisées dans différents domaines, entre autres : l'éclairage public et domestique, le pompage de l'eau, des applications diverses dans les maternités et les écoles publiques, ...

c) Les différentes sources utilisables

L'étude et la conception d'un système hybride varient selon le lieu géographique et le potentiel énergétique de l'endroit considéré. Les sources utilisées pour un site peuvent ne pas correspondre à un autre, donc il faut une nouvelle étude pour une nouvelle installation. Les conditions climatiques jouent un rôle très important dans le choix des sources, et le budget des bénéficiaires limite la puissance totale à installer.

Les sources principales les plus utilisées en milieu rural sont :

- le solaire photovoltaïque,
- les aérogénérateurs (éoliennes),
- les différentes installations de biogaz,
- et la turbine hydroélectrique.

Chacune de ces sources peut être choisie comme source principale. Elles peuvent être combinées entre elles ou avec d'autres sources pour satisfaire la demande et pour respecter le rapport production/consommation. La source d'énergie pouvant être utilisée comme appoint est le groupe diesel.



Chapitre II. LES DIFFERENTS MOYENS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

II.1. INTRODUCTION

Actuellement, l'énergie électrique est la plus demandée parmi toutes les autres formes d'énergie, sans doute à cause de sa grande variété d'applications. C'est pourquoi nous allons consacrer ce chapitre à l'étude de la production d'électricité.

Les techniques et technologies sur la production et l'exploitation de l'électricité étaient développées au cours du XIX^e siècle. L'électricité est produite dans les centrales électriques au moyen d'un turboalternateur à eau, à vapeur, ou sous l'action du vent.

Au fil des temps, les chercheurs ont inventé différents appareils pour produire de l'électricité à partir d'autres formes d'énergie. Ils diffèrent seulement par la façon de faire tourner l'alternateur. Nous allons énumérer ci-après les principaux procédés et expliquer leurs principes de fonctionnement.

II.2. LA CENTRALE THERMIQUE

Dans une telle centrale, on utilise des groupes électrogènes qui marchent grâce à la combustion de matériaux organiques fossiles (pétrole, charbon, gaz) : l'alternateur est accouplé avec un moteur thermique qui est aussi appelé moteur à combustion.

Nous allons voir les éléments constitutifs d'un groupe électrogène avec les différentes versions technologiques mises sur le marché.

II.2.1. Le moteur d'entraînement

Le moteur est l'élément essentiel qui détermine la puissance maximale que peut délivrer un groupe. Certes, c'est en fonction de l'énergie mécanique produite par le moteur d'entraînement que dépend l'énergie électrique délivrée par l'alternateur accouplé à celui-ci : plus le moteur est puissant, plus il supporte un alternateur pouvant débiter sur une charge importante.

Mais la caractéristique la plus importante du moteur d'entraînement est la vitesse. Cette vitesse doit être gardée constante sous la fluctuation de la charge afin d'assurer une production continue et stable.

a) Principe de fonctionnement du moteur diesel

Généralement, un moteur à combustion interne ou diesel fonctionne comme suit : un mélange de carburant (gas-oil) avec l'oxygène de l'air est soumis à une très forte pression jusqu'à la combustion du mélange qui va produire une force de pression sur un piston, le conduisant ainsi à faire un mouvement rectiligne dans le cylindre. Selon le



fabricant, le mélange combustible peut se faire avant l'injection ou bien dans la chambre de combustion.

Le mouvement de translation du piston est ensuite transformé en un mouvement de rotation par le système bielle manivelle, qui fera tourner l'arbre du moteur.

On récolte alors l'énergie mécanique de rotation sur l'arbre moteur.

b) Les différents types de moteurs diesel

On peut classer les moteurs en fonction de leurs technologies de fabrication. Parmi les techniques que chaque fabriquant utilise, les plus importantes sont :

* Le mode d'admission d'air :

Le contrôle du débit d'air est très important car il limite la quantité de carburant entrant en combustion, donc le volume total du mélange. Un débit d'air élevé implique plus de mélange combustible, donc la force qui en émane sera plus grande. D'où l'utilisation des dispositifs accélérant l'arrivée d'air dans les nouveaux moteurs.

On considère deux types de moteurs selon le mode d'admission d'air :

- le moteur normal : c'est un moteur classique dont la quantité d'air qui entre en combustion dépend uniquement des conditions atmosphériques du milieu où il se trouve : on a une circulation normale de l'air ;

- le moteur suralimenté : c'est une technologie qui utilise un dispositif appelé TURBO. Ce système récupère les gaz d'échappement du moteur pour pomper l'air à travers une turbine, augmentant ainsi le débit d'air à l'entrée du filtre à air. Notons que dans ce cas, l'air aspiré doit être refroidi avant d'être mélangé au carburant.

* Le système de refroidissement :

Comme le moteur est un système dynamique de grande puissance, le mouvement de ses organes provoque un échauffement considérable qui peut nuire au bon fonctionnement et provoquer de sérieux dégâts à long terme. Il est donc nécessaire d'étudier l'amélioration des systèmes de refroidissement.

Dans la plupart des cas, le refroidissement des moteurs se fait par la circulation de fluide (souvent de l'eau) à l'intérieur de ceux-ci. A l'entrée, l'eau est portée à une température suffisamment basse pour pouvoir accumuler la chaleur des parties internes du moteur où elle passe. Au fur et à mesure qu'elle parcourt le circuit, cette température augmente jusqu'à la sortie de la culasse.

Le but est donc de créer un système formant une boucle fermée qui consiste à ramener l'eau usée à la température nécessaire en entrée. C'est la réalisation de ce système qui différencie les modes de refroidissement des moteurs.

On distingue :

- le refroidissement air - eau : on utilise un souffle d'air donné par un ventilateur pour refroidir l'eau qui passe à travers un radiateur. Le ventilateur peut être monté directement sur l'arbre du moteur considéré, ou sur un moteur électrique auxiliaire alimenté par l'alternateur du groupe.



- Le refroidissement eau - eau : l'eau circulant dans le moteur est refroidie lors de son passage dans un échangeur thermique qui est lui-même refroidi en permanence par de l'eau à basse température reliée à une source extérieure (bassin ou rivière).

* La disposition des cylindres :

Le nombre et la taille des cylindres (alésage, course du piston) déterminent la puissance du moteur : plus le volume de la chambre de combustion est grand, et plus le moteur est puissant.

- Cylindres *en ligne* : c'est la disposition classique où les cylindres sont alignés sur une seule rangée. Le nombre de cylindres pouvant être implantés sur une longueur donnée est donc limité par la taille de leur diamètre.

- Cylindres *en V* : dans ce cas, les cylindres sont disposés sur deux rangées décalées d'un certain angle. On a alors deux fois plus de puissance avec le même espace. Mais le carburant consommé va aussi augmenter.

* Le système de démarrage :

Une fois que la combustion a commencé, le moteur diesel n'a plus besoin d'énergie extérieure pour pouvoir fonctionner. Le problème est donc de donner cette première réaction.

Le démarrage d'un moteur à combustion peut se faire en tournant le volant moteur, soit à l'aide d'un moteur électrique, soit par air comprimé.

Dans le premier cas qui est maintenant le plus utilisé, un moteur électrique alimenté par une ou des batteries actionne le volant moteur au moment du démarrage. Quand le groupe est lancé, l'alimentation du moteur électrique est coupée jusqu'au prochain redémarrage.

La seconde option a été abandonnée maintenant et on ne voit plus ce système que dans les anciens moteurs. On injecte de l'air comprimé sur les pales d'une sorte de turbine solidaire au volant moteur. L'action est répétée jusqu'à ce que le moteur démarre complètement.

II.2.2. L'alternateur

L'alternateur est une machine électrique tournante. Utilisant l'énergie mécanique fournie par le moteur d'entraînement, il délivre à ses bornes une tension alternative sinusoïdale. Le rôle de l'alternateur est donc de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

a) Principe de fonctionnement

L'appellation « machine tournante » est due au fait que, dans l'alternateur, il y a une partie fixe et une partie qui tourne autour d'un axe. Cet axe correspond à celui de l'arbre entraîné en rotation par le moteur. Mais l'alternateur proprement dit est accouplé au bout du moteur pour former le groupe électrogène, donc il est immobile par rapport à un certain système d'axes de l'espace.



La fréquence du courant produit est donnée par la formule générale :

$$F = n.p/60$$

Où n est la vitesse de rotation en [tr/min] et p le nombre de paires de pôles de la machine. D'après cette formule, on voit que la qualité du courant obtenu dépend principalement de la vitesse, donc de la faculté du moteur d'entraînement à garder un régime constant, quelle que soit la charge appliquée au groupe.

b) Les différentes parties fonctionnelles de l'alternateur

* L'inducteur :

C'est un ensemble de bobinages qui a pour rôle principal de créer un champ magnétique bien réparti (excitation).

Dans la plupart des cas, les bobines sont alimentées par un courant continu qui est soit prélevé à l'énergie produite par l'alternateur lui-même, soit donné par une autre source d'énergie électrique (batterie ou alternateur auxiliaire accouplé au bout de l'arbre).

Souvent, l'inducteur est enroulé sur le *rotor*, c'est-à-dire la partie tournante de l'alternateur, produisant ainsi un champ tournant. La liaison des bobines avec la source d'alimentation se fait alors par un système de balais et collecteur.

On utilise aussi l'inducteur pour ajuster certaines valeurs caractéristiques du courant à la sortie de l'alternateur. En agissant sur sa tension d'alimentation, on varie le champ créé, c'est-à-dire l'excitation : c'est la façon de corriger la valeur de la tension générée par le groupe.

* L'induit :

Les bobinages de l'induit sont le siège d'une force électromotrice induite, sous l'action du champ magnétique créé par l'inducteur, d'après la loi généralisée d'un conducteur placé dans un champ magnétique.

L'induit est placé sur les pôles du *stator*, et les bouts des fils qui le composent sont reliés à une plaque à bornes fixée à l'extérieur du châssis. Toutes les extrémités des fils sont sorties sur la plaque afin de pouvoir effectuer manuellement le couplage (en étoile ou en triangle) en fonction de la tension qu'on veut avoir.

La section des conducteurs de l'induit est calculée de façon à supporter une intensité du courant assez grand, en fonction de la puissance nominale du groupe.

II.2.3. La cogénération - la trigénération [7]

Les centrales thermiques peuvent être utilisées pour une production combinée d'électricité et de chaleur (eau chaude ou vapeur) : c'est la cogénération. L'intérêt majeur de la cogénération est l'augmentation du rendement de conversion de l'énergie primaire (bois, charbon, biomasse ou gazole), passant de 25-40% en production d'électricité uniquement à 80-90% en cogénération.

La cogénération est une des technologies les plus prometteuses pour satisfaire les critères de meilleure efficacité énergétique et de moindres émissions de gaz à effet de serre, en utilisant un groupe électrogène. Cette technique permet de satisfaire les usines



agroalimentaires et de transformation de bois qui ont des besoins simultanés de chaleur et d'électricité.

Les grandeurs caractéristiques d'un groupe de cogénération sont :

- Le rendement électrique, c'est-à-dire le facteur de conversion de l'énergie primaire consommée en électricité
- Le rendement thermique, c'est-à-dire le facteur de conversion de l'énergie primaire consommée en chaleur
- Le ratio électricité/chaleur (souvent noté E/Q), c'est-à-dire le rapport entre l'électricité et la chaleur produites par le groupe. Il influence le choix du groupe de cogénération en fonction de l'application visée (plus d'électricité ou de chaleur).

Principe :

Pendant leur fonctionnement, les moteurs thermiques produisent des grandes quantités de chaleur qui ne sont pas valorisées, dans les gaz d'échappement et le système de refroidissement. Le principe de la cogénération est de récupérer cette chaleur pour avoir d'autres produits tels que l'eau chaude sanitaire, le chauffage et la vapeur basse pression.

La chaleur produite par la cogénération peut ensuite être valorisée pour la production de froid : c'est la trigénération. Elle est surtout exploitée dans les pays tropicaux pour réduire la facture énergétique consommée pour la climatisation et la conservation des aliments.

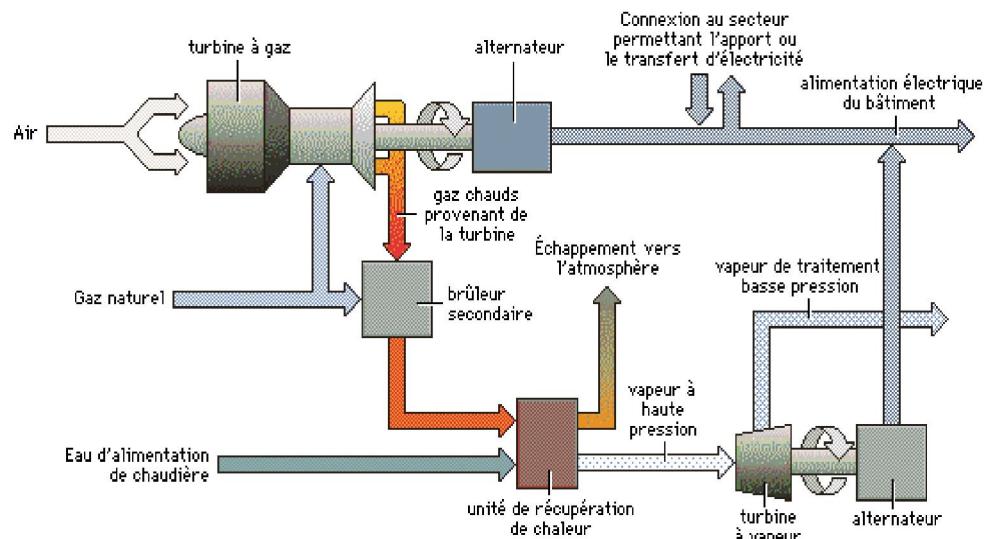


Figure N° 3 : Principe de la cogénération utilisant une turbine à gaz.

II.2.4. Impact environnemental

Le pétrole a toujours été considéré comme une source d'énergie polluante, depuis son extraction jusqu'à l'utilisation. Il n'en est pas moins pour ses dérivées.



Bien que le groupe diesel soit la principale source d'électricité dans les pays en voie de développement, il est très polluant et émet des gaz nocifs. De plus, le fonctionnement d'un groupe diesel est toujours caractérisé par le bruit qu'il fait, ce qui est très ennuyeux et peut altérer la santé.

L'émission de gaz CO₂ du groupe diesel lors de la production d'électricité est de l'ordre de 800 à 1000 g/kWh.

Dans la recherche de solutions pour réduire les impacts négatifs du groupe diesel sur l'environnement, la cogénération peut prendre une place importante car le pourcentage d'émissions de CO₂ va diminuer.

II.3. LA CENTRALE HYDROELECTRIQUE

Dans ce cas, on récupère l'énergie mécanique de l'écoulement de l'eau pour faire tourner une turbine qui va, à son tour, entraîner l'alternateur.

Généralement, les centrales hydro-électriques sont implantées dans des sites présentant une chute d'eau assez considérable, le plus souvent le long d'un fleuve ou d'une rivière. Mais il existe aussi des centrales installées au bord de la mer dont la force motrice est celle des vagues (usine marémotrice).

II.3.1. Les centrales hydroélectriques à retenue d'eau

La centrale est reliée à un grand réservoir d'eau situé en amont du barrage dont le débit peut être contrôlé et le niveau maintenu constant.

L'eau est transportée par des conduits, appelés canaux d'amenée qui sont des canalisations forcées, commandés par des vannes ou des portes de turbine, afin que l'on puisse contrôler le débit en fonction de la demande en énergie. Elle passe ensuite dans les turbines et est évacuée par une galerie d'évacuation.

Les générateurs d'énergie sont directement installés au-dessus des turbines sur des axes verticaux. La conception des turbines dépend de la charge d'eau disponible, les turbines Francis étant utilisées pour les charges élevées et les turbines à hélice pour les charges légères.

II.3.2. Les centrales hydroélectriques au fil de l'eau

Contrairement aux centrales de type réservoir, qui ont besoin d'une importante retenue d'eau, les usines hydroélectriques dites « au fil de l'eau » peuvent fonctionner dès que la hauteur de chute et le débit constant sont suffisamment importants (supérieure à 5m).

On installe un barrage au point culminant de la chute. Pour augmenter la pression dans la descente, l'eau est dirigée dans une canalisation forcée ; on peut ainsi contrôler le débit d'eau frappant les pâles de la turbine.

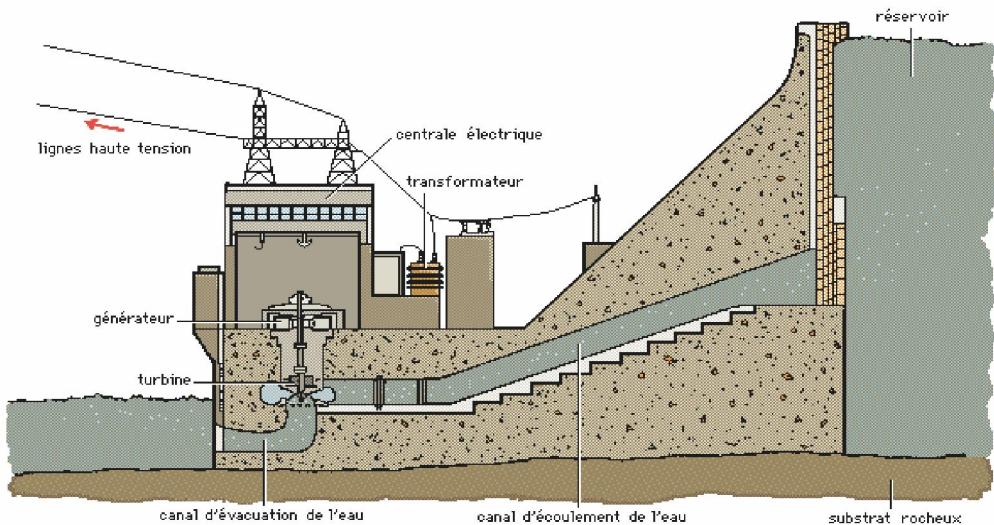


Figure N° 4 : Coupe d'un barrage hydroélectrique

II.3.3. Les centrales marémotrices [14]

Cette technique est encore moins exploitée que les deux premières.

L'usine marémotrice de la Rance située sur l'estuaire de la Rance, en Bretagne est la première usine de ce type au monde. Elle fut mise en service en 1967. La centrale utilise l'énergie des marées pour produire de l'électricité. Un barrage d'une longueur de 750 m coupe l'estuaire, isolant un bassin de la mer. À cet endroit, la dénivellation entre la marée basse et la marée haute est de 13,5 m. Le bassin a une superficie de 22 km² ; son volume utile (entre 0,00 et + 13,5 m) est de 184 millions de m³ ; le débit de pointe correspondant est de 15 000 m³/s à la mi-marée. La marée actionne des turbines spécifiques, les 24 groupes bulbes, d'une puissance de 10 MW chacun. Ils sont constitués d'un alternateur et d'une turbine Kaplan tournant à 94 tr/min. Ils turbinent et pompent dans les deux sens : pendant la phase de remplissage du bassin lors de la marée montante, et en sens inverse pendant la phase de vidage, à marée basse. Une écluse est implantée dans la pointe sur la rive gauche (longueur du sas, 65 m ; largeur, 13 m ; radier à la cote + 200). La centrale produit 544 millions de kWh/an.



Figure N° 5 : Usine marémotrice de la Rance

II.3.4. Les turbines hydrauliques

Les turbines hydrauliques convertissent l'énergie potentielle ou cinétique d'une masse d'eau en énergie mécanique.

La turbine Kaplan est dotée d'une hélice à pales mobiles. En s'écoulant, l'eau provoque la rotation de l'hélice, qui entraîne l'arbre de la turbine. La turbine Pelton fonctionne selon le principe de la roue à eau.

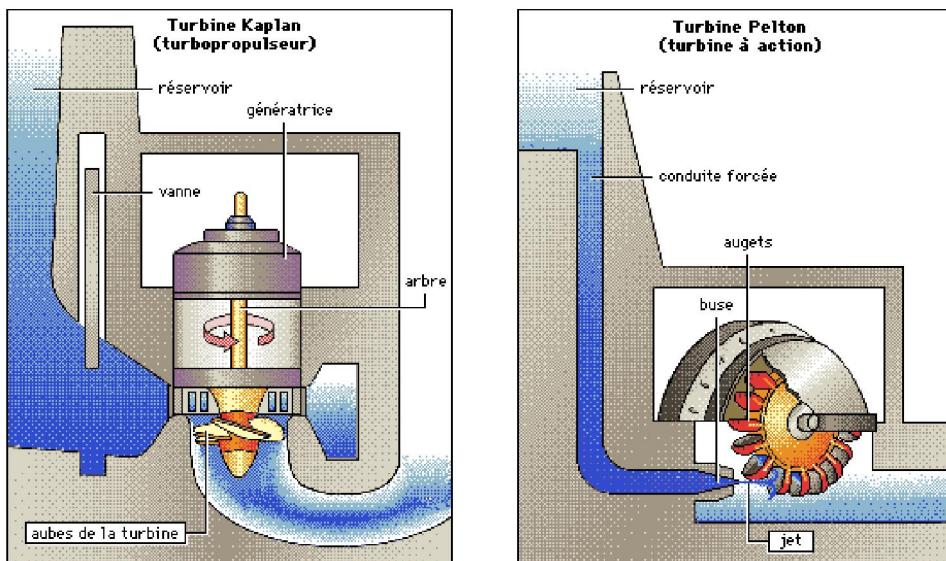


Figure N° 6 : Turbines Kaplan – Turbine Pelton

II.3.5. Impact environnemental

L'hydroélectricité est une énergie propre et à 100% renouvelable.

On peut installer des centrales de 1kW à plusieurs milliers de MW, ce qui permet de bien gérer les ressources disponibles et d'éviter les surdimensionnements.

La pollution en CO₂ engendrée par une centrale hydroélectrique n'est que de 5 g/kWh.

Mais son exploitation a un mauvais impact environnemental et paysager important, à cause de la modification de la trajectoire et du débit d'eau des fleuves, et surtout de l'état des eaux usagées.

On doit donc résoudre les problèmes causés par l'utilisation d'une turbine hydraulique par un traitement des eaux usagées avant de les évacuer dans la nature.

II.4. L'INSTALLATION DE BIOGAZ [13][15]

Le biogaz est un extrait d'énergie de la biomasse, par le procédé de méthanisation. Le biogaz peut être traité partout où il y a des déchets recyclables ou non. D'après le type de déchets traités, on distingue plusieurs types d'installation de biogaz.



II.4.1. Le biogaz agricole

On récupère les déchets organiques des fermes (lisier, fumier, litière) et des cultures (paille de canne, déchets de taille fruitière...) dont le stockage et la manutention sont faciles.

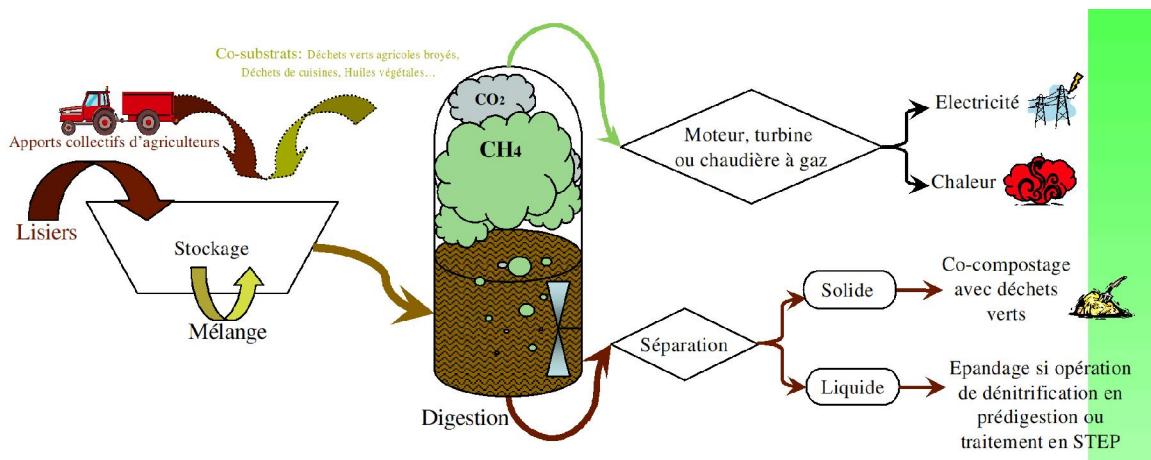


Figure N° 7 : Principe d'une installation de biogaz

II.4.2. Le biogaz industriel

La méthanisation joue un double rôle dans le traitement des effluents industriels car en produisant de l'énergie utile à partir de ces déchets, il diminue leur charge organique et rend plus hygiéniques les matériaux à forte charge.

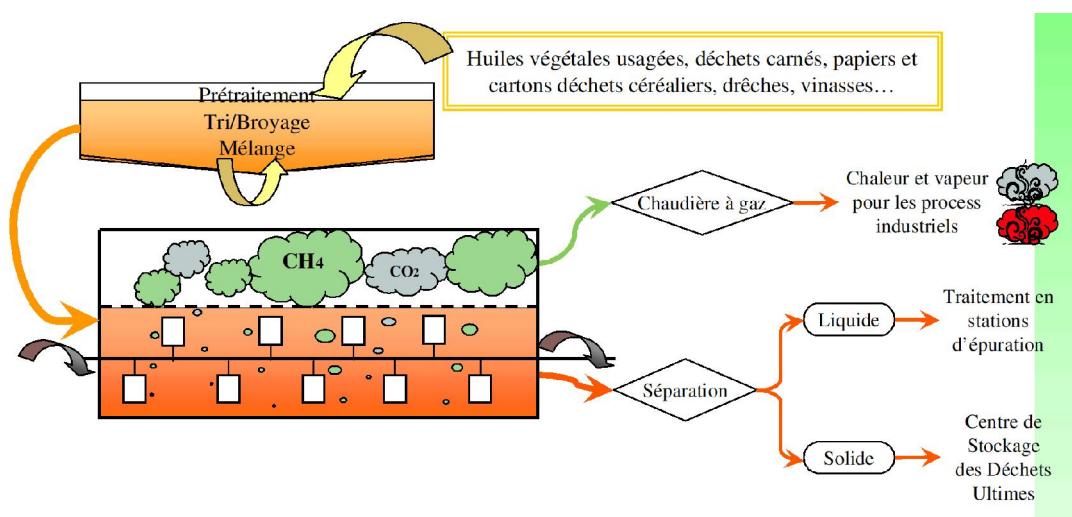


Figure N° 8 : Principe d'une installation de biogaz



II.4.3. Le biogaz de station d'épuration

On peut aussi produire du biogaz dans les stations d'épuration en valorisant les déchets laissés par les eaux polluées avant d'être évacuées dans la nature.

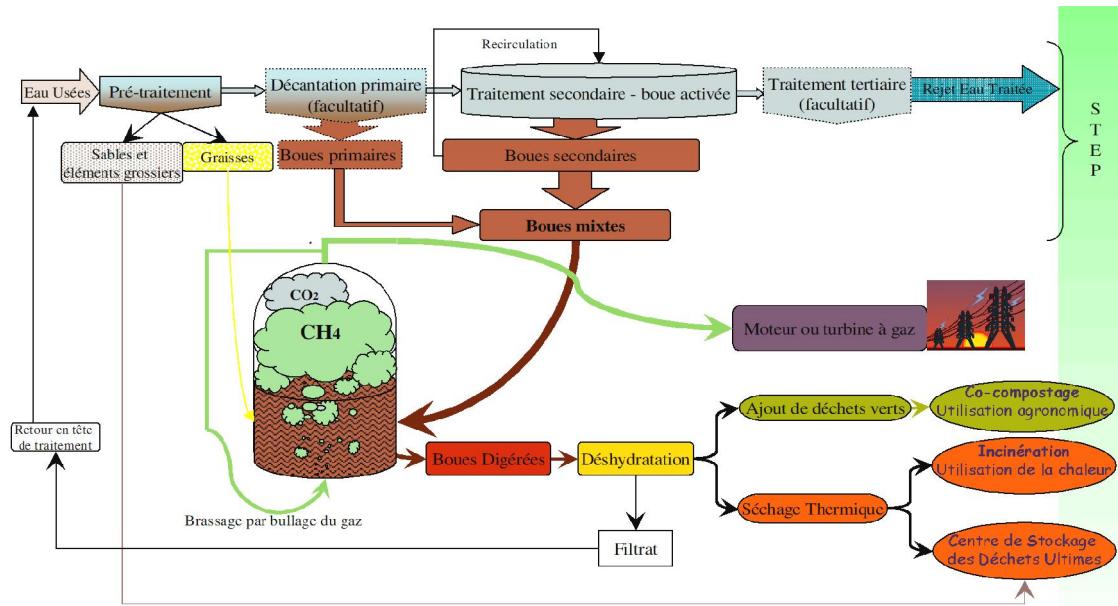


Figure N° 9 : Principe d'une installation de biogaz dans un centre d'épuration

II.4.4. Le biogaz ménager

Les ordures fermentescibles des particuliers dégagent du gaz semblable à celui obtenu par méthanisation ; donc on peut les utiliser comme source de biogaz.

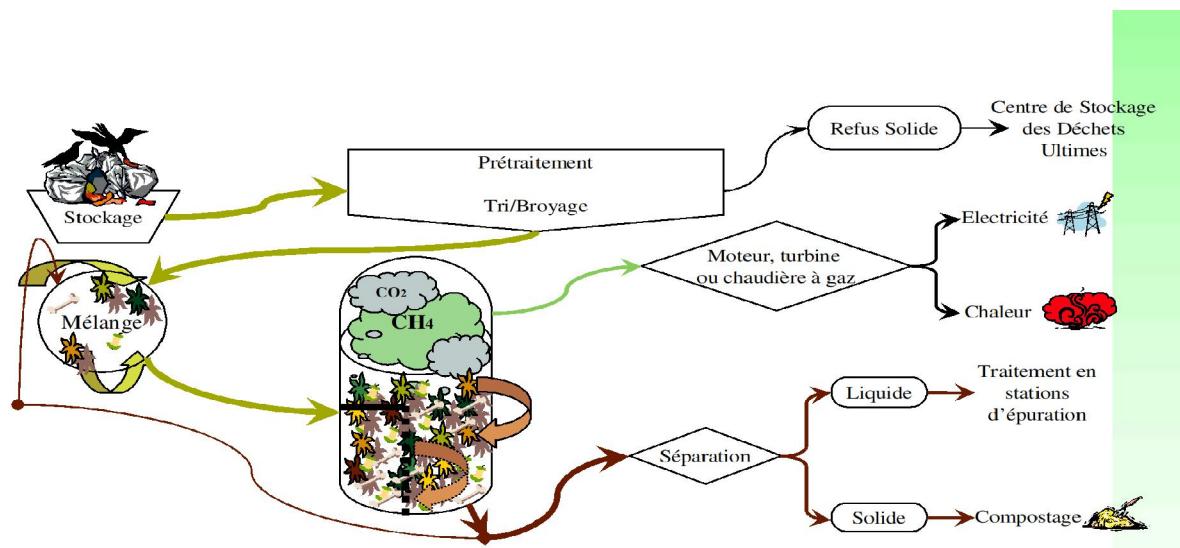


Figure N° 10 : Principe d'une installation de biogaz à partir des ordures ménagères



II.4.5. La filière bois énergie

C'est l'ensemble des ressources ligneuses d'origine forestière, urbaine ou agricole. La valorisation de l'énergie contenue dans le bois par le procédé illustré améliore le rendement par rapport à l'utilisation classique du bois dans les différentes applications domestiques.

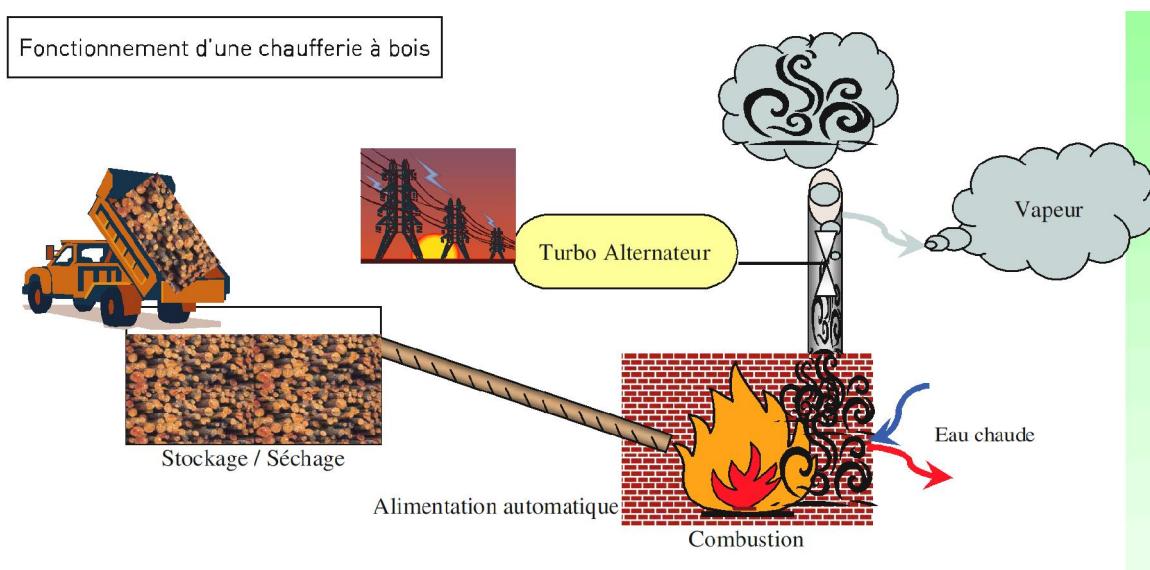


Figure N° 11 : Principe d'une installation utilisant le bois comme source d'énergie

II.4.6. Le biocarburant

Il est obtenu à partir des plantes ayant une propriété énergétique élevée. Selon la nature de la plante utilisée, on distingue le bioéthanol et le biodiesel.

Les différentes étapes de valorisation de l'énergie contenue dans les matières organiques végétales sont montrées sur la figure suivante, ainsi que leurs applications respectives.

Cette filière commence à prendre son élan, surtout avec le développement de la culture du Jatropha, dont l'étude des techniques de valorisation a été récemment achevée par les chercheurs, à savoir un professeur de l'E.S.P.A.

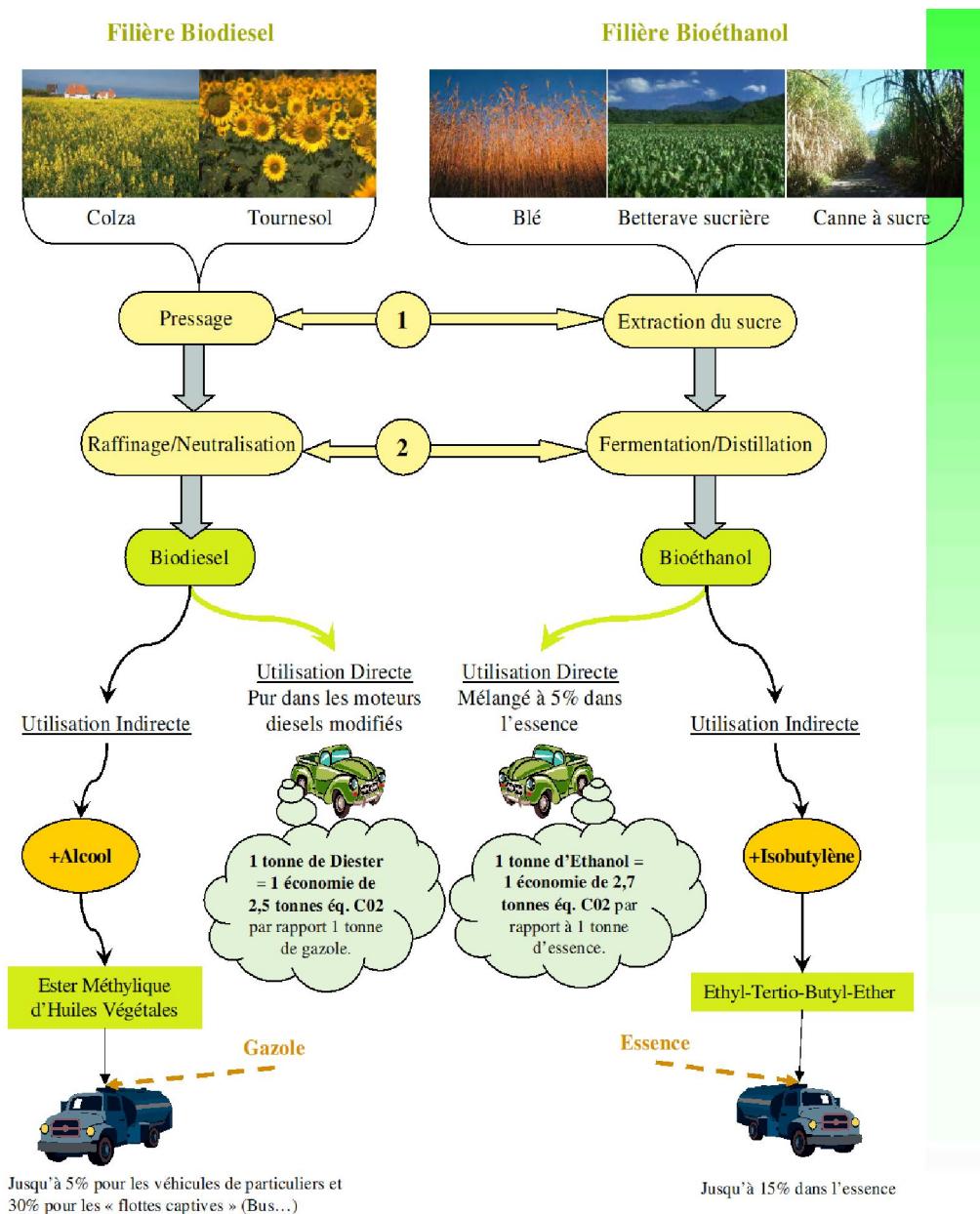


Figure N° 12 : Principe de l'extraction de biocarburant

II.4.7. Le complexe bagasse charbon

La bagasse, qui est une matière fibreuse issue de la canne à sucre après extraction du jus, est brûlée dans une chaudière par laquelle on récupère de la vapeur pour faire tourner un turboalternateur.

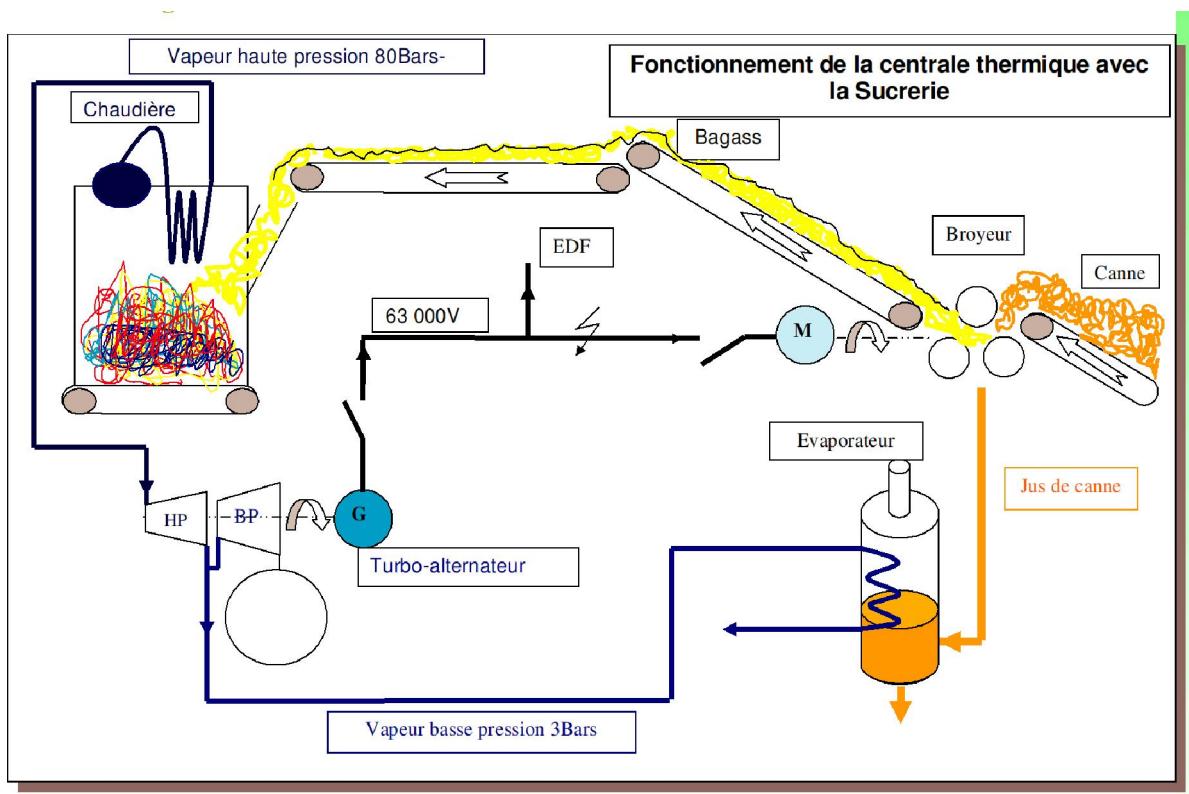


Figure N° 13 : Principe d'une installation complexe bagasse-charbon

D'après ces illustrations, on peut résumer les parties fonctionnelles d'une installation de biogaz :

- Une unité de stockage des déchets
- Une station de méthanisation ou une chaufferie
- Un système d'accumulation de l'énergie
- Des convertisseurs d'énergie
- Les utilisations.

II.4.8. Impact environnemental

La biomasse regorge d'énergie potentiellement propre et à 100% renouvelable, à condition d'appliquer une bonne gestion rationnelle de cette énergie.

Il y a un potentiel très vaste et un large champ d'application.

La valorisation de certains types de déchets pour la production d'énergie (thermique ou électrique) réduit la quantité d'éléments polluants évacués dans l'atmosphère.

Bien que très rentable, la filière bois énergie reste un grand polluant de la nature. De plus, son exploitation non contrôlée conduit rapidement et dangereusement à la déforestation générale. Certes, avec 10 000 000 ha/an de forêts détruites dans le monde, il n'y a qu'une faible surface reboisée.



Emission polluante en cuisson en grammes équivalent CO₂ par kWh utile :

- bois géré : 472 g/kWh, bois non géré : 2351 g/kWh.
- charbon géré : 932 g/kWh, charbon non géré : 4670 g/kWh.

II.5. L'ENERGIE EOLIENNE [14][17]

Cette énergie résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, lui-même relié à un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

La vitesse du vent varie beaucoup en fonction du temps, ce qui complique la gestion d'un tel système.

II.5.1. Historique

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie connue. Au début, elle était utilisée uniquement pour des travaux mécaniques, à savoir le pompage de l'eau, le moulin à vent, le meulage de grains et d'autres matériaux.

On commença à utiliser des turbines éoliennes pour produire de l'électricité à la fin du XIX^e siècle, au Danemark, où elles sont encore largement répandues. De petits générateurs à turbine éolienne fournirent l'électricité aux petites communautés rurales jusqu'à dans les années 1930, alors que les lignes électriques commençaient à silloner le pays. De grandes turbines éoliennes furent également construites à cette époque.

Les éoliennes à axe vertical sont les plus anciennes, et leur principe de fonctionnement est le plus simple ; elles ont cependant un rendement inférieur aux éoliennes à axe horizontal, et on cessa pratiquement de les utiliser. Toutefois, dans les années 1970, un nouveau système d'éolienne à axe vertical, reprenant le principe inventé par l'ingénieur français Darrieus en 1925, fut mis au point aux États-Unis et au Canada. Ce dispositif est un moulin muni de pales semblables à la partie mobile d'un batteur à œufs. Ce type d'éoliennes convient à la production de puissances inférieures à 50 kW.



Figure N° 14 : Pompe éolienne - Moulin à vent



II.5.2. Principe de l'aérogénérateur

Dans un aérogénérateur, un rotor convertit l'énergie cinétique du vent en énergie cinétique de rotation (pour l'arbre). Un train d'engrenages permet d'augmenter ou de réduire la vitesse. Un générateur convertit l'énergie de rotation de l'arbre en énergie électrique. Sur certaines machines à axe horizontal, le pas des ailes peut être en outre ajusté de manière à régler la vitesse pendant le fonctionnement, voire à couper totalement le système lorsque le vent atteint des vitesses trop élevées. D'autres machines utilisent le décrochage, un phénomène aérodynamique qui limite naturellement la puissance sous des vents forts.

Les aérogénérateurs actuels commencent en général à tourner lorsque la vitesse du vent est d'environ 19 km/h, ils atteignent leur puissance de croisière pour des vitesses du vent comprises entre 40 et 50 km/h, et s'arrêtent sous des vents soufflant à plus de 100 km/h. Les meilleurs sites pour planter des aérogénérateurs sont ceux où la vitesse moyenne du vent est d'au moins 20 km/h (5,5 m/s).

L'énergie éolienne, dont la production ne s'accompagne pas d'émission de gaz à effet de serre, est une solution intéressante pour remplacer les combustibles fossiles tels que le pétrole.

Les aérogénérateurs les plus rentables pour une production électrique à grande échelle sont de taille moyenne (rotors mesurant entre 15 et 30 m de diamètre, avec des puissances comprises entre 100 et 400 kW).



Figure N° 15 : Centrale éolienne de grande puissance

II.5.3. Impact environnemental

Energie propre et 100% renouvelable, c'est la plus propre de toutes les technologies de production d'électricité à grande échelle utilisant une technologie avancée.

La pollution moyenne en émission de CO₂ est très faible, de l'ordre de 3 g/kWh.

Du point de vue de la préservation de l'environnement, c'est la meilleure solution. Mais son handicap majeur qui est le très faible rendement reste un frein à son développement.



II.6. L'ENERGIE NUCLEAIRE

Une des méthodes récemment développée dans la production d'électricité est l'utilisation des propriétés chimiques de certains matériaux comme l'uranium. Au cours d'une réaction nucléaire, faisant intervenir les nucléons (protons et neutrons), les quantités d'énergie dégagées sont cent mille fois supérieures à celles libérées par des réactions chimiques classiques, impliquant le cortège électronique des atomes.

La particularité de ce type de centrale électrique est l'utilisation de réacteurs nucléaires qui provoquent l'enrichissement de l'uranium. Au cours du processus, la teneur en ^{235}U passe de 0.7% à 3%. On distingue deux types de réactions nucléaires : la fission nucléaire et la fusion nucléaire.



Figure N° 16 : Centrale nucléaire de Tricastin (France)

II.6.1. La fission nucléaire

C'est la division d'un noyau atomique lourd en deux fragments plus légers. Ce procédé est souvent utilisé dans la fabrication d'armes nucléaires, et parallèlement on l'exploite pour la production d'électricité, on parle alors d'énergie électronucléaire.

Les deux principales caractéristiques de la fission sont d'une part une grande libération d'énergie, et d'autre part l'existence d'une réaction en chaîne.

Jusqu'à maintenant, l'uranium-235 est le seul élément reconnu à pouvoir subir une fission par bombardement de neutrons dans des réacteurs nucléaires.

L'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium-235, appelé combustible nucléaire, conduit à sa fragmentation en deux noyaux fils avec libération de neutrons.

a) Exemples de fission nucléaire

Différents scénarios de fragmentation sont possibles : par exemple, la fragmentation en un noyau de strontium-94 et un noyau de xénon-140 avec libération de deux neutrons ; ou encore la fragmentation en un noyau d'yttrium-95 et un noyau d'iode-138 avec libération de trois neutrons, etc.



Les différentes réactions de fission possibles libèrent en moyenne 2,5 neutrons par noyau d'uranium, qui induisent ensuite la fission de plusieurs autres atomes, libérant à leur tour des neutrons supplémentaires qui initient des fissions nucléaires auto-entretenues, ou « réactions en chaîne ».

Ainsi, la fission d'un noyau d'uranium libère une énergie approximativement égale à 200 MeV, répartie entre photons gamma et énergie cinétique des fragments, neutrons et autres particules générées par la radioactivité des fragments.

b) Provocation de la réaction en chaîne

L'uranium naturel ne contient que 0,7 % d'uranium-235, le reste étant composé d'uranium-238, non fissile, c'est-à-dire ne pouvant subir de fission par absorption d'un neutron de faible énergie. Ainsi, quelle que soit la quantité d'uranium naturel, celui-ci ne peut être le siège d'une réaction en chaîne. C'est pourquoi l'uranium naturel est enrichi en uranium-235 avant d'être utilisé dans les centrales nucléaires.

D'autre part, la probabilité qu'un neutron produit par fission et d'énergie initiale de 1 MeV induise lui-même une fission est relativement faible. Elle peut néanmoins être augmentée des centaines de fois en ralentissant ce neutron par des collisions élastiques avec un modérateur constitué de noyaux légers comme l'hydrogène, le deutérium ou le carbone. Ce processus est à la base du principe de fonctionnement des réacteurs produisant de l'énergie par fission.

Pour produire de l'énergie nucléaire, on utilise surtout l'uranium-235, éventuellement le thorium. La fission d'un kilogramme d'uranium libère autant d'énergie que la combustion de 2 500 tonnes de charbon ou de 2 000 tonnes de pétrole.

II.6.2. La fusion nucléaire

La fusion est l'association de deux noyaux légers qui conduit à la formation d'un noyau plus lourd. Ce phénomène se produit dans les étoiles à des températures très élevées ; malgré de nombreuses recherches menées sur la production d'énergie thermonucléaire, les scientifiques n'ont pas encore pu réaliser des réactions de fusion nucléaire contrôlée sur Terre.

a) Développement de la technologie de fusion

L'une des réactions les plus étudiées dans les laboratoires de recherche consiste en la fusion d'un noyau de deutérium (hydrogène-2) et d'un noyau de tritium (hydrogène-3) pour former un noyau d'hélium-4 avec libération d'un neutron. Chaque noyau d'hélium formé libère une énergie de 17,6 MeV. Mais pour que cette réaction ait lieu, il faut accélérer les noyaux initiaux et les faire entrer en collision. L'énergie doit être suffisante pour surmonter la répulsion électrostatique entre les noyaux, et les amener au contact ; l'énergie nécessaire est de quelques centaines de keV.

En laboratoire, cette réaction est facile à réaliser. En revanche, à l'échelle d'un réacteur nucléaire, le problème est de communiquer de l'énergie aux noyaux tout en les maintenant localisés. Pour cela, il faut confiner le milieu.

Les deux techniques à l'étude sont :



▪ *le confinement inertiel*, où le mélange isotopique est enfermé dans une bille en verre et l'énergie de démarrage est fournie par un tir laser de très haute intensité ;

▪ et *le confinement magnétique*, réalisé dans des réacteurs Tokamaks, où le plasma est confiné au centre d'un tore par des champs magnétiques intenses, l'énergie initiale étant fournie par une élévation de la température (la température à l'intérieur du Tokamak est largement supérieure à celle au centre du soleil qui est de 16 millions de degré celcius).

b) Avantages de la fusion contrôlée

L'intérêt de la fusion contrôlée est double :

- d'une part, le deutérium est abondant dans la nature (eau lourde des océans)
- et le tritium peut être facilement obtenu à partir du lithium (dont le minerai est également abondant) ;

Ainsi, les réserves énergétiques estimées pour la fusion couvriraient nos besoins sur des millénaires ; d'autre part, cette forme d'énergie est non polluante, les produits résultant des fusions contrôlées n'étant pas radioactifs.

c) Inconvénients

Malgré ses nombreux avantages, la fusion contrôlée n'est pas encore très répandue à cause des risques que cela engendre à la moindre perte de contrôle sur la réaction : plusieurs pays ont arrêté leur production nucléaire et ont même sorti des règles strictes concernant le développement des réactions nucléaires chez eux. Seuls restent dans la course la France, les Etats-Unis, la Corée du Sud et le Japon qui développent le nucléaire de façon intensive.

La cause du retrait des autres pays est l'accident d'explosion nucléaire survenu à Tchernobyl, près de Kiev en Union soviétique, le 26 avril 1986. Un nuage radioactif se répand sur l'Europe de l'Est, atteignant aussi plusieurs pays occidentaux. Dans les mois qui suivent, 31 personnes meurent des suites de l'exposition au rayonnement. Plus de 200000 personnes sont évacuées, laissant déserte une vaste zone autour de la centrale. Les conséquences désastreuses de cet accident sont toujours gravées dans la mémoire collective, ce qui peut freiner le développement du nucléaire dans les années qui suivent.

Pourtant, on espère qu'à long terme, le nucléaire civil pourrait connaître une nouvelle phase de développement sous l'effet conjugué d'une demande d'énergie toujours croissante, et de la nécessité de réduire la pollution atmosphérique, notamment les émissions de gaz à effet de serre.



Figure N° 17 : Tokamak de Princeton (Etats-Unis)

II.6.3. Les éléments fonctionnels d'une centrale nucléaire

Une centrale nucléaire se compose de trois unités principales :

- La production de vapeur : il comprend le réacteur, au cœur duquel se déroulent les fissions nucléaires, et les échangeurs de chaleur (ou générateurs de vapeur), dans lesquels la chaleur produite par le réacteur est transformée en vapeur
- Le générateur : la vapeur fait tourner un turboalternateur qui produit de l'électricité, avant de subir une détente dans les parties à haute, moyenne et basse pression ;
- Le condenseur : parcouru par des tuyaux contenant de l'eau très froide, il condense la vapeur. Cette dernière est ensuite entraînée par la pompe d'alimentation qui la comprime à la pression voulue, puis est introduite dans la chaudière nucléaire.

II.6.4. Impact environnemental

Rappelons que la centrale nucléaire utilise principalement des éléments chimiques dans son processus de fonctionnement. La plupart de ces éléments sont radioactifs.

Les composés radioactifs émettent des rayonnements ionisants qui pénètrent dans les tissus organiques et les endommagent. L'unité de mesure des doses radioactives reçues par un être humain est le millisievert (mSv).

Les normes appliquées par l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI), sont données ci-après (dose équivalente annuelle) :

- 5 mSv pour le public
- 50 mSv pour les travailleurs de l'industrie nucléaire et des industries utilisant des sources de rayonnements ionisants (chercheurs, personnel médical des services de médecine nucléaire, etc.).



À titre de repère, les doses de l'ordre de 2 000 mSv sont considérées comme graves et nécessitent un traitement en milieu hospitalier ; une dose de 5 000 mSv (5 Sv) peut être mortelle.

Les activités minières et de broyage du minerai produisent une grande quantité de déchets qui restent à ciel ouvert et qui contiennent encore de petites concentrations d'uranium. Ces déchets doivent être confinés dans des bassins étanches et recouverts d'une épaisse couche de terre pour éviter qu'ils ne contaminent la biosphère.

Les usines d'enrichissement d'uranium et de fabrication du combustible contiennent de grandes quantités d'hexafluorure d'uranium, qui est un gaz corrosif.

II.7. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE [2]

II.7.1. Ressources énergétiques du soleil

La quantité d'énergie solaire incidente sur la Terre est d'environ 3.10^{18} kWh par an, alors que la consommation mondiale d'énergie s'élève à 60.10^{12} kWh par an : ce chiffre englobe l'énergie sous toutes ses formes. On peut alors calculer qu'un générateur photovoltaïque de $300 \times 1000 \text{ km}^2$ (territoire désertique), serait suffisant pour assurer cette consommation mondiale s'il fonctionnait avec seulement un rendement de 10%.

Le rayonnement atteignant la Terre, au dessus de l'atmosphère, est en moyenne de 1370 W/m² (constante solaire).

Le soleil fournit à la terre 150 milliards MW ; Madagascar en reçoit 100 millions MW.

C'est pour ne pas gaspiller cette énergie fournie gratuitement chaque jour que les chercheurs ont inventé les capteurs solaires, dans le but de convertir l'énergie du rayonnement solaire en d'autres formes d'énergie. Quand il s'agit de fournir de l'énergie électrique, les capteurs sont appelés « cellules photovoltaïques ».

II.7.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (EPV) permet directement la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique. L'EPV se définit généralement comme l'apparition d'une différence de potentiel dans un semi-conducteur.

Pour qu'un EPV apparaisse, il faut que le semi-conducteur possède une hétérogénéité à laquelle est sensible le système de charges libres (électrons ou trous).

Cette hétérogénéité peut être un gradient de dopage, de masse effective, ou de bande interdite, qui conduit à une barrière de potentiel servant de collecteur.

L'EPV permet la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

II.7.3. Schéma équivalent d'une cellule PV

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque au silicium est composé :

- d'un générateur de courant, produisant un courant I_{ph} généré par la lumière reçue par la cellule, et proportionnel à la quantité de lumière reçue ;
- d'une diode qui représente le fonctionnement de la jonction P-N et qui absorbe un courant I_d (courant de polarisation de la jonction P-N) ;
- d'une résistance shunt et d'une résistance série qui caractérisent les qualités du matériau, des contacts...

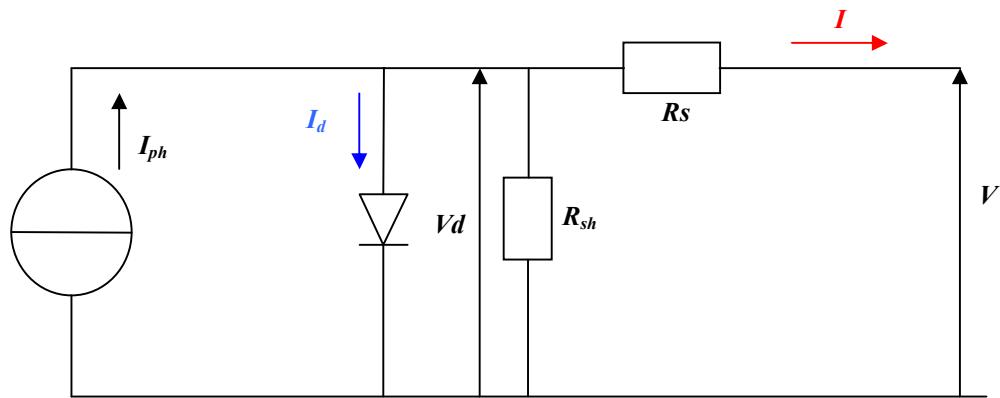


Figure N° 18 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant produit a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

- Le courant de photon $I_{ph} = I_{cc}$ a pour valeur 30 à 35 mA/cm² pour une cellule au silicium multi cristallin, sous un ensoleillement de 1000W/m².
- I_d : courant de la diode :

$$I_d = I_s (e^{\frac{qV_d}{hKT}} - 1) \quad (2.2)$$

Avec $V_d = V + R_s \cdot I$;

$h = 1,5$: coefficient d'idéalité de la diode ;

$kT/q = 26$ mV à la température $T = 300$ °K (27°C) ;

I_s : courant d'obscurité ($<0,5$ mA),

$R_s = 0,05 \Omega$,

$R_{sh} = 50 \Omega$.

En remplaçant ces valeurs dans la formule du courant produit, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_s [e^{\frac{q(V + 0,05 I)}{1,5 kT}} - 1] - \frac{V}{50} \quad (2.3)$$

II.7.4. La photopile

La cellule solaire ou photopile convertit le rayonnement solaire en courant électrique suivant l'effet photovoltaïque.

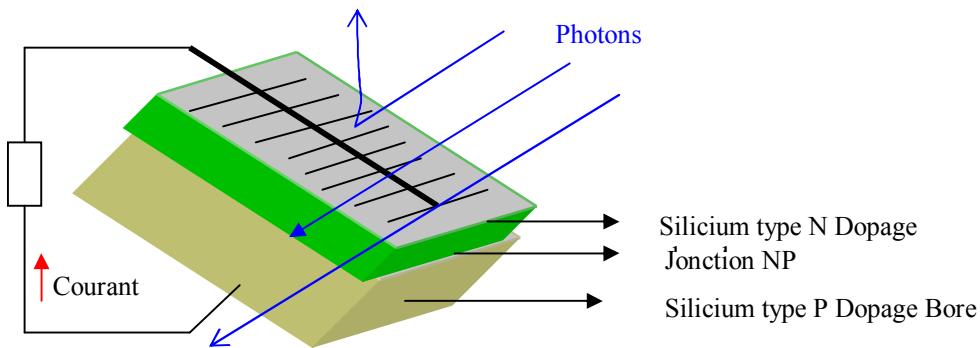


Figure N° 19 : La photopile

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs dont l'élément de base est le silicium.

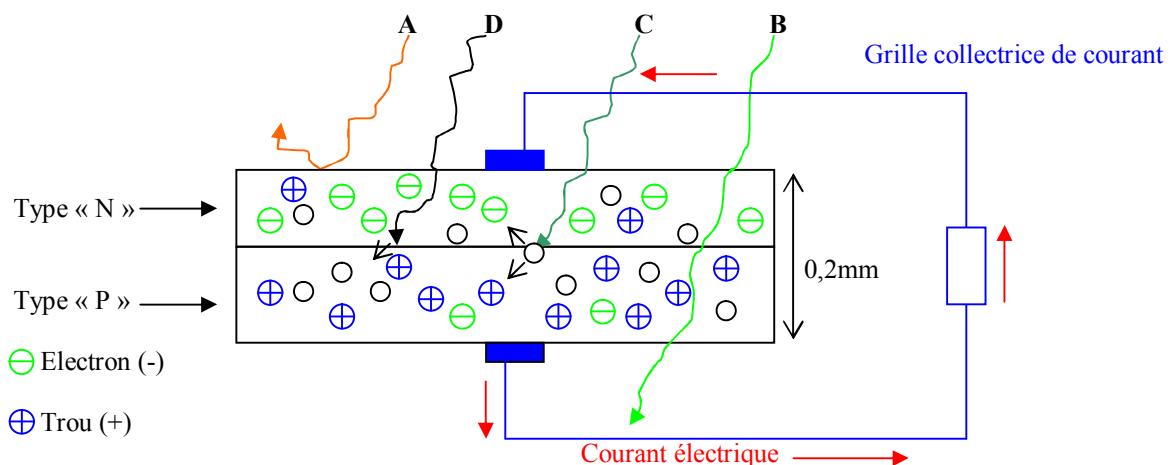


Figure N° 20 : Fonctionnement d'une photopile

a) Rendement

Le rendement d'une photopile est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de sa surface.

Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique des cellules. Il passe par un maximum à ce que l'on appelle le « point de puissance maximale ».

Les rendements des cellules fonctionnant à leur point de puissance maximale se trouvent dans le tableau suivant :

TYPE DE PHOTOPILE	RENDEMENT (%)
Silicium monocristallin	13 à 15
Silicium multicristallin	11 à 13
Silicium amorphe	4 à 6

Tableau N° 5 : Rendement d'une photopile

b) Limite du rendement

Toute l'énergie de la lumière n'est pas transformée en électricité :

- certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles (A),



- certains ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron ($E < E_g$) (**B**),
- seuls les photons d'énergie suffisante ($E > E_g$) sont absorbés et créent des paires électrons-trous (**C**),
- certains photons sont trop énergétiques, leur énergie est cédée aux électrons sous forme d'énergie cinétique qu'ils perdent rapidement pour se retrouver sous forme de chaleur (**D**),
- enfin, de nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile.

Ces différents phénomènes limitent théoriquement le rendement à **22% pour le silicium monocristallin**. Pratiquement, les photopiles, actuellement les plus utilisées pour des raisons de coût, ont un rendement typique de l'ordre de 12% à 14%.

II.7.5. Réalisation de générateurs photovoltaïques

A cause du faible rendement et de la faible puissance des cellules photovoltaïques, elles ne peuvent être utilisées seules.

a) Association des cellules photovoltaïques

On peut associer des cellules photovoltaïques identiques pour réaliser des modules PV plus performantes en :

- Tension : grâce à l'association en série des cellules
- Courant : grâce à la mise en parallèle des portions de cellules en série.

b) Le parc à batteries

Pour améliorer le rendement de l'installation, on utilise des éléments de stockage, notamment des batteries, avec chaque installation PV.

Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire.

En effet :

- la demande énergétique est fonction de la charge à alimenter : demande continue ou discontinue des appareils d'utilisation,
- l'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (nuages ou non).

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité. Le système tampon le plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques.

II.7.6. La régulation

La régulation de charge peut s'effectuer selon 3 principes :

- régulation parallèle (ou shunt) ;
- régulation série par semi-conducteur ;



- régulation par coupure électromécanique.

Le régulateur est constitué de 2 fonctions principales :

- une fonction de « Régulation de Charge » de la batterie, ou RC ;
- une fonction de « Limitation de décharge » de la batterie ou LD.

II.7.7. Impact environnemental

L'énergie solaire photovoltaïque a les avantages suivants :

- propre,
- 100 % renouvelable,
- inépuisable à l'échelle du temps humain,
- sans bruits,
- modulable,
- disponible à côté de son utilisation (sans ligne de transport),
- répartition géographique.

Elle présente les inconvénients suivants :

- flux énergétique variable,
- encombrant surface de captage importante.

Le solaire photovoltaïque fait partie de la source d'énergie la plus douce. C'est-à-dire le moindre impact négatif sur l'environnement.

Le développement à l'échelle mondiale du solaire ainsi que des autres sources non polluantes et renouvelables diminue l'utilisation des énergies fossiles et réduit l'émission de gaz nocifs.

PRINCIPE DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

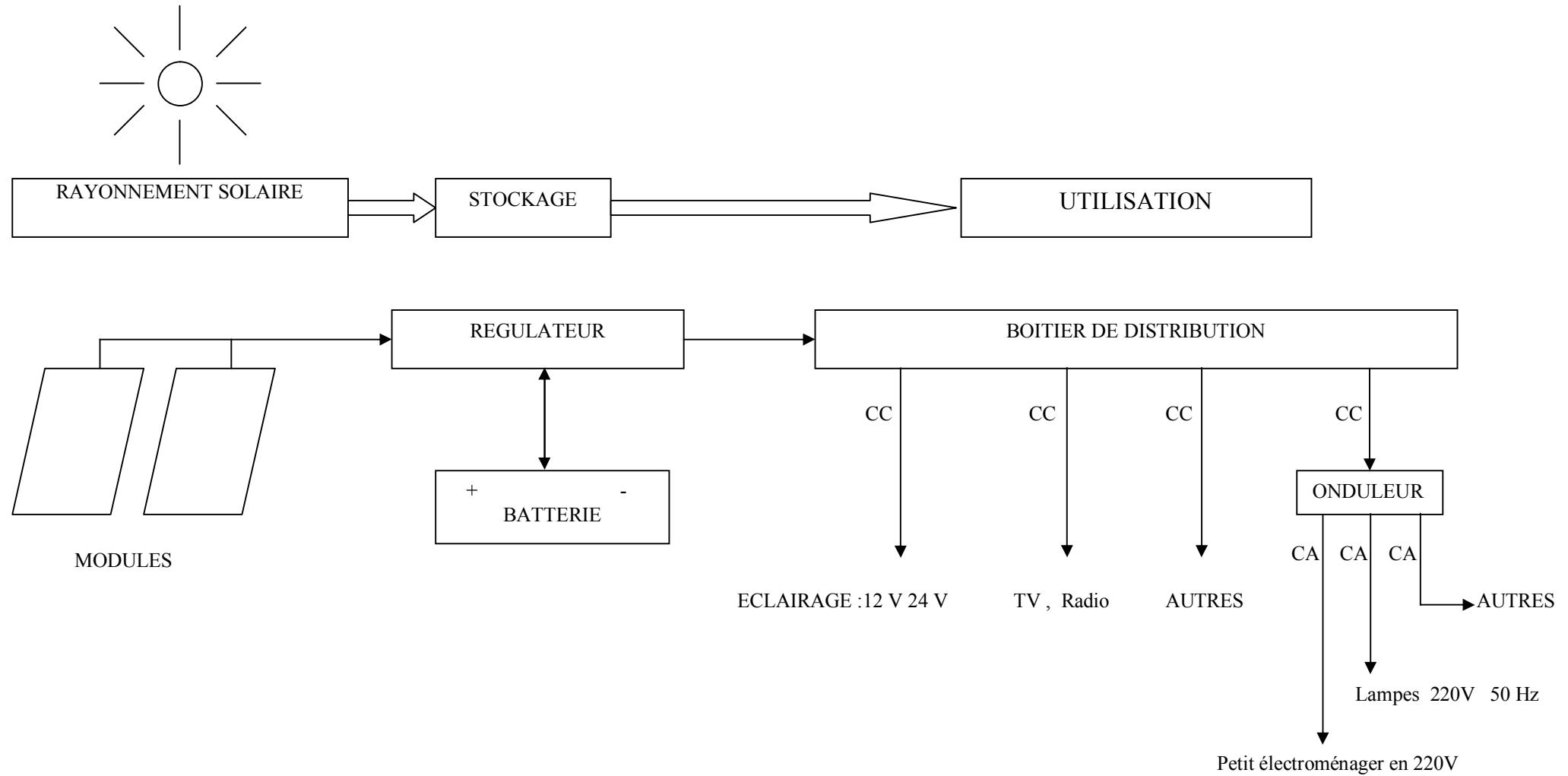


Figure N° 21 : Installation solaire photovoltaïque



Chapitre III. CONCEPTION D'UN SYSTEME HYBRIDE

III.1. NOTIONS DE BASE

III.1.1. Aspect général

Lors de la conception d'un système hybride, on a le choix entre les deux méthodes suivantes :

- soit fixer une source principale qui est la moins coûteuse, et déterminer les autres sources pouvant servir d'appoints, puis calculer la part de chaque élément ;
- soit évaluer toutes les sources d'énergie disponibles dans la zone et les combiner pour satisfaire les besoins imposés par les utilisateurs.

Il a été démontré [5] que l'utilisation de plusieurs sources est toujours plus rentable.

On peut aussi en outre, limiter le nombre de sources utilisées ou procéder par élimination après le résultat des simulations.

III.1.2. Les étapes de la conception [5]

La conception d'un système hybride se fait généralement en trois étapes principales.

Le problème technique souvent rencontré par le concepteur de système énergétique autonome est l'acquisition des paramètres nécessaires au dimensionnement des éléments de la centrale hybride, surtout dans les pays du tiers monde où les bases de données techniques et socio-économiques de leur territoire ne sont pas encore toutes mises à jour.

a) Etape 1 : Evaluation des charges

La première étape de l'étude consiste en la réalisation d'une enquête auprès des futurs bénéficiaires de la centrale hybride étudiée.

On doit relever la liste de tous les appareils qu'ils envisagent d'utiliser une fois le courant établi. Cette liste permet d'évaluer, par calcul, la puissance électrique consommée, donc la puissance à leur fournir. On doit faire apparaître un profil de charge provisoire grâce aux enquêtes menées.

A part l'énergie électrique, les usagers peuvent aussi avoir besoin d'autres formes d'énergie qu'il faudra prendre en compte. Certes, le système hybride utilise plusieurs sources à la fois, et permet d'avoir plusieurs formes d'énergie.

Mais il faut préciser l'ordre de priorité de ces besoins, au cas où il y aurait un problème comme la non satisfaction de toutes les demandes imposées ; ce problème peut être d'origine économique, technique, ou un manque de ressources.



b) Etape 2 : Analyse des ressources énergétiques

Souvent, les ressources disponibles ne sont pas utilisées à bon escient. Soit elles sont mal exploitées, c'est-à-dire qu'on n'en utilise qu'une petite quantité, alors que les demandes ne sont pas remplies ; soit on les exploite trop, sans tenir compte de leur capacité journalière.

Il est donc nécessaire d'analyser la disponibilité des ressources du site considéré, afin de les utiliser comme il le faut.

Les sources d'énergie peuvent se présenter directement en quantité d'énergie utilisable, ou sous forme d'énergie primaire. Leur évaluation se fait sur une période d'un an ; on peut ainsi donner des valeurs moyennes calculées avec les différentes fluctuations causées par le changement de climat pendant toute l'année.

Chaque source possède ses propres critères d'évaluation qui sont exprimés en quantité d'énergie par an.

L'évaluation des sources d'énergie doit fournir des paramètres qui vont entrer dans le dimensionnement de chaque équipement utilisé. Les caractéristiques les plus importantes sont celles qui entrent dans le calcul du rendement économique de l'installation.

c) Etape 3 : Dimensionnement

Après avoir récolté toutes les données sur la répartition des charges et sur la disponibilité des ressources, on peut enfin procéder au calcul du dimensionnement des éléments de la centrale.

Cette phase détermine quelles sources d'énergie conviennent à l'obtention d'un résultat optimal pour le site, et ce n'est pas une tâche facile.

Les aspects techniques, économiques et sociaux du système hybride doivent être analysés soigneusement avant de faire un choix spécifique. Une fois qu'on a tous les renseignements sur le site et ses environs, on peut procéder au choix des combinaisons qui donneront le coût minimum par unité d'énergie, tout en satisfaisant les besoins.

Dans certains cas, on peut juste mettre en place des équipements bon marché pour minimiser les investissements initiaux du système hybride, avec l'approbation des bénéficiaires évidemment.

Dans d'autres cas, on doit calculer la rentabilité optimale du système qui doit remplir certaines exigences incontournables comme le niveau de fiabilité et de précision, les facteurs de pondération et le coût de l'équipement.

Mais dans l'un ou l'autre cas, le but est de fournir assez de puissance pour satisfaire les besoins, en partie ou en totalité.



III.2. METHODES DE CONCEPTION

Quand plusieurs sources d'énergie sont disponibles pour compenser des besoins bien définis, nous avons le choix entre deux principes de base :

- Combiner toutes les sources pour n'avoir qu'un seul générateur capable de satisfaire toutes les formes d'énergie demandées ;
- Utiliser chaque source pour une tâche convenable et le plus efficace, comme décrit dans le tableau des combinaisons possibles.

La méthode développée ici suit la deuxième option ci-dessus.

Nous allons détailler les trois étapes de conception cités dans le paragraphe précédent.

III.2.1. Classification des besoins

Les besoins énergétiques en milieu rural peuvent être classés en cinq groupes selon le type et la qualité de l'énergie demandée :

- Energie calorifique de moyenne catégorie (100°C-300°C) : cette forme d'énergie est utilisée premièrement pour la cuisson, et aussi pour compenser la chaleur demandée par les petites industries
- Energie mécanique de rotation : utilisée pour le pompage de l'eau (irrigation, réservoir d'eau), les installations de biogaz, petites industries, transport, travaux agricoles
- Courant alternatif : éclairage public et domestique, moteurs à courant alternatif
- Courant continu : charge des batteries de stockage destinées à l'éclairage de secours, matériels didactiques, communication, centre de santé, moteurs à courant continu
- Energie thermique de faible puissance (moins de 100°C) : chauffe-eau domestique, climatisation intérieure, séchage des grains et fruits.

III.2.2. Classification des sources d'énergie

Depuis la découverte du biogaz par la valorisation de la biomasse, qui implique un moindre coût alors qu'il peut générer toutes les formes de produits énergétiques demandés, il est classé en premier rang dès que son exploitation sur un site est possible. Ainsi, quand le biogaz est disponible, on commence toujours par valoriser ses ressources avant d'introduire d'autres sources d'énergie qui seront classées par ordre croissant d'investissement.

Voici un classement courant des ressources énergétiques disponibles dans les milieux ruraux des pays en développement, et qui sont les plus utilisées, par ordre croissant du coût d'investissement :



- La biomasse : bois de chauffage, feuilles mortes, déchets de l'agriculture comme la paille de riz et la bagasse, ordures ménagères, qui sont soit utilisés directement soit transformés en biogaz.
- Le rayonnement solaire : converti en courant électrique par des panneaux photovoltaïques, ou en énergie thermique par des échangeurs de chaleur
- L'énergie éolienne : convertie en énergie mécanique à l'aide de turbines éoliennes ou moulins à vent
- L'énergie potentielle de l'eau : chute d'eau naturelle ou réservoir d'eau élevé à une certaine hauteur.

La combustion directe de la biomasse n'est pas prise en compte dans notre étude à cause de ses impacts négatifs sur l'environnement.

III.2.3. Principales combinaisons source-utilisation

Théoriquement, chaque source d'énergie peut fournir toutes les formes d'énergie listées ci-dessus, moyennant des convertisseurs d'énergie. Mais le problème est que le rendement total de l'installation va diminuer considérablement, et certaines combinaisons peuvent impliquer des dépenses excessives, donc peu pratiques. Le tableau ci-après donne les combinaisons fréquentes et rentables, entre les sources d'énergie et leurs utilisations, dans les pays en développement.

Ressources	Machines et applications
1- Biomasse → fermentation Anaérobiose → biogaz	Cuisinière : chauffage à haute température Moteur au biogaz : pompage de l'eau Groupe au biogaz : production d'électricité Chauffage à basse température : eau et intérieur
2- Rayonnement solaire → Cellules photovoltaïques	Moteur à courant continu : pompage de l'eau, petite industrie Climatiseur à courant alternatif Courant continu : chargeur de batteries
3- Energie éolienne → Aérogénérateurs	Pompage de l'eau Production d'électricité
4- Chute d'eau	Turbines : entraînement en rotation Turbines hydroélectriques : production d'électricité
5- Rayonnement solaire → Collecteurs	Cuisinière solaire Echangeur de chaleur : chauffe eau, climatisation Machines à vapeur : énergie mécanique Groupe à vapeur : Production d'énergie électrique

Tableau N° 6 : Principales combinaisons source d'énergie - utilisation



III.2.4. Dimensionnement

Connaissant les caractéristiques de chacune des sources et besoins énergétiques, nous pouvons procéder au dimensionnement des générateurs de la centrale hybride.

Il y a de nombreuses méthodes déjà élaborées quant au dimensionnement d'un système hybride. Mais nous n'allons citer que les deux approches les plus utilisées, vu leur simplicité.

La détermination du coût minimum des éléments de la centrale par calcul est appelée « optimisation ». Elle consiste à trouver la meilleure combinaison source-utilisation qui va minimiser le coût de l'installation.

Quand nous parlons de combinaison source-utilisation, ça veut dire quelle quantité d'énergie Q_i de la source « i » va-t-on utiliser pour fournir la quantité Q_j sous forme de produit « j ».

III.3. LES METHODES D'OPTIMISATION

III.3.1. La Programmation Linéaire

La méthode de la programmation linéaire utilise un algorithme mathématique pour résoudre une fonction objectif lié à un système d'équations et d'inéquations.

La formulation de ces équations et inéquations repose sur l'analyse du système à mettre en place, et des besoins énergétiques imposés.

Nous allons consacrer un chapitre pour l'étude de cette méthode qui est le grand sujet même de ce travail.

III.3.2. La méthode du LPSP

LPSP est l'abréviation anglaise de *Low Power Supply Probability*, ce qui peut être traduit par la réduction des pertes en puissance dans l'installation.

Cette méthode est très simple, car elle est juste basée sur la connaissance des besoins et des ressources disponibles. Donc, c'est juste un résumé des deux premières étapes de la conception.

Son nom est dû au fait qu'on doit épuiser totalement la source la moins coûteuse avant d'en utiliser une autre.

a) Démarche :

- On commence par classifier les différents besoins énergétiques du village par ordre de priorité.
- Ensuite, on dresse une liste des ressources pouvant satisfaire le besoin le plus important, en commençant par celle qui nécessite le plus faible investissement.



- Quand toute la quantité d'énergie demandée par la première catégorie a été remplie, on passe à la catégorie de demandes suivante et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les besoins soient satisfaits.
- A moins qu'une ressource particulière n'arrive à satisfaire à elle seule tous les besoins, il y a un point où plusieurs sources d'énergie doivent être utilisées en même temps pour venir à bout de toutes les demandes, et on aura même peut-être besoin d'éléments de stockage d'énergie. C'est à ce stage qu'entre en jeu la notion de LPSP pour déterminer la combinaison optimale donnant le coût minimum pour la satisfaction des demandes, tout en gardant la condition sur le rapport production/consommation.

b) Organigramme de la méthode :

Les ressources sont numérotées avec des lettres en majuscules, et les besoins avec des chiffres de 1 et 4.

On utilise des indicateurs « I » et « II ».

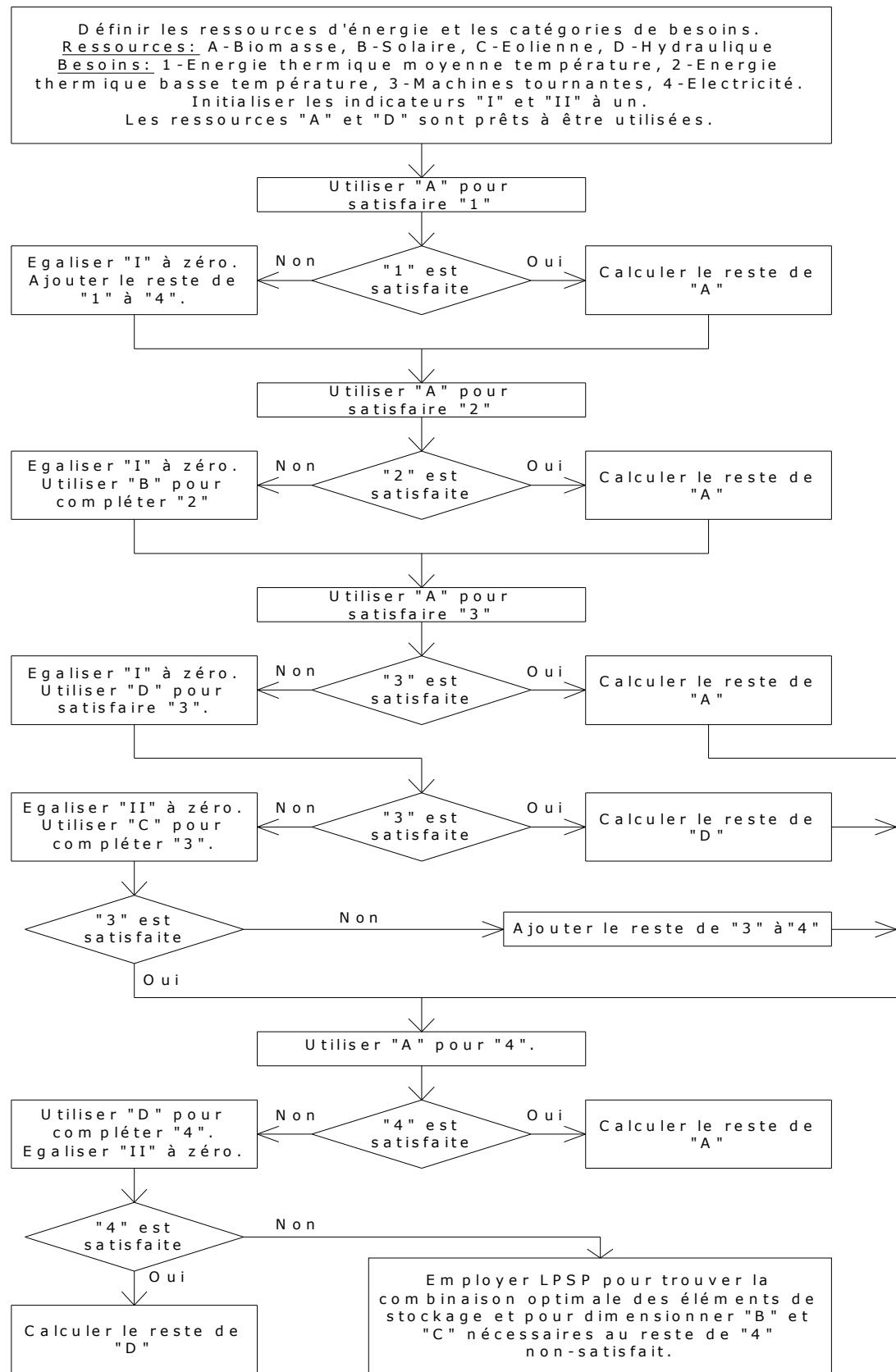


Figure N° 22 : Organigramme de la méthode LPSP



c) Exemple de dimensionnement avec la méthode LPSP [5]:

R. Ramakumar de School of Electrical and Computer Engineering de Oklahoma State University USA est l'un des chercheurs à utiliser pour la première fois l'approche du LPSP pour le dimensionnement d'une centrale hybride.

On considère un village situé dans un milieu rural d'un pays en voie de développement, qui possède d'excellentes ressources en biomasse et en eau fluviale. D'autre part, il y a un bon régime de vent (vitesse moyenne annuelle du vent = 7,6 m/s).

La liste ci-dessous résume les capacités vitales du village, les sources d'énergie disponibles et les besoins énergétiques qu'on doit satisfaire :

- Nombre d'habitants : 700 personnes
- Nombre de bétails : 450 têtes
- Ressources disponibles :
 - Biogaz : 280 m³/jour ; 1554 kWh/jour
 - Chute d'eau : 20991 m³/jour ; 572 kWh/jour (10m de hauteur)
 - Vent : sans limite
 - Soleil : faible taux d'ensoleillement
- Besoins énergétiques :
 - Cuisson : 700 kWh/jour ; 100 kW (max)
 - Chauffage : 230 kWh/jour ; 100 kW (max)
 - Forces motrices : 400 kWh/jour ; 80 kW (max)
 - Electricité : 960 kWh/jour ; 60 kW (max) et 20 kW (min).

En appliquant la méthode précédente avec les données statistiques du village, c'est-à-dire du site où on va installer la centrale hybride, nous trouvons les résultats suivants :

Utilisations	Ressources/Equipements	Coût d'investissement (\$)
Cuisson et chauffage	Biomasse/Cuisinières à gaz (100 kW) Chalumeau (100 kW)	15 000
Forces motrices	Chute d'eau – turbine hydroélectrique (80 kW)	96 000
Electricité	Aérogénérateurs (150 kW) Batteries de stockage (1300 kWh)	315 000
COUT TOTAL		426 000

Tableau N° 7 : Résultats du calcul de dimensionnement d'un système hybride

Interprétation :

- Les besoins en énergies thermiques de moyenne et petite puissances sont entièrement satisfaits par l'installation de biogaz.
- La demande d'énergie des machines tournantes (forces motrices) est remplie par des convertisseurs d'énergie utilisant la chute d'eau naturelle comme source primaire (hydroélectricité).
- Puisque les ressources en biomasse et l'énergie hydraulique sont entièrement consacrées aux trois premières catégories énergétiques, la production



d'électricité sera assurée par les convertisseurs d'énergie éolienne (aérogénérateurs) avec les éléments de stockage qui ont une autonomie de plus d'une journée.

Conclusion :

La technique du LPSP, appliquée avec un classement adéquat des besoins et ressources énergétiques, peut très bien aider dans la conception d'un système hybride utilisant des sources d'énergies renouvelables. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour simplifier la programmation sur ordinateur, afin de rendre efficace la méthode.

Les valeurs données par les calculs dans l'exemple précédent sont seulement à titre indicatif. Elles sont sous réserve de modification, selon la possibilité de financement et d'autres paramètres techniques et sociales.



Chapitre IV. PROGRAMMATION LINÉAIRE METHODE DU SIMPLEXE

La programmation linéaire est une méthode de résolution des systèmes mathématiques complexes. Elle est souvent employée dans la recherche d'une solution optimale liée à une fonction économique pour un système donné, sous différentes conditions formulées sous forme de contraintes.

La première étape nécessaire avant l'application de la résolution par la programmation linéaire est la formulation mathématique du modèle à résoudre, après quoi on peut procéder à la résolution en utilisant un programme informatique lancé sur ordinateur, ou le cas échéant, en suivant les différentes étapes de calculs expliquées dans ce chapitre.

IV.1. CONDITIONS D'APPLICATION DE LA PROGRAMMATION LINÉAIRE

- Les variables doivent être réelles et non négatives ;
- On doit avoir des relations linéaires entre les variables, c'est-à-dire des effets proportionnels aux causes, et des variables homogènes c'est-à-dire additives, sous forme de contraintes (équations et inéquations) ;
- La fonction économique est soit à maximiser ou à minimiser, selon le cas.
- Hypothèses :

Soit E l'ensemble des solutions possibles du système. Nous admettons les hypothèses suivantes :

- Convexité du domaine délimité par les contraintes : pour x_1 et $x_2 \in E$ ($E \subset R^n$), $\forall \lambda$ tq $0 \leq \lambda \leq 1$, alors $\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2 \in E$ ou tout simplement que tout segment formé par deux éléments de E est inclus dans E .
- Variables continues
- Les conditions uniques sont celles qui sont exprimées par les contraintes.
- Propriétés de la linéarité :
 - Divisibilité : chaque x_j doit pouvoir être divisé
 - Additivité.

IV.2. NOTATIONS

- Variables principales : x_1, x_2, \dots, x_p
- Vecteur caractéristique : $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$



- Contraintes :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j &\geq b_j \\ \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j &= b_j \\ \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j &\leq b_j \end{aligned} \quad (4.1)$$

Avec $i = 1, 2, \dots, m$
 $j = 1, 2, \dots, n$
 a_{ij} et $b_j \in \mathbb{R}$
 $x_j \geq 0$

- Modèle linéaire à optimiser ou **fondction objectif**:

$$z(x) = \sum_{j=1}^p c_j x_j \quad (\text{à maximiser ou à minimiser}) \quad (4.2)$$

La fonction objectif et les contraintes définissent le modèle PL⁰.

Sous forme vectorielle : $z(x) = c.x$

Avec : $c = (c_1, c_2, \dots, c_p)$
 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$

- Variables d'écart : s_1, s_2, \dots, s_k avec $s_i \geq 0$

Les variables d'écart sont définies comme des variables supplémentaires nécessaires pour que le système ne contienne que des équations linéaires. Il ne restera plus d'inéquations à part les conditions de non négativité.

Les contraintes deviennent alors :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j - s_i &= b_j \\ \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j &= b_j \\ \sum_{j=1}^p a_{ij}x_j + s_i &= b_j \end{aligned} \quad (4.3)$$

Sous forme vectorielle : $z(x) = c.x$

Avec : $c = (c_1, c_2, \dots, c_p, 0, 0, \dots, 0)$

Et le vecteur caractéristique : $x = (x_1, x_2, \dots, x_p, s_1, s_2, \dots, s_k)$

Ne pas oublier la condition : $s_i \geq 0$

- Conditions de positivité des variables :

Il est préférable que toutes les variables soient soumises à une contrainte de non négativité en considérant le changement de variable suivant :



$$\forall x_j, \exists x'_j \geq 0 \text{ et } x''_j \geq 0 \text{ telle que } x_j = x'_j - x''_j \quad (4.4)$$

IV.3. NOTATION MATRICIELLE

$$\left\{ \begin{array}{l} A.x = b \\ x \geq 0 \\ z(x) = c.x \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} \parallel \\ \rightarrow \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Définissent l'ensemble des solutions } E \\ \text{fonction objectif} \end{array}$$

Avec :

- Dimensions de la matrice A : m lignes et n colonnes ($n > m$)
- $x = (x_1, x_2, \dots, x_p, s_1, s_2, \dots, s_k)$
- $c = (c_1, c_2, \dots, c_p, 0, 0, \dots, 0)$
- $b_j \geq 0$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3p} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \vdots & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \vdots & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Notons par a_i les vecteurs colonnes de la matrice A.

IV.4. METHODE DE RESOLUTION (Optimisation) [11]

IV.4.1. Exposé général de la méthode

Posons :

- L'ensemble des solutions E du système linéaire est inclus dans R^m
- $C = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ est la base canonique de R^m avec $e_i = (0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$

\uparrow
i^{ème} coordonnée

Si :

- $B_1 = (e_1^1, e_2^1, \dots, e_m^1)$ et $B_2 = (e_1^2, e_2^2, \dots, e_m^2)$ sont deux bases de R^m ,
- x est le vecteur colonne des coordonnées d'un élément de R^m sur la base B_1 et X celui sur la base B_2
- P_{12} qui est la matrice de passage de B_1 à B_2 admet comme j^{ème} colonne les coordonnées de e_j^2 sur la base B_1 ,

Alors la relation fondamentale de changement de coordonnées s'écrit :

$$x = P_{12} \cdot X \quad (4.5)$$



La notion de « base » est essentielle car l'algorithme du simplexe consiste à construire une suite de bases telles que :

- Une base B_k est constituée de m vecteurs colonnes a_j
- B_k et B_{k+1} ne diffèrent que par un seul vecteur a_j .

IV.4.2. Base réalisable

Une base réalisable de E est un ensemble de m vecteurs colonnes a_j linéairement indépendants.

Notons β l'ensemble des indices j des vecteurs a_j constituant une base réalisable de E . Notons $\bar{\beta}$ l'ensemble des indices j n'appartenant pas à β .

L'unique solution du système $\sum_{j \in \beta} a_j x_j = b$ vérifie : $\forall j \in \beta, x_j \geq 0$

a) Variables de base :

- Ce sont les x_j tel que $j \in \beta$.
- Le vecteur colonne associé est x_β (c'est un vecteur colonne de variables).
- B sera la matrice carrée des vecteurs a_j tel que $j \in \beta$.

b) Variables hors base :

- Ce sont les x_j tel que $j \in \bar{\beta}$
- Le vecteur colonne associé est $x_{\bar{\beta}}$ (c'est un vecteur colonne de variables).

IV.4.3. Solution du système

La solution du système est :

$$x_B = B^{-1} \cdot b \quad : \text{où } x_B \text{ est un vecteur colonne numérique.}$$

B est la matrice de passage de la base canonique C dans la base β , ce qui donne :

$$y_j = B^{-1} \cdot a_j \quad : y_j \text{ est l'expression des coordonnées de } a_j \text{ dans la base } \beta$$

Le vecteur de R^n défini par $\begin{cases} x_B = B^{-1} \cdot b & (j \in \beta) \\ x_j = 0 & (j \in \bar{\beta}) \end{cases}$ est une solution du système. (4.6)

C'est une solution de base. Elle possède au moins $(n-m)$ coordonnées nulles.

La valeur de la fonction économique associée à une solution de base est :

Rapport gratuit.com
LE GOUT DES MEILLEURS



Ou

$$z = c_\beta \cdot x_B = c_\beta \cdot B^{-1} \cdot b \quad (4.7)$$

IV.4.4. Expression en fonction des variables hors base

Notons : $z_j = c_\beta \cdot y_j = c_\beta \cdot B^{-1} \cdot a_j \quad (j = 1, 2, \dots, n)$

Considérons la matrice des vecteurs colonnes hors base, soit \bar{B} .

Nous pouvons alors exprimer les variables de base en fonction des variables hors base :

$$\begin{aligned} Ax = b &\rightarrow B \cdot x_\beta + \bar{B} \cdot x_{\bar{\beta}} = b \\ &\rightarrow x_\beta = B^{-1} \cdot b - B^{-1} \cdot \bar{B} \cdot x_{\bar{\beta}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

D'autre part : $x_\beta \geq 0, x_{\bar{\beta}} \geq 0$

Et : $z = c_\beta \cdot x_\beta + c_{\bar{\beta}} \cdot x_{\bar{\beta}}$

$$\begin{aligned} z &= c_\beta \cdot B^{-1} \cdot b - c_\beta \cdot B^{-1} \cdot \bar{B} \cdot x_{\bar{\beta}} + c_{\bar{\beta}} \cdot x_{\bar{\beta}} \\ z &= z_\beta + (c_{\bar{\beta}} - c_\beta \cdot B^{-1} \cdot \bar{B}) x_{\bar{\beta}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

$(c_{\bar{\beta}} - c_\beta \cdot B^{-1} \cdot \bar{B})$ est un vecteur ligne dont la composante associée à l'indice j de $\bar{\beta}$ est :

$$c_j - c_\beta \cdot B^{-1} \cdot a_j = c_j - z_j \quad (j \in \bar{\beta}) \quad (4.10)$$

IV.4.5. Coûts marginaux

Les coûts marginaux associés à la base β sont les scalaires $c_j - z_j \quad (j \in N)$ car ils représentent l'accroissement de la fonction objectif dû à l'accroissement d'une unité de la variable x_j .

Les coûts marginaux associés aux variables de base sont nuls.

IV.4.6. Base réalisable initiale

Rappelons qu'une base β est réalisable si $x_B = B^{-1} \cdot b \quad (j \in \beta)$ est positif ou nul. Si l'ensemble des solutions E n'est pas vide, alors il existe au moins une base réalisable.

Partons de la formulation initiale PL⁰ du programme linéaire :

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ x &\geq 0 \\ \text{Opt } z &= cx \end{aligned} \quad (4.11)$$



Si l'ensemble des vecteurs colonnes de la matrice A contient la base canonique de R^m , cette base est alors réalisable ($b \geq 0$) et $B_0 = I_{m,m}$. Ce cas particulier simple se produit lorsque chaque contrainte de type $Ax = b$ du programme linéaire initial mise sous la forme :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i$$

est telle que : $b_i \geq 0$, les variables d'écart étant alors les variables de base initiales.

IV.4.7. La méthode en deux phases

C'est une méthode de recherche d'une base réalisable initiale en construisant un programme linéaire PL^1 déduit de PL^0 , tels que :

- $B_0 (=I_{m,m})$ soit réalisable pour PL^1

• La structure de la solution optimale de PL^1 permette de savoir si E est vide et, dans le cas contraire, d'exhiber une base réalisable de PL^0 .

Dans la formulation de (4.11), nous avons trois types de contraintes, à savoir :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + s_i = b_i \quad i \in A' \quad (4.12)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j - s_i = b_i \quad i \in B' \quad (4.13)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j = b_i \quad i \in C' \quad (4.14)$$

Seuls les vecteurs colonne associés aux variables d'écart s_i , $i \in A'$, sont des vecteurs canoniques de R^m . Nous allons faire apparaître artificiellement les m vecteurs canoniques de R^m en adjoignant à chaque contrainte de type B' ou C' une variable artificielle de la manière suivante :

- Pour les contraintes de type B' :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j - s_i + t_i = b_i \quad i \in B' \quad (4.15)$$

- Pour les contraintes de type C' :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + t_i = b_i \quad i \in C' \quad (4.16)$$



Nous obtenons alors un nouveau système de contraintes linéaire, à savoir :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + s_i = b_i \quad i \in A' \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j - s_i + t_i = b_i \quad i \in B' \\ \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + t_i = b_i \quad i \in C' \end{array} \right.$$

Ce sont les équations (4.17) , (4.18) et (4.19).

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_j \geq 0 & j = 1, 2, \dots, n \\ s_i \geq 0 & i \in A' \cup B' \\ t_i \geq 0 & i \in B' \cup C' \end{array} \right.$$

Ces six contraintes définissent notre nouveau programme linéaire PL¹.

Le sous ensemble des valeurs affectées aux variables x_j et s_i constitue un point de E si et seulement si : $t_i = 0 \quad i \in B' \cup C'$

Afin de trouver une base réalisable du système précédent, il faut chercher l'optimum de la fonction objectif suivante :

$$z = \sum_{i \in B' \cup C'} t_i \quad (4.20)$$

Donc, comme base initiale, nous choisirons :

$$\begin{aligned} s_i &= b_i \quad i \in A' \\ t_i &= b_i \quad i \in B' \cup C' \end{aligned}$$

Si $\forall i \in B' \cup C'$, t_i est une variable hors base ; alors la base optimale β^* de PL¹ est aussi une base réalisable pour PL⁰. La base β^* ne contient pas de variables artificielles.

La méthode en deux phases nous a donc permis de trouver une base réalisable initiale du système de départ à partir d'un autre système déduit de celui-ci.

IV.4.8. Amélioration d'une solution de base

Considérons une base réalisable β supposée connue.

Réalisons une nouvelle base réalisable γ telle que :

$$\gamma = \beta - \{i_0\} \cup \{j_0\} \quad (4.21)$$

où i_0 est un indice de base et j_0 un indice hors base. Pour que H soit une base, la condition nécessaire et suffisante est que : $y_{i_0 j_0} \neq 0$



Mais pour qu'elle soit réalisable, il faut :

$$\frac{x_{i_0}}{y_{i_0 j_0}} a_{j_0} + \sum_{k=1}^{m-1} \left[x_{i_k} - x_{i_0} \frac{y_{i_k j_0}}{y_{i_0 j_0}} \right] a_{i_k} = b \quad (4.22)$$

Décomposition de b sur γ :

$$x'_{j_0} = \frac{x_{i_0}}{y_{i_0 j_0}} \quad \text{et} \quad x'_{i_k} = x_{i_k} - x_{i_0} \frac{y_{i_k j_0}}{y_{i_0 j_0}} \quad \text{avec } k = 1, 2, \dots, m-1$$

Et il faut que les x' soient positifs ou nuls ($x' \geq 0$) pour que γ soit réalisable.

- 1^{er} cas : $x_{i_0} = 0$

On a : $x'_{j_0} = 0$ et $x'_{i_k} = x_{i_k}$ pour $k = 1, \dots, m-1$

- 2^è cas : $x_{i_0} > 0$

Ceci implique : $y_{i_0 j_0} > 0$;

Pour $y_{i_k j_0} \leq 0$, on a $x'_{i_k} \geq 0$.

Soit K l'ensemble des indices k telle que $y_{i_k} > 0$.

Sur K , on doit avoir :

$$\forall k \in K \rightarrow \frac{x_{i_0}}{y_{i_0 j_0}} \leq \frac{x_{i_k}}{y_{i_k j_0}} \quad (4.23)$$

C'est le **DEUXIEME CRITERE DE DANTZIG**.

$$\text{Notons } r \text{ la valeur du rapport : } r = \min_{k \in K} \left(\frac{x_{i_k}}{y_{i_k j_0}} \right) \quad (4.24)$$

Valeur de z dans la base γ :

$$z_\gamma = z_\beta + r (c_{j_0} - z_{j_0}) \quad (4.25)$$

Il faut donc choisir convenablement le vecteur entrant a_{j_0} qui va agir sur le terme $r (c_{j_0} - z_{j_0})$ en améliorant la fonction objectif lors du passage de la base β à la base γ .

Dans le cas d'une maximisation, choisir a_{j_0} telle que le coût marginal $c_{j_0} - z_{j_0}$ soit strictement positif. On choisira soit le plus grand coût marginal positif, soit le plus grand accroissement $z_\gamma - z_\beta$. Si tous les coûts marginaux associés à β sont négatifs ou nuls, il n'existe pas de base réalisable adjacente qui donnera une solution de base meilleure que β .



IV.4.9. Conditions d'optimalité

La solution de base associée à la base réalisable β est optimale si :

- Cas d'une maximisation : $\forall j = 1, 2, \dots, n \quad c_j - z_j \leq 0 \quad (4.26)$

- Cas d'une minimisation : $\forall j = 1, 2, \dots, n \quad c_j - z_j \geq 0 \quad (4.27)$

IV.5. REGLES OPERATOIRES

Partons d'une base réalisable β_0 et de l'indice $i = 0$.

Dans le cas d'une maximisation :

- Déterminer les coûts marginaux associés à la base β_i en cours
- Choisir le plus grand
- S'il est négatif ou nul, la base β_i est optimale
- Sinon, faire entrer le vecteur colonne correspondant dans la base (**PREMIER CRITERE DE DANTZIG**) et faire sortir le vecteur colonne imposé par le second critère de Dantzig.
- Si ce changement de base n'est pas possible, incrémenter d'une unité la valeur de i
- Revenir au début jusqu'à avoir la solution optimale.

Dans le cas d'une minimisation, faire l'analogie avec la maximisation.

IV.6. EXEMPLE D'ILLUSTRATION

Les théories données ci-dessus sont très vagues et difficiles à assimiler. Pourtant, à force de s'exercer à résoudre des problèmes d'optimisation par la méthode de la programmation linéaire, on arrive à comprendre son fonctionnement et on constate alors que cette technique est très simple.

Afin de transmettre l'idée générale de la programmation linéaire, notamment la méthode du simplexe, nous allons continuer avec un exemple d'illustration.

Soit l'exemple de programme linéaire suivant que nous nous proposons de résoudre :

$$4x_1 + 3x_2 \geq 12$$

$$-x_1 + x_2 \leq 4$$

$$x_1 + 3x_2 \leq 24$$

$$x_1 \leq 6$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

$$\text{MAX } z = x_1 + 3x_2$$





Cette formulation mathématique est celle d'un problème pas très compliqué.

Introduisons les variables d'écart, le programme linéaire devient alors :

$$\begin{aligned} 4x_1 + 3x_2 - s_1 &= 12 \\ -x_1 + x_2 + s_2 &= 4 \\ x_1 + 3x_2 + s_3 &= 24 \\ x_1 + s_4 &= 6 \\ x_1, x_2, s_1, s_2, s_3, s_4 &\geq 0 \end{aligned}$$

Il apparaît que le vecteur colonne associé à la variable s_1 n'est pas canonique ; il faut alors introduire pour la première contrainte une variable artificielle t_1 . Nous obtenons la formulation suivante :

$$\begin{aligned} 4x_1 + 3x_2 - s_1 + t_1 &= 12 \\ -x_1 + x_2 + s_2 &= 4 \\ x_1 + 3x_2 + s_3 &= 24 \\ x_1 + s_4 &= 6 \\ x_1, x_2, s_1, t_1, s_2, s_3, s_4 &\geq 0 \end{aligned}$$

et il faut ajouter la contrainte suivante : $\text{MIN } z = t_1$.

Nous avons alors constitué le programme linéaire adjoint PL^1 .

La base initiale β_0 pour PL^1 est associée à l'ensemble des variables (t_1, s_2, s_3, s_4) . Les variables x_1, x_2 et s_1 sont des variables hors base ; calculons leurs coûts marginaux :

Puisque $\beta_0 = I_{4,4}$ et $c_{B_0} = (1, 0, 0, 0)$, nous avons :

$$\begin{aligned} \Delta(x_1) &= c_{x_1} - c_{B_0} y_{x_1} = c_{x_1} - c_{B_0} B_0^{-1} a_1 = -4 \\ \Delta(x_2) &= c_{x_2} - c_{B_0} y_{x_2} = c_{x_2} - c_{B_0} B_0^{-1} a_2 = -3 \\ \Delta(s_1) &= c_{s_1} - c_{B_0} y_{s_1} = c_{s_1} - c_{B_0} B_0^{-1} a_{s_1} = 1 \end{aligned}$$

L'optimisation est ici une minimisation, donc d'après le premier critère de Dantzig, nous choisirons le vecteur colonne associé à la variable x_1 , qui a le coût marginal négatif le plus grand en valeur absolue, comme vecteur entrant. D'après le second critère, c'est la variable de base t_1 qui va sortir de la base β_0 . Les détails de la méthode seront expliqués dans la deuxième phase.

La nouvelle base β_1 associée aux variables (x_1, s_2, s_3, s_4) ne contient pas de variables artificielles, donc elle est optimale pour PL^1 et est une base réalisable pour PL^0 .

Nous avons alors achevé la « première phase ». Pour démarrer la seconde, il suffit de reprendre la fonction économique initiale : $\text{MAX } z = x_1 + 3x_2$.

Les variables hors base sont x_2 et s_1 .



La nouvelle matrice B_1 est égale à :

$$B_1 = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Et son inverse :

$$B_1^{-1} = \begin{pmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 \\ 1/4 & 1 & 0 & 0 \\ -1/4 & 0 & 1 & 0 \\ -1/4 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec : $c_{B_1} = (1, 0, 0, 0)$

La solution réalisable avec cette base est :

$$x_{B_1} = B_1^{-1}b = B_1^{-1} \begin{pmatrix} 12 \\ 4 \\ 24 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 21 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Les coordonnées des vecteurs associés aux variables hors base sont :

- Pour le vecteur associé à x_2 :

$$y_{x_2} = B_1^{-1}a_2 = B_1^{-1} \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 3 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3/4 \\ 7/4 \\ 9/4 \\ -3/4 \end{pmatrix}$$

- Pour le vecteur associé à s_1 :

$$y_{s_1} = B_1^{-1}a_{s_1} = B_1^{-1} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/4 \\ -1/4 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{pmatrix}$$

Nous en déduisons les coûts marginaux des variables hors base, soit :

- Pour x_2 :

$$\Delta(x_2) = c_{x_2} - c_{B_1} y_{x_2} = 3 - 3/4 = 9/4$$

- Pour s_1 :

$$\Delta(s_1) = c_{s_1} - c_{B_1} y_{s_1} = 0 - (-1/4) = 1/4$$



La base β_1 n'est pas optimale puisqu'il existe un Δ strictement positif ; il nous faut donc une base β_2 déduite de β_1 :

- D'après le premier critère de Dantzig, c'est le vecteur colonne correspondant à x_2 qui va entrer dans la nouvelle base (plus grand coût marginal positif)
- Comme c'est x_2 qui possède le plus grand coût marginal, le vecteur colonne

« y » à considérer sera donc : $y_{x_2} = \begin{pmatrix} 3/4 \\ 7/4 \\ 9/4 \\ -3/4 \end{pmatrix}$

Calcul des rapports r :

$$x_{B_1} = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 21 \\ 3 \end{pmatrix}$$

	x_{1_k}	$y_{i_k j_0}$	r
x_1	3	3/4	$3/(3/4) = 4$
s_2	7	7/4	$7/(7/4) = 4$
s_3	21	9/4	$21/(9/4) = 84/9$
s_4	3	-3/4	

On ne calcule pas le rapport correspondant à s_4 car $-3/4 < 0$.

Nous avons deux rapports minimaux (= 4) correspondants à x_1 et s_2 . Choisissons s_2 comme variable sortante de la base. La nouvelle base est donc constituée des vecteurs associés aux variables x_1, x_2, s_3, s_4 .

La matrice B_2 associée ainsi que son inverse sont données par :

$$B_2 = \begin{pmatrix} 4 & 3 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B_2^{-1} = \begin{pmatrix} 1/7 & -3/7 & 0 & 0 \\ 1/7 & 4/7 & 0 & 0 \\ -4/7 & -9/7 & 1 & 0 \\ -1/7 & 3/7 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec : $c_{B_2} = (1, 3, 0, 0)$

La solution réalisable avec cette base est :

$$x_{B_2} = B_2^{-1}b = B_2^{-1} \begin{pmatrix} 12 \\ 4 \\ 24 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 12 \\ 6 \end{pmatrix}$$



Les coordonnées des vecteurs associés aux variables hors base sont :

- Pour le vecteur associé à s_1 :

$$y_{s_1} = B_2^{-1} a_{s_1} = B_2^{-1} \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/7 \\ -1/7 \\ 4/7 \\ 1/7 \end{pmatrix}$$

- Pour le vecteur associé à s_2 :

$$y_{s_2} = B_2^{-1} a_{s_2} = B_2^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3/7 \\ 4/7 \\ -9/7 \\ 3/7 \end{pmatrix}$$

Nous en déduisons les coûts marginaux des variables hors base, soit :

- Pour s_1 :

$$\Delta(s_1) = c_{s_1} - c_{B_2} y_{s_1} = 0 - (-4/7) = 4/7$$

- Pour s_2 :

$$\Delta(s_2) = c_{s_2} - c_{B_2} y_{s_2} = 0 - (9/7) = -9/7$$

La base β_2 n'est pas optimale puisque $\Delta(s_1)$ est strictement positif ; il nous faut donc une base β_3 déduite de β_2 :

- D'après le premier critère de Dantzig, c'est le vecteur colonne correspondant à s_1 qui va entrer dans la nouvelle base (plus grand coût marginal positif)
- Comme c'est s_1 qui possède le plus grand coût marginal, le vecteur colonne

« y » à considérer sera donc : $y_{s_1} = \begin{pmatrix} -1/7 \\ -1/7 \\ 4/7 \\ 1/7 \end{pmatrix}$



Calcul des rapports r :

$$\mathbf{x}_{B_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 12 \\ 6 \end{pmatrix}$$

	x_{l_k}	$y_{i_k j_0}$	r
x_1	0	-1/7	
x_2	4	-1/7	
s_3	12	4/7	$12/(4/7)=21$
s_4	6	1/7	$6/(1/7)=42$

D'après le second critère de Dantzig, puisque c'est la variable s_3 qui a le plus petit rapport, donc c'est elle qui va devenir hors base. La nouvelle base est donc constituée des vecteurs associés aux variables x_1, x_2, s_1, s_4 .

La matrice B_3 associée ainsi que son inverse sont données par :

$$B_3 = \begin{pmatrix} 4 & 3 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad B_3^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & -3/4 & 1/4 & 0 \\ 0 & 1/4 & 1/4 & 0 \\ -1 & -9/4 & 7/4 & 0 \\ 0 & 3/4 & -1/4 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec : $c_{B_3} = (1, 3, 0, 0)$

La solution réalisable avec cette base est :

$$\mathbf{x}_{B_3} = B_3^{-1} \mathbf{b} = B_3^{-1} \begin{pmatrix} 12 \\ 4 \\ 24 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 21 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Les coordonnées des vecteurs associés aux variables hors base sont :

- Pour le vecteur associé à s_2 :

$$y_{s_2} = B_3^{-1} a_{s_2} = B_3^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3/4 \\ 1/4 \\ -9/4 \\ 3/4 \end{pmatrix}$$



- Pour le vecteur associé à s_3 :

$$y_{s_3} = B_3^{-1}a_{s_3} = B_3^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/4 \\ 1/4 \\ 7/4 \\ -1/4 \end{pmatrix}$$

Nous en déduisons les coûts marginaux des variables hors base, soit :

- Pour s_2 :

$$\Delta(s_2) = c_{s_2} - c_{B_3} y_{s_2} = 0$$

- Pour s_3 :

$$\Delta(s_3) = c_{s_3} - c_{B_3} y_{s_3} = -1$$

Tous les coûts marginaux des variables hors base sont négatifs ou nuls, donc la base β_3 est optimale pour le programme linéaire. La solution de base optimale associée est :

$$x_{B_3} = B_3^{-1}b = B_3^{-1} \begin{pmatrix} 12 \\ 4 \\ 24 \\ 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 21 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Une solution optimale de PL^0 est donnée par :

$$x_1=3 ; x_2=7 ; s_1=21 ; s_2=0 ; s_3=0 ; s_4=3$$

Résumons l'évolution de la fonction objectif pendant ces changements de bases :

- Pour la base β_1 :



$$z_{B_1} = c_{B_1} x_{B_1} = (1, 0, 0, 0) \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 21 \\ 3 \end{pmatrix} = 3$$

- Pour la base β_2 :

$$z_{B_2} = c_{B_2} x_{B_2} = (1, 3, 0, 0) \begin{pmatrix} 0 \\ 4 \\ 12 \\ 6 \end{pmatrix} = 12$$

- Pour la base β_3 :

$$z_{B_3} = c_{B_3} x_{B_3} = (1, 3, 0, 0) \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \\ 21 \\ 3 \end{pmatrix} = 24$$

On voit bien que le passage d'une base à une autre a amélioré la valeur de la fonction objectif (ici la valeur de z augmente car c'est une maximisation).

Donc, la programmation linéaire (méthode du simplexe) peut être utilisée pour la recherche d'une solution optimale d'un système aussi complexe soit-il.

En pratique, la méthode du simplexe est rédigée sous forme de tableaux successifs contenant tous les paramètres et résultats relatifs à une base. Il apparaît un nouveau tableau à chaque itération faite. Mais dans la résolution de notre exemple, nous avons présenté la méthode avec beaucoup plus de détails afin de comprendre le déroulement même des calculs d'optimisation utilisant cette technique.



Chapitre V. DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE HYBRIDE PAR LA PROGRAMMATION LINEAIRE

V.1. BUT ET PRINCIPE

Le but de cette étude est de concevoir un système hybride « biogaz-solaire-diesel » (SHBSD) pour un complexe agro-industriel autonome. Nous nous limiterons au dimensionnement des éléments qui vont fournir l'énergie nécessaire à l'approvisionnement de l'unité, sans entrer dans les détails d'installation et d'utilisation.

Pour ce faire, nous allons élaborer un modèle économico-mathématique correspondant à un tel système hybride, que nous allons ensuite utiliser pour déterminer la combinaison optimale des sources d'énergie qui peuvent satisfaire les besoins de l'ensemble, en engendrant le coût minimum d'investissement.

Notre objectif est donc de minimiser le coût total de l'installation du système hybride. Par conséquent, nous devons établir une fonction objectif donnant la somme des dépenses occasionnées par une combinaison quelconque des sources d'énergie, un système d'équations et d'inéquations ou contraintes relatives aux besoins de l'unité agro-industrielle.

Les variables qui seront étudiées afin de trouver le coût minimum sont les paramètres d'utilisation d'une source pour satisfaire en totalité ou en partie les besoins d'une forme d'énergie ou d'un produit. Le problème sera donc d'évaluer le coût unitaire d'une combinaison source-produit.

V.2. CHOIX DES SOURCES « BIOGAZ – SOLAIRE - DIESEL »

Parmi les différentes sources d'énergie connues, nous avons choisi le biogaz, le solaire et le diesel pour des raisons justifiées.

Notre critère de choix se pose sur les plans technique, économique, écologique et social.

V.2.1. Choix du biogaz

- Possibilité de générer plusieurs produits à la fois : électricité, énergie thermique, force motrice
 - Rendement élevé et coût réduit en production multiple
 - Grande disponibilité
 - Energie renouvelable
 - Création d'emplois
 - Valorisation des déchets
 - Impact environnemental positif.



V.2.2. Choix du solaire

- Disponible partout
- Energie propre et renouvelable
- Faible taux d'émission de gaz nocifs
- Très rentable à long terme : dépenses d'exploitation faibles
- Durée de vie élevée
- Réduction des pollutions
- Impact environnemental positif.

V.2.3. Choix du diesel

- Compensation des autres sources
- Puissance élevée
- Facilité d'utilisation en mode appoint
- Plus rentable pour les grandes puissances
- Installation simple.

V.2.4. Choix de la pompe à eau électrique

L'eau est vitale pour l'humanité.

Généralement, on devrait pouvoir trouver de l'eau en creusant un puits d'une quinzaine de mètres de profondeur.

La non exploitation de ce site impliquerait la dépendance à un réseau de distribution, ou le cas échéant, la nécessité d'aller puiser de l'eau ailleurs, par exemple à partir d'une rivière ou d'une source montagneuse. Le transport impliquant ainsi des dépenses en surplus.

Le pompage de l'eau à partir d'un puits permet de produire de l'eau potable localement et en quantité suffisante.

V.2.5. Remarques

- L'utilisation du solaire photovoltaïque s'accompagne toujours d'éléments de stockage, dont les paramètres sont inclus dans le dimensionnement des panneaux.
- Nous avons classé le pompage de l'eau parmi les sources, bien qu'il doit utiliser une autre forme d'énergie (électricité), parce que l'eau qu'il produit est plus importante que l'énergie consommée.



V.3. **MODELISATION ECONOMICO-MATHEMATIQUE [3][4][5][6][9][10]**

La modélisation économico-mathématique du SHBSD comportera cinq grandes parties qui sont :

- L'évaluation des ressources disponibles
- L'évaluation des charges et principaux besoins
- La formulation théorique des éléments de la programmation linéaire (fonction objectif et contraintes)
 - La recherche des différents paramètres du modèle
 - La résolution par la programmation linéaire.

Nous utiliserons l'indice « i » pour les sources d'énergie et l'indice « j » pour les formes d'énergie ou les produits obtenus.

V.3.1. **Les sources d'énergie utilisées**

L'installation de biogaz sera utilisée pour produire de l'électricité et de l'énergie thermique. On en tirera aussi en outre de l'engrais organique pour l'agriculture.

Le solaire comportera une station photovoltaïque pour l'électricité et un système de chauffage solaire.

On considérera un groupe diesel de cogénération qui fournira en même temps de l'électricité et de l'énergie thermique.

La liste suivante résume les différentes sources d'énergie utilisées dans notre système hybride. Elles ne sont pas classées par ordre de priorité comme dans la méthode du LPSP.

- | | |
|-------|------------------------------|
| i = 1 | Installation de biogaz (IBG) |
| i = 2 | Groupe électrogène (GE) |
| i = 3 | Station photovoltaïque (SPV) |
| i = 4 | Chauffe eau solaire (CES) |
| i = 5 | Station de pompage (SP) |

V.3.2. **Les formes d'énergie et produits disponibles**

En combinant les sources citées ci-dessus, nous pouvons avoir les formes d'énergie et produits suivants à partir de la centrale hybride (classés selon un quelconque ordre) :

- | | |
|-------|-----------------------------------------|
| j = 1 | Courant alternatif |
| j = 2 | Energie thermique pour cuisson (300° C) |
| j = 3 | Eau chaude |
| j = 4 | Eau potable |
| j = 5 | Engrais organique |

V.3.3. **Structure Paramétrique du modèle**

Le schéma relationnel suivant montre les combinaisons possibles entre les sources d'énergie et les produits U_j obtenus, dont les proportions de production seront à déterminer par la programmation linéaire.

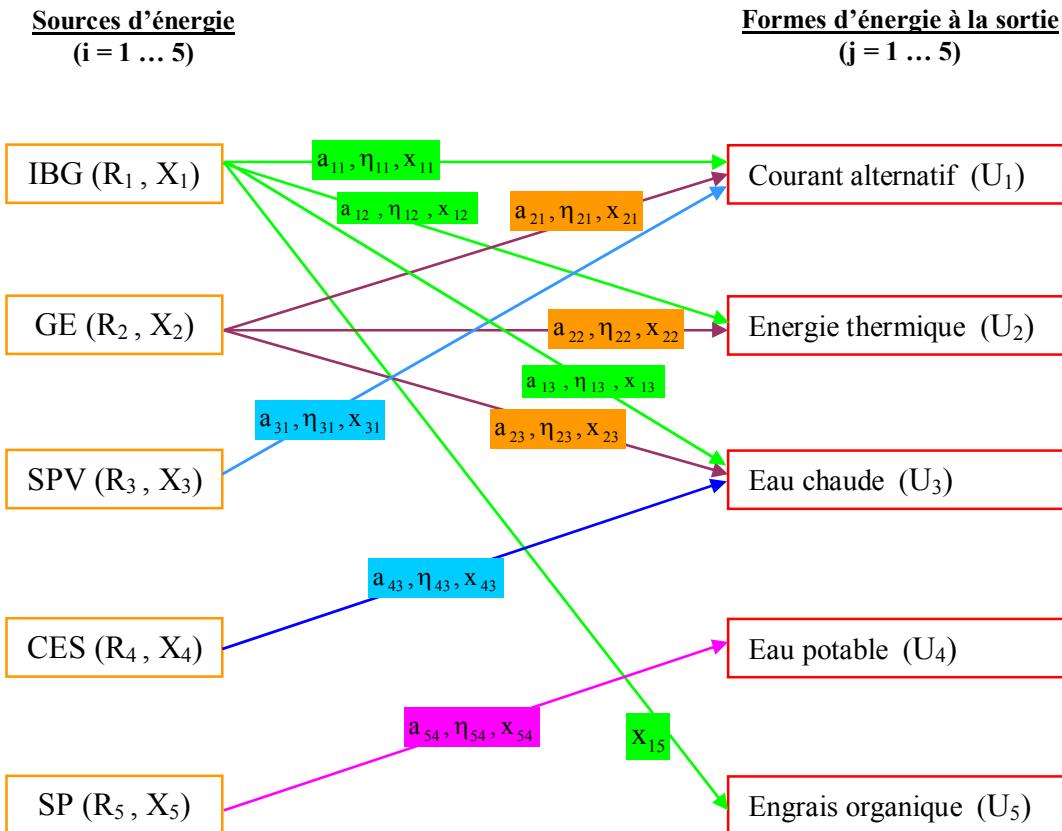


Figure N° 23 : Schéma relationnel entre sources et produits

Légendes :

x_{ij} : quantité de $i^{\text{ème}}$ source pour satisfaire complètement ou en partie les usagers de $j^{\text{ème}}$ forme d'énergie ou produits obtenus

$$X_i = \sum_{j=1}^5 x_{ij} \quad (5.1)$$

R_i : équivalent énergétique de la source i

$$E_i = R_i X_i \quad (5.2)$$

: somme annuelle de l'énergie obtenue à partir de la source i

$$E_{ij} = R_i x_{ij} \quad (5.3)$$

: une partie de E_i utilisée pour avoir $j^{\text{ème}}$ forme d'énergie ou produits obtenus

U_j : énergie totale nécessaire aux usagers de $j^{\text{ème}}$ forme d'énergie ou de produits obtenus

U_{ij} : une partie de U_j donnée par la $i^{\text{ème}}$ source

a_{ij} : coût spécifique de l'énergie de la combinaison « $i-j$ » en \$/kWh



$$\eta_{ij} = U_{ij}/E_{ij} \quad (5.4)$$

: rendement de transmission de l'énergie de la source i vers les usagers de j forme d'énergie ou de produits obtenus

ORGANIGRAMME DE CONCEPTION D'UN SYSTEME HYBRIDE PAR LA PROGRAMMATION LINEAIRE :

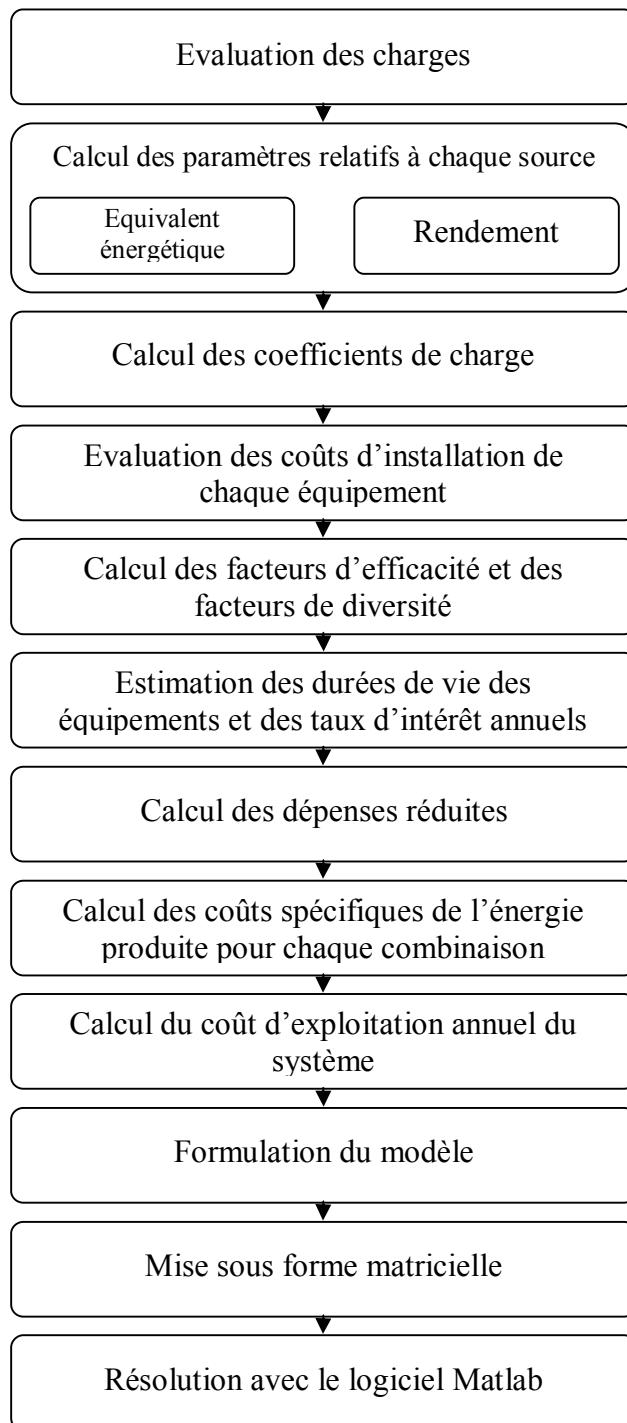


Figure N° 24 : Organigramme de résolution par la programmation linéaire

V.3.4. Formulation de la fonction objectif



- Coût annuel de la combinaison « i-j » :

$$C_{ij} = \frac{T_{cr,ij} P_{ij} E_{ij}}{8760 k_{ij}} \quad (5.5)$$

où $T_{cr,ij}$: dépenses réduites de la combinaison « i-j » pour un agrégat

k_{ij} : facteur d'utilisation de la combinaison « i-j »

P_{ij} : coût spécifique des dispositifs de la combinaison « i-j »

Avec :

$$T_{cr,ij} = \frac{r(1+r)^{n_{ij}}}{(1+r)^{n_{ij}} - 1} + m_{ij} \quad (5.6)$$

Où n_{ij} est la durée de vie de la combinaison « i - j », et m_{ij} les charges d'exploitation correspondant.

Il est préférable d'exprimer E_{ij} par (5.3)

- Coût total du système (en \$):

$$C = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 C_{ij} \quad (5.7)$$

En combinant ces formules, nous pouvons simplifier l'équation du coût général du système hybride :

$$C = \sum_{i=1}^5 R_i \left[\sum_{j=1}^5 a_{ij} x_{ij} \right] \rightarrow \text{à minimiser} \quad (5.8)$$

Avec :

$$a_{ij} = \frac{T_{cr,ij} P_{ij}}{8760 k_{ij}} \quad [\$/kWh] \quad (5.9)$$

V.3.5. Formulation des contraintes

La formulation des contraintes repose essentiellement sur la connaissance de base en matière d'énergie. Nous allons essayer de trouver le maximum de contraintes pour affiner le résultat, au moyen des théories qui peuvent être appliquées au SHBSD.

Ainsi donc, les contraintes seront formulées comme suit :

a) Bilan énergétique :

La somme des énergies fournies par toutes les sources pour le produit j doit être égale à l'énergie totale U_j demandée par les consommateurs en $j^{i\text{ème}}$ forme d'énergie.



$$U_j = \sum_{i=1}^5 R_i \eta_{ij} x_{ij} \quad \text{pour } j = 1 \dots 5 \quad (5.10)$$

E_{ij} étant la part d'énergie fournie par la source i pour donner une partie du produit j , la quantité utile sous forme de produit j en utilisant la source i est égale à :

$$U_{ij} = E_{ij} \eta_{ij} \quad (5.11)$$

b) Flux énergétique :

Le flux énergétique sommaire, approvisionné par les sources combinées (IBG, GE, CES), doit être égal à la somme des énergies thermique et électrique nécessaires d'après le bilan thermique suivant :

$$A + \xi + Q_{\text{cond}} = Q_s \quad (5.12)$$

où A : énergie par la combustion du groupe de cogénération

ξ : affluent de l'énergie solaire et du biogaz

Q_{cond} : affluent de la chaleur de l'eau condensée

$Q_s = Q_T + \varepsilon$: somme d'énergie nécessaire à la sortie du groupe

Q_T : énergie thermique

ε : énergie électrique

$$R_1 \eta_{11} x_{11} + R_2 \eta_{21} x_{21} + R_3 \eta_{31} x_{31} + R_2 \eta_{23} x_{23} + R_4 \eta_{43} x_{43} = G_{\text{vap}} (H_{\text{ev}} - H_{\text{ee}}) + U_1$$

Où G_{vap} : consommation de vapeur pour l'élevage

H_{ev} : enthalpie de la vapeur

H_{ee} : enthalpie de l'eau condensée

U_1 : énergie électrique nécessaire

c) Contrainte en puissance :

La puissance délivrée par chaque source ne doit pas dépasser sa puissance nominale en régime continu. Si p_i est la puissance maximale utile disponible pour la source i et p_{ai} sa puissance nominale, alors :

$$p_i \leq p_{ai} \quad \text{ou} \quad p_{ai} - p_i \geq 0 \quad (5.13)$$

$$\text{Avec : } p_i = \frac{1}{d_i} \sum_{j=1}^5 p_{ij} \quad \text{et} \quad p_{ai} = \frac{E_i}{8760 \cdot k_i}$$

Soit :

$$\frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^5 x_{ij} - \frac{1}{d_i} \sum_{j=1}^5 \frac{x_{ij}}{k_{ij}} \geq 0 \quad \text{pour } i = 1 \dots 5 \quad (5.14)$$



Où : $d_i = \frac{\text{Somme des demandes maximum}}{\text{Demande max imum}}$;

$$k_{ij} = \frac{E_{ij}}{8760p_{ij}} = \frac{U_{ij}}{8760\eta_{ij} p_{ij}} \quad (5.15)$$

Dans cette équation de k_{ij} , les valeurs de p_{ij} et U_{ij} ne sont pas connues d'avance. Cependant, l'énergie totale demandée U_j et la consommation maximale admissible p_{0j} doivent être connues ou estimées avant le calcul. Si on suppose que le rapport entre la pointe et la puissance moyenne requise par une tâche ne dépend pas des sources, alors on peut estimer que :

$$k_{ij} = \frac{U_j}{8760p_{0j}} \quad (5.16)$$

d) Disponibilité des ressources :

Evidemment, les sources d'énergie, bien qu'elles soient renouvelables, sont limitées dans le temps. Elles ne peuvent débiter que ce qui est disponible sur le site en temps réel, sauf dans le cas d'utilisation d'un système de stockage. Il est clair alors que la somme des énergies débitées par une source i sous toutes les formes possibles, ne doit pas dépasser la quantité maximale admissible.

$$X_i \geq \sum x_{ij} \quad (5.17)$$

e) Formulation théorique du modèle :

Notre modèle sera donc défini par les contraintes et la fonction objectif suivantes :

Les contraintes : équations (5.18)

1. $R_1\eta_{11}x_{11} + R_2\eta_{21}x_{21} + R_3\eta_{31}x_{31} = U_1$
2. $R_1\eta_{12}x_{12} + R_2\eta_{22}x_{22} = U_2$
3. $R_1\eta_{13}x_{13} + R_2\eta_{23}x_{23} + R_4\eta_{43}x_{43} = U_3$
4. $R_5\eta_{54}x_{54} = U_4$
5. $x_{15} = U_5$
6. $R_1\eta_{11}x_{11} + R_2\eta_{21}x_{21} + R_3\eta_{31}x_{31} + R_2\eta_{23}x_{23} + R_4\eta_{43}x_{43} = G_{vap}(H_{ev} - H_{ee}) + U_1$
7. $\frac{1}{k_1}(x_{11} + x_{12} + x_{13}) - \frac{1}{d_1}\left(\frac{x_{11}}{k_{11}} + \frac{x_{12}}{k_{12}} + \frac{x_{13}}{k_{13}}\right) \geq 0$



$$8. \quad \frac{1}{k_2}(x_{21} + x_{22} + x_{23}) - \frac{1}{d_2} \left(\frac{x_{21}}{k_{21}} + \frac{x_{22}}{k_{22}} + \frac{x_{23}}{k_{23}} \right) \geq 0$$

$$9. \quad \frac{1}{k_3}(x_{31}) - \frac{1}{d_3} \left(\frac{x_{31}}{k_{31}} \right) \geq 0$$

$$10. \quad \frac{1}{k_4}(x_{43}) - \frac{1}{d_4} \left(\frac{x_{43}}{k_{43}} \right) \geq 0$$

$$11. \quad \frac{1}{k_5}(x_{54}) - \frac{1}{d_5} \left(\frac{x_{54}}{k_{54}} \right) \geq 0$$

$$12. \quad x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq X_1$$

$$13. \quad x_{21} + x_{22} + x_{23} \leq X_2$$

$$14. \quad x_{31} \leq X_3$$

$$15. \quad x_{43} \leq X_4$$

$$16. \quad x_{54} \leq X_5$$

$$17. \quad x_{ij} \geq 0, \quad \forall i=1 \dots 5, \quad \forall j=1 \dots 5$$

18. La fonction objectif à optimiser : équation (5.19)

$$C = \left\{ R_1 a_{11} x_{11} + R_1 a_{12} x_{12} + R_1 a_{13} x_{13} + R_1 a_{15} x_{15} + R_2 a_{21} x_{21} + R_2 a_{22} x_{22} + \dots \right. \\ \left. R_2 a_{23} x_{23} + R_3 a_{31} x_{31} + R_4 a_{43} x_{43} + R_5 a_{54} x_{54} \right\} \rightarrow \min$$

Sachant les formules théoriques qui vont nous aider à rédiger le modèle économico-mathématique, nous allons maintenant essayer de déterminer les valeurs des différents paramètres manquants.

Pour cela, considérons l'exemple concret d'un village typique situé dans une région isolée de Madagascar. Nous avons pris des valeurs relatives pour cet exemple, mais elles sont susceptibles de changements en fonction de l'emplacement du site.

V.4. CARACTERISTIQUES DU VILLAGE DONNÉ EN EXEMPLE

Les données suivantes ont été tirées de [4].

Le village compte 1500 habitants répartis en 300 ménages. La plupart de la population œuvre dans des activités d'élevage et d'agriculture ; une usine de transformation agro-industrielle complète la production locale. On trouve des unités de décortiquerie, de provanderie, et quelques usines de traitement du lait.

Il y a 5 fermes comportant chacune 200 bétails en moyenne, soit un total de 1000 têtes.

Dans notre exemple, nous supposons que les besoins sont constants tout au long de l'année. Mais en pratique, la demande en énergie varie d'une saison à une autre, donc on



doit faire le dimensionnement des éléments du système hybride pour chaque saison, et on fera une comparaison entre les différentes études réalisées.

Le site reçoit un ensoleillement journalier de 4 kWh/m².jour.

La population a été éduquée sur la maîtrise de l'énergie. La consommation journalière en électricité de chaque ménage a été fixée ainsi que l'utilisation de l'ensemble des ateliers et usines.

Evaluation des demandes annuelles :

Utilisation (j)	Energie (U_j) kWh/an	Puissance maximale (p_{oj}) en kW
1	788 160	262,7
2	289 080	154,1
3	690 966	216,0
4	144 000	45,0
TOTAL	1 912 206	677,8
5	12 417 T	

Tableau N° 8 : Evaluation des besoins énergétiques du village [4]

V.5. LES EQUIVALENTS ENERGETIQUES

Ce sont des coefficients propres à chaque source et ils sont calculés à partir de nombreux paramètres relatifs à la source considérée. L'équivalent énergétique de la source i est notée : R_i.

V.5.1. Equivalent énergétique du biogaz (R₁) [6] [13]

D'après les nombreuses expériences menées par l'ingénieur chercheur R. Ramakumar en matière de bioénergie, il a adopté comme valeur moyenne, pour le biogaz :

$$R_1 = 5,55 \text{ kWh/n.m}^3$$

V.5.2. Equivalent énergétique du Groupe Electrogène (R₂) [7] [8]

Pour le groupe de cogénération diesel, l'équivalent énergétique est rapporté à celui du gas-oil.

D'après l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), l'équivalent énergétique moyenne du pétrole et de ses dérivées est de 9500kCal/kg.

En utilisant la conversion d'unité : 1 kWh = 861 kCal ; nous arrivons à l'expression suivante : R₂ = 11 kWh/kg.

Avec une densité de 0,845 [14] nous avons enfin :

$$R_2 = 13,02 \text{ kWh/l}$$



V.5.3. Equivalent énergétique du solaire photovoltaïque (R₃) [1] [4] [10]

L'équivalent énergétique du SPV est calculé comme étant l'énergie délivrée sous forme de courant continu pendant une année. Si nous comptons 365 jours par an, alors le nombre d'heures de marches possibles en une année est égale à : $H = 24 * 365 = 8760$ heures.

Ce qui nous donne :

$$R_3 = \eta_p \sum_{\alpha=1}^{8760} Y_\alpha \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (5.20)$$

Où : η_p est le facteur d'efficacité pour la conversion
 Y_α l'ensoleillement moyen reçu par heure.

Avec un facteur de conversion de $\eta_p = 10\%$, nous avons :

$$\begin{aligned} R_3 &= 0,10 \times 365 \times 5,5 \\ &= 200 \text{ kWh/m}^2 \text{ par an} \end{aligned}$$

V.5.4. Equivalent énergétique du solaire thermique (R₄)

R₄ est l'équivalent de l'énergie thermique annuelle fournie par les collecteurs de chaleur.

$$R_4 = \eta_t \sum_{\alpha=1}^{8760} Y_\alpha \quad (5.21)$$

Le rendement de cette conversion est de 40 % à 60 %. Supposons que $\eta_t = 55\%$ [4] [9]

$$\begin{aligned} R_4 &= 0,55 \times 365 \times 5,5 \\ &= 1104 \text{ kWh/m}^2 \text{ par an.} \end{aligned}$$

V.5.5. Equivalent énergétique de la station de pompage (R₅) [4] [6]

La station de pompage utilise l'énergie électrique ou mécanique produite par le système hybride pour pomper l'eau à partir d'un puit ou d'une rivière.

Toujours à l'aide de ses nombreuses recherches et applications sur les systèmes hybrides, R.Ramakumar a constaté que la valeur de l'équivalent énergétique d'une station de pompage est bornée entre deux valeurs.

Les limites de cette valeur sont de 1 à 1,50 kWh/kWh.

On choisit la moyenne qui est de : $R_5 = 1,25 \text{ kWh/kWh}$ [4]





V.5.6. Résumé

Sources (i)	1	2	3	4	5
R_i	5,55 kWh/n.m ³	13,02 kWh/l	200 kWh/m ² .an	1104 kWh/m ² .an	1,25 kWh/kWh

Tableau N° 9 : Equivalents énergétiques des différentes sources d'énergie

V.6. RENDEMENT DE CHAQUE COMBINAISON

V.6.1. Biogaz – Courant Alternatif [5]

Si on revient à la structure interne d'une installation de biogaz, on voit qu'une telle installation comprend deux unités productives principales : la chaudière et la turbine, qui sont le siège des pertes dans la machine.

Ayant les valeurs des deux paramètres, on peut calculer le rendement global de l'installation de biogaz d'après la formule suivante :

$$\eta_{11} = \frac{U_{11}}{E_{11}} = \eta_c \eta_t \quad (5.22)$$

D'après [5] : $\eta_c = 0,83$; $\eta_t = 0,43$

D'où :

$$\eta_{11} = 0,83 \times 0,43 = 0,35 \text{ ou } \eta_{11} = 35 \%$$

V.6.2. Biogaz – Thermique cuisson

D'après [5] , le rendement sera :

$$\eta_{12} = 0,60 \text{ ou } \eta_{12} = 60 \%$$

V.6.3. Biogaz – Eau chaude

D'après [5] :

$$\eta_{13} = 0,83 \text{ ou } \eta_{13} = 83 \%$$

V.6.4. Groupe électrogène – CA

D'après [7] , le rendement de transmission du groupe diesel de cogénération en électricité est de :

$$\eta_{21} = 0,38 \text{ ou } \eta_{21} = 38 \%$$



V.6.5. Groupe électrogène – Thermique cuisson

D'après [7] , le rendement de valorisation de la chaleur à partir d'un groupe de cogénération (environ 200°C) est de :

$$\eta_{22} = 0,85 \text{ ou } \eta_{22} = 85 \%$$

V.6.6. Groupe électrogène – Eau chaude

Encore d'après [7] , la conversion de l'énergie thermique en chaleur utilisable pour les travaux sanitaires (environ 90°) nécessite des appareillages de rendement effectif 90%. Le rendement final de la génération d'eau chaude à partir d'un groupe de cogénération est donc :

$$\eta_{22} = 0,85 \times 0,90 = 0,76 \text{ ou } \eta_{22} = 76 \%$$

V.6.7. Solaire PV – CA

D'après [5] , le rendement de transmission de l'énergie solaire est :

$$\eta_{31} = 0,90 \text{ ou } \eta_{31} = 90 \%$$

V.6.8. Solaire thermique – Eau chaude

D'après [6] , le rendement de transmission d'eau chaude à partir du soleil vers l'utilisation est de :

$$\eta_{43} = 0,70 \text{ ou } \eta_{43} = 70 \%$$

V.6.9. Pompage – Eau potable

D'après nos estimations, le rendement de transmission de l'eau froide à partir du pompage électrique est de :

$$\eta_{54} = 0,85 \text{ ou } \eta_{54} = 85 \%$$

V.6.10. Résumé

Utilisation (j) Source (i)	1	2	3	4	5
1	0,35	0,60	0,83	-	-
2	0,38	0,85	0,76	-	-
3	0,90	-	-	-	-
4	-	-	0,70	-	-
5	-	-	-	0,85	-

Tableau N° 10 : Rendement de chaque combinaison



V.7. EVALUATION DES COUTS SPECIFIQUES

Le calcul des coûts spécifiques de chaque combinaison « i – j » repose essentiellement sur la connaissance des coefficients de charge.

V.7.1. Calcul des coefficients de charge k_{ij}

Ces coefficients se définissent comme étant le facteur d'utilisation de la source i pour satisfaire en partie ou en totalité le produit j.

On utilise la formule (5.16) :

$$k_{ij} = \frac{U_j}{8760p_{0j}}$$

Les valeurs des U_j et de p_{0j} sont déterminées d'avance par enquête sur la prévision de la consommation énergétique du village et présentées dans le tableau 5.1.

Utilisation (j) Source (i)	1	2	3	4	5
1	0,34	0,22	0,22	-	-
2	0,34	0,22	0,22	-	-
3	0,34	-	-	-	-
4	-	-	0,22	-	-
5	-	-	-	0,36	-

Tableau N° 11 : Valeurs des coefficients de charge k_{ij}

V.7.2. Calcul des coûts spécifiques de la puissance installée P_{ij}

Le coût spécifique de la puissance équivaut au coût d'investissement de la puissance installée. Il est exprimé en US \$/kW.

Ce coût varie en fonction du lieu considéré et de la combinaison choisie. Le tableau suivant donne les coûts d'installation de chaque source, d'après [4] et [6].

En particulier, pour le groupe de cogénération qui est la particularité de ce travail, les paramètres ont été tirés des bases de données de RETScreen International [16]. Le coût maximum du kW installé est de 2 000 dollars canadiens, soit 1 620 USD.

Utilisation (j) Source (i)	1	2	3	4	5
1	3 296	2 354	2 354	-	-
2	1 620	1 620	1 620	-	-
3	13 578	-	-	-	-
4	-	-	132	-	-
5	-	-	-	1 356	-

Tableau N° 12 : Coût d'installation de chaque combinaison



V.7.3. Calcul des coûts spécifiques de l'énergie produite C_{ij}

Ce sont ces valeurs qui déterminent la fonction objectif à optimiser. Elles définissent le coût minimum d'exploitation de l'énergie produite, donc la rentabilité du système.

La formule donnant ces coûts spécifiques est (5.9) :

$$a_{ij} = \frac{T_{cr,ij} P_{ij}}{8760 k_{ij}} \quad [\$/kWh]$$

C'est la dernière étape qu'on doit franchir avant d'entamer le calcul d'optimisation avec la programmation linéaire.

Facteurs d'efficacité et de diversité :

Les facteurs d'efficacité des stations k_i et les facteurs de diversité d_i pour les cinq sources sont regroupés dans le tableau ci-après [4]:

Source « i »	1	2	3	4	5
k_i	0,3	0,36	0,22	0,22	0,36
d_i	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2

Tableau N° 13 : Coefficients d'efficacité et de diversité

Facteurs économiques [6]

Prenons un taux d'intérêt de : $r = 0,1$ ou $r = 10\%$.

Pour toute i et toute j , nous adoptons les valeurs suivantes: $n_{ij} = 20$; $m_{ij} = 0,05$

On trouve alors : $T_{cr,ij} = 0,1675 = \text{constante}$.

Les derniers coefficients à calculer sont ceux qui entrent dans la fonction objectif (coût total) :

a_{ij}	1	2	3	4
1	0,19	0,20	0,20	-
2	0,09	0,14	0,14	-
3	0,76	-	-	-
4	-	-	0,01	-
5	-	-	-	0,07

Tableau N° 14 : Coût spécifique de la combinaison « $i - j$ »



V.8. MISE EN EQUATIONS ET INEQUATIONS

En utilisant les différents paramètres et facteurs énumérés dans cet exemple, nous arrivons à la formulation du programme linéaire suivant :

- Les contraintes :

- $1,94 x_{11} + 4,18 x_{21} + 180 x_{31} = 788\ 160$
- $3,33 x_{12} + 9,35 x_{22} = 289\ 080$
- $4,61 x_{13} + 8,36 x_{23} + 772,8 x_{43} = 690\ 966$
- $1,06 x_{54} = 144\ 000$
- $x_{15} = 12\ 417$
- $1,23 x_{11} + 0,09 x_{12} + 0,09 x_{13} \geq 0$
- $0,52 x_{21} - 0,72 x_{22} - 0,72 x_{23} \geq 0$
- $2,09 x_{31} \geq 0$
- $0,76 x_{43} \geq 0$
- $0,46 x_{54} \geq 0$
- $x_{11} ; x_{12} ; x_{13} ; x_{15} ; x_{21} ; x_{22} ; x_{23} ; x_{31} ; x_{43} ; x_{54} \geq 0$

- La fonction objectif :

- $C = 1,03 x_{11} + 1,14 x_{12} + 1,14 x_{13} + 1,19 x_{21} + 1,83 x_{22} + 1,83 x_{23} + 152 x_{31} + 11,04 x_{43} + 0,09 x_{54}$

V.8.1. Résolution du système

Pour résoudre ce système assez complexe, nous allons utiliser le logiciel Matlab qui a déjà une fonctionnalité de programmation linéaire intégrée.

La procédure est très simple :

- Ouvrir Matlab
- Mettre le modèle sous forme matricielle
- Dans l'espace de travail, créer et saisir les composantes des matrices A, b, Aeq, beq, f
 - Si nécessaire, ajouter d'autres options comme l'affichage des valeurs, la précision de calcul, ...
 - Exécuter l'optimisation à l'aide de la commande « linprog »
 - Matlab effectue le calcul et affiche les résultats de l'optimisation à l'écran.

Note sur la mise sous forme matricielle :

La commande linprog de Matlab considère les variables introduites comme étant sous la forme suivante :

$$\begin{cases} A.x \leq b \\ Aeq.x = beq \\ f.x = \text{minimiser} \end{cases}$$



Donc il faut d'abord formuler le modèle :

- Sous forme d'équations linéaires
- Sous forme d'inéquations linéaires ne comportant que des signes d'infériorité
- Formuler une fonction objectif à minimiser.

Par conséquent, il est possible que des changements de signes soient nécessaires.

V.8.2. Résultats du dimensionnement

Après résolution sur le logiciel Matlab, nous trouvons les résultats suivants:

- Coût total par an = \$ 260 819
- Coût du kWh = \$ 0,136

Les apports annuels de chaque source ayant donné cette valeur optimale sont :

- x_{11} = volume de biogaz pour la production d'électricité
= 0 m³
- x_{12} = volume de biogaz pour la cuisson
= 0 m³
- x_{13} = volume de biogaz pour l'eau chaude
= 0 m³
- x_{15} = volume d'engrais obtenu
= 12 417 m³
- x_{21} = volume de gas-oil pour la production d'électricité
= 159 224 l
- x_{22} = volume de gas-oil pour la cuisson
= 26 113,8 lg
- x_{23} = volume de gas-oil pour l'eau chaude
= 0 l
- x_{31} = surface des panneaux solaires photovoltaïques pour l'électricité
= 0 m²
- x_{24} = surface des capteurs solaires pour l'eau chaude
= 894,1 m²
- x_{43} = puissance de la station de pompage
= 135 849 m³.

V.9. CONSLUSIONS ET REMARQUES

- Nous venons de voir la conception d'un système hybride pour un village isolé de Madagascar. Les paramètres donnés dans cet exemple sont à titre indicatif et peuvent changer d'une région à une autre.
- Les traductions mathématiques des contraintes de disponibilité des ressources, des coûts spécifiques de chaque combinaison et de la satisfaction des différents besoins constituent le modèle à optimiser. La programmation linéaire est seulement un exemple parmi tant d'autres méthodes d'optimisation, mais nous l'avons choisi pour sa simplicité et sa capacité à traiter les problèmes de grande taille.



Chapitre VI. ETUDE D'UN CAS PRATIQUE - LE VILLAGE D'AMBATOFOOTSY

Pendant la réalisation de notre travail, nous avons effectué une visite du village d'Ambatofotsy, dans le cadre de l'application pratique de notre étude.

Puisque notre étude concerne la maîtrise de l'énergie et le dimensionnement des centrales électriques dans les régions éloignées des réseaux de distribution nationaux, nous avons jugé nécessaire de faire une descente sur terrain pour voir de près l'installation électrique du village d'Ambatofotsy qui a été mise en place récemment.

Le but de cette visite est d'évaluer les charges supportées par la centrale et d'en juger si son dimensionnement correspond aux exigences de l'utilisation. Cela fait, nous allons appliquer notre méthode de dimensionnement au cas de ce village.

VI.1. LE VILLAGE D'AMBATOFOOTSY

Ambatofotsy est un village de la Province autonome d'Antananarivo, dans la région de Bongolava, et dans le district de Tsiroanomandidy.

Pour aller à Ambatofotsy, on suit la route de Tsiroanomadidy, c'est-à-dire la RN1 jusqu'à Ampizarantany, à 20 km avant d'arriver dans le chef lieu de la région Bongolava. A partir de là, on emprunte une piste praticable longue de 40 km environ, menant directement à Ambatofotsy, en passant par Ambararata.

La principale activité de la population est l'agriculture, principalement du riz et du manioc. La terre est très fertile ; elle est sous de bonnes conditions climatiques, c'est pourquoi ses habitants ont toujours eu une vocation agricole.

VI.2. LE PROJET

Récemment, le gouvernement malagasy a lancé un projet de relance du secteur primaire. Le dit projet est dénommé PROjet Jeunes Entrepreneurs Ruraux (PROJER). Il a pour mission principale de former des jeunes aux activités d'agricultures, d'élevage et de tout ce qui concerne le milieu rural.

Le centre de formation se trouve justement à Ambatofotsy et les terrains d'application seulement à quelques kilomètres de là.

Ce projet a apporté beaucoup de changements dans le village d'Ambatofotsy, et a amélioré les conditions de vie des habitants. On peut citer entre autres :

- L'électrification du village (domestique et éclairage public)
- La mise en place d'une usine de décorticquerie



- L'accroissement du potentiel économique de la région
- L'apport de soutien matériel dans les travaux de champs.

Lors de notre visite à Ambatofotsy, dans le cadre de la réalisation de notre mémoire, nous avons constaté les différentes infrastructures qui feront d'Ambatofotsy une ville nouvelle de type rurale.

La durée du PROJER prend fin en Novembre 2006 après avoir œuvré pendant sept ans. Nombreuses sont les infrastructures déjà réalisées, et d'autres sont encore en cours de finition.

Mais la plus grande innovation est la mise en place de la centrale électrique dans cette région qui est assez éloignée des réseaux de la JIRAMA.

VI.3. CARACTERISTIQUES DE LA CENTRALE HYBRIDE

D'AMBATOFOTSY

La centrale d'Ambatofotsy est composée d'une installation solaire photovoltaïque comme source principale, et d'un groupe diesel pour compenser les besoins lorsque les batteries ne sont pas en mesure de satisfaire à elles seules les demandes.

VI.3.1. Les champs photovoltaïques

Il y a deux champs photovoltaïques identiques composés chacun de 56 modules PV, ce qui donne en tout 112 modules.

Caractéristiques du module utilisé :

- Type : TE750
- Puissance 75Wc
- Tension nominale : 12V
- Tension à vide : 21V
- Courant nominal : 4,4A
- Courant de court-circuit : 4,8A
- Diode by-pass : 6A
- Fusible : 10A

VI.3.2. Disposition des panneaux et branchement des modules

Les panneaux photovoltaïques d'un champ PV sont disposés comme suit : il y a 8 rangées et 7 colonnes. Les colonnes sont réparties le long de la droite ayant comme direction l'axe Est-Ouest. Les rangées sont alignées suivant l'inclinaison du support, dont l'angle est calculé en fonction de l'emplacement du site.

Les modules sont branchés en série par 4, et on met ensuite les 28 tronçons en parallèle pour avoir le champ total.

Chaque champ comporte donc 14 séries de 4 modules, mises en parallèle. Ce branchement nous permet d'avoir l'équivalent d'un générateur ayant une tension de 48 V, et pouvant débiter un courant maximal de 140A.



Figure N° 25 : Les panneaux solaires composant le champ PV d'Ambatofotsy

VI.3.3. Le parc à batteries

Le système de stockage est composé de 48 batteries. Chaque élément a les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale : 2V
- Charge maximale : 2100Ah.

Les batteries sont branchées de telle façon à ce qu'on ait la même tension que celle à la sortie du champ PV. Nous avons alors deux branches en parallèle, composée chacune de 24 batteries en série. La capacité totale des batteries est donc de 4200Ah.



Figure N° 26 : Le parc à batteries de la centrale



VI.3.4. Le groupe électrogène

Le groupe utilisé comme groupe de secours (GS) est très performant car il relève des toutes nouvelles technologies en matière de groupe électrogène.

Ce groupe, de marque SDMO, peut être démarré manuellement ou automatiquement à partir d'un onduleur relié au parc à batteries. Ses commandes se font par une interface électronique à écran digital 16 digits, où on peut aussi voir les paramètres du groupe, à savoir : les paramètres électriques de l'alternateur, les paramètres du moteur diesel qui l'entraîne, les valeurs caractéristiques du courant de sortie, les paramètres du réseau.

Connaissant ces paramètres, nous pouvons contrôler le fonctionnement du groupe et lui attribuer les valeurs de réglage, encore à l'aide de l'interface du groupe.

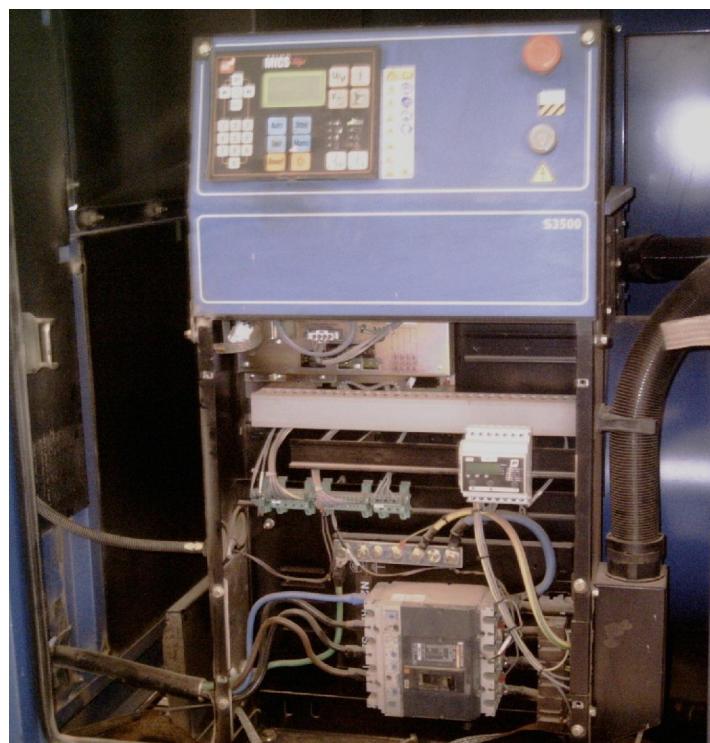


Figure N° 27 : Coffret de commande et câblage du groupe JS100K

a) Caractéristiques du groupe électrogène

- Marque : SDMO
- Modèle : JS100K
- Coffret de commande : Telys
- Tension : 230/400V, triphasé
- Fréquence : 50Hz
- Vitesse de rotation : 1500tr/min
- $\text{Cos}\phi = 0,80$



b) Fonctionnement du groupe

Ce groupe peut fonctionner, soit en service secours, soit en étant lui-même la source principale.

- En mode service secours ou Emergency Stand-by Power (ESP), le groupe est à l'arrêt en temps normal. Quand la charge des batteries ne peut plus satisfaire les besoins du réseau, le groupe est démarré automatiquement par un système commandé par l'onduleur. Il peut alors débiter la puissance secours, supérieure à sa puissance nominale, pendant un laps de temps.
- En fonctionnement continu ou Prime Power (PRP), c'est-à-dire que c'est le groupe qui fournit la quasi-totalité de l'énergie demandée par le réseau, il peut délivrer sa puissance nominale pendant quelques heures.

	PRP	ESP
kVA	100	110
kW	80	88
A	144	158,4

Tableau N° 15 : Puissance disponible auprès du groupe

c) Encombrement

Le problème d'exploitation souvent rencontré avec les groupes électrogène est qu'ils émanent un bruit assourdissant et pouvant créer des détériorations de l'enceinte où ils sont placés.

Dans le cas de ce groupe, les bruits ont été réduits et on ne l'entend presque plus en dehors de la centrale.

Pression acoustique à 50Hz:

1m	7m	15m
77 dB	67 dB	63 dB

Tableau N° 16 : Pression acoustique du groupe en fonction de l'éloignement



VI.4. SCHEMA D'INSTALLATION DE LA CENTRALE HYBRIDE

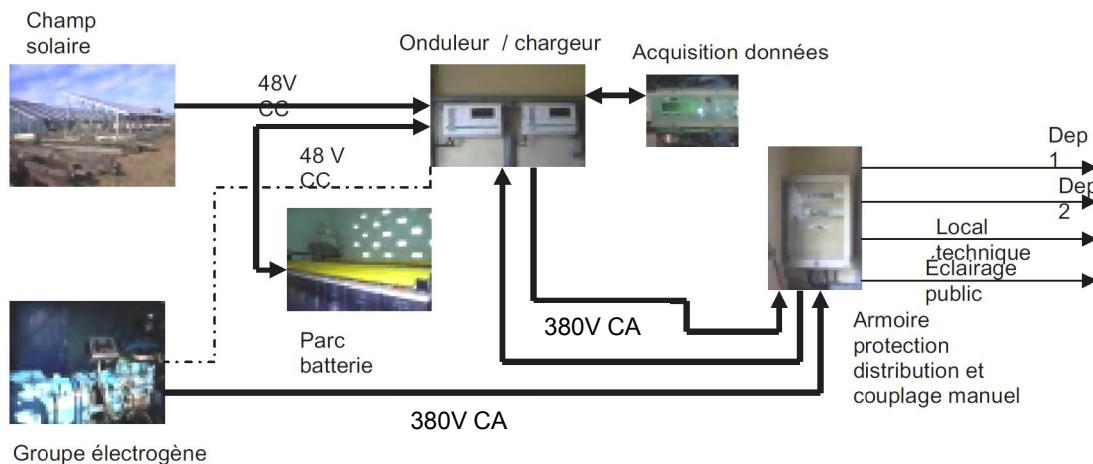


Figure N° 28 : Schéma de principe de la centrale d'Ambatofotsy

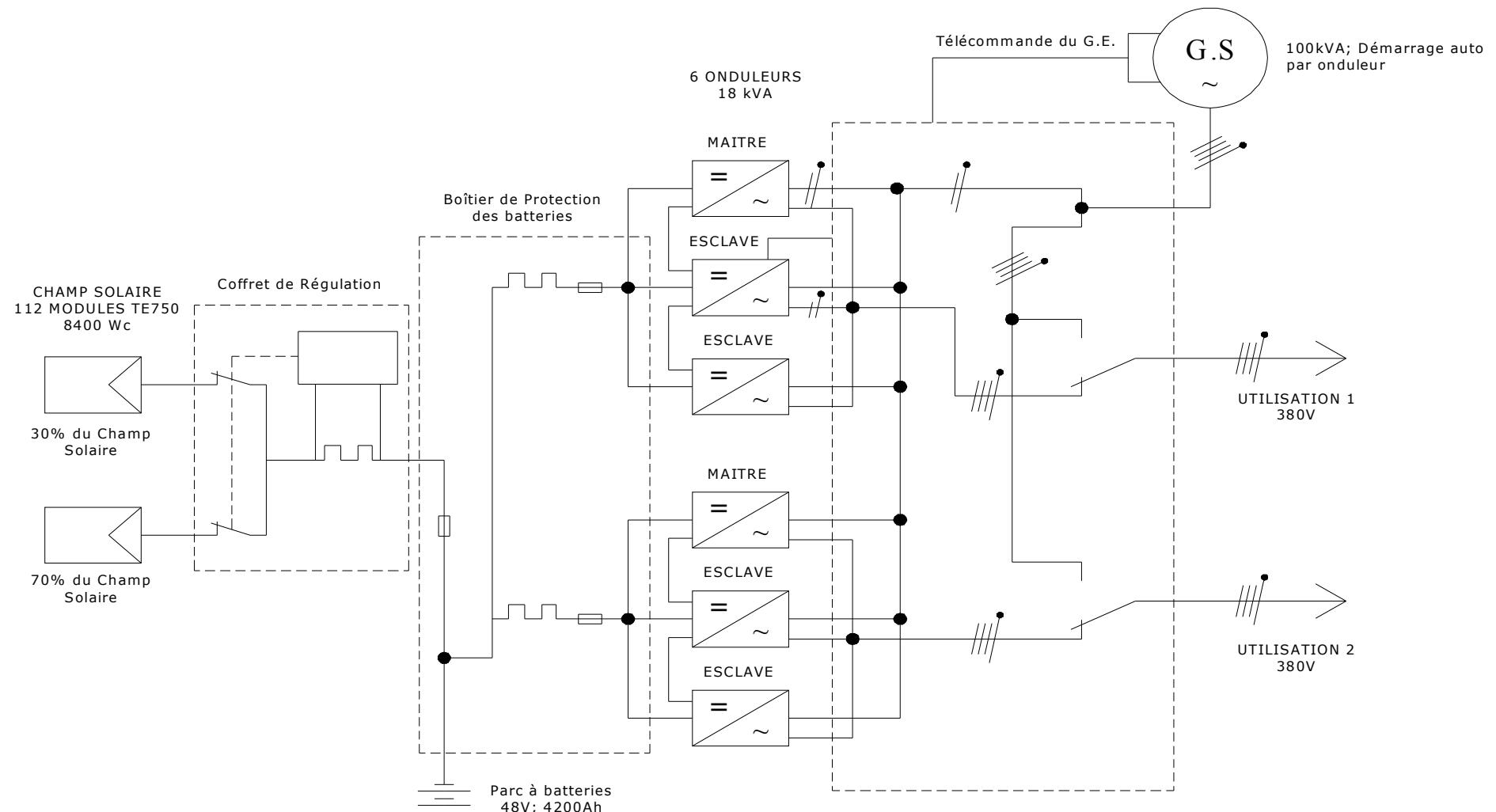


Figure N° 29 : Schéma unifilaire de la centrale d'Ambatofotsy



VI.5. LE REGULATEUR ENERPAC

C'est un matériel complexe qui est souvent utilisé avec les installations de champ solaire PV. Il contrôle la charge des batteries quand elles sont connectées aux panneaux. Quand la charge des batteries est en dessous du seuil fixé au préalable, le régulateur établit le contact entre les panneaux et les batteries : le chargement commence jusqu'à avoir la charge maximale admise.

Quand le niveau de la batterie atteint sa charge maximale, un système automatique ouvre le contact et le chargement prend fin.

A part son rôle de régulateur, la console ENERPAC peut aussi stocker des données relatives aux mesures qu'il a faites, sur une mémoire intégrée.

VI.5.1. Fonctions de l'ENERPAC

- Suivi d'installation photovoltaïque
- Fonctionnement des systèmes photovoltaïques complexes (hybride avec sources annexes DC ou AC : aérogénérateur, groupe électrogène, chargeur batterie ...)
- Bilan énergétique complet, analyse détaillée
- Régulation photovoltaïque.

Combinés en un seul appareil, ces différentes fonctionnalités font de l'ENERPAC un outil compact de gestion d'énergie.

a) Mesures

- Directes :

- Courant continu panneaux, utilisation, onduleur, chargeur, groupe électrogène, chargeur auxiliaire
 - Tension continue panneaux, batterie, utilisation
 - Ensoleillement
 - Température
 - Vitesse du vent
 - Energie sortie onduleur, utilisation AC
 - Energie sortie groupe (utilisation AC).

- Par calcul :

- Irradiation journalière
- Energie du champ photovoltaïque
- Energie consommée en utilisation continue
- Energie en entrée de l'onduleur
- Energie en sortie du chargeur auxiliaire
- Energie en sortie du chargeur G.E

- Affichage des mesures directes et calculées sur écran.



b) Enregistrement

- Enregistrement journalier de toutes les valeurs mesurées et calculées (cumuls, minimums, maximums, etc....)
 - Autonomie de la mémoire de données supérieure à deux ans
 - Enregistrement détaillé des valeurs mesurées et calculées, par pas de 10 minutes, des 15 derniers jours.

c) Télésurveillance

- Alarmes émises automatiquement vers le PC d'exploitation
- Affichage de la nature du défaut
- Signalisation par clignotement d'un voyant rouge et action d'un contact.

d) Régulation

- Régulation de charge de batterie par déconnexion des modules PV
- Limitation de décharge par déconnexion des récepteurs
- Chargée forcée périodique
- Remise en charge de la batterie :
 - Par reconnexion des modules après temporisation
 - Par reconnexion des modules suivant seuil de tension
- Alarme tension batterie haute et basse
- Réglages des seuils de régulation à partir du clavier
- Visualisation de l'état des batteries.

e) Pilotage

- Commande de démarrage ou arrêt du Groupe Electrogène par seuil de tension batterie ou horloge
- Commande d'un relais « timer » par horloge.

VI.5.2. L'importance du régulateur sur le PV

D'après les caractéristiques et fonctionnalités du régulateur ENERPAC ci-dessus, nous pouvons affirmer que c'est un outil de gestion très complet pour une centrale solaire photovoltaïque.

Son principal rôle étant celui d'un régulateur, il surveille en temps réel l'état de charge des batteries. Au moindre dépassement des seuils haut et bas fixés au préalable, le régulateur coupe le circuit de charge ou de décharge pour protéger les batteries contre la décharge trop profonde ou le surcharge, qui peuvent altérer leur durée de vie.

Cette fonction assure la fiabilité du système tout entier et permet une durée de vie plus longue, donc une économie sur les dépenses d'exploitation.

La possibilité de communiquer à distance facilite la gestion des centrales installées dans les zones vraiment isolées et difficiles d'accès. Certes, toutes les données techniques



concernant le fonctionnement de la centrale sont enregistrées et transmises au centre de pilotage ou à l'ordinateur d'exploitation. Donc on peut analyser les différents paramètres de plusieurs installations depuis un poste central.

VI.6. EVALUATION DE LA CHARGE D'AMBATOFOTSY

Lors de notre visite, nous avons pu relever les différentes charges électriques utilisées par les habitants du centre de formation du PROJER, les villageois ne bénéficiant pas encore du réseau électrique.

La distribution se fait à travers un réseau triphasé aérien.

Il est plus facile d'évaluer les charges en combinant les abonnés ou locaux ayant des profils identiques. De même pour les équipements.

- Notons par « *i* » le type d'abonnés ; avec $i = 1, \dots, k$.
- Notons par « *j* » le type d'équipements ; avec $j = 1, \dots, n$.
- Soit a_i le nombre d'abonnés,
- Et c_{si} le coefficient de simultanéité des abonnés ou locaux.

Ensuite, notons :

- c_{sij} : coefficient de simultanéité des équipements,
- a_{ij} : nombre d'équipements de type « *j* » de l'abonné de type « *i* » ;
- h_{ij} : heures de marche de l'équipement « *j* » de l'abonné « *i* » ;
- p_{ij} : puissance nominale d'un équipement « *j* » de l'abonné « *i* » ;
- e_{ij} : énergie consommée par un appareil « *j* » de l'abonné « *i* » ;
- P_{ij} : puissance totale des équipements de type « *j* » relatifs à l'abonné « *i* »
- P_i : somme des puissances de tous les équipements contenus dans des locaux identiques

VI.6.1. Evaluation de la puissance consommée

Dans le cas d'une évaluation de charge globale, on n'additionne pas les puissances et énergies spécifiques pour calculer la pointe maximale du réseau. On utilise des formules faisant intervenir les coefficients de simultanéité pour chaque combinaison d'appareils ou d'abonnés.

Evaluons les puissances de chaque équipement dans chaque local avec la méthode suivante.

Pour l'abonné « *i* » ayant « *n* » types d'appareils, nous avons :

$$P_{ij} = \sum_{j=1}^n c_{sij} a_{ij} p_{ij} \quad \text{avec } j = 1 \dots n \quad (6.1)$$

La somme des puissances de l'équipement « *j* » pour tous les abonnés qui l'utilisent est donnée par :

$$P_{ij,t} = \sum c_{si} a_i P_{ij} \quad (6.2)$$



VI.6.2. Evaluation de l'énergie débitée

Evaluons maintenant l'énergie moyenne consommée par les abonnés de nombre « k » et de « n » équipements.

Le modèle de la consommation énergétique d'un abonné de type « i » de « n » équipements e_{ij} a pour expression :

$$e_{ij} = \sum_{j=1}^n c_{sij} a_{ij} h_{ij} p_{ij}, \quad (6.3)$$

$$E = 0,365 [c_1 a_1 (e_{11} + e_{12} + \dots + e_{1n}) + c_2 a_2 (e_{21} + e_{22} + \dots + e_{2n}) + \dots + c_k a_k (e_{k1} + e_{k2} + \dots + e_{kn})]$$

L'énergie totale est évaluée par la formule :

$$E = 0,365 \sum_{i=1}^k c_{si} a_i \sum_{j=1}^n e_{ij} \quad (6.4)$$

VI.6.3. Coefficient de simultanéité

Le tableau suivant donne les valeurs des coefficients de simultanéité en fonction du nombre d'équipements ou d'abonnés.

Nb (abonnés ou équipts) a_i ou a_{ij}	2	3	4-5	6-7	8-10	11-15	16-20	21-30	31-50	51-150	>150
c_i ou c_{sij}	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35

Tableau N° 17 : Coefficients de simultanéité

Le coefficient de simultanéité des lampes est égal à :

- $c_{sj} = 1$ pour $n_j \leq 3$
- $c_{sj} = 0,6$ pour les autres.

D'après le tableau 6.3 voici la récapitulation des charges par catégorie d'équipements :

	Eclairage domestique	Eclairage public	Forces motrices	Autres	Total
[kW]	16,018	0,372	46,50	4,746	67,64
[%]	23	1	69	7	100

Tableau N° 18 : Récapitulation des charges d'Ambatofotsy



LOCAL	DESIGNATION	Pour un local						TOTAL			
		p _{ij} (Watts)	a _{ij}	c _{si,j}	P _{ij}	h _{ij}	e _{ij}	a _i	c _{si}	P _{ij,t}	P _i
Eclairage Public	Lampe Basse Consommation	20	31	0,6	372	12	4464,00	1	1	372	372,00
Dé cortiquerie	Moteur Asynchrone M1	7500	1	1	7500	8	60000,00	1	1	7500	43886,40
	Moteur Asynchrone M2	15000	1	1	15000	8	120000,00			15000	
	Moteur Asynchrone M3	5500	1	1	5500	8	44000,00			5500	
	Moteur Asynchrone M4	1500	1	1	1500	8	12000,00			1500	
	Moteur Asynchrone M5	1500	1	1	1500	8	12000,00			1500	
	Moteur Asynchrone M6	750	1	1	750	8	6000,00			750	
	Moteur Asynchrone M7	11000	1	1	11000	8	88000,00			11000	
	Moteur Asynchrone M8	750	1	1	750	8	6000,00			750	
	Lampe à Néon	36	4	0,6	86,4	8	691,20			86,4	
Atelier bois et mécanique	Lampe à incandescence	100	5	0,6	300	12	3600,00	1	1	300	308,00
	Lampe à Néon	36	5	0,6	108	8	864,00			108	
Epicerie	Lampe à incandescence	100	2	1	200	12	2400,00	1	1	200	3264,00
	Réfrigérateur	80	1	1	80	12	960,00			80	
	Lecteur VCD de salon	100	1	1	100	6	600,00			100	515,00
	Ventilateur	35	1	1	35	6	210,00			35	
- Maison à 4 chambres - Maison à 3 chambres - Blocs sanitaires	Lampe à incandescence	100	3	1	300	4	1200,00	1	1	300	2970,00
	Lampe à incandescence	75	9	0,6	405	6	2430,00			90	
	Lampe à incandescence	75	8	0,6	360	6	2160,00			100	
Logement du magasinier	Lampe à incandescence	75	4	0,6	180	2	360,00	1	1	360	3120,00
	Téléviseur en couleur	90	1	1	90	4	360,00			90	
	Lecteur VCD de salon	100	1	1	100	6	600,00			100	
Bâtiment multifonction	Lampe à incandescence	75	8	0,6	360	6	2160,00	1	1	2160,00	2294,40
	Lampe à Néon	36	7	0,6	151,2	12	1814,40			151,2	
	Lampe à Néon	20	3	1	60	8	480,00			60	
Salle de formation	Téléviseur en couleur	130	1	1	130	4	520,00	1	1	130	5315,60
	Magnétoscope	11	1	1	11	2	22,00			11	
	Lampe à Néon	36	12	0,6	259,2	8	2073,60			259,2	
	Lampe à incandescence	75	5	0,6	225	12	2700,00			225	
Bibliothèque	Lampe à Néon	36	9	0,6	194,4	8	1555,20	1	1	194,4	404,40
											3835,20



	Lampe à Néon	20	3	1	60	8	480,00			60		
	Lampe à incandescence	75	2	1	150	12	1800,00			150		
Bureaux	Lampe à Néon	40	31	0,6	744	8	5952,00	1	1	744	894,00	7752,00
	Lampe à incandescence	75	2	1	150	12	1800,00			150		
Logement des cadres	Chauffe-eau électrique	2000	1	1	2000	3	6000,00	3	1	2000	2240,00	23760
	Lampe à Néon	40	10	0,6	240	8	1920,00			240		
Bureau de la Gendarmerie	Lampe à Néon	36	10	0,6	216	8	1728,00	1	1	216	441,00	4428,00
	Lampe à incandescence	75	3	1	225	12	2700,00			225		
Bureau du Fokontany	Lampe à Néon	36	2	1	72	8	576,00	1	1	72	147,00	1476,00
	Lampe à incandescence	75	1	1	75	12	900,00			75		
Logement des formateurs	Lampe à Néon	36	9	0,6	194,4	12	2332,80	11	0,6	1283,04	1283,04	8468,064
- Type 1	Lampe à Néon	36	7	0,6	151,2	6	907,20	2	1	302,4	302,40	604,8
- Type 2	Lampe à Néon	36	8	0,6	172,8	6	1036,80	4	0,75	518,4	518,40	1555,2
- Blocs sanitaires	Lampe à incandescence	75	6	0,6	270	2	540,00	6	0,7	1134	1134,00	4762,8
Gîte d'étape	Lampe à incandescence	75	10	0,6	450	4	1800,00	1	1	450	450,00	450
Dispensaire	Lampe à Néon	40	13	0,6	312	10	3120,00	1	1	312	582,00	6360,00
	Lampe à incandescence	75	6	0,6	270	12	3240,00			270		
Logement du Médecin	Ordinateur PC	700	1	1	700	6	4200,00	1	1	700	2200,00	7200,00
	Photocopieur	1000	1	1	1000	2	2000,00			1000		
	Imprimante	500	1	1	500	2	1000,00			500		
Hangar	Ponceuse portatif	1000	1	1	1000	2	2000,00	1	1	1000	3336,00	10032,00
	Perceuse portatif	1000	1	1	1000	2	2000,00			1000		
	Meuleuse portatif	1000	1	1	1000	2	2000,00			1000		
	Lampe à Néon	40	14	0,6	336	12	4032,00			336		

Tableau N° 19 : Evaluation de la charge du centre de formation Ambatofotsy



VI.6.4. Profil des charges

En utilisant le tableau N°19 nous pouvons dresser le profil de charge suivant.

Profil de Charge Ambatofotsy:

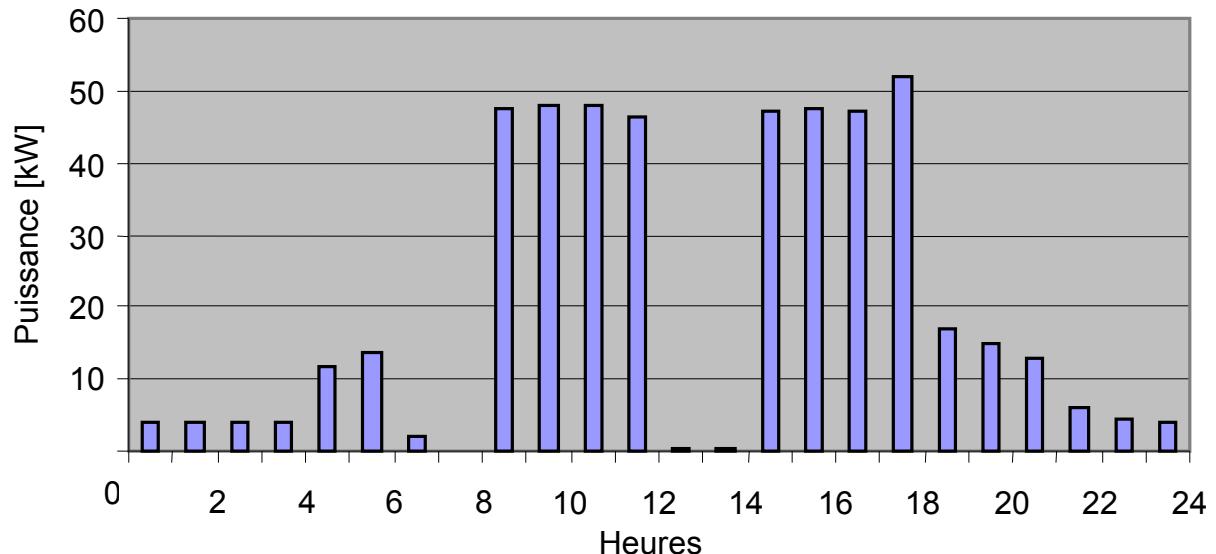


Tableau N° 20 : Profil des charges d'Ambatofotsy

VI.6.5. Redimensionnement de la centrale d'Ambatofotsy

Ayant tous les paramètres nécessaires au dimensionnement, nous allons appliquer notre méthode de dimensionnement au cas d'Ambatofotsy.

Le modèle correspondant au d'Ambatofotsy est :

- Les contraintes :

- $1,94 x_{11} + 4,95 x_{21} + 180 x_{31} = 180\ 600$
- $3,33 x_{12} + 11,07 x_{22} = 210\ 000$
- $4,61 x_{13} + 9,90 x_{23} + 772,8 x_{43} = 576\ 000$
- $1,06 x_{54} = 115\ 000$
- $x_{15} = 12\ 417$
- $1,23 x_{11} + 0,09 x_{12} + 0,09 x_{13} \geq 0$
- $0,52 x_{21} - 0,72 x_{22} - 0,72 x_{23} \geq 0$
- $2,09 x_{31} \geq 0$
- $0,76 x_{43} \geq 0$
- $0,46 x_{54} \geq 0$
- $x_{11} ; x_{12} ; x_{13} ; x_{15} ; x_{21} ; x_{22} ; x_{23} ; x_{31} ; x_{43} ; x_{54} \geq 0$

- La fonction objectif :

- $C = 1,03 x_{11} + 1,14 x_{12} + 1,14 x_{13} + 1,19 x_{21} + 1,83 x_{22} + 1,83 x_{23} + 152,72 x_{31} + 2,67 x_{43} + 0,09 x_{54}$

**Formulation sous Matlab :**

```
>> Aeq=[1.94 0 0 0 4.95 0 0 180 0 0;0 3.33 0 0 0 11.07 0 0 0 0;0 0 4.61 0 0 0 9.90 0 772.8 0;0 0 0  
0 0 0 0 0 1.06;0 0 0 1 0 0 0 0 0 0];  
>> beq=[180600 210000 576000 115000 12417];  
>> A=(-1)*[1.23 0.09 0.09 0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0.52 -0.72 -0.72 0 0 0;0 0 0 0 0 0 0 2.09 0 0;0 0 0  
0 0 0 0.76 0;0 0 0 0 0 0 0 0 0.46];  
>> b=[0 0 0 0];  
>> f=[1.03 1.14 1.14 0 1.19 1.83 1.83 152.72 12.67 0.09];  
>> lb=zeros(10,1);  
>> [x,fval,exitflag,output,lambda]=linprog(f,A,b,Aeq,beq,lb)
```

Résultats:

Optimization terminated successfully.

x =

```
1.0e+005 *  
    0.00000000000010  
    0.00000000000004  
    0.00000000000001  
    0.12417000000000  
    1.59224242424238  
    0.26113821138210  
    0.00000000000000  
    0.00000000000000  
    0.00894107142857  
    1.35849056603774
```

fval =

2.608198937621253e+005

exitflag =

1

output =

```
    iterations: 7  
    cgiterations: 0  
    algorithm: 'lipsol'
```

lambda =

```
    ineqlin: [5x1 double]  
    eqlin: [5x1 double]  
    upper: [10x1 double]  
    lower: [10x1 double]
```



Interprétation des résultats :

Voici la signification des résultats affichés par le logiciel Matlab :

- Coût total par an = \$ 260 819
- Coût du kWh = \$ 0,136

Les apports annuels de chaque source ayant donné cette valeur optimale sont :

- x_{11} = volume de biogaz pour la production d'électricité
= 0 m³
- x_{12} = volume de biogaz pour la cuisson
= 0 m³
- x_{13} = volume de biogaz pour l'eau chaude
= 0 m³
- x_{15} = masse d'engrais obtenu
= 12 417 T
- x_{21} = volume de gas-oil pour la production d'électricité
= 159 224 l
- x_{22} = volume de gas-oil pour la cuisson
= 26 113,8 l
- x_{23} = volume de gas-oil pour l'eau chaude
= 0 l
- x_{31} = surface des panneaux solaires photovoltaïques pour l'électricité
= 0 m²
- x_{24} = surface des capteurs solaires pour l'eau chaude
= 894,1 m²
- x_{43} = puissance de la station de pompage
= 135 849 kW.

Le fait que le volume nécessaire pour la production de biogaz soit nul indique que l'exploitation de cette ressource pour produire d'autres formes d'énergie n'est pas plus rentable que les autres combinaisons. Ce résultat est donné par la résolution de l'optimisation du dimensionnement des équipements par la programmation linéaire. Il existe en fait des combinaisons moins chères.

Par contre, le volume d'engrais produit est de 12417 tonnes qui est égal aux besoins annuels des agriculteurs. Cette quantité n'est pas nulle car la production d'excréments par les bétails de la ferme n'engendre pas de dépenses supplémentaires.



CONCLUSION GENERALE

L'élaboration de ce travail nous a permis d'assimiler la technique de la programmation linéaire, notamment la méthode du simplexe. Nous avons pu voir sa puissance et son efficacité dans la recherche d'une solution optimale d'un problème quelconque, quelle que soit son niveau de difficulté.

En utilisant la programmation linéaire, nous avons abouti au résultat final de l'optimisation du dimensionnement d'une centrale hybride. Le logiciel Matlab que nous avons utilisé est un outil puissant et très utile dans le calcul d'optimisation, grâce à sa fonction intégrée « linprog » qui est l'application même de la programmation linéaire sur ordinateur.

Cette étude permet de réduire les coûts d'investissement et d'exploitation d'un système hybride, en cherchant les meilleures combinaisons de source – utilisation.

L'application pratique de la méthode que nous avons proposé dans ce travail au cas d'Ambatofotsy a permis de faire le dimensionnement d'un système hybride adéquat, d'après l'évaluation de la charge que nous avons faite sur terrain. Cette étude de cas particulier nous est vraiment nécessaire pour voir les résultats donnés par notre méthode dans le cas réel.

La solution optimale donnée par les calculs sous Matlab montre qu'il est préférable de ne pas mettre en place une installation de biogaz et une station solaire photovoltaïque. Ceci est sûrement dû au fait que leurs coûts spécifiques sont largement supérieurs aux autres.

Afin de pouvoir utiliser le système hybride « diesel – solaire – biogaz » avec des combinaisons toutes non nulles, on devrait réétudier le coût d'application de ces différentes sources d'énergie à Madagascar. Certes, la réduction des coûts spécifiques relatifs au biogaz et au solaire PV rendrait leurs parts différentes de zéro.

Nous espérons que cette étude puisse être poussée un peu plus loin afin de réduire au minimum les coûts relatifs à un système hybride.

Nous proposons à nos cadets de revoir les points suivants :

- Amélioration du rendement des équipements ;
- Calcul des paramètres techniques permettant de réduire le coût spécifique afin de pouvoir utiliser plus de deux sources à la fois ;
 - Inclure dans les calculs de dimensionnement, le paramétrage du réseau de distribution ;
 - Maîtrise de l'évolution des charges après l'électrification de la région.

Liste des figures

Figure N° 1 :	Sources d'énergie sur la planète ; Répartition des ressources énergétiques utilisées en 2000.....	3
Figure N° 2 :	Consommation énergétique globale.....	4
Figure N° 3 :	Principe de la cogénération utilisant une turbine à gaz.	22
Figure N° 4 :	Coupe d'un barrage hydroélectrique.....	24
Figure N° 5 :	Usine marémotrice de la Rance	24
Figure N° 6 :	Turbines Kaplan – Turbine Pelton.....	25
Figure N° 7 :	Principe d'une installation de biogaz agricole.....	26
Figure N° 8 :	Principe d'une installation de biogaz industriel.....	26
Figure N° 9 :	Principe d'une installation de biogaz dans un centre d'épuration	27
Figure N° 10 :	Principe d'une installation de biogaz à partir des ordures ménagères.....	27
Figure N° 11 :	Principe d'une installation utilisant le bois comme source d'énergie	28
Figure N° 12 :	Principe de l'extraction de biocarburant	29
Figure N° 13 :	Principe d'une installation complexe bagasse-charbon	30
Figure N° 14 :	Pompe éolienne - Moulin à vent	31
Figure N° 15 :	Centrale éolienne de grande puissance	32
Figure N° 16 :	Centrale nucléaire de Tricastin (France)	33
Figure N° 17 :	Tokamak de Princeton (Etats-Unis)	36
Figure N° 18 :	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	38
Figure N° 19 :	La photopile	39
Figure N° 20 :	Fonctionnement d'une photopile.....	39
Figure N° 21 :	Installation solaire photovoltaïque.....	42
Figure N° 22 :	Organigramme de la méthode LPSP	49
Figure N° 23 :	Schéma relationnel entre sources et produits	71
Figure N° 24 :	Organigramme de résolution par la programmation linéaire	72
Figure N° 25 :	Les panneaux solaires composant le champ PV d'Ambatofotsy.....	87
Figure N° 26 :	Le parc à batteries de la centrale d'Ambatofotsy	87
Figure N° 27 :	Coffret de commande et câblage du groupe JS100K.....	88
Figure N° 28 :	Schéma de principe de la centrale d'Ambatofotsy.....	90
Figure N° 29 :	Schéma unifilaire de la centrale d'Ambatofotsy	91

Liste des tableaux

Tableau N° 1 : Consommation énergétique des pays développés en 1996	4
Tableau N° 2 : Production et Consommation énergétiques des pays développés en 2004	4
Tableau N° 3 : Répartition de la Production à Madagascar en 2004	7
Tableau N° 4 : Coût de l'électricité à Madagascar.....	11
Tableau N° 5 : Rendement d'une photopile.....	39
Tableau N° 6 : Principales combinaisons source d'énergie - utilisation.....	46
Tableau N° 7 : Résultats du calcul de dimensionnement d'un système hybride	50
Tableau N° 8 : Evaluation des besoins énergétiques du village [4].....	77
Tableau N° 9 : Equivalents énergétiques des différentes sources d'énergie	79
Tableau N° 10 : Rendement de chaque combinaison.....	80
Tableau N° 11 : Valeurs des coefficients de charge k_{ij}	81
Tableau N° 12 : Coût d'installation de chaque combinaison	81
Tableau N° 13 : Coefficients d'efficacité et de diversité	82
Tableau N° 14 : Coût spécifique de la combinaison « i – j »	82
Tableau N° 15 : Puissance disponible auprès du groupe	89
Tableau N° 16 : Pression acoustique du groupe en fonction de l'éloignement.....	89
Tableau N° 17 : Coefficients de simultanéité	95
Tableau N° 18 : Récapitulation des charges d'Ambatofotsy.....	95
Tableau N° 19 : Evaluation de la charge du centre de formation Ambatofotsy	97
Tableau N° 20 : Profil des charges d'Ambatofotsy	98

ANNEXES

Annexe 1 :Références bibliographiques et informatiques

- [1] Solofo Hery RAKOTONIAINA, Situation énergétique de Madagascar – Colloque international à La Réunion : « Politique européenne de l'énergie pour les îles et les régions 2000 – 2025 – 2050 » ; La Réunion, Octobre 2005
- [2] Solofo Hery RAKOTONIAINA, Cours Electricité solaire photovoltaïque ; Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2005
- [3] Solofo Hery RAKOTONIAINA – MI Gontsar, Les centrales hybrides en énergie renouvelable pour l'approvisionnement en énergie des consommateurs ruraux à Madagascar ; Mémoire de fin d'études à l'Institut de mécanisation et d'électrification rurale de Kharkov, Ukraine 1989
- [4] Solofo Hery RAKOTONIAINA, Perspectives de développement des centrales hybrides ; Septembre 2005
- [5] R.Ramakumar, Conception d'un système autonome d'énergie renouvelable pour les pays en voie de développement ; Université d'Oklahoma, 1986
- [6] R.Ramakumar, Conception de générateurs autonomes à énergie renouvelable dans les pays en voie de développement, utilisant la programmation linéaire ; Ecole d'ingénierie en électricité et en informatique, Oklahoma 1986
- [7] Programme international de soutien à la maîtrise de l'énergie (PRISME), La cogénération – trigénération ; Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, 2005
- [8] Société Bergerat – Monnoyeur , Promotion des groupes électrogènes de secours; Catalogue des groupes électrogènes de puissance ; 220
- [9] M.SAMARAKOU, Optimisation de la combinaison du système solaire – diesel ; Egypte 2001
- [10] Muselli – G.Notton – A.Louche, Dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque – groupe électrogène ; Université de Corse, 1998
- [11] J.Vignes, Algorithme et pratique de la programmation linéaire ; 1988
- [12] Ministère de l'énergie et des Mines (MEM), Etat des lieux - Problématiques - Recommandations pour le secteur énergie à Madagascar ; Groupe de travail MEM , Octobre 2005
- [13] Agence Régionale Energie Réunion (ARER), Fiches techniques Biogaz et Procédés ; 2004

- [14] Microsoft Collection Encarta 2004, Rubrique Production et Distribution d'électricité (dernière mise à jour 2003)
- [15] Benoît Sylvestre, Biogaz de fermes d'élevage et de bâtiments d'exploitation ; stage de fin d'études Université de Pays-Bas, Mai-Octobre 2003
- [16] RETScreen International, Analyse et modèle pour la cogénération (dernière mise à jour 2006)
- [17] L'Internet

Annexe 2 :Acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADER	Agence pour le Développement de l'Electrification Rurale
AIE	Agence Internationale de l'Energie
E.S.P.A	Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
ENR	Energie Renouvelable
ERD	Electrification Rurale Décentralisée
GN	Gaz Naturel
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
GTE	Groupe de Travail Energie
JIRAMA	Jiro sy Rano Malagasy
MEM	Ministère de l'Energie et des Mines
ORE	Organe de Régulation de l'Electricité
PDE	Production Décentralisée d'Electricité (raccordé aux réseaux existants)
PEDM	Programme Energie Domestique Mahajanga
PIE	Producteur Indépendant d'Electricité
PNEBE	Programme national d'économie de bois énergie
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PPIM	Projet Pilote intégré de Mahajanga
PROJER	Projet Jeunes Entrepreneurs Ruraux
Solaire PV	Energie Solaire Photovoltaïque, à différencier de l'énergie solaire thermique (production d'eau chaude).

Annexe 3 :Glossaire des terminologies propres au secteur de l'énergie

MJ	<u>Méga Joule</u> , soit 1 million de Joules. Le joule est l'unité de mesure de la quantité d'énergie dans le système physique international.
KW	<u>Kilowatt</u> , soit 1000 Watts. Le Watt est l'unité de mesure de la quantité de puissance dans le système physique international. 1 Joule est équivalent à l'énergie produite par une puissance de 1 Watt pendant une seconde. Le Joule représente la quantité d'énergie, la puissance représente le débit instantané d'énergie, soit l'équivalence $1W = 1J/sec$.
kWh	<u>Kilowattheure</u> , quantité d'énergie contenue équivalent à l'utilisation d'une puissance de 1 kW pendant 1 heure soit équivalente à 3600 kJ . $1\text{ kWh} = 3,6\text{ MJ} = 861\text{ kCal}$
TEP	<u>Tonne Equivalent Pétrole</u> , terme utilisé comme unité de quantification de l'énergie représentant l'énergie brute contenue dans 1 tonnes de Pétrole. $1\text{ TEP} = 41855\text{ MJ} = 11626\text{ kWh}$
kWc solaire	Unité de quantification de la puissance crête des modules solaires. Un module de 100 Wc délivrera sous un ensoleillement de 1000 W/m^2 (ensoleillement maximal) et une température de 25°C (condition standard) une puissance électrique de 100 Watt.
CGA	<u>Coût Global Actualisé</u> . Appliquée à l'énergie, ce coût se calcule pour une source de production d'électricité en divisant l'ensemble des coûts actualisés d'investissement et d'exploitation sur une durée d'observation économique par la quantité total d'énergie produite par la source sur cette même durée d'observation. Difficile à estimer de manière précise, le CGA permet de déterminer des ordres de grandeurs du coût effectif de l'énergie produite par différentes sources de production, renouvelables ou non. Il est un élément de comparaison intéressant, notamment entre les sources renouvelables et les sources classiques.

Annexe 4 :Nomenclature

a_{ij}	coût unitaire de la combinaison i-j (en \$/kWh)
C	coût total annuel (\$)
C_{ij}	partie de C pour la combinaison i-j (\$)
d_i	facteur de diversité des tâches remplies par la source i
E_i	énergie totale fournie annuellement par la source i (kWh)
E_{ij}	partie de E_i utilisée pour le produit j (kWh)
$E_{i,max}$	énergie maximum disponible de la source i (kWh)
g	accélération de la pesanteur (m/s^2)
h	hauteur moyenne de l'eau (m)
i	indice représentant les sources
j	indice représentant les formes d'énergie produites
k_i	coefficent de charge effective pour la source i
k_{ij}	coefficent de charge pour la combinaison i-j
m_{ij}	partie du coût d'investissement, nécessaire pour le fonctionnement et la maintenance, par an, de l'installation correspondant à la combinaison i-j
n_{ij}	durée de vie de l'installation correspondant à la combinaison i-j (années)
p_i	pointe de puissance admissible pour la source i (kW)
p_{ai}	puissance disponible de la source i (kW)
p_{ij}	puissance maximale nécessaire pour satisfaire une partie du produit j à partir de la source i (kW)
p_{0j}	puissance maximale demandée par la forme d'énergie j (kW)
P_{ij}	coût des matériels nécessaires à l'installation de la combinaison i-j (\$/kW)
r	taux d'intérêt annuel
R_i	équivalent énergétique de la source i (kWh/m^2 , kWh/m^3)
$T_{cr,ij}$	facteur de charge de la combinaison i-j
U_j	énergie totale demandée sous forme de $j^{ième}$ produit (kWh)
U_{ij}	partie de U_j remplie par la source i (kWh)
V_α	vitesse moyenne du vent pendant l'heure α (m/s)
x_i	quantité totale requise par an de la source i (m^2 ou m^3)
x_{ij}	partie de x_i destinée au produit j (m^2 ou m^3)
$x_{i,max}$	quantité maximale disponible de x_i (m^2 ou m^3)
Y_α	ensoleillement total reçu pendant l'heure α (kWh/m^2)
α	indice représentant une durée égale à une heure
η_p	rendement moyen des panneaux photovoltaïques
η_w	rendement moyen des aérogénérateurs
η_t	rendement moyen des capteurs solaires thermiques
η_{ij}	$= (U_{ij}/E_{ij})$

Auteur : RAFIDIARISON Nambinintsoa

Titre : OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS D'UNE CENTRALE HYBRIDE « DIESEL – SOLAIRE – BIOGAZ » PAR LA PROGRAMMATION LINEAIRE

Nombre de pages : 101

Nombre de figures : 29

Nombre de tableaux : 20

ABSTRACT

Integrated renewable energy systems (IRES) which utilize different manifestations of solar energy to satisfy various energy needs are well suited for the remote rural areas of developing countries such as Madagascar.

By employing a linear programming approach, this paper develops a methodology for the design of IRES. The method is quite general and it minimizes an objective function of total cost, subject to a set of energy and power constraints.

A numerical example is included to illustrate the design procedure.

Mots-clés: Centrale hybride; optimisation; programmation linéaire ; méthode du simplexe ; électrification rurale; développement énergétique durable ; maîtrise de l'énergie ; biogaz ; générateur solaire photovoltaïque ; convertisseurs solaires thermiques ; cogénération.

Encadreur : Monsieur RAKOTONIAINA Solofo Hery

Adresse de l'auteur : Lot VR10 Ter A - Mahazoarivo – ANTANANARIVO (101)
Mobile : +261 34 01 591 55