



HAL
open science

INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLE POUR UNE POLITIQUE ENERGETIQUE DURABLE A DJIBOUTI

Fouad Aye

► **To cite this version:**

Fouad Aye. INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLE POUR UNE POLITIQUE ENERGETIQUE DURABLE A DJIBOUTI. Energie électrique. Université Pascal Paoli, 2009. Français. NNT: . tel-00605579

HAL Id: tel-00605579

<https://theses.hal.science/tel-00605579v1>

Submitted on 2 Jul 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE DE CORSE

UMR-CNRS 6134 SPE
SYSTEMES PHYSIQUES DE L'ENVIRONNEMENT



ECOLE DOCTORALE
Environnement et Société

Thèse de Doctorat

Soutenu publiquement le 9 décembre 2009

INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES
POUR UNE POLITIQUE ENERGETIQUE
DURABLE A DJIBOUTI

FOUAD AHMED AYE

Sous la Direction de Philippe POGGI, Maître de Conférences, HDR

Membres du Jury

- | | |
|---|-------------------|
| - Jean-Claude ROMANO, Professeur, Université de Corse | Président du Jury |
| - Jacques VARET, Docteur ès Sciences, Directeur de la Prospective, BRGM | Rapporteur |
| - Stefka NEDELTCHEVA, Professeur, Université de Sofia, Bulgarie | Rapporteur |
| - Christian CRISTOFARI, Professeur, Université de Corse | Examineur |
| - Idriss Ahmed HARED, Maître de Conférences, CERD, Djibouti | Examineur |
| - Philippe POGGI, Maître de Conférences, HDR, Université de Corse | Examineur |

Sommaire	p. 3
Remerciements	p. 5
Résumés	p. 7
Introduction	p. 9
Chapitre 1^{er} : SITUATION ENERGETIQUE DE DJIBOUTI	p. 15
1.1 Généralités sur le pays	p. 17
1.1.1 Situation politique et socioéconomique	p. 17
1.1.2 Aspect géographique et climatologique	p. 18
1.1.3 Aspect géologique	p. 20
1.2 Etat actuel du secteur de l'énergie	p. 23
1.2.1 Aspect institutionnel et réglementaire	p. 23
1.2.2 Le sous-secteur électrique	p. 24
1.2.3 Le sous-secteur des hydrocarbures	p. 41
1.2.4 Le bilan énergétique national de 2005	p. 44
1.3 Les perspectives à court et moyen termes du secteur	p. 48
Chapitre 2 : L'ENERGIE SOLAIRE	p. 49
2.1 Le gisement solaire à Djibouti	p. 52
2.1.1 Les caractéristiques climatologiques	p. 52
2.1.2 Estimations du potentiel solaire	p. 53
2.1.3 Le diagramme solaire de Djibouti	p. 56
2.2 Situation actuel de la filière	p. 58
2.2.1 La capacité installée	p. 58
2.2.2 Les perspectives de développement	p. 59
2.3 Etudes de cas pratique	p. 61 & p. 81
2.4.1 Electrification d'une école rurale	p. 63
2.4.2 Diffusion des cuiseurs solaires en milieu rural	p. 84
Chapitre 3 : L'ENERGIE GEOTHERMIQUE	p. 99
3.1 Les ressources géothermiques	p. 102
3.1.1 Les manifestations géothermiques	p. 104
3.1.2 Les travaux réalisés	p. 107
3.1.3 Résultats des travaux	p. 109
3.1.4 L'état actuel de la géothermie	p. 116
3.2 Valorisation des ressources géothermiques	p. 120
3.2.1 Généralités	p. 120
3.2.2 Production d'électricité à Djibouti	p. 124
3.2.3 Evaluation des bénéfices socioéconomiques	p. 127
3.3 Conclusion	p. 129
Chapitre 4 : L'ENERGIE EOLIENNE	p. 131
4.1 L'état actuel de l'éolien à Djibouti	p. 133
4.1.1 Présentation générale	p. 133
4.1.2 Les premières mesures des vitesses de vent	p. 133
4.1.3 Le nouveau programme de développement	p. 134
4.2 Estimation du potentiel éolien	p. 147
4.3 Perspectives de la filière	p. 152
Chapitre 5 : CONCLUSION ET RECOMMANDATION	p. 153
Bibliographie	p. 165

REMERCIEMENTS

RESUMES

D'un point de vu général, l'épuisement prévisible des énergies fossiles, la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, la prise de conscience pour la sauvegarde de l'environnement et enfin la prise en compte du développement durable dans les politiques énergétiques ont mis les énergies renouvelables au cœur d'un enjeu stratégique pour l'avenir de notre planète. Mais pour la République de Djibouti qui connaît actuellement une croissance économique annuelle de 3,5%, il est presque vital d'exploiter son potentiel en matière d'énergies renouvelables pour assurer sa croissance économique, réaliser des économies de devises et atteindre dans un premier temps les objectifs de développement humain du Millénaire dont le calendrier est fixé à 2015.

Malheureusement, le pays connaît la même situation énergétique des pays d'Afrique subsaharienne où l'énergie est abondante mais l'électricité est rare ! En effet, la balance énergétique actuelle du pays est fortement déficitaire. Les 97% des besoins énergétiques de la population (majoritairement urbaine à plus de 85%) sont satisfaits par les importations des produits pétroliers et 90% des ménages Djiboutiens utilisent le kérosène comme combustible domestique. Le taux de couverture du réseau électrique est très bas, de l'ordre de 30%. Seulement 0,2 % de la production électrique (avec une capacité totale installée de 130 MW) est faite à partir d'une unique source d'énergie renouvelable (l'énergie solaire photovoltaïque).

Et pourtant, le pays dispose d'un important potentiel en énergies renouvelables. Au niveau de l'énergie solaire photovoltaïque (PV), le potentiel solaire techniquement exploitable est évalué à 200 GWh/jour. Au niveau de l'énergie éolienne, l'estimation du potentiel actuellement exploitable est de 8 MW et pourtant aucune forme d'énergie éolienne (que ce soit le grand ou le petit éolien) n'est exploitée dans le pays. Au niveau de l'énergie géothermique, le potentiel techniquement exploitable est actuellement estimé entre 350 et 650 MWe. Le potentiel économiquement exploitable pour la seule région d'Assal-Ghoubbet est supérieur à 150 MWe, très largement supérieur aux besoins actuels du pays. Au niveau de l'énergie marémotrice, un potentiel non encore évalué existe et pourrait être exploité au niveau de la passe du Goubbet.

La planification énergétique que nous proposons pour le moyen long-terme se base sur l'intégration de l'une des énergies renouvelables potentielles et plus particulièrement la plus noble d'entre-elles : la géothermie. En effet, la géothermie possède des atouts que les autres formes d'énergies renouvelables n'ont pas : elle est une énergie de base, indépendante du climat, susceptible d'être exploitée à la fois pour la production de la chaleur et la production électrique. Le schéma électrique que nous proposons est le suivant : A l'horizon 2015, nous estimons que la demande électrique se situera aux alentours de 165 MW. De ce fait, nous préconisons 74,5% d'énergies fossiles (avec une option substituable en période chaude par l'électricité importée depuis l'Ethiopie à hauteur de 30,3%) et 25,5% d'énergies renouvelables (dont 18,2% de géothermie, 6,8% d'éolien et 0,5% de solaire)

Mots clés : intégration, énergies renouvelables, planification énergétique, bilan énergétique national

SUMMARY

Generally, the predictable exhaustion of the fossil fuels, the necessity of fighting against the global warming, the awareness for the protection of the environment and finally the consideration of the sustainable development in energy policies put the renewable energies in the heart of a strategic stake for the future of our planet. But for the Republic of Djibouti which currently knows an annual economic growth of 3,5 %, it is almost vital to exploit its potential in renewable energies to ensure its economic growth, to realize savings of currencies and to initially achieve the Millennium human development goals whose calendar is fixed at 2015.

Unfortunately, the country knows the same energy situation of the countries of sub-Saharan Africa where the energy is plentiful but the electricity is rare! Indeed, the current energy balance of the country is strongly overdrawn. The 97 % of the energy needs of the population (mainly urban in more than 85 %) are satisfied by the imports of oil productions and 90 % of the Djiboutians households use the kerosene as domestic fuel. The cover rate for the electricity network is very low, about 30 %. Only 0,2 % of the electric production (with a total capacity installed of 130 MW) is made from a unique source of renewable energy (the photovoltaic solar energy).

Nevertheless, the country has an important potential in renewable energies. At the level of the photovoltaic solar energy (PV), the technically exploitable solar potential is estimated in 1535 GWh / day. At the level of the wind energy, the estimation of the currently exploitable potential is 8 MW and yet no form of wind energy (whether it is the big or the small wind energy) is exploited in the country. At the level of the geothermal energy, the technically exploitable potential is esteemed between 350 and 650 MWe. The economically exploitable potential for the only region of Assal-Ghoubbet is higher than 150 MWe, very widely upper to the current needs of the country. At the level of the tidal energy, a not yet estimated potential exists and could be exploited at the level of the pass of Goubbet.

The energy planning that we propose for the average length-term bases on the integration of one of the potential renewable energies and more particularly the noblest of them: the geothermal energy. Indeed, the geothermal energy possesses advantages which the other forms of renewable energies do not have: it is a basic energy, independent from the climate, susceptible to be exploited at the same time for the production of the heat and the electric production. The electric plan which we propose is the following one: on the horizon 2015, we consider that the electric request will be situated near 165 MW. Therefore, we recommend 74,5 % of fossil fuels (with a substitutable option in warm period by the electricity imported from Ethiopia to a total value of 30,3 %) and 25,5 % of renewable energies (including 18,2 % of geothermal energy, 6,8 % of wind energy and 0,5 % of solar energy).

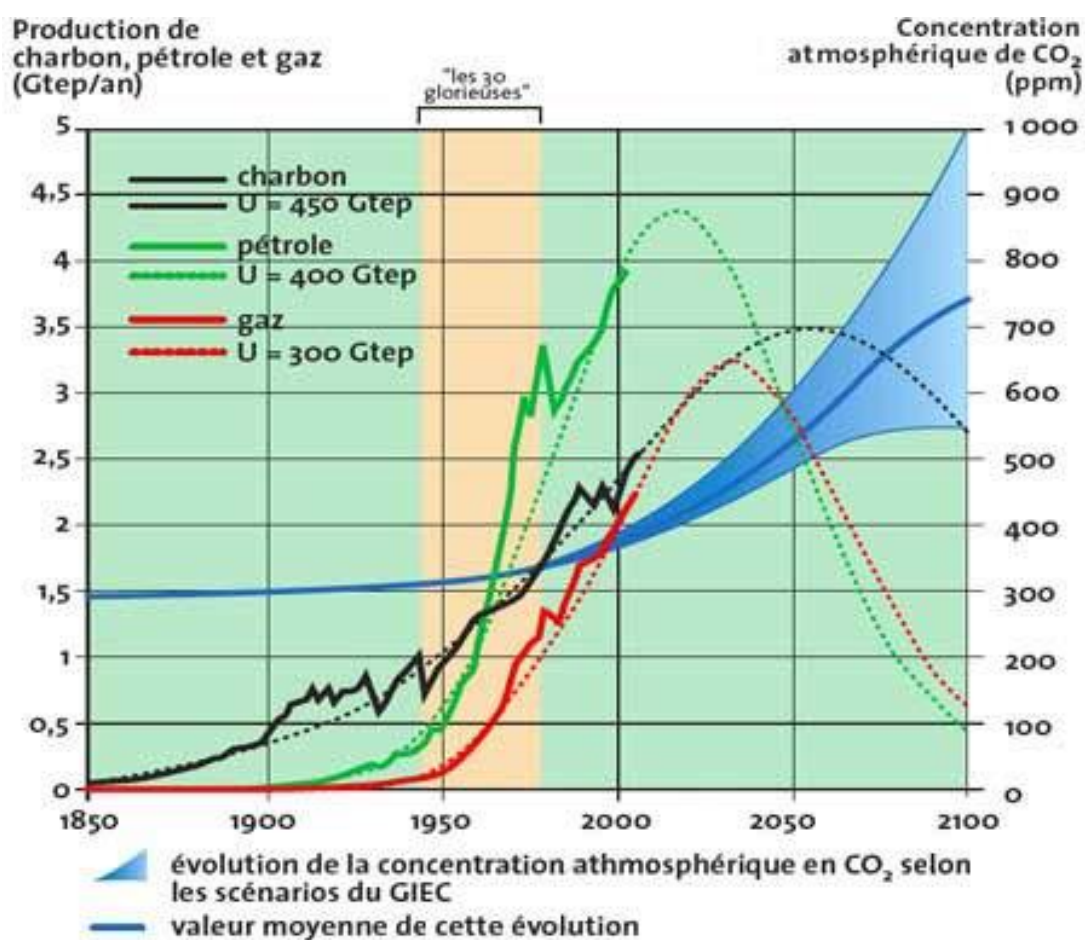
Key words: integration, renewable energies, energy planning, national energy balance

INTRODUCTION

Aujourd'hui, le contexte énergétique mondial montre des signes inquiétants de fragilité et d'instabilité dus notamment à la menace qui pèse sur la disponibilité des ressources pétrolières. Ceci pour plusieurs facteurs :

- Le Facteur géologique : les réserves mondiales sont limitées, il semble que le pic de production mondiale du pétrole sera atteint dans très peu de temps (voir graphique 0.1).
- Le Facteur économique : les besoins énergétiques des pays émergents, avec en tête la Chine et l'Inde, pèsent sur les marchés pétroliers.
- Le Facteur stratégique : l'instabilité de la région du golfe avec pour toile de fond, l'utilisation de cette « arme » par les pays producteurs.

Graphique 0.1 : Evolution de la disponibilité des ressources fossiles et de l'Effet de serre



La hausse vertigineuse des prix du pétrole ces dernières années et, pire encore, le constat général que les prix ne feront qu'augmenter dans l'avenir montre que l'énergie est une ressource hautement stratégique. Cela nous incite donc non seulement à réfléchir sur les voies et moyens pour se soustraire à cette crise mais aussi à agir rapidement pour la République de Djibouti puisse atteindre son indépendance énergétique.

Par ailleurs, le paradoxe actuel qui caractérise l'Afrique dans le domaine de l'électrification est désolant ! L'Afrique est totalement dans l'obscurité alors que ces ressources énergétiques renouvelables (sans prendre en compte les ressources fossiles) sont abondantes. L'image satellite (figure 0.1) prise la nuit illustre ce constat.

Figure 0.1 : Image satellite montrant le niveau d'électrification de l'Europe, du Moyen Orient et de l'Afrique



Selon un rapport du FMI, l'Afrique subsaharienne est richement dotée de sources d'énergies renouvelables et inépuisables (principalement hydrauliques et géothermiques). Rien qu'avec son gigantesque potentiel hydraulique, elle aurait pu satisfaire ses besoins électriques alors qu'aujourd'hui elle n'exploite que 8% de ce potentiel avec une production qui atteint 3,3 millions de Gigawatts-heures par an.

L'ironie du sort fait qu'aujourd'hui en Afrique subsaharienne, l'énergie est abondante mais l'électricité est rare ! Plus de 30 pays sur les 48 que compte cette partie de l'Afrique ont connu ces dernières années de graves pénuries d'électricité. Avec 83 GW installée sur une population de plus de 720 millions d'habitants, la capacité de production de ces pays équivaut à celle de l'Espagne qui ne compte que 46 millions d'individus en 2007.

Dans la zone du rift Est Africain, dont fait partie Djibouti, le potentiel géothermique exploitable est évalué à 4 500 MWe alors qu'actuellement cette région n'exploite que 3% de son potentiel géothermique.

En République de Djibouti, le tableau n'est guère reluisant. En effet, plus de 97% des besoins énergétiques actuelles du pays sont satisfaits à partir des hydrocarbures. Alors que seulement 0,2% de la consommation électrique est d'origine renouvelable. Pire encore, plus de 90% des ménages Djiboutiens utilisent le kérosène comme combustible domestique tandis que le taux d'électrification global du pays est inférieur à 30%.

Ajouté à cela les délestages qui ont commencé à apparaître à partir de 1996 jusqu'à leurs généralisations en 1998, les Djiboutiens ont perdu confiance à leur système électrique à tel point que la majorité de ceux d'entre eux qui avaient les moyens se sont mis à l'auto-génération. Les commerçants ont répercutés leurs investissements en équipements électriques sur les produits. S'en est suivi une flambée des prix qui a eu pour conséquence la baisse du pouvoir d'achat et donc la paupérisation d'une frange de la population.

Au niveau rural, les problèmes de sécheresses récurrentes ont accentué le manque d'eau qui a engendré un exode rural et donc l'apparition d'une fracture sociale de plus en plus visible au niveau de la capitale.

Et pourtant, le potentiel d'énergies renouvelables (géothermie, solaire et éolien) est riche et prouvé !

Ce sont ces considérations mondiales, africaines et régionales qui nous ont incitées à nous intéresser aux questions énergétiques en générale et plus particulier la quasi dépendance de Djibouti vis-à-vis des ressources fossiles ainsi que la situation alarmante de pauvreté énergétique de ses populations rurales.

Notre premier engagement dans cette voie a débuté en 2004 avec la création de l'Association Djiboutienne pour l'Energie et le Développement (ADED) avec quatre autres compatriotes de divers horizons mais que nous avons pu sensibiliser à ces problèmes d'actualité. La première action d'envergure de l'ADED fut l'exécution d'un projet pilote d'introduction de cuiseurs solaires (30 exemplaires) en 2007 dans la zone périurbaine de PK12.

Ce projet, premier du genre dans le pays, a eu un grand succès à tel point que le bailleur de fond (L'Ambassade de France) a élargi la portée de ce dernier au niveau national (350 cuiseurs à diffuser sur les cinq régions rurales du pays). C'est cette étape qui nous a servi d'étude de cas (étude de cas n°2, chapitre 2) dans les travaux de cette thèse. A l'heure actuelle, ce projet est en phase de finalisation.

L'Agence Djiboutienne pour le Développement Social (ADDS) s'est inspirée des résultats de ce projet pour lancer une diffusion à plus grande échelle des cuiseurs solaires, une action qu'elle est déjà commencée et qui est actuellement en cours de réalisation. Nous avons été consultés pour la réalisation de ce programme et nous avons apporté notre expertise puisque le modèle introduit par cette dernière différait de celui que nous avons diffusé.

Boosté par le succès de nos actions dans le domaine du solaire thermique (précisément la cuisine solaire), nous avons monté un autre projet dans le domaine du solaire photovoltaïque avec l'électrification par énergie solaire photovoltaïque d'une école rurale (école de Gued-Qarweyné) avec le soutien financier de L'Ambassade du Canada. Cette action nous a également servi d'étude de cas dans nos travaux de thèse (étude de cas n°1, chapitre 2).

Ce fut, là encore, un succès puisque c'est la première école rurale à avoir été intégralement électrifiée et qui a pu bénéficier de la tension du réseau classique (conversion de l'électricité solaire en tension alternative de 230 V). Auparavant, quelques écoles rurales furent électrifiées de façon non seulement limitée mais avec un courant continu, ce qui restreignait considérablement les possibilités qu'offraient une telle installation.

La réalisation pratique de cette électrification solaire photovoltaïque a démontré qu'il était plus utile d'utiliser l'électricité en courant alternatif même en milieu rural (réception satellitaire des programmes éducatifs, recharge des téléphones portables, ...etc.). A la suite de ce projet, Le Ministère de l'Education a entrepris un vaste programme d'électrification rurale de toutes les écoles nouvellement construites en zones rurales ou isolées.

Ici aussi, nous avons été consultés pour la mise en place de ce programme qui se poursuit et fait aujourd'hui de ce département le deuxième utilisateur de l'énergie solaire dans le pays avec 73 kWc installés (soit 25% de la capacité totale installée qui est estimée à 290 kWc). L'ADDS étant actuellement le premier organisme de diffusion de cette technologie (programme d'électrification solaire du quartier de PK12, électrification solaire du village de Holl-Holl, ...etc.).

Par ailleurs, de part nos différentes responsabilités (anciennement directeur de l'Energie et actuellement conseiller technique du Ministre) au sein du Ministère en charge de l'énergie, nous sommes au cœur de la problématique énergétique de Djibouti et à ce titre, nous avons participé à la publication de plusieurs ouvrages consacrés à différentes thématiques sur le secteur avec le soutien financier des bailleurs de fonds comme le PNUD, La Banque Mondiale, etc.

L'objectif visé par cette thèse est en premier lieu d'appréhender le contexte énergétique actuel de la République de Djibouti, de montrer ensuite l'existence d'un potentiel en énergies renouvelables susceptible d'être valorisé et enfin d'apporter une contribution à la planification énergétique pour les cinq prochaines années. Elle se propose donc d'être à la fois un outil de promotion des potentialités énergétiques en matières d'énergies renouvelables de Djibouti et un appui à la prise de décision pour les décideurs politiques concernées par ces questions aussi urgentes que stratégiques pour Djibouti.

Après un premier chapitre qui détaillera la situation énergétique de la République de Djibouti, nous aborderons les filières solaires (photovoltaïque et thermique), éolienne et géothermique et nous vous présenterons les réalisations que nous avons effectuées et leur impact dans le tissu local. Enfin, nous terminerons par une conclusion et les recommandations sur la mise en place d'un plan de développement de l'Energie en République de Djibouti.

Puisse les travaux de cette thèse apporter un élan retentissant pour la promotion et la vulgarisation des énergies renouvelables à Djibouti !

CHAPITRE 1^{er}

SITUATION ENERGETIQUE ACTUELLE

1.1 Généralités sur le pays

1.1.1 Situation politique et socioéconomique

Djibouti était une ancienne colonie française de 1862 à 1967 sous le nom de Côte Française des Somalis. Elle a ensuite été constituée en T.O.M. (Territoire d'Outre Mer) sous le nom de Territoire Français des Afars et des Issas (TFAI) à partir de 1967 jusqu'à son indépendance en juin 1977. C'est une république démocratique (constitution modifiée en 1992) avec un Président et 65 députés élus au suffrage universel direct respectivement pour 6 et 5 ans.

La population nationale constituée à plus de 98 % de musulmans est estimée à 734000 habitants (Estimation PNUD, 2003), plus de 85 % de la population habite dans les villes dont 65 % rien qu'à Djibouti (la capitale). Elle est caractérisée par un taux de croissance naturel annuel de 2,8 %. Les jeunes (moins de vingt ans) représentent plus de 54 % de la population totale. L'espérance de vie moyenne est de 52 ans, le taux de natalité est de 5,6 enfants/femme. On compte en moyenne 6,7 personnes par famille avec une population féminine légèrement supérieure.

Les deux grands groupes ethniques sont les Afars qui habitent généralement dans les régions Nord du pays et les Somalis dans les régions Sud et avec une minorité Arabe (essentiellement d'origine yéménite). L'arabe et le français sont les deux langues officielles du pays.

L'économie du pays, axée sur les services à plus de 80 %, est liée à sa position géographique stratégique (point de jonction entre la mer rouge et l'océan indien). Avec son port moderne et son aéroport international, Djibouti constitue le principal point d'accès au commerce international pour bon nombre de pays de la sous-région. C'est aujourd'hui une zone de libre échange et de réexportation de toutes sortes de marchandises à travers le monde.

L'industrie et le secteur primaire ne représentent que 10 % chacun dans le PIB. L'agriculture avec ses 400 ha irrigués sur les 9000 ha de terres arables (à cause des problèmes de disponibilité en eau) ne permet pas de couvrir les besoins alimentaires. Le pays est donc obligé d'importer l'essentiel de ses besoins de l'étranger (Ethiopie, Yémen, France,..)

La monnaie nationale, le Franc Djiboutien (DJF) est librement convertible. Elle est indexée au Dollar Américain depuis 1973 au taux fixe de 1 USD = 177.721 DJF, ce qui limite l'inflation à un taux relativement faible de 2 %. Le secteur bancaire est stable et libre, les transferts de devises ne sont pas limités. Le PNB est évalué à 900 USD / habitant / an [AQUASTAT, FAO 2005].

Les infrastructures routières sont globalement en bon état d'usage avec 2900 km de routes dont 620 km de routes bitumées. Selon des estimations non officielles, le taux de chômage est très élevé chez les jeunes et dépasse largement les 35 %. La main d'œuvre est relativement bon marché.

1.1.2 Aspect géographique et climatologique

La République de Djibouti est située en Afrique de l'Est entre 11° et 12° 40' de Latitude Nord et 41° 45' et 43° 15' de Longitude Est avec une superficie de 23 200 km². Elle possède 349 km de frontière terrestre du nord-ouest au sud-ouest avec l'Éthiopie, 109 km au nord avec l'Érythrée et 58 km au sud avec la Somalie.

Ses côtes s'étendent sur plus de 370 km en commençant au nord-est par la Mer Rouge, en passant à l'est par le Bab-El-Mendab qui le sépare du Yémen et de la péninsule arabique et se terminent jusqu'au Golfe d'Aden au sud-est qui se prolonge profondément dans le territoire djiboutien par le Golfe de Tadjourah jusqu'au Ghoubbet-Al-Kharrab (figure 1.1).

Fig. 1.1 : Carte Administrative du pays

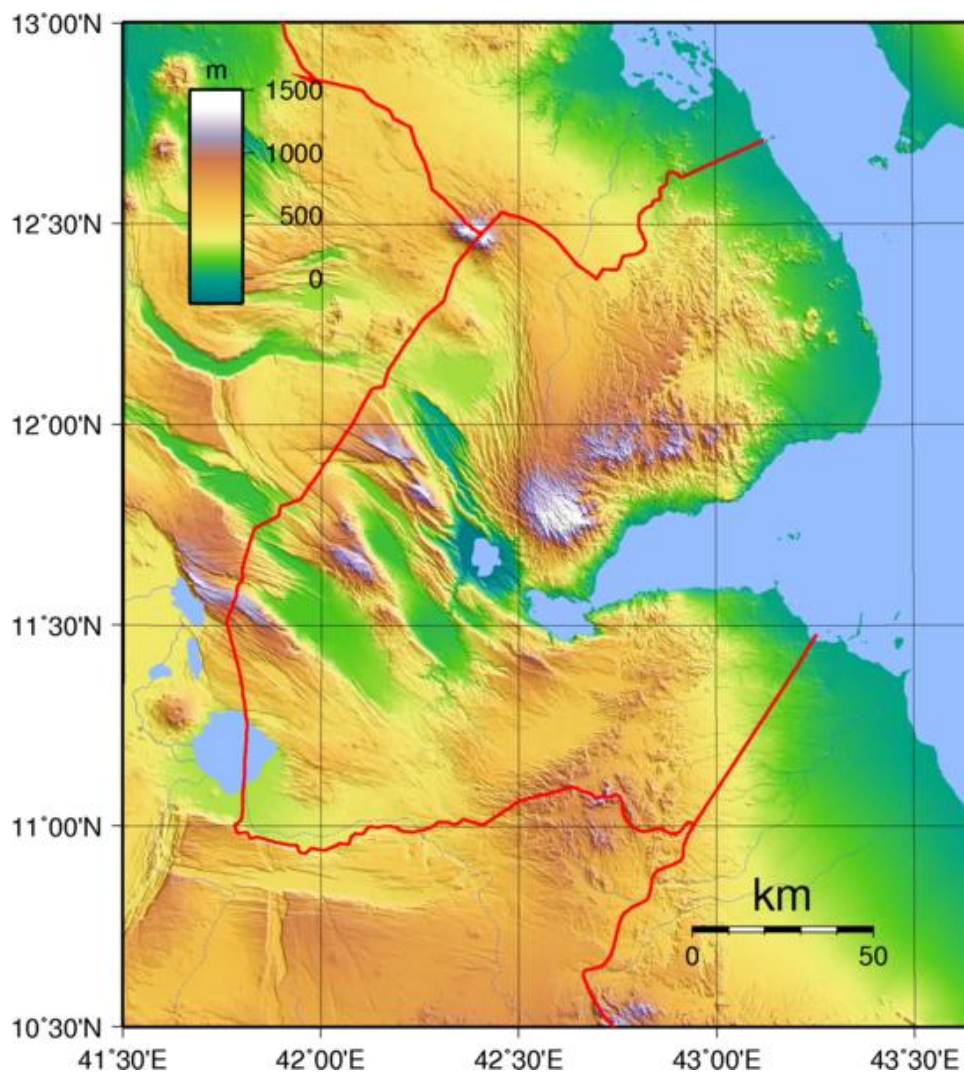


Le pays compte 5 régions (anciennement districts) plus la capitale, soit 6 entités administratives décentralisées.

D'un point de vue géographique, le pays se divise en cinq grandes zones (fig. 1.2):

- ⇒ Au nord-est et au sud-est, des plaines côtières (Bahari) formées de fines coulées basaltiques et d'anciens récifs coralliens exondés.
- ⇒ Au nord-ouest et à l'ouest, de vastes plateaux de nature basaltiques avec une altitude comprise entre 1000 et 1500 m limités par de grandes failles (Mak'Arrassou, Ayla'Adou, Dalha, Manda Inakir qui se prolonge en Ethiopie,...).
- ⇒ Au nord, de grands massifs rhyolitiques très chaotiques (Mabla, Goda, Ado'Alé,...) dont le point le plus haut atteint 2020 m avec le Mont Moussa Ali.
- ⇒ Au sud-ouest et au centre, une zone d'effondrement constituée de plaines dont l'altitude passe de + 240 m (Hanlé, Gaggadé, ...) à - 150 m au Lac Assal.
- ⇒ Au sud, la région d'Ali-Sabieh avec le massif de Bour Ougoul (1700 m) limité à l'ouest par les dépressions de Bada Weyn et Bada Yar.

Fig. 1.2 : Carte géomorphologique de Djibouti



Le climat est tropical aride sur la majeure partie du territoire mais des différences climatiques existent en fonction de l'altitude et de la distance à la mer. En hiver, d'octobre à mars, la République de Djibouti est soumise aux alizés du nord-est, très secs. En été, d'avril à septembre, elle se trouve dans la zone des vents équatoriaux d'ouest, mais l'essentiel des pluies apportées par ces vents humides tombent sur les montagnes éthiopiennes.

Les précipitations moyennes annuelles sont donc très faibles, inférieures à 150 mm/an et les variations interannuelles sont très importantes (maximum : 300 mm/an, minimum : 10 mm/an). A Djibouti, station représentative de la zone côtière, la pluviosité annuelle moyenne est de 129 mm/an. En raison de la topographie, la pluviosité est plus forte au nord. Dans la région des massifs du Mabila, elle est en moyenne de 271 mm/an à Randa et plus de 70 % des pluies tombent entre octobre et mars.

La température diurne moyenne en hiver est de 25 °C et en été de 39°C avec les extrema suivants : de 17 °C à 53 °C. L'humidité de l'air est de 75 % à 6h30 et de 63 % à 12h. L'humidité est encore plus élevée vers les sommets, ce qui a permis le maintien de forêts relictuelles comme la forêt du Day.

L'évaporation est élevée (6,4 mm/jour en moyenne) et l'évapotranspiration potentielle atteint son maximum à l'intérieur du pays (2750 mm/an). En raison de ce régime climatique sévère, la plupart des cours d'eau sont temporaires et ne coulent que quelques heures après les orages. Les milieux aquatiques permanents tels que le Lac Assal et le Lac Abbhé (en voie de dessèchement) sont alimentés par des sources thermales et leurs eaux sont fortement minéralisées.

1.1.3 Aspect géologique :

La République de Djibouti est située au point de rencontre de trois axes distensifs (fig. 3) :

- ⇒ Le Rift Est Africain qui s'étend du sud-ouest de Djibouti jusqu'au Kenya et la Tanzanie et du nord-ouest de l'Erythrée jusqu'à la Mer Rouge.
- ⇒ Le Rift Mer Rouge qui s'étend du nord de la Mer Rouge, du Golfe d'Aqaba et de la Mer Morte et se termine jusqu'au nord de la Syrie.
- ⇒ Le Rift Golfe d'Aden qui se prolonge jusqu'au Golfe de Tadjourah à Djibouti.

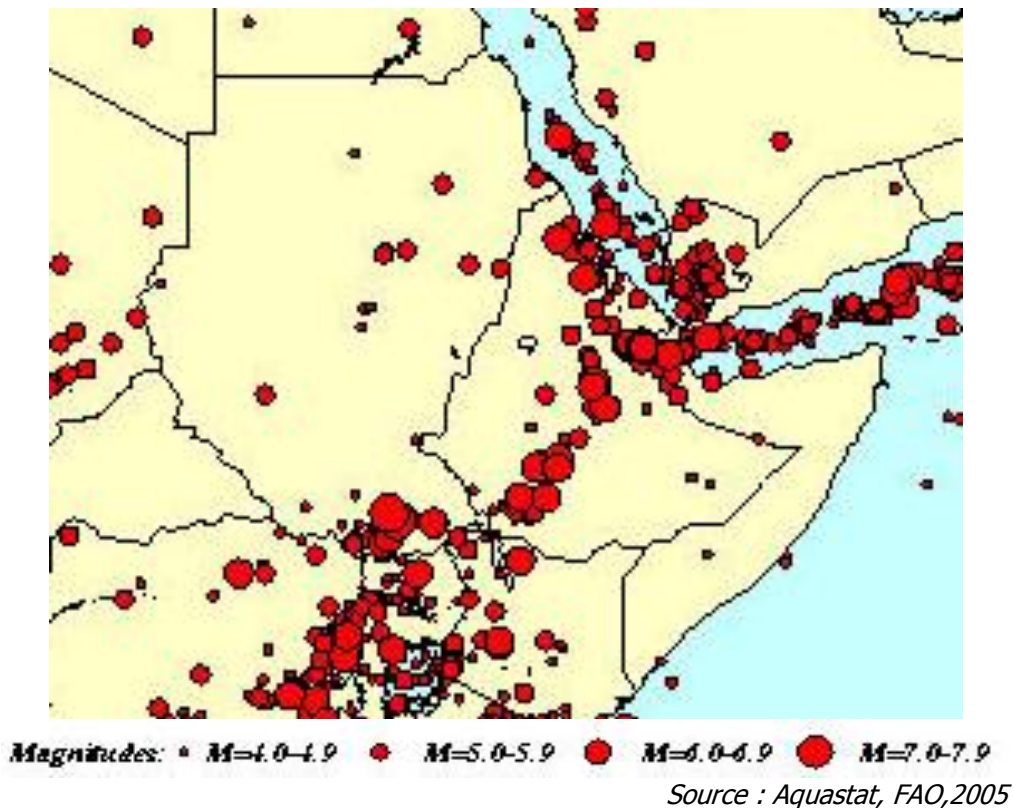
On estime que ce phénomène de "rifting" a débuté il y a 25 millions d'années et se poursuivra jusqu'à l'océanisation de la portion de rift d'Assal-Ghoubbet. La vitesse d'expansion de ce rift est estimée à 2 cm/an. Ce qui a pour effet de faire de la République de Djibouti, le siège d'une activité tectonique intense.

A l'échelle du pays, c'est le golfe de Tadjourah qui présente la sismicité la plus importante et la plus continue dans le temps. On y note une activité microsismique permanente (quelques séismes par jour) et plus sporadiquement de crises de plusieurs séismes dont la magnitude est souvent comprise entre 3,5 et 5,5 sur l'échelle ouverte de Richter.

La dernière crise a eu lieu en novembre 1978 avec l'apparition d'un volcan d'une quarantaine de mètres de haut que les habitants de la zone ont vite surnommé " Ardoukoba " à l'arrivée de Haroun Tazieff, nom signifiant « terre en pente » en langue Afar.

Le dispositif actuel d'observation sismique comprend 12 sismographes répartis autour du golfe de Tadjourah et dans le rift d'Assal. Chaque station est reliée par télémétrie à l'Observatoire Géophysique d'Arta qui enregistre tous les signaux et procède à l'exploitation des données en partenariat avec l'Institut de Physique du Globe de Paris.

Fig. 1.3 : sismicité de la zone du Rift Africain



En résumé, cet aperçu global de la République de Djibouti nous permet d'or et déjà d'avoir une idée sur les différents types d'énergies renouvelables que l'on pourrait trouver dans cette partie du globe mais également d'appréhender le contexte dans lequel ces énergies pourraient être développées.

D'un point de vue énergétique, la faible pluviométrie et l'aridité du climat (indice 0,054) expliquent les deux constats suivants :

- ⇒ L'hydroélectricité n'est pas envisageable à cause du manque de cours d'eau permanent dans le pays.
- ⇒ L'exploitation de la biomasse est très limitée en raison de la faiblesse du couvert végétal qui n'est que de 3% [rapport FOSA, 1999].

Compte tenu des caractéristiques climatiques et géographiques, les formes d'énergie renouvelables que l'on pourrait exploiter sont au nombre de trois :

- ⇒ L'énergie géothermique,
- ⇒ L'énergie solaire,
- ⇒ L'énergie éolienne.

On pourrait éventuellement y ajouter l'énergie marémotrice qui pourrait être exploitée au niveau de la passe du Ghoubbet (fig. 1.4 et photo 1.1). En effet, le Ghoubbet et le golfe de Tadjourah sont séparés par un petit passage long de 700 m et d'une faible profondeur d'environ 10 m. En fonction des marées, on observe donc, un impressionnant courant circulant dans les deux sens.

Les travaux de cette thèse ne concerneront donc que ces trois formes d'énergies renouvelables. Une petite partie à titre informatif sera également consacrée aux possibilités techniques d'exploitation de l'énergie marémotrice.

Fig.1.4 : Passe du Goubbet (signalé par le cercle)

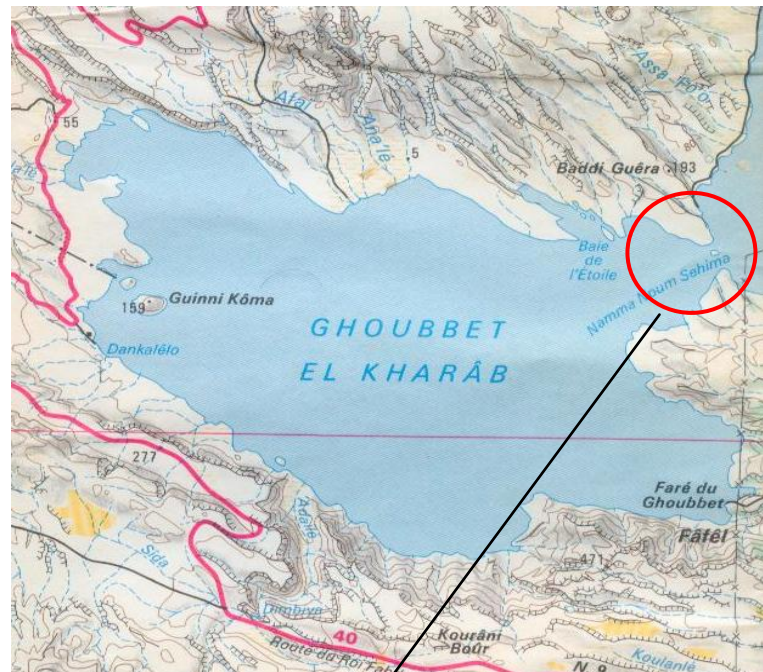
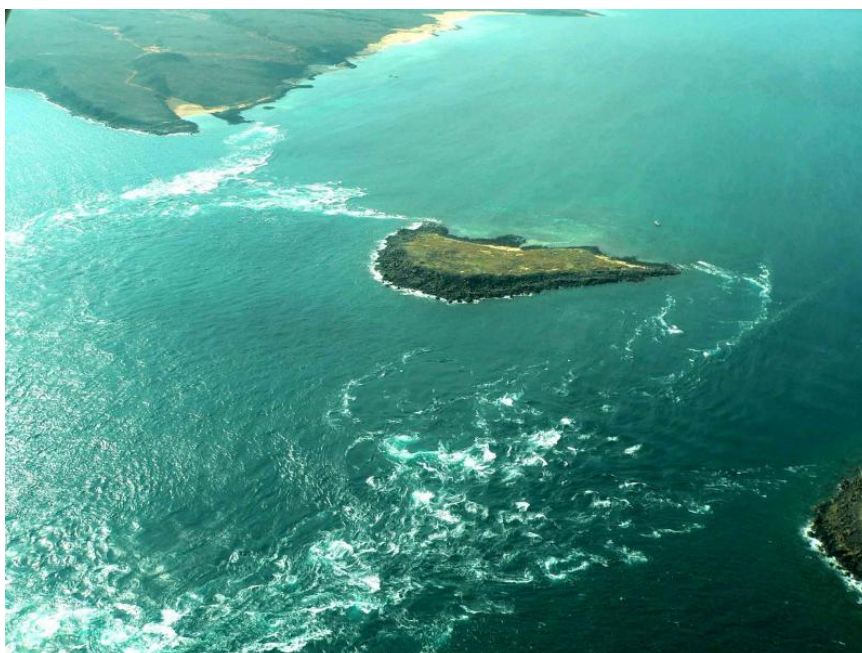


Photo 1.1 : Courant observé à la passe du Goubbet



1.2 Etat actuel du secteur de l'énergie

1.2.1 Aspect institutionnel et réglementaire

Le secteur comprend aujourd'hui quatre acteurs majeurs :

- ⇒ Le Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles est responsable de la politique énergétique au niveau national. Les prérogatives du ministère énoncées dans la Loi N°97/AN/4^{ème} L, loi de réorganisation de ce département, comprennent, outre le secteur énergie, les ressources naturelles au sens minier (richesses du sol et du sous-sol). Il est constitué d'un secrétariat général et de trois directions dont celle de l'énergie qui comprend elle-même deux services administratifs (énergies conventionnelles et énergies renouvelables).
- ⇒ Le sous-secteur de l'électricité est caractérisé par un monopole d'Etat. La compagnie nationale d'électricité EDD (Electricité de Djibouti), unique opérateur dans le secteur depuis sa création en 1960, est responsable de toute la chaîne électrique depuis la production jusqu'à la commercialisation de l'énergie électrique en passant par le transport et la distribution (Article 3 de l'Arrêté N°83-0171/PR/EDD portant modification du Cahier des charges de l'EDD). Elle est placée sous la tutelle du Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles (MERN) même si elle jouit d'une autonomie administrative et financière (décret N°77-079/PR/MRI portant réorganisation des statuts de l'EDD).
- ⇒ La Société Internationale des Hydrocarbures de Djibouti (SIHD), sous la tutelle du MERN, a pour rôle de veiller au respect de la réglementation en vigueur dans le sous-secteur des hydrocarbures même si avec la récente modification de ses statuts, elle peut aussi importer et vendre les produits pétroliers. Les importations des produits pétroliers sont dominées par trois compagnies pétrolières mondiales (Shell, Total et Oilibya). Oilibya est la dernière compagnie à s'être installée dans le pays, elle vient juste de commencer ses activités cette année 2009. Le Ministère des Finances intervient également dans ce sous-secteur pour la régulation et la stabilisation des prix des hydrocarbures même si officiellement ce segment est libéralisé.
- ⇒ Le Centre d'Études et de Recherches scientifiques de Djibouti (CERD), directement rattaché à la Présidence de la République, intervient et joue un rôle important au niveau de la recherche scientifique dans le secteur de l'énergie, notamment dans le domaine des énergies renouvelables.

Les organes de régulation du secteur n'existent pas encore à ce jour en République de Djibouti. Il faut noter que les producteurs indépendants et les investisseurs potentiels du secteur exigent la mise en place de telles institutions pour la prise en compte de leurs préoccupations et garantir un arbitrage équitable en cas de litiges avec les opérateurs étatiques.

Néanmoins, le gouvernement vient de prendre une décision importante en mettant en place une Commission Nationale de l'Énergie (septembre 2009) qui sera chargée notamment de faire des propositions au gouvernement pour la réforme du secteur de l'énergie.

1.2.2 Le sous-secteur électrique

Malgré sa petite taille, la République de Djibouti est caractérisée par l'absence d'un réseau électrique national interconnecté. Il existe quatre centres de production indépendants, classés ci-après par ordre d'importance :

- ⇒ Le principal centre de production du pays se trouve dans la capitale Djibouti et est réparti sur deux endroits (Boulaos et Marabout) qui sont reliés entre eux par une liaison souterraine de 63 kV d'une longueur de 4,8 km. Ce centre alimente également le district d'Arta (à 36 km de la capitale) et ses trois autres petites localités qui sont Wéa (32 km), Doua (6 km) et Damerjog (8 km).
- ⇒ Le deuxième centre de production est situé à Dikhil (à 118 km de la capitale), il est relié à la ville d'Ali-Sabieh et à la petite localité de Mouloud par une ligne aérienne de 20 kV d'une longueur totale de 44 km. Il faut toutefois noter que la ville d'Ali-Sabieh est dotée d'un groupe électrogène de secours utilisé uniquement en cas d'avarie de la centrale de Dikhil.
- ⇒ Le troisième centre de production est situé à Tadjourah (à 173 km de la capitale), il n'alimente que cette ville du Nord.
- ⇒ Le quatrième et dernier centre de production est situé à Obock (à 235 km de la capitale), il n'alimente que cette ville de l'extrême Nord.

Il faudrait toutefois noter que l'actuel projet d'interconnexion avec l'Éthiopie en cours de réalisation modifiera cette configuration puisqu'il est prévu, entre autres, la construction de 283 Km de ligne de transport de 230 kV entre la ville de Dire-Dawa (Éthiopie) et la ville d'Ali-Sabieh (Rép. De Djibouti) ainsi que la construction de 73 km de ligne de 63 kV entre Ali-Sabieh et Djibouti (la capitale).

1.2.2.1 La capacité installée

Les moyens de production en République de Djibouti sont exclusivement constitués de centrales thermiques classiques utilisant du mazout (180 cSt) pour la centrale de Boulaos et du Gasoil pour toutes les autres. Le parc de production national est réparti comme suit :

A Djibouti-ville, deux centrales sont en activités : la centrale de Boulaos sise dans la partie Sud de la capitale (tableau 1.2) et la centrale de Marabout située dans la partie Nord plus précisément à l'entrée du port de Djibouti (tableau 1.1). La capacité installée en 2008 dans la capitale était de 124,55 MW. Dans les autres régions, la production est faite par des groupes diesel de différentes capacités fonctionnant tous au gasoil, la capacité installée se répartie comme suit :

- ⇒ Dikhil/Ali-Sabieh 3,128 MW,
- ⇒ Tadjourah 1,28 MW,
- ⇒ Obock 0,796 MW.

Ces trois centres de production totalisent une capacité de 5,2 MW (tableau 1.3). La capacité totale installée dans le pays en 2008 était donc de **130 MW**. Le graphique 1.1 retrace l'évolution de la capacité de production depuis 1980.

Tableau 1.1 : Capacité installée dans la centrale de Marabout

Groupe	Année d'installation	Puissance installée (MW)	Puissance disponible (MW)	Heures de fonctionnement
M1	1999	3	2,3	1505
M2	1999	3	2,3	13658
M3	1999	3	2,3	10325
M4	1999	3	2,3	14316
M5	1999	3	2,3	11759
M6	1999	3	2,3	12932
SOUS TOTAL 1	2004	18	13,8	

*Source : EDD***Tableau 1.2 : Capacité installée dans la centrale de Boulaos**

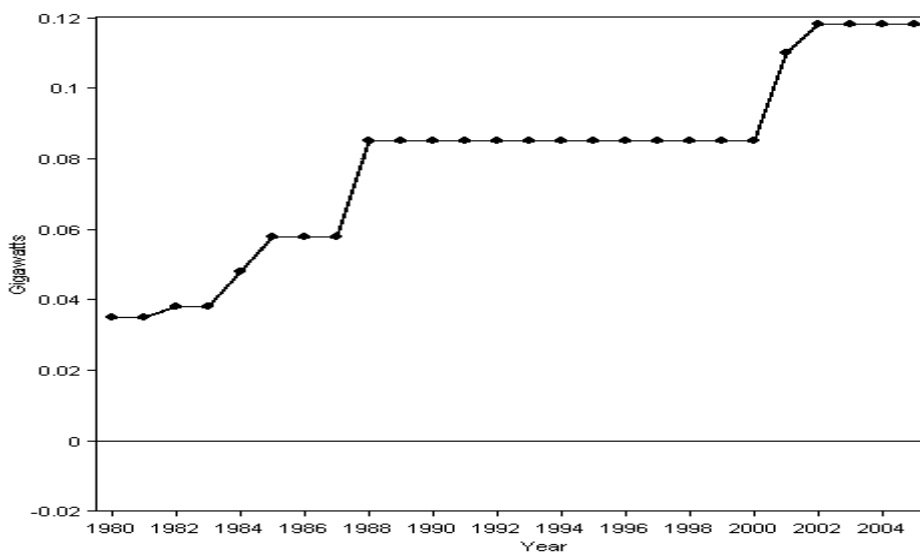
Groupe	Année d'installation	Puissance installée (MW)	Puissance disponible (MW)	Heures de fonctionnement
G1	1976	5,5	4,5	108153
G21	1984	15,2	10	95996
G23	1988	5,5	4,5	79953
G24	1988	5,5	4,5	77052
G25	1999	15	14	21603
G13	2001	5,5	5,2	12632
G14	2001	5,5	5,2	12952
G15	2001	5,5	5,2	13432
G16	2001	5,5	5,2	10025
G17	2003	7,45	-	2434
G18	2004	7,45	-	-
G12	2004	7,45	-	-
G22bis	2007	15,5	10	-
SOUS TOTAL 2	2007	106,55	68,3	

*Source : EDD***Tableau 1.3 : Capacité installée dans les Districts**

Districts	Puissance installée (MW)
Dikhil/Ali-sabieh	3,128
Tadjourah	1,28
Obock	0,796
SOUS TOTAL 3	5,2

Source : EDD

Graphique 1.1 : Evolution de la capacité installée (1980-2005)



Source : DOE, USA 2005

1.2.2.2 La production électrique

De 1976 à 1985, la production couvrait largement la demande d'électricité avec une puissance installée de 40 MWe. La croissance de la demande électrique était estimée en 1985 à 2 % par an. A partir de 1985, les capacités de production ont doublé pour passer à 81 MWe de puissance installée. De 1986 à 1995, malgré l'accroissement rapide de la demande qui est passée en 1995 à 3.5 % par an, l'équilibre entre l'offre et la demande était maintenue. Malheureusement, la vétusté des équipements de production commençait déjà à se faire sentir.

A partir de 1996, le parc de production n'arrivait plus à satisfaire la demande, plus forte en été avec des pics de consommation de l'ordre de 50 MWe, à cause du vieillissement du parc. Les délestages ont fait leur apparition en été cette année là. Ce problème a atteint son paroxysme en 1998 avec l'incendie d'une partie de la centrale de Boulaos qui a pratiquement réduit de moitié les capacités de cette centrale. La production d'électricité est revenue à son niveau de 1983 et depuis, les délestages sont devenus très fréquents. Les petits industriels, les commerçants de la capitale et le gros résidentiel (collectif ou aisé) se sont donc mis à l'auto-génération.

La situation s'est globalement améliorée dans la capitale en 1999 avec la rénovation de la partie sinistrée de la centrale de Boulaos (29 MWe installés) et la remise en service de la centrale de Marabout (capacité initiale de 18 MWe).

Au niveau des autres régions, l'évolution de la production électrique pour la période 1986-2000 montre que, dans le district d'Obock, il n'y a pas eu de production de 1992 à 1997 à cause d'un conflit armé au Nord du pays qui a complètement détruit les installations de cette ville (Tableau 1.4 et Graphique 1.2).

L'EDD a mis en place depuis 2000 un plan pluriannuel d'équipement qui prévoit l'installation de 25 MWe supplémentaire dont 7,45 MWe déjà installé en 2003 et 14,90 MWe installée en 2004. Celui-ci a déjà permis de répondre à la demande jusqu'en 2005. Avec l'installation supplémentaire de 15,5 MWe en 2007, EDD prévoit de répondre à la demande jusqu'en 2010. Malgré cela, on observe quelquefois plus particulièrement pendant la période de pointe en été l'apparition des délestages programmés. Les délestages fortuits ont fortement régressés ces dernières années.

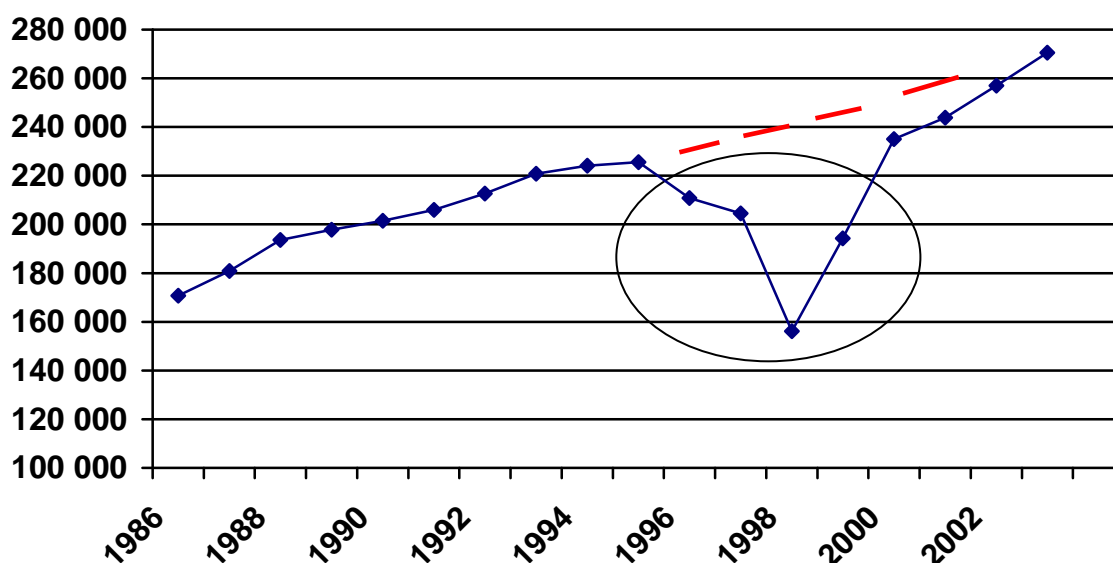
Tableau 1.4 : La Production électrique nationale de 1986 à 2000 (en MWh)

PERIODE	Djibouti-Arta	Ali-sabieh / Dikhil	Obock	Tadjourah	TOTAL
1986	164 019	3 145	741	2 892	170 797
1987	173 407	3 730	633	3 042	180 812
1988	185 950	3 899	924	2 901	193 674
1989	190 106	4 081	891	2 772	197 850
1990	193 139	4 456	973	2 980	201 548
1991	197 582	4 657	980	2 779	205 998
1992	206 044	4 448	-	2 203	212 695
1993	213 613	5 020	-	2 220	220 853
1994	216 667	4 837	-	2 623	224 127
1995	217 767	5 090	-	2 748	225 605
1996	202 494	5 455	-	2 878	210 827
1997	196 139	5 425	-	2 922	204 486
1998	146 470	5 325	1 209	3 183	156 187
1999	184 389	5 339	1 264	3 250	194 241
2000	226 320	4 843	1 175	2 682	235 020
2001	234 310	5 245	1 204	3 085	243 844
2002	247 555	5 109	1 145	3 156	256 965
2003	260 660	5 389	1 223	3 245	270 517

Source : EDD

Sur le graphique 1.2, on peut observer que la courbe a perdu sa progression normale à partir de 1996 jusqu'à la perte sèche et brutale de production dû à l'incendie de la centrale de Boulaos en 1998 (partie signalée par le cercle). Les traits discontinus (en rouge) préfigurent l'évolution normale de cette courbe.

Graphique 1.2: Evolution de la production nationale de 1986 à 2003 (en MWh)



Les groupes installés à la centrale de Boulaos consomment essentiellement du mazout (180 cSt) ou fuel-oil (environ 97 %) qui est mélangé avec une faible quantité de Gasoil (environ 3 %) et produisent 92% de l'électricité consommée tandis que les groupes installés à la centrale de Marabout consomment exclusivement du Gasoil et produisent 8 % de d'électricité consommée à Djibouti.

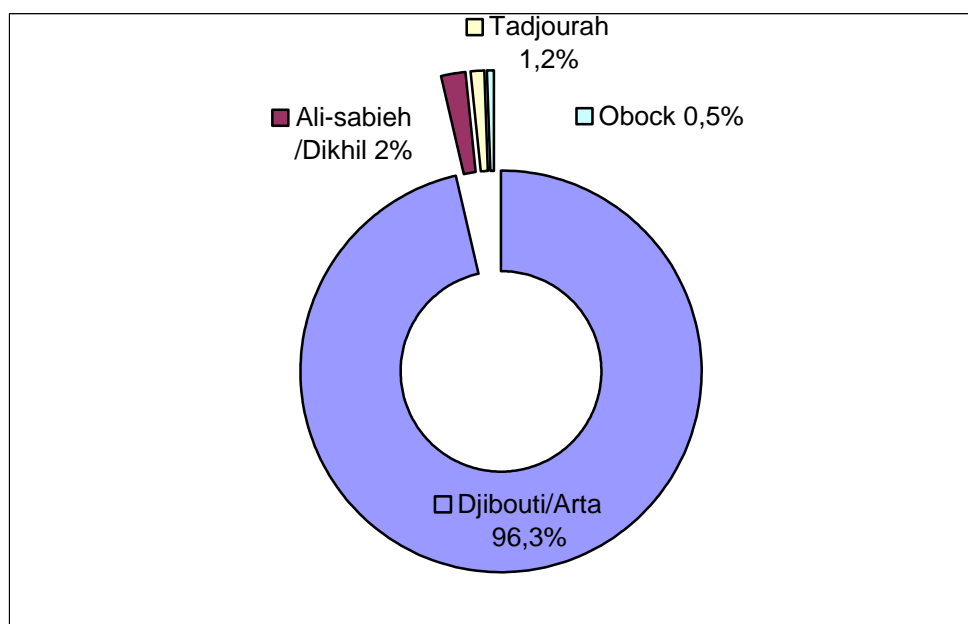
La répartition de la production montre que la capitale est le principal centre de production électrique du pays avec 96,3 %. Les quatre pourcent restant se répartissent entre les 3 districts de l'intérieur comme suit. (Tableau 1.5 et graphique 1.3).

Tableau 1.5 : Répartition de la production électrique par zone en 2003

Zones	Djibouti/Arta	Ali-sabieh /Dikhil	Tadjourah	Obock	TOTAL
en MWh	260 660	5 389	3 245	1 223	270 517
en %	96,3	2,0	1,2	0,5	100

Source : rapport d'activité EDD, 2003

Graphique 1.3 : Répartition de la production par électrique par zone



➤ Le taux de disponibilité à Djibouti pour l'année 2007 :

La disponibilité des centrales thermiques dans le monde avoisine les 90 % en moyenne. Pour ce qui est de Djibouti, la puissance disponible sur la centrale de Boulaos en 2007 était de 68,3 MW. La puissance disponible sur la centrale de Marabout était quant à elle de 13,1 MW. Soit au total 82,1 MW de puissance disponible sur 129,55 MW installée.

$$\tau = \frac{\text{Puissance disponible}}{\text{Puissance installée}} \times 100 \quad (1.1)$$

$$\tau = \frac{82,1}{129,55} \times 100 = 63,4 \%$$

Ce taux est relativement bas, il est probablement dû à la vétusté des moyens de production de la partie ancienne B1 (composée des groupes mis en service avant l'année 1989) de la centrale de Boulaos.

Il faut souligner que la production subit des pertes assez considérables, à titre d'exemple, nous allons estimer ces pertes pour l'année 2002 sur Djibouti-Arta (tableau 1.6).

Tableau 1.6 : Quantification des pertes électriques en 2002

Réseau	Produite MWh	Distribuée MWh	Facturée MWh
Djibouti-Arta	247 555	236 126	201 359

Source : EDD, 2003

Il ressort de ce tableau que l'acheminement de l'énergie produite sur le site jusqu'au consommateur final subit des défaillances plus ou moins importantes :

- La consommation des auxiliaires :

$$C = \frac{\text{Energie produite} - \text{Energie distribuée}}{\text{Energie produite}} \times 100 \quad (1.2)$$

$$C = \frac{247555 - 236126}{247555} \times 100$$

$$C = 4,6 \%$$

- Les pertes sur le réseau :

$$P = \frac{\text{Energie distribuée} - \text{Energie facturée}}{\text{Energie distribuée}} \times 100 \quad (1.3)$$

$$P = \frac{236126 - 201359}{236126} \times 100$$

$$P = 14,7 \%$$

Les pertes sont de deux types, les pertes techniques et les pertes illicites. Les pertes techniques sont dues au transport (effet joule) et à la transformation (courant magnétique) de l'électricité alors que les pertes illicites sont le plus souvent attribuées aux fraudes. A noter que les pertes subies sont tout de même très élevées. La part des pertes techniques du réseau est évaluée à 11% (*source EDD*).

Nous allons maintenant estimer le rendement moyen du parc de production national. Pour cela, nous avons besoins de connaître les caractéristiques techniques des moyens de production (consommation normale et spécifique des groupes en carburant, consommation normale et spécifique en lubrifiant, la production brute, ...etc.). Nous avons pris comme exemple les données de l'année 2000 dans l'ensemble du pays et par zone, ces données sont résumées dans le tableau 1.7 ci-dessous :

Tableau 1.7 : Caractéristiques des moyens de production

District	Unités	Quantités
Centrale de Boulaos		
Consommation Fuel-Oil	Tonne	35511
Consommation Diesel-Oil	Tonne	2262
Consommation huile	Tonne	575
Production brute	MWh	164938
Consommation spécifique Fuel-Oil	g/kWh	215
Consommation spécifique Diesel-Oil	g/kWh	13.7
Consommation spécifique huile	g/kWh	3,6

Centrale de Marabout		
Consommation Fuel-Oil	Tonne	0
Consommation Diesel-Oil	Tonne	13736
Consommation huile	Tonne	96,8
Production brute	MWh	61383
Consommation spécifique Fuel-Oil	g/kWh	0
Consommation spécifique Diesel-Oil	g/kWh	224
Consommation spécifique huile	g/kWh	2,8
Centrale de Dikhil/Ali-Sabieh		
Consommation Fuel-Oil	Tonne	0
Consommation Diesel-Oil	Tonne	1279
Consommation huile	Tonne	11,22
Production brute Dikhil	MWh	5240
Production brute Tadjourah	MWh	5
Consommation spécifique Fuel-Oil	g/kWh	0
Consommation spécifique Diesel-Oil	g/kWh	244
Consommation spécifique huile	g/kWh	2,2
Centrale de Tadjourah		
Consommation Fuel-Oil	Tonne	0
Consommation Diesel-Oil	Tonne	859
Consommation huile	kg	7370
Production brute	MWh	3126
Consommation spécifique Fuel-Oil	g/kWh	0
Consommation spécifique Diesel-Oil	g/kWh	280
Consommation spécifique huile	g/kWh	2,6
Centrale d'Obock		
Consommation Fuel-Oil	Tonne	0
Consommation Diesel-Oil	Tonne	376
Consommation huile	kg	6160
Production brute	MWh	1286
Consommation spécifique Fuel-Oil	g/kWh	0
Consommation spécifique Diesel-Oil	g/kWh	321
Consommation spécifique huile	g/kWh	5,2

Source : rapport d'activité EDD, 2000 complété

A titre d'information, les lubrifiants utilisés par les centrales sont de trois types le T30, X40 et le T40.

- Le rendement moyen de ces groupes est calculé comme suit (tableau 1.8):

Tableau 1.8 : Consommations spécifiques et rendement

Centrales	Boulaos	Marabout	Dikhil / Ali-sabieh	Tadjourah	Obock
Energie Produite (MWh)	164938	61383	5240	3126	1286
Conso. combustible (tonne)	37773 ¹	13736	1279	859	376
Conso. spécifique (g/kWh)	228	224	244	280	321
Rendement énergétique (PCI)	36,8 %	37,7 %	34,3 %	30,5 %	28,7 %

¹ mélange fioul et gasoil (voir tableau 1.7)

Les facteurs de conversion utilisés sont : Fuel-Oil (11,86 kWh/kg) et Diesel-Oil (11,94 kWh/kg). En 2000, le rendement énergétique moyen des centrales de Djibouti s'élevait à 37,3 % , ce qui est relativement normal alors que celui des centrales des autres régions se dégrade en en fonction de la taille de la centrale (bas pour Dikhil et mauvais pour Obock).

1.2.2.3 Le réseau de transmission

La République de Djibouti n'étant pas un pays de grande taille, elle ne dispose donc pas d'un grand réseau de transport et de distribution en tant que tel. La taille et les caractéristiques de ce réseau de transmission se définissent comme suit :

- ⇒ Le réseau à 63 kV HT (Haute Tension) comprend une ligne souterraine de 4,8 km qui relie les centrales de Boulaos et Marabout.
- ⇒ Le réseau à 20 kV MT (Moyenne Tension) distribue l'électricité vers les zones périphériques de Djibouti ville et vers les villes plus lointaines telles que Arta, Wéa, Douda, Damerjog, ...etc. qui sont raccordées au réseau principal. Ce réseau fonctionne grâce à une ligne de 241km, dont environ la moitié est souterraine.
- ⇒ Le réseau 220/380 V BT (Basse Tension) avec une longueur de 330 km dont environ 87 km de lignes souterraines est le réseau de distribution.
- ⇒ Les caractéristiques de la tension du réseau de distribution sont de 230 V avec une fréquence de 50 Hz.
- ⇒ L'Eclairage Public constitue un réseau à part entière avec 63 km de lignes et 4000 foyers lumineux.
- ⇒ Il y a 279 postes de transformation.

Par ailleurs, dans le cadre du projet d'interconnexion en cours, il est prévu la construction de 283 km de lignes de transport THT (Très Haute Tension) de 230 kV entre Dire-Dawa (Ethiopie) et Ali-Sabieh (Djibouti) et de 73 km de lignes HT de 63 kV entre Ali-Sabieh et Djibouti-ville. Il est prévu une ligne mono-terne d'une capacité maximale de 74 MW.

1.2.2.4 La consommation électrique

Pour l'année 2006, on comptait un peu plus de 36 000 raccordements au système, dont près de 33 000 établis dans Djibouti Ville et le reste dans les villes secondaires. L'entreprise nationale EDD classe ses clients selon qu'ils sont « spéciaux » ou « courants ». Les clients classés « spéciaux » sont ceux qui reçoivent de l'électricité grâce au réseau à moyenne tension ou qui sont raccordés au réseau à basse tension et dont la demande atteint 36 kVA ou plus. Les services d'éclairage public et les charges temporaires telles que celles occasionnées par les travaux publics sont également classés dans la catégorie des clients spéciaux. Les consommations par zones sont présentées dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9 : Répartition et consommation des abonnés en 2006

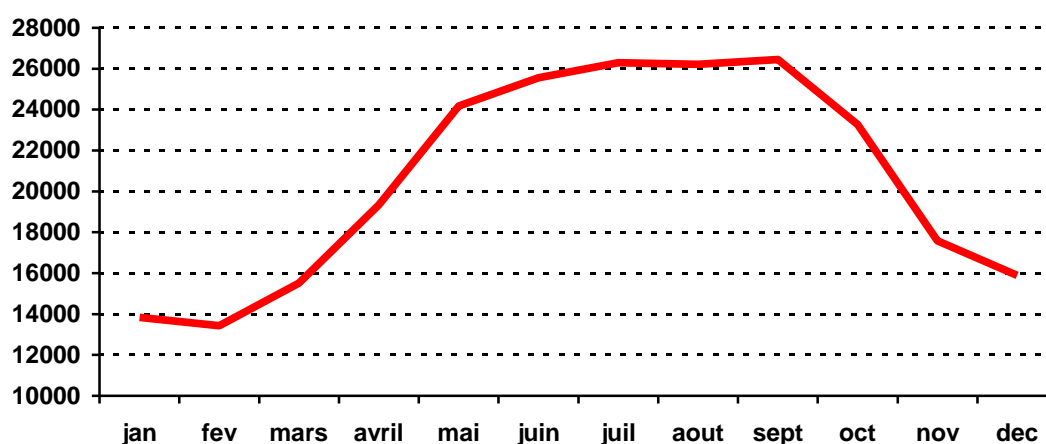
Zones	Clientèles		Consommations	
	nombre	Part (%)	(GWh)	Part (%)
Djibouti-Arta	32 676	90,6	181,5	96,9
Ali-sabieh	1 358	3,8	2,1	1,1
Dikhil	861	2,4	1,9	1,0
Tadjourah	737	2,0	0,7	0,4
Obock	448	1,2	1,3	0,6
Total	36 080	100	187,5	100

Source : EDD, 2000 complété

➤ Profil de la demande

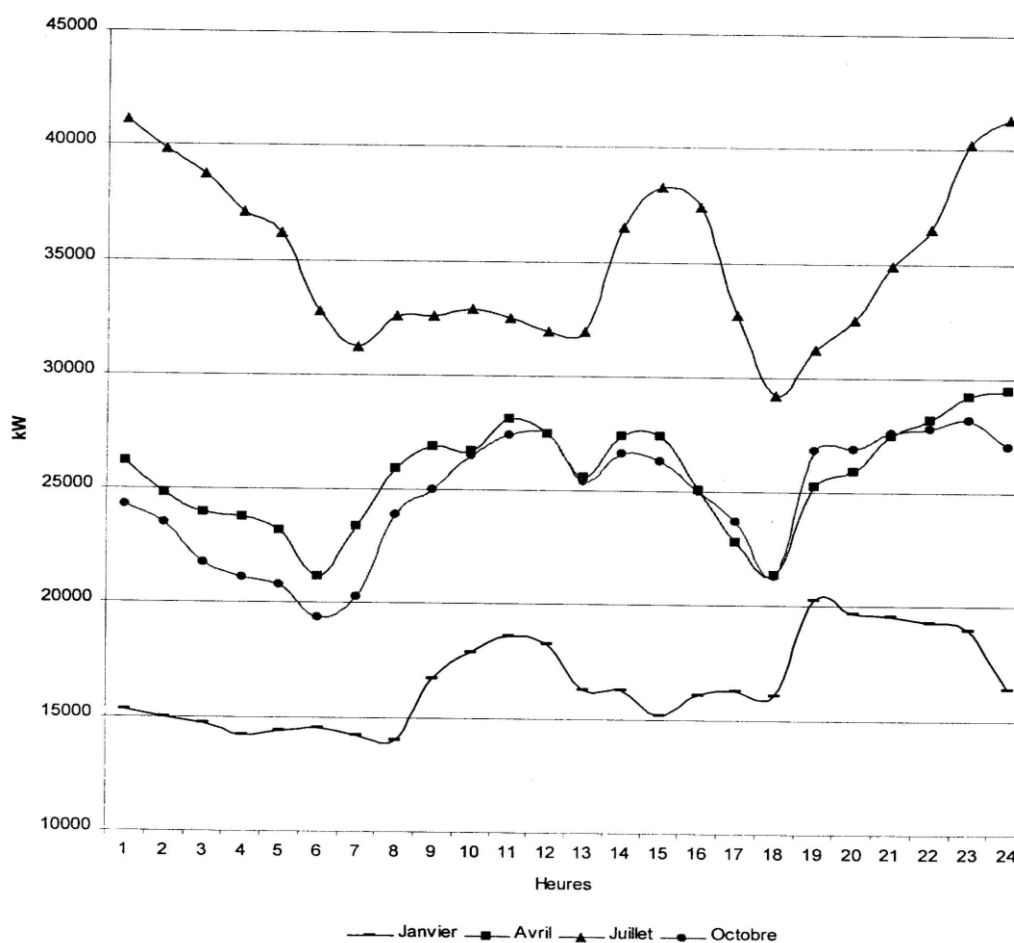
La République de Djibouti se trouve en zone de climat chaud, le profil de consommation est caractérisé par une pointe pendant la période chaude d'avril à septembre. Pour illustrer cette particularité, nous avons pris les chiffres de la consommation électrique mensuelle de l'année 2002 (graphique 1.4).

Graphique 1.4: Demande d'électricité mensuelle pour l'année 2002 (en MWh).



Le profil horaire de la demande représenté dans le graphique 1.5 montre que la pointe se situe en général le soir pendant la période allant de juin à juillet, lorsque les besoins de refroidissement atteignent leur maximum, alors que la demande la plus basse se situe le matin dans la période allant de fin janvier à début février, qui est la période la plus fraîche de l'année. On note également l'existence d'un deuxième pic journalier moins important que celui du soir et se situant en début d'après-midi toujours pendant cette période chaude. Pour les périodes de transitions climatiques (mois d'avril et d'octobre) le profil est sensiblement identique et la consommation converge vers la moyenne des deux saisons extrêmes. Ce profil horaire est pratiquement le même pour chaque année. Enfin, une différence de puissance qui oscille entre 20 et 25 MW sépare les courbes de charge des deux saisons.

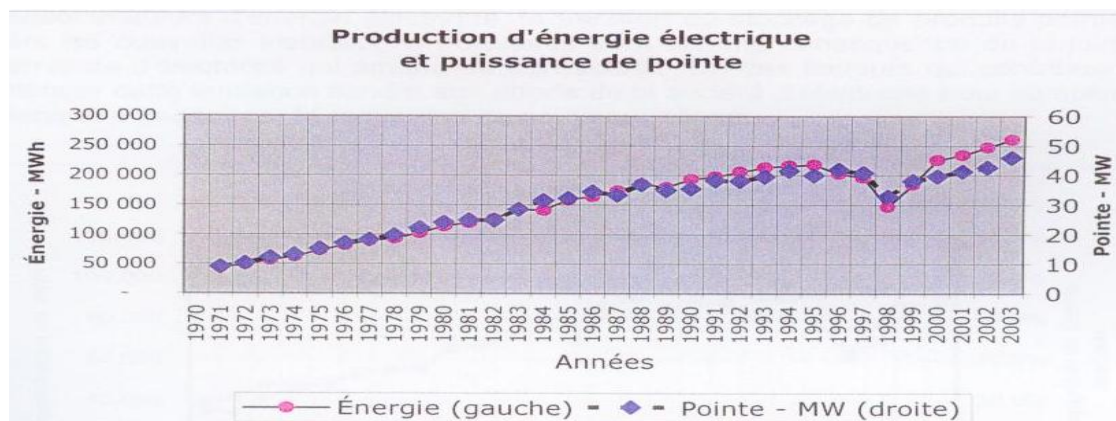
Graphique 1.5: Demande horaire pour l'année 1994.



Source : EDD, programme 2001-2010

En 2002, la demande de pointe atteignait 42,7MW alors que la demande minimum pendant la période creuse s'élevait à moins de 12 MW. Pour l'année 2008, en hiver la consommation de base se situait aux alentours de 25 MW tandis que la pointe maximale enregistrée en été était légèrement supérieure à 60 MW. Le graphique 1.6 retrace l'évolution de la pointe pour la période 1971-2003.

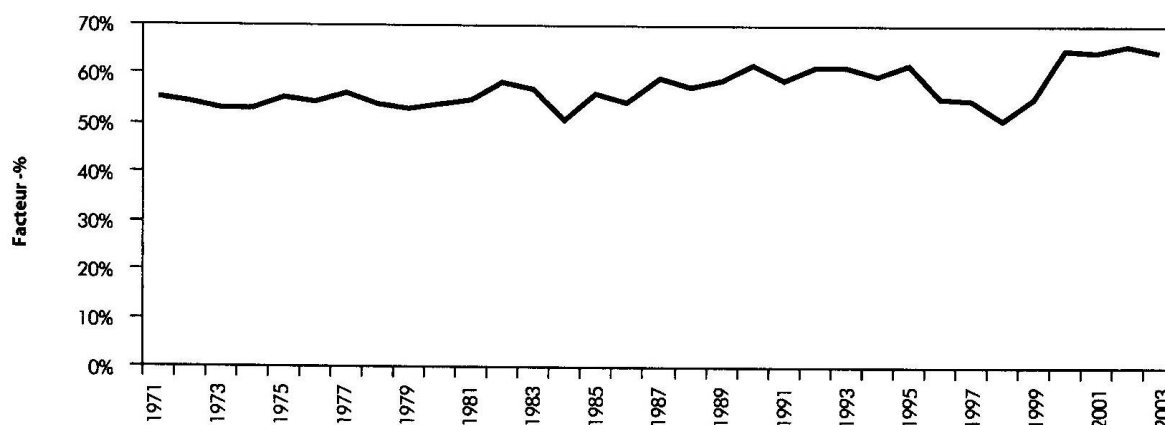
Graphique 1.6: Evolution de demande de pointe et de la production entre 1971 et 2003



Source : Esmap 110/07FR, 2007

➤ Le facteur de charge

Graphique 1.7: Evolution du facteur de charge.



Source : Esmap 110/07FR, 2007

Le facteur de charge d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produit si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période. Il ressort de l'analyse de ce graphique que l'évolution du facteur de charge du réseau d'électricité entre 1971 et 2003 a connu quatre phases distinctes:

- ⇒ 1^{ère} phase : de 1971 à 1984, avec de légères variations autour du même niveau (environ 55 %),
- ⇒ 2^{ème} phase : de 1984 à 1995, avec un accroissement substantiel en passant d'une valeur initiale de près de 50 % pour l'année 1984 à plus de 60 % pour l'année 1995,
- ⇒ 3^{ème} phase : de 1995 à 1998, avec un déclin jusqu'au niveau de 50 %, cette période correspond aux délestages observés à la centrale de Boulaos,
- ⇒ 4^{ème} phase : depuis 1999, avec une hausse importante pour atteindre 65,2 %.

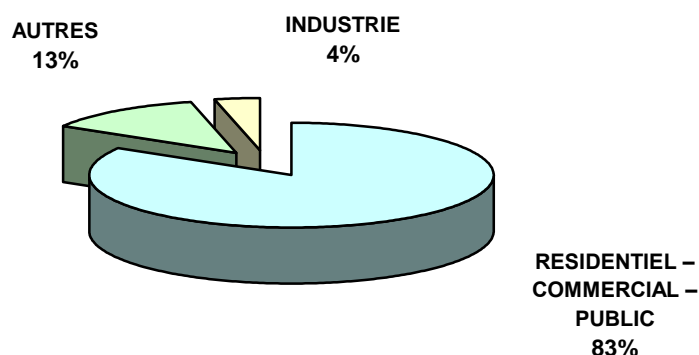
➤ La répartition de la consommation

La répartition de la consommation de l'énergie électrique par secteur d'activités à Djibouti (Tableau 1.10 et graphique 1.8) montre nettement que le secteur tertiaire, moteur de l'économie nationale, est le plus gros consommateur avec plus de 83,7 %. L'armée française vient en seconde position avec 10,8 % alors que l'industrie ne représente que 3,5 % de la consommation nationale.

Tableau 1.10 : Répartition de la consommation

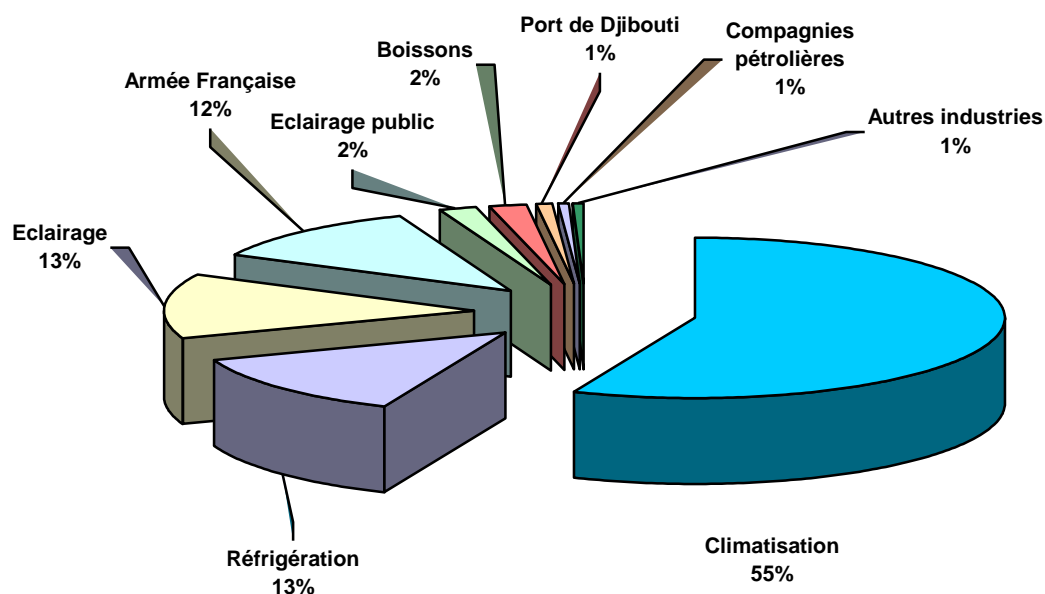
SECTEURS ET TYPES DE CONSOMMATION	CONSOMMATION D' ELECTRICITE (EN %)
<i>RESIDENTIEL – COMMERCIAL – PUBLIC</i>	<i>83,7</i>
Climatisation	52,3
Réfrigération	12,1
Eclairage	12,1
Autres usages	7,2
<i>INDUSTRIE</i>	<i>3,5</i>
Boissons	1,7
Port de Djibouti	0,7
Compagnies pétrolières	0,6
Autres industries	0,5
<i>AUTRES</i>	<i>12,8</i>
Armée Française	10,8
Eclairage public	2

Graphique 1.8 : Répartition de la consommation par secteur (en %)



La répartition de la consommation par type de consommation (graphique 1.9) montre que les besoins en froid (la climatisation avec 52,3 % et la réfrigération avec 12,1 %) viennent largement en tête avec 64,4 % de la consommation nationale. Le taux de croissance moyen de la consommation est aujourd'hui estimé à 3,3 % par an. Les estimations tablent sur un chiffre de 4,5 % pour les cinq prochaines années.

Graphique 1.9 : Répartition par types de consommation (en %)



La réfrigération qui couvre 13 % de la consommation d'électricité est essentiellement domestique. Le secteur industriel étant très peu développé, les besoins en froid se limitent à la fabrication des glaces industrielles et à la conservation des denrées périssables. Le secteur du froid industriel est dominé par une seule entreprise qui s'occupe à la fois de la fabrication de glaces, de boissons gazeuses, d'eaux minéralisées et de la conservation (entrepôts frigorifiques). Elle est présente tout au long de la chaîne du froid avec ses supermarchés.

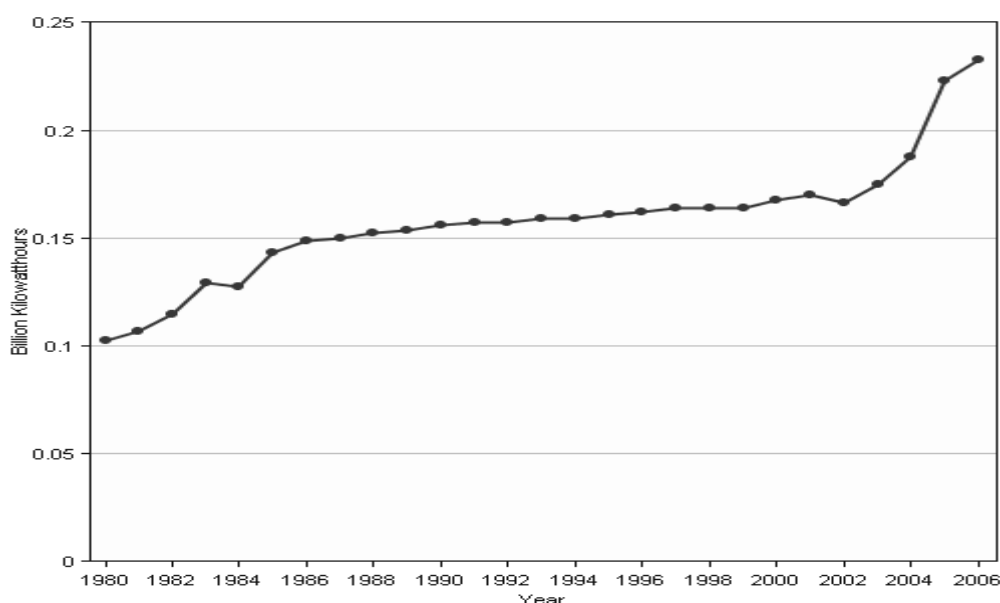
La structure de la consommation électrique au niveau des ménages (l'enquête EDAM-Energie de 2004) montre que les besoins en froid (climatisation et réfrigération) sont les plus gros postes de consommations.

* Climatisation :	37,3%	} Rafrachissement : 62,3 %
* Ventilation :	25,1%	
* Réfrigération :	16,3%	
* Equipements :	11,4%	
* Eclairage :	09,9%	

➤ Evolution de la consommation électrique

Le graphique 1.10 retrace l'évolution de la consommation électrique de Djibouti depuis 1980. On remarque que depuis 2002, le rythme de consommation s'est brusquement accéléré, le taux d'accroissement est passé de 1,5% par an à 3,3% par an. En 2006, 226 887 MWh d'énergie électrique ont été consommée. On estime que ce rythme se maintiendra au moins pour les cinq prochaines années. Cette embellie est liée à la celle de la croissance économique (due principalement au regain des activités portuaires consécutif à la décision de l'Ethiopie d'utiliser exclusivement le port de Djibouti pour ses approvisionnements).

Graphique 1.10 : Evolution de la consommation électrique de 1980 à 2006



Source : Department Of Energy, USA

➤ Evaluation de quelques grandeurs énergétiques

Pour l'année 2006, nous avons les données suivantes :

- * Nombre de branchement : 36080 ménages
- * Taille des ménages : 6,9 personnes
- * Population totale (est. 2003) : 734000 habitants
- * Taux de croissance : 2,8%

Nous avons ensuite généré les données suivantes pour l'année 2006:

- * Population totale : 802000
- * Population desservie : $36080 \times 6,9 = 248952$

⇒ **Taux de couverture global : 31%**

- * Population urbaine : 85% soit 681700 hab.
- * **Taux de desserte urbaine :** **34,5%**
- * Electricité consommée : 238 GWh

⇒ **Electricité conso./habitant/an : 297 kWh/hab/an**

Malgré le fort taux d'urbanisation de la population, le taux d'électrification (c'est-à-dire le taux de couverture) est relativement bas avec une consommation électrique par habitant qui ne reflète pas la forte propension du pays vers l'économie de services même si elle se situe dans la moyenne haute en Afrique.

1.2.2.5 Le tarif de vente de l'électricité

Le système tarifaire actuel, directement indexé sur le coût des combustibles utilisés, offre plusieurs types de tarifs selon les catégories de consommateurs. Aujourd'hui, le tarif domestique qui est composé de deux tranches liées à la puissance souscrite, s'apparente grosso modo à un tarif unique de 50 FDJ le kWh (soit 0,28 \$US). Ce coût élevé de l'électricité est dû entre autres au coût élevé du combustible utilisé, aux pertes considérables sur les réseaux de transport et de distribution et à la détérioration des équipements de production.

Le tableau 1.11 retrace les tarifs successifs et évalue la hauteur des augmentations subies. Ces tarifs actuellement en vigueur ont subi une augmentation de près de 53% depuis 1983 en raison du renchérissement des prix du pétrole, ce n'est que depuis avril 2009 qu'une baisse de 9% a été consentie en raison de l'énorme charge que constitue la facture électrique pour les usagers.

Ils sont régulièrement réévalués selon la relation 4 suivante :

$$t \% = 0,924 (F-F_0) + 0,126 (G-G_0) \quad (1.4)$$

Où F est le prix du fuel rendu à la Centrale de Boulaos en FDJ par kg
G est le prix du gasoil rendu à la Centrale de Boulaos en FDJ par litre

➤ Evolution des tarifs à Djibouti

Tableau 1.11 : Evolution des tarifs depuis 1983

Années	1983	2001	2005	2007	2009
Prix de vente moyen (DJF/kWh)	37	40	47	55	50
Prix de vente moyen (USD/kWh)	0,21	0,23	0,27	0,31	0,28
Taux d'augmentation (%)		+10,5	+17,5	+17	- 9

Une comparaison du tarif actuel avec les tarifs en vigueur dans certains pays d'Afrique montre que ceux pratiqués à Djibouti se situent dans une fourchette haute (tableau 1.12). Djibouti est actuellement le deuxième pays après Madagascar à avoir le tarif le plus haut du continent (à noter que ce tarif était le plus élevé depuis 2007 avec 0,31 \$US/kWh).

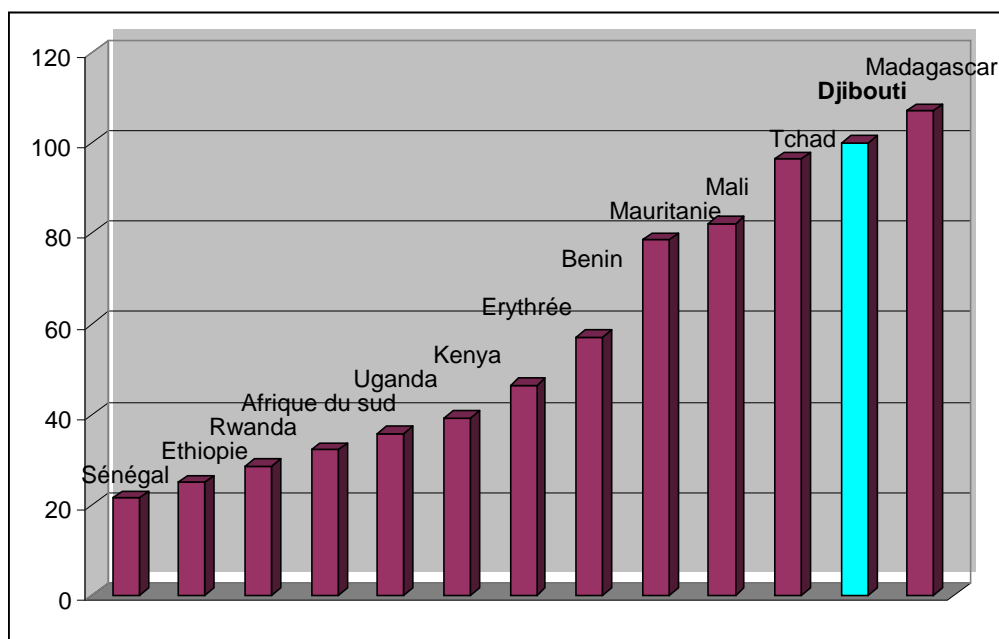
Le graphique 1.11 ci-dessous (avec comme référence base 100 pour Djibouti) illustre bien cet état. Ce tarif converti en euro (soit 0,19 €/kWh) prend toute sa signification comparé aux tarifs pratiqués en Europe. En effet, le coût de l'électricité le plus élevé en Europe est pratiqué au Danemark (0,17 €/kWh). Le coût du kWh électrique à Djibouti est donc le deuxième le plus élevé au monde toujours après Madagascar.

Tableau 1.12 : Tarifs de l'électricité comparés en Afrique

Pays	Prix du kWh en \$ US
Sénégal	0,06
Ethiopie	0,07
Rwanda	0,08
Afrique du sud	0,09
Uganda	0,10
Kenya	0,11
Erythrée	0,13
Benin	0,16
Mauritanie	0,22
Mali	0,23
Tchad	0,28
Djibouti	0,28
Madagascar	0,30

Source : ESPAM, World Bank

Graphique 1.11 : Diagramme comparatifs des prix de l'électricité avec Djibouti Base 100



Les tarifs actuels sont élevés et constituent un frein au développement humain durable du pays comme l'ont montré toutes les études socioéconomiques. Le gouvernement lui-même

en est conscient. Ces tarifs pourraient à la longue plomber la croissance économique actuellement observée. Nous estimons que trois facteurs principaux ont un impact sur ces tarifs :

- ⇒ La dépendance vis à vis des importations de mazout, dont le prix suit les fluctuations du marché mondial ;
- ⇒ Le coût élevé d'exploitation, en particulier les "charges sociales" ;
- ⇒ Un taux d'impayés très élevés surtout au niveau des administrations publiques.

1.2.3 Le sous-secteur des hydrocarbures

Le sous-secteur comprend trois des principales compagnies pétrolières mondiales : Shell, Total Fina Elf et Oilibya, qui importent toutes des produits finis depuis Dubaï (90%) et le reste depuis le Yemen (10%) étant donné que Djibouti est dépourvu de ressources fossiles et ne dispose pas non plus de raffinerie (plusieurs tentatives d'implantation de telles infrastructures ont été menées sans succès jusqu'à aujourd'hui). Le tableau 1.14 indique les volumes importés par type de produits et de marchés pour l'année 2002.

Ces trois compagnies collaborent au sein de la « coordination pétrolière » et assurent la liaison avec le Ministère des Finances pour l'établissement des prix qui sont révisés mensuellement. La Société Internationale des Hydrocarbures de Djibouti (SIDH) a pour rôle la régulation et le contrôle de ce secteur (notamment les normes des qualités) même si depuis sa restructuration en 2000, elle peut entreprendre des opérations dévolues aux entreprises pétrolières telles que l'importation, le stockage, le raffinage, la distribution, ...etc.

Le secteur des hydrocarbures de Djibouti est dominé par le marché de transit éthiopien qui concentre les exploitations et les investissements effectués par les compagnies pétrolières. Comme le montre le tableau 1.14, 80% du total des importations est destiné à l'Ethiopie. On estime aussi que les 95% des besoins pétroliers de l'Ethiopie sont actuellement gérés à partir de Djibouti.

L'essentiel du pétrole est convoyé par voie routière, dans des camions citernes qui appartiennent et sont gérés par des particuliers (le réseau ferroviaire est également utilisé quelques fois pour le transport vers l'Ethiopie, mais il est sujet à la fois à des perturbations dus à sa vétusté et à des actes de sabotages occasionnels du côté éthiopien).

Les hydrocarbures sont surtaxés à Djibouti (33%). En juillet 2009, les prix à la pompe s'élevaient à 1,63 \$ pour l'essence sans plomb, 0,63 \$ pour le kérosène et 0,97 \$ pour le diesel. Par ailleurs, Djibouti s'est conformée à la réglementation internationale depuis 2005 en passant à l'utilisation exclusive de l'essence sans plomb.

➤ Consommation des produits pétroliers

Il existe également un marché naissant mais très limité du gaz de pétrole liquéfié (GPL), qui est importé du Yémen en quantités réduites et sous forme de bouteilles par des marchands indépendants. L'estimation des ménages utilisant ce combustible est de 5% [enquête EDAM-Energie, 2004]. De plus, le gaz naturel n'est pas utilisé à Djibouti ni pour les besoins domestiques, ni pour la production d'électricité.

Tableau 1.14 : Types de produits pétroliers et leurs parts de marchés respectives en 2002

Marché	Quantités (tonnes)	Pourcentages (%)
Consommation Domestique		
Essence	4 423	0,3
Kérosène	13 203	1,0
Diesel	36 113	2,7
Mazout (180 cSt)	51 909	3,9
Autres (y compris lubrifiants)	1 351	0,1
Aéronautique		
Jet A1	55 039	4,1
Avgas	19	0,0
Dégazage		
Diesel	87 630	6,5
Mazout	7 744	0,6
Exportations (vers la Somalie)		
Essence	1 226	0,1
Kérosène		0,0
Diesel	14	0,0
Jet A1 et autres produits	1 452 ¹	1,1
Transit (vers l'Ethiopie)		
Essence	4 230	0,3
Kérosène	206 947	15,4
Diesel	645 745	48,2
Mazout (180 cSt)	130 053	9,7
Jet A1	79 445	5,9

¹ mètres cubes

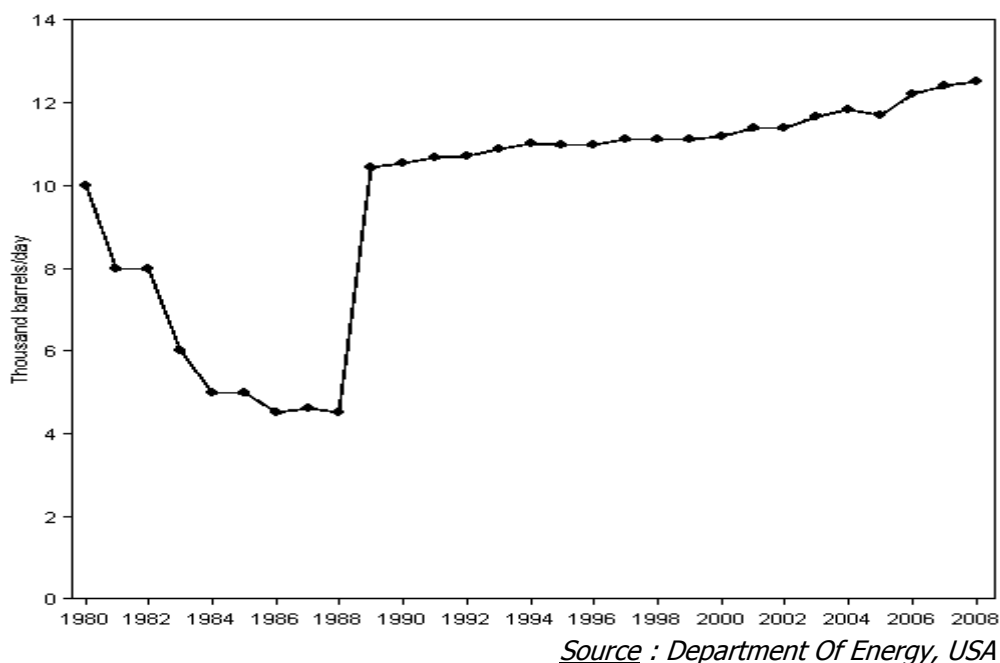
Source: Coordination Pétrolière

➤ Evolution de la consommation

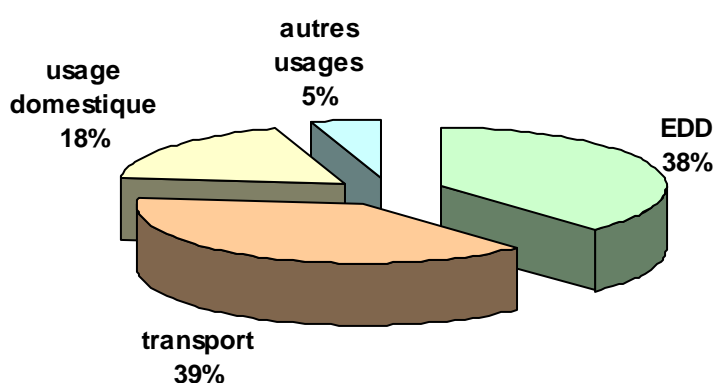
Les graphiques 1.12 et 1.13 illustrent l'évolution de la consommation des produits pétroliers à l'intérieur du pays (hors transit) depuis 1980. Cette consommation est exprimée ici en millier de Barils de Pétrole par jour. Le marché intérieur des hydrocarbures en République de Djibouti absorbe annuellement près de 150 millions de litres de produits pétroliers (chiffres de 2002). Le secteur des transports et les usages domestiques représentent respectivement 39 % et 18 % de la consommation globale.

La croissance moyenne annuelle de la consommation des produits pétroliers est aujourd'hui évaluée à 6 %.

Graphique 1.12 : Consommation des hydrocarbures



Graphique 1.13 : Répartition de la consommation des produits pétroliers par types d'usages (estimations 2002)



L'économie Djiboutienne étant essentiellement une économie de service, ceci explique la part importante du secteur des transports dans la consommation nationale des hydrocarbures qui représente plus du tiers. Le Gouvernement lui-même s'approvisionne en quantités importantes de diesel et d'essence pour le secteur des transports. Le secteur de la production électrique représente également à lui seul plus de 38 % de la consommation totale. Le chiffre de 18% pour la consommation domestique des hydrocarbures est dû à une

particularité des ménages Djiboutiens qui utilisent à plus de 93% [enquête EDAM-Energie, 2004] le kérosène comme combustible domestique pour la cuisine.

1.2.4 Le bilan énergétique

Nous prendrons l'année 2005 comme année de référence pour établir le bilan énergétique national. Dans le tableau récapitulatif ci-dessous (tableau 1.16), nous avons dû procéder à l'extrapolation des estimations tirées de l'enquête EDAM-Energie de 2004 pour pallier au manque de données sur certains segments.

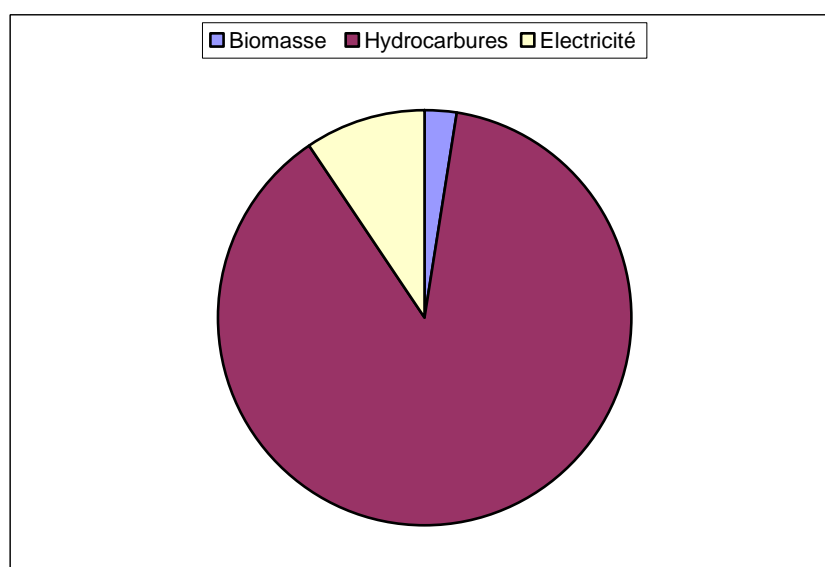
Tableau 1.16 : Bilan énergétique pour l'année 2005 (en tep)

Source	Consommation réelle	%
Biomasse	5414 ¹	2,6
hydrocarbures	182984	88,0
GPL	260 ²	0,1
Essence	3745	1,8
Fuel	58400	28,1
Jet Fuel	59771	28,7
Kérosène	12562	6,0
Gazole	48247	23,2
Electricité	19 512	9,4
Total	207911	100

1 : extrapolation des estimations de 2004 (5334 tep) fournies d'après l'enquête EDAM-Energie

2 : report du chiffre de 2004

Graphique 1.14 : représentation graphique du bilan énergétique de 2005



A Djibouti, le secteur de l'énergie se caractérise par une prédominance de la consommation des hydrocarbures. En effet, les combustibles fossiles pèsent près de 90% dans le bilan énergétique national. Si l'on y ajoute la génération électrique elle-même faite à partir des hydrocarbures, on se retrouve avec une dépendance vis-à-vis des produits pétroliers de plus de 97%. On constate donc la fragilité du secteur de l'énergie.

Dans le tableau 1.17, nous allons comparer le bilan énergétique de l'année 2005 à celui de l'année 2000.

Tableau 1.17 : Consommations énergétiques en tep pour les années 2000 et 2005

Source	Conso. 2000	%	Conso. 2005	%
Biomasse	* 14418	9,0	5414	2,6
hydrocarbures	125862	78,8	182984	88,0
GPL	260	0,2	260	0,1
Essence	5244	3,3	3745	1,8
Fuel	36409	22,8	58400	28,1
Jet Fuel	21699	13,6	59771	28,7
Kérosène	14709	9,2	12562	6,0
Gazole	47541	29,7	48247	23,2
Electricité	19 398	12,1	19 512	9,4
Total	159 678	100	207 911	100

Source : données récentes collectées auprès de la SIHD

* estimations de 1999 (Emerton)

En comparant les données réelles collectées pour ces deux années, on remarque que la consommation de la biomasse est très faible et a fortement reculé en raison de la raréfaction des ressources ligneuses. Face à cette situation, les populations rurales se sont mis à utiliser le kérosène pour éviter la lourde corvée de collecte de bois de feu qu'il faut aller chercher de plus en plus loin (parfois plus de 15 km). Il faut cependant noter qu'on observe actuellement chez les populations semi-urbaines une utilisation de plus en plus accrue du charbon de bois en raison de l'augmentation du prix du pétrole lampant.

En ce qui concerne les autres combustibles, les mêmes causes produisant les mêmes effets, la population préfère les voitures roulant au Diesel à celles roulant à l'essence Super (le prix du Super Sans Plomb à la pompe étant à peu près le double de celui du Diesel). La consommation du GPL a également subi une baisse conséquente pour les mêmes raisons.

Nous allons maintenant procéder à la comparaison du bilan de l'année 2000 par rapport aux projections du Plan Energétique National (datant de 1987 et unique plan du pays) selon son scénario de référence. Les projections du Plan Energétique National (PEN) tablaient sur une consommation globale de l'ordre de 116335 tep alors que les chiffres réels pour la même année montrent que cette consommation est de 159678 tep, soit 37% de plus que prévu.

On constate donc un écart de projection très significatif, cet écart de projection nous montre particulièrement la nécessité d'élaborer très rapidement un nouveau PEN pour une meilleure lisibilité et une prise en compte efficiente de l'état actuel et de l'évolution à court termes de la société Djiboutienne.

➤ Consommation d'énergie par secteur d'activité

Compte tenu de l'inexistence des données sectorielles pour l'année 2000 et de l'énorme écart de projection déjà constaté précédemment, nous ne pouvons nous permettre de faire des projections fiables sur le bilan énergétique par secteur d'activités. Tout au plus, on constate actuellement à Djibouti, une forte demande du secteur industriel (y compris construction) ainsi qu'une croissance exponentielle de la demande dans le secteur résidentiel (essentiellement due à la décohabitation des ménages) et celui des services.

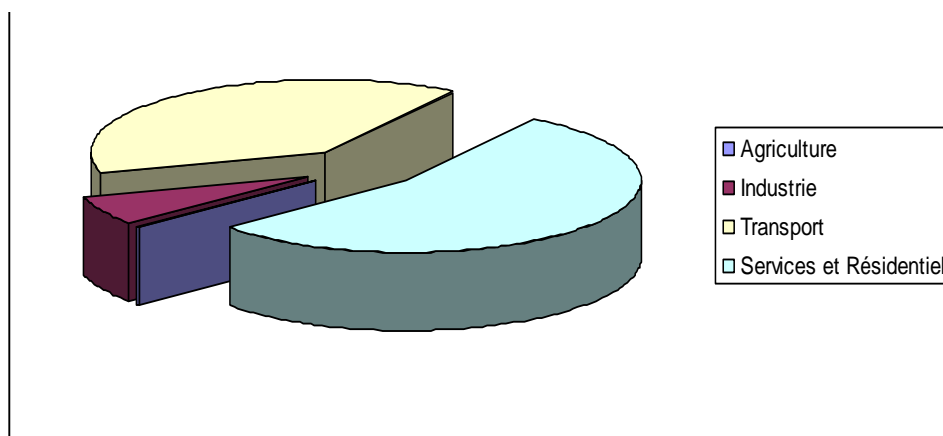
A titre purement indicatif, nous reproduisons dans le tableau 1.18 et le graphique 1.15 les projections du PEN pour l'année 2000.

Tableau 1.18 : Consommation d'énergie en tep pour l'année 2000 par secteur d'activité

Activité	Consommation (tep)	Part (%)
Agriculture	327	0,28
Industrie	7913	6,80
Transport	44888	38,59
Services et Résidentiel	63207	54,33
Total	116335	100

Source : Scénario de référence Plan Energétique National, 1987

Graphique 1.15 : Répartition de la consommation d'énergie par secteur d'activité



➤ Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du secteur

Pour les estimations des GES, La méthode utilisée est celle préconisée dans les lignes directrices du GIEC pour les inventaires de gaz à effet de serre. L'utilisation du logiciel du GIEC (disponible sur le site internet de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques : CCNUCC) nous donne les résultats suivants (tableau 1.19), elles sont exprimées en Gigagramme de CO₂ :

Tableau 1.19 : Emissions de CO₂ par type de combustible en 2005 (Gg CO₂)

Produits	Essence	Jet Fuel	Kérosène	Gasoil	Fuel	GPL	Total
Emissions (en Gg CO₂)	10,78	184,97	88,85	120,45	126,17	0,35	531,57

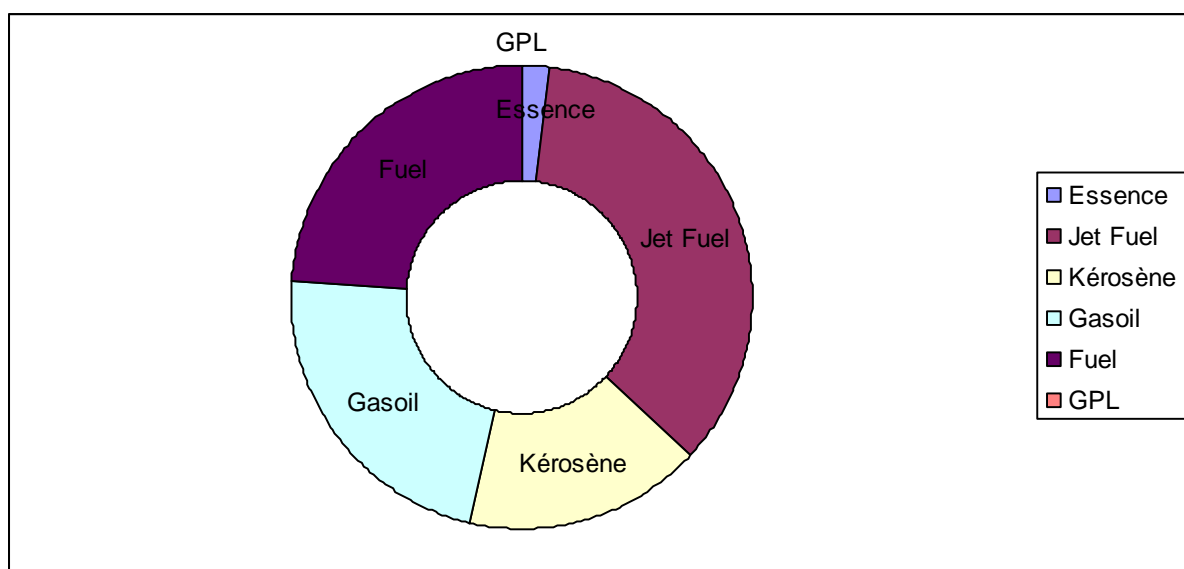
Source : d'après feuilles de calcul du GIEC, version révisée 1996

Les émissions de CO₂ en 2005 dans le pays sont estimées à **532 Gg CO₂**.

Représentés sous forme de digramme (graphique 1.16), on voit que les émissions de GES sont essentiellement dominées par les émissions dues au secteur du transport aérien, cela montre que le trafic aérien à Djibouti est très développé. Elles sont suivies par la génération électrique et l'utilisation des véhicules à motorisation Diesel.

Les émissions actuelles ont pratiquement doublées comparativement à celles de 1994 qui se chiffraient à 274 Gg CO₂, cependant ce niveau classe la République de Djibouti dans le cadre des pays qui sont des « puits de CO₂ » et éligibles au Mécanisme de Développement Propre (MDP).

Graphique 1.16 : Répartition des émissions par origine



1.2 Les perspectives du secteur de l'énergie

Grâce à l'interconnexion électrique avec l'Éthiopie, le secteur de l'énergie va connaître certainement un grand bouleversement dans un futur proche. En témoigne, l'engouement des investisseurs privés pour la production électrique, par exemple :

- * Par la signature d'un contrat en avril 2009 avec la société Mapple Indian Ocean Ressources, pour la construction dans la zone du Ghoubbet, d'une centrale électrique éolienne et solaire d'une capacité de 40 MW. Cette centrale servira également au dessalement de l'eau de mer.
- * Par la signature de deux protocoles d'accords en juillet 2009 avec une firme chinoise CGCG, de nouveaux projets énergétiques sont en cours d'études à Djibouti. Les projets portent sur la recherche de ressources géothermiques sur 10 sites, la construction d'un terminal gazier et d'une centrale électrique de 150 Mégawatt qui fonctionnera au gaz.

Par ailleurs, le gouvernement Djiboutien a l'intention d'effectuer le maillage du réseau national pour profiter des apports électrique de l'Éthiopie et du projet de construction de la centrale géothermique d'Assal mené par les Islandais. Il est prévu :

- * La construction de 45 km de lignes aériennes de 63 kV entre Assal et PK 51 où un poste de transformation de la ligne d'interconnexion avec l'Éthiopie est entrain d'être bâti.
- * Une autre ligne de 63 kV de 75 km de long est également prévue entre Assal et Tadjourah. Celle-ci permettra non seulement de désenclaver les régions du Nord actuellement isolées mais aussi de renforcer le réseau électrique du pays en permettant l'intégration des productions des centrales d'énergies renouvelables installées dans cette zone.

La compagnie nationale électrique est actuellement en train de renforcer ses moyens de production et de procéder à la réhabilitation du réseau électrique avec le soutien de la Banque Islamique de Développement et de l'OPEP.

CHAPITRE 2

L'ENERGIE SOLAIRE A DJIBOUTI



Source : société ENERDJI, 2008

Centre de transit des réfugiés somaliens à Loyada

“I’d put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don’t have to wait ‘til oil and coal run out before we tackle that.”

Thomas Edison

2.1 Le gisement solaire en République de Djibouti

2.1.1 Les caractéristiques climatologiques du pays

Comme nous l'avons déjà vu, le climat du pays (chapitre 1^{er}) laisse présager des conditions très favorables pour trouver un potentiel solaire élevé. Nous avons essayé de chercher les données disponibles sur le rayonnement solaire à Djibouti et à notre grande surprise, aucun centre que ce soit à caractère scientifique ou technique n'avait en sa possession ces mesures du rayonnement solaire.

Même le service de la météorologie nationale n'avait non seulement pas ces données mais n'avait pas les instruments nécessaires pour sa mesure (pyranomètre). Ce dernier ne collecte que les données de températures (extrema), l'humidité relative, la durée d'insolation et la direction du vent. Nous reproduisons dans le tableau 2.1 ces chiffres pour les années 1992 à 1996.

Tableau 2.1 : Moyennes mensuelles des données météorologiques de bases collectées à Djibouti (de 1992 à 1996).

		janv	fevr	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	sept	oct	nov	dec
1992	humidité (%)	72,9	73,3	74,4	75,6	74	63,1	52,4	43,8	67,2	69,1	69,4	75,3
	insolation (h)	259	206	251	281	324	284	242	283	307	294	297	249
	T min (°C)	23	24,7	25,2	26,5	28,1	29,8	31,4	30,2	29,3	27	25	24,7
	T max (°C)	28,3	29,2	29,8	30,6	33,9	37,6	40,6	40,1	36	32,7	30,6	29,5
1993	humidité (%)	75,2	77,1	75,8	76,6	76,8	64,2	53,3	61,2	67,1	70,7	69,8	70,9
	insolation (h)	203	194	281	241	301	304	286	262	288	300	312	310
	T min (°C)	23,8	23,3	24,6	25,7	27,8	30,2	30,9	30,4	29,7	27,7	24,9	23,3
	T max (°C)	28,2	28,2	29,8	31,3	34	37,3	40,8	38,5	37,8	33,2	30,8	29,2
1994	humidité (%)	70,6	72,6	75,8	77	75,3	56,2	48,9	56,6	57	70,2	74,2	72
	insolation (h)	314	271	267	305	326	249	234	255	292	322	272	299
	T min (°C)	22,2	23	25,4	26,8	28,7	31	31,1	30	28,3	26,2	24,8	23,4
	T max (°C)	28,3	28,4	29,8	31,4	34	39,6	40,8	39,6	35,8	31,5	30	29,3
1995	humidité (%)	73,3	74,3	75,4	76,5	73,7	58,1	49	56,3	60,5	68,1	70,6	71
	insolation (h)	284	271	274	302	316	247	246	265	293	308	276	292
	T min (°C)	22,5	24,2	25,9	27,4	33,8	29,6	31,2	30,7	29,6	27	24,5	24,1
	T max (°C)	28,3	28,9	30,1	31,4	29,5	36	41	41	36,7	32,9	30,1	28,4
1996	humidité (%)	76	76	75	76	72	60	49	56	64	66	67	70
	insolation (h)	254	270	280	298	306	245	259	275	294	293	280	285
	T min (°C)	23,3	23,3	26,3	27,3	34,8	31,1	31	31	30,1	27,6	24,8	23,2
	T max (°C)	28,3	28,5	30,4	31,9	27,6	38,4	40,5	39,9	36,8	33,1	30,2	28,6

Source : Service de la Météorologie Nationale

Certes, une série d'essais de mesure du potentiel solaire a été faite de façon ponctuelle par le CERD en même temps que la première campagne de mesure du potentiel éolien en 1983 mais ses résultats sont sans grand intérêt scientifique. De plus, ces essais ne sont pas disponibles en format électronique.

A l'heure actuelle, ces données ne sont donc pas disponibles dans le pays.

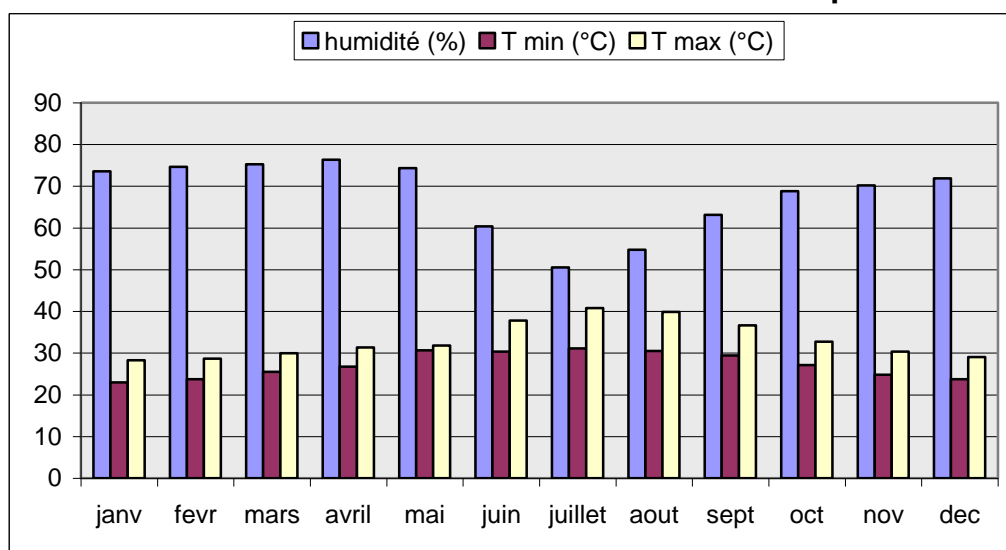
Pour pouvoir interpréter les données climatiques, nous les avons exprimées en moyenne absolue (tableau 2.2) puis représentées sous forme graphique (Graphique 2.1).

:

Tableau 2.2 : Moyennes mensuelles des principales données climatiques à Djibouti

	janv	fevr	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	sept	oct	nov	dec
humidité (%)	73,6	74,66	75,28	76,34	74,36	60,32	50,52	54,78	63,16	68,82	70,2	71,84
insolation (h)	262,8	242,4	270,6	285,3	314,6	265,8	253,3	268,2	294,5	303,3	287,4	287
T min (°C)	22,96	23,7	25,48	26,74	30,64	30,34	31,12	30,46	29,4	27,1	24,8	23,74
T max (°C)	28,28	28,64	29,98	31,32	31,8	37,78	40,74	39,82	36,62	32,68	30,34	29

Graphique 2.1 : Représentation graphique des moyennes mensuelles de l'humidité relative et des extrema de températures à Djibouti.

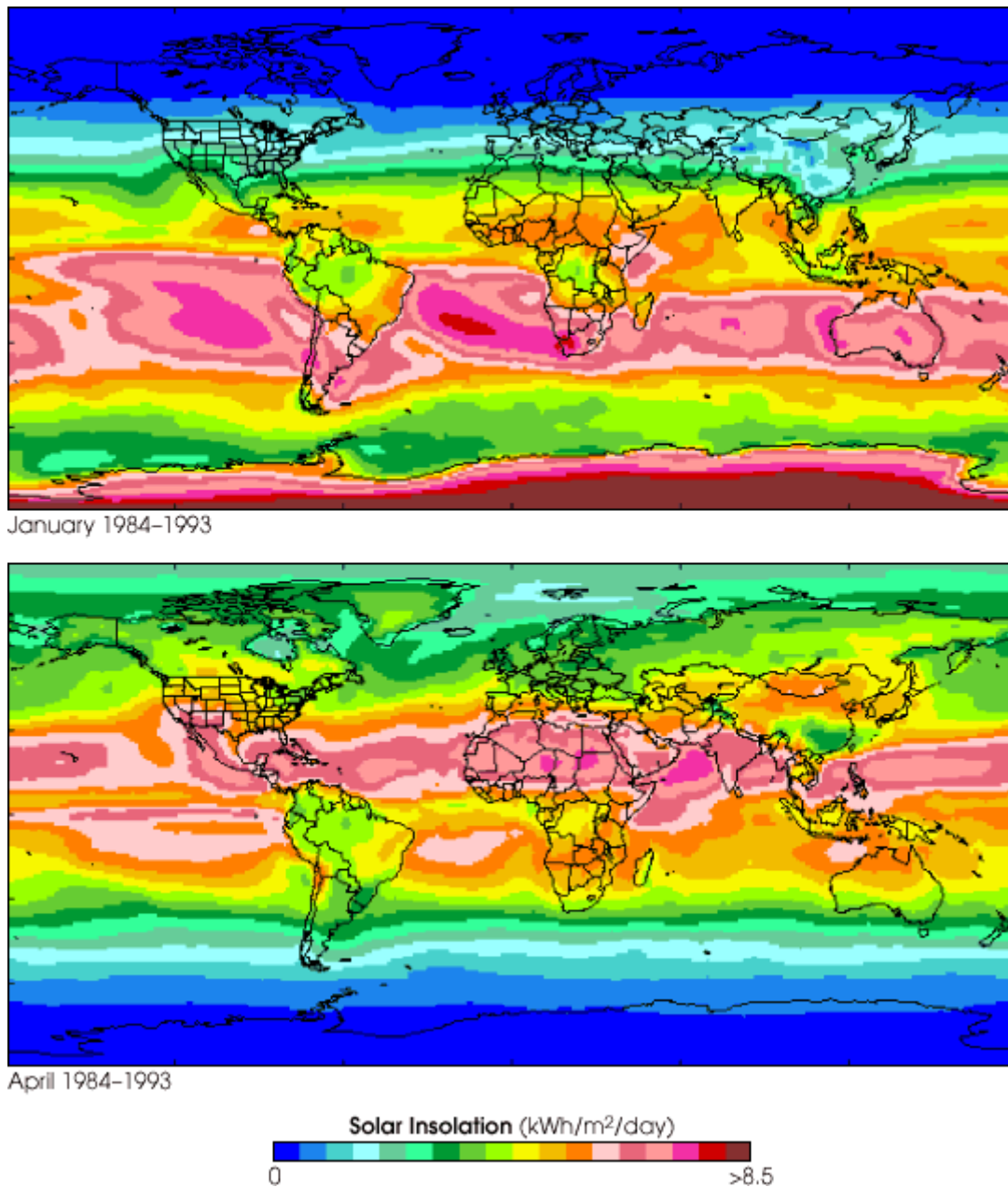


En ce qui concerne la température, il faut signaler que des pics pouvant aller jusqu'à 47°C sont observés en période estivale (avril à septembre). On remarque aussi **une durée d'insolation annuelle** très élevée, elle est **3335 heures**. A titre de comparaison en France, elle varie de 1750 à 2750 h selon les régions.

2.1.2 Estimation du potentiel solaire

D'un point de vue mondial, on estime qu'en une heure, l'énergie solaire captée par la terre pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux... pendant un an ! La cartographie solaire mondiale (figure 2.1) indique que la République de Djibouti se situe dans une zone favorable, les chiffres du rayonnement solaire global fournis par le site de la NASA sont compris entre 5,5 et 7,5 kWh/m²/jour.

Figure 2.1 : Cartographie solaire mondiale



Source : site web de la NASA

Cette cartographie mondiale nous montre qu'en hiver comme en été, les valeurs du rayonnement solaire constatées sont très élevées, c'est donc à priori une zone où le gisement solaire est abondant.

Les seules mesures de rayonnement solaire détaillées sur une longue période que nous avons pu trouver sur le pays sont ceux disponibles sur le site internet de World Radiation Data Centre (WRDC), un centre russe. Ces mesures ont probablement été faites par satellite. Nous les présentons dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Irradiation Globale Moyenne journalière (kWh/m²/jour).

mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
jours												
1	5,11	5,44	6,21	7,35	7	6,51	7,41	7,48	5,85	6,46	6,09	5,18
2	5,12	5,92	6,1	6,07	7,05	6,53	6,8	7,52	6,17	6,35	6,07	5,59
3	5,23	5,05	6,44	6,84	7,07	6,52	6,18	6,21	5,91	6,2	6,11	5,26
4	5,71	5,01	5,94	7,23	6,22	6,06	5,9	5,79	6,08	6,44	5,81	4,62
5	5,98	5,30	6,36	6,26	4,76	6,29	4,41	4,44	6,5	6,08	5,53	5,59
6	5,5	6,28	6,15	6,36	4,01	6,4	6,75	6,35	6,32	6,03	5,94	5,05
7	5,46	6,41	6,91	5,78	6,37	6,5	6,25	6,3	6,1	6,69	5,49	4,68
8	4,94	6,11	6,69	7,29	2,92	6,46	7,07	6,5	6,97	5,91	5,91	4,75
9	3,61	6,06	6,72	7,32	5,28	6,84	6,67	6,55	7,5	6,48	6,48	5,49
10	5,3	5,98	6,67	5,43	6,53	7,43	7,45	5,92	4,34	6,55	6,32	5,16
11	5,07	5,64	6,81	3,99	6,55	6,89	7,84	6	6,56	6,73	6,46	5,46
12	4,53	5,36	6,8	7,75	6,13	6,66	7,07	6,66	7,04	6,67	6,18	4,87
13	5,28	6,53	6,94	7,17	6,97	6,24	6,07	6,7	7,29	5,82	5,53	4,65
14	5,9	6,45	6,7	7,08	7,01	6,44	6,16	5,92	4,97	6,39	5,04	4,55
15	6,21	6,95	7,17	7,05	6,98	6,51	6,51	5,89	6,71	7,31	5,79	5,28
16	6,13	4,76	6,74	6,82	6,75	6,45	6,07	5,94	6,38	7,17	5,87	4,84
17	5,92	6,44	5,75	6,68	7,09	5,6	7,4	7,09	2,77	6,59	6,07	4,59
18	6,21	6,22	7,08	6,95	7,16	6,12	7,43	6,17	6,1	6,65	6,21	4,29
19	6,22	4,87	6,67	7,07	6,83	6,07	7,07	6,93	6,07	6,54	6,35	4,08
20	5,4	6,45	6,98	6,88	7,03	6,27	6,64	6,29	5,38	6,47	6,13	5,13
21	5,71	6,42	6,12	5,86	7	6,35	7,6	6,06	6,34	6,49	6,12	3,41
22	5,7	6,67	5,77	6,58	6,75	6,24	8,05	6,27	5,19	6,66	5,64	4,05
23	5,07	6,83	7,13	5,69	6,6	6,1	6,27	5,91	6,98	6,29	6,1	5,16
24	3,84	6,61	7,19	3,16	6,56	5,97	7,08	6,84	6,78	6,07	5,84	5,69
25	2,83	6,48	5,82	6,86	6,58	5,97	6,37	7,23	6,42	6,03	5,71	6,19
26	4,09	6,07	6,73	6,47	6,69	6,19	7,11	6,42	7,23	6,03	5,63	5,99
27	4,97	5,96	6,52	6,25	6,62	6,27	5,51	6,42	7,06	5,66	5,44	6,18
28	5,63	6,25	5,72	5,34	6,28	6,02	7,1	5,67	7,14	6,05	5,68	5,64
29	5,86		6,88	4,24	6,34	5,96	7,52	6,12	6,87	6,13	5,41	4,67
30	5,85		6,42	8,16	6,61	6,22	7,1	4,8	7,36	5,99	5,56	5,25
31	6,05		6,82		6,57		7,33	5,62		5,98		5,3
Irradaiton												
Moy. Journ.	5,30	6,02	6,55	6,40	6,40	6,34	6,78	6,26	6,28	6,35	5,88	5,05
(kWh/m²/jour)												

Source : Donnée du site Web de World Radiation Data Centre.

En moyenne annuelle, nous avons **6,14 kWh/m²/jour**.

Ce qui donne en moyenne un potentiel énergétique solaire de **2240 kWh/m²/an**.

Les données de rayonnement solaire retenues pour la suite de ce chapitre sont ceux fournies dans ce tableau 2.3.

A titre de précision, il est rappelé ici que pour vérifier le degré de fiabilité de ces données, nous les avons croisées avec ceux fournies sur le site de la NASA, consultables sur internet. Il ressort que ce sont sensiblement les mêmes valeurs. Enfin, ces données sont des moyennes sur une période décennale allant de 1984 à 1993.

Le pays reçoit chaque jour une énergie équivalente à 6,14 kWh par unité de surface. La superficie du pays étant de 23200 km², soit 2,32.10¹⁰ m², l'énergie reçue quotidiennement est alors :

$$E_1 = 2,32 \cdot 10^{10} \times 6,14 = 142\,448 \text{ GWh} \quad (2.1)$$

En tenant compte du niveau de la technologie actuelle qui ne permet de récupérer que 13% de cette énergie (cellules photovoltaïques monocristallines), le pays reçoit quotidiennement une énergie équivalente à :

$$E_2 = 142\,448 \times 0,13 = 18\,518 \text{ GWh} \quad (2.2)$$

Comparée à l'énergie électrique consommée annuellement aujourd'hui dans le pays (227 GWh en 2006), le potentiel solaire disponible équivaut à plus de 80 fois la consommation annuelle actuelle. **En d'autres termes, le soleil pourrait fournir quotidiennement plus de 80 fois les besoins annuels en énergie électrique de Djibouti.** Le pays dispose donc d'un potentiel énorme en énergie solaire !

- Le potentiel techniquement exploitable :

La surface du bâti dans le pays est estimée aujourd'hui à moins de 250 km², (chiffre que nous avons obtenue en faisons des estimations à partir des observations des images satellites disponibles sur le site de Google Earth) l'énergie récupérable techniquement est de **200 GWh/jour** presque l'équivalent de la consommation électrique annuelle du pays.

Encore faudrait-il connaître maintenant le potentiel économiquement exploitable. Aucune étude dans ce sens n'a encore été faite. Il faut juste signaler qu'un jeune doctorant français de l'Université de Corse (Benjamin Pillot) en a fait son sujet de thèse qu'il vient de commencer sous la direction conjointe de Marc Muselli et Philippe Poggi. L'objectif de cette thèse est d'évaluer plus précisément le potentiel solaire du pays.

2.1.3 Le diagramme solaire à Djibouti

La connaissance très précise de la course du soleil est un élément important dans toute évaluation du potentiel solaire. Cette course dépend des saisons, elle est représentée dans un diagramme et matérialisée par le lever, le coucher et la hauteur du soleil dans le ciel à tout instant de la journée. Deux angles caractérisent cette course du soleil : la hauteur (angle mesurée à partir du plan horizontal vers le centre du soleil) et l'azimut (angle entre la projection de l'axe vertical passant par le soleil sur le plan horizontal et le sud, la direction sud-ouest étant comptée positivement)

Pour un lieu donné quelconque à un jour quelconque, on peut décrire avec précision la course du soleil grâce aux relations trigonométriques liant le quantième de l'année (le n^{ième} jour après le 1^{er} janvier), la latitude et la longitude du lieu à la hauteur et l'azimut. Ces deux derniers sont obtenus à partir des relations suivantes (Brichambault et Lamboley, 1974) :

$$\sin h = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (2.3)$$

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (2.4)$$

Où φ , δ et ω étant respectivement la latitude, la déclinaison et l'angle horaire. Les relations 2.3 et 2.4 exprimant respectivement la hauteur et l'azimut.

* La déclinaison étant définie comme suit :

$$\sin \delta = 0,3979 \cdot \sin JD \quad (2.5)$$

$$\text{Avec } JD = (n - 81) \cdot \left(\frac{360}{365} \right) \text{ (exprimée en degrés)} \quad (2.6)$$

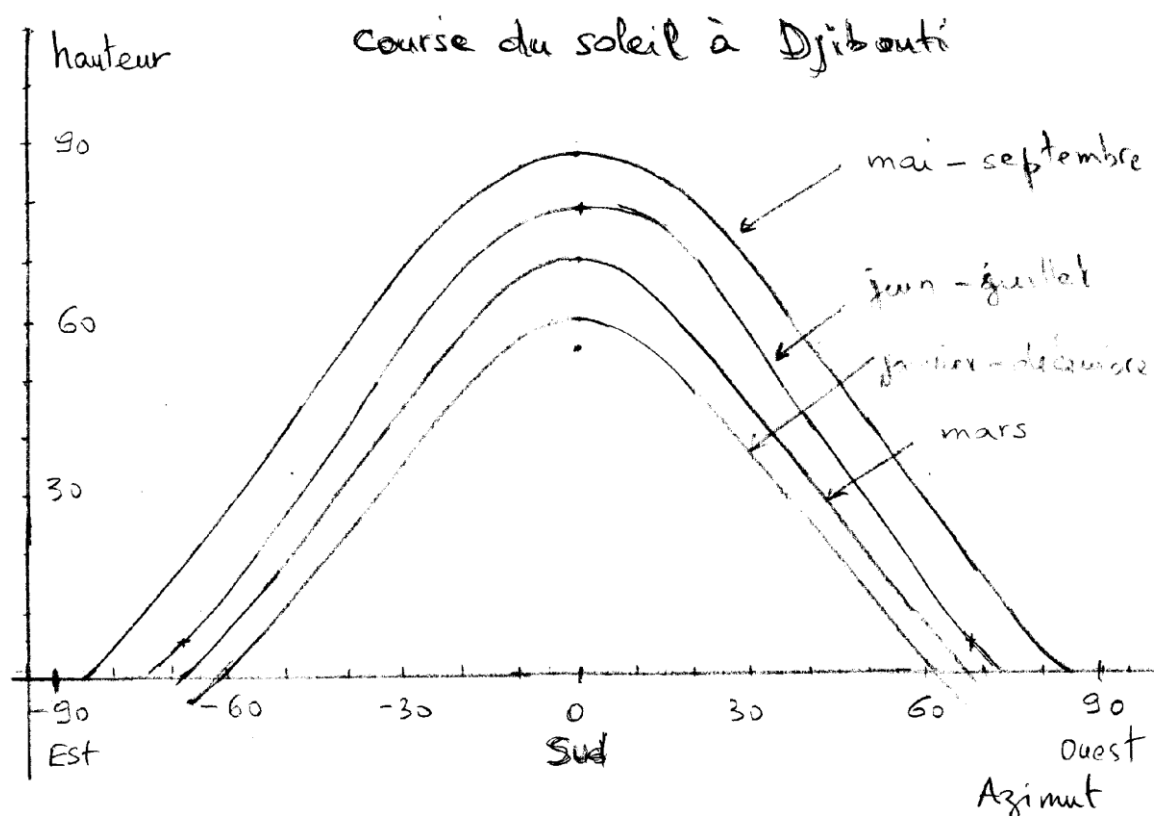
Pour tracer le diagramme solaire de Djibouti, nous avons utilisé un des nombreux logiciels de calculs du temps disponibles librement sur internet en entrant tout simplement la latitude et la longitude de Djibouti (11,33° Nord et 42,09° Est). Voici les résultats donnant la position du soleil en tout temps et en toutes saisons (tableau 2.4). Pour aérer la représentation graphique, nous n'avons retenu que le 1^{er} jour de chaque mois.

Tableau 2.4 : Mesures mensuelles de la Hauteur et de l'Azimut du soleil à 6 heures d'intervalles à Djibouti

Date	Heure	Hauteur	Azimut	Date	Heure	Hauteur	Azimut	Date	Heure	Hauteur	Azimut
01/01	00:00	-78.26	-180.00	01/05	00:00	-63.87	-180.00	01/09	00:00	-69.70	-180.00
	06:00	-4.41	-67.35		06:00	2.89	-104.60		06:00	1.74	-98.71
	12:00	55.64	0.00		12:00	86.38	0.00		12:00	87.46	0.00
	18:00	-4.41	67.39		18:00	2.92	104.75		18:00	1.70	98.53
01/02	00:00	-83.70	-180.00	01/06	00:00	-56.89	-180.00	01/10	00:00	-81.50	-180.00
	06:00	-3.40	-72.76		06:00	4.19	-111.43		06:00	-0.58	-87.12
	12:00	61.18	0.00		12:00	79.47	0.00		12:00	75.64	0.00
	18:00	-3.37	72.90		18:00	4.20	111.51		18:00	-0.61	86.93
01/03	00:00	-86.60	-179.99	01/07	00:00	-55.50	-180.00	01/11	00:00	-87.52	179.99
	06:00	-1.53	-82.32		06:00	4.43	-112.75		06:00	-2.70	-76.37
	12:00	70.93	0.00		12:00	78.20	0.00		12:00	64.70	0.00
	18:00	-1.50	82.50		18:00	4.42	112.71		18:00	-2.73	76.21
01/04	00:00	-74.87	-180.00	01/08	00:00	-60.43	-180.00	01/12	00:00	-79.67	-180.00
	06:00	0.77	-93.83		06:00	3.51	-107.85		06:00	-4.17	-68.69
	12:00	82.67	0.00		12:00	83.21	0.00		12:00	56.93	0.00
	18:00	0.80	94.02		18:00	3.49	107.72		18:00	-4.18	68.61

Malheureusement pour nous, nous n'avons pas pu trouver un logiciel de tracé de diagramme solaire disponible gratuitement, raison pour laquelle nous avons tracé le diagramme solaire à main levée sur du papier quadrillé (graphique 2.2) à partir des données du tableau 2.4.

Graphique 2.2 : Diagramme solaire à Djibouti



On remarquera que le soleil est le plus haut dans le ciel (presqu'au zénith) aux mois de mai et septembre : les jours sont donc plus longs à cette période. Et à l'inverse, elle atteint son point le plus bas aux mois de janvier et décembre : les jours sont plus courts.

2.2 Situation actuel de la filière

2.2.1 La capacité installée

L'utilisation de l'énergie solaire commence aujourd'hui à se développer dans le pays en général et à se généraliser dans les zones rurales en particulier. En zone rurale, les principaux bénéficiaires sont les édifices gouvernementaux comme les dispensaires, les écoles primaires publiques et parfois les bureaux administratifs. Seule l'énergie photovoltaïque est utilisée à Djibouti.

En raison du climat, le solaire thermique n'est pas encore utilisé même si certaines régions du Nord enregistrent des températures inférieures à 20°C la nuit. Quant à la cuisine "solaire", elle n'est qu'à ses débuts et le projet de diffusion des cuiseurs solaires réalisé par notre association (voir étude de cas 2) en est le premier du genre.

A partir de 2006, le Ministère de l'Education Nationale a lancé un programme d'électrification rurale de toutes les écoles nouvellement construites. De plus, une partie des écoles déjà équipées de panneaux solaires ont été soit réhabilités soit renforcés.

Le Ministère de l'Agriculture vient à son tour de lancer cette année un programme de réhabilitation de tous les points d'eau (surtout les forages) anciennement équipés de pompes solaires.

Concernant le Ministère de la Santé, il utilise également l'énergie photovoltaïque mais de façon limitée pour les besoins d'éclairage des dispensaires ruraux ainsi que la réfrigération des vaccins et produits médicaux sensibles.

L'Agence Djiboutienne pour le Développement Social (ADDS) a, quant à elle, terminé un premier volet d'un programme d'installation de kit solaire pour 180 foyers situés dans la zone périurbaine de PK12 (quartier défavorisé). Il est prévu l'installation de 320 kits supplémentaires d'ici la fin de cette année. Elle vient également de commencer un projet similaire, mais cette fois, d'électrification globale d'un village de la région d'Ali-Sabieh (village de Holl-Holl).

Il faut savoir également que l'unique opérateur de téléphonie mobile (Djibouti Télécom) a déjà à son actif plus de 22 kW installé essentiellement dans deux zones isolés pour ses relais téléphoniques.

Les services de Police et de gendarmerie ont aussi équipé leurs centres de transmissions situés sur les zones reculés en énergie photovoltaïque.

On a également recensé quelques personnes qui utilisent le photovoltaïque à titre privés mais nous n'avons aucune statistique à ce niveau là même si nous estimons que cela soit très limitée.

Les différentes estimations établies nous donnent une puissance de **290 kW** en photovoltaïque installées dans le pays au jour d'aujourd'hui. En 2000, la capacité totale installée à Djibouti était estimée à 138 kW (CERD, 2000). En moins de 10 ans, la capacité a plus que doublée. Ce rythme va certainement s'accélérer compte tenu des projets d'envergure actuellement en cours d'exécution et ceux en cours d'élaboration dont le financement est déjà acquis.

2.2.2 Les perspectives de développement

Le marché du solaire connaît actuellement une embellie. Plusieurs sociétés spécialisées dans ce domaine ont vu le jour en moins de deux ans. La première raison est dû au fait que le gouvernement vient lui-même de lever de facto l'ambiguïté concernant l'autoproduction électrique à Djibouti en lançant le programme d'électrification de la zone d'habitation périurbaine de PK12. En effet, l'unique opérateur national de production d'électricité a l'exclusivité de la production mais uniquement dans les centres urbains !

Or, tout le monde était convaincu que c'était un monopole sur l'étendue du territoire. Le fait que le gouvernement, à travers son agence de développement ADDS, ait ouvert la voie sur l'utilisation de l'énergie solaire à titre privé (habitation) a fait sauter le verrou psychologique qui nuisait au développement de cette filière. A cela s'est ajoutée la levée des taxes d'importations sur les matériels solaires récemment adoptés et qui étaient auparavant de 33% (au même titre que les produits de luxe).

On pourrait même voir les centres urbains se doter de petites centrales photovoltaïques pour usages collectifs ou individuels à cause du coût actuel de l'électricité qui est exorbitant. Tous les ingrédients sont donc réunis pour que la filière puisse connaître un très fort développement dans très peu de temps. En effet, nous avons :

- * Un potentiel considérable
- * Des mesures gouvernementales incitatives
- * Une énergie électrique très chère
- * Un marché presque vierge

Il n'est pas exclu non plus que des investisseurs privés viennent rapidement prendre part à ce marché potentiel. Le gouvernement vient d'ailleurs de signer son premier mémorandum d'accord dans ce sens cette année avec une société privée pour l'exploitation des ressources solaires et éoliennes dans la zone du Goubbet (40 MW). Cette société envisagera probablement un mix-énergétique avec ces deux ressources pour la production électrique (nous n'avons pas d'informations détaillées à ce sujet).

Dans les cinq prochaines années, on pourrait même voir du photovoltaïque injecté sur le réseau après le maillage de ce dernier qui pourra se faire en aval de l'interconnexion électrique Djibouti-Ethiopie. Nous pensons que c'est le but même du projet privé cité plus haut.

Pour l'heure au rythme de développement constaté dans ce secteur et indépendamment des projets industriels, nous estimons que le cap du 1^{er} Mégawatt photovoltaïque installé uniquement avec les programmes d'électrifications rurales sera atteint avant 2017. L'électrification rurale est donc l'élément moteur de cette filière.

Étude de cas n° 1

2.3.1 Electrification par énergie solaire photovoltaïque d'une école rurale :



Source : ADED, 2007

L'école primaire publique de Gued-Qarweyné

2.3.1.1 Rappel du contexte

C'est l'Association Djiboutienne pour l'Energie et le Développement (ADED), unique association Djiboutienne active dans le domaine des énergies renouvelables qui a réalisé ce projet d'électrification solaire. L'association ADED a été fondée en février 2004, elle est dirigée par un comité composé de 5 membres. Nous assumons actuellement la fonction de Président de cette association et également la responsabilité des projets au sein de l'association.

L'objectif de l'association est de promouvoir l'utilisation des énergies propres pour le développement durable des populations rurales et isolées. Elle a déjà réalisé plusieurs projets basés sur l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables potentielles disponibles en République de Djibouti.

Il faut tout d'abord rappeler que ce projet d'électrification rurale par énergie solaire photovoltaïque a été réalisé grâce au soutien financier de l'Ambassade du Canada à travers son Fonds Canadien d'Initiative Locale (F.C.I.L.).

Ce projet se situe dans le village de **Gued Qarweyné**, sur la Route Nationale 1 à 50 km de Djibouti, la capitale, et à 17 km de Wéa, ville la plus proche en venant de la capitale. Ce village se trouve dans le nouveau district d'Arta, le nom du village signifie littéralement en langue somali « arbre au tronc géant ». Il compte à lui seul une soixantaine de campements nomades qui se sont sédentarisés au fil du temps grâce notamment au seul forage de la zone.

Ce village constitue donc en quelque sorte le chef-lieu de plusieurs zones de campements environnants. Cela représente près de 800 personnes. Alors que le nombre d'enfants scolarisés dans cette école n'est, en tout et pour tout, que de 57 élèves. Si l'on compare avec le nombre d'enfants scolarisés dans le village de PK 20 (95 élèves) où il y a pourtant moins de campements nomades (parce que proche de la capitale), on comprend facilement qu'il y a un désintérêt des parents pour la scolarisation des enfants dans la zone du projet.

L'électrification de cette école contribuera à l'éducation des enfants et plus particulièrement à celle des filles et donc finalement à l'amélioration des conditions de vie de ces populations. Un programme d'alphabétisation des adultes est également mené dans cette école depuis quelques années. L'électricité facilitera et favorisera la diffusion et l'adhésion à ce programme puisque les cours pourront se dérouler désormais la soirée, ce qui libérera les hommes et femmes contraintes auparavant de suivre ces cours le jour. Alors que normalement, durant la matinée, ils vauaient à leurs occupations quotidiennes habituelles.

Ce projet a la particularité d'être le premier du genre dans le pays (électrification totale de l'école et utilisation d'un onduleur pour débiter une tension normale de 230 V), il a eu un fort impact non seulement au niveau local mais particulièrement au niveau national. Les bénéfices socio-économiques de ce projet seront abordés à la fin de cette partie.

2.3.1.2 Description de l'école primaire

Cette école est constituée de 4 blocs distincts (photo 2.1.). Les équipements électriques de chaque bloc sont inventoriés dans les tableaux 2.5 à 2.9 suivants :

* Le bloc I :

Il est composé de 3 salles de classes, du bureau du directeur et d'une salle de stockage.

Tableau 2.5 : Équipements bloc I

	Lampes néon	Brasseurs d'air	Téléviseur	Radiocassette
Salle 1	5	4	-	-
Salle 2	5	4	-	-
Salle 3	5	4	1	1
Bureau directeur	1	1	-	-
Salle stockage	1	-	-	-
Couloir	3	-	-	-

* Le bloc II :

Il est composé de deux logements réservés pour le personnel administratif de l'école. L'un habité par le directeur de cette école et l'autre par les enseignants.

Tableau 2.6 : Logement directeur

	Lampes néon	Brasseurs d'air	Téléviseur	Radiocassette	Récepteur satellitaire
Chambre 1	1	1	-	-	-
Chambre 2	1	1	-	-	-
Salon	2	1	1	1	1
Bureau directeur	1	1	-	-	-
Salle stockage	1	-	-	-	-
Couloir	3	-	-	-	-

Tableau 2.7 : Logement enseignants

	Lampes néon	Brasseurs d'air	Téléviseur	Radiocassette	Récepteur satellitaire
Chambre 1	1	1	-	-	-
Chambre 2	1	1	-	-	-
Salon	2	1	1	1	-
Bureau directeur	1	1	-	-	-
Salle stockage	1	-	-	-	-
Couloir	3	-	-	-	-

* Le bloc III :
Il est composé de la bibliothèque et du réfectoire.

Tableau 2.8 : Équipements Bloc III

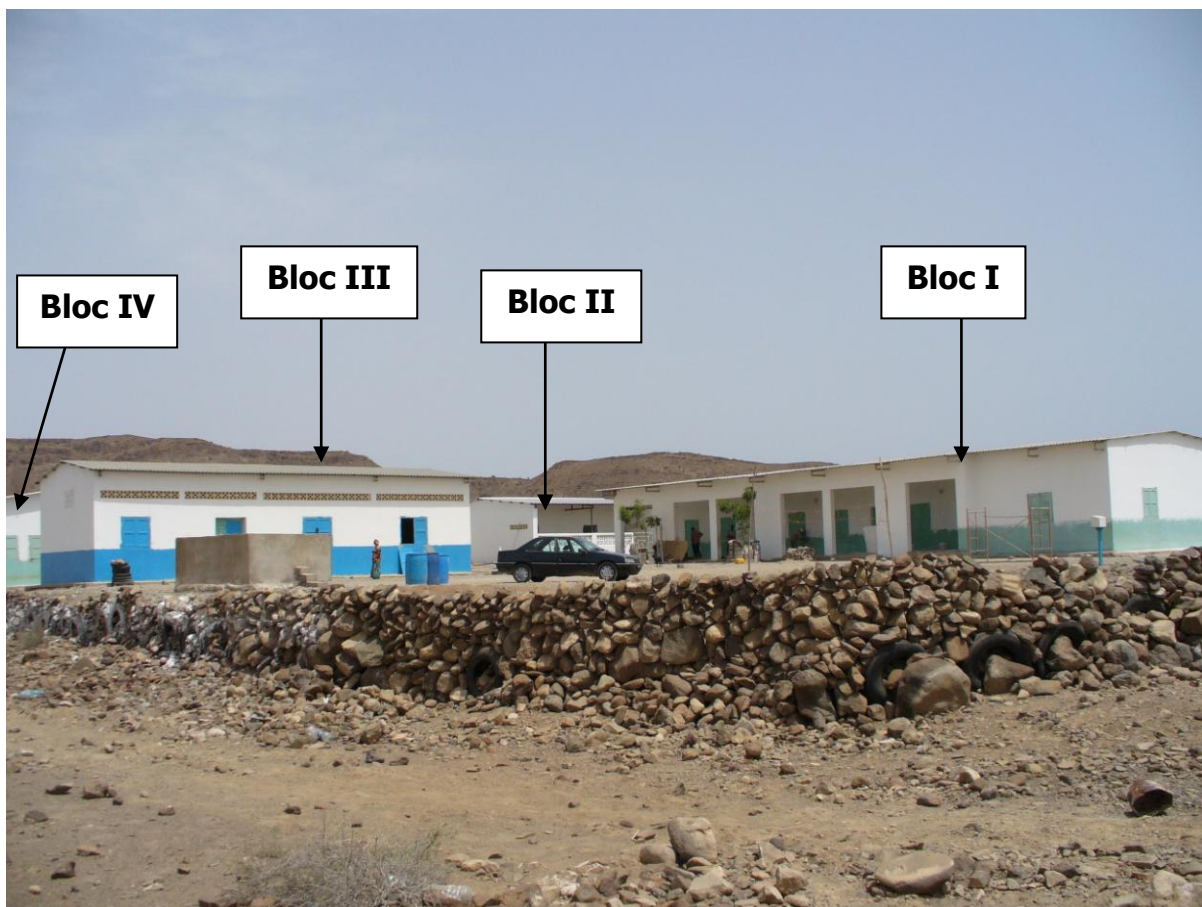
	Lampes néon	Brasseurs d'air	Téléviseur	Radiocassette	Récepteur satellitaire
La bibliothèque	4	2	-	-	-
Le réfectoire	2	2	-	-	-

* Le bloc IV :
Il est composé de deux dortoirs l'un réservé pour les filles et l'autre pour les garçons.

Tableau 2.9 : Équipements Bloc IV

	Lampes néon	Brasseurs d'air	Téléviseur	Radiocassette	Récepteur satellitaire
Dortoir fille	2	2	-	-	-
Dortoir garçon	2	2	-	-	-

Photo 2.1 : Vue et Description de l'école



Source : ADED, 2007

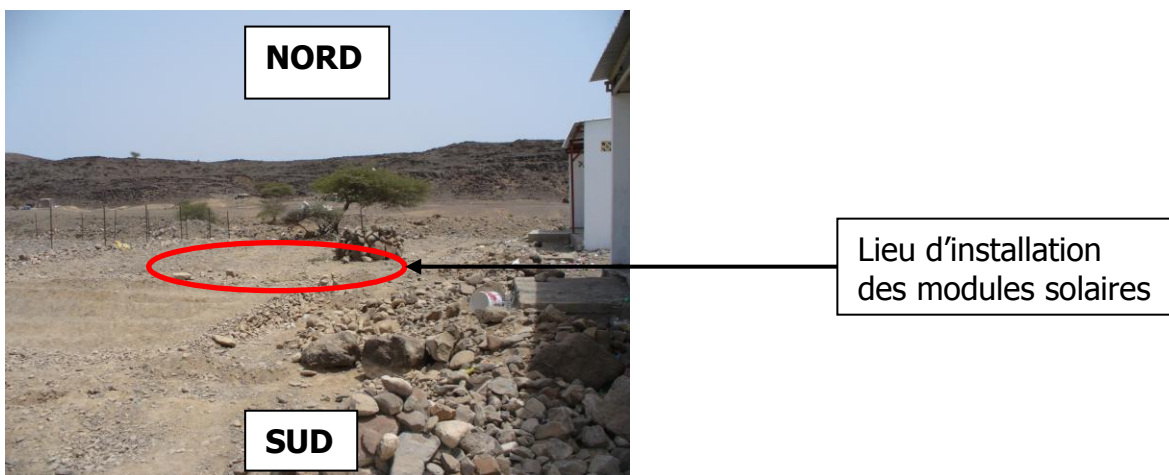
2.3.1.3 Dimensionnement

En raison de la limitation des fonds disponibles au niveau du Fonds Canadien, nous n'avons dimensionné uniquement que les blocs prioritaires à savoir les Blocs I et II (salles de cours et logements) de cette école.

- * Etude du masque et des phénomènes d'occultations :

Nous avons procédé à une étude préalable des masques solaires de la zone. Pour cela, nous nous sommes servis du diagramme solaire de Djibouti (voir graphique 2.3). Il ressort de cette étude que compte tenu de la topographie de la zone (peu de montagnes aux alentours de l'école), l'influence des masques est pratiquement négligeable (photo 2.2).

Photo 2.2: vue de l'emplacement choisi



Ensuite, nous avons fait une étude des occultations possible sur les modules solaires. Etant donné que nous disposions de tout l'espace nécessaire, nous avons retenu la zone la plus proche des blocs qui présentait le degré d'occultation le plus faible possible : ici, nous n'avons toléré aucune occultation. Pour cela, nous avons juste éliminé quelques arbustes qui risquaient de faire ombrages aux modules.

- * Estimation des besoins énergétiques :

Pour estimer les besoins quotidiens de cette structure, nous avons longuement interrogé les responsables administratifs de l'école sur leurs besoins électriques journaliers actuels et les équipements électriques dont ils avaient besoin ainsi que les conditions d'utilisation optimum de ces équipements.

L'estimation des besoins énergétiques quotidiens de cette école est résumée dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10 : Les besoins journaliers

	Type d'équipements	Nbre	P. unitaire (W)	P. totale (W)	Utilisation (h/jour)	Energie (Wh)
SALLES DE CLASSE	Lampes néon	20	20	400	6	2400
	Brasseurs d'air	13	40	520	8	4120
	Téléviseur	1	85	85	4	340
	Radiocassette	1	35	35	2	70
LOGEMENTS	Lampes néon	16	20	320	6	1920
	Brasseurs d'air	6	40	240	12	2880
	Téléviseur	1	85	85	7	595
	Radiocassette	2	35	70	4	280
	Décodeur satellite	1	15	15	7	105

Le total des besoins énergétiques quotidiens B_j est estimé à **12 710 Wh**

$$\boxed{B_j = 12\,710\text{ Wh}} \quad (2.7)$$

Remarque :

Les salles de classes étant également utilisées les soirs toute l'année pour le programme d'alphabétisation des adultes, nous avons tenu compte de cette donnée.

- * Estimation de la puissance totale à installer:

Avant de faire l'estimation de la puissance totale des modules solaires, il fallait procéder préalablement au choix de l'ensemble des équipements solaires autres que les panneaux à installer de telle sorte à pouvoir connaître le rendement de ces derniers. Après avoir fait un tour d'horizon des équipements solaires disponibles sur le marché local, nous nous sommes rendu compte qu'il fallait que nous commandions l'ensemble des matériels à l'étranger.

Les choix suivants ont donc été faits en fonction à la fois de la qualité des équipements et des fonds disponibles:

- Les panneaux solaires :
Modèle monocristallin SUNTECH STP060S-12/Bb fabriqué en Chine
- Les batteries solaires :
Modèle stationnaire gel SU-KAM 200 AH/12V fabriqué en Inde.
- L'onduleur :
Modèle CHIKO DC-AC Automatique 2 000 VA/24Vdc/230Vca fabriqué au Japon
- Le régulateur de charge :
Modèle XANTREX C60 avec 60A/24V fabriqué en Allemagne

Pour déterminer la puissance à installer, on utilise la formule suivante (Guide Pratique du solaire photovoltaïque, Jean-Paul Louineau, 2005):

$$P = \frac{B_j}{I_r \times \eta \times \rho} \quad (2.8)$$

Avec :

- P = puissance des modules solaires à installer en Watt crête (Wc)
- B_j= estimation des besoins journalier en Watt heure par jour (Wh/j)
- I_r= rayonnement solaire global moyen annuel calculé sur une période de 10 ans en kiloWattheure par mètre carré et par jour (kWh/m²/j)
- η = rendement des batteries
- ρ = rendement des convertisseurs

Le rayonnement solaire global moyen annuel pour le site considéré n'ayant pas été mesuré, nous prendrons les valeurs du rayonnement du tableau 2.3. Nous prendrons la valeur du mois le plus défavorable, ici le mois de décembre : **I_r = 5,05 kWh/m²/j**. Pour le rendement des batteries, on considère le chiffre donné par les constructeurs, nous prendrons ici pour ce modèle la valeur de 80% : **η = 0,8**. Pour les convertisseurs, nous prendrons pour ce modèle la valeur de 90% : **ρ = 0,9**.

L'application de la formule (2.8) donne les résultats suivants :

$$P = \frac{12710}{5,05 \times 0,8 \times 0,9}$$

$$\boxed{P = 3\,496 \text{ Wc}} \quad (2.9)$$

* Estimation de la capacité totale des batteries :

La capacité des batteries est déterminée avec la formule suivante :

$$C = \frac{B_j \times A_j}{D_d \times U_{cc}} \quad (2.10)$$

Avec :

- C = capacité des batteries en Ampères-heures (Ah)
- A_j = nombre de jours d'autonomie souhaitée pour les batteries.
- D_d = degré de décharge imposé pour les batteries.
- U_{cc} = tension des batteries en Volts courant continu (Vcc)

Compte tenu de la taille de notre école, nous avons estimé que le système solaire que nous allons mettre en place fonctionnera en 24 Vcc.

Pour l'autonomie des batteries, on tiendra compte des caractéristiques climatiques de la zone qui sont les suivantes :

Durée d'insolation moyenne annuelle : 3335 heures (Météo Djibouti).

Un autre facteur entre en ligne de compte, il s'agit du budget limité alloué à ce projet. Ce qui fait que nous avons réduit le nombre de jours d'autonomie. Nous avons donc pris seulement 2 jours afin de limiter la taille du stockage :

Autonomie (en jours) : $A_j = 2$

Le degré de décharge des batteries étant inversement proportionnel à la durée de vie de ces dernières, nous devons privilégier ici le critère de longévité compte tenu de l'éloignement de la zone et de l'absence de programme de maintenance pour cette école. On considérera donc une valeur de 50%.

Degré (ou taux) de décharge des batteries : $D_d = 0,5$

L'application de la formule (4) donne les résultats suivants :

$$C = \frac{12710 \times 2}{0,5 \times 24} = 2118 \text{ Ah}$$

$$\boxed{C = 2118 \text{ Ah}} \quad \textbf{(2.11)}$$

* Choix du nombre de batteries :

Etant donné que la tension du système est de 24 Vcc, le nombre de batteries solaires à installer sera fonction de la capacité unitaire de ces dernières. Nous avons choisi des batteries à électrolyte gel et étanches de 200 Ah/12V de marque Su-Kam. Le nombre de batteries (Nb) à installer est le suivant :

$$\textbf{Nb} = 2118 \text{ Ah} \div 200 \text{ Ah} = 10.6$$

La tension du système imposant le nombre de batteries connecté en série (24V = un nombre paire de batteries), on préférera donc prendre **12 batteries de 200 Ah/12V**. Le fait de surdimensionner légèrement est également conseillé pour tenir compte des pertes éventuelles dans le circuit.

$$\boxed{\textbf{Nb} = 12}$$

* Choix du nombre de modules solaires:

Pour les modules solaires, nous avons pris délibérément des modules de 60 Wc/12V en raison d'une promotion qui nous a été proposée pour ce modèle. Le nombre de modules solaires (Nm) nécessaire est le suivant :

$$\textbf{Nm} = 3496 \text{ Wc} \div 60 \text{ Wc} = 58.3$$

Nous avons donc fait le choix de prendre **60 modules solaires de 60 Wc/12V** en raison de la tension préalablement fixée pour le système (24V).

$$\boxed{Nm = 60}$$

La puissance totale des modules à installer dans cette école devient donc :

$$\boxed{Pt = 60 \times 60 = 3600 \text{ Wc}} \quad (2.12)$$

* Dimensionnement du régulateur de charge:

Le dimensionnement du régulateur est fait en tenant compte de deux contraintes :

1. Il doit supporter l'intensité maximale de court-circuit (I_{scm}) générée par les modules photovoltaïques :

$$\bullet \quad I_{scm} = I_{sc} \times Nm$$

Avec : - I_{sc} : l'intensité de court-circuit de chaque module
- Nm : le nombre de modules installé en parallèle

2. Il doit supporter l'intensité nominale de la totalité des récepteurs à courant continue (I_{nm}) qu'il alimente directement :

$$\bullet \quad I_{nm} = \sum I_n$$

Avec, I_n : l'intensité nominale de chaque récepteur

Dans notre cas, le système solaire que nous installerons fonctionnera en courant alternatif. Le régulateur sera uniquement dimensionné en fonction de la 1^{ère} contrainte.

Les modules que nous allons utiliser sont des modules SUNTECH modèle STP060S-12/Bb, l'intensité de court-circuit fourni par le constructeur est 3,85 A. Le nombre de modules installé est de 60 et en tenant compte de la tension de notre système qui est de 24 Vcc, nous aurons donc la configuration suivante : 30 séries parallèles constitué de 2 modules, soit :

$$\boxed{I_{scm} = 3,85 \times 30 = 105,5 \text{ A}}$$

Avec une telle intensité maximale, il était donc nécessaire de séparer en deux champs l'installation solaire, chaque champ aura donc :

$$\boxed{I_{sc_{max}} = 52,75 \text{ A}} \quad (2.13)$$

Nous avons donc dimensionné un régulateur de 60A/24V pour chaque champ de 30 modules solaires répartis en 2 strings, soit au total **2 régulateurs de 60A/24V** pour notre installation. Les deux régulateurs choisis sont des régulateurs automatiques de fabrication allemande XANTREX C60.

* Dimensionnement du convertisseur:

L'onduleur (ou appelé également convertisseur CC-CA) doit être dimensionné de telle sorte que sa puissance (en C.A.) doit être au minimum supérieure à deux fois à la puissance totale des appareils qu'il devra alimenter. Dans l'idéal, il faudrait que la puissance de l'onduleur soit équivalente à 95% de la puissance totale (exprimée en W) des modules solaires installés.

Dans notre cas la puissance nominale totale des équipements électriques est égale à :

$$P_{nt} = \sum P_n$$

$$\boxed{P_{nt} = 1770 \text{ W}} \quad \mathbf{(2.14)}$$

La puissance de notre onduleur P_o est donc :

$$P_o = 2 \times 1770 = 3540 \text{ W}$$

$$\boxed{P_o = 3540 \text{ W}} \quad \mathbf{(2.15)}$$

Dans l'idéal, on aurait la valeur suivante :

$$P_o = 0,95 \times 3600 = 3420 \text{ W}$$

Les deux méthodes de dimensionnement donnent pratiquement les mêmes résultats, cette dernière méthode est utilisée dans la plupart des logiciels de dimensionnement photovoltaïque (PVSyst, RETScreen, Solo 2000, ...etc.).

Compte tenu, d'une part, du coefficient de foisonnement (probabilité pour que tous les appareils soit branchés en même temps) qui paraît assez faible dans notre cas et d'autre part, de la non disponibilité sur le marché local des gammes d'onduleurs et des moyens financiers disponibles, nous avons dû choisir un onduleur ayant les caractéristiques suivantes :

- Convertisseur CHIKO sinusoïdal pure
- Tension d'entrée : 24 Vdc (courant continu)
- Tension de sortie : 230 Vac (courant alternatif)
- Puissance : 2000 VA

Dans l'absolu, cette puissance de l'onduleur est suffisante, on prendra pour le convertisseur, la valeur suivante :

$$\boxed{P_o = 2000 \text{ W}}$$

* Dimensionnement des câbles :

La section des câbles ainsi que leurs longueurs interviennent dans l'efficacité du système solaire. Les chutes de tensions induites ont été calculées et prises en compte dans le dimensionnement de notre système. Les chutes de tension U_{ab} sont calculées à partir de la formule suivante :

$$U_{ab} = L_c \times R \times I \quad (2.16)$$

Avec : L_c = Longueur de câbles
 R = Résistance électrique du câble
 I = Intensité nominale circulant dans le câble

Les câbles étant tous en cuivre, les résistances électriques à différentes sections de câbles sont données dans le tableau 2.11 suivant :

Tableau 2.11 : Résistance Ohmique des câbles électriques usuels

Section (mm ²)	1	1,5	2,5	4	6	10	16
R (Ω/m)	0,04	0,0274	0,01642	0,01018	0,00678	0,0039	0,00248

Voici donc les caractéristiques retenues pour nos différents câbles :

- Câbles d'interconnexion entre les modules solaires :
 - Section : 4 mm²
 - Longueur : n'est pas comptabilisée dans les chutes de tensions
- Câbles d'interconnexion modules – régulateurs :
 - Section : 16 mm²
 - Longueur : 10 m

La chute de tension U_{mr} entre chaque champ de modules et son régulateur est calculée en appliquant la formule (10) et en utilisant la relation (7), on aura donc :

$$U_{mr} = L_c \times R \times \frac{I_{scm}}{2}$$

$$U_{mr} = 10 \times 0,00248 \times 52,75$$

$$U_{mr} = 1,31 \text{ V}$$

La chute de tension maximale conseillée pour une installation solaire de 24 V doit être inférieure à 0,6 V, ce qui n'est évidemment pas le cas ici. Nous avons donc une chute de tension supérieure à la norme, nous avons dû tenir compte de cette chute de tension dans nos calculs de dimensionnement exposé ci-haut.

- Câbles de connexion batteries – régulateurs :
 - Section : 16 mm²
 - Longueur : 2 m

La chute de tension U_{br} entre les batteries et le régulateur est calculée en appliquant la formule (10) et en utilisant la relation (7), on aura donc :

$$U_{br} = L_c \times R \times \frac{I_{scm}}{2}$$

$$U_{br} = 2 \times 0,00248 \times \frac{105,5}{2}$$

$$U_{br} = 0,26 \text{ V}$$

La chute de tension maximale conseillée pour une installation solaire de 24 V doit être inférieure à 0,3 V, ce qui est le cas ici. Nous n'avons donc pas de chute de tension au niveau de la connexion batteries-régulateur.

- Câbles de connexion onduleur – batteries :
 - Section : 25 mm²
 - Longueur : 2 m

La chute de tension U_{ob} entre l'onduleur et les batteries est négligeable

- Câbles de connexion régulateur – charges :
 - Section : 2,5 mm²
 - Longueur : 10 m

Pour calculer la chute de tension U_{rc} entre le régulateur et les charges, il faudra d'abord calculer l'intensité maximale des charges I_c :

$$I_c = \frac{P_{nt}}{U}$$

Avec P_{nt} = Puissance nominale totale des charges, relation (8).
 U = Tension de sortie après l'onduleur.

$$I_c = \frac{1770}{230} = 7,69 \text{ A} \quad \mathbf{(2.17)}$$

En appliquant les expressions (10) et (11), on aura donc :

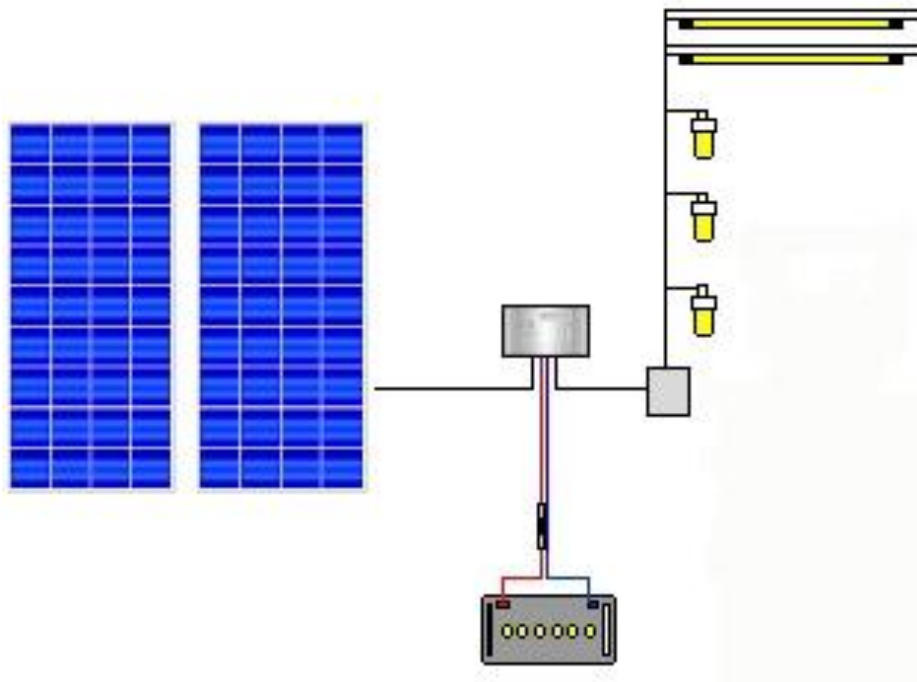
$$U_{rc} = 2,5 \times 0,01642 \times 7,69$$

$$U_{rc} = 0,31 V$$

La chute de tension maximale conseillée pour une installation solaire de 24 V doit être inférieure à 0,6 V, ce qui est également le cas ici.

On voit donc que dans cette installation solaire, nous avons respecté globalement les chutes de tension admissibles pour une telle installation. Par conséquent, il n'était pas nécessaire de surdimensionner les équipements solaires, ce qui aurait eu pour conséquence d'accroître les coûts financiers.

* Schéma simplifié de l'installation :



Dans notre cas, nous avons séparé les modules en deux champs de 30 panneaux solaires chacun. Chaque champ étant relié à son propre régulateur de 60 A, ces derniers sont reliés tous les deux aux batteries. Les batteries sont donc chargées à la fois et séparément par les deux champs de modules.

* Estimation de l'énergie produite :

Pour l'estimation de l'énergie produite (E_p) par cette centrale solaire, nous avons besoin des données suivantes :

- I_r = Irradiation moyenne annuelle globale horizontale du lieu ($kWh/m^2/an$)
- F_t = Facteur de transposition (coefficient multiplicateur)
- F_o = Facteur d'ombrage (coefficient multiplicateur compris entre 0 et 1)
- C_s = Coefficient de structure (facteur multiplicatif)
- S_m = Surface totale occupée par les modules

Pour le calcul de cette énergie exprimée en kWh/an, nous nous sommes basé sur les formulaires du logiciel de dimensionnement photovoltaïque PVSYST4_37, nous aurons donc :

$$E_p = I_r \times F_t \times F_o \times C_s \times S_m \quad (2.18)$$

- Calcul de l'irradiation moyenne annuelle globale horizontale :

Les données utilisées ici sont les données mensuelles de la durée moyenne mensuelle d'insolation à Djibouti exprimée en heure (Tableau 2.2) et les données de l'irradiation globale journalière moyenne sur une période significative de 10 ans (tableau 2.3). Etant donné que c'est la seule station météorologique en activité dans le pays, on prendra ces valeurs pour le site de Gued-Qarweyné.

L'irradiation mensuelle moyenne ($I_r.m.$ en kWh/m²/mois) est ensuite calculée de la manière suivante :

$$I_r.m. = \text{Irradiation moyenne journalière} \times \text{Nombre de jour du mois}$$

On reporte donc la valeur mensuelle correspond à chaque mois sur le tableau 2.12 suivant :

Tableau 2.12: Tableau récapitulatif des valeurs de l'irradiation moyenne mensuelle obtenue

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Nombre de jours	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Irradiation Moy. Journalière (kWh/m²/jour)	5,30	6,02	6,55	6,40	6,40	6,34	6,78	6,26	6,28	6,35	5,88	5,05
Ir. Moy. Men. (kWh/m²/mois)	164,3	174,58	203,05	192	198,4	190,2	210,18	194,06	188,4	196,85	176,4	156,55

L'irradiation moyenne annuelle ($I_r.a.$) est obtenue en faisant la sommation des valeurs mensuelles du tableau 2.12, on aura donc :

$$I_r.a. = \sum_1^{12} I_r.m.$$

$$I_r.a. = 2245 \text{ kWh} / m^2 / an \quad (2.19)$$

- Calcul du facteur de transposition :

Le facteur de transposition n'est autre que le facteur correctif qui permet d'obtenir la valeur de l'irradiation globale dans le plan des modules solaires, il dépend donc de l'orientation et de l'inclinaison des modules solaires. Dans notre cas, l'orientation (sud) et l'inclinaison (12°) correspondent à un rendement optimum. Le logiciel nous donne la valeur suivante :

$$F_t = 1,12$$

- Calcul du facteur d'ombrage :

Le facteur d'ombrage correspond à la fraction des modules solaire ne subissant pas d'occultation. Dans notre cas, comme nous l'avons exposé plus haut, il n'y a aucun ombrage dont il faut tenir compte, on prendra donc la valeur suivante :

$$F_o = 1$$

- Calcul du coefficient de structure :

Le coefficient de structure (Cs) est lié aux caractéristiques des cellules photovoltaïques utilisées et à la ventilation des modules, les différentes valeurs de ce coefficient sont consignées dans le tableau 2.13 suivant :

Tableau 2.13 :

Types d'intégration	Rendement Modules (%)	Cs : Modules non ventilés	Cs : Modules ventilés	Cs : Modules très ventilés
Technologie cellules				
Silicium monocristallin	12,5	0,0875	0,09375	0,100
Silicium multicristallin	11,5	0,0805	0,08625	0,092
Silicium amorphe	5	0,0350	0,03750	0,040

Source : Logiciel PVSYST4_37

On estime que dans notre contexte, les modules solaires utilisant des cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont très ventilés puisque nous sommes dans un environnement où il n'y a pratiquement pas de bâti et que les modules sont installés sur le sol.

On prendra donc la valeur suivante :

$$C_s = 0,100$$

- Surface des modules :

Les dimensions des modules utilisés sont de :

Longueur = 771 mm
Largeur = 665 mm

La surface d'un seul module est :

$$S = 0,771 \times 0,665$$
$$S = 0,513 \text{ m}^2$$

La surface totale des modules est donc :

$$S = 0,513 \times 60$$

$$S = 30,78 \text{ m}^2$$

L'application de la formule (12) donne :

$$Ep = 2245 \times 1,12 \times 1 \times 0,1 \times 30,78$$

$$Ep = 7740 \text{ kWh / an} \quad (2.20)$$

En exprimant cette grandeur en heures équivalentes cela nous donne :

$$H = \frac{7740 \text{ kWh}}{3,6 \text{ kWc}} = 2150 \text{ h} \quad (2.21)$$

En faisant la comparaison avec les besoins annuels énergétiques de l'école, on aura :

De la relation (2.7), on tire les besoins énergétiques annuels Ba :

$$Ba = 12,71 \times 366 = 4652 \text{ kWh} \quad (2.22)$$

En faisant la soustraction entre les relations (2.20) et (2.22), on obtient un surplus énergétique égal à **3088 kWh**, soit un excédent énergétique de près de **40%**.

En dimensionnant de façon très fine, on aurait pu limiter l'excédent à une valeur de 20% mais comme l'école est située en zone isolée, elle sera amenée à être fréquentée de plus en plus en fonction de l'évolution de l'effectif des élèves, cet excédent s'avérera alors nécessaire.

:

* Quelques Images du Projet :

Voici quelques images de notre installation solaire

Photo 2.3 : Discussions avec les notables



Photo 2.4 : Choix du site en présence du Préfet de Région



Photo 2.5 : Site avant l'installation



Photo 2.6 : Site après l'installation



Photo 2.7 : Local technique



Photo 2.8 : Cérémonie d'Inauguration avec la représentante du Fonds Canadien



Étude de cas n° 2



Source : ADED, 2009

Inauguration officielle du projet de diffusion des cuiseurs solaires à Dikhil en présence de l'Ambassadeur de France à Djibouti et du Préfet de Région ainsi que du Président de Région

2.3.2 Introduction et vulgarisation des cuiseurs solaires à Djibouti.

Comme précédemment expliqué, ce projet d'introduction et de vulgarisation des cuiseurs solaires en République de Djibouti a également été réalisé dans le cadre associatif, par l'association ADED et avec le soutien financier du service de coopération et d'action culturelle (SCAC) de l'Ambassade de France à Djibouti. Ce projet a été réalisé en deux étapes :

La 1^{ère} étape : La phase pilote (introduction du cuiseur solaire)

Elle a été réalisée en 2007 pendant une période de 6 mois dans une des zones périurbaines aux abords de la ville de Djibouti, la capitale, plus précisément dans le quartier de PK12, zone essentiellement habitée par des populations à bas revenus. Cette phase constituait proprement dit la phase d'introduction du cuiseur solaire.

La 2^{ème} étape : La phase diffusion

C'est la phase vulgarisation du projet, elle a démarrée en 2009, elle est actuellement en cours de réalisation et concerne l'ensemble des 5 régions intérieures du pays. Il faut souligner que durant cette deuxième phase, un étudiant en Master SEER (Systèmes Energétiques et Energies Renouvelables) de 2^{ème} année de l'Université de Corse (sous la responsabilité de Philippe POGGI), Benjamin PILLOT a réalisé un stage de 6 mois au sein de l'association ADED pour la mise en œuvre de cette phase.

2.3.2.1 Historique et Contexte du projet

* L'historique des cuiseurs solaires à Djibouti :

En République de Djibouti, des tentatives d'introduction du cuiseur solaire ont déjà été menées par deux fois et par le Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti CERD (anciennement ISERST) :

- La première fois en 1983 dans le cadre du projet " VITA-ISERST energy initiatives project " avec des volontaires américains au cours de laquelle une campagne de mesure du rayonnement solaire avait notamment été réalisée. Il s'agissait en fait de tester les performances de différents modèles de cuiseurs solaires représentés sur les photos 2.9 et 2.10. Les cuiseurs solaires testés étaient surtout destinés à la recherche scientifique plutôt qu'à une diffusion.

Photo 2.9 : cuiseur parabolique en fonctionnement



Photo 2.10 : cuiseur fermé



Les Photos 2.9 et 2.10 montrent un des modèles testés, ici un cuiseur solaire parabolique pliable sous forme d'attaché-case.

- La deuxième fois en 2005 dans le cadre d'une étude de la Banque Mondiale sur la santé environnementale. Ici, les deux modèles testés étaient de type "boite" : l'un conçu par une société portugaise (four SunCo) et l'autre par une société américaine (four SOS sport) (photos 2.11 et 2.12). Les tests se sont déroulés dans deux villages ruraux, l'un au Nord (Région de Tadjourah, village de Khalaf), l'autre au sud (Région d'Ali-Sabieh, village de Goubetto).

L'approche privilégiée, ici, était beaucoup plus globale et axée sur les aspects suivants : l'approvisionnement en eau, l'accessibilité aux services de santé, l'amélioration de l'hygiène et de l'environnement en milieu rural. Les résultats obtenus étaient encourageants mais pas significatifs en raison du nombre limité de cuiseurs testés.

En effet, au cours de cette étude, le nombre de cuiseurs distribués n'étaient que de quatre (deux de chaque modèle). L'étude ne concernait seulement que quatre familles, deux familles par village. Par la suite l'opération n'a pas été poursuivie probablement par manque de résultats statistiquement fondés.



Photo 2.11: Four SOS Sport



Fig 2.12: Four SunCo

Il faut signaler également qu'un français installé dans la ville d'Ali-Sabieh (sud ouest) utilise depuis plusieurs années déjà un four solaire (modèle en boite) fabriqué en Europe pour ses besoins personnels. Il ressort des contacts que nous avons pu établir avec ce dernier que les performances de son modèle étaient assez bonnes et qu'il l'utilisait uniquement lors de ses nombreuses sorties en zones rurales isolées.

* Le contexte de notre projet :

Dans le monde, on estime que :

- Près de 1,2 milliards de personnes soit 1/5 de la population mondiale n'a pas accès à l'eau potable parmi lesquelles 5 millions d'enfants meurent chaque année en buvant des eaux contaminées.
- La plupart des femmes dans les pays en développement passent plus de 5 heures par jour pour chercher du bois de chauffe.
- Une personne qui cuisine dans un local fermé inhale l'équivalent de 10 à 20 paquets de cigarettes.
- Etc....

En République de Djibouti, la culture et le mode de vie des populations rurales sont généralement fondés sur le pastoralisme. Les nomades se déplacent donc au gré des saisons et des pluies, ils utilisent le bois et le charbon de bois pour la cuisson. Ces dernières années, un constat général a été fait : les arbres qui sont si nécessaires au maintien de ce mode de vie, sont en voie de disparition en raison de la coupe massive pour la production de charbon de bois.

L'enquête de la Direction des Statistiques (DISED) du Ministère des Finances, (EDAM-Energie, 2004) révèle que 25% de la population nationale vis dans les villes de l'intérieur du pays (y compris zones rurales) et 37% parmi ces populations utilisent le bois et ses dérivés pour la cuisine.

La quasi-totalité des ruraux utilisent cette ressource pour les besoins domestiques malgré la faiblesse du couvert végétale du pays qui représente 3,2% (IGAD, 1990). Dans les zones arides et semi-arides du territoire, les ressources ligneuses se font de plus en plus rares. Même dans certains endroits où l'environnement a été partiellement dégradé, on estime que la repousse des grands arbres et le retour au statu quo ante peut prendre de 30 à 50 ans [rapport FOSA, 2005].

Nous avons constaté que dans les zones périurbaines de la ville de Djibouti, les populations utilisent actuellement et de plus en plus le charbon de bois pour des raisons économiques alors qu'avant c'était exclusivement le réchaud à kérosène (EDAM-Energie, 2004). Et comme la cuisine se fait dans des endroits fermés, ces populations plus particulièrement les femmes et les enfants en bas âge souffrent de maladies respiratoires (bronchites chroniques, cancer des poumons, asthme, etc..) et des yeux à causes des fumées nocives dégagées.

Les taux de mortalité infantile et infanto-juvénile seraient ainsi passés respectivement à 103,1 et 124,4 pour mille en 2002 (contre 114 et 154 pour mille en 1989). Il faut cependant noter que la mortalité infantile et infanto-juvénile sont beaucoup plus élevées chez les filles, soit respectivement de 100,5°/°° et 110,4°/°° (Enquête Djiboutienne sur la Santé de la Famille – Rapport Préliminaire – Mai 2003).

C'est dans ce cadre que se situe notre réflexion sur cette nouvelle approche de cuisine solaire. La problématique liée à un changement de comportement, donc de l'acceptation de ce nouveau mode de cuisson par ces populations était également une des préoccupations majeures de ce projet.

2.3.2.2 Généralités sur les cuiseurs solaires

Plus généralement appelés collecteurs thermiques, les cuiseurs solaires (ou fours solaires) sont des systèmes de cuisson des aliments utilisant l'énergie solaire. Ces systèmes fonctionnent uniquement avec le rayonnement solaire direct (même si certains types font intervenir le rayonnement diffus de façon peu significative).

Le principe de fonctionnement de ces cuiseurs est le suivant : étant constitués de deux parties (le réflecteur et l'absorbeur), le rayonnement solaire capté par le réflecteur est redirigé vers l'absorbeur. L'absorbeur étant le récipient contenant la nourriture (et la surface interne des cuiseurs dans certains types) et le réflecteur la surface réfléchissante (miroir, aluminium, etc.). L'énergie solaire captée est transformée en énergie thermique, donc en chaleur.

Les cuiseurs solaires sont différenciés en trois grands types :

- Les cuiseurs à caisson,
- Les cuiseurs à panneaux,
- Les cuiseurs paraboliques.

* Les cuiseurs solaires à "caisson" ou en "boîtes" :

Il s'agit d'une boîte, le plus souvent en bois, isolée avec double vitrage et une tôle noire au fond pour produire l'effet de serre. Les rayonnements sont directement absorbés à la fois par le fond de couleur noire et par le récipient dont les parois extérieures sont peintes également en noir. Le modèle SOS Sport en est un exemple (Photo 2.11). Les aliments sont cuits à la fois par conduction sous l'effet de la chaleur transmise et par convection à l'intérieur de la boîte.

Ce type de cuiseur est simple à construire à partir de matériaux locaux que l'on peut trouver partout : bois, contre-plaqué, aluminium ménager, verre et laine de mouton (pour l'isolation). La température atteinte variant de 100 à 190°. Certains modèles sont également équipés d'un système de réflexion pour obtenir un modèle hybride plus performant, ce sont les systèmes non focalisant : ils ne font qu'accumuler le rayonnement solaire dans un réceptacle à l'aide de miroirs plans comme par exemple le four SunCo (photo 2.12).

Nous avons également été amené à tester les performances de ce genre de cuiseur solaire, le test s'est déroulé dans le quartier de PK12 au sein d'une famille modeste. Le modèle testé de fabrication Indienne (photo 2.13) a été importé par l'Agence Djiboutienne pour le Développement Social (ADDS) qui a l'intention de diffuser ce dernier à Djibouti. Nous ne traiterons pas ce sujet dans cette thèse.

Il faut cependant signaler que dans ce dernier modèle, les parois externes du cuiseur sont en aluminium. Ceci dans le but d'éviter la surchauffe de la surface extérieure au moment de la cuisson. L'aluminium ayant un indice de réflexion très élevé (0,75).

Photo 2.13 : le four solaire en « boîte » modèle indien



Le réflecteur (Miroir)

Les parois internes de couleurs noires (L'absorbeur)

Le double vitrage créant l'effet de serre

Les parois extérieures en aluminium

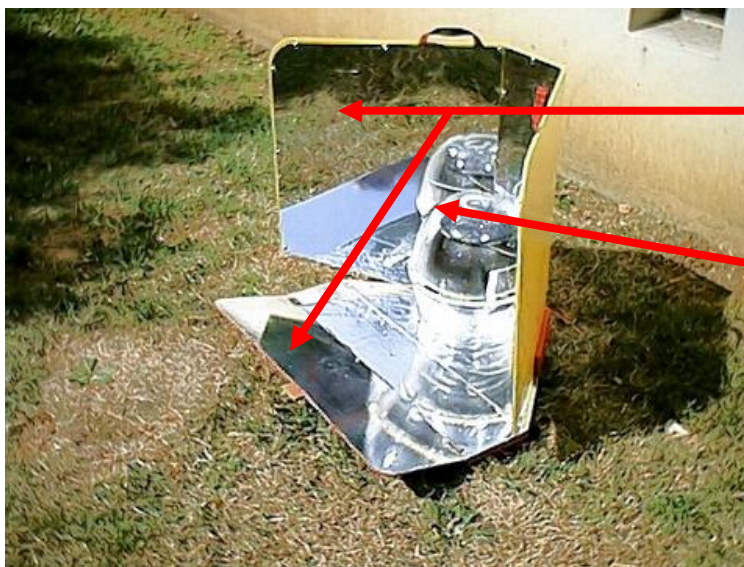
Source : ADED, 2009

* Les cuiseurs solaires à "panneaux" :

Ce modèle est constitué de différents panneaux plans qui réfléchissent les rayons solaires vers un pot placé sous une cloche en verre (photo 2.14). L'avantage de ce modèle est sa simplicité. Il peut être fabriqué à partir de matériaux basiques tels que du carton et de l'aluminium. C'est le modèle le plus répandu dans le monde et plus particulièrement dans les pays en voie de développement en raison de son très faible coût (moins de 50 \$US). La température atteinte varie entre 70 et 150°.

Plus connu sous le nom de Four Bernard, du nom de son inventeur Français, on trouve aujourd'hui ces cuiseurs à panneaux sous différentes déclinaisons mais le principe de cuisson est toujours le même.

Photo 2.14 : le four solaire à panneaux plus connu sous le nom de « Four Bernard »



**Les différents
panneaux plans
réfléchissants**

**La cloche en verre
contenant le récipient
peint en noir**

* Les cuiseurs solaires à "concentration" :

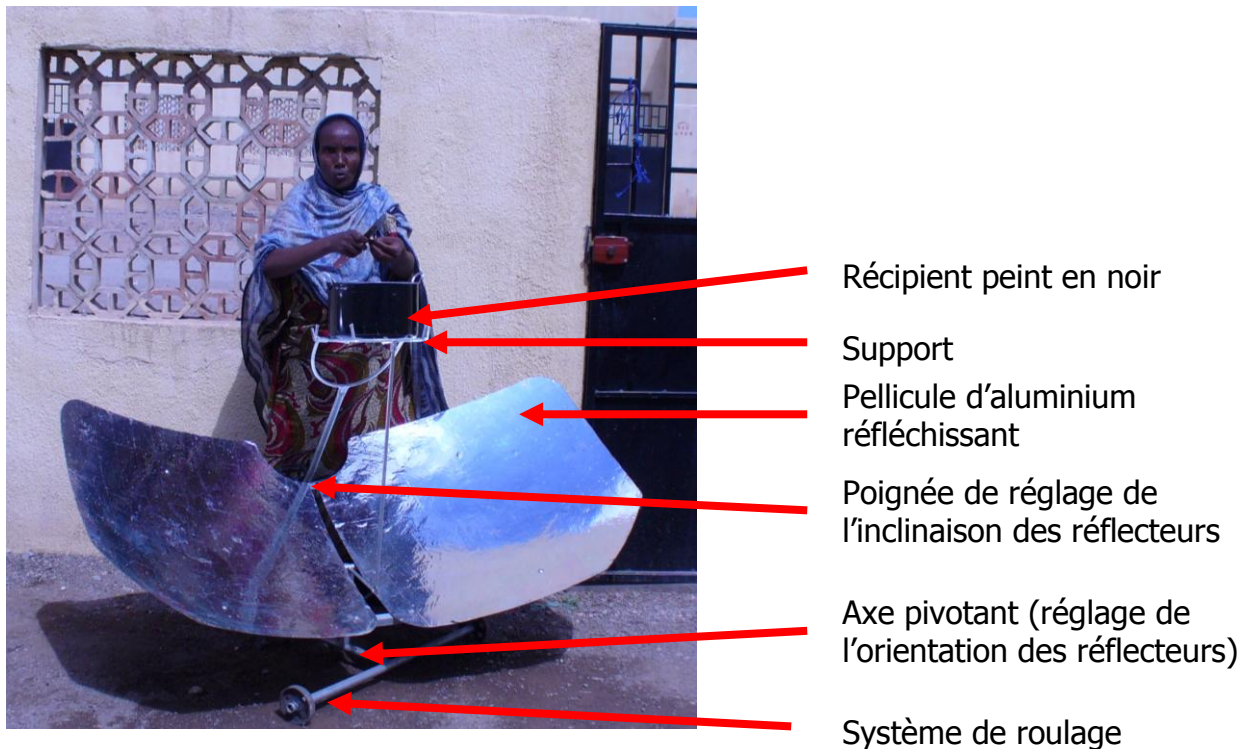
Ces fours se différencient des autres par le fait que le rayonnement solaire est ici focalisé vers un point fixe (l'absorbeur) à l'aide de plusieurs miroirs ou réflecteurs. Plus connu sous l'appellation de concentrateurs solaires, ces cuiseurs atteignent des températures très élevées de 100 à plusieurs centaines de degré Celcius. Toutes les formes possibles de systèmes focalisants ont été construites (hémisphériques, paraboliques, multi-collecteurs, etc.).

On exploite ce type de cuiseur dans l'industrie (production de chaleur industrielle ou même d'électricité) mais leur emploi dans le domaine de la cuisson domestique est plus lié à leur temps de cuisson extrêmement court. Les cuiseurs solaires de types paraboliques sont notamment utilisés en Amérique Latine, en Inde et en Chine. Les chinois fabriquent même un modèle avec une double parabole, un modèle communément appelé modèle "papillon". Dans ce modèle, l'absorbeur n'est autre que le récipient contenant la nourriture.

C'est précisément ce dernier type que nous avons importé de Chine pour pouvoir le diffuser en République de Djibouti. Notre étude de cas concerne donc ce modèle (Photo 2.15) fabriqué par la société Yancheng Sangli Solar Energy Co. Ltd d'une valeur de 200 \$US

(acheté chez un revendeur de la place). La finalité même de notre projet étant de collecter des fonds pour permettre la fabrication de ces cuiseurs à Djibouti avec des matériaux locaux.

Photo 2.15 : cuiseur papillon



2.3.2.3 Brève description du cuiseur solaire étudié

Le cuiseur solaire "papillon" fait partie de la famille des concentrateurs solaires, il tire son appellation de sa structure même qui rappelle les ailes d'un papillon. En effet, les deux réflecteurs sont disposés de part et d'autre de la tige centrale. La surface réfléchissante est faite d'une fine couche de pellicule d'aluminium (type aluminium poli) collée sur les deux réflecteurs en fonte. Le poids total de cuiseur est d'environ 50 kg.

La maniabilité de ce cuiseur est assurée par deux systèmes de réglages l'un pour l'inclinaison et l'autre pour l'orientation ainsi qu'un système de roulage. Le réglage de l'horizontalité du support se fait par l'insertion d'une cale sous le pied métallique, l'angle d'inclinaison est assuré par une poignée munie d'une vis sans fin et enfin, l'ensemble de la structure (support et réflecteur) pivotant autour d'un axe vertical pour l'orientation du cuiseur. L'ajustement des rayons focalisés sous l'absorbeur est donc assez facile à obtenir.

Mais il est nécessaire de procéder à un réajustement des rayons solaires toutes les ½ heures de façon manuelle en fonction de la course du soleil pour que le flux solaire incident arrive constamment au point focal où se situe l'absorbeur et obtenir ainsi un fonctionnement optimum de ce cuiseur. Il est recommandé aux utilisateurs du cuiseur de peindre le fond des marmites en noir pour obtenir un meilleur rendement.

De plus, l'entretien de cuiseur n'est pas difficile, il suffit de remplacer les portions de la surface réfléchissante qui se détériorent avec le temps par un rouleau d'aluminium adhésif qui est fourni avec le cuiseur. Pour des raisons de sécurité, nous avons ajouté des taquets sur le support de la marmite afin d'éviter que celle-ci ne puisse glisser lors des manœuvres.

Enfin, il faut rappeler que le choix de ce modèle réside dans sa stabilité, sa durabilité, sa robustesse, sa rapidité de cuisson et son prix accessible pour les populations pauvres ou à faibles revenus.

2.3.2.4 Théorie des concentrateurs solaires

* Equations de bases

Dans la théorie des concentrateurs solaires (CHASSERIAUX), l'équation de base du fonctionnement est la suivante :

$$Pa = Pu + P' \quad (2.23)$$

Avec :

- Pa : la puissance incidente du rayonnement absorbée (W)
- Pu : la puissance utile (W)
- P' : les pertes thermiques (W)

De même :

$$Pa = E \cdot Sc \cdot a \cdot r \cdot \tau \quad (2.24)$$

Avec :

- E : l'éclairement énergétique au niveau du capteur (W/m²)
- Sc : la surface de captation des réflecteurs (m²)
- a : l'absorptivité des surfaces absorbantes (%)
- r : la réflectivité des surfaces réfléchissantes (%)
- τ : la transmissibilité des parois protectrices (%)

Pour l'équation du fonctionnement de notre cuiseur solaire papillon, le terme τ est absent de l'expression de la puissance du rayonnement absorbée Pa car il n'existe pas de parois protectrices sur sa surface réfléchissante.

La relation s'écrit alors :

$$Pa = E \cdot Sc \cdot a \cdot r \quad (2.25)$$

En effet, le coefficient d'absorption de la peinture noire est proche de 0.95. Or plus le taux d'absorption a est élevé, plus la puissance absorbée est importante.

De même pour la qualité des surfaces réfléchissantes. Plus le taux de réflexion r est élevé, plus la puissance absorbée sera importante. Il est donc important de nettoyer régulièrement les réflecteurs.

La puissance utile Pu est donnée par la relation suivante :

$$Pu = \rho \cdot v \cdot \zeta \cdot \left(\frac{\partial T}{dt} \right) \quad (2.26)$$

Avec :

- ρ : la masse volumique du fluide caloporteur (kg/m^3)
- v : le volume du fluide caloporteur (m^3)
- ζ : la capacité calorifique (ou chaleur spécifique) du fluide caloporteur (J/kg.K)

Le produit $\rho v \zeta$ représente la capacitance thermique du corps absorbant (J/K). Il faut noter que l'essentiel de la cuisine en République de Djibouti étant faite à base d'eau (riz et pâtes) et d'huile (frites et viandes), on aura donc le plus souvent $\rho_{\text{eau}} v_{\text{eau}} \zeta_{\text{eau}}$ et $\rho_{\text{huile}} v_{\text{huile}} \zeta_{\text{huile}}$ respectivement les capacitances thermiques de l'eau et de l'huile.

$$P' = Cp \cdot [T(t) + \Delta T - Ta] \quad (2.27)$$

Avec :

- Cp : la conductance des pertes thermiques* à la température moyenne suivante :
 $T_{\text{moy}} = T(t) + \Delta T$ (W/K)
- $T(t)$: la température du fluide caloporteur qui est fonction du temps (K)
- ΔT : le gradient de température correspondant au transfert de chaleur entre la surface absorbante et le fluide caloporteur (K)
- Ta : la température ambiante (K)

*Pour information, on donne la forme que prend généralement cette conductance, l'absorbeur étant le siège de déperditions thermiques par convection, rayonnement et conduction :

$$Cp = Sr \cdot (hr + hcv + hcond) \quad (2.28)$$

Avec :

- S_r : la surface réelle de l'absorbeur
- h_{cond} : la conductance
- h_r : le coefficient d'échange par rayonnement
- h_{cv} : le coefficient d'échange par convection

De fait, l'équation de base du fonctionnement du cuiseur solaire est :

$$E \cdot Sc \cdot a \cdot r = \rho \cdot v \cdot \zeta \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + Cp \cdot [T(t) + \Delta T - Ta] \quad (2.29)$$

Remarque :

Dans la formule précédente, l'éclairement énergétique E au niveau du capteur est considéré comme constant. C'est une approximation acceptable dans le cas du fonctionnement du cuiseur durant un faible intervalle de temps (lorsque l'on porte à ébullition un faible volume d'eau ou d'huile par exemple). Dans le cas contraire (pour des volumes plus importants), on prendra $E(t)$ ou, pour réduire la complexité du calcul, la valeur moyenne de E dans l'intervalle de temps considéré.

- * Calcul des performances du cuiseur papillon

Les caractéristiques techniques de ce cuiseur fournies par le constructeur sont résumées dans le tableau 2.14.

Tableau 2.14: Paramètres techniques principaux

Surface de captation	1,5 m ²
Distance focale	0,6 m
Rendement pour l'ébullition de l'eau	> 50 %
Puissance (pour une journée ensoleillée)	800 W
Poids	50 kg

Source: Yancheng Sangli Solar Energy Industrial Co., Ltd

Les bases de la physique et particulièrement de la calorimétrie permettent d'évaluer la puissance de cuisson qu'un cuiseur solaire peut engendrer par le rayonnement du soleil. Pour mesurer l'efficacité réelle du modèle "papillon", il suffit de mesurer par l'expérience la puissance utile à la cuisson puis de la comparer à la puissance incidente du rayonnement solaire au moment de la journée où on utilise le cuiseur.

Pour cela, nous disposons d'une théière que nous avons préalablement fait peindre en noir sur ses parois extérieures afin d'optimiser l'absorption des rayonnements reçus. On porte à ébullition un litre d'eau à température ambiante à l'intérieur de cette théière dans laquelle on a préalablement immergé un thermocouple type k de manière à relever les valeurs de la température au cours du temps. On obtient ainsi une courbe de variation de la température en fonction du temps $T = f(t)$.

On peut répéter l'opération plusieurs fois aux mêmes heures de la journée (pour garder une valeur de la puissance incidente constante) afin d'améliorer la précision du calcul. Par la suite, on détermine la puissance moyenne de cuisson dans l'intervalle de temps Δt à partir de la formule suivante :

$$Q_i = \frac{(T_2 - T_1) \cdot m \cdot C_p}{\Delta t} \quad (2.30)$$

Avec :

- Q_i : puissance moyenne de cuisson dans l'intervalle de temps Δt (W)
- T_2 : température moyenne finale du volume d'eau (°C)
- T_1 : température moyenne initiale du volume d'eau (°C)
- m : masse d'eau (kg)
- C_p : chaleur spécifique de l'eau (4186 J/kg.°C)
- Δt : intervalle de temps Δt durant lequel sont relevées les valeurs de température (s)

Cette formule est la forme intégrale de la puissance utile dans l'équation de base du fonctionnement des concentrateurs vue précédemment (2.29). C'est une moyenne puisque cette formule ne prend en compte que les états initiaux et finaux de l'intervalle de temps considéré et pas les différentes fluctuations qui peuvent exister entre ces états.

Pour évaluer les performances de ce cuiseur à Djibouti, nous allons procéder à la comparaison entre le temps "théorique" donné par le fabricant pour porter 1 litre d'eau à ébullition et le temps "réel" obtenu sur site.

Les données du constructeur indiquent une puissance de 800 W (Tableau 2.14). En utilisant la relation (2.30), on aura :

- $Q_i = 800 \text{ W}$
- $T_2 = 100^\circ\text{C}$
- $T_1 = 35^\circ\text{C}$ (température ambiante)
- $m = 1 \text{ kg}$
- $C_p = 4186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$
- $\Delta t = t_2 - t_1$ avec $t_1 = 0$ donc $\Delta t = t$ en seconde (s)

L'application de la formule donne les résultats suivants :

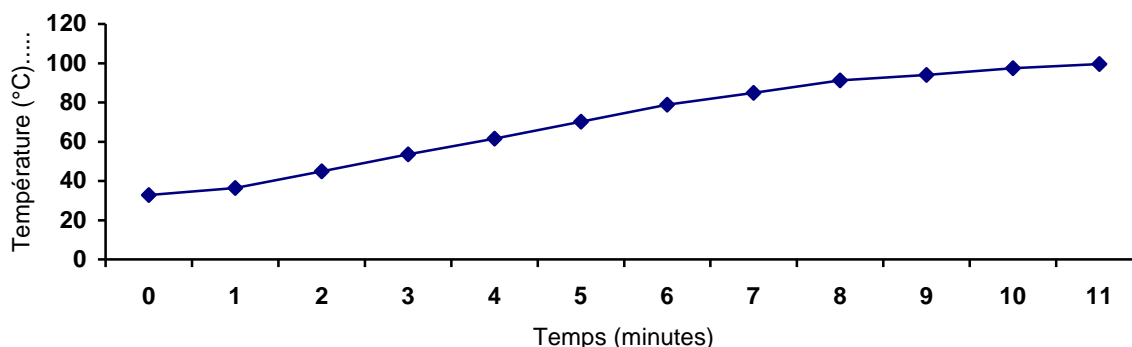
$$t_{\text{théorique}} \approx 6 \text{ min} \quad (2.31)$$

Nous allons maintenant d'évaluer le temps réel $t_{\text{réel}}$ du cuiseur, les meilleurs résultats obtenus sont consignés dans le tableau 2.15 suivant qui donne les prises de mesures (toutes les minutes) faites avec le multimètre, en position température, muni d'une sonde thermocouple K dont l'extrémité est immergée dans un litre d'eau contenu dans la théière.

Tableau 2.15 : Evolution de la température de l'eau en fonction du temps

Temps (minutes)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Température (°C)	32,8	36,4	44,9	53,6	61,5	70,2	78,8	84,9	91,3	94,1	97,5	99,6

Graphique 2.3: Courbe de variation de la température en fonction du temps



Il faut noter que le temps $t = 0$ correspond à la température ambiante. En réalité, si l'on voulait affiner les paramètres, on aurait dû considérer l'existence de 2 phases dans le laps de temps considéré : la 1^{ère} phase correspond au temps mis pour que la montée en température puisse démarrer et la 2^{ème} phase correspond proprement à la montée en température du liquide jusqu'à la phase de stagnation où débute la cuisson. La montée en température est

schématisée ici par la partie linéaire de la courbe (entre les temps $t = 1$ min et $t = 8$ min), soit 7 min seulement.

Mais par souci de globalité et donc de prise en compte des conditions expérimentales, on considère "le temps mis pour que l'eau commence à bouillir". On constate ici que le cuiseur porte à ébullition un litre d'eau au bout de onze minutes seulement, soit près du double du temps théorique.

$$t_{\text{réel}} = 11 \text{ min} \quad (2.32)$$

Les raisons qui expliquent cet écart sont multiples et peuvent être dues à :

1. La qualité de la surface réfléchissante : le papier aluminium recouvrant les réflecteurs présentait, lors du test, des parties détériorées et était, par endroit, recouvert d'une fine couche de poussière difficile à enlever (réduction du coefficient de réflexion r),
2. La mauvaise qualité de la peinture noire recouvrant le fond de la théière utilisée est aussi à prendre fortement en compte (réduction du coefficient d'absorption α),
3. La mauvaise qualité de l'air ambiant de la ville de Djibouti, fortement polluée par des particules aérosols provenant en grande partie des vents de sable.
4. Les pertes énergétiques classiques que l'on a vues précédemment et enfin, les pertes énergétiques et les imprécisions dues aux manipulations lors de l'expérience.

Cependant, ce test se rapproche des conditions réelles d'utilisation dans le pays et notamment en zone rurale. En effet, dans un premier temps, l'entretien de la couche d'aluminium réfléchissante n'est pas régulier comme nous l'avons constaté au cours de la phase pilote. Dans un second temps, cette pellicule d'aluminium est soumise aux conditions climatiques rigoureuses du site (températures ambiante dépassant les 38°C entre 13h30 et 15h30 à cette période).

D'autres facteurs entrent également en jeu tels que le manque d'entretien (les femmes ne la nettoient pas après utilisation), la curiosité des enfants et des animaux domestiques que ces populations élèvent. Enfin, les récipients utilisés ne sont pas toujours peints en noir (ou parfois la peinture n'est pas renouvelée) et sont souvent ouverts pour la bonne pratique de la cuisine (ajout d'ingrédients, vérification de l'état de cuisson, etc...).

* Discussion sur la forme de la courbe :

En effectuant une régression linéaire, on trouve un coefficient de régression qui vaut :

$$R^2 = 0.9897 \quad (2.33)$$

La courbe se rapproche donc fortement d'une droite. C'est en accord avec la théorie, puisque l'équation de base des concentrateurs (7) indique la linéarité des pertes thermiques bien que ce ne soit, en fait, jamais le cas dans la réalité à cause de la complexité des échanges thermiques mis en jeu.

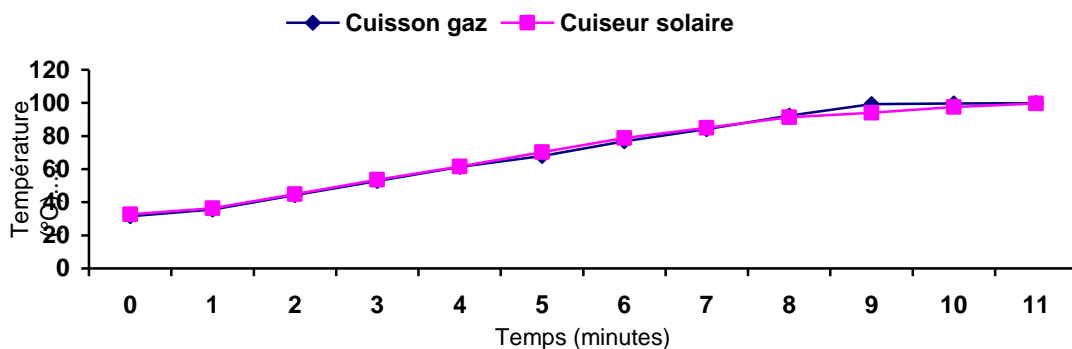
Cependant, pour des intervalles de temps relativement courts, sur lesquels on peut considérer l'éclairement énergétique E constant, on remarque que cette approximation est acceptable. Aussi, les pertes les plus aléatoires sont celles par convection car la vitesse du vent varie constamment au cours du temps. Les quelques fluctuations qui peuvent, toutefois, exister entre chaque point de la courbe sont dues aux pertes par évaporation et convection lors de la prise de mesure, celle-ci ayant nécessité le retrait du couvercle de l'absorbeur pour plonger la sonde thermométrique dans l'eau.

Par ailleurs, pour avoir une idée de la puissance développée par le cuiseur "papillon", nous avons comparé, ci-dessous, avec la cuisson au gaz classique en intérieur (pour le même volume d'eau de un litre).

Tableau 2.16 : Test avec la gazinière (Volume d'eau = 1 litre)

Temps (minutes)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Température (°C)	31,6	35,6	44,4	52,8	61,3	68,0	76,8	84,1	92,4	99,2

Graphique 2.4 : Variation de la température au cours du temps



Ici, la gazinière (gaz butane) fait bouillir l'eau en 9 min alors que le cuiseur le fait en 11 min. La comparaison est intéressante, car si le cuiseur apparaît comme étant moins puissant, il faut rappeler que les conditions en intérieur et en extérieur sont totalement différentes, principalement au niveau des courants de convection (Vent). Les pertes thermiques sont donc plus importantes en extérieur : on remarque donc que le cuiseur possède une forte capacité de cuisson, quasi à égalité avec les techniques traditionnelles.

On peut même pousser plus loin la comparaison en affinant l'analyse par l'observation des deux courbes : la montée en température débute à partir de la 1^{ère} minute pour les deux modes de cuisson (on voit que les deux courbes se confondent à partir de ce point) et ce, jusqu'à la 8^{ème} minute pour le cuiseur solaire et jusqu'à la 9^{ème} minute pour la gazinière. On aurait donc respectivement 7 min et 8 min tout en sachant que les conditions ne sont pas les mêmes. Cette analyse montre que si le cuiseur était placé dans les mêmes conditions que la gazinière, il aurait été plus performant.

Afin d'évaluer l'efficacité du cuiseur, nous devons calculer la puissance moyenne de cuisson par la relation (2.30) :

$$Q_i = \frac{(T_2 - T_1) \cdot m \cdot Cp}{\Delta t}$$

En reprenant les valeurs correspondantes du tableau 2.15, on aura donc :

$$Q_i = \frac{(99,6 - 32,8) \cdot 1 \cdot 4186}{(11 - 0) \cdot 60}$$
$$Q_i = 424 \text{ W} \quad (2.34)$$

Nous déterminons ensuite, la puissance incidente :

Pour cela, nous considérons une valeur consensuelle et constante de l'éclairement énergétique E de 1000 W/m². Pour les coefficients d'absorption de la peinture noire et le coefficient de réflexion de l'aluminium poli, il est pris les valeurs habituelles qui sont respectivement de 0,9 et 0,6.

En utilisant la relation (2.25), on aura :

$$P_a = 1000 \cdot 1,5 \cdot 0,9 \cdot 0,6$$
$$P_a = 810 \text{ W} \quad (2.35)$$

Le rendement théorique du cuiseur est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{Q_i}{P_a} \quad (2.36)$$

On utilisant les valeurs obtenues (12) et (13), nous aurons le résultat suivant :

$$\eta = \frac{424}{810} = 0,523 \quad (2.37)$$

En comparant ce résultat avec celui fourni par le constructeur du cuiseur papillon (tableau 2.14), on abouti au même résultat ($\eta > 50\%$).

Ce calcul, bien qu'étant une approximation, n'est là que pour donner une idée des futures performances du système dans son fonctionnement réel dans le pays. Par ailleurs, il est important, ici, de bien différencier les performances du cuiseur de ses capacités de cuisson. En effet, bien que son efficacité soit moyenne, la relative grande taille du système lui permet, malgré tout, de rester une solution crédible au remplacement du bois de feu pour la cuisson des aliments.

On constate également que, malgré les performances moyennes du modèle "papillon", du fait du choix particulier de sa conception (en particulier concernant la pellicule d'aluminium constituant les surfaces réfléchissantes qui se détériore facilement) et des conditions d'utilisation, celui-ci est un cuiseur tout à fait adapté aux conditions difficiles existantes en République de Djibouti tant par sa robustesse que par ses capacités de cuisson qui restent, tout de même, importantes.

2.3.2.5 Les avantages des cuiseurs solaires_

* Pour la santé des populations :

- Il évite les maladies des yeux et des poumons liées à l'exposition aux fumées pendant la préparation des repas. Les enfants sont particulièrement exposés et sensibles.
- Il évite les maux de dos et de colonne vertébrale liés au portage du bois.
- Il limite les diarrhées, source majeure de mortalité infantile, en permettant la pasteurisation de l'eau.

* Pour l'environnement :

- Il réduit le déboisement et l'érosion des sols qui s'ensuit.
- Il permet de diminuer l'émission des gaz à effet de serre (CO₂).
- La biomasse, herbes et bouses, restent utilisables en tant qu'engrais naturels pour enrichir le sol.

* Pour l'économie familiale et locale :

- Il réduit les dépenses de combustible (bois, charbon, gaz butane, kérosène).
- La fabrication des cuiseurs crée de l'emploi local, pour les menuisiers mais aussi pour les femmes, qui peuvent par exemple vendre des plats cuisinés ou des gâteaux au marché.

* En termes de progrès social :

Les femmes et les enfants sont "libérés" de la corvée de bois et de la surveillance de la cuisson. Ces heures deviennent alors disponibles pour l'éducation, la formation, les soins à la famille...etc.

Au bilan, la promotion des cuiseurs solaires s'inscrit donc parfaitement dans une démarche de développement durable, par les effets positifs qu'ils engendrent dans les domaines sociaux, économiques et environnementaux à l'échelle locale autant que nationale.

CHAPITRE 3

LA GEOTHERMIE



Tests de production du puit Assal 3

Source : ISERST, 1987

3.1 Les ressources géothermiques

D'un point de vue géologique (fig. 3.1), c'est l'étude des mécanismes des mouvements des plaques (théorie de la tectonique des plaques) qui a amené de nombreux scientifiques à s'intéresser à Djibouti qui se situe à la frontière de trois grands rifts (Barberi et al. 1975). C'est la zone du Rift Africain, un rift océanique émergé (fig. 3.2). On ne rencontre les rifts océaniques émergés que dans deux endroits au monde. L'un étant situé en Islande : Rift de KRAFLA et l'autre étant celui d'ASSAL à Djibouti (TRAINEAU et al. 1984).

Cette jonction structurale est unique au monde et la région est le point focal de flux thermique très élevé avec une épaisseur de la couche terrestre superficielle estimée entre 3 et 5 km. Ce qui se traduit dans cette région par une activité volcanique très intense. C'est en outre une zone de prédilection pour les phénomènes telluriques.

La République de Djibouti est le siège d'importants bouleversements géologiques : la naissance en 1978 du volcan "Ardoukoba" est l'une des nombreuses manifestations de ce choc titanesque. À cette occasion, l'Afrique et la péninsule arabique se sont écartées de 1,20 m et une faille de 12 km de long s'est ouverte entre le lac Assal et la baie de Goubbet (TAZIEFF et al. 1979).

Les ressources géothermiques se situent principalement au niveau des zones de rift. On les trouve donc sur l'axe Nord-est / Sud-ouest en partant d'Obock jusqu'au Lac Abbhé (fig.3.3) et en passant par la plaine de Gaggadé. Elles sont surtout concentrées dans la zone centrale du rift entre le Lac Assal et le Ghoubbet. Une zone d'une superficie de plus de 150 km² qui a fait l'objet de nombreuses études scientifiques (géologique, géophysique, géochimique et géothermique) depuis une trentaine d'année. On y observe des failles et des phénomènes de fissuration et fracturation qui témoignent d'un volcanisme récent et actif (fig.3.5).

Il ressort que la région, essentiellement volcanique, (Erta'ale en Ethiopie, Ardoukoba à Djibouti,..) présente de nombreux indices géothermiques tels que fumerolles et sources chaudes.

On estime qu'à l'échelle géologique, dans quelques millions d'années, naîtra petit à petit dans cette région l'océan érythréen.

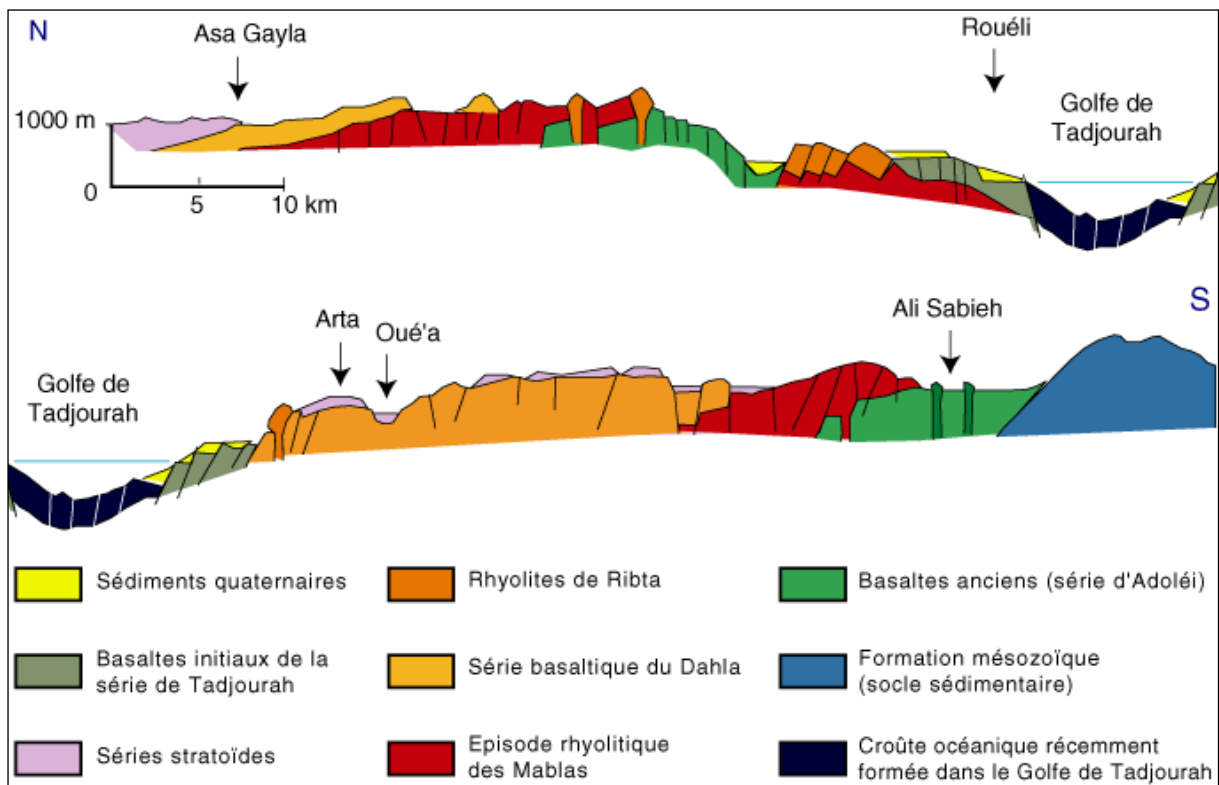
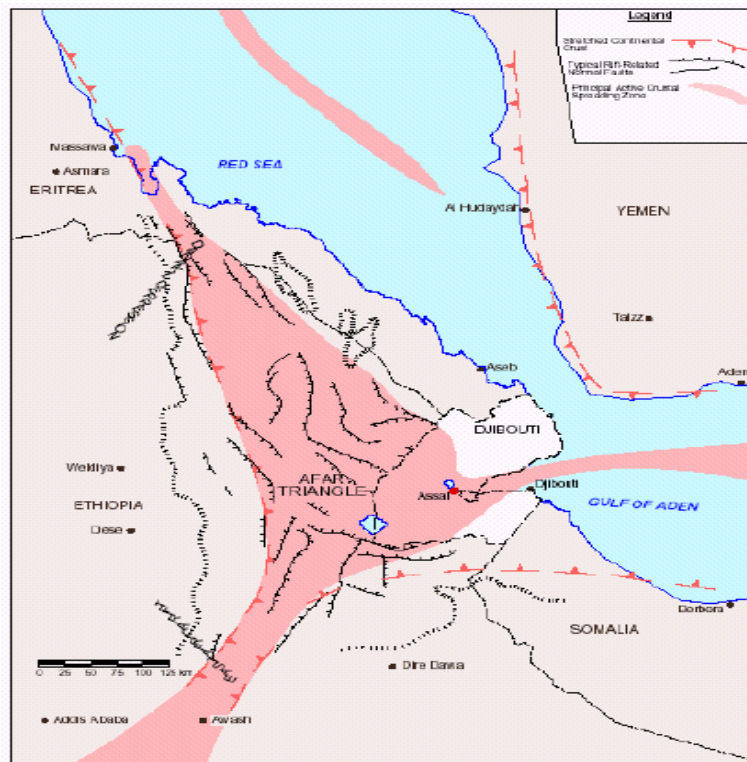


Figure 3.1 : Coupe géologique schématique Nord-Sud de Djibouti (source : J.P. BERGER)



Source: GDA, 2001

Légende:

- Limite plaque continentale
- Fractures et failles
- Zones de rifts

Figure 3.2 : Carte simplifiée du Rift africain

3.1.1 Les manifestations géothermiques :

* Au Nord :

Les manifestations de surface sont très rares dans cette partie, il faut juste signaler la présence d'une fumerolle (ou mofette ?) avec une température de 46°C au Sud Est de **Dorra** et une autre avoisinant les 40°C dans la zone de **Obock**. On y trouve également quelques sources chaudes avec des températures allant de 57°C à 86°C.

C'est en se rapprochant de la zone de **Tadjourah** que l'on rencontre deux sources chaudes ayant des températures de l'ordre de 48°C et quelques mofettes dont la température est comprise entre 38 et 47°C à **Rouéli**. On note également la présence d'une source chaude à la même température à **Ni'illé** signifiant littéralement « eau chaude » en langue afar (STIELTJES L. – 1978).

* Au Sud :

C'est principalement dans le Sud-ouest entre le **Lac Abbé** et le plateau de **Gaggadé** que l'on trouve de très nombreux indices géothermiques, on peut noter l'existence de cinq (5) champs de fumerolles :

Figure 3.3 : Localisation des ressources géothermiques en République de Djibouti



- Dans la zone de Hanlé :

C'est une vaste plaine de plus de 35 km de long sur 20 km de large. C'est précisément à **Dalahamallou** (42°05'E, 11°21'N) que l'on trouve des fumerolles au pied de la faille normale bordant Hanlé au Sud-ouest. On note la présence à **Garabbayis** (42°09'E, 11°24'N) de deux fumerolles importantes localisées au niveau de la faille normale bordant Hanlé au Nord-est (AQUATER, 1982). A l'oued **Dimbir** (42°15'E, 11°28'N), on signale trois zones fumerolliennes importantes situées sur une grande faille transverse, au dessus de l'oued.

- Dans la zone de Gaggadé :

Il faut signaler la présence de deux fumerolles au pied de la faille normale principale bordant le Gaggadé au Sud-ouest. On trouve également une fumerolle isolée au Nord-Est de cette plaine, plus exactement dans la région de **Galafi**.

- Au Lac Abbhé. :

C'est principalement sur le pourtour Nord-est du lac que l'on rencontre des sources chaudes et quelques fumerolles aux senteurs de soufre qui ont donnés son nom au lac (Abbhé signifiant "pourri" en langue Afar). Les températures de ces sources ne dépassent pas les 87°C. Ce lac est mitoyen entre l'Éthiopie (partie Ouest) et Djibouti (partie Est). Des concrétions de calcaires forment des cheminées en formes d'aiguilles de quelques mètres à cinquante mètres de hauts et sont visibles de très loin.

- * Au Centre

C'est la principale zone d'intérêt du pays, elle a fait l'objet de nombreuses études géochimiques, géophysiques et tectoniques. Les indices géothermiques sont nombreux et concentrés sur trois zones.

- Zone du Ghoubbet :

Le Ghoubbet-Al-Kharrab est l'extrême pointe du golfe de Tadjourah qui vient mourir non loin du lac Assal et de la zone volcanique. La zone fumerollienne la plus importante se situe dans la partie Sud-ouest entre les oueds **Ana'ale** et **Afay**. De nombreuses altérations hydrothermales y sont associées (MARREC et al. 1981).

La plupart des fumerolles ont un faible débit avec des compositions gazeuses proches de celles de l'atmosphère. Néanmoins, on trouve une fumerolle à 108°C avec un fort débit et une composition chimique caractéristique des champs géothermiques à haute température (GADALIA et al. 1982). D'autres fumerolles entre 99 et 100°C sont à signaler dans la partie amont de l'oued **Ana'ale**.

Enfin, on note de part et d'autre d'**Abou Maya** des zones fumerolliennes non négligeables :

- Au nord, à **Baddi Géra**, on trouve une fumerolle à 72°C,
- Au sud, dans les parties basses des oueds **Moulhoulé Biyaley** et **Moulhoulé Ommané**, deux zones hydrothermalisées avec sorties de vapeurs de faible débit à 87°C.

- Zone d'Arta :

Les manifestations géothermiques sont limitées à quelques mofettes localisées le long de l'oued **Qiqley**. Les températures observées ne sont pas significatives et tournent autour de 37°C.

- Zone d'Assal :

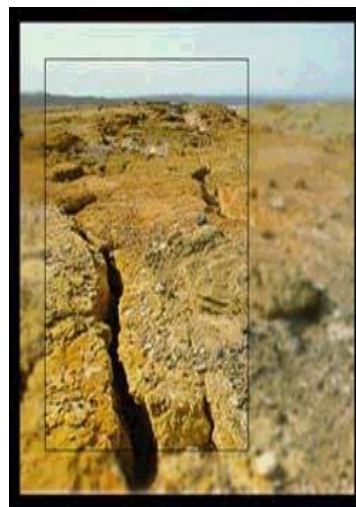
Avec une altitude de 157 m en dessous du niveau de la mer, la lac Assal est le point le plus bas du continent africain et le 3^{ème} du monde après la Mer Morte qui descend à – 400 m et le lac de Tibériade qui va jusqu'à – 208 m. Il est séparé du Ghoubbet par une zone volcanique de plus de 11 km. Il est alimenté en eau de mer par des lignes de fractures souterraines, ce flux est estimé à 20 m³/s. Ce qui compense largement l'intense évaporation (5800 mm/an) à l'origine des grands dépôts de sel actuellement exploités de façon semi-industrielle.

C'est la zone où sont concentrées l'essentiel des ressources géothermiques en République de Djibouti. En partant de la rive Nord-est du Lac d'Assal hyper salé (35 g/L) jusqu'au Sud-Ouest du Ghoubbet et en passant par la multitude de failles et fractures, on dénombre des dizaines de champs fumerolliens et de sources chaudes (fig.3.4). Il existe en particulier d'autres manifestations fumerolliennes dans l'ancien cratère du lac de lave où les températures à la surface n'excèdent les 45°C.

Figure 3.4 : Sources chaudes de KORILI



Figure 3.5 : Faille au rift d'Assal



Source : Office du Tourisme (ONTD).

3.1.2 Travaux réalisés

* Reconnaissances préliminaires

En raison de la faible superficie du territoire (23200 km²), on estime aujourd'hui que les principales zones de manifestations géothermiques ont fait l'objet de reconnaissances préliminaires soit sans objectif géothermique (lors de campagnes scientifiques), soit à but purement géothermique.

La plupart des explorateurs de la fin du 19^{ème} siècle (Arthur RIMBAUD, 1885) et au début du 20^{ème} siècle (Henri de MONFREID, 1914) ont tous signalé dans leurs récits de voyages des manifestations de surfaces tels que les sources thermales.

Les reconnaissances scientifiques ont réellement débutés entre 1929 et 1932 avec les expéditions de LAMARE et du père TEILHARD de CHARDIN qui ont décrit très brièvement la zone du rift. C'est à BESAIRIE (1945) que l'on doit, avec la première carte géologique au 1/400.000^{ème}, une reconnaissance globale du pays. Il faudra toutefois attendre l'année 1967 avec la campagne scientifique conjointe du CNR (Italien) et CNRS (Français) pour qu'une étude tectonique, sans but géothermique, soit entreprise dans la région d'Assal-Ghoubbet.

Les 1^{ères} campagnes d'exploration de surface à but non géothermique ont été menées par le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) à partir de 1970 dans la zone d'Assal-Ghoubbet. Elles débutèrent par des études de géologie, des mesures géophysiques (gravimétrie, radiométrie infrarouge, aéro-magnétisme, magnétotelluriques, sismiques,..) et géochimiques.

* Campagnes d'exploration géothermique :

Les travaux d'exploration géothermique à Djibouti ont été réalisés principalement par deux organismes étrangers associés à l'ISERST (Institut Supérieur d'Etude et de Recherche Scientifique et Technique) de Djibouti actuellement dénommé CERD.

La 1^{ère} phase s'est déroulée de 1970 à 1985, c'est le BRGM (France) qui a mené les différentes campagnes scientifiques.

La 2^{ème} phase s'est déroulée de 1985 à 1992, le gouvernement djiboutien a intensifié et élargi les travaux grâce notamment à la coopération multilatérale et bilatérale (gouvernement italien notamment). C'est à un bureau d'étude d'ingénierie sous-sol italien, AQUATER, qu'a été confiée l'immense tâche de valider, de poursuivre les anciens travaux et de prospecter de nouvelles zones.

Seules les zones d'Assal-Ghoubbet et de Hanlé ont fait l'objet de travaux de reconnaissances par forages.

- Zone d'Assal-Ghoubbet

En 1970, un 1^{er} lever aéro-magnétique fut réalisé par une équipe de l'Université de Newcastle (GRIDLER et al. 1970) suivi la même année par une cartographie des dépôts de travertin hydrothermaux (STIELTJES, 1971).

Lors de la campagne CNR-CNRS de 1971, un survol de la zone avec radiométrie infrarouge fut effectué. Il fut suivi en 1972 par des sondages électromagnétiques MELOS et conclu par une étude des manifestations de surfaces (LOPOUKHINE, 1972). Les mesures du flux géothermique et les analyses géochimiques en profondeur ont débuté par la réalisation de 17 forages de gradient allant de 50 à 180 m lors de la campagne de 1972-73. Pour des raisons d'accessibilité, seule la partie Sud-ouest du Ghoubbet fût explorée.

De 1973 à 1979, des études géologiques détaillées et concentrées principalement sur le rift d'Assal mais également élargies aux autres zones d'intérêt géothermiques débutèrent (VARET et al.1974 ; STIELJES et al.1975 ; BARBERI et al.1979 ; ...). C'est à l'issue de ces études que des cartes géologiques détaillées au 1/100.000^{ème} de la République de Djibouti furent élaborées en collaboration avec des géologues Djiboutiens de l'ISERST. Toutes ces études ont montré l'intérêt géothermique de la région d'Assal-Ghoubbet.

Elles se sont concrétisées par la réalisation des deux forages d'exploration. Les travaux des deux premiers forages d'exploration réalisés par le BRGM ont eu lieu entre fin 1974 et début 1975, elles se sont soldés par la réalisation d'Assal 1 (42°28'36 "E ; 11°32'31"N) avec une profondeur de 1316 m et d'Assal 2 (42°28'52"E ; 11°32'27"N) avec une profondeur de 1554 m.

A partir de 1980, les autorités nationales prennent la décision de développer le champ géothermique d'Assal. De nouvelles campagnes d'exploration sont lancées avec le concours financier de plusieurs bailleurs de fonds comme la BAD (Banque Africaine de Développement), le PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement), la Banque Mondiale,... etc.

Le BRGM reprend les travaux avec tout d'abord une synthèse des données disponibles (VARET et al. 1980) suivi par des recherches d'indices géothermiques en profondeur par prospection électrique (MARREC et al. 1981). De 1981 à 1982, des études approfondies du fluide géothermal du puits d'Assal 1 et de son comportement en production furent entreprises (BARBUT et al. 1982).

Ces travaux ont été suivis par une exploration géochimique de la zone du Ghoubbet (GADALIA et al. 1982) qui s'est poursuivie avec une reconnaissance géothermique par prospection gravimétrique, électrique, audio magnétotellurique (PUVILLAND et al. 1983). Des séries de mesures sur les deux forages ont été faites. Sur Assal 1, l'étude des dépôts de colmatage (CORREIA et al. 1983) et mesures de diagraphies (AFZALI, 1984). Sur Assal 2, une étude minéralogique et isotopique des cuttings (FOUILLAC et al. 1985).

Entre 1984 et 1992, la zone d'Assal-Ghoubbet fut explorée de nouveau par AQUATER. Les travaux se sont concrétisés par la réalisation de 3 nouveaux forages, Assal 3, 4 et 5 :

- Assal 3, puits producteur non dévié, distant de moins de 100 m de Assal 1 et ayant la même profondeur.
- Assal 4 avec une profondeur de 2013 m et situé à plus de 1000 m au Nord-est d'Assal 1.
- Assal 5 avec une profondeur de 2019 m, situé en plein centre du rift plus précisément sur le flanc Est du Lac de Lave.

Enfin le dernier forage Assal 6 situé dans le même périmètre que Assal 1 et 3 fut réalisé en fin 1988 par l'ISERST et cette fois en collaboration avec des organismes nationaux comme le Service de l'hydraulique, le Génie Rural,...etc. Les travaux de ce dernier forage furent entièrement financés par le gouvernement djiboutien (fig. 3.6).

- Zone de Hanlé - Gaggadé:

La zone de Hanlé – Gaggadé, au Sud-ouest de Djibouti, est une zone également connue pour ses nombreuses manifestations géothermiques, c'est une zone large de plus de 50 km. Le 1^{er} forage de gradient a été réalisé en 1982 par une équipe italienne du CNR, suivi en 1984 par deux autres forages de gradient réalisés par le BRGM.

Entre 1985 et 1986, seule la zone de Hanlé a été explorée de façon plus approfondie par AQUATER qui a poursuivi les travaux en profondeur avec la réalisation de deux forages d'exploration Hanlé 1 et Hanlé 2 ayant une profondeur respective de 1623 m et 2020 m.

- Zone du Lac Abbhé :

A partir de 1986, les campagnes d'exploration s'élargissent jusqu'à la région du Lac Abbhé, qui présente également des indices géothermiques. Une campagne de géophysique par télédétection avec l'aide des données fournies par le satellite LANDSAT MSS a été faite (GIRAUD, 1986).

3.1.3 Résultats des travaux :

- * Zone d'Assal-Ghoubbet :

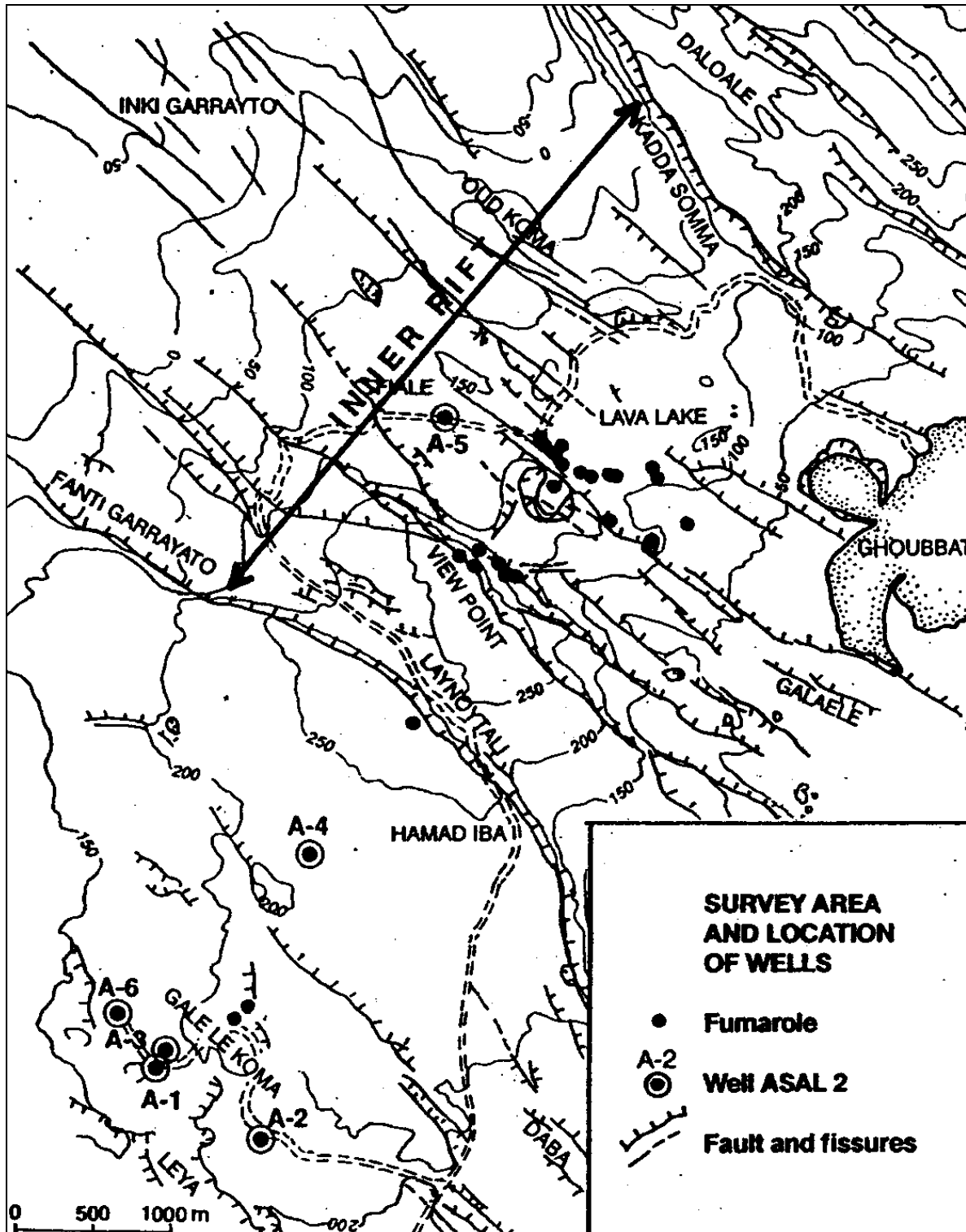
Les résultats des différentes campagnes CNR-CNRS et BRGM ont montré que la région la plus riche en termes de ressources géothermiques est sans conteste celle d'Assal-Ghoubbet, la zone active du rift.

Les deux forages Assal 1 et 2 présentent des températures élevées en profondeur allant jusqu'à 345°C. Malheureusement, des problèmes de salinités élevées de la ressource (taux de minéralisation de 110 g/l) conduisent à des dépôts importants dans les puits, réduisant considérablement les possibilités d'exploitation du fluide.

Les essais de production du réservoir profond du puits Assal 1 ont donné un débit total (eau + vapeur) de 135 tonnes/heures à 220°C et 15 bars. On a estimé sa capacité de production à 20 MWe sur le long terme. Ce puits a recoupé un réservoir superficiel à 600 m de profondeur ayant une température moindre (180°C) et une salinité plus faible compatible avec une exploitation commerciale (50 g/l).

Le gradient géothermique observé présente une anomalie thermique caractéristique des grands champs géothermiques mondiaux, il est de $25^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$. Les valeurs du flux géothermique obtenues sont de $3,9 \text{ Mcal/cm}^2/\text{s}$. Dans la moitié Sud-ouest du rift, les valeurs les plus élevées du gradient superficiel se situent au pied de l'escarpement sud avec 2.9 à $5.9 \text{ }^{\circ}\text{C} / 10 \text{ m}$. L'eau de mer circulant dans les fractures au centre du rift tend à abaisser le gradient superficiel.

Figure 3.6 : Emplacement des six forages géothermiques d'Assal



Source : (Arnason et Flovenz, 1995)

Un modèle initial du champ géothermique a été proposé par le BRGM au cours de ces premiers travaux (fig.3.7). On estime obtenir de la vapeur sèche dans la partie centrale du réservoir localisé entre 1000 et 2000 m de profondeur dans les laves de la série stratoïde couvrant une superficie d'environ 15 km² (CORREIA et al. 1983). Le volume du réservoir n'a toutefois pas été quantifié.

Malgré les premiers résultats de ces essais très encourageants, des problèmes de dépôts (composés sulfurés et silicates ferreux), de corrosions et de perméabilité de la zone prospectée sont très vite apparus. Ce qui ne laissait pas augurer d'une productivité satisfaisante et continue dans le temps.

Les travaux de prospection se sont donc orientés vers l'intérieur du rift pour rechercher des zones perméables. Aussi, des solutions furent envisagées pour lutter contre ces problèmes de dépôts difficilement maîtrisables à l'époque notamment grâce à l'utilisation d'inhibiteurs contre les composés sulfurés et les silicates ferreux.

AQUATER a tenu compte des recommandations des travaux antérieurs du BRGM. Ce qui explique l'emplacement des trois nouveaux forages. Les puits ont été forés dans le centre du rift avec Assal 4 et Assal 5. Seul Assal 3 est situé dans le même périmètre que les deux anciens Assal 1 et Assal 2. Les résultats n'ont malheureusement pas confirmé les projections énoncées puisque la zone centrale du rift s'est révélée également peu perméable.

Néanmoins les résultats ont confirmé la très haute température de la ressource, les puits Assal 4 et Assal 5 se sont révélés peu producteurs avec un fluide diphasique à dominant liquide (saumure) et une température de plus de 350 °C (tableau 3.1).

Voici un tableau récapitulatif des résultats des différents forages :

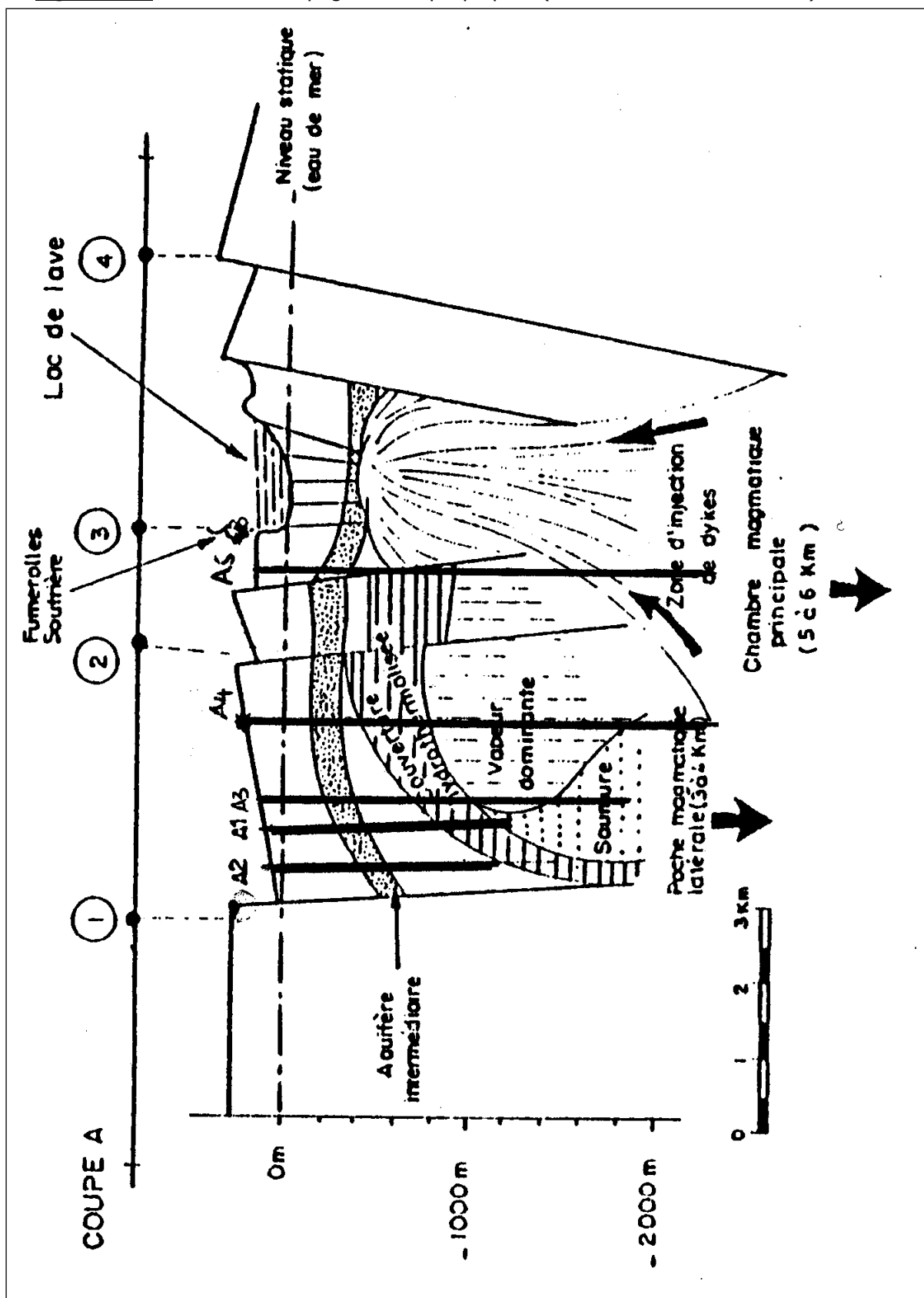
Tableau 3.1 : Caractéristiques des puits de la zone d'Assal-Goubbet

Noms du Puits	Profondeur (m)	Température maximale (°C)	Débit total (t/h)	Salinité (g/l)
Assal 1	1146	260	135	120
Assal 2	1554	233 (à 933 m)	-*	-
Assal 3	1316	264	350	130
Assal 4	2013	359	-	180
Assal 5	2105	359	-	-
Assal 6	1761	265	150	130

* : non déterminée

C'est tout naturellement que le choix du site du dernier forage Assal 6 s'est porté sur l'ancienne zone des deux premiers forages avec, cette fois, la décision de descendre encore plus profondément, au delà des 2500 m. Malheureusement les travaux se sont brusquement arrêtés sans que l'on puisse dépasser 1761 m, d'une part pour des problèmes d'avaries survenus sur les machines et d'autre part du fait de l'insuffisance des investissements engagés

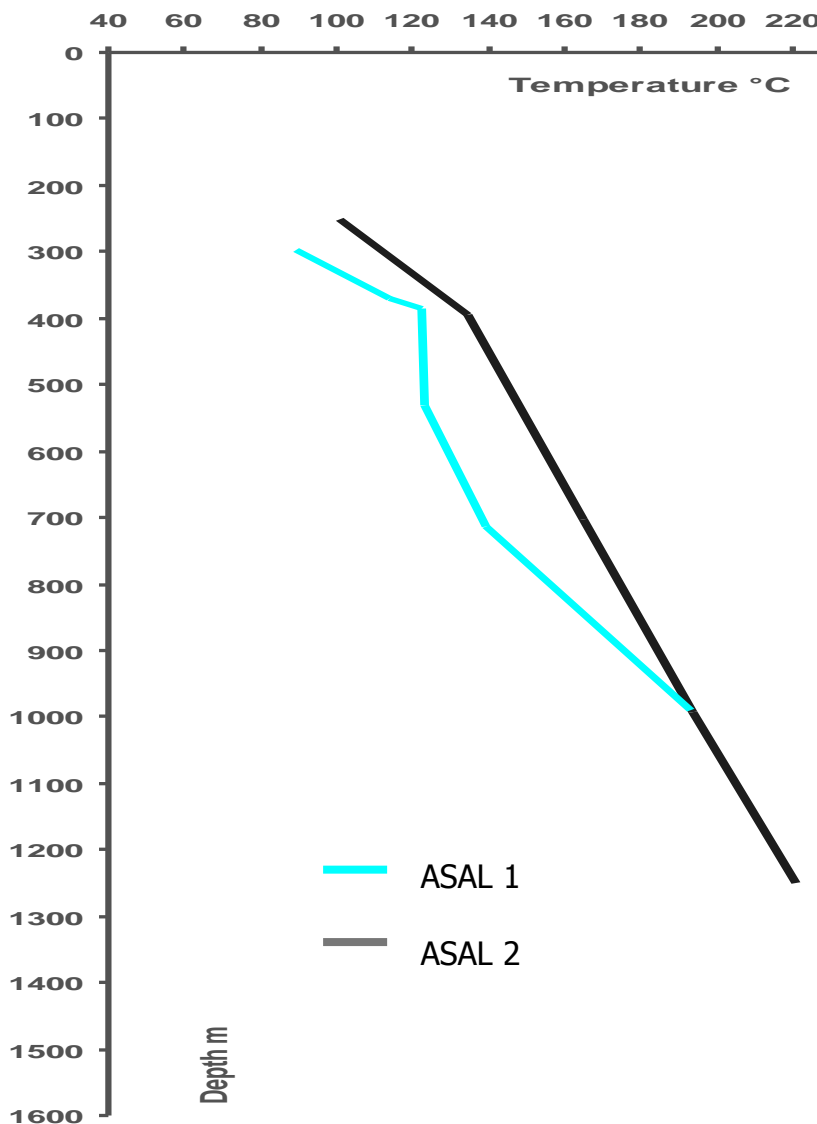
Figure 3.7 : Modèle de champ géothermique proposé (CORREIA et al. 1983 modifié)



Cette deuxième phase des travaux a permis non seulement de conforter les premières estimations sur le potentiel de la zone mais d'affiner d'autres mesures, c'est ainsi que la profondeur de la poche magmatique a été réévaluée. Elle se situe entre 3 et 5 km de profondeur. Les résultats de ces six forages ont montré l'existence d'un réservoir géothermique intermédiaire situé entre 400 et 600 m de profondeur avec des températures comprises entre 130 et 190 °C et avec une salinité moindre tandis que le réservoir profond se situera au-delà des 2000 m de profondeur avec des températures comprises entre 250 et 360°C.

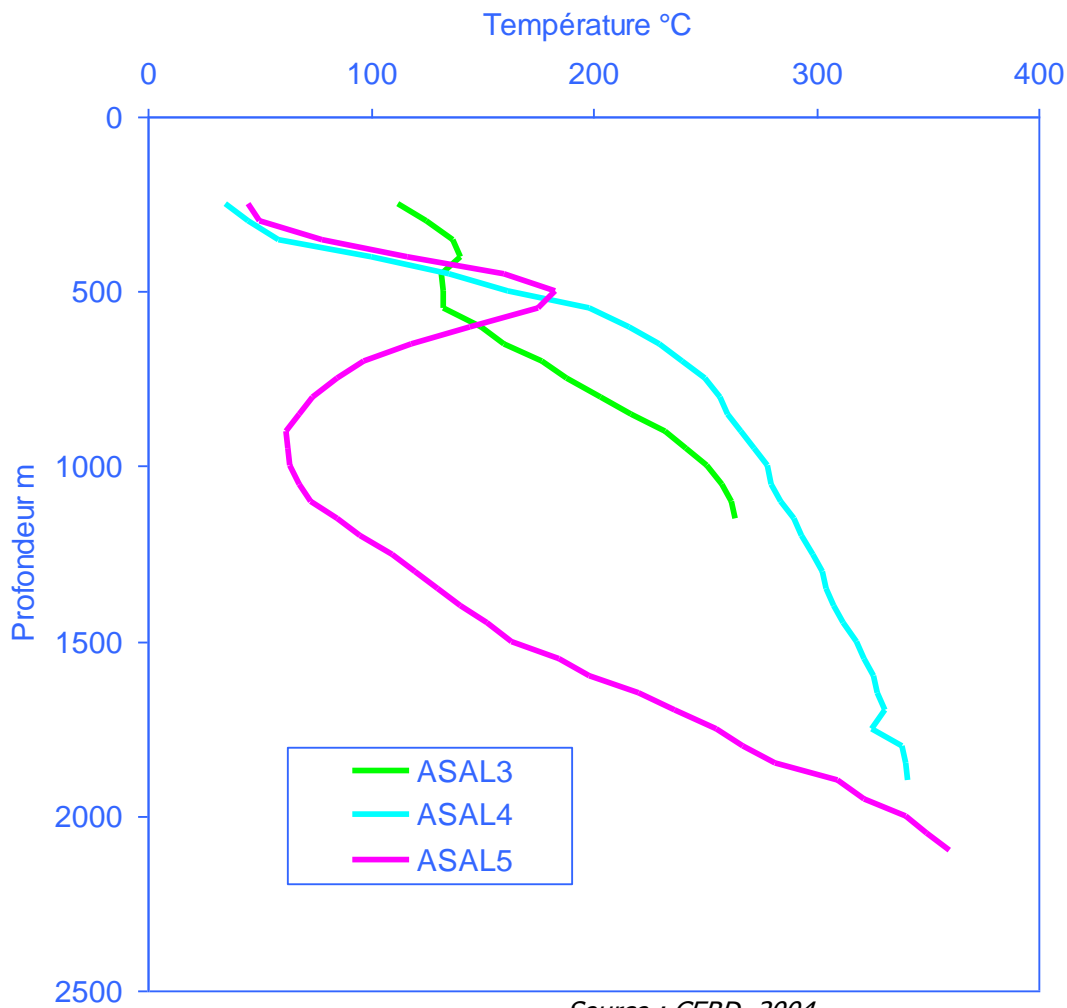
La décision de conduire des études pour trouver des solutions aux problèmes de dépôts et de corrosions posés par le fluide géothermique en vue de son exploitation a été prise en 1989 par les autorités nationales. Ces études financées par le gouvernement italien ont été confiées à un bureau d'étude islandais spécialisé. Les tests effectués en laboratoire sur des échantillons du fluide n'ont pas apporté les réponses adéquates.

Figure 3.8 : Profils de température des forages ASSAL 1 et 2.



Source : CERD, 2004

Figure 3.9 : Profils de température des forages ASSAL 3, 4 et 5.



Le potentiel géothermique de la partie prospectée est, à elle seule, estimée à 300 MWe. Si l'on inclut toute la région d'Assal-Ghoubbet, les estimations donnent des chiffres compris entre 450 et 630 MWe. C'est donc la région la plus riche en potentiel géothermique.

* Zone de Hanlé :

La plupart des forages de gradient présentent des températures assez faibles malgré une bonne perméabilité du réservoir :

- Garrabayis1 avec un gradient de 2°C/100m et une Tmax= 121,7°C à 440 m ;
- Garrabayis2 avec un gradient de 3°C/100m et une Tmax= 80,8°C à 450 m ;
- Tewe01 avec un gradient de 1,3°C/100m et Tmax= 43,7°C à 452 m.

Les températures les plus élevée mesurée dans les deux forages d'exploration dans la zone de Hanlé étaient les suivantes (fig. 3.10 et 3.11):

- Hanlé1 : Tmax= 72°C à 1420 m de profondeur ;
- Hanlé2 : Tmax= 124 °C à 2020 m de profondeur (AQUATER, 1989).

Le gradient géothermique est faible, de l'ordre de 3 °C/100 m. L'estimation des températures dans le réservoir profond laisse présager des valeurs supérieures à 160 °C. On estime que ce sont les écoulements des eaux superficielles fraîches depuis la basse vallée de la rivière Awash (Ethiopie) qui sont à l'origine de ces faibles températures.

Figure 10. : Profiles de températures de Hanlé 2

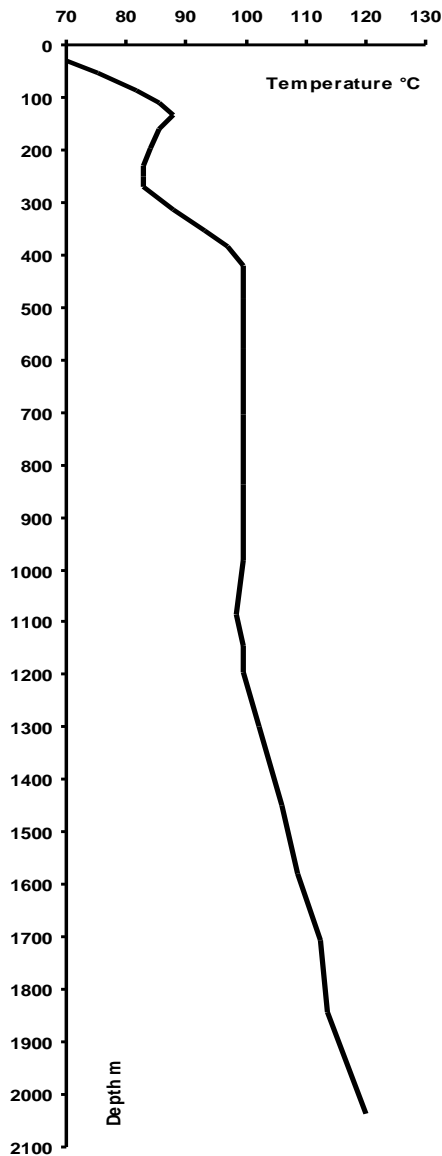
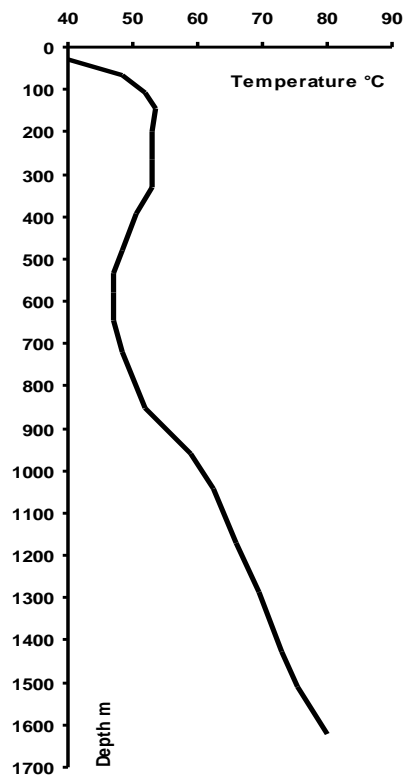


Figure 11 : Profils de températures de Hanlé 1



Sources : CERD, 2004

* Zone de Gaggadé :

Cette région parallèle à celle de Hanlé a été explorée par les italiens, les travaux de forages prévus n'ont pas été menés à cause des résultats négatifs sur Hanlé. Seules des études de surface ont conclu à la probabilité de trouver un réservoir profond avec des températures comprises entre 210 et 275 °C. A priori, c'est une zone beaucoup plus intéressante que Hanlé.

* Zone d'Arta :

Cette région très proche de la capitale (à une quarantaine de kilomètres) a bénéficié de campagnes d'explorations préliminaires. La composition chimique des gaz émis par les fumerolles est voisine de celle de l'air avec 80 % de CO₂. La présence d'hydrogène laisse présager des températures élevées en profondeur supérieures à 180 °C.

* Zone du Lac Abbhé :

Les scientifiques italiens ont été les seuls à prospecter cette partie du territoire où malgré l'abondance des manifestations de surfaces, le potentiel géothermique est jugé plus faible. Cependant, la salinité y est plus faible, ce qui représente un atout pour l'exploitation de la ressource. La température du réservoir est estimée à 175°C.

Depuis 1993, en raison du désintéressement des bailleurs de fonds pour les projets de géothermie à Djibouti et le gouvernement djiboutien ne pouvant supporter seul de tels investissements, les activités de recherche et les travaux d'exploration géothermique ont été arrêtés dans le pays.

Fort heureusement, la prise de conscience des Nations-Unies sur les problèmes environnementaux mondiaux qui déboucheront sur "le sommet de la terre" de RIO en 1992 et du protocole de Kyoto en 1997 viendra au secours de la filière géothermie en lui reconnaissant son caractère particulier d'énergie renouvelable avec un faible impact environnemental. Malgré cela, il faudra attendre une période de 10 ans avant que la relance de la géothermie ne soit amorcée à Djibouti.

3.1.4 L'état actuel de la filière

C'est à partir de 2001 que la géothermie est relancée avec la signature d'un protocole d'accord avec une société privée américaine Geothermal Development Associates (GDA). Cette étape marque un tournant décisif dans le développement des ressources géothermiques. En effet, c'est la première fois que le gouvernement fait intervenir le secteur privé dans le processus de développement et d'exploitation de ses ressources.

Cette nouvelle approche a été soutenue par le Programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUE), elle est à l'origine de la mise en place d'un Programme Régional du Rift Est Africain de Développement de la Géothermie (ARGeo : African Rift Geothermal facility) à partir de 2003.

Et enfin, conscient des enjeux politiques majeurs que constitue l'indépendance énergétique du pays, le gouvernement a sollicité l'expertise de l'Islande, seul pays au monde à produire 100% de son électricité à partir de la géothermie, pour atteindre cet objectif. L'Islande est actuellement engagée dans le processus de développement des ressources géothermiques du pays.

* Les négociations avec l'opérateur privé GDA :

Après avoir réactualisé l'ensemble des études précédentes par différentes missions sur le terrain, GDA a réalisé une étude de faisabilité pour l'installation d'une centrale électrique d'une puissance initiale de 30 MW à Assal avec le soutien financier de l'USDITA (l'agence

américaine pour le commerce et le développement). GDA prévoyait une augmentation graduelle de la capacité de la centrale pour atteindre 100 MW d'ici 2015 et estimait qu'elle pourrait répondre à tous les besoins en électricité de Djibouti.

Le projet de type BOO (Built-Own-Operate) évalué à un montant de 117 Millions de Dollars US (soit 3600 \$/kW) a obtenu les promesses de soutiens financiers de plusieurs bailleurs de fonds tels que :

- le GEF pour les accords d'achats d'électricité à hauteur de 287 000 \$US,
- le PNUD pour les travaux de forages à hauteur de 3 M\$US,
- le Département de l'Energie (USA), la SFI (Société Financière Internationale) pour la confirmation de la ressource,
- enfin autres bailleurs régionaux et des fonds arabes d'investissements pour la mise en œuvre du projet.

Le coût global de ce projet privé entièrement financé par ses promoteurs semblait relativement élevé même s'il incluait la construction d'une ligne de transmission de 132 kV et la modernisation du système électrique national. Les promoteurs mettaient également en avant la haute qualité environnementale du projet avec une réduction des émissions de gaz carbonique de 139146 tonnes par an, soit une réduction qui devrait atteindre 4035222 tonnes au bout du projet dont la durée était de 30 ans.

Les négociations avec Electricité de Djibouti (EDD), l'unique acheteur potentiel de l'énergie produite, n'ont pas abouti en raison notamment de :

- la proposition du prix de vente du kWh électrique de GDA (0,17 \$US/kWh) jugée trop élevée par l'EDD,
- du refus de la part de GDA d'inclure les coûts historiques engagés par le Gouvernement dans les recherches scientifiques (que GDA a d'ailleurs utilisé) comme capital d'investissement dans le projet du GDA,

* Le Programme ARGeo :

Ce programme est doté d'une enveloppe initiale de 250 Millions de Dollars. Il est financé en grande partie par des agences multilatérales et bilatérales (PNUE, le Fonds Mondial pour l'Environnement, L'Allemagne (BGR, KfW), L'Italie, etc....). Il est prévu pour une période initiale de 10 ans (2004-2014). L'objectif du programme ARGeo est, entre autres:

- 1- La facilitation des investissements privés dans les projets de développement de l'énergie géothermique dans les pays du Rift Africain ;
- 2- L'identification des nouvelles technologies dans le domaine de l'énergie géothermique pour les rendre techniquement et économiquement applicables dans les systèmes électriques du réseau Est africain ;
- 3- L'élimination des obstacles politiques, techniques et financiers au développement de l'énergie géothermique et l'encouragement de la participation active des pays concernés.

C'est à Djibouti qu'a été organisé l'atelier de lancement du programme ARGéo en 2004 avec la participation des six pays concernés (Djibouti, Erythrée, Ethiopie, Kenya, Tanzanie et Uganda) suivi de la 1^{ère} conférence en 2006 à Addis-Abeba, Ethiopie et de la 2^{ème} en 2008 à Entebbe, Uganda. Les estimations du potentiel géothermique de toute la région dépassent les 7000 MW (GEA, 2007 interim report).

Les pays du rift Est Africain qui exploitent actuellement la géothermie sont :

- Le Kenya, avec 135 MWe installés à Olkaria représentant 11% de la capacité totale du pays, est le seul pays exploitant actuellement les ressources géothermiques dans la région.
- L’Ethiopie, malgré ses 4000 MW de potentiel, a exploité pendant une période de deux ans une centrale géothermique de près de 8,5 MWe dans le prospect de Aluto-Langano jusqu’en 1990. La réhabilitation de cette centrale est en cours avec le concours de l’opérateur privé GDA.

Les autres pays de la région, hormis Djibouti, sont encore au stade de la confirmation de leurs ressources géothermiques.

Les priorités du gouvernement Djiboutien dans ce programme sont les suivantes :

- L’étude du réservoir intermédiaire d’Assal (aquifère confirmé) par :
 - o des forages de reconnaissance,
 - o des tests de production,
 - o l’ingénierie de réservoir complète,
 - o une étude de faisabilité pour l’utilisation d’un système binaire, ...etc.
- Le développement du réservoir profond d’Assal :
 - o L’évaluation de son potentiel,
 - o Les possibilités d’exploitation de ce réservoir
- Le développement des ressources géothermiques déjà identifiées à :
 - o Obock : proposition pour une centrale pilote de 5 MWe,
 - o Dikhil et Arta.

* La coopération bilatérale avec l’Islande :

Cette coopération fut amorcée par le Président Djiboutien en septembre 2005 au cours de sa rencontre avec le Premier Ministre islandais lors du sommet des Nations-Unies à New-York. Elle a été officialisée par la visite du Président Djiboutien en Islande en février 2007 avec la signature d’un accord de concession avec la société islandaise REI (Reykjavik Energy Invest).

Par la suite, la société REI a obtenu un permis d’exploitation en mai 2007 dans la zone d’Assal avec une superficie de 750 km² pour l’installation d’une centrale géothermoélectrique d’une capacité de 50 MW avec un montant total pour les investissements estimé à 150 Millions \$US. Il faut rappeler que REI exploite actuellement des centrales géothermiques produisant plus de 330 MWe en Islande uniquement.

L’étude de pré-faisabilité de ce projet de centrale électrique de 50 MW réalisée par Iceland Geosurvey (ISOR) a été achevée en mai 2008. Le projet est actuellement dans la phase de finalisation de l’étude de faisabilité dont les résultats sont prévus pour septembre 2009.

Après avoir revu les anciennes études, les islandais ont procédé à des études géophysiques complémentaires pour localiser les emplacements favorables pour des forages géothermiques :

- Ils ont ciblé la zone de Fiale, près du Lac de Lave pour les forages d'exploration (fig. 3.12). Ils installeront tous les équipements en dehors du Lac de Lave mais atteindront cette zone par des forages déviés.
- Ils exploiteront le réservoir profond en utilisant soit le système "single flash" ou le système binaire "single flash" avec condensation de vapeur.
- Ils ont prouvé que les inhibiteurs ont montré leur efficacité sur les dépôts de sulfures mais avaient malheureusement tendance à reformer des dépôts de chlorure de calcium. Ils continueront les travaux de recherches sur les inhibiteurs.
- Ils ont démontré que la vapeur n'était plus corrosive avec l'utilisation des matériaux résistants comme les résines époxy.
- Ils exploiteront les puits existants à des pressions supérieures à 18 bars pour éviter les dépôts de silicate de fer.

Ils sont actuellement en train de débiter les travaux de forage de gradients et ont prévu de procéder au forage de 3 puits profonds pour l'exploration ainsi que le début des travaux de génie civil pour la fin 2009. La construction de la centrale est programmée pour la période 2009-2012 et la production prévue fin 2012.

Les accords avec REI ont été non seulement reconfirmés mais élargis en janvier 2008 lors du Sommet Mondial sur l'Énergie du Futur à Abu Dhabi avec la signature d'accord de financement pour la future structure qui gèrera la centrale géothermique d'Assal entre le gouvernement de Djibouti et celui d'Islande représentés par leurs Présidents respectifs.

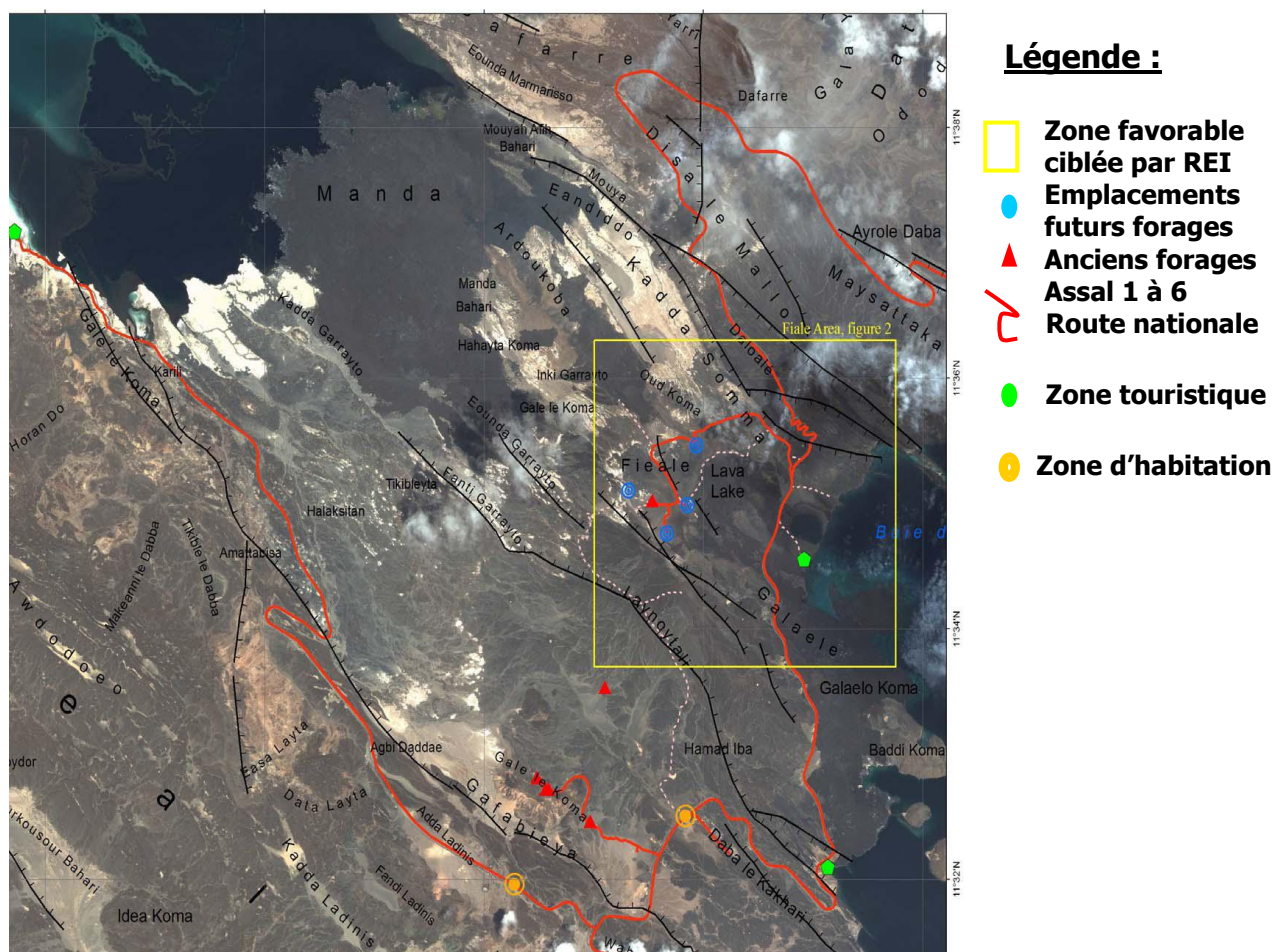
Le Président Islandais n'a pas manqué de rappeler que son pays utilisait exclusivement les énergies fossiles pour la génération électrique au milieu du 20^{ème} siècle comme le fait actuellement Djibouti. Ils ont ensuite développé leurs ressources géothermiques jusqu'à leur indépendance énergétique aujourd'hui (l'Islande est le seul pays qui produit 100% de son électricité à partir de la géothermie). Il a promis le soutien de son pays pour que Djibouti puisse atteindre le même objectif.

Au cours de ce sommet, la géothermie a été rappelée comme étant non seulement une énergie propre mais surtout l'une des énergies du futur.

Enfin, espérons que la récente crise financière mondiale qui a particulièrement touché l'Islande en la mettant en situation de quasi faillite en 2009 et le changement de gouvernement (devenu depuis très conservateur) intervenu également en 2009 n'auront pas d'impacts directs sur les perspectives de développement des ressources géothermiques à Djibouti.

Pour l'anecdote, si ce scénario catastrophe devenait réalité, les Djiboutiens ne feront que se conforter dans l'opinion populaire qui parle de "la malédiction de la géothermie" dans ce pays.

Figure 3.12 : Zone ciblée par REI et Emplacement des futurs forages



Source: Iceland Geosurvey (ISOR), 2008

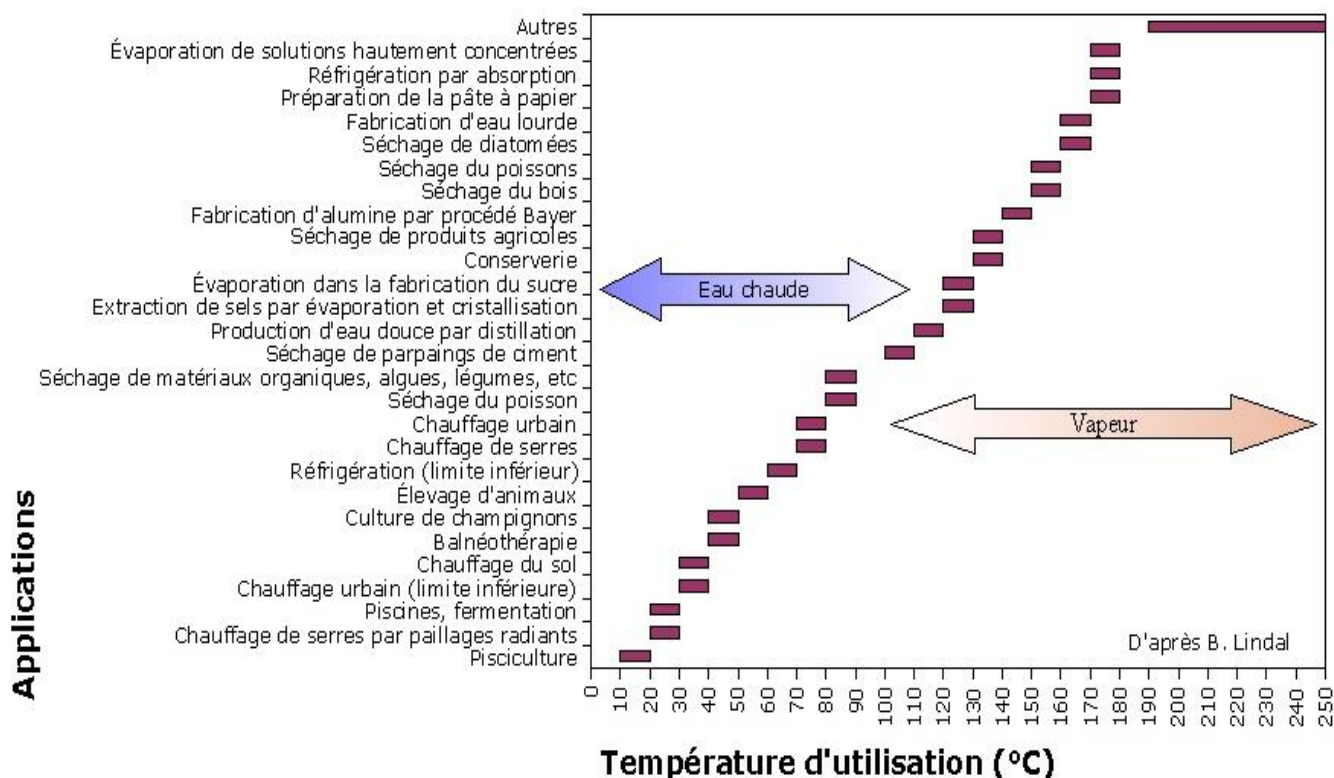
3.2 Valorisation des ressources géothermiques et évaluation des bénéfices socio-économiques.

3.2.1 Généralités :

Les possibilités de valorisations des ressources géothermiques sont très nombreuses et très variées. Elles dépendent de nombreux critères tels que :

- Les caractéristiques de la ressource (la température, la physico-chimie et la qualité du fluide géothermal)
- Les caractéristiques géomorphologiques du terrain (la géophysique du sous-sol, la perméabilité, la transmissivité du réservoir, la topographie, ...etc.)
- Les besoins locaux et donc les conditions de rentabilité
- Les contraintes environnementales
- Etc....

Figure 3.13 : Les applications industrielles de la géothermie



La valorisation des ressources géothermiques repose sur l'utilisation de la chaleur. Soit son utilisation directe, soit sa transformation en électricité. Dans le premier cas, il y a nécessité de transporter cette chaleur vers le lieu d'utilisation. Dans le second cas, sa transformation est faite surplace.

* Utilisation directe de la chaleur :

L'utilisation directe de la chaleur est faite pour les applications surtout industrielles pour des températures de fluides inférieures à 190 °C (fig. 3.13). Parmi les multiples possibilités d'usage de la chaleur géothermique (réseaux de chaleur, serres, ...etc.), nous citerons ici les exemples potentiels de valorisations en République de Djibouti :

- Les serres :

Le chauffage des serres constitue une cible privilégiée pour la géothermie dans la mesure où les besoins en énergie y sont élevés. C'est surtout pour les cultures maraîchères et florales que la géothermie est utilisée (exemple au Kenya). On pourrait envisager ce genre de valorisations dans le nord du pays où le climat est plus doux et la terre plus fertile mais uniquement que dans le cadre de projets privés.

- La pisciculture - aquaculture :

L'élevage des poissons et crustacés est une application bien adaptée à la géothermie. Une augmentation de la température de quelques degrés et surtout son maintien à un niveau

constant permet de prolonger toute l'année les possibilités de croissance des poissons et crustacés.

En 2009, Les autorités Djiboutiennes ont accordés les autorisations administratives pour l'installation d'une usine de culture des crustacés dans la région d'Obock pour un industriel originaire du golfe persique. Il faut rappeler que la région d'Obock a un potentiel géothermique et l'on pourrait envisager l'utilisation de la géothermie pour ce cas-ci. Cette application pourrait être également être faite à Tadjourah et au Ghoubbet.

- Les autres usages industriels :

La géothermie est aussi utilisée pour le séchage des produits issus de l'artisanat, des produits agricoles, des poissons, ...etc. On pourrait donc l'utiliser dans le pays pour toutes ces applications dans les régions Nord à fort potentiel agricole.

- La production d'eau douce :

Aujourd'hui, la République de Djibouti est confrontée à un sérieux problème d'alimentation en eau potable. Les causes sont multiples. C'est d'abord en raison de la faible pluviométrie qui caractérise notre climat, inférieure à 150 mm/an avec une évapotranspiration intense. Le pays reste donc dépendant à 100 % des eaux souterraines.

Cette rareté de l'eau ajoutée à une demande toujours croissante de la population a provoqué une dégradation accélérée des rares ressources en eau. Les eaux souterraines proviennent de l'infiltration des eaux de ruissellement dans les lits d'oueds. Malheureusement, les oueds qui traversent l'aquifère évacuent chaque année entre 8 et 12 millions de mètres cubes en moyenne à la mer.

Le cas de l'alimentation en eau de la ville de Djibouti est une véritable urgence. Les besoins de la ville sont assurés par une trentaine de forages. La consommation annuelle atteint à l'heure actuelle 12 millions de m³. Les ressources en eau de la nappe de Djibouti sont estimées à entre 12 et 15 millions de m³ d'eau par an. Il existe donc déjà un déficit d'alimentation en eau à l'heure actuelle.

Les éléments techniques disponibles actuellement révèlent une situation très critique pour les ressources en eau de la région de Djibouti. Les concentrations de certains éléments de l'eau dépassent les normes internationales de l'O.M.S. (Organisation Mondiale de la Santé) pour la potabilité (salinisation de l'eau pompée, intrusion de l'eau de mer, surexploitation, baisse des niveaux piézométriques... etc.).

De plus, les estimations faites pour les besoins en eau de la ville de Djibouti pour les horizons 2015 et 2025 donnent respectivement 25 et 40 millions de m³ d'eau par an (AQUASTAT, enquête 2005). C'est donc à un véritable défi auquel font face les autorités nationales.

Pour les autres villes, la situation est similaire. Aucune des villes de l'intérieur n'est totalement satisfaite pour ses besoins, du moins, pendant la période d'été. A Ali-Sabieh, la ville subit un important rationnement de l'eau à cause de l'insuffisance de la production. A Dikhil, la galerie drainante a été arrêtée en raison de la contamination bactériologique. A Obock, la situation n'est guère meilleure avec un taux de nitrates dépassant les 150 mg/l dans certains forages.

Pour pallier cette situation, le gouvernement a planifié un certain nombre d'actions réparties dans le temps selon le Schéma Directeur de l'Eau tels que l'exploitation des eaux de surfaces, le renouvellement de forages, une étude technico-économique entre le pompage de l'aquifère de Hanlé et le dessalement de l'eau de mer,etc. Le dessalement de l'eau de mer pour l'alimentation en eau potable de la capitale pourrait donc devenir une réalité d'ici quelques années à Djibouti.

C'est là que l'utilisation de la géothermie pourrait se révéler être un choix judicieux. En effet, les techniques de dessalement par géothermie sont aujourd'hui éprouvées et largement utilisées dans le monde. Ce type de projet pourrait se réaliser à Assal compte tenu de la proximité de la baie du Ghoubbet. L'eau potable serait ensuite acheminée vers la capitale par des conduites forcées. Ce projet est à priori plus avantageux que la solution de pompage de l'aquifère de Hanlé qui se trouve à plus 150 km de la capitale.

A ce sujet, le gouvernement a lancé en 2008 les premiers appels d'offres pour des projets de dessalement d'eau de mer grâce au soutien financier du FADES (Fonds Arabe de Développement Economique et Social). Aussi, un accord vient d'être signé en mars 2009 avec une société privée indienne pour la construction d'une centrale éolienne et solaire de 40 MW avec une unité de dessalement d'eau de mer d'une capacité de 40000 m³/jour dans la zone de Ghoubbet.

On pourrait également envisager de petits projets de dessalement pour les villes du Nord qui sont confrontées à une baisse de productivité des nappes. Ces projets seraient implantés sur les abords des deux principales villes du Nord (Tadjourah et Obock). Ces deux régions disposent d'un potentiel géothermique capable de répondre à de tels projets.

- La production de froid :

Il est possible de produire du froid à partir de la chaleur grâce à des systèmes à absorption. Deux sortes de cycles sont utilisées, pour les applications nécessitant du froid négatif (températures inférieures à 0 °C), on utilise des cycles à ammoniac. Pour les autres applications de la géothermie comme la réfrigération ou la climatisation, les cycles lithium-brome sont utilisés (fig 3.14).

En République de Djibouti, les ressources halieutiques sont abondantes et très peu exploitées. Le secteur de la pêche est actuellement en plein essor dans les villes côtières du Nord comme Obock et Tadjourah. La création, récemment, d'un port de pêche dans chacune de ces deux villes témoigne des intérêts économiques de ce secteur créateur d'emploi.

Malheureusement, faute de moyens de conservation adéquats, les petits pêcheurs sont obligés d'écouler rapidement leurs marchandises. Ils utilisent quotidiennement de la glace produite à partir de groupes électrogènes pour la conservation de leurs produits. Le coût de la conservation de ces produits limite le développement de cette activité génératrice de revenu.

La géothermie pourrait jouer un grand rôle dans le développement de ce secteur qui est capital pour les économies locales. On pourrait produire du froid négatif grâce à des groupes à absorption. Ce qui permettrait l'installation de chambres froides destinées à la conservation des produits de pêches. Ceci pourrait permettre l'exploitation industrielle des ressources halieutiques. On pourrait même envisager l'exportation à grande échelle de ces produits.

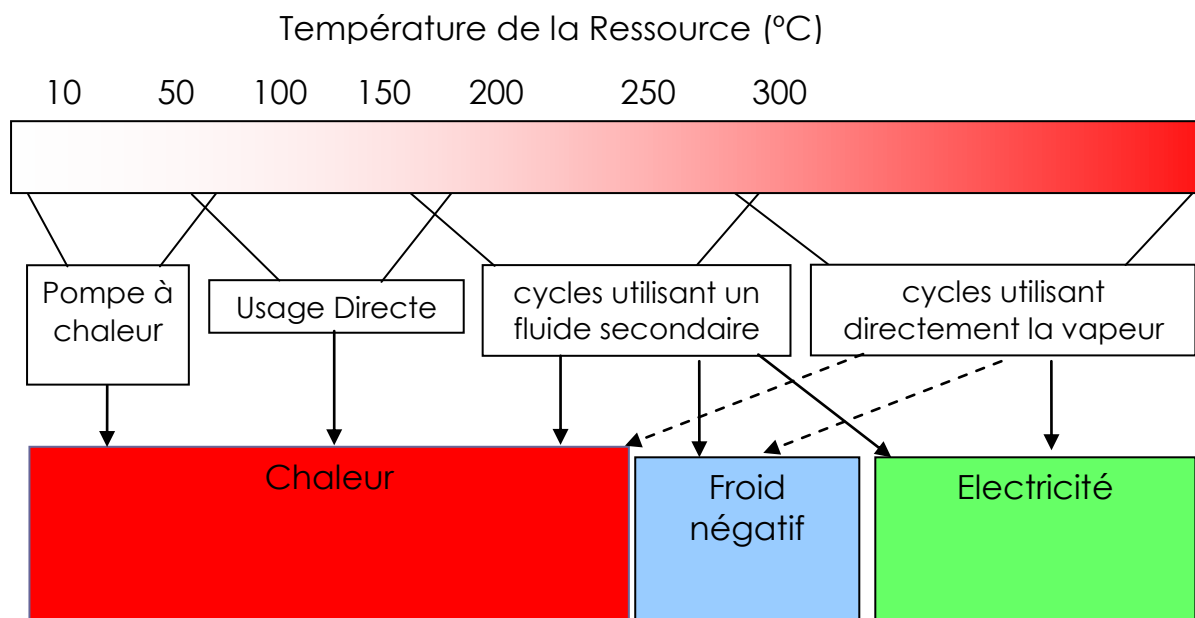
- Les pompes à chaleur :

Pour des températures très basses, on peut assurer le chauffage ou le rafraîchissement des locaux avec des pompes à chaleur géothermiques qui sont des systèmes thermodynamiques. Pour des raisons purement économiques, ces systèmes ne pourraient être envisagés pour le rafraîchissement à Djibouti. En effet, les investissements engagés ne seraient pas rentables en raison de l'efficacité de ces systèmes par rapport justement au degré de rafraîchissement attendus.

- * La transformation de la chaleur :

Pour les plages de températures supérieures à 190 °C, la chaleur est soit transformée pour produire de l'électricité, soit pour produire du froid négatif.

Figure 3.14 : Les différentes techniques de production d'énergie en fonction de la température du fluide géothermal



3.2.2 Possibilité de Production d'électricité à Djibouti :

- * Les différents systèmes de production d'électricité :

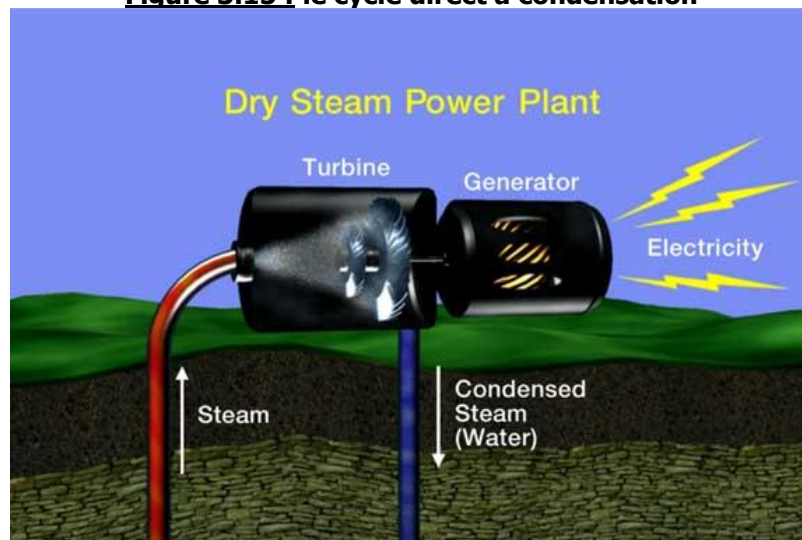
La première expérience de production d'énergie électrique par fluide géothermique fut réalisée à Larderello en Italie en 1904. La première centrale géothermique entra en service en 1913 sur ce même site. En 2006, la puissance installée dans le monde était de 9065 MWe (IGA : International Geothermal Associated, 2006). En 2010, elle dépassera les 10 000 MWe selon les scénarios de l'IGA.

Il existe différents procédés permettant de produire de l'électricité à partir de la vapeur :

- Les centrales utilisant le cycle direct à condensation :

Ce système se base sur l'utilisation directe de la vapeur issue du fluide géothermal, la turbine est entraînée directement par la vapeur, elle est ensuite condensée et évacuée sous forme de liquide (fig. 3.15). Il faut noter que dans les premières centrales (notamment à Larderello en Italie), la vapeur ne pouvait pas être envoyée directement dans la turbine car, étant très corrosive, elle dégradait rapidement cette dernière. Le fluide géothermal chauffait, en surface dans l'usine, un tuyau où circulait de l'eau froide. Cette eau vaporisée sous l'effet de la chaleur entraînait par la suite la turbine.

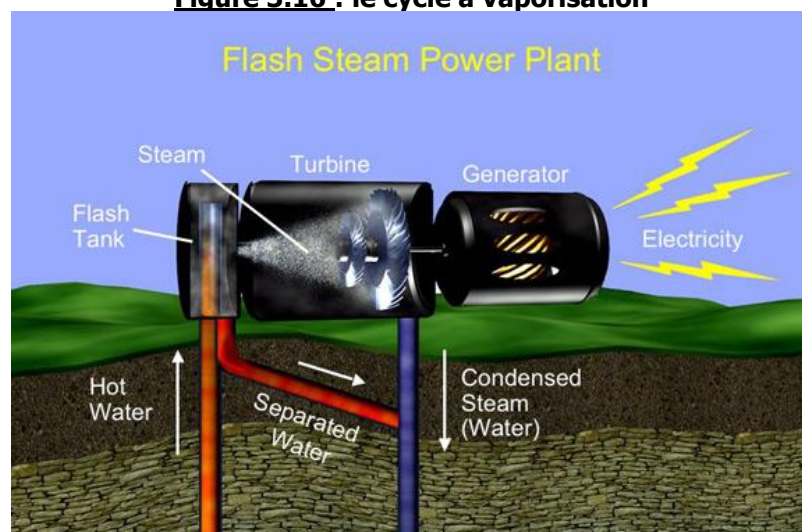
Figure 3.15 : le cycle direct à condensation



- Les centrales utilisant le cycle à vaporisation :

Le fluide extrait, composé de vapeur d'eau et d'eau liquide, est séparé en deux phases. La partie liquide est conduite dans un compartiment où sa pression est abaissée afin de la vaporiser. Cette vapeur entraîne ensuite une turbine qui produit de l'électricité. La partie vapeur entraîne directement une seconde turbine dans un circuit parallèle (fig. 3.16).

Figure 3.16 : le cycle à vaporisation

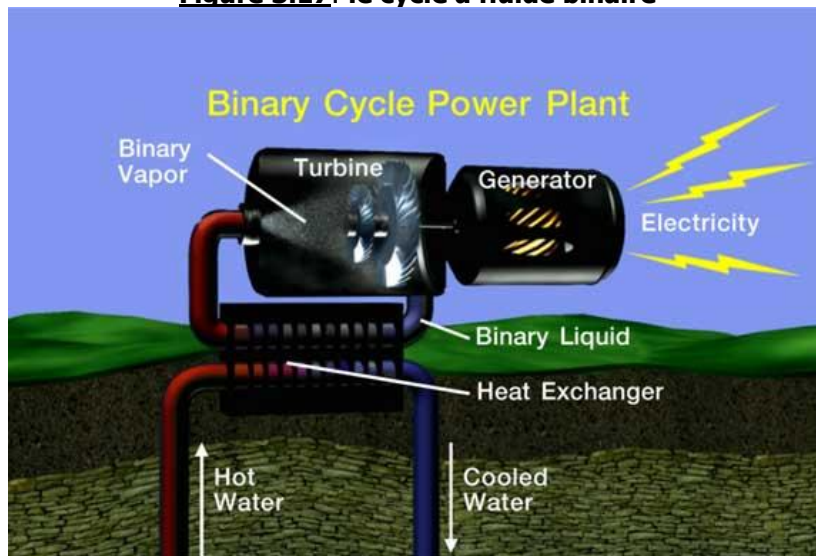


- Le cycle à fluide binaire - ou cycle de Rankine :

Contrairement aux autres cycles, le fluide géothermal est maintenu à l'état liquide et ce, grâce à une pompe placée dans le puits. Une fois à la surface, il est conduit dans un échangeur de chaleur où une partie de son énergie va être transférée dans un fluide volatil (alcane par exemple). Ce fluide est appelé fluide de travail et est vaporisable à faible température. Tandis que le fluide géothermal est renvoyé dans le sous-sol, le fluide de travail est vaporisé et envoyé dans une turbine afin de l'actionner. Il est ensuite condensé au contact d'un circuit de refroidissement composé d'eau. Ce liquide est renvoyé dans l'échangeur de chaleur, le cycle recommence (fig. 3.17).

Cette technologie est utilisée depuis le début des années 1980, mais elle est limitée à de petites puissances, répondant à la demande de zones éloignées ou isolées.

Figure 3.17: le cycle à fluide binaire



A l'heure actuelle, aucun des autres projets mentionnés ci-après n'a encore été entrepris à Djibouti. Ce sont simplement des exemples de projets de valorisation potentiels des ressources géothermiques de la République de Djibouti. Il ressort des données actuellement disponibles que le site d'Assal-Ghoubbet situé à mi distance des principaux centres de consommations électriques du pays est l'endroit idéal pour l'installation d'une centrale géothermique, il est à (par ordre d'importance) :

- 70 km de Djibouti (la capitale) principal centre de consommation,
- 60 km d'Ali-Sabieh,
- 85 km de Dikhil,
- et 50 km de Tadjourah.

Le site d'Assal-Ghoubbet est non seulement bien situé mais c'est la zone de plus grand potentiel dans le pays.

* Projets d'électrification rurale :

L'une des applications de la géothermie à Djibouti serait les projets d'électrification rurale. En effet, la répartition géographique des ressources géothermiques montre que les possibilités de ce type de projets sont réelles. La plupart des zones d'habitation non électrifiées se trouvent à proximité de champs géothermiques. Voici quelques exemples :

▪ A Arta :

Dans ce petite localité située à 40 km au Sud-ouest de Djibouti, le taux d'électrification n'atteint pas les 50 % alors que le potentiel géothermique de cette zone dépasse largement les besoins actuels de toute la région. Une petite centrale de l'ordre du mégawatt ou des unités modulaires de quelques centaines de kilowatts utilisant le principe du cycle de Rankine pourrait être envisagée.

L'avantage de cette région réside dans le fait qu'elle dispose déjà des infrastructures électriques nécessaires. En effet, elle est directement alimentée par la capitale. Toutes les petites localités environnantes pourraient donc bénéficier de l'énergie électrique fournie par cette centrale géothermique. Dans le cadre d'un programme d'électrification ou d'un programme de développement, cette solution pourrait amorcer ou même renforcer le développement économique de cette région touristique.

▪ A Obock :

Ancienne petite cité coloniale située à l'entrée du golfe de Tadjourah et à 75 km au Nord-est de Tadjourah, Obock est aujourd'hui une ville sinistrée par un conflit armé (1991-1994). Les infrastructures électriques ont été complètement détruites et les capacités actuelles sont insuffisantes. La géothermie pourrait jouer un rôle crucial dans le processus de réhabilitation de cette ville. En effet, cette région dispose d'un potentiel géothermique, un programme élargi d'électrification rurale de toute la région est également possible. D'ailleurs, une proposition d'une centrale pilote de 5 MWe à été incluse par le gouvernement Djiboutien dans le programme ARGeo.

▪ Au Sud-ouest du pays :

Cette région a déjà fait l'objet de travaux d'exploration, elle est riche en potentiel géothermique (prospects de Hanlé et de Gaggadé). Malheureusement, les petites localités comme Yoboki, Gourrabous, Agna, etc...n'ont pas encore (ou très peu) d'électricité. Une situation qui a longtemps défavorisé tout essor économique de cette partie du territoire. Un programme d'électrification rurale basé sur l'utilisation de la géothermie permettrait de lancer les bases d'un développement durable.

3.2.3 Evaluation des bénéfices socio-économiques des projets géothermiques :

Les projets géothermiques sont avant tout des projets basés sur l'utilisation des ressources renouvelables. Les bénéfices socio-économiques sont nombreux, on peut les classer en deux catégories pour les pays en voie de développement : la réduction de la pauvreté et Le développement durable.

* La réduction de la pauvreté :

Les pays en voie de développement sont confrontés à une pauvreté croissante de leur population surtout rurale. Djibouti n'échappe à cette réalité (voir les données socio-économiques). Le taux de chômage de la population active dépasse aujourd'hui les 35 %. Les projets d'exploitation des ressources géothermiques s'inscrivent dans la lutte contre la pauvreté grâce notamment à :

- La création d'emplois directs ou indirects. De plus, si ces projets sont financés par des entreprises étrangères avec des capitaux étrangers, cela contribuera à l'amélioration de l'économie nationale et particulièrement l'économie locale grâce notamment aux différentes taxes et impôts. Ce qui favorisera nécessairement l'amélioration des conditions de vie des populations locales (en espérant qu'il y ait une répartition équitable de la richesse engendrée).

L'utilisation des ressources géothermiques locales pour la production d'électricité engendre également :

- Une économie de devises pour le pays. L'achat de produits pétroliers pour les centrales thermiques à fioul coûte relativement cher (voir données secteur électrique).
- La baisse du prix du kWh actuel, très élevé à Djibouti (voir secteur électrique), qui s'en suivra contribuera à l'amélioration des conditions socioéconomiques de ces populations

* Le développement durable :

Tous les projets basés sur la promotion des énergies renouvelables, tendant à réduire les émissions de gaz à effets de serre et présentant des impacts négligeables sur l'environnement sont considérés comme des projets de développement durable. C'est le cas des projets géothermiques. Ils bénéficient, de ce fait, de l'appui des bailleurs de fonds et des circuits de financements internationaux tels que les institutions de Bretton Woods (FMI, Banque Mondiale), les agences internationales (UNESCO, PNUD, PNUE, GEF,..) et régionales (BAfD, BAsD,...) et les mécanismes de financements tels que les MDP.

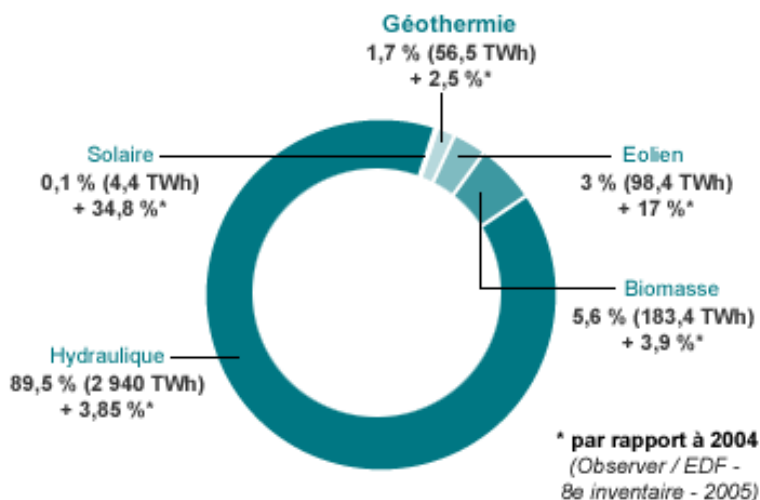
* Les perspectives de la géothermie

La place de la géothermie dans la production mondiale d'électricité à partir de sources renouvelables était de 3322,7 TWh en 2004, la géothermie occupe la 3^{ème} place après l'hydraulique et l'éolien (figure 3.18).

Enfin, il faut noter qu'aux Etats-Unis, l'administration Obama s'apprête à développer la géothermie et s'est fixée comme objectif d'exploiter jusqu'à 100000 MWe d'ici 2050 (Futur of geothermal energy, MIT report, 2009). En Europe, c'est la technologie des HDR (Hot Dry Rock), la géothermie des roches chaudes profondes que l'on veut maîtriser dans les années à venir. Des essais sont actuellement en cours en France à Soult-La-Forêt.

La géothermie n'est qu'à ses débuts, c'est donc une énergie d'avenir !

Figure 3.18 : Production mondiale d'électricité d'origine renouvelable



3.3 Conclusion :

Le relief du pays, sa faible superficie et sa situation géologique exceptionnelle ont permis l'exploration assez aisée de ses ressources géothermiques. Contrairement à d'autres pays où les activités d'exploration se poursuivent depuis des décennies, ce n'est que sur une période relativement courte de vingt ans que les recherches ont permis de cerner le potentiel de ces ressources.

Les estimations du potentiel géothermique techniquement exploitable en République de Djibouti sont entre 350 à 860 MWe. Le potentiel économiquement exploitable pour la seule région d'Assal-Ghoubbet est de l'ordre de 300 MWe, très largement supérieur aux besoins actuels du pays. (Estimations de 1999, Geothermal Energy Association).

Nous avons vu qu'il y avait des ressources hautes températures disponibles pour la production d'électricité, il y avait également des ressources géothermiques basses et moyennes énergies pour des usages directs tels que la production de froid ou la production d'eau potable par dessalement d'eau de mer. Malheureusement, ces ressources n'ont toujours pas été exploitées pour plusieurs raisons :

- La première raison : une des raisons majeures était la forte tendance du fluide géothermal à former des dépôts et colmater les canalisations des puits. Il y avait également son caractère très corrosif. Il faut aussi préciser qu'à l'époque, la recherche dans ce domaine n'était pas suffisamment avancée pour résoudre ces problèmes. Aujourd'hui, ces contraintes techniques ne constituent plus une barrière pour l'exploitation de ces ressources.

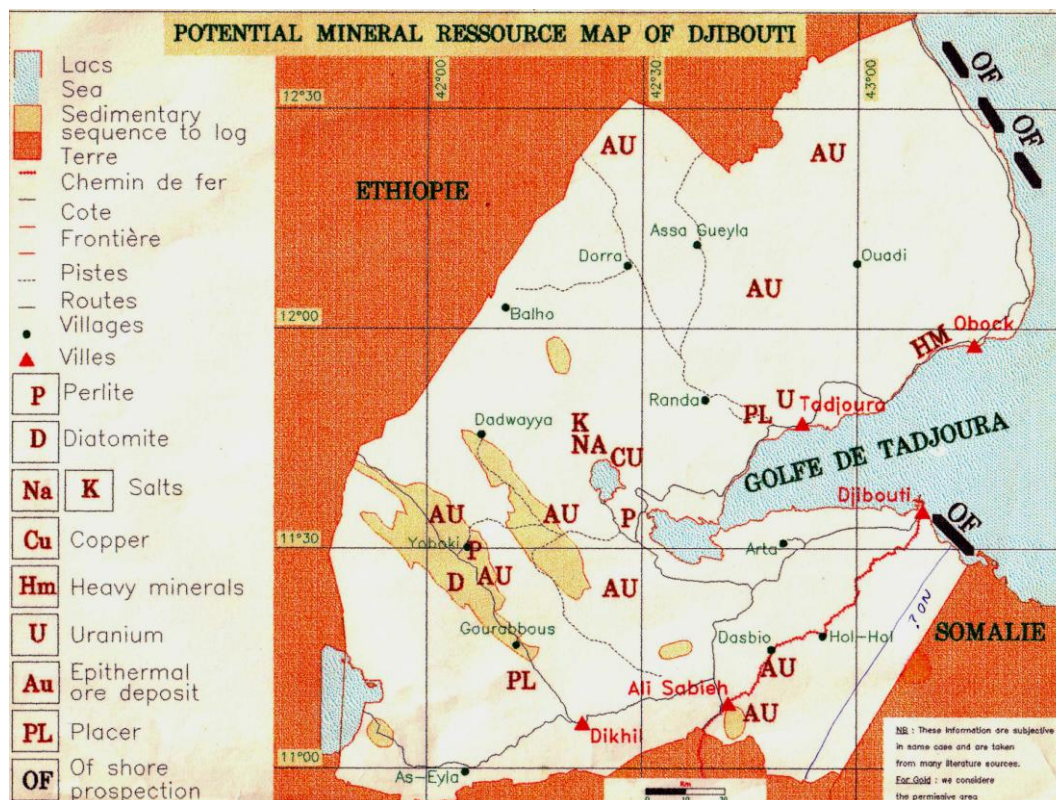
On pourrait envisager l'utilisation directe du fluide en combinant l'usage des nouveaux matériaux très résistants comme le titane ou ceux issus de la recherche comme les résines époxy ou les inhibiteurs de corrosion récemment développés par la chimie. On pourrait également exploiter le réservoir superficiel du champ géothermique d'Assal en installant des turbines à cycles binaires (cycle de RANKINE, cycle de KALINA).

- La deuxième raison : les coûts financiers et les risques géologiques (les probabilités de trouver un puits non producteur) pour l'exploitation des ressources géothermiques sont extrêmement élevés pour pouvoir attirer les investisseurs. De plus, les délais entre le début du projet et la production électrique sont très longs (entre 6 et 10 ans), ce qui fait que les bailleurs de fonds sont très réticents à financer ce genre d'opérations.

Aujourd'hui, les différentes crises pétrolières, les problèmes environnementaux mondiaux et le réchauffement climatique ont donné du crédit aux énergies renouvelables et à la géothermie en particulier.

Enfin, nous illustrons dans la figure 3.19, la carte des ressources minières de la République de Djibouti à titre indicatif car les projets géothermiques sont souvent menés de concert avec la recherche des minerais contenus dans les cuttings des forages géothermiques.

Figure 3.19 : Carte des ressources minières de Djibouti



Source : MERN, 2000

CHAPITRE 4

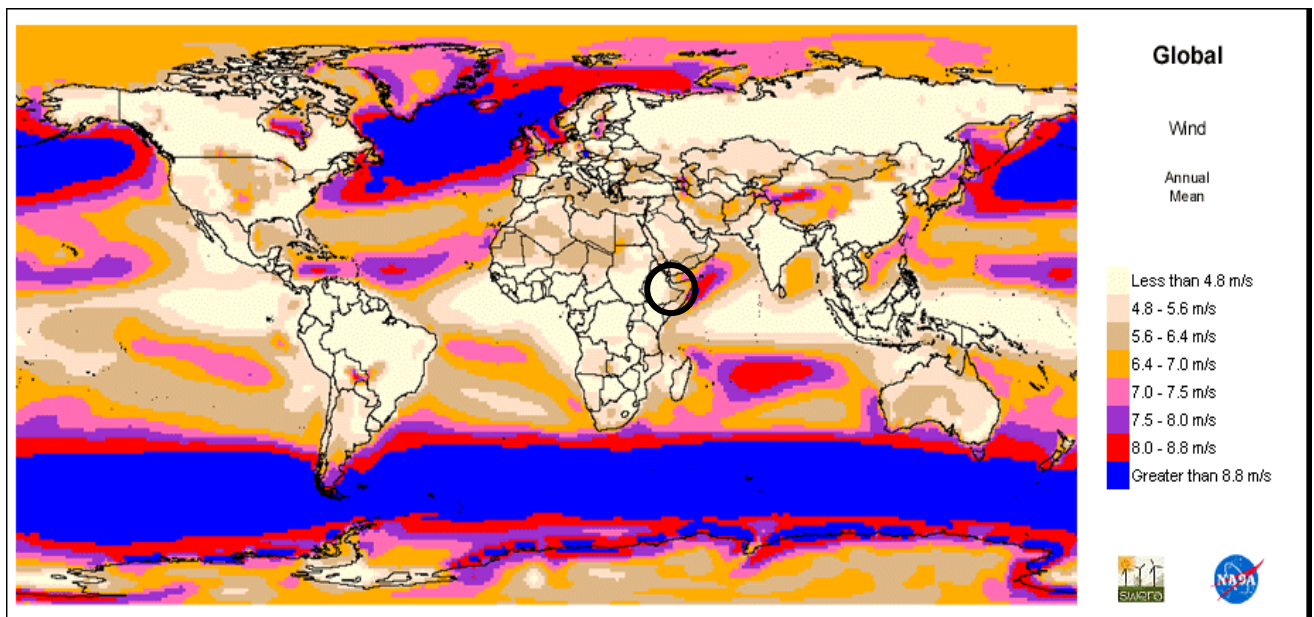
L'ENERGIE EOLIENNE A DJIBOUTI

4.1 L'état actuel de l'éolien à Djibouti

4.1.1 Présentation générale :

La cartographie mondiale du potentiel éolien (figure 4.1) montre que la République de Djibouti est située dans la zone de potentiel intermédiaire (cercle couleur noire) avec des vitesses de vent comprises entre **5,6 m/s et 6,4 m/s**. C'est donc à priori une zone où l'on pourrait envisager l'exploitation de l'énergie éolienne même si ses vitesses ne sont considérées rentables que pour des grands parcs éoliens.

Figure 4.1 : Cartographie du potentiel éolien mondial



Source : <http://eosweb.larc.nasa.gov/>

4.1.2 Les premières mesures des vitesses de vent

Les premières mesures du potentiel éolien en République de Djibouti ont été faites en 1984 par le CERD (Centre d'Etude et de Recherche scientifique de Djibouti, ex-ISERST) en partenariat avec la coopération américaine (projet VITA-ISERST, 1983). Ces mesures ont été réalisées sur la capitale (station météorologique de l'aéroport) et sur la ville d'Ali-Sabieh (80 km au Sud Ouest de la capitale).

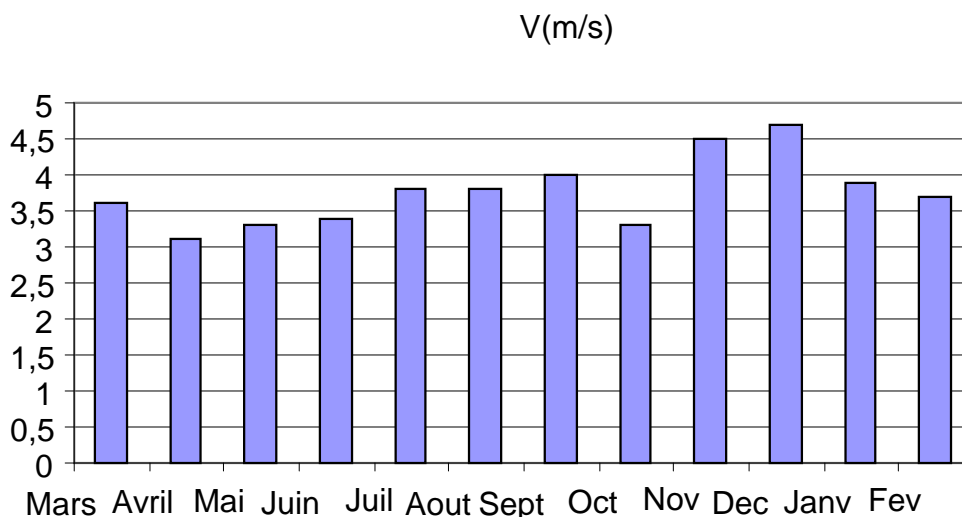
Les résultats des mesures horaires de la vitesse du vent ne sont disponibles uniquement qu'en format physique, ils sont consignés sur du papier quadrillé et renseignés de façon manuscrite. Nous présentons dans le tableau 4.1 les résultats de la campagne de mesure de mars 1984 à février 1985. Ces données sont issues de la station météorologique de la capitale située dans l'enceinte de l'aéroport d'Ambouli.

Tableau 4.1 : Résultats de la station météo

Mois	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev
V (m/s)	3,6	3,1	3,3	3,4	3,8	3,8	4,0	3,3	4,5	4,7	3,9	3,7

Source : ISERST, 1985

Graphique 4.1 : Vitesses mensuelles de vent à la station météo



La vitesse moyenne annuelle sur ce site est relativement faible, de l'ordre de 3,8 m/s. Ces résultats ne donnaient pas réellement des vitesses de vent significatives pour un éventuel développement de la ressource éolienne. De plus, ces mesures étaient faites à l'époque principalement pour les besoins de la recherche. Il faut savoir que l'ISERST (Institut Supérieur d'Etudes et de Recherches Scientifiques et Techniques) actuellement dénommé CERD (Centre d'Etude et Recherche de Djibouti) avait à peine cinq années d'existence.

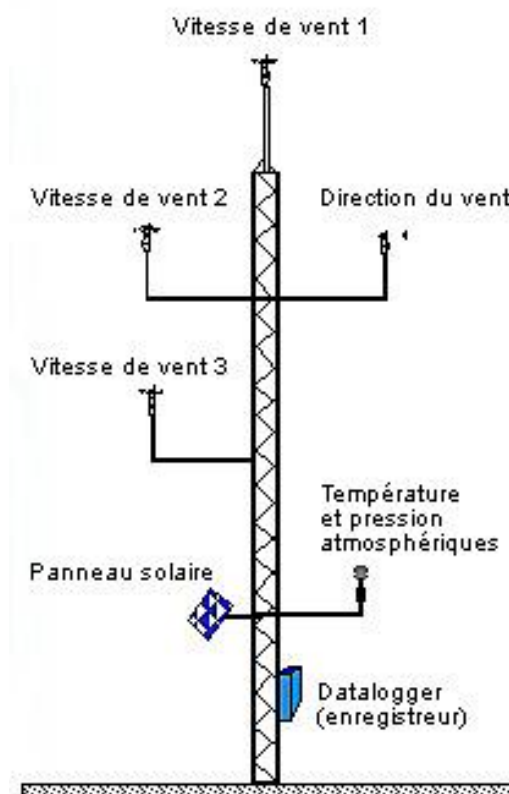
4.1.3 Le nouveau programme de développement de l'éolien

C'est à partir de mai 2002, soit une vingtaine d'année après les premières estimations du potentiel éolien, que le gouvernement a entamé un programme de développement de l'énergie éolienne avec une première phase qui consistait à entreprendre une campagne de mesures des vitesses de vent en vue d'évaluer le potentiel éolien du pays. Si les résultats de cette 1^{ère} phase étaient satisfaisantes, la deuxième étape consistait à procéder à l'installation d'un petit parc éolien pilote d'une capacité initiale de 2 à 3 MW. La première phase de ce programme financé par le gouvernement a été confiée au CERD.

La campagne de mesures du potentiel éolien a débuté avec l'installation de mats de mesure sur 8 sites en 2002 et 2 sites en 2003. Les sites ont été choisis principalement en fonction de leur caractéristique de lieux connus comme étant des endroits très ventés, de leurs facilités d'accès ainsi que de la disponibilité d'espace pour l'installation des mats de mesure. L'ensemble des stations ont été installées dans les régions de l'intérieur du pays.

Les vents étaient mesurés sur trois niveaux à 20, 30 et 40 m tandis que la collecte des données était faite par un automate calibré placé en bas du mat (figure 4.2). Il faut savoir aussi qu'actuellement d'autres technologies plus récentes comme par exemple le système SODAR sont également utilisées.

Figure 4.2 : Modèle de mât de mesure utilisé



Source : image sur internet

Le tableau 4.2 récapitule les caractéristiques des huit premières stations de mesure :

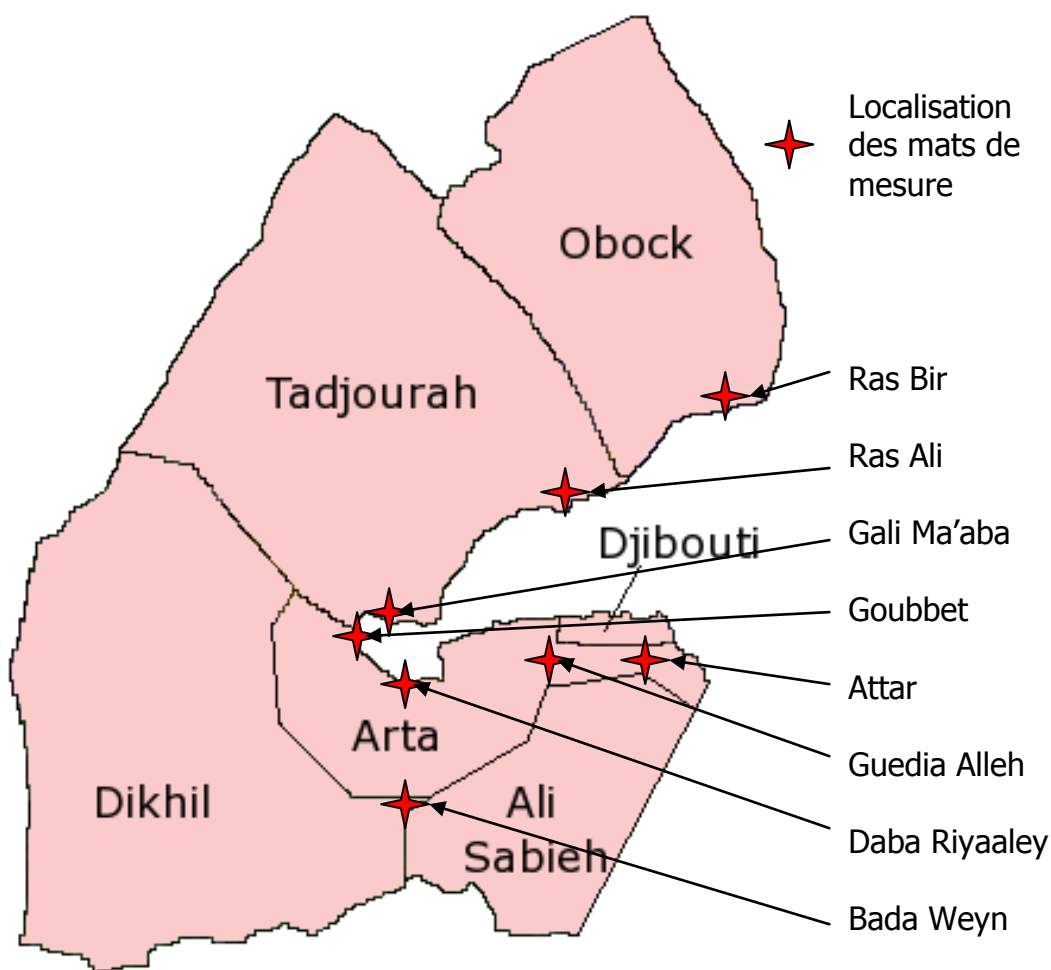
Tableau 4.2 : Caractéristiques des sites choisis

Nom du site	Date d'installation	Région	Coordonnées géographiques	Altitude (m)
Goubbet	3-août-2002	Tadjourah	11°32'N ; 42°29'E	274
Attar	13-sept-2002	Arta	11°29'N ; 43°12'E	34
Guedia Alleh	23-sept-2002	Arta	11°32'N ; 43°17'E	185
Ras Bir	28-sept-2002	Obock	12°15'N ; 43°27'E	68
Ras Ali	19-oct-2002	Tadjourah	11°46'N ; 42°56'E	49
Bada Weyn	29-oct-2002	Ali-Sabieh	11°02'N ; 42°49'E	583
Gali Ma'aba	01-fevr-2003	Tadjourah	11°38'N ; 42°35'E	540
Daba Riyaadley	11-août-2003	Arta	11°23'N ; 42°40'E	582

Source : CERD, 2004 modifié

L'implantation des différentes stations de mesure est indiquée sur la carte géographique de la figure 4.3. On remarquera que chacune des six régions du pays abrite au moins une station à l'exception de Dikhil et que les zones côtières ont été privilégiées dans cette campagne en raison probablement de la forte densité de la population dans le littoral. La région de la capitale n'a pas été ciblée probablement en raison des faibles valeurs enregistrées lors de la 1^{ère} campagne de 1984.

Figure 4.3 : Répartition géographique des points de mesures



4.1.3.1 Les Résultats

Les moyennes mensuelles des vitesses de vent sur chaque site sont consignées dans les tableaux suivants (tableaux 4.3 à 4.9). Certaines données de vitesses étaient manquantes, nous les avons alors générés par extrapolation, cela n'aura aucun impact significatif sur la vitesse moyenne annuelle. Les vitesses mentionnées dans les tableaux ci-après sont celles mesurées à 40 m de hauteur.

* Site de Goubbet :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Goubbet est de **8,9 m/s**.

Tableau 4.3 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

Mois an	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003	Sept 2003	Oct 2003	Nov 2003	Dec 2003	Jan 2004	Fev 2004
V	10,9	10,4	8,6	5,7	7,2	6,5	5,7	10,3	11,6	9,4	10,4	10,3

* Site de Gali Ma'aba :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Gali Ma'aba est de **9,2 m/s**.

Tableau 4.4 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

Mois an	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003	Sept 2003	Oct 2003	Nov 2003	Dec 2003	Jan 2004	Fev 2004
V	10,6	10,6	9,2	8,3	7,0	5,6	5,2	10,3	11,3	9,6	11,4	10,9

* Site de Bada Weyn :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Bada Weyn est de **6,7 m/s**.

Tableau 4.5 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

Mois an	Sept 2002	Oct 2002	Nov 2002	Dec 2002	Janv 2003	Fevr 2003	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003
V	4,4	6,9	7,3	6,8	6,4	7,1	7,5	7,2	6,3	5,2	7,5	6,6

* Site de Ras Bir :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Ras Bir est de **5,4 m/s**.

Tableau 4.6 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

Mois an	Janv 2003	Fevr 2003	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003	Sept 2003	Oct 2003	Nov 2003	Dec 2003
V	6,1	4,4	4,6	4,7	4,0	5,7	9,2	6,5	4,9	5,6	4,9	4,3

* Site de Ras Ali :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Ras Ali est de **5,2 m/s**.

Tableau 4.7 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

Mois an	Janv 2003	Fevr 2003	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003	Sept 2003	Oct 2003	Nov 2003	Dec 2003
V	5,1	5,2	5,5	5,3	4,6	5,1	7,2	6,3	4,6	4,6	4,9	4,2

* Site de Attar :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Attar est de **4,7 m/s**.

Tableau 4.8 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

Mois an	Janv 2003	Fevr 2003	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003	Sept 2003	Oct 2003	Nov 2003	Dec 2003
V	4,9	5,5	4,5	4,3	3,6	5,1	6,4	5,3	3,8	3,9	4,1	4,5

* Site de Guedia Alleh :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Guedia Alleh est de **4,6 m/s**.

Tableau 4.9 : Vitesses Moyennes mensuelles (m/s)

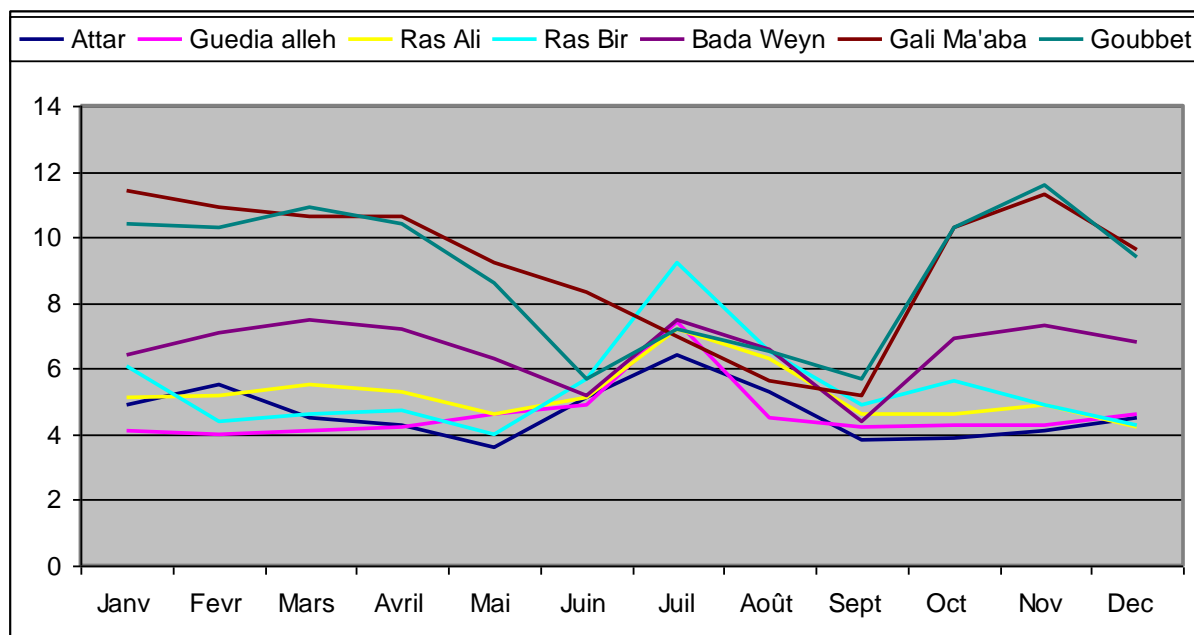
Mois an	Janv 2003	Fevr 2003	Mars 2003	Avril 2003	Mai 2003	Juin 2003	Juil 2003	Août 2003	Sept 2003	Oct 2003	Nov 2003	Dec 2003
V	4,1	4,0	4,1	4,2	4,6	4,9	7,4	4,5	4,2	4,3	4,3	4,6

* Site de Daba-Riyadley :

La vitesse moyenne annuelle sur le site de Daba-Riyadley est de **5,9 m/s**.

Pour ce site, nous n'avons pas les données de vitesses de vent mensuelles, c'est uniquement la vitesse moyenne annuelle qui était mentionnées dans les documents en notre possession.

Graphique 4.2 : Représentation graphique des vitesses de vent mensuelles pour l'ensemble des sites



4.1.3.2 Exploitation des résultats :

Les valeurs moyennes mensuelles des vitesses de vent mentionnées dans ce chapitre nous ont été fournies au cours d'une conférence de presse du CERD consacrée à la restitution des résultats relatives à ce projet d'évaluation de la ressource éolienne à Djibouti. Il ne nous a pas été possible de disposer des valeurs horaires et tri-horaires des vitesses de vents ainsi que des différents paramètres caractéristiques de chaque site (distribution des fréquences de vitesses de vents, rugosité des sites, coefficients de Weibull, ...etc).

Par conséquent, nous ne pourrions pas faire des analyses fines dans cette partie. Néanmoins, pour chaque site, nous avons analysé les valeurs des vitesses moyennes mensuelles enregistrées en fonction des saisons et procédé par la suite à une comparaison substantielle des différentes valeurs de vitesses de vent afin de faire ressortir et retenir les sites à fort potentiel éolien. Enfin, nous ferons des projections pour l'exploitation de ces sites dans le contexte actuel et futur de la politique énergétique de Djibouti.

Il faut noter de prime abord que les résultats de cette étude ne sont pas très significatifs au regard des méthodes habituelles d'exploitation des vitesses qui sont basées sur des périodes d'observation très longues généralement d'une trentaine d'années sinon d'au moins une dizaine d'années. Au niveau du CERD, l'exploitation de ces résultats a été confiée à un bureau d'étude international allemand (Lahmeyer) grâce à un financement de la Banque Mondiale.

Là encore, il ne nous a pas été possible de disposer du rapport final de Lahmeyer sur l'étude de faisabilité de ce projet puisque ce dernier n'a pas été rendu public pour des raisons que nous ignorons. Nous essayerons donc d'exploiter les statistiques mensuelles des vitesses de vent en fonction des considérations climatologiques, socioéconomiques et énergétiques actuelles du pays.

Il faut savoir aussi que les régimes du vent d'un site sont déterminés par les irrégularités des surfaces (topographie), la structure du relief (orographie) et les obstacles isolés dans l'environnement du site d'implantation prévu. Les considérations locales du site sont capitales. En l'occurrence dans notre cas, les données nécessaires pour l'exploitation des résultats qui nous font défaut sont :

- * l'intensité des turbulences sur le site
- * la distribution de la fréquence mensuelle des vitesses de vent
- * les variations journalières et périodes d'accalmie
- * les vitesses maximales enregistrées
- * la rugosité du site
- * le coefficient de cisaillement du vent
- * la rose des vents

Le tableau 4.10 suivant est un tableau récapitulatif des résultats des vitesses de vent enregistrées en moyenne annuelle toujours à 40 m de hauteur pour l'ensemble de ces sites.

Tableau 4.10 : Vitesses moyennes annuelles des sites

Sites	Attar	Guedia Alleh	Bada Weyn	Ras Bir	Ras Ali	Goubbet	Gali Ma'aba	Daba riyaadley
V (m/s)	4.7	4.6	6.7	5.4	5.2	8.9	9.2	5.9

On notera que les sites à priori avec un très bon potentiel éolien sont les suivants:

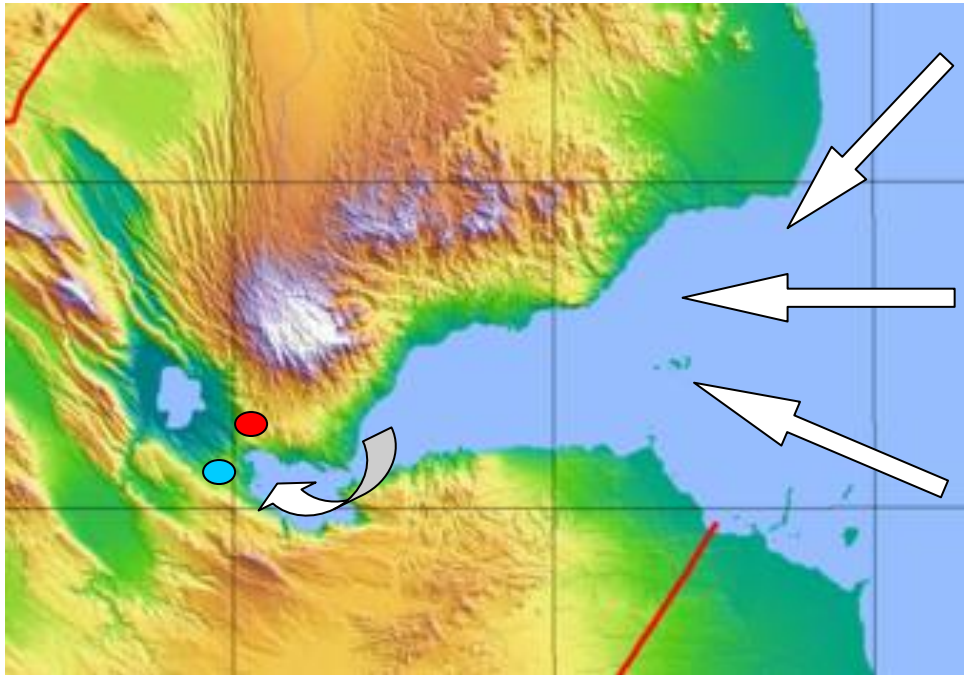
- * Bada Weyn
- * Goubbet
- * Gali Ma'aba

- Sites du Goubbet et de Gali Ma'aba :

Les sites du Goubbet (point de couleur bleue sur la figure 4.4) et de Gali Ma'aba (point rouge) étant localisés dans la même zone (zone d'effondrement du rift d'Assal-Goubbet), on peut estimer qu'ils sont soumis pratiquement au même régime de vent. L'orographie de la zone d'Assal-Goubbet montre que ces deux sites subissent les vents venant du golfe de Tadjourah et accéléré par Effet Venturi à partir de l'entrée de la baie du Goubbet. Le golfe d'Aden étant probablement à l'origine de ces vents. A noter également le fort potentiel éolien au niveau du golfe d'Aden mentionné dans l'atlas éolien mondial qui est supérieur à **8 m/s**.

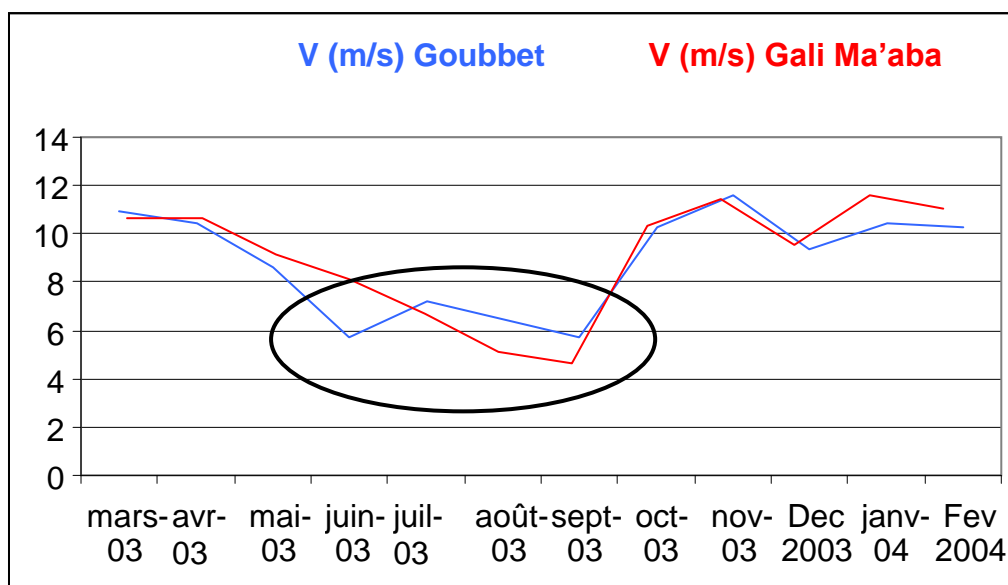
Les flèches sur la figure suivante indiquent la direction de provenance des vents et le chemin pris par la suite. Ces vents qui s'engouffrent dans le golfe de Tadjourah sont repoussés par la chaîne montagneuse des Mabla en direction du Goubbet, ils sont ensuite redirigés vers le Nord-est par les flans montagneux d'Arta en subissant une accélération jusqu'à la faille du rift d'Assal.

Figure 4.4 :



En superposant les variations de leurs vitesses de vents (graphique 4.9), on se rend compte de la similitude des régimes de vents. Ce qui explique également les valeurs voisines des vitesses de vents.

Graphique 4.3 : Vitesses comparées des sites du Goubbet et de Gali M'aba



A noter aussi que la baisse des vitesses de vent de juin à septembre (signalé par un cercle sur le graphique 4.3) correspond à la période d'été à Djibouti où les besoins énergétiques sont très élevés. Malgré le fort potentiel de ces deux sites, il n'y a pas de complémentarité entre la courbe de charge du réseau et les courbes de leur potentiel éolien. Or l'avantage d'installer des éoliennes réside dans le fait d'abord d'apporter une énergie complémentaire en période de pointe.

La vitesse moyenne pour cette période dans les deux sites est de 6,4 m/s soit une dégradation de près de 30% sur la vitesse moyenne annuelle. Cette baisse prend toute sa signification dans le calcul du potentiel énergétique qui est fonction du cube de la vitesse moyenne. Pour ce site, un manque à gagner considérable d'un point de vue énergétique est donc à déplorer. Les sites de Goubbet et de Gali Ma'aba sont situés dans des zones non couvertes par le réseau et sont distantes de la ville d'Arta (là où s'arrête le réseau) respectivement de 60 et 75 km.

L'exploitation de ces deux sites nécessitera à coup sûr des surcoûts prohibitifs consécutifs à la construction de lignes électriques que le gouvernement ne pourrait assumer tout seul. Raison pour laquelle la construction de lignes électriques n'est envisagée que dans le cadre d'un partenariat avec des investisseurs privés. Les accords signés récemment avec une firme étrangère (Mapple Indian Ocean Ressources) pour l'exploitation de ces ressources montrent bien que l'acheminement de l'électricité produite est du ressort de l'Etat, en quelques sortes la contrepartie nationale.

L'éloignement du réseau actuel constitue également un facteur limitant pour le développement de l'éolien dans cette zone.

Concernant la géologie de la zone, comme nous l'avons vu précédemment (en chapitre 3), le Goubbet est une zone de rift où les phénomènes telluriques sont pratiquement permanents, il existe donc un réel danger quant à l'installation d'un parc éolien. La prise en compte de ce facteur de risque occasionnera sans doute un surcoût pour les projets éoliens et donc à rendre cette énergie moins compétitive par rapport à la géothermie (ou peut-être même au thermique classique ?).

De plus, la topographie de la zone très accidentée rendra difficile non seulement l'accès à ces deux sites ainsi que l'installation même de parcs éoliens mais également l'extension de ces derniers.

Enfin, l'immense potentiel géothermique de cette zone (voir chapitre 3) constitue un facteur d'occultation de ce potentiel éolien et le fera passer, sans doute, au second plan des potentialités énergétiques à exploiter en priorité dans la zone.

Dans tous les cas, l'intérêt de l'utilisation de l'énergie éolienne dans cette zone sera toujours justifié en raison des perspectives d'exploitation à l'échelle industrielle de ses richesses naturelles (notamment minières) telles que le sel du Lac Assal ou ceux du sous sol comme la perlite ou autres minerais (voir carte des ressources minières du pays en chapitre 3). Le dessalement de l'eau de mer pourrait également être envisagé.

Il faut savoir aussi qu'un programme de développement intégré de toute la zone du Goubbet a déjà été élaboré, il y a de cela quelques années, pour la valorisation de ses richesses naturelles. Il est prévu entre autres la construction d'un port industriel sur la baie du Goubbet.

- Site de Bada Weyn :

Les vitesses enregistrées sur ce site sont pratiquement constantes toute l'année. Hormis la valeur de 4,4 m/s enregistrée pour le mois de septembre qui nous paraît incohérente. Il faut rappeler que les résultats de cette étude ont été obtenus avec une incertitude de près de 30% (Lahmeyer, 2005), l'ensemble des résultats reflète un site caractérisé par une régularité du régime des vents. Cette caractéristique est un atout considérable.

Ce site, situé en contre bas des hauteurs de la ville d'Ali-Sabieh qui elle-même se situe à une altitude de l'ordre de 700 m, est une vaste plaine pratiquement plate et connu pour ses vents violents puisqu'elle abrite un centre de char à voile très fréquenté (voir photo 4.1). Il peut donc accueillir un parc éolien de grande taille. Il est également bien desservi par une route goudronnée en bon état.

De plus, les besoins en électricité dans cette région du sud du pays sont amenés à être importantes dans un proche avenir. En effet, la ville d'Ali-Sabieh, proche du site, soit à une quinzaine de kilomètres, est une ville qui commence à s'industrialiser. De plus cette ville est située sur le tracé de la ligne d'interconnexion électrique entre Djibouti et l'Éthiopie dont la mise en œuvre effective est prévue pour fin 2009.

Photo 4.1 : le site de Bada Weyn



Source : rapport BRL, 2005

Plusieurs projets d'envergure nationale y ont déjà élu domicile dans cette ville, on a recensé comme projet déjà réalisé ou en cours, les exemples suivants :

- L'installation d'une cimenterie qui est en phase de réalisation,
- Une unité industrielle de fabrication de marbre et autres produits sanitaires exploitée par la société CNC a déjà commencé à commercialiser ses produits,
- L'usine d'embouteillage d'eau minérale ILJANO exploitée par la société SIEMAS fonctionne depuis deux années.

Malheureusement, ces petites industries ne sont pas connectées au réseau local, elles produisent elles-mêmes leur électricité. En effet, la desserte électrique de la ville est assurée par une centrale thermique diesel comme source principale située à Dikhil, et une de secours à Ali Sabieh dont la capacité est insuffisante pour alimenter ces usines. La charge du réseau qui alimente en plus la petite localité de Mouloud varie de 300 kW à 1200 kW au cours de l'année avec une capacité installée de 3128 kW.

On constate donc que malgré ses vitesses sensiblement moins importantes, ce site a beaucoup plus d'avantages que les deux précédents. Malheureusement, à l'heure actuel, il n'est pas indiqué d'envisager l'installation d'un parc éolien en raison de la taille du réseau. Réserve que nous avons émise au cours d'une réunion consacrée à la mise en place de ce projet et qui avait eu lieu dans le bureau du Premier Ministre en mars 2003.

Auparavant, le CERD envisageait l'implantation d'un tel parc sur ce site si les résultats des vitesses de vent s'avéraient convaincants. Par la suite, le bureau d'étude Lahmeyer a confirmé l'impossibilité technique d'un tel scénario à l'heure actuelle. Il a proposé de se rapprocher du réseau de Djibouti-Arta qui pouvait seul absorber l'électricité produite par une centrale éolienne.

Le meilleur site qui pouvait être un bon compromis entre l'exigence d'une distance minimale par rapport au réseau et l'emplacement actuel des sites de monitoring était la ville d'Arta, le point géographique extrême du réseau. Les données de vent prises en compte pour les études de faisabilités de l'implantation d'un parc éolien à Arta sont ceux du site de Guedia-Allah (63%) et ceux de Daba-Riyaadley (37%).

Il faut rappeler que la capacité initiale du projet a été ramenée à 1,8 MW pour des raisons de contraintes budgétaires. A rappeler également que le financement de cette phase pilote était assuré par la Banque Mondiale.

La faisabilité technique de ce projet a été finalisée par le même bureau d'étude. Malheureusement, ce dernier dont pourtant le financement était acquis n'a pas été conduit à termes. Au vu des documents consultés et des contacts que nous avons eu avec certaines personnes impliquées dans ce projet, nous pensons que les deux raisons suivantes furent probablement à l'origine :

- * La taille de ce parc était trop faible pour que des grands fabricants d'éoliennes puissent s'y intéresser. En effet, le déploiement de la logistique nécessaire (non disponible dans le pays et même sur la région) pour la mise en place de ce parc occasionnerait un surcoût très élevé.
- * Les vitesses de vent ne reflétaient pas réellement les conditions du site et comme les fabricants sont tenus de garantir une certaine productivité annuelle, ils ne pouvaient logiquement apporter cette dernière avec le manque de données réelles et fiables (30% d'incertitude).

A noter toutefois que la société française VERGNET fut le seul fabricant venu faire une proposition qui consistait à installer des éoliennes de petites puissances, propositions non conformes au cahier des charges qui préconisait une puissance unitaire minimale de 600 kW pour les aérogénérateurs.

4.2 Estimations du potentiel éolien :

4.2.1 Le gisement éolien à Djibouti

Le gisement éolien est déterminé avec l'aide des logiciels tels que WAsP, WindPro, RETScreen, ...etc et en fonction des caractéristiques propres des éoliennes choisies (courbes de puissances). Des méthodes empiriques basées à la fois sur les diamètres des pales des aérogénérateurs et des vitesses de vents sont également employées dans certains cas (Merzouk et al.2006).

Le potentiel éolien théorique disponible est donné par la relation (1) suivante :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \overline{v^3} \quad (4.1)$$

* $\rho = 1,25 \text{ kg} / \text{m}^3$ représente la masse volumique de l'air

La vitesse cubique moyenne est déterminée par la distribution de Weibull des fréquences de vitesses de vent $f(v)$

$$\bullet \quad f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right)$$

▪ k et c étant les paramètres de Weibull caractéristiques du lieu

* La vitesse cubique moyenne est ensuite déduite par intégration du moment d'ordre 3, on a :

$$\overline{v^3} = \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv$$

* On abouti à la relation suivante pour la vitesse cubique moyenne

$$\overline{v^3} = \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv$$

Le potentiel énergétique récupérable s'écrit donc :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (4.2)$$

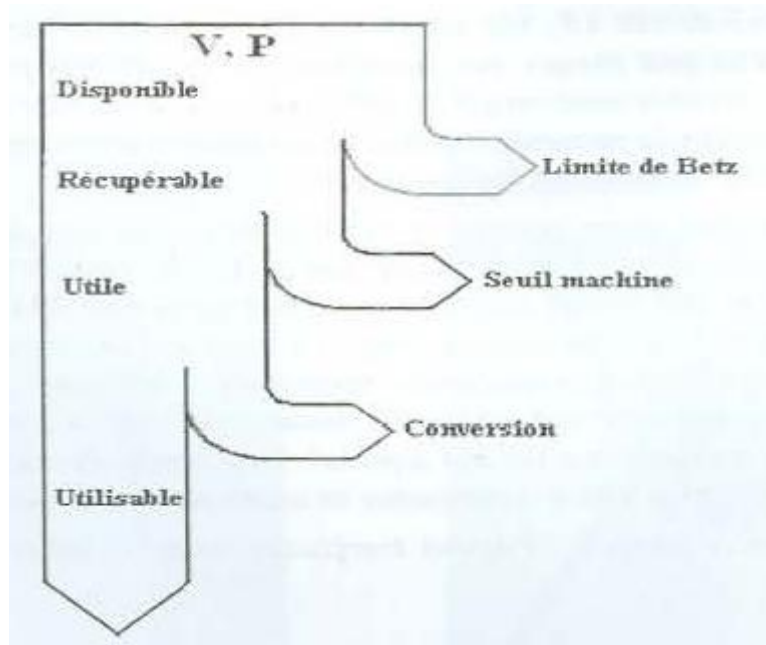
Où Γ représente la fonction gamma

Il faut savoir également que le potentiel énergétique récupérable subi des dégradations successives dues à trois facteurs (figure 4.5) :

- * Le limite de Betz : seulement 37% de la puissance disponible est récupérable.
- * Le seuil des aérogénérateurs : chaque machine récupère l'énergie en fonction de ses caractéristiques (diamètres des pâles, etc)
- * La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Compte tenu des considérations déjà mentionnées plus haut (non disponibilité des résultats détaillés des vitesses de vent), le gisement éolien disponible en République de Djibouti ne pourra être évalué ici. Néanmoins, nous pourrions estimer le taux de pénétration de l'énergie éolienne dans le réseau électrique du pays sans tenir compte de la perspective proche du maillage du réseau électrique national et de l'interconnexion régionale (Ethiopie notamment) qui pourrait augmenter ce taux de pénétration.

Figure 4.5 : Représentation schématique des pertes des capteurs éoliens



4.2.2 Estimation du productible éolien

Pour l'estimation du potentiel éolien actuellement exploitable, nous utiliserons le logiciel canadien *RETScreen International*. Pour cela, nous allons d'abord évaluer le taux de pénétration de l'éolien dans le réseau national et choisir ensuite le ou les sites potentiels à exploiter en fonction des besoins énergétiques actuels.

De par le monde, le retour d'expérience sur les éoliennes déjà en fonctionnement a montré que le taux de pénétration de l'énergie électrique produite par les aérogénérateurs et injectées sur le réseau se situe aux alentours de 25 à 30% maximum. Au delà, des problèmes techniques apparaissent comme par exemple des fluctuations de la tension, des flickers (grésillement des ampoules électriques) et parfois l'apparition des harmoniques dans le réseau.

Dans le cas de Djibouti, la charge minimale du réseau électrique national en période creuse (hiver) avoisine actuellement les 26 MWe (chiffre de l'année 2008). En prenant un taux de pénétration de l'ordre de 30%, on trouve une puissance maximale admissible pour l'éolien dans notre pays de l'ordre de 7,8 MWe.

Aussi, le choix du site repose essentiellement sur la proximité du réseau, or à l'heure actuelle, aucun des sites n'est proche du réseau mais une projection optimiste à court terme laisse présager que le site de Bada Weyn sera probablement traversé par la ligne d'interconnexion Djibouti-Ethiopie selon le tracé initial de cette dernière.

Pour la suite, nous partirons des critères suivants :

- * Une puissance maximale à installer de 8 MW.
- * Les données de vent du site de Bada Weyn.
- * Les paramètres climatiques de Djibouti-ville (tirés du site web de la NASA)
- * Un coefficient de cisaillement du vent de 0,4 (pratiquement pas de turbulence)

Avant l'utilisation du logiciel, nous allons corriger en extrapolant la valeur de la vitesse de vent enregistrée pour le mois de septembre 2002 correspondant à la date de mise en service de la station que nous estimons erronée. L'extrapolation pour ce mois nous donne une valeur de 6,8 m/s que nous considérerons pour la suite des calculs.

Après avoir renseigné la feuille de calcul de RETScreen, nous choisissons le type d'aérogénérateurs qui conviendrait pour ce site. Pour des raisons de proximité géographique, nous ciblons en priorité les fabricants européens. Notre choix se porte ensuite sur une éolienne GAMESA G52-850kW avec hauteur de moyeu à 65m dont la courbe de puissance est donnée sur le graphique 4.10.

La moyenne annuelle de la vitesse du vent à hauteur de moyeu est obtenue par la relation suivante :

$$\frac{V}{V_o} = \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (4.3)$$

V_o : vitesse en m/s à la hauteur h_o de référence au-dessus du sol

α : Coefficient de cisaillement du vent caractéristique du lieu (entre 0,1 et 0,4)

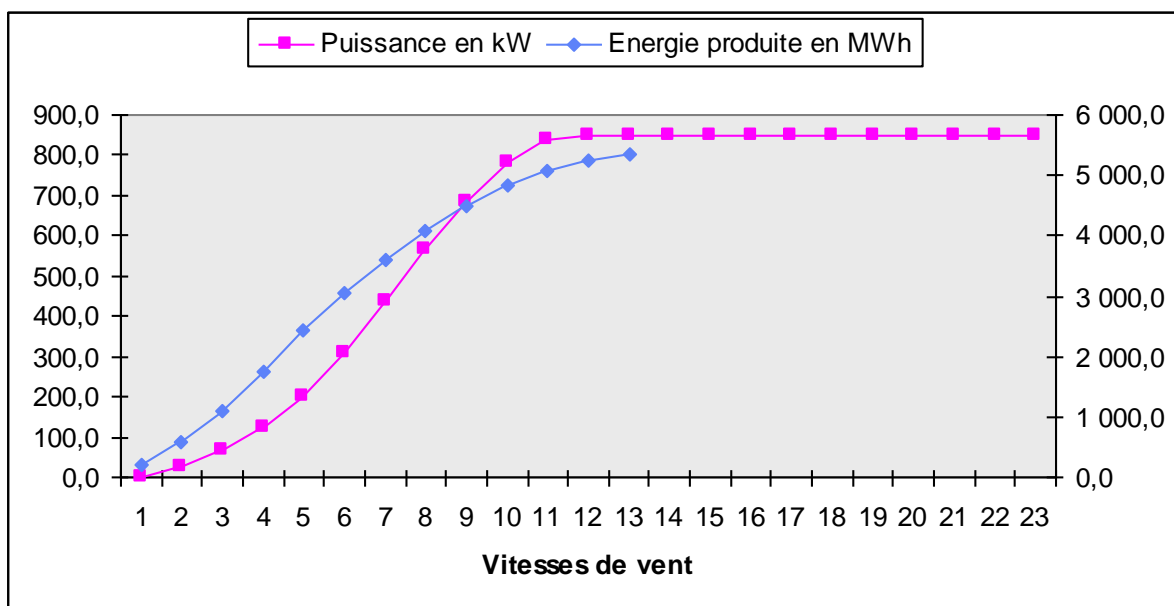
En appliquant la relation (4.3), nous avons :

$$V = V_o \times \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha = 8,9 \times \left(\frac{65}{40} \right)^{0,4}$$

$$V = 10,8 \text{ m/s}$$

La courbe de puissance de l'aérogénérateur est un élément important dans la détermination du productible énergétique, elle est fournie par le constructeur. Ce dernier est tenu de garantir les productions annoncées. Raison pour laquelle il est conseillé de garder sur place les mats de mesure pour mesurer ensuite les courbes de puissance de l'éolienne et faire valoir les droits de recours à l'égard du constructeur en cas de défaillance constatée sur la production énergétique ou bien au cas où des vices techniques seraient constatés sur l'éolienne.

Graphique 4.10 : Courbe de puissance de la GAMESA G52-65m



Les résultats des calculs du modèle énergétique de RETScreen sont mentionnés dans le tableau 4.11. Ici, le choix des aérogénérateurs a quelque peu modifié la puissance installée qui devient 8,5 MW. En effet, pour avoir à minima 8 MW, il était nécessaire de prendre au moins 10 aérogénérateurs de 850 kW. La production électrique annuelle avec une puissance de 8,5 MW est estimée à 33998 MWh. Soit 11,2 % de la production nationale d'électricité en 2005.

Il faut rappeler aussi que la disponibilité des centrales éoliennes est de l'ordre de 95%, ceci témoigne de la fiabilité de la technologie des aérogénérateurs. Aussi, le facteur d'utilisation de 45,7% qui correspond dans notre cas à 4000 heures de fonctionnement sur l'année est dans la moyenne haute comparativement aux chiffres habituels qui se situent entre 3500h et 4000 heures.

Tableau 4.11 : Résultats de la simulation avec RETScreen

Paramètres	Unités	Valeurs	
Évaluation des ressources			
Vitesse de vent - annuelle	m/s	8,9	
Mesuré à	m	40,0	
Coefficient de cisaillement du vent		0,4	
Température de l'air - annuelle	°C	29,9	
Pression atmosphérique - annuelle	kPa	100,8	
Éolienne			
Capacité électrique par turbine	kW	850,0	
Fabricant	Gamesa		
Modèle	G52-850kW - 65m		
Nombre de turbines		10	
Capacité électrique	kW	8 500,0	
Hauteur du moyeu	m	65,0	10,8 m/s
Diamètre du rotor par turbine	m	52	
Surface balayée par turbine	m ²	2 124	
Courbe d'énergie		Standard	
Facteur de forme		2,0	
Pertes par effet de sillage	%	5,0%	
Pertes au niveau des pales	%	8,0%	
Pertes diverses	%	2,0%	
Disponibilité	%	95,0%	
Facteur d'utilisation	%	45,7%	
Électricité exportée au réseau	MWh	33 998	

4.2.3 Estimation du potentiel de réduction des Gaz à Effet de Serre (GES)

Les éoliennes étant des technologies de production d'énergie propre, en principe elles n'émettent pas de GES, nous allons aussi négliger les GES émis lors de la fabrication des machines. La quantité de Gaz à effet de Serre évitée en utilisant cette technologie est calculée par le logiciel RETScreen, les résultats sont les suivants (tableau 4.12).

Tableau 4.12 : Analyse des émissions de GES (année de référence 2005)

Réseau électrique de référence (Niveau de référence)		Facteur d'émissions GES (avant pertes)	Pertes t-d	Facteur d'émissions GES
Pays - région	Type de combustible	tCO ₂ /MWh	%	tCO ₂ /MWh
Djibouti	Mazout (180cSt)	0,417	11,0%	0,469
Électricité exportée au réseau	MWh	33 998	Pertes t-d	
Émissions de GES				
Cas de référence	tCO ₂	15 929,5		
Cas proposé	tCO ₂	0,0		
Réduction annuelle brute d'émissions de GES	tCO ₂	15 929,5		

Le facteur d'émissions des GES exprimé en tCO₂/MWh est obtenu de la manière suivante :

- * Pour 2005 les émissions de GES dues à la production électrique sont de 126,17 GgCO₂ (tableau 1.19 rubrique fuel) exprimées en tCO₂ on trouve 126170 tCO₂, cette valeur rapportée à la production électrique brute pour la même année (303 000 MWh) équivaut à 0,417 tCO₂/MWh.
- * Les pertes techniques sur le réseau national sont estimées à 11% (ESMAP, 2003).

Ce parc éolien aurait donc permis d'éviter une quantité de 15 930 tCO₂ de Gaz à Effet de Serre, cela reviendrait à économiser une quantité de 33 076 Barils de pétrole brut.

On pourrait pousser la réflexion plus loin en chiffrant le crédit carbone de ce parc éolien en prenant en référence les coûts actuels en vigueur en France (17 €/tCO₂), cela donnerai avec le taux de change actuel de 250 DJF pour 1 Euro, un crédit de 67 702 500 DJF.

4.2 Perspectives de la filière :

Il faut rappeler tout d'abord que le projet pilote d'implantation d'éoliennes d'une puissance de 1,8 MW sur le site d'Arta n'a pas été concrétisé pour les raisons évoquées plus haut. Malgré cela, le gouvernement tient à développer cette filière qui profitera du maillage du réseau national qui sera réalisé prochainement avec la mise en service de la ligne d'interconnexion électrique avec l'Éthiopie (prévue en 2009) et la mise en service de la centrale géothermique qui sera construite à Assal-Goubbet (prévue en 2012).

A cet effet, un contrat a été signé en avril 2009 avec la société Mapple Indian Ocean Ressources, pour la construction dans la zone du Ghoubet, d'une centrale électrique éolienne et solaire d'une capacité de 40 MW. La centrale servira également au dessalement de l'eau de mer, pour une capacité de production de 40000 m³ par jour. Le montant de l'investissement de la première phase du projet est estimé à 200 millions \$.

**CONCLUSION
et
RECOMMANDATIONS**

La République de Djibouti est engagée depuis une décennie dans un processus de modernisation de son économie, en témoigne les gros projets d'investissements dans le domaine des infrastructures comme par exemple la mise en service d'un deuxième port moderne, la réhabilitation et construction de voies de communication (routes aux normes internationales, aéroport international géré par un consortium privé), ...etc.

Au niveau régional, les échanges commerciaux ont commencé à se renforcer avec l'ouverture du pays au marché du COMESA (Common Market of Eastern and Southern Africa). Ce développement a valu à Djibouti de ne plus figurer dans la liste des pays pauvres très endettés (PPTE) des bailleurs de fonds.

Parallèlement, le gouvernement est entrain de réduire la fracture sociale avec la création récente du Secrétariat d'Etat chargé exclusivement du développement social. L'Agence Djiboutienne pour le Développement Social (ADDS), bras opérationnel de ce département, a intensifié ses actions en faveur des zones les plus défavorisées (construction de centre de développement communautaire, réhabilitation des infrastructures éducatives et sanitaires, ...etc.) et des zones isolées (fourniture de kit solaires, équipements des puits en pompes solaires, ...etc.). Un accent particulier a été mis pour faciliter l'accès à l'énergie.

Les indicateurs économiques du pays sont aujourd'hui au vert, les grands projets de développement portés par des investisseurs privés commencent à affluer, les propositions se suivent à un rythme soutenu, ils vont de la construction d'une raffinerie de pétrole jusqu'au plus faramineux comme la construction d'un pont reliant l'Afrique à l'Arabie (entre Djibouti et Yemen).

Le rythme de la croissance actuel (3,5% par an depuis 2005, PNUD) est tel qu'il a déjoué toutes les prévisions . Le doute n'est plus permis, la République de Djibouti est bien partie pour sortir du cercle vicieux du sous développement. La question cruciale qui se pose alors est la suivante : Comment rendre durable ce processus de décollage économique ?

Un des grands défis à relever pour le pays est incontestablement la problématique de l'énergie, un maillon essentiel du processus de développement économique. A l'aube des trentenaires de Djibouti, plus rien ne sera comme avant. Une chose est sûre : le secteur énergétique resté longtemps calqué sur le rythme de la croissance démographique (2,8%) est amené aujourd'hui à changer d'échelle ! Désormais, c'est la croissance économique qui va imposer la cadence.

Aussi, pour être en mesure de faire les recommandations que nous jugerons utiles pour la planification énergétique du pays et nécessaires au maintien du rythme actuel de croissance, il y a lieu dans un premier temps de faire un diagnostic sans complaisance de ce secteur stratégique. Ce diagnostic sera tiré essentiellement des travaux de cette thèse.

Nous verrons ensuite les atouts des énergies renouvelables exploitables pour le pays. Les actions de Maîtrise de la Demande d'Electricité (MDE) qu'il y a lieu de préconiser seront également abordés. Et enfin, nous préconiserons un schéma directeur pour la planification énergétique pour les 5 prochaines années.

* **Les faiblesses actuelles du secteur énergétique**

▪ *Une forte dépendance énergétique :*

Djibouti ne dispose pas encore de ressources fossiles prouvées (pétrole, charbon, gaz, ...etc.). Le pays importe 88% de ses besoins énergétiques sous formes de combustibles fossiles tandis que la part des combustibles ligneux ne représente que 2,6%, cette caractéristique est sans commune mesure avec les pays limitrophes ou même ceux de la plupart des pays africains où on observe une tendance inverse. Pour exemple, l'Erythrée et le Mali tirent respectivement 82% et 90% de leurs besoins énergétiques à partir de la biomasse.

Si l'on prend en compte la production électrique faite, elle-même, exclusivement à partir des produits pétroliers, la dépendance énergétique de notre pays vis-à-vis de l'extérieur est de 97,4%. Une situation qui fragilise ce secteur qui, comme on vient de le souligner plus haut, sera amené à être le soubassement de la croissance économique actuellement observée. Il faut toutefois reconnaître que cet état des choses est lié plus à la nature du sol qu'à une volonté quelconque. En effet, l'aridité et la faiblesse du couvert végétal font que les ressources ligneuses soient très limitées dans le pays.

▪ *Une carte énergétique défavorable :*

Du fait de l'inégale répartition démographique (les citadins représentent 85% de la population), 96% des moyens de production sont concentrés sur la capitale. Et comme les autres régions ne sont pas connectées au réseau principal, nous avons donc un réseau en ilotage. De plus, le système de production installé dans ces régions est basé sur l'utilisation de petits groupes diesel, ce qui a pour conséquence de rendre les coûts de production électrique très élevés.

Cette carte énergétique défavorise donc les autres régions au détriment de la capitale et hypothèque sérieusement leur développement (notamment grâce à la valorisation de leurs richesses naturelles). Pour illustrer cela, voici un constat frappant : plusieurs investisseurs potentiels ont dû renoncer à leur projet d'exploitation des ressources minières malgré les indices favorables recueillis sur le terrain lors de leurs campagnes d'exploration à cause de la non disponibilité d'un réseau électrique.

▪ *Un taux d'électrification faible :*

La forte concentration de la population dans la capitale (Densité de 400 hab/km²) devrait normalement se traduire par un taux d'électrification élevé. Ce qui n'est pourtant pas le cas puisque le taux de desserte urbaine ne dépasse guère le tiers de cette population (34,5%). Un taux relativement bas pour une population majoritairement urbaine. Les études ont montré que cette situation ne résulte pas d'une faible densité du réseau mais tout simplement d'un coût d'accès à l'électricité inaccessible (conclusions de l'enquête EDAM-Energie de 2004).

▪ *Un tarif de l'électricité trop élevé :*

Le tarif de l'électricité est en général fonction de plusieurs paramètres tels que le système de production lui-même, les coûts d'exploitation et maintenance, la politique tarifaire appliquée entre en ligne de compte également (par exemple : la péréquation des tarifs), ...etc.. A Djibouti, les tarifs pratiqués (0,28 \$US/kWh) sont les plus élevés au monde après ceux de Madagascar.

Ces tarifs n'ont cessé d'augmenter depuis 1983 (+38%) et malgré la baisse de 9% consentie cette année 2009, la majorité des ménages trouvent ces tarifs excessivement chers (EDAM-Energie, 2004). Ce coût du kWh accentue probablement aussi l'actuel constat de l'augmentation de la pauvreté relative (de 64,9 % en 1996 à 74,4 % de la population en 2002, BAD 2004).

Plusieurs études ont montré que la principale cause était les coûts de production qui sont jugés excessivement élevés. Plusieurs raisons sont à l'origine de cette situation, entre autres :

- la flambée des prix des produits pétroliers au niveau du marché international et le système d'approvisionnement non concurrentiel pratiqué par l'opérateur national,
- le coût de la charge sociale engendrée d'une part par l'obligation de desserte des secteurs publics qui sont énergivores et n'honorent pas leurs factures et d'autre part, par un quota du kWh élevé pour la catégorie sociale ainsi qu'un quota annuel gratuit de 4000 kWh pour l'ensemble des travailleurs (près de 900 agents),
- la situation de monopole de l'unique opérateur l'empêche quelque peu de s'adapter au contexte international (par exemple l'ouverture du capital aux actionnaires, désengagement sur certains segments déficitaires comme la production, ...etc.),
- le vieillissement du parc de production (baisse de rendement de production) et les coûts élevés de son remplacement.

▪ *Un secteur non réglementé :*

Comme nous l'avons vu, l'Etat djiboutien a encore le monopole sur ce secteur stratégique. Certes, ce "monopole naturel" est encore en vigueur dans les pays occidentaux comme le Canada, la France,...etc mais ne constitue pour autant un obstacle à la modernisation. De nos jours, le secteur électrique est considéré comme un secteur industriel à part entier, il est donc susceptible d'attirer des investissements privés.

A cet effet, la plupart des pays industrialisés (et tout récemment les pays en voie de développement) se sont dotés d'une réglementation et une législation spécifique pour ce secteur. Les capitaux privés ne pourront injectés dans l'industrie de réseau que si une législation souple, équitable et particulièrement attrayante est établie. Or, c'est ce qui fait cruellement défaut à ce jour à Djibouti. La réforme du secteur de l'énergie devra donc être inscrite dans les priorités de l'action gouvernementale.

- *Absence de planification énergétique :*

Le dernier Plan Energétique National (PEN) date de 1987, il faut dire que c'est le seul qui ait été élaboré pour le pays. Ses prévisions couvraient la période 1985-2000, soit quinze années. Nous avons montré dans nos travaux que les prévisions de ce PEN présentaient un écart considérable sur les projections établies par exemple pour l'année 2000 (+37% pour les chiffres réels). Cela fait donc près de dix qu'il n'a pas été réactualisé, nous voyons bien qu'en 2000 (Il y a dix ans déjà), il était considéré comme étant caduque.

Aujourd'hui face à ce manque de visibilité, tous les acteurs impliqués dans ce secteur font cavalier seul. Pour exemple, La Prmature abrite une cellule énergie qui pilote le projet éolien, l'ADDS a mis en place sans le nommer une cellule électrification rurale en son sein, chaque département concerné par ces questions poursuit seul sa propre "politique énergétique". Il s'ensuit un manque de coordination et donc une dilution des actions qui auraient pue être bénéfique pour le développement harmonieux du pays.

Aussi, une politique énergétique cohérente repose nécessairement sur une planification fiable. Il est donc, là encore, inéluctable de réorganiser ce secteur et de procéder par la suite à l'élaboration d'un nouveau Plan Energétique Nationale.

- * **Atouts des énergies renouvelables**

D'un point de vu général, l'épuisement prévisible des énergies fossiles, la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique, la prise de conscience pour la sauvegarde de l'environnement et enfin la prise en compte du développement durable dans les politiques énergétiques ont mis les énergies renouvelables au cœur d'un enjeu stratégique pour l'avenir de notre planète.

Mais pour la République de Djibouti, il est presque vital d'exploiter son potentiel en matière d'énergies renouvelables pour assurer sa croissance économique, réaliser des économies de devises et atteindre dans un premier temps les objectifs de développement humain du Millénaire dont le calendrier est fixé à 2015.

Comme nous venons de le voir précédemment, La République de Djibouti pays dispose d'un énorme potentiel en ressources énergétiques renouvelables encore largement sous exploité pour ne pas dire négligé. Nous exposerons dans ce qui suit, les avantages que le pays aurait tiré de la mise en valeur de ses ressources.

- *L'énergie solaire :*

Au niveau de l'énergie solaire photovoltaïque (PV), comme déjà mentionné, 1 heure de soleil captée équivaut à 80 fois les besoins électriques actuels du pays ! Le potentiel solaire techniquement exploitable est évalué à 200000 MWh/jour. Or, avec la capacité installée actuellement en solaire photovoltaïque (290 kWc), cela équivaut à une production électrique annuelle de 657 MWh. Rapporté à la production électrique nationale, le pays produit aujourd'hui 0,3 % de son électricité à partir de cette source d'énergie renouvelable.

Le solaire PV pourrait régler en grande partie, dans les zones rurales, les problématiques récurrentes de :

- L'accès à l'électricité : Ce volet a connu un fort développement depuis 2006. Le Ministère de l'Education ayant pris la décision d'équiper systématiquement les nouvelles écoles rurales en énergie PV. Les besoins sanitaires de base dans les zones isolées peuvent être solutionnés à grande échelle avec l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque (électrification des dispensaires ruraux).
- L'accès à l'eau : Les besoins actuels sont six fois supérieurs à la quantité disponible (25 Millions de m³), le manque d'eau est principalement dû aux manques des moyens d'exhaure. A cet effet, Le Ministère de l'Eau a intensifié depuis 2007 son programme d'équipement en pompes solaires qui sont exclusivement utilisées sans stockage ou "au fil du soleil".

Le solaire thermique n'est pas encore à l'ordre du jour et pourtant certaines régions montagneuses du pays, particulièrement les régions nord, peuvent bénéficier de :

- L'eau chaude solaire (ECS) : on rapporte que les écoliers et la plupart des villageois ne se lavent pas à cause de la température de l'eau très froide pendant l'hiver. Les habitants préférant réserver leurs collectes de bois de chauffe en priorité à la cuisine. Ces systèmes ECS favoriseraient une bonne hygiène et contribueraient donc à une bonne santé des populations rurales ainsi que la préservation du fragile écosystème.
- Cuiseurs solaires : Les maladies diarrhéiques dues à une eau contaminée sont les plus fréquentes dans les zones reculées. Il faut savoir que les cuiseurs solaires sont efficaces pour la pasteurisation des bouteilles d'eau et des biberons. Ils ont également un impact sur la préservation de l'environnement (moins de bois de chauffe pour la cuisine), ils contribuent donc à l'amélioration des conditions de vie de ces populations (Etude de cas n°2).

▪ *L'énergie éolienne :*

Aujourd'hui, aucune forme d'énergie éolienne n'est exploitée dans le pays. La dernière étude du potentiel a montré l'existence d'une ressource éolienne. L'estimation de la puissance actuellement envisageable est de 8 MW. Les atouts de cette énergie renouvelable pourraient se matérialiser comme suit :

- Pour le petit éolien : nous avons constaté que la possibilité d'utilisation du petit éolien est négligée dans le pays. Et pourtant, le problème de la soif dans les zones isolées pourra être résolu avec l'installation de pompes éoliennes pour l'exhaure de l'eau. Pour exemple, le Danemark a réalisé entre 2000 et 2002, un programme d'équipement de 1200 puits avec des pompes éoliennes en Somalie. A noter aussi que l'électrification rurale peut être également envisagée pour les régions très ventées à l'instar des petites éoliennes démontables (type Vergnet) répandues en Mongolie. Toutefois, il sera nécessaire de poursuivre les campagnes de mesure sur la partie Ouest du pays où l'on observe une forte densité de population rurale.

- Pour le grand éolien : Malgré l'échec du projet pilote d'installation d'éoliennes de 1,8 MW à Arta, l'éolien de grande puissance pourrait apporter sa contribution à l'offre électrique après l'interconnexion électrique avec l'Éthiopie et le maillage du réseau national. Il serait donc nécessaire de procéder à partir de ce moment là à une nouvelle évaluation de la capacité éolienne que l'on pourra installer dans le pays.

- *L'énergie géothermique :*

Le relief, la situation géologique et la faible superficie du pays ont permis l'exploration assez aisée de ses ressources géothermiques sur la majeure partie du territoire. Contrairement aux idées reçues, après deux décennies d'exploration, il ne reste plus qu'à passer à la phase exploitation. Le potentiel géothermique techniquement exploitable en République de Djibouti est actuellement estimé entre 350 et 650 MWe. Le potentiel économiquement exploitable pour la seule région d'Assal-Ghoubbet est supérieur à 150 MWe, très largement supérieur aux besoins actuels du pays.

Dans la région d'Assal, zone la plus prometteuse, une première tranche de 30 MWe suivie progressivement d'unités modulaires de 5 à 10 MWe est dans le domaine des possibilités actuelles du pays. L'actuel projet mené par les islandais dans cette zone pourrait se concrétiser dans les 3 prochaines années avec une puissance initiale prévue de 50 MWe. Sur la région d'Obock, les premiers indices (étude géochimique préliminaire) recueillis sont positifs, nous pourrions à court terme proposer la programmation d'une phase d'exploration (géochimie, géologie, géophysique et quelques forages profonds) pour ensuite projeter la construction d'une centrale géothermique pilote de 5 MWe.

Dans la zone de Dikhil, bien que des forages de reconnaissances aient déjà été réalisés par le passé, la même démarche que précédemment peut être envisagée avec une puissance similaire. Enfin dans la région d'Arta, dans le même contexte, on pourrait projeter l'installation de petites unités modulaires de l'ordre de quelques centaines de kilowatts à quelques mégawatts.

- *L'énergie marémotrice :*

Dans la zone du Goubbet, il peut être envisagé l'exploitation de l'énergie marémotrice. En effet, la baie du Goubbet et le Golfe de Tadjourah sont séparés par une passe d'environ 700 m de longueur et d'une profondeur de moins de 10 m (figure 1.4, chapitre 1). Le régime des marées au niveau de cette zone montre que l'on atteint une amplitude comprise entre 1,8 et 2 m de hauteur, niveau de rentabilité requis pour envisager une exploitation. On observe d'ailleurs des courants assez conséquents au niveau de la passe (photo 1.1, chapitre 1).

La seule contrainte pour l'installation d'une telle usine est la sismicité de la zone même si la moyenne annuelle des secousses mesurées par le Centre sismologique d'Arta est de l'ordre de 1,5 degré sur l'échelle ouverte de Richter, ce qui n'est pas pratiquement pas décelable. Les avancées technologiques dans ce domaine ont montré que les constructions en zone sismique sont possibles de nos jours (le Japon l'a démontré). Même si les installations de ce genre sont rares dans le monde (en Europe, l'usine marémotrice de La Rance en France est la seule en activité), Djibouti ne peut pas se permettre de négliger un tel potentiel énergétique pour atteindre son indépendance énergétique.

* **Comparaison entre les différents types d'énergies renouvelables**

Contrairement aux autres énergies renouvelables qui sont des énergies intermittentes et non « contrôlables », **la géothermie est une énergie de base**. C'est son principal avantage. En termes de puissance, elle est comparable à l'énergie nucléaire. Voici ses principaux atouts :

- Elle est indépendante du climat, elle est la seule énergie renouvelable qui possède cette caractéristique. L'énergie solaire et l'énergie éolienne dépendent toutes les deux du soleil. En effet, les différences de températures des masses d'air sont à l'origine des vents. Ces dernières sont des énergies intermittentes.
- Les centrales géothermiques ne rejettent aucun polluant ni dans l'atmosphère, ni en surface. C'est donc une énergie propre, respectueuse de l'environnement. De plus, elles n'occupent pas une grande surface comme le solaire ou l'éolien. Par exemple, pour une puissance de 50 MW, il faudrait au moins 50 fois d'espace pour l'éolien et 20 fois plus pour le solaire.
- Le taux de disponibilité (temps réel de production d'énergie) de ces centrales dépasse 98 % comparée au 75 % des centrales thermiques, elle offre également un taux de disponibilité très supérieur aux autres énergies renouvelables (95% pour l'éolien et 90% pour le solaire).
- La modularité (unités de petites tailles) des centrales géothermiques a permis de placer cette énergie parmi les priorités dans les programmes d'électrification des zones isolées dans les pays en voie de développement (exemple Philippines, Vietnam).
- La géothermie est la seule source d'énergie renouvelable capable de produire à la fois de la chaleur et de l'électricité. Toutes les possibilités d'exploitation directe de la chaleur par exemple : la production d'eau potable par dessalement d'eau de mer, la production de froid négatif (températures négatives), la climatisation, ... sont envisageables dans le pays. Les autres énergies renouvelables n'ont pas cette faculté. Aussi, grâce aux récents progrès technologiques dans ce domaine (notamment la réduction des coûts d'investissements), c'est aujourd'hui une énergie très compétitive.

En résumé, nous pouvons finir notre comparaison en réaffirmant que Djibouti dispose de la plus noble des énergies renouvelables : La Géothermie ! Les ressources géothermiques hautes températures sont disponibles pour la production d'électricité, les ressources géothermiques basses et moyennes énergies pour des usages directs de la chaleur sont également disponibles.

La géothermie est le meilleur instrument pour non seulement concrétiser l'indépendance énergétique de la République de Djibouti mais également permettre son développement durable.

PRECONISATIONS

Au vu des considérations de la situation actuelle du secteur énergétique et du potentiel en énergies renouvelables du pays, nous préconisons les choix suivants :

- Le développement des ressources géothermiques pour limiter notre dépendance énergétique et faciliter l'accès à une électricité à un coût économiquement viable pour les populations défavorisées.
- Le désenclavement des régions non connectées à la capitale par le maillage complet du réseau électrique national. Cette configuration seule permettra le développement de ces régions et la valorisation de leurs ressources naturelles.
- L'élargissement de ce projet d'interconnexion électrique avec l'Ethiopie vers les autres pays du rift Est Africain pour une intégration régionale (potentiel géothermique du rift évalué à 6 500 MW).
- Intensifier l'électrification rurale avec l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour assurer un développement rural et le petit éolien pour les programmes de lutte contre la soif dans les zones isolées. A cet effet, il est recommandé de poursuivre les campagnes de mesure sur la partie Ouest du pays où on observe une forte densité de population rurale.
- Généraliser la diffusion des cuiseurs solaires dans l'ensemble du pays en poursuivant l'initiative de l'ADDS et soutenir les actions associatives comme celle de l'ADED (Association Djiboutienne pour l'Energie et le Développement). Cette initiative permettra de préserver le peu d'espace vert encore disponible à ce jour dans le pays.
- Procéder à la réforme du secteur de l'énergie en créant un organe de régulation, de contrôle et de décision indépendant et autonome, en assouplissant la législation actuelle. La création de la Commission Nationale de l'Energie en septembre 2009 va certainement dans le bon sens.
- Lancer une campagne de recherche des énergies fossiles (notamment pétrole et gaz naturel) sur l'ensemble du territoire en y associant les grandes multinationales du secteur pétrolier.
- Procéder à une étude de faisabilité technique pour la construction d'une usine marémotrice sur la passe du Goubbet avec une estimation du potentiel économiquement exploitable (l'expertise du Japon et de la France seraient tout à fait indiquées).
- Renforcer l'expertise nationale dans le domaine des énergies renouvelables. Il faut souligner qu'il y a très peu de personnes formées dans ce domaine. Sur ce point, il faut noter que, rien qu'en Corse, deux Djiboutiens préparent leurs thèses sous la direction de Nicolas Héraud l'un en solaire PV et l'autre en éolien.
- La recherche des investissements privés (Partenariat Public-Privé) ainsi que l'adhésion aux organismes de garanties internationales pour l'exécution des gros projets d'investissements dans ce secteur devront être une constante. A cet égard, le pays devrait

chercher à attirer les industries lourdes fortement consommatrices en énergie et grandes émettrices de GES qui seront probablement lourdement taxées (taxe Carbone) notamment l'industrie sidérurgique. L'ouverture par le Président de la République de Djibouti du Forum sur le Développement de Djibouti organisé récemment à Paris et consacrée entre autres au développement de l'immense potentiel géothermique est une initiative à saluer et qui va dans ce sens.

Pour pouvoir réaliser ces actions, il faudrait que la République de Djibouti puisse tirer pleinement profits des mécanismes de financement actuels des projets d'énergies propres mis en place par les bailleurs de fonds (Par exemple : Le Programme ARGeo, L'initiative Energie de l'Union Européenne, Le Mécanisme de Développement Propre de la CCNUCC, ...etc.). Il doit également prendre part aux négociations actuelles sur le climat de Copenhague où doivent se décider les futurs accords post-2012 et qui découleront sur des mécanismes de financements novateurs et favorables aux pays dotés de ressources renouvelables non émettrices de Gaz à Effet de Serre (GES) comme la géothermie.

Les enjeux de la conférence de Copenhague sur le climat sont si importants pour les pays en voie de développement qui sont beaucoup plus vulnérables aux changements climatiques sans y avoir contribué comme le souligne le dernier rapport du GIEC (Groupe Intergouvernemental des Experts sur l'évolution du Climat) sorti en 2007. La République de Djibouti se trouve d'autant plus menacée que toute sa structure socioéconomique se trouve dans une zone côtière.

Pour mémoire, le changement climatique est apparu sur la scène politique internationale pour la première fois en 1988, lorsque l'ONU a adopté une résolution considérant l'évolution du climat comme une « préoccupation commune de l'humanité ». Le GIEC créé à cet effet produira trois rapports sur ce thème sortis respectivement en 1990, 1995 et 2001. L'élan politique impulsé par le "sommet de la terre" à Rio en 1992 contribua à l'entrée en vigueur de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1994, au sein de laquelle s'inscrivent les négociations actuelles à Copenhague.

Au niveau mondial, on s'attend ainsi à une augmentation de la température moyenne globale de la surface de la terre de 0,3 à 6,4 °C entre 1990 et 2100. Un consensus s'est établi pour considérer qu'au-delà de 2 °C d'augmentation de la température, il y avait des risques de bouleversement du système climatique mondial. Copenhague devrait donc découler sur des mesures contraignantes et chiffrées sur la réduction des GES des pays industrialisés jusqu'en 2050 entre 25 et 40%.

Il aura certainement fallu les grandes catastrophes climatiques qui ont secoué notamment de grands pays industrialisés (cyclone Katrina aux États-Unis en 2005, vagues de chaleur en Europe en 2003) pour qu'enfin les décideurs politiques admettent la nécessité de prendre en charge ces questions qui mettent en péril le futur de l'humanité. L'obtention par le GIEC et Al Gore du prix Nobel de la paix en 2007 a constitué un signal fort et a certainement aussi aidé à la prise de conscience, à tous les niveaux, des menaces liées au changement climatique

➤ Les actions de Maîtrise de la Demande d'Énergie (MDE)

La singularité de la demande énergétique à Djibouti nous pousse à proposer également en marge de ces travaux des actions de MDE fort utiles en ces temps de crises économiques. En effet, la part du secteur tertiaire (résidentiel et services) dans la consommation est de 83% et la plus grosse partie de cette consommation est consacrée à la climatisation (55%). Même si Djibouti se situe dans une zone de climat chaud, cette consommation n'est pas répartie sur le temps mais uniquement sur une courte période (les trois mois les plus chauds en été, voir graphique 1.4). De plus, seulement 34% du bâti dans le pays est en dur, le reste n'est pas construit dans les normes habituelles.

Nous voyons bien que ce profil qui caractérise le pays engendre d'énormes pertes en énergie. Il y a donc lieu d'intervenir sur deux aspects pour réduire la part du plus gros poste de consommation que constitue la climatisation :

- Au niveau du comportement
- Au niveau de la construction

Le comportement intervient beaucoup dans la consommation énergétique. Par exemple, en réduisant le niveau de confort en climatisation, on arriverait à faire des économies d'énergies substantielles et donc à réduire ses dépenses budgétaires consacrées à la climatisation. Nous savons aussi que le coût de l'électricité était très cher à Djibouti. Nous avons également remarqué que les Djiboutiens utilisaient l'air conditionné pour abaisser la température extérieure en été d'au moins 15°C (de 38°C à 23°C). Ce niveau de confort n'est pas raisonnable puisque même en hiver la température moyenne est de 27°C. Il suffirait d'abaisser normalement de 5 à 7°C maximum pour avoir un niveau de confort convenable (soit 33 à 31°C). D'autres démarches classiques peuvent également contribuer à la réduction de la consommation comme l'efficacité énergétique en s'équipant par exemple d'équipements électroménagers à faible consommation électrique (réfrigérateurs de classe A, ampoules fluo compactes, ...etc.) ou le fait de lutter contre les "charges fantômes" en débranchant toujours les appareils électroniques laissés en mode veille.

Au niveau de la construction, la demande de logement dépasse aujourd'hui l'offre. D'après une estimation de la Banque Mondiale, il faudrait construire 2250 logements pour satisfaire cette demande. Aussi, au vu du bâti actuel, aucune considération climatique n'est prise en compte dans la construction, l'habitat actuel de la majorité des Djiboutiens sont énergivores (pas d'isolation thermique), ces derniers ne comptent que sur la climatisation pour créer un confort intérieur. Et pourtant il suffirait d'une petite amélioration au niveau de l'isolation intérieure (polystyrène de 4 cm et une couche de Placoplatre de 13 mm sur les murs et laine de verre sur le plafond) pour réduire d'au moins 30% l'utilisation de l'air conditionné. C'est ce que vient de démontrer une expérience conduite au CERD. De plus, cette amélioration de l'isolation thermique n'a nécessité aucun gros investissement, ce coût est à la portée des ménages logés en dur. Il est donc nécessaire d'entreprendre une campagne d'information et de sensibilisation sur cet aspect. Pour les nouvelles constructions, il y a lieu de définir très rapidement des normes bioclimatiques peu contraignantes.

Pour l'anecdote, les nomades Afars et Somalis construisent toujours avec le climat. Ces habitats traditionnels sont connus pour leurs fraîcheurs en été et leurs tiédeurs en hiver. Ils savent donc l'importance de la conception bioclimatique contrairement aux citadins.

PROPOSITIONS

Afin de poursuivre un développement harmonieux et une croissance soutenue, la planification énergétique de Djibouti pour les cinq prochaines années, c'est-à-dire jusqu'en 2015, devrait suivre le schéma électrique suivant :

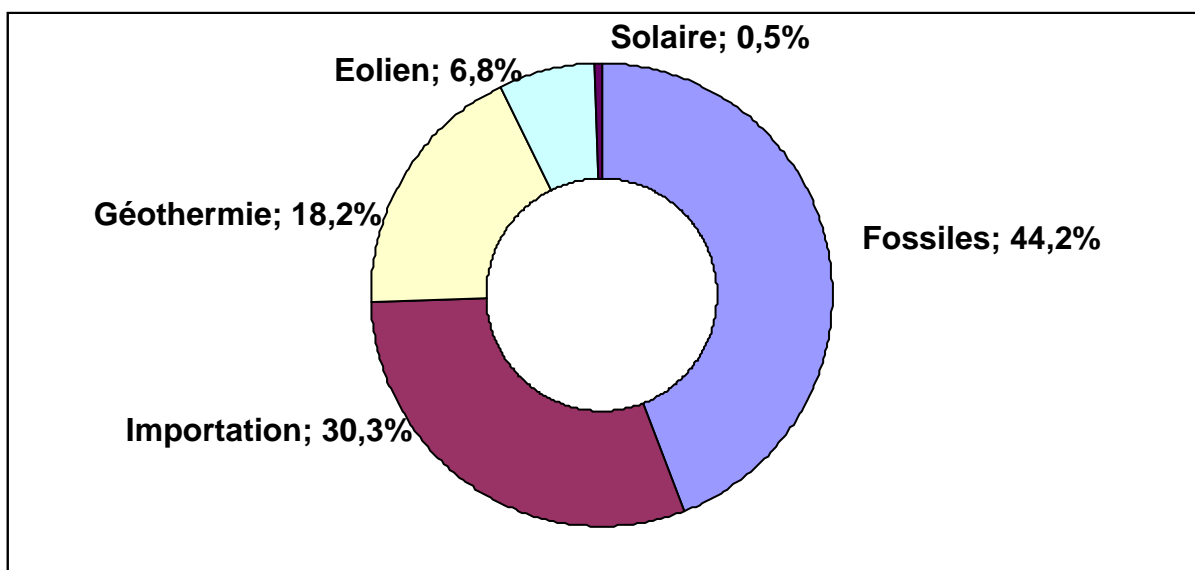
- Estimation de la l'équilibre offre/demande électrique :

Avec une croissance de la consommation électrique de l'ordre de 3,5%, la capacité nécessaire pour le réseau en **2015** s'établira aux alentours de **165 MW**.

- Schéma électrique :

Energies Fossiles :	74,5%	
Dont importation* :	30,3%	soit l'équivalent de 50 MWe
Energies Renouvelables :	25,5%	
Dont Géothermie :	18,2%	soit l'équivalent de 30 MWe
Eolien :	6,8%	soit l'équivalent de 11 MWe
Solaire :	0,5%	soit l'équivalent de 800 kWc

* cette capacité serait uniquement exploitée pendant les périodes chaudes



Cela se fera graduellement en intégrant dans un premier temps l'apport de l'énergie électrique importée depuis l'Ethiopie à partir de 2011 et ensuite l'énergie géothermique produite à Assal-Goubbet à partir de 2012.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie Générale sur Djibouti

Banque Mondiale Document Djibouti No. 20856/secteur énergétique Mai 2003.

Banque mondiale. *Note de Politique Sectorielle, Secteur de l'Eau, République de Djibouti.* Rapport No. 29187-DJ, Washington, DC.2004.

Banque mondiale. *Environnement et Santé : Coordination des Interventions en Milieu Rural à Djibouti : Rapport de la Phase I.* En collaboration avec les Ministères de l'Habitat, de l'Urbanisme, de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, de la Santé, et de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche ainsi que du CERD, Washington, DC. 2005.

Nations Unies. *Bilan Commun, Pays Commun, République de Djibouti, 2003-2007. Plan Cadre des Nations Unies pour l'Assistance au Développement UNDAF : Une Charte pour l'action commune en faveur du Développement Humain,* Djibouti. 2002.

PNUD. *Cadre Stratégique de Développement Local : Principaux Axes de l'Approche et Outils de Mise en Oeuvre, République de Djibouti.* En collaboration avec le Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation, Djibouti. 2005.

Direction de la statistique, Ministère des Finances, République de Djibouti. *Enquête ménage-Indicateurs Sociaux* (EDAM-IS-1996). Djibouti. 1997.

Direction de la statistique, Ministère des Finances, République de Djibouti. *Enquête ménage-Energie* (EDAM-Energie). Djibouti. 2004.

Direction de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, République de Djibouti. *Plan d'Action National pour l'Environnement 2001-2010.* Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme, de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. Djibouti. 2000.

Direction de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, République de Djibouti. *Plan d'Action National pour l'Environnement (PANE).* Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme, de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire. Djibouti. 2000.

Direction de la statistique, Ministère des Finances, République de Djibouti. *Enquête ménage* (EDAM-IS-2002). Djibouti. 2003.

SCHULTZ (G.A.), *Eaux de surface,* in : Inventaire et mise en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti, *Volume II,* Mission de Coopération hydrogéologique allemande et génie rural (Djibouti), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hanovre, 1982.

RUTTEN (J.), *Etude du gisement cimentier d'Ali Sabieh (analyses chimiques, calculs de mélanges crus, aptitude à la cuisson),* C.E.G.D., 1978

ESMAP, Technical Paper 110/07 FR *Potentiel de réduction des coûts de l'électricité et Stratégie sectorielle d'accroissement de l'accès à l'Energie en République de Djibouti,* Février 2007

Bibliographie Solaire et Eolien

Association « Projet du Feu Solaire ». *"Caractéristiques techniques des cuiseur et four solaires Vesta et Hélios"*. Avril 2008.

Jean Paul LOUINEAU, *Guide pratique du solaire photovoltaïque, systèmes solaires,* 2005

Desautel Jacques. *"Les capteurs héliothermiques"*. 1977.

A. Harmim, M. Boukar et M. Amar *Etude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée.* Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1, pp 31 – 38. 2007

H.H. Ozturk, *'Experimental Determination of Energy and Exergy Efficiency of the Solar Parabolic Cooker'*, Solar Energy, Vol. 77, N°1, pp. 67 – 71, 2004.

O.V. Ekechukwu , N.T. Ugwuoke *Design and measured performance of a plane reflector augmented box-type solar-energy cooker.* Renewable Energy N°28 pp 1935–1952. 2003

C. Perrin de Brichambaut, C. Vauge. *Le gisement solaire,* 1982

C. Perrin de Brichambaut, Lamboley. *Le rayonnement solaire au sol et ses mesures,* 1978

J-M. Chassériaux, *Conversion thermique du rayonnement solaire*

R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz. *Le rayonnement solaire, conversion thermique et application*

Kasbadji Merzouk et al. *Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable. Application au pompage dans les hauts plateaux.* Revue des énergies Renouvelables. Vol. 9 N°3, pp 155-163, 2006

BRL. *Etude d'impact environnemental et social.* Projet Energie et Eau de Djibouti. Rapport final, Avril 2005

Pierre Savary. Banque Mondiale, Rapport de mission sur le potentiel de production d'éolienne et sur la maîtrise de l'énergie, République de Djibouti, IED, mai 2004.

S. Marouki, PNUD-DJ/06/N01. *Stratégie de communication dans le domaine de la maîtrise de l'énergie,* rapport final, juillet 2007

Gayapershad, R., Dladla, S.T., et Brooks, M.J. *"Performance evaluation of commercial solar cookers under equal loading conditions"*. Septembre 2006.

P.Poggi, G.Notton, C.Cristofari, M. Muselli. *Calculation on an hourly basis of solar diffuse irradiances from global data for horizontal surfaces in Ajaccio.* Energy Conversion and Management, sous presse. (2004).

P.Poggi, M.Muselli, G.Notton, C.Cristofari, A.Louche. *Forecasting and simulating wind speed in Corsica by using an autoregressive model*, Energy Conversion and Management, 44, 3177-3196. (2003).

P.Poggi, G.Notton, C.Cristofari, M.Muselli. *Calculation of solar irradiances profiles for hourly data in view of energy systems behaviours simulation*. Renewable Energy, 27-1, 123-142. (2002).

P.Poggi, G.Notton, C.Cristofari, M.Muselli. *Wind electrical supply system : behaviour simulation and sizing optimization*. Wind Energy, 4-2, 43-59. (2001).

P.Poggi, M.C.Torre, A.Louche. *Markovian Model for Studying Wind Speed Time Series In Corsica*. Int. Journal of Renewable Energy Engineering, 3-2, 311-319. (2001).

P. Poggi, M.Muselli, G. Notton, A. Louche. *First order Markov chain model for generating synthetic typical days series of global irradiation in order to design PV stand alone systems*. Energy Conversion and Management, 42-6, 675-687. (2001).

P.Poggi, G.Notton, M.Muselli, A.Louche. *Decentralized wind energy systems providing small electrical loads in remote area*. International Journal of Energy Research, 25, 141-164. (2001).

P.Poggi, V.Acquaviva, M.Muselli, A.Louche. *Grid connected rooftop PV systems for reducing voltage drops at the end of the feeder - A case study in Corsica Island*. Energy, 25, 774-756. (2000).

P.Poggi, C.Cristofari, G.Notton, A.Louche. *Diagnostic de la situation énergétique de la région Corse - L'éolien peut-il être intégré dans une réelle politique énergétique de développement ?* Revue de l'Energie, 521, 544-551. (2000).

P. Poggi, M.Muselli, G.Notton, A.Louche. *Classification of typical meteorological days from global irradiation records and comparison between two Mediterranean coastal sites in Corsica island*. Energy Conversion and Management, 41-10, 1043-1063. (2000).

P.Poggi, G.Notton, M.Muselli, A.Louche. *Stochastic study of hourly solar radiation in Corsica by using a Markov model*. International Journal of Climatology, 20-14, 1843-1860. (2000).

P.Poggi, M.Muselli, G.Notton, A.Louche. *Computer aided analysis of the integration of renewable energy systems in remote areas using a Geographical Information System*. Applied Energy, 63-3, 141-160. (1999).

P.Poggi, G.Notton, M.Muselli, A.Louche. *Sizing reduction induced by the choice of electrical appliances options in a stand-alone photovoltaic production*. Renewable Energy, 15, 581-584. (1998).

P.Poggi, M.Muselli, G.Notton, A.Louche. *Improved Procedure for Stand-alone Photovoltaic Systems using Meteosat Satellite Images*. Solar Energy, 62-6, 429-444. (1998).

P.Poggi, G.Notton, M.Muselli. *Costing of a Stand-alone photovoltaic system.* Energy – The international Journal, 23-4, 289-308. (1998).

P.Poggi, G.Notton, M.Muselli, A.Louche. *Autonomous photovoltaic systems : Influencies of some parameters on the sizing: simulation time-step, input and output power profiles.* Renewable Energy, 7-4, 353-369. (1996).

P.Poggi, G.Notton, A.Louche, G.Peri. *Dimensionnement optimal d'un système photovoltaïque autonome - Partie II: système solaire bi-source.* Entropie, 176, 11-16. (1993).

P.Poggi, A.Louche, G.Notton, G.Simonnot. *Classification of direct irradiation days in view of energetic applications.* Solar Energy, 46-4, 255-259. (1991).

P.Poggi, A.Louche, G.Notton, G.Simonnot. *Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site.* Solar Energy, 46-4, 261-266. (1991).

P. Poggi, M. Muselli, G. Notton, C. Cristofari, A. Louche. *Wind farm peak load matching potential in Corsica,* Actes du 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition, ISBN 3-936338-09-4, Copenhagen, Danemark, 2-6 Juillet 2001, pp. 1139-1141. (2001).

P. Poggi, G. Notton, M. Muselli, C.Cristofari, A.Louche. Reliability analysis of wind-assisted systems and impact on the reduction of the fossil energy generation. *Actes du 2001 European Wind Energy Conference and Exhibition,* ISBN 3-936338-09-4, Copenhagen, Danemark, 2-6 Juillet 2001, pp. 1136-1138. (2001).

Bibliographie Géothermie

VARET (J.), *Géologie de l'Afar central et méridional (Ethiopie et République de Djibouti),* C.N.R.S. , Paris, 124 p., 1978.

VARET (J.) Dir. : *Géologie de l'Afar central et méridional (Ethiopie et RDD),* Paris, CNRS, 124 p., 1978.

VARET (J.) : *The AFAR triangle the future gulf region for world geothermal energy,* conference ARGeo, Addis-Abeba, 2006.

TAZIEFF (Haroun), *Le volcanisme africain actuel,* Colloque de Géologie Africaine, [Montpellier du 25 au 27 avril 1979], Résumés, 10, pp. 146-148, 1979.

TAZIEFF (Haroun), *A propos de tourisme...* Informations touristiques de Djibouti n° 7, Ministère du Commerce, des Transports et du Tourisme de la RDD, janvier 1983. (Rédigé à l'occasion d'un colloque international à l'ISERST de Djibouti)

ROBINEAU (B.), *La zone d'Arta et le rift d'Asal-Ghoubbet; leur étude intégrée dans le contexte géodynamique de l'Afar,* thèse, U. de Montpellier 2, 76 p., 1979.

REBEYROL (Y.), *Eruption volcanique près de Djibouti*, Le Monde, pp. 1 et 15, 17-11-1978

REBEYROL (Yvonne), *Naissance d'un volcan nommé Ardoukoba*, Le Monde, p.15, 22-11-1978.

UDIN (E.), FABRIOL (R.), FOUILLAC (C.), *Dépôts sulfurés dans le forage géothermique du lac Asal (Djibouti) : Principaux résultats scientifiques et technique 1984*, 122 p., 1984.

OMAR (Ahmed), *Quelques aspects de la sismicité en République de Djibouti, années 1991 et 1992*, Rev. Sci. Tech, ISERST, n° 9, pp. 15 – 23, Djibouti, 1994.

OMAR (Ahmed), CARMAGNOLLE (Philippe), ABAR (Abdillahi), *La crise sismique du mois d'avril 1994*, Sciences et Environnement, n° 9, pp. 55 – 61, ISERST, Djibouti, 1994.

MOHAMED HOUMED (A.), *Country report of Djibouti. Géothermal Research Report of Kyushu University*, n° 4, pp. 95 – 108, 1995.

MOHAMED HOUMED (A.), JALLUDIN (M.), *Premiers résultats de l'exploration géothermique, plaine du Hanlé – Asal*, Rev. Sci. Techn., ISERST, n°1, pp.3 – 13, Djibouti, 1989.

MANIGHETTI (I.), *Dynamique des systèmes extensifs en Afar*, Thèse, Paris 6, 1993.

MANIGHETTI (I.), *Quand l'Arabie décide d'en finir avec l'Afrique*, La Recherche, n° 298, pp. 62-67, 1993.

Gasse F., Richard O., Robe D. Et Williams M.A.J. *Evolution tectonique et climatique de l'Afar Central d'après les sédiments plio-pléistocènes*. Bull. Soc. Géol. Fr., 7, XXII, 6, p. 987-1001. (1980)

Gaulier J.M. and Huchon P. *Tectonic evolution of Afar triple junction*. Bull. Soc. Géol. France, t. 162, n°3, p. 451-464. (1991).

Halbwachs. *Relevé de la polarisation spontanée des sols sur le site de l'éruption de l'Ardoukabo*. Rapport PIRPSEV-CNRS. (1979).

Hirn A. *Etude sismique sur Asal. In: Champ géothermique d'Asal. Djibouti. Synthèse des données*. 93CFG06. pp56-60. (1988).

ZAN L. ; GIANELLI G. ; PASSERINI P. ; TROISI C. ; ABDOURAHMAN OMAR HAGA *Geothermal exploration in the Republic of Djibouti : thermal and geological data of the Hanlé and Asal areas*. Geothermics, vol. 19, n°6, pp. 561-582 – 1990.

PUVILLAND P. , CHARBONNEYRE P. , DORE P. , LESAGE P. , MADELAINE B. , BENDERITTER Y. *Reconnaissance géothermique par prospections gravimétrique, électrique, audio-magnéto-tellurique dans la région du nord Ghoubbet (Rép. De Djibouti)*. Rapport BRGM – 83, GPH , 014. – 1983.

MARREC C. , PUVILLAND P. , ROUGIEUX L. *Recherches géothermiques par prospection électrique dans la région de Ghoubbet-Assal (Rép. De Djibouti).* Rapport BRGM – 81, GPH, 086. – 1981.

AFZALI H. *Mesures diagraphies différées.* Rapport BRGM – 85, IMRG, 001. – 1984.

GIRAULT F. *Etude par télédétection de la région du Lac Abbhé et du Rift d'Assal (Données LANDSAT MSS).* Rapport BRGM – 86, DJI , 152 , GEO. – 1986.

TRAINEAU H. , GADALIA A. *Deux champs géothermiques de rifts océaniques émergés : KRAFLA (Islande) et ASSAL (Djibouti). Une étude comparative des contextes géologiques et des méthodes d'exploration.* Rapport BRGM – 84, SGN, 216, IRG. – 1984.

ROCHER P. *Etude de la distribution des minéralisations hydrothermales rencontrées dans les forages géothermiques aux Acores (Sao Miguel) et à Djibouti (Assal). Applications géothermiques.* Rapport BRGM – 83, SGN , 446 , GTH. – 1983.

BARBUT J. , CLOT A. , IUNDT F. , MENJOZ A. , VARET J. Report on Project DJI 78/005 , Testing of geothermal fluids Lac Assal (Rep. of Djibouti). Phase II (UNDP Contract 197/80) Rapport BRGM – 82, SGN , 018 , GTH. – 1982.

GADALIA A., IUNDT F., FABRIOL R. *Exploration géologique et géochimique de la zone nord Ghoubbet (Rép. De Djibouti)* Rapport BRGM – 82, SGN, 022, GTH. – 1982.

VARET J., BARTHES V., GERARD A. *Champ géothermique d'Assal (Djibouti): Synthèse des données disponibles au 1^{er} juin 1980.* Rapport BRGM – 80, SGN , 525 , GTH. – 1980.

STIELTJES L. *Possibilités de développement de la géothermie en République de Djibouti* Rapport BRGM – 78, AGE, 006. – 1978.

LEGENBRE O. *Inclusions fluides des cuttings d'Assal 2 (Djibouti).* Rapport BRGM – 85, DJI, 075, MGA. – 1985.

FOUILLAC A.M., CESBRON F., PILLARD F. *Etude minéralogique et isotopique des cuttings d'Assal 1 (Djibouti)* Rapport BRGM – 85, DJI, 075, MGA. – 1985.

FABRIOL R., VARET J. *Discussion sur la faisabilité technique de l'exploration du fluide mis en évidence par le forage Assal 1 pour la production d'électricité à la lumière de l'expériences des champs de Cerro Prieto et Salton Sea.* Rapport BRGM – 83, SGN, 021, GTH. – 1983.

JALLUDIN M. et al. *Réservoir géothermique superficiel Assal. Note de synthèse finale.* ISERST– 1992

ABDOU HOUMED. *Geothermal Prospects in the Djibouti Republic.* Proceedings of the 6th Geothermal Workshop, Geothermal Institute, University of Auckland. – 1984.

AQUATER. *Technical-economic study of geothermal pre-feasibility.* General conclusions – 1982

AQUATER. *Djibouti geothermal project, Assal 3 Well chemistry.* Comnessa 339400, GEOT A3158, june 1988

BATTISTELLI A., RIVERA J., FERRAGINA. *Reservoir engineering studies at the Assal field. Rep. Of Djibouti.* Geothermal Resources Council Bulletin, november 1991.

ENEL – D.P.T. Djibouti geothermal project : feasibility study for the exploitation of Assal 3 well. Italian Ministry of Foreign Affairs / Electricité de Djibouti, Pisa. – 1991

KOENIG J.B., GEOTHERMEX Inc. Assessment of results of drilling Hanlé 1 and 2 and evaluation of the Assal depression for geothermal drilling and resource development. WORD BANK, Republic of Djibouti. – 1987

LEMALE J., JAUDIN F. La géothermie, une énergie d'avenir, une réalité en ile-de-France. ARENE. – 1998.

LEMALE J., LAPLAIGE P. Energie géothermique. Techniques de l'ingénieur, traité génie énergétique. – 1999

CORREIA H. Utilisation des ressources géothermiques pour la production d'électricité. Institut ENSAM. – 2003.

ARNASON K., FLOVENZ O.G. Geothermal exploration by TEM-Soundings in the central Assal rift in Djibouti, East Africa. Proceedings of World Geothermal Congress. Japan, May 28 – June 10 , 2000. 933 pp.

KRISTMANNSDOTTIR H. *Environmental aspects of geothermal energy utilization.* European Geothermal Conference, Hungary, 25 – 30 may 2003.

TOURNAYE D. *Soussaki Geothermal Project. Possible uses of the geothermal resources – stage 5.* Rapport CFG – GEMEE, 92/CFG/41. – 1992.

TOURNAYE D., TRINEAU H., HERBRICH B. *Perspectives de développement des ressources géothermales de CHILLAN (CHILI).* Rapport ADEME – CFG : 2002/CF/G65. – 2002.

KEBEDE (Fekadu), KULHANEK (Ota), *Recent seismicity of the East African Rift system and its implications,* Physics of the Earth and Planetary Interiors, 68 (3-4), pp. 259-293, , septembre 1991.

Barberi F., Ferrara G., Santacroce R. and Varet J. *Structural evolution of th Afar triple junction. Afar Depression of Ethiopia,* Bad Bergzabben, F.R. Germany, April 1-6 1974. Edition A. Pilger and A. Rösler, vol. 1. pp38-54. . (1975).

Battistelli A., Rivera J. and Ferragina C, *Reservoir engineering studies at the Asal field.* Republic of Djibouti. Geothermal Resources Council Bulletin. Nov. 1991. pp280-289. (1991).

Ballestracci R. et Benderitter Y. *Mesures magnétotelluriques (8 Hz-1 700 Hz) dans le rift d'Asal.* CRNS report. CRG Garchy. 46pp. (1979).

Black M., Morton W.H. and Rex D.C. *Block tilting and volcanisme within the Afar in the light of recent K/Ar age data. Afar Depression of Ethiopia,* Bad Bergzabben, F.R. Germany, April 1-6 1974. Edition A. Pilger and A. Rösler, 296-299. 1974.

Bosch B., Deschamps J., Lopokhine M., Marce A. et Vilbert C. *La zone géothermique du lac Asal (TFAI). Résultats de terrain et études expérimentales.* Bull. BRGM. Section II, n°:4. pp367-383. (1974).

Demange, J. et Tazieff, H., - *L'éruption « tectonique » de l'Ardoukôba (Djibouti).* C.R. Acad. Sci., Fr, 287, pp. 1269-1272. 1978.

Demange, J., Stieltjes, L. et Varet, J., - *L'éruption d'Asal de novembre 1978.* Bull. Soc. géol. France, (7), t. XXII, n° 6, pp. 837-843, 7 fig., 2 tabl. 1980.

Ferry, L., - *Géologie et recherche d'énergie géothermique de la République de Djibouti.* Mémoire DEA, Université P. et M. Curie, (Paris VI), 57 p., 25 fig., 1 carte h.-t. 1980.

Fontes, J.-C. et Pouchan, P., - *Les cheminées du lac Abhé (TFAI): stations hydroclimatiques de l'Holocène.* C.R.Acad. Sc., Paris, t. 280, série D, pp. 383-386. 1975.

Lépine, J.C., Ruegg, J.C. et Anis A.M., - *Sismicité du rift d'Asal-Ghoubbet, pendant la crise sismo-volcanique de novembre 1978.* COLLOQUE RIFT D'ASAL, Djibouti 23-29 février 1980, Bull. Soc. Géol. Fr., (7), t. XXII, n° 6, pp. 809-816, 7 fig., 2 tabl. 1980.

Lépine, J.C., - *Répartition de la sismicité dans la zone d'extention de Djibouti.* Université de Paris VI. 1987.

Lépine, J.C., - *La sismicité de la République de Djibouti.* Rev. Sci. Tech., ISERST, n° 2, pp. 15-28. 1989.

Ruegg, J.C., - *Structure profonde de la croûte terrestre au moyen de grands profils sismiques, application à l'étude de zones de distension (sud-est Afar et Massif Central Français).* Université de Paris VI. 1974.

Ruegg, J.C., - *Tectonique et mouvements du sol.* Rev. Sci. Tech. ISERST, n° 2, pp. 29-49. 1989.

Stieltjes, L., - *Étude volcanique et géothermique de la région Ghoubbet al Kharâb - lac Asal (Territoire français des Afars et des Issas).* Rapport n° 70 S.G.N., 213 G.T.H. 1970.

Stieltjes, L., - *Évolution tectonique récente du rift d'Asal.* T.F.A.I. Rev. Géogr. Phys. Géol.Dyn., (2), vol. XV, fasc. 4, pp. 425-436, Paris. 1973.

Stieltjes, L., - *L'axe tectono-volcanique d'Asal (Afar et Afar central).* Thèse 3 cycle, Paris-Sud, 196p. 1973 .

Tazieff, H. - *Relations tectoniques entre l'Afar et la Mer Rouge.* Bull. Soc. Géol. France, (7), X, pp. 468-477. 1968.

Tazieff, H., - *Volcanisme sous-marin de l'Afar (Éthiopie).* C. R. Acad. Sci., Paris, t. 268, série D, pp. 2657-2660. 1969.

Tazieff, H., - *L'éruption de l'Ardoukôba.* LE RÉVEIL DE DJIBOUTI, 16 novembre 1978, pp. 5. 1978.

U.S.G.S. et I.S.E.R.S.T., 1995. - *Gold Mineralisation in the Republic of Djibouti*. Project document, U.N.D.P., project of the Gouvernement of Republic of Djibouti.

Valette, J.N., - *Le lac Abhé (TFAI): étude morphologique et géochimique*. Rapp. BRGM, série 2, n° 2, pp. 143-155. 1975.

Valette, J.N., - *Geochemical study of Lake Asal and Ghoubet el Kharab (T.F.A.I.)*. Afar depression of Ethiopia, Schweizeirhat, Pilger A. and Rosler A. Edit., Stuttgart, pp 239-250, 4 fig., 6 tabl. 1975.

Vellutini, P. et Piguët, P., - *Djibouti - Itinéraires géologiques*. Mis. Fr. de Coopération et d'action culturelle à Djibouti, BCIMR et P.F.A. Ed., 289 p., Djibouti. 1994.

Willcock, C., - *La grande faille d'Afrique*. In: TIME-LIFE (Edit.), les grandes étendues sauvages, 184 p. 1978.

Documents consultés

AQUATER, *Projet pour l'évaluation des ressources géothermiques*. Gouvernement de Djibouti. ISERST. 137pp (1981).

AQUATER, *Djibouti geothermal exploration project*. Republic of Djibouti. Final Report. ISERST. 159pp (1989).

BRGM. *Reconnaissance géothermique du Territoire Français des Afars et des Issas*. 70SGNGTM. pp59. (1970)

BRGM. *Territoire Français des Afars et des Issas: étude géochimique de la région du lac Asal*. 73SGN140GTH. 32pp. (1973)

BRGM. *Etude géophysique par sondages Melos et sondages électriques de la région du lac Asal (TFAI)*. 73SGN010GTH. 18pp. (1973b).

BRGM. *Territoire Français des Afars et des Issas: rapport de fin de sondage: résultats des premiers essais de production*. 75SGN442.GTH. 18pp. (1975a)

BRGM. *Territoire Français des Afars et des Issas: rapport de fin de sondage, interprétation des données géologiques de Asal 1 et Asal 2*. 75SGN443GTH. 19pp. (1975b).

BRGM. *Report on project DJI78/005. Testing on geothermal fluids. Lac Asal (République de Djibouti): Phase 1*. 80SGN400GTH. 27pp. (1980)

CFG. *Champ géothermique d'Asal. Djibouti. Synthèse des données*. 93CFG06. 87pp. (1993).

CFG. *Assistance à l'ISERST dans la définition du projet géothermie d'Asal. République de Djibouti*. 88CFG27. (1988).

CNRS-CNR. *Geology of Northern Afar (Ethiopia)*. Rev. Géog. Phys. Géol. Dyn., (2), XV, 4, pp443-490. (1973).

ENEL *Djibouti geothermal project. Report on the state of mining knowledge on the Asal zone. Proposals and recommendations*. 28pp. (1990).

GENZL. *Results of temperature gradient drilling in the Hanlé area. Djibouti*. 31pp. (1985).

GEOTHERMICA. *Interprétation of gradient wells data. Hanlé plain. Republic of Djibouti*. 29pp. (1985).

ORKUSTOFNUN. Geothermal resistivity survey in the Asal rift in Djibouti. Vol. I and Vol. II. (1988).

VIRKIR-ORKINT. Djibouti. Geothermal scaling and corrosion study. Final report. 109pp. (1990).

Cartographie

Institut Géographique National – 1992.

Carte Générale de Djibouti. Echelle : 1 :200 000.
Les spéciales de l'IGN, Pays et Villes du Monde, Edition 1, Paris.

Institut Géographique National – 1986.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Ali-Sabieh : feuille NC-38-XIX-2, échelle :1 :100 000.

Institut Géographique National – 1961.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Assal : feuille NC-38-XIX-3, échelle :1 :100 000.

Institut Géographique National – 1985.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Tadjourah : feuille NC-38-XIX-4, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1995.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Khor Angar : feuille ND-38-II-1, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1995.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Daddato : feuille ND-38-I-2, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1955.

Carte de la Côte Française des Somalis.
Abbhé Bad : feuille NC-37-XXIV-2, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1962.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Djibouti : feuille NC-38-XX-3, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1956.

Carte de la Côte Française des Somalis.
Gamarré : feuille NC-37-XXIV-4, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1987.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Dikhil : feuille NC-38-XIX-1, échelle : 1 :100 000.

Institut Géographique National – 1995.

Carte de la Côte Française des Somalis. Territoire Français des Afars et des Issas.
Dorra : feuille ND-38-I-1, échelle : 1 :100 000.

STIELTJES L. – non datée

Carte géologique du rift d'Assal, Djibouti.
Dépression Afar, Est Africain. Echelle : 1 :50 000.
CNRS – ISERST.

SOULEIMAN FARAH LODON, TRAMPONT (Jacques),

Carte scolaire murale de la RDD au 1/500000ème, physique (recto), économie et administration (verso), Hatier, mars 1985. Réactualisée

Demange, J., Di Paola, G.M., et Stieltjes, L., 1971. - Carte géologique de la région du Lac Abhé - Lac Asal, T.F.A.I. B.R.G.M.

Demange, J. et Stieltjes, L., 1975. - Géologie de la région sud-ouest du T.F.A.I. (région lac Abhé - lac Asal). Bull. BRGM, 2, IV, n°2, pp. 83-119, 20 fig. 2 tabl., 4 pl.photo, 1 carte h.-t.

Gasse, F., Dagain, J., Mazet, G., Richard, O. et Fournier, M., - Carte géologique de la République de Djibouti: feuille de Dikhil. Ministère Français des Relations Extérieures et ISERST, ORSTOM Ed. 1987.

VARET (J.) et GASSE (Françoise), *Carte géologique de l'Afar central et méridional au 1/500000^e*, éd. du CNRS, 125 p., 1978.

Sites Web

Nations Unies. 2000. *Objectifs de Développement du Millénaire.*
<http://www.un.org/french/millenniumgoals/index.html>

Worldbank. *Document Stratégique de Réduction de la Pauvreté (DSRP) à Djibouti.*
Washington, DC. 2004.
<http://poverty.worldbank.org/prsp/country/49/>

Géologie de Djibouti :
<http://www.jpj-imagine.com/>

Office du tourisme de Djibouti :

<http://www.office-tourisme.dj/>

Direction des Statistiques (Djibouti):

<http://www.disep.org/>

Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement :

<http://www.agora21.org/>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France) :

<http://www.ademe.fr/>

International Geothermal Association (IGA) :

<http://iga.igg.cnr.it/>

Systèmes solaires (France) :

<http://www.systemes-solaires.com>

Association Allemande pour la Géothermie :

<http://www.geothermie.de>

Office Fédéral Suisse de l'Energie :

<http://www.geothermal-energy.ch>

Département Américain de l'Energie :

<http://www.eren.doe.gov/geothermal>

Geothermal Resources Council (Etats Unis) :

<http://www.geothermal.org>

Geo-Heat Center (Etats Unis) :

<http://www.oit.edu/~geoheat/~geoheat>