

Nomenclature

C_p : capacité thermique massique à pression constante.....KJ.Kg⁻¹
 ∂ : Rapport des capacités thermiques
 h : Enthalpie massique.....m
 ρ : Masse volumique.....Kgm⁻³
 S : Entropie massique.....KJ Kg⁻¹
 T : Température thermodynamique.....K
 t : TempératureK ou °C
 t : Tempsen s
 V : Volume.....
 η : Rendement, efficacité
 \vec{F} : Force massique
 $\eta, et \mu$: Coefficients de viscosité du milieu
 \vec{R} : Force exercée par le liquide
 p_0 : Pression atmosphérique à l'extérieur.....Pa ou bar
 S : surface
 Q_c : quantité de chaleur rejetée au condenseur.....KJ Kg⁻¹
 Q_{ch} : quantité de chaleur fournie par le chaudière.....KJ Kg⁻¹
 Δ : Variation
 V : vitesse d'écoulement en amont et en aval du coude..... m/s

REMERCIEMENTS

*Nous remercions le Bon Dieu de nous avoir donné la chance et le courage de terminer ce travail. Les recherches que nous avons effectuées, touchent sur le domaine de la physique- énergétique et concerne l'électricité, domaine nécessaire dans le monde actuel. Nos remerciements les plus vifs sont adressés à nos Directeurs de recherche : **Docteur Edmond, enseignant à l'université de Tuléar, professeur Ramamonjisoa Bertin Olivier, enseignant à l'université de Fianarantsoa et Directeur de l'Ecole Nationale de l'Informatique, le Docteur Daniel Kotonirina Ramampihrika** qui nous a conduits au choix du sujet. Ces derniers ont bien accepté la direction ce travail. Grâce à leur orientation et les conseils nous avons pu terminer ce travail.*

Nos remerciements plus sincères sont adressés à tous les enseignants de la Faculté de la science physique de l'université de Tuléar et ceux de la Formation Doctorale. Nous remercions également nos pauvres parents qui sont aux Comores qui ont bien voulu apporter une aide inestimable. Il s'agit de : Ali m'madi un simple paysan et Mariama Madihali. Nos vifs remerciements sont aussi adressés à ma femme Tahinyjanahary-Elisabeth-Esperance et sa famille. Ma femme qui nous a donné du courage dès le début du travail de recherche. Nous insistons nos remerciements à ma femme pour sa patience en vers tous les problèmes que nous avons vécus durant nos années d'études. Nos remerciements sont adressés à nos frères et sœurs aux Comores, en France, et à Madagascar qui ne cessent pas de nous aider financièrement. En particulier ma pauvre sœur Faouzia Ali aux Comores et Soifia Benty Mze Ali ici à Madagascar, qu'elles reçoivent mes remerciements les plus vifs. Nous tenons à remercier nos amis qui s'engagent à nous aider des le début de ce travail jusqu'à la fin : il s'agit de, Moussa Maoulida, Youssouf Himidi, Said M'madi et Ali Ibarhim.

*Nous remercions aussi mon grand frère **Rabemahafaly Philippe** et sa femme qui nous ont aidés durant nos années d'Etudes. Nous avons également une dette de reconnaissance envers nos communautés: la communauté des Etudiants Grand Comorien à Tuléar et à Fianarantsoa.*

Nous tenons enfin à remercier toutes personnes qui nous ont prêté main forte à la réalisation et à l'accomplissement de ce travail. (Nourddine Mirhani et Ibrhim Abdou)

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur EDMOND, Maître de conférences à l'Université de Tuléar, qui nous a acceptés de bien vouloir gouverner ce travail et Monsieur RAMAMPIHERIKA Kotonirina Daniel qui nous a conduits au choix du sujet, nous vous réservons ici nos vifs respects.

Je m'adresse également ma profonde gratitude à Monsieur RAZAFIMANDIMBY Hery Antenaina, Professeur et Responsable pour la formation doctorale en Physique, Monsieur, LEZO Hugues, Maître de Conférence à la faculté des Sciences, RAMAMONJISOA Bretin Olivier, Professeur à l'Université de Fianarantsoa et Directeur de l'Ecole Nationale d'Informatique (ENI) de Fianarantsoa qui ont bien voulu accepter d'apporter leurs commentaires ainsi que leurs remarques constructives malgré leurs occupations.

RESUME

L'objectif de cette recherche consiste à proposer de solutions adaptées aux utilisations rationnelles et accessibles aux pays en développement des sources géothermiques pour produire de l'électricité à grande échelle à partir des schémas théoriques existants. Après avoir fait des inventaires de ces derniers, nous avons pu obtenir quelques solutions intéressantes.

Summary.

The objective of this research is to propose adapted solutions for the rational use and accessibility of the geothermic sources of developing countries to produce electricity on a global scale, following existing models. Once the aforementioned inventories have been done, interesting solutions may be obtained.

MOHAMED Ali
projet81@yahoo.fr

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
INTRODUCTION.....	2
Chapitre I- GENERALITES	4
I-1. Introduction- schéma de configuration.....	4
I-2. La cogénération.	6
I-3. Les différentes formes d'énergies géothermiques	7
I-4. Exploitations de l'énergie géothermique.....	9
Chapitre II : Valorisation de la Géothermie dans les pays de l'océan Indien.	11
II-1 Introduction	11
II-2. Données sur les sites géothermiques à Madagascar.....	12
II-3. Cas particuliers de la station d'Eau Thermale de Ranomafana et de celle de Bezaha.	13
Chapitre III : Caractéristiques des centrales classiques.....	14
III-1 Généralités	14
III 2 Centrale thermique.	14
III-3. Centrale Hydraulique.	17
III-4. Centrale Nucléaire.	20
Chapitre IV : Production suffisante de vapeur d'Eau Thermale et son adaptation	21
IV-1. Introduction.....	21
IV-2. Méthodes classiques.	21
IV-3. Méthodes adaptées.....	29
CHAPITRE V. Etudes physiques d'une Centrale à vapeur et son adaptation.	32
V-1. Généralité	32
V-2. Principe de calcul des forces appliquées aux hélices.	32
V-3. Cycle classique à flamme.....	35
V-4. Turbine à gaz.....	37
V-5. Adaptation des schémas classiques.....	39
Chapitre VI. Les différents types de turbines à vapeur.	40
VI-1. Turbine à condensation.....	40
VI-2 Turbine à contre pression.....	40
VI-3. Turbine à soutirage et condensation.	41
VI-4. Turbine à soutirage et contre pression.	42
Conclusions.	43
Annexe A.....	46
Annexe B.....	47
Analyse Chimique de l'Eau Thermale de Ranomafana.	47
Annexe C.....	48
Annexe D- Poussée exercée par un liquide sur un obstacle.....	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54

INTRODUCTION

L'énergie joue un rôle primordial dans la vie de l'homme. Elle apparaît comme un symbole de développement. La croissance démographique ne fait que multiplier les besoins énergétiques.

La géothermie « du mot grec 'Ge', la terre et 'thermie' la chaleur » consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire de l'énergie nécessaire à la vie.

L'écologie est devenue dans notre société, depuis quelques décennies, un enjeu majeur pour l'homme. Et pour sauver la terre, nous ne pouvons pas abandonner la société telle qu'elle est aujourd'hui, et cela concerne en particulier le secteur énergétique.

C'est à partir de ce constat qu'il nous est arrivé l'idée d'étudier une Energie Nouvelle et Renouvelable : à partir de la géothermie.

Ainsi, notre étude s'est portée sur la production de l'énergie géothermique. Son exploitation par l'homme remonte à peu près de 20000ans avec l'utilisation des sources chaudes. La première production d'électricité géothermique remonte en Italie en 1904 et le premier réseau de chaleur a été installé en Islande en 1930.

De part ce bref rappel, on peut considérer que la géothermie est une énergie ancienne. Mais ne serait elle pas aussi une énergie du futur ? Une énergie capable de révolutionner par rapport à d'autres et de rendre sa santé à notre planète Terre ?

La demande d'électricité augmente chaque année et les prix des combustibles ne cessent d'augmenter à l'échelle internationale.

La croissance de l'énergie en électricité restant très importante dans le monde entier, souvent, largement supérieure à celle du Produit Intérieur Brut (PIB), les besoins sont considérables tant pour les unités centralisées que décentralisées.

L'énergie étant omniprésente dans les sociétés modernes, les enjeux financiers sont considérables. Le jeu de la concurrence est ouvert car de nombreuses solutions technologiques existent. Elle joue un rôle important dans les sociétés actuelles qu'elle restera une occupation en termes stratégiques, économiques et de protection de l'environnement dans les pays tant industrialisés qu'en développement.

En matière de statistique, 90% du bilan énergétique mondial participe aux émissions de CO₂. La véritable solution ne peut donc provenir que du développement

de la technologie permettant d'une part de réduire la pollution à la source et d'autre part du moins à moyen terme, de disposer d'Énergies Nouvelles et Renouvelables non polluantes et compétitives par rapport aux énergies fossiles.

Le développement des sociétés humaines s'est largement fondé sur la conquête de l'énergie. Dans tous les cas, l'énergie est ainsi progressivement devenue l'un des facteurs essentiels du développement économique et social, au même titre que le capital, le travail et les ressources naturelles.

Après des décennies, pendant lesquelles, l'énergie bon marché coulait à flot sans problème particulier, nous sommes depuis une trentaine d'années entrés dans une période où les crises sont devenues courantes.

Le bouleversement du paysage énergétique est particulièrement préoccupant du fait que l'impact des crises énergétiques sur les sociétés humaines est devenu considérable : récession économique, augmentation du chômage par les chocs pétroliers, pénuries de combustibles traditionnels par la crise du bois de chauffe, rupture de la couche d'ozone, augmentation de l'effet de serre.

De nombreuses solutions technologiques en vive concurrence existent pour la production d'électricité.

Les problèmes actuels concernent la disponibilité des combustibles, et la maîtrise des conditions de combustions qui déterminent les émissions de polluants.

Notre objectif consiste à proposer de **solutions adaptées à l'utilisation rationnelle des sources géothermiques** à partir des schémas théoriques existants à l'heure actuelle afin, d'une part, de satisfaire aux exigences de l'Environnement, et d'autre part de simplifier au maximum les infrastructures, pour permettre aux pays en développement d'acquiescer facilement à de telles innovations.

Le présent mémoire se compose de trois parties :

- Valorisation de la géothermie dans les pays de l'océan Indien (chapitre II)
- Revue générale sur les centrales classiques (chapitre III) et sur les différents types de turbines à vapeur (chapitre VI) ;
- Revue générale et propositions d'adaptation sur la production suffisante de vapeur d'Eau Thermale (chapitre IV) et sur les Etudes physiques d'une centrale à vapeur et son adaptation (chapitre V)

Chapitre I- GENERALITES

I-1. Introduction- schéma de configuration

I-1-1. Introduction.

L'énergie géothermique utilise la vapeur d'eau thermale (eau chaude présente dans la croûte terrestre) pour faire fonctionner des turbines ou pour chauffer des bâtiments ou de l'eau. La croûte terrestre contient une quantité d'énergie. La lave qui coule d'un volcan constitue un exemple frappant de l'énergie contenue dans la croûte terrestre. Si les caractéristiques géographiques le permettent, il est possible de bâtir des installations géothermiques qui récoltent l'eau qui s'écoule à travers des trous dans les roches souterraines. L'énergie géothermique nécessite une température à la source de plus de 100°C afin de faire fonctionner une turbine. L'énergie géothermique se présente sous diverses formes. En effet des structures géologiques particulières permettent l'échauffement à très haute température. Des milieux à plus de 200°C, sont nécessaires pour alim enter les centrales de production de l'électricité. En fait, on ne trouve ces températures que dans les régions volcaniques et on parle de gisements de « haute énergie ».

Par opposition, on parle de gisements de « moyenne » ou « basse énergie » lorsque ces sources d'eau chaude sont à des températures inférieures à 150°C.

De tels gisements sont beaucoup plus nombreux et ont été utilisés essentiellement en « basse énergie », 20 à 70°C pour :

- chauffer des locaux à usage industriel ou d'habitation
- fournir l'eau chaude sanitaire
- chauffer des serres
- servir d'apport thermique dans certains processus industriels

I-1-2. Schéma de configuration.

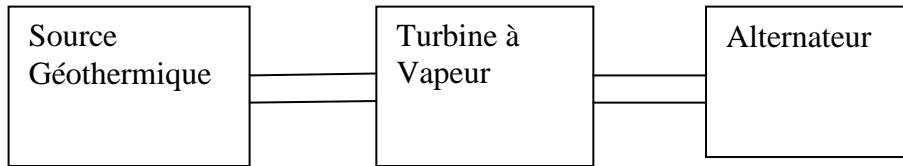


Figure 1 : Schéma de configuration

L'eau chaude du réservoir atteint une température de plus de 150°C et se transforme en vapeur. La vapeur fait tourner la turbine qui entraîne l'alternateur qui produit de l'énergie électrique. La vapeur en sortie de turbine est refroidie dans le condenseur et redevient liquide. Ce genre d'installation, utilise un cycle combiné complexe à turbines à vapeur pour produire de l'électricité et fournir de la chaleur au réseau de chauffage urbain d'une ville de quelques millions d'habitants.

La chaleur géothermique chauffe l'eau du réservoir sous pression dont la température est supérieure à 150°C. Le circuit part de la centrale à sa température maximale.

Les besoins en chaleur varient au cours de l'année en fonction des conditions climatiques. La centrale doit s'adapter à ces besoins et moduler la puissance thermique qu'elle fournit au réseau.

I-2. La cogénération.

On appelle cogénération, la production combinée d'énergie mécanique et de l'électricité. L'idée de base de cogénération est que les combustions se déroulent toutes à des températures très élevées (supérieures à 1000°C) alors que les besoins de chaleur dans l'industrie ou pour le chauffage se manifestent entre 80°C et 300°C. Dans ces conditions, il est tout à fait possible, alors qu'on a recours à la combustion pour satisfaire des besoins en chaleur, de tirer partie de températures élevées pour produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un cycle moteur. Il suffit pour cela que la source chaude du cycle moteur soit la chaudière ou la chambre de combustion et la source froide pour les besoins de chaleur.

Une installation de cogénération produit à la fois de la chaleur et de l'électricité. Pour qualifier ses performances sur le plan à la fois réglementaire et technique, on introduit un certain nombre d'indicateurs.

Soit Q_c la chaleur fournie à la machine de cogénération. Q_u , la chaleur utile et τ , l'énergie mécanique ou électrique produite.

Le rendement global est le rapport : [1]
$$\eta_g = \frac{|\tau + Q_u|}{|Q_c|} \quad (I-1)$$

Il caractérise sur le plan énergétique le rendement d'ensemble de l'installation.

Le rendement mécanique est donné par :
$$\eta_m = \frac{|\tau|}{|Q_c|} \quad (I-2).$$

Il caractérise les performances de l'installation en tant que générateur d'électricité. Les meilleurs rendements mécaniques sont obtenus dans les centrales électriques classiques où $Q_u=0$.

I-3. Les différentes formes d'énergies géothermiques

L'énergie géothermique présente dans le sous-sol apparaît sous plusieurs formes caractérisées par la température. On distingue habituellement trois types de géothermie.

I-3-1. La géothermie peu profonde et basse température

Il s'agit principalement d'extraire la chaleur contenue dans le sous-sol afin de l'utiliser pour les besoins du chauffage. La géothermie basse énergie a fait l'objet d'importantes réalisations dans un certain nombre de pays. Elle utilise l'eau chaude du sous-sol en pompant, au moyen de forage à une profondeur de l'ordre de 1000 à 2000 mètres des eaux dont la température est comprise entre 34 à 90°C.

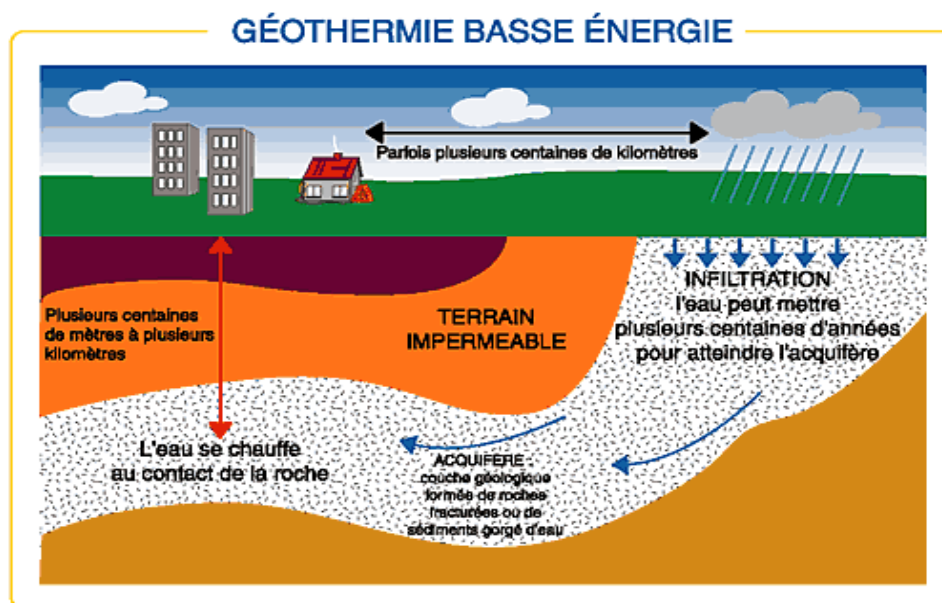


Figure 2 : Géothermie basse énergie (internet)

I-3-2. La géothermie profonde à haute température

La géothermie haute énergie permet la production directe d'électricité grâce à la production de vapeur à une température supérieure à 150°C. Certaines roches chaudes et sèches se présentent également à l'éventualité d'une production d'électricité par injection d'eau conduisant en quelque sorte à la géothermie artificielle. Le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la

production d'électricité. L'eau se réchauffe en circulant dans les fissures des roches, puis on la pompe et elle est utilisée pour la production de l'électricité.

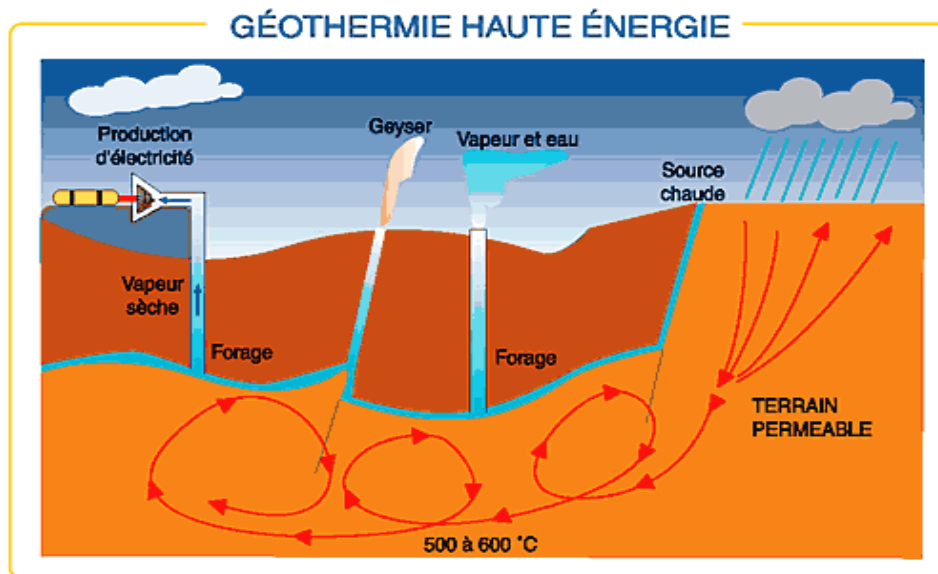


Figure 3 Géothermie à haute énergie (internet)

I-3-3 La géothermie très profonde à très haute température

Plus on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne l'augmentation de température atteint 20 à 30°C par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région du globe considérée. Il peut varier de 3°C par 100 mètres (région sédimentaire) jusqu' à 1000°C par 100 mètres (région volcanique). [15]

I-3-4. Remarques

La recherche en énergie géothermique met en œuvre un certain nombre de disciplines parmi lesquelles figurent :

- La protection géophysique qui implique l'utilisation des méthodes variables suivant le type des champs géothermiques, les conditions géologiques : thermométrie, gravimétrie sismique, prospection électrique magnétique, radiométrie infrarouge.
- La géochimie des eaux de surface, des gaz, étude des sources thermales, identification des Eaux, du processus de convection de la vapeur, estimation des températures des nappes souterraines.
- La réalisation de forage pour déterminer les conditions d'exploitations des ressources : dimension du réservoir de vapeur, capacité des puits par rapport à l'énergie nécessaire.

I-4. Exploitations de l'énergie géothermique

Pour mettre en œuvre une telle exploitation géothermique, il est nécessaire d'effectuer une reconnaissance préliminaire des possibilités géothermiques (inventaire des sources chaudes en particulier) afin de déterminer si et où celles-ci existent et afin de pouvoir formuler un programme d'exploitation et de développement géothermique. Il est aussi primordial d'étudier un prototype de micro- centrale électrique alimenté par une source thermique, en utilisant la théorie du modèle réduit.

Une identification des sites géothermiques est indispensable.

Cette étape doit permettre de préciser :

- Les caractéristiques des sources géothermiques : température, composition chimique de l'eau.
- L'existence ou non d'une source froide
- Les besoins en énergie à proximité des ressources
- Les conditions d'accès à ces sites afin de garantir, au moins pour les premières installations, le caractère démonstratif des projets, ce qui suppose des contrôles techniques réguliers
- Les conditions d'aménagement du site et de captation de la source.

Dans le coût de l'énergie géothermique proprement dite, interviennent:

- Le coût du forage et de son équipement (variable selon la profondeur)
- Le coût du traitement de la vapeur ou de l'eau (pour éliminer certains éléments corrosifs ou polluants)
- Les dépenses d'énergie à prévoir pour refouler l'eau usée.

Les coûts de l'énergie géothermique sont estimés, selon les évaluations, de l'ordre suivant :

Tableau 1 : Comparaison des Estimations de coûts [18]

	Coût d'investissement en (euros / kW)	Coût de l'énergie (euros/kWh)
Géothermie	1900-3000	0,06
Hydro-électrique	3000-4500	0,075
Centrale thermique (à fuel)	1000-2500	0,125
Centrale nucléaire		0,075

Ces chiffres indiquent que si l'investissement est plus important que pour une centrale thermique, l'énergie produite est par contre la moins chère. Elle peut être captée dans des installations de moyenne envergure qui peuvent être agrandies si la demande augmente. Dans le cas du KENYA les études et les travaux en cours ont montré qu'il est possible d'obtenir 3000 à 4000 kW d'électricité par puits. Cela présente une limite inférieure pour que les projets soient compétitifs par rapport à l'énergie hydro-électrique.

Chapitre II : Valorisation de la Géothermie dans les pays de l'océan Indien.

II-1 Introduction

Hormis les Seychelles, les pays de la Commission de l'Océan Indien présentent les conditions favorables à l'existence des ressources géothermiques.

-A la Réunion, les travaux de reconnaissance, puis de préfaisabilité ont été menés entre 1979 et 1984, et ont abouti à la sélection de deux zones pour lesquelles une étude de faisabilité incluant des forages profonds devait se dérouler entre 1985 et 1986. [17]

-A Madagascar des travaux de reconnaissance préliminaires ont été menés en 1979 sous les auspices du PNUD. Ces travaux ont dû être complétés en 1985 et déboucher sur la sélection d'une zone d'intérêt prioritaire (sur trois zones possibles) sur laquelle une étude de faisabilité devrait être engagée en 1986. [17]

-Aux Comores, une mission de reconnaissance du PNUD a été effectuée en 1980. Elle a conduit à l'intérêt de deux îles de la Grande Comores et d'Anjouan au point de vue de ressources géothermiques potentielles.

-A Maurice une courte reconnaissance a été effectuée par M.H. Tazief en 1979 dont la conclusion est favorable. Des travaux scientifiques montrent par ailleurs le caractère récent d'une grande partie de l'activité volcanique de l'île (700 à 2500ans). [17]

Ainsi le développement de la géothermie a fait l'objet d'études et d'investigations qui méritent d'être poursuivies jusqu' à la connaissance des caractéristiques de ces gisements géothermiques sans lesquels, il est ne serait pas possible de rentabiliser leur exploitation à des fins énergétiques. Les disponibilités très probables en potentiel géothermique dans les îles de l'Océan Indien et les intérêts que portent les pays de la région à cette source d'Energie Nouvelle et Renouvelable de par les initiatives qu'ils ont prises, militent en faveur d'un effet commun en vue de la poursuite des études et des recherches géothermiques dans le cadre d'une coopération inter îles. Le développement de ces actions au niveau régional s'avère les meilleurs.

II-2. Données sur les sites géothermiques à Madagascar.

En 1980, la société Islandaise Virkir.R.S.A a recensé l'activité géothermique à Madagascar dans le but d'un développement futur de l'utilisation de cette forme d'énergie à des fins économiques.

Madagascar poursuit toujours des travaux en vue de la valorisation de la géothermie essentiellement sur le site d'Antsirabe. On a rapporté dans le tableau ci-dessous les principaux résultats obtenus. [17]

Tableau 2 : Les températures estimées dans les différentes zones géothermiques à Madagascar.

N°	Zone	Température en °C
1	Antsiranana	27-29°C
2	Ambilobe	47-78°C
3	Nosybe	32-28°C
4	Ambanja	(éventuellement)
5	Andapa-Doany	63°C
6	Sainte Marie	24°C
7	Andasibe	51-75°C
8	Maintirano	27-432
9	Fenoarivo	65°C
10	Ranomafana Est	55°C
11	Fenoarivolikopa	55°C
12	Itasy	24-42°C
13	Antsirabe	38-57°C
14	Morondava	39-42°C
15	Ambatofianandrahana	69°C
16	Miandrivazo	55°C
17	Fianarantsoa	55°C
18	Fandriana	55°C
19	Mangoky	44-50°C
20	Tuléar (Bezaha)	26-34°C
21	Fort Dauphin	42°C

L'étude géochimique postérieure menée dans la région d'Antsirabe a confirmé l'existence d'un potentiel thermique élevé en profondeur. La température de l'eau en

profondeur dépasse 150°C et la pression partielle d u CO₂ associée comprise entre 9 et 13 atmosphères.

Tenant compte des résultats et des recherches effectuées sur la possibilité d'utilisation de la géothermie à Antsirabe, on a décidé de démontrer par un exemple d'application concrète sur la fabrication des bougies, que cette nouvelle source d'énergie est compétitive avec les autres sources conventionnelles telles que la biomasse, le bois de chauffe, le charbon de bois et le pétrole.

II-3. Cas particuliers de la station d'Eau Thermale de Ranomafana et de celle de Bezaha.

Parmi les sources géothermiques recensées à Madagascar, celle de Ranomafana est la plus célèbre, car elle est munie d'infrastructures modernes d'exploitation :

- Dans le domaine du tourisme : piscine d'Eau Thermale.
- Dans le domaine de la santé : divers traitements médicaux
- (voir annexe C)
- Dans le domaine de la recherche (voir annexe A et B).

Il est évident que cette station thermale attire de plus en plus de touristes chaque année.

C'est à partir de station thermale de Ranomafana que nous avons l'idée d'une création éventuelle de centrale géothermique.

Pour la station thermale de Bezaha, il y a moins d'infrastructures touristiques, mais elle présente un intérêt important pour l'adduction d'eau : l'agglomération de Bezaha est alimentée en eau potable directement par de multiples sources thermales dont l'eau jaillit naturellement au-dessus du sol au moindre forage. Il suffit ensuite d'y installer un système simple de tuyauterie avec un robinet !

Chapitre III : Caractéristiques des centrales classiques

III-1 Généralités

Tous les jours, nous utilisons l'énergie électrique sans même en avoir conscience. L'énergie électrique est présente dans tous les domaines, y compris ceux où on pense qu'elle n'est pas utilisée (chauffage central au gaz, véhicule à moteur thermique...). Les moyens de productions de cette énergie sont très divers. Les centrales dites classiques sont les centrales thermiques, les centrales hydrauliques et les centrales nucléaires.

III 2 Centrale thermique. [14]

III -2-1. Introduction.

Une centrale thermique fonctionne avec des groupes à gaz ou à huile. Elle doit être placée approximativement dans un lac ou dans une rivière pour le refroidissement des moteurs. Elle ne doit pas être entourée des maisons d'habitation à cause des bruits des moteurs.

Le tuyau de sortie de l'échappement du groupe doit être vertical pour éviter les pollutions directes du gaz d'échappement.

La présence d'un canal d'évacuation des eaux usées (huile de vidange, eau et gaz -huile à utiliser lors des lavages à l'entretien) est indispensable. Les moteurs doivent obligatoirement être orientés vers le vent dominant ; c'est-à-dire le radiateur doit être raflé par le vent pour le refroidissement.



Photo N° 1 : Centrale thermique de Tuléar

III-2-2.Générateur Electrique.

Dans les petites installations, les générateurs électriques utilisés sont essentiellement des dynamos à courant continu du type Shunt et surtout des alternateurs. Ces derniers peuvent être utilisés pour la production de courant alternatif, peuvent également fournir du courant continu après redressement.

La production de courant continu est intéressante parce qu'elle permet le stockage d'énergie dans les batteries d'accumulateurs.

L'alternateur présente par rapport à la dynamo l'avantage d'avoir un meilleur rendement, de débiter encore de l'énergie à une vitesse plus basse et de fournir de l'énergie à une vitesse supérieure. Le rapport entre la vitesse maximale et la vitesse de conjonction (vitesse d'amorçage par laquelle la machine commence à débiter) est plus grand pour un alternateur que pour une dynamo. Il en résulte qu'une installation dotée d'un alternateur pourra utiliser une gamme plus importante.

Dans les grandes installations, on utilise soit des alternateurs soit des générateurs asynchrones. La facilité d'accrochage de la génératrice asynchrone sur le réseau, sa robustesse, l'absence de contact, de risque de pompage électrique lui confèrent des avantages appréciables.

Ici, le groupe est alimenté par du gaz ouïl et entraîne un mouvement de va et vient des pistons qui excitent le générateur (alternateur ou dynamo à courant continu) pour débiter à une certaine intensité sous une différence de potentiel déterminée.

III-2-3. Le Groupe Electrogène.

Le groupe électrogène est utilisé en secours dans les installations qui nécessitent de l'énergie électrique sans interruption (hôpital etc....). En cas d'interruption de la fourniture d'électricité, le groupe électrogène démarre en quelques secondes et prend l'alimentation en charge. Les groupes électrogènes utilisés en secours doivent faire l'objet d'une surveillance régulière (batteries, essais de démarrage).

III-3. Centrale Hydraulique.

L'énergie primaire est ici une retenue d'eau dans un barrage. La différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval de la retenue constitue une source d'énergie potentielle.

Figure 4. (internet)



Photo N° 2: Dénivellation de la Centrale hydroélectrique de Ranomafana.



Photo N° 3 : Tableau synoptique de la Centrale de Ranomafana

III-3-1. Fonctionnement d'une centrale hydraulique.

On construit un barrage à travers un cours d'eau, de préférence en altitude afin d'avoir un dénivelé important. Ce barrage va constituer un lac de retenue dans lequel on retient une grande quantité d'eau. On crée, à partir de cette retenue, une chute d'eau dans une conduite forcée qui va entraîner la turbine et par la suite l'alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. L'eau est évacuée ensuite par le canal de fuite vers l'ancien lit du cours d'eau. Des vannes sur la conduite forcée permettent d'ajuster le débit d'eau acheminé vers la centrale et la quantité d'électricité produite.

L'avantage principal des centrales hydrauliques est qu'elles ne produisent ni de déchet et ni de gaz à effet de serre. De plus, elles peuvent être mises en marche et arrêtées rapidement à l'aide de simples vannes afin de s'adapter aux variations de la consommation électrique.

L'un des principaux inconvénients est qu'on modifie le cours naturel des cours d'eau et qu'on submerge toute une région pour constituer la retenue d'eau.

III-3-2. Les différentes poussées s'exerçant sur les barrages.

Un barrage est soumis à plusieurs forces. Les plus importantes sont :

- La poussée hydrostatique exercée par l'eau sur son parement exposé à la retenue d'eau.
- Les sous-pressions (poussée d'Archimède) exercées par l'eau dans le corps du barrage ou la fondation.

Pour résister à ces forces, deux stratégies sont utilisées :

- Construire un barrage capable de reporter ces efforts vers divers ou une fondation rocheuse résistantes (barrage-voûte, barrage à voûte multiples...)
- Construire un ouvrage suffisamment massif pour résister par son simple poids afin qu'il soit rigide (barrage-poids en béton) ou souple (barrage remblai...)

III-4. Centrale Nucléaire.

III-4-1. Schéma classique de centrale Nucléaire

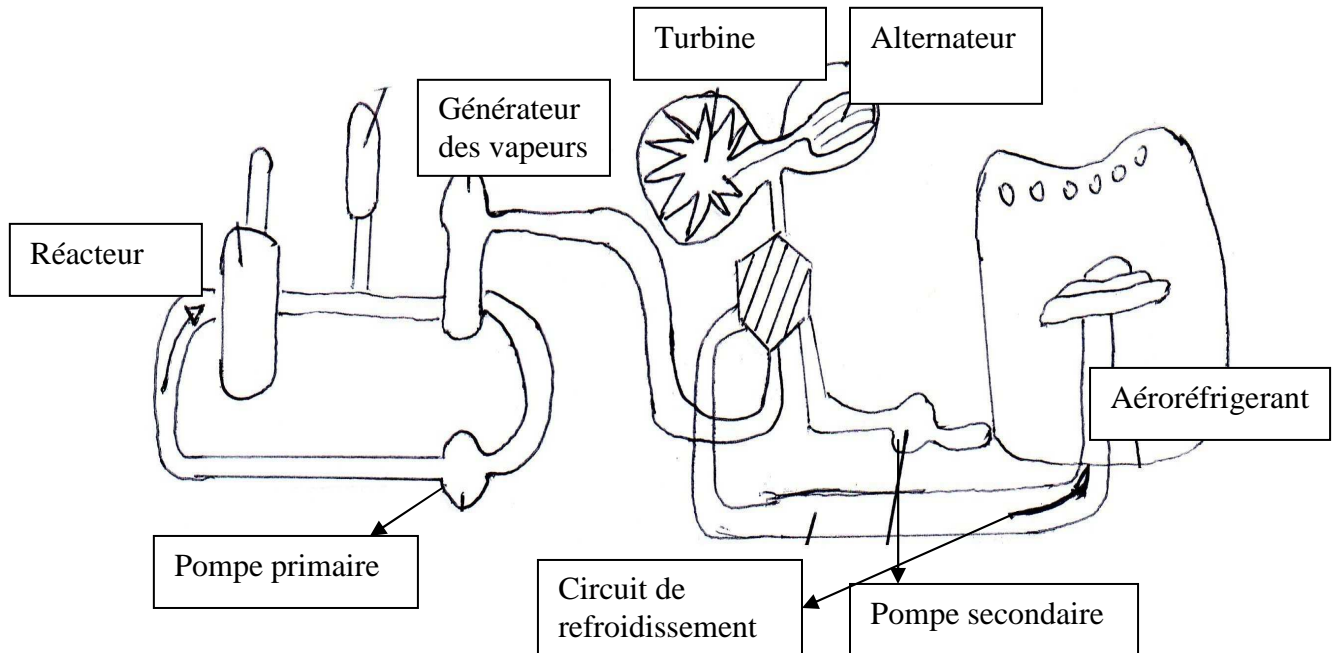


Figure 5 : (internet)

III-4-2. Fonctionnement d'une Centrale Nucléaire

Dans le réacteur, la fission des atomes produit une grande quantité d'énergie thermique. Cette énergie élève la température de l'eau du réacteur. L'eau chaude de ce premier circuit primaire va transformer en vapeur l'eau du circuit secondaire dans le générateur de vapeur. L'eau du circuit primaire circule entre le réacteur et le générateur de vapeur en circuit fermé grâce à la pompe primaire. La vapeur fait tourner une turbine qui entraîne l'alternateur pour en dégager de l'énergie électrique. La vapeur en sortie de turbine est refroidie dans le condenseur. Le condenseur est refroidi par l'Aéroréfrigérant dans lequel circule de l'eau (circuit de refroidissement).

Le circuit primaire est celui qui entoure le cœur du réacteur. Un échangeur thermique permet à la chaleur produite par le réacteur d'échauffer l'eau du circuit secondaire. La vapeur sous pression qui arrive à la turbine ne doit pas présenter de radioactivité. Enfin, le circuit de refroidissement qui permet de refroidir le condenseur est totalement isolé du circuit secondaire.

Chapitre IV : Production suffisante de vapeur d'Eau Thermale et son adaptation

IV-1. Introduction

Nous nous proposons dans ce chapitre d'une part de passer en revue les différents prototypes classiques de production de vapeur à partir des sources géothermiques et d'autre part, d'en modifier certains éléments afin d'obtenir des systèmes qui ne fonctionnent qu'avec des Energies Nouvelles et Renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne etc.) conformément à notre objectif essentiel. Ces prototypes ne sont pas en général aussi classiques qu'on le pense car la plupart d'entre eux restent des schémas théoriques. D'ailleurs les réalisations pratiquées dans ce domaine de la géothermie restent très limitées.

IV-2. Méthodes classiques. [19, 20, 21,22]

La conversion thermodynamique de l'énergie géothermique fait appel à quatre principales techniques.

IV-2-1. Les centrales dites « Directes ». [19, 20, 21,22]

Les centrales dites « Directes » peuvent être utilisées si le fluide géothermique est de la vapeur surchauffée qui peut être directement détendue dans une turbine. C'est le type de centrale qui a été le premier mis en œuvre à Larderello en Italie dès 1904.

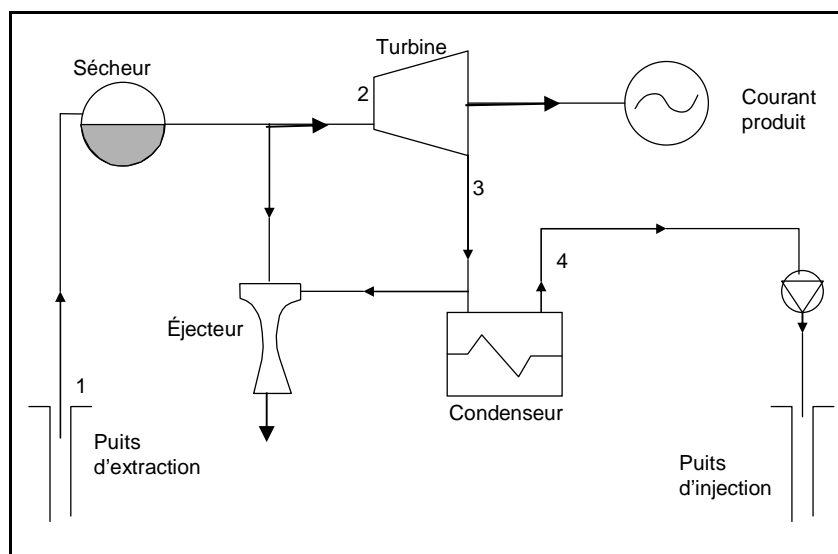


Figure 6. Centrale Directe

Le cycle d'une centrale « Directe » est très proche de celui de Hirn. Selon les cas, l'extraction se fait en utilisant un éjecteur entraîné par la vapeur géothermique ou un compresseur couplé à la turbine. On a considéré qu'on disposait de 111kg /s de vapeur à 5,5 bars et 204°C, ce qui représente une surchauffe de 50°C. Cette vapeur est détendue à 0,123 bars soit 50°C, puis condensée et réprimée avant réinjection.

Dans ce cas, la puissance mécanique produite vaut 57,3MW (Méga Watt), tandis que le rendement du cycle vaut 20,9%.

IV-2-2. Les Centrales à vapeur par simple flash et par double flash. [19, 20, 21, 22]

Les Centrales à vaporisation par flash, permettent d'exploiter les sites où le fluide géothermique se présente sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide vapeur. C'est aujourd'hui le type de centrale le plus employé. Le fluide géothermique commence alors par être détendu dans une chambre à pression inférieure à celle du puits, ce qui permet d'en vaporiser une partie, qui est ensuite envoyée dans une turbine.

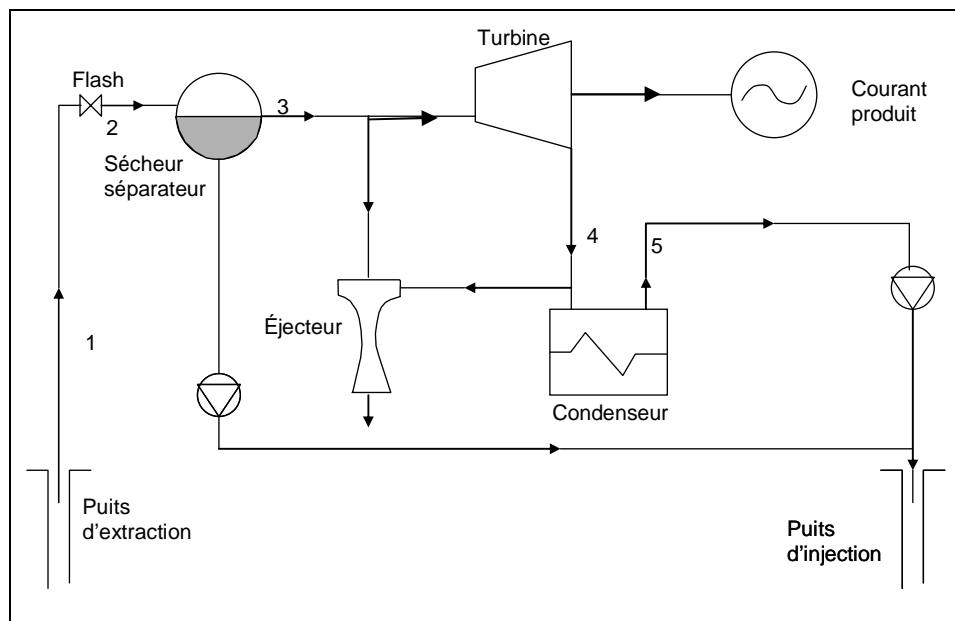


Figure 7. Centrale à simple flash.

Généralement, on ne dispose au niveau du puits que d'un mélange liquide vapeur de faible titre (inférieur à 0,5%) que l'on ne peut donc directement envoyer dans la turbine. Si la pression initiale est suffisante, une solution consiste à détendre partiellement ce mélange afin d'en vaporiser une partie, qui alors turbinée, tandis que la fraction est réinjectée.

On notera que la vapeur qui traverse la turbine est de l'eau distillée qui peut quelque fois être valorisée notamment comme eau potable.

La figure IV-2, montre le synoptique d'une centrale modélisée.

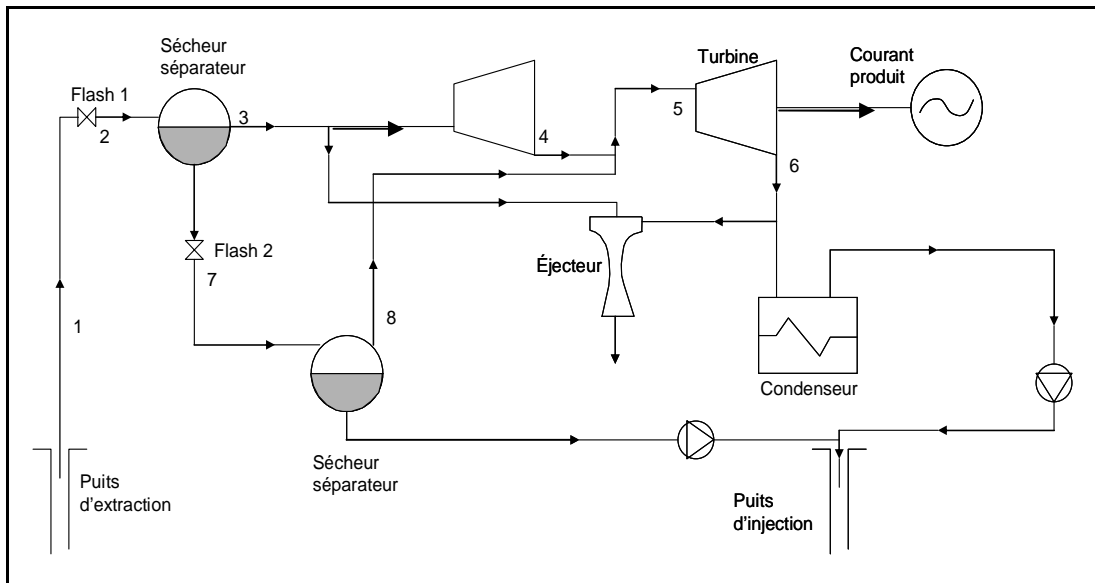


Figure 8. Centrale à double flash.

Dans certains cas, si la pression en sortie de puits est suffisante, il est possible de réaliser un double flash, ce qui permet de récupérer de la vapeur à deux niveaux de pression différente et d'augmenter les performances de la centrale.

Théoriquement, on pourrait multiplier le nombre d'étages de flash, mais les contraintes technologiques et économiques limitent en pratique ce nombre.

IV-2-3. Microcentrale à fluide secondaire Géo Watt. [15]

La centrale à fluide géo watt est une microcentrale électrique alimentée par une source thermique. Cette centrale adapte une boucle thermodynamique déjà expérimentée dans l'industrie solaire. La boucle thermodynamique, utilise pour son fonctionnement une source chaude (source thermique) et une source froide (eau ou air). La puissance dont on peut disposer est fonction des températures respectives de la source chaude et de la source froide, ainsi que du débit de la source thermique.

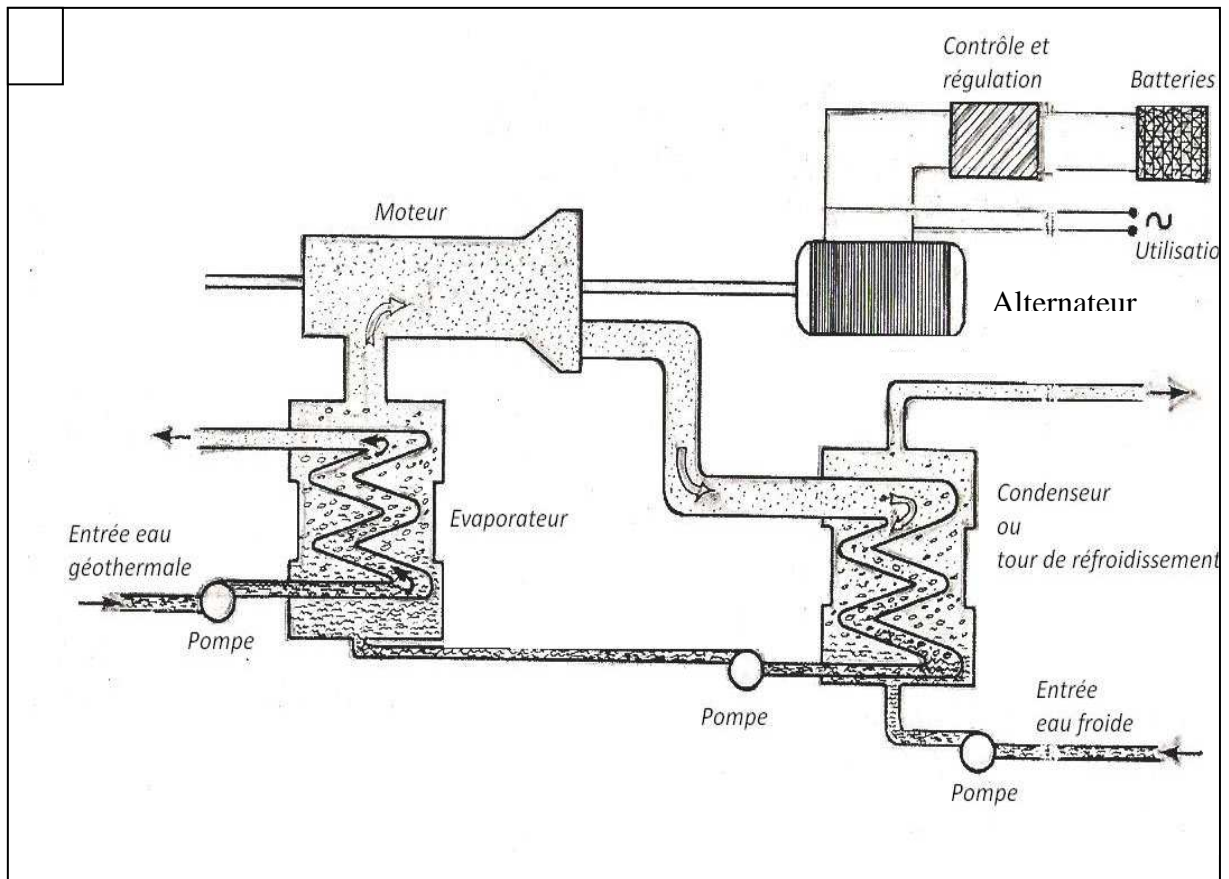


Figure 9. Centrale géo watt.

Une centrale pilote actuellement en cours d'installation à Chaudes-aigues fournira une puissance de 20kw (kilo watt) à partir d'une source chaude de 83°C.

IV-2-4. Les systèmes binaires. [1, 19, 20, 21,22]

Les systèmes dits binaires font appel à un fluide thermodynamique secondaire, qui suit un cycle de Rankine fermé, la chaudière étant constituée d'un échangeur de chaleur avec le fluide géothermique.

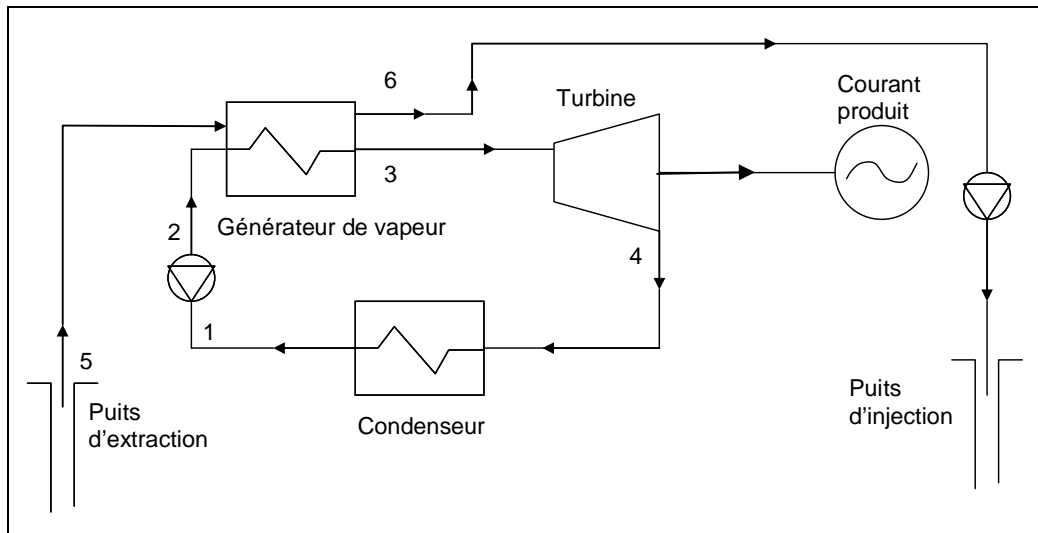


Figure 10 :Centrale binaire

Lorsque la température et la pression en sortie de puits sont basses, il ne devient plus possible de faire appel à des cycles à détente directe ou à flash. On utilise alors un deuxième fluide thermodynamique, qui suit un cycle de Rankine fermé avec ou sans surchauffe. Un tour de refroidissement permet d'assurer la condensation du fluide technique, dont le choix dépend de multiples considérations, technologiques, environnementales et économiques.

IV-2-5. Cycle Combiné. [1, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25,26]

Une solution alternative consiste à utiliser un cycle combiné, associant un cycle direct ou à flash à fluide thermodynamique intermédiaire, la vapeur sortant de la turbine à une pression supérieure à l'atmosphère étant refroidie dans la chaudière du second cycle.

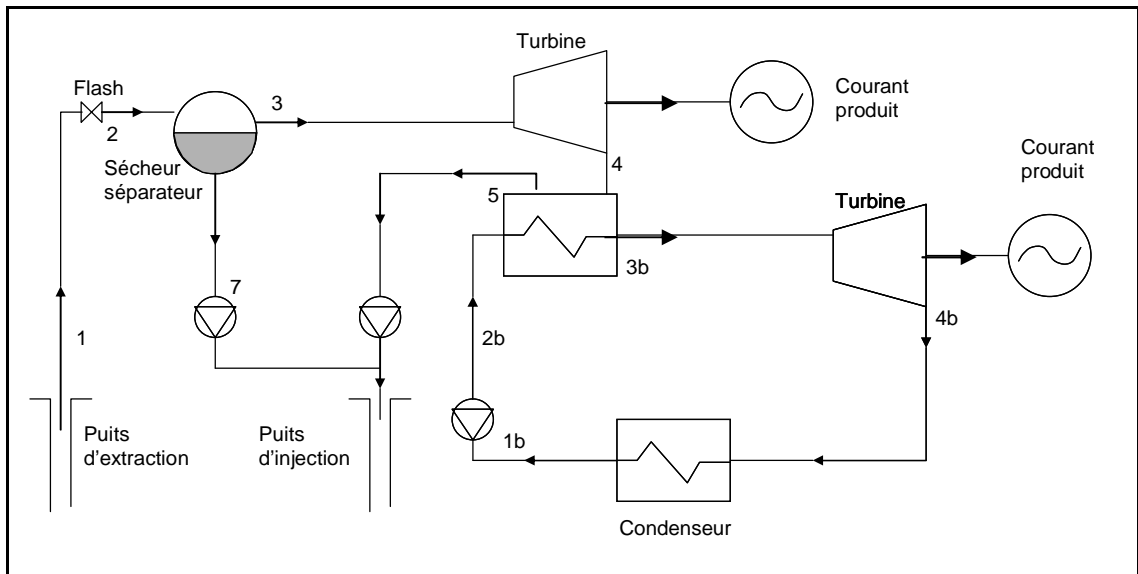


Figure 11 : Cycle Combiné.

Le principe d'un cycle combiné consiste à faire fonctionner en cascade une ou plusieurs turbines à gaz, suivies d'une centrale à vapeur dont la source chaude est la source froide des turbines. Dans un cycle combiné simple du type de celui présenté ici, la turbine à gaz fournit les deux tiers de la puissance totale. La turbine à vapeur, alimentée en vapeur surchauffée fournit le tiers restant. Le cycle combiné le plus simple (dit sans postcombustion) est représenté à la fig IV-6 : la température des gaz à l'échappement d'une turbine à gaz pouvant dépasser 550°C, niveau de température maximale atteint dans un cycle à vapeur. Il est tout à fait possible de récupérer l'enthalpie disponible en sortie d'une turbine à gaz pour chauffer un cycle à vapeur d'eau.

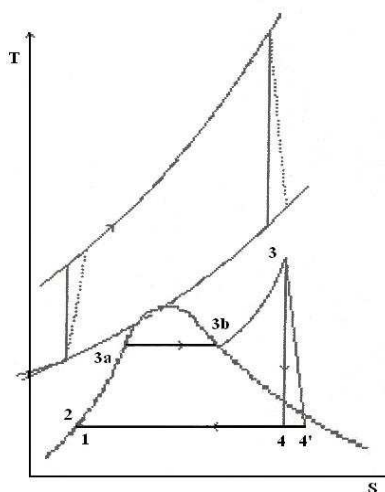


Figure 12 : Cycle combiné.

On peut améliorer le rendement du cycle en recourant à diverses modifications, étudiées lors de la présentation du cycle à vapeur : resurchauffe et prélèvement.

IV-2-6. Les systèmes des cycles mixtes. [19, 20, 21, 22]

Ces systèmes consistent à un mélange de fluide binaire où le fluide thermodynamique n'est plus pur mais constitué de deux fluides afin de réaliser un glissement de température lors de vaporisation.

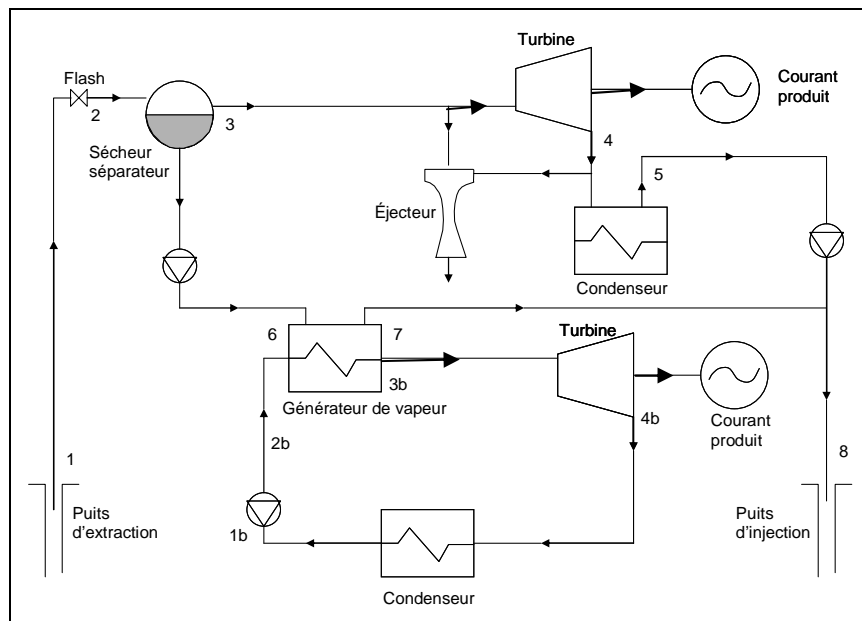


Figure 13 : Cycle mixte.

Les cycles mixtes permettent de mieux valoriser le fluide géothermique, en se servant de la fraction liquide pour fournir l'énergie nécessaire. On peut obtenir un rendement global bien supérieur à celui d'un cycle à flash.

IV-3. Méthodes adaptées.

IV-3-1. Introduction.

Notre objectif essentiel consiste à utiliser, soit uniquement l'énergie géothermique, soit celle-ci à l'aide d'autres Energies Nouvelles et Renouvelables pour la production d'électricité. Il s'avère alors inutile d'introduire d'autres sources d'énergies classiques dans une centrale géothermique. Dans ce cas nous nous proposons d'adapter les schémas classiques décrits dans le paragraphe IV-2 précédent en éliminant les moteurs et les pompes qui fonctionnent en général à l'aide des formes d'énergies classiques telles que le pétrole etc.

Il est évident que les accessoires à ces machines sont également supprimés des schémas. De même, certains sous paragraphes ne seront pas repris, car ils seront d'office supprimés à cause de l'objectif sus mentionné. On pourra enfin, envisager d'autres innovations non décrites dans le paragraphe IV-2.

IV-3-2. Méthodes adaptées.

IV-3-2-1. Modification des centrales dites directes et à multiple flash.

Les centrales dites « Directes » décrites en IV-2-1 correspondent bien à notre objectif essentiel, mais il a été spécifié qu'il fallait un « fluide géothermique de vapeur surchauffée » naturellement, ce qui est rare dans le cas général.

Par contre, les centrales à vapeur par multiple flash résolvent les contraintes imposées ci-dessus à condition, toutefois de disposer d'une chambre à pression inférieure à celle du puits. A cet effet, nous proposons les modifications suivantes :

- On adopte systématiquement le principe des centrales à multiple flash, en essayant de les rentabiliser par récupération de l'eau distillée, récoltée au niveau de la turbine.
- Le réglage de la chambre à faible pression devra se faire en utilisant les Energies Nouvelles et Renouvelable (Energie Solaire et Energie Eolienne). Le système peut être complexe par la multiplicité des éléments (plusieurs flashes et leurs accessoires) mais il sera rapidement amorti grâce aux innovations décrites ci-dessus.

IV-3-2-2. Modification de microcentrale à fluide secondaire géo watt.

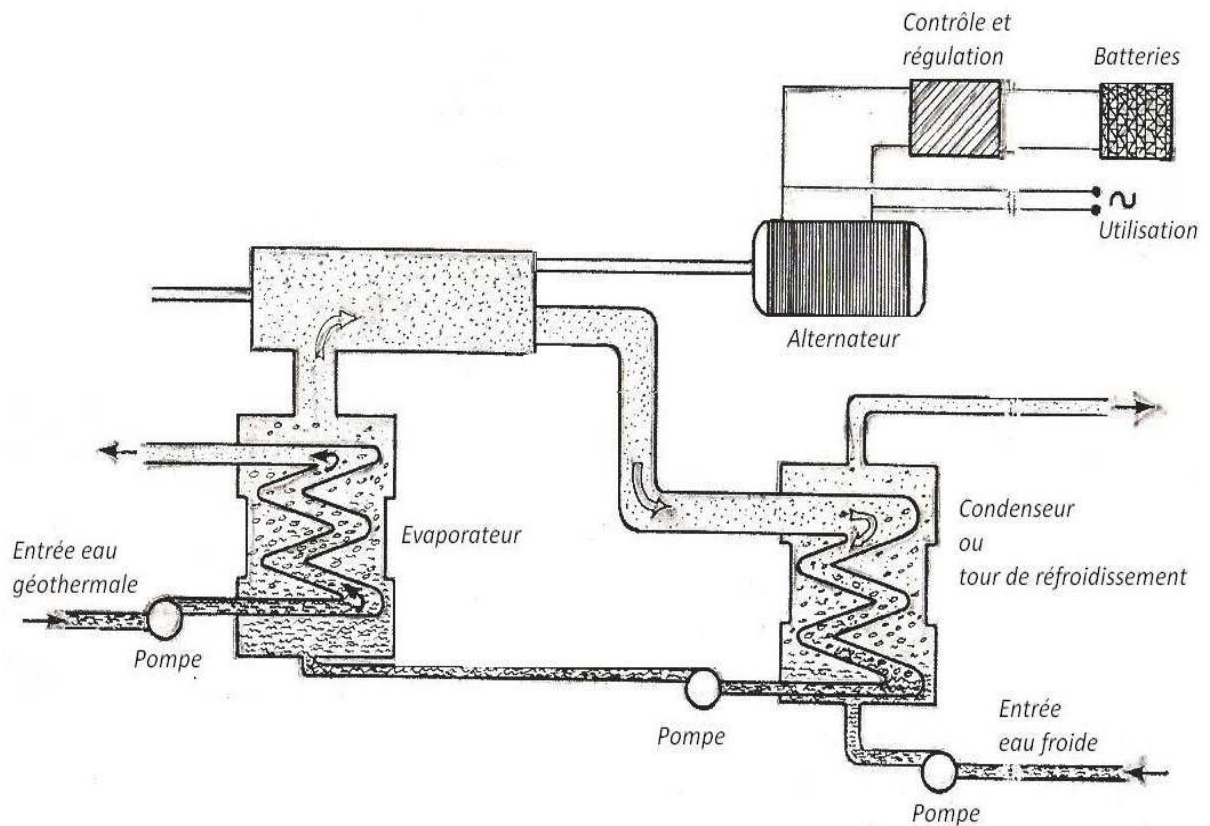


Figure 14 : Modification de microcentrale à fluide secondaire.

On élimine le moteur. La pompe est conservée, mais elle doit fonctionner à l'aide de l'énergie solaire ou de l'énergie éolienne. On injecte de l'eau dans l'évaporateur qui est lié directement à la source chaude (Eau Thermale). Ici la température de la source chaude est de l'ordre de 180°C, elle est sous forme de vapeur qui se dirige vers l'évaporateur. Après avoir injecté de l'eau froide dans l'évaporateur, on a un mélange liquide vapeur. L'eau chaude dont la température atteinte plus de 180°C, peut être canalisée et transformée en vapeur pour faire fonctionner des turbines qui produisent l'électricité.

IV-3-2-3. Autres innovations.

Une technique pour exploiter l'énergie géothermique des Roches chaudes sèches a été testée au Nouveau Mexique : il s'agit de forer dans la roche chaude et sèche située au dessus d'un système volcanique au repos, en fracturant la roche

compacte, pour qu'un liquide puisse y circuler et en injectant de l'eau qui revient sous forme de vapeur surchauffée.

Dans des puits expérimentaux, on utilise de l'eau pour fracturer la roche, créant des fissures qui se remplissent de vapeur. La vapeur gagne alors la surface où on peut utiliser son énergie. Cette source d'énergie non polluante est économique.

CHAPITRE V. Etudes physiques d'une Centrale à vapeur et son adaptation.

V-1. Généralité

Les études physiques d'une centrale à vapeur comprennent essentiellement deux parties :

- la partie mécanique constituée par la turbine
- la partie thermodynamique permettant de vaporiser le liquide.

La turbine est un système d'hélices qui tourne autour d'un axe. Il est donc utile de comprendre le fonctionnement physique d'une hélice.

La partie thermodynamique utilise des cycles fermés.

Les principaux cycles utilisés dans les installations à vapeur servent aujourd'hui essentiellement à la production centralisée d'électricité et des variantes qui y sont apportées pour en optimiser le rendement. La plupart des centrales électriques à vapeur utilisent de cycles classiques, c'est-à-dire à chaudière à flamme brûlant principalement du fioul. Toutefois, d'autres sources chaudes sont aussi utilisées quoiqu'à une échelle beaucoup plus modeste : l'énergie solaire dans les centrales solaires, l'énergie géothermique, des effluents gazeux ou liquides de toute sorte dont le niveau de température est suffisant.

V-2. Principe de calcul des forces appliquées aux hélices. [29,30]

(Voir détails de calculs en annexe D)

L'étude physique proposée ici découle de la Théorie de la Mécanique des Fluides.

V-2-1. Equation de mouvement sous forme intégrale. [29,30]

Considérons un milieu fluide dans lequel nous isolons un volume variable en fonction du temps $V(t)$ et désignons par $\rho(\vec{r}, t)$ et $\vec{v}(\vec{r}, t)$ respectivement la masse volumique et le vecteur vitesse au point \vec{r} et à l'instant t de l'élément de volume dV

$S(t)$ étant la surface fermée entourant $V(t)$; on peut établir l'équation suivante (voir annexe D) :

$$\iint_{(S)} \rho v_n \vec{v} dS = \iiint_{V(t)} \frac{\rho d\vec{v}}{dt} dV - \iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV. \quad (V-1) \text{ avec : } v_n = \vec{v} \cdot \vec{n} = \text{projection de } \vec{v} \text{ sur la}$$

normale \vec{n} à $S(t)$.

En régime stationnaire (c'est le cas que nous considérons par la suite) :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = 0 \dots \dots (V-2)$$

$$\text{D'où : } \iint_{S(t)} \rho v_n \vec{v} dS = \iiint_{V(t)} \rho \frac{d\vec{v}}{dt} dV \quad (V-3).$$

Or l'équation de Navier- Stokes s'écrit :

$$\text{voir } \rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad} p + \left(\eta + \frac{\mu}{3}\right) \text{grad} \text{div} \vec{v} + \mu \Delta \vec{v} \quad (V-4)$$

Avec P : pression au point considéré.

\vec{F} : Force massique d'origine extérieure, qui est égale ici au vecteur accélération de la pesanteur \vec{g} .

$\mu, \text{ et } \eta$, premier et deuxième coefficients de viscosité du milieu.

$$\text{Compte tenu de l'identité : } \iint_{S(t)} \vec{\theta} n dS = \iiint_{V(t)} \text{grad} \theta(\vec{r}, t) dV \quad (V-5) \text{ et reportant (V-4) dans}$$

$$(V-3), \text{ on obtient : } \iint_{S(t)} \left\{ \rho v \vec{v}_n + \left[p - \left(\eta + \frac{\mu}{3}\right) \text{div} \vec{v} \right] \vec{n} \right\} dS = \iiint_{V(t)} (\rho \vec{F} + \mu \Delta \vec{V}) dV \quad (V-6)$$

C'est l'équation de mouvement sous forme intégrale pour le cas de régime stationnaire

V-2-2. Force \vec{R} exercée par un liquide sur un coude d'un tuyau horizontal de section constante S (voir annexe D) :

$$\vec{R} = -(P - p_0 + V^2) S (\vec{n}_{S_1} + \vec{n}_{S_2}) \quad (V-7)$$

Avec P_0 , pression atmosphérique à l'extérieur.

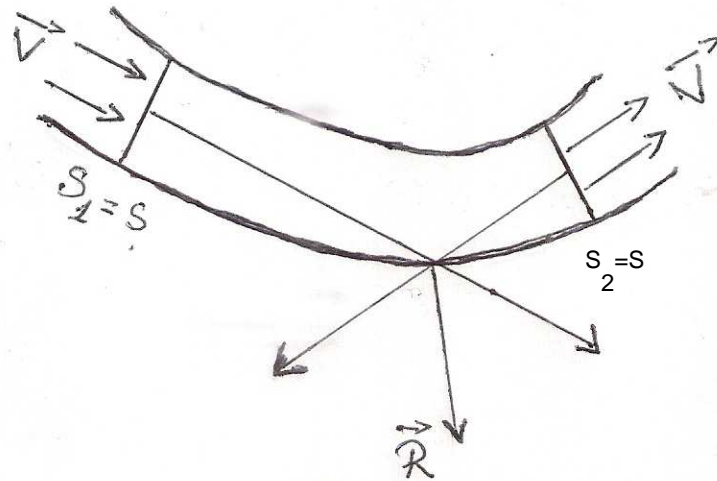


Figure 15 : Tourniquet hydraulique.

Le coude a été choisi de telle sorte que le point d'application de \vec{R} se trouve sur la paroi de ce coude. Application : tourniquet hydraulique.

V-2-3. Application aux hélices hydrauliques et aériennes (ou éoliennes).

Le principe de calcul pour les hélices hydrauliques et aériennes est le même que celui du tourniquet hydraulique :

- au lieu d'un tuyau, on a affaire à un **tube de courant** de section constante et dont la partie coudée de la paroi latérale est assurée par la surface interne de l'hélice.

- Pour les liquides : $div\vec{v} = 0$

- Pour les gaz : $d\vec{i}v(\rho\vec{v}) = -\frac{\partial\rho}{\partial t} = 0$ (régime stationnaire) et

$$d\vec{i}v(\rho\vec{v}) \approx \rho_0 d\vec{i}v(\vec{v}) = 0$$

On obtient ainsi le même résultat que ci-dessus.

V-3. Cycle classique à flamme. [1]

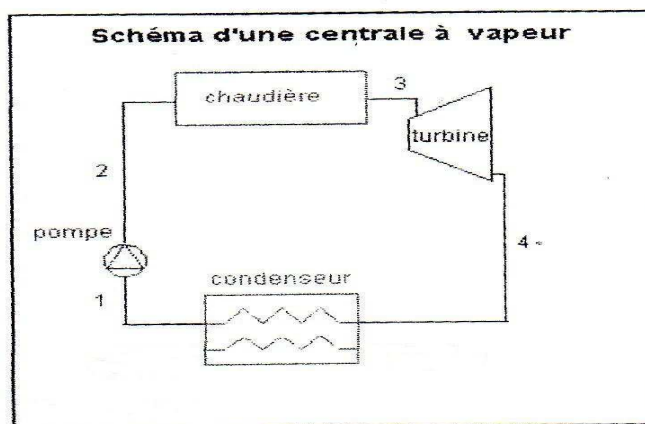


Figure 16 : Schéma d'une centrale à vapeur.

Le schéma de principe d'une centrale thermique à vapeur idéale fonctionnant selon le cycle de Hirn est donné par la fig V-2. Il montre qu'une telle centrale comprend quatre composants : une pompe, une chaudière, une turbine et un condenseur, traversé par le même débit d'eau.

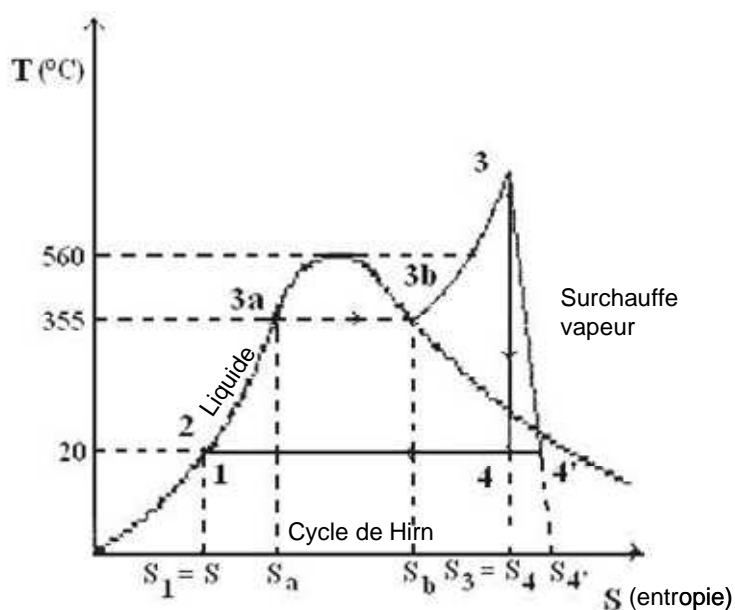


Figure 17 : Description du cycle

L'eau est portée à haute température dans la chaudière. L'échauffement comporte trois étapes (avec ci-dessous un exemple numérique) :

- Chauffage du liquide près de 20°C à environ 355°C, température de début d'ébullition à 165 bars : Evolution (2-3a)

- Vaporisation à température constante 355°C : Evolution (3a-3b)

La vaporisation s'effectue à pression et température constantes, elle se traduit sur le diagramme par un segment horizontal (3a-3b). Le point 3b se trouve donc sur la branche descendante de la courbe de vaporisation à pression P de 165 bars.

- L'évolution (3b-3) ; surchauffe de la température de 355°C à 560°C. Le point 3 est encore par hypothèse à la pression P de 165bars mais la température augmente de 560°C.

L'évolution (3-4) est une détente adiabatique de 165 bars à 0,023 bars. C'est-à-dire à la sortie du condenseur.

V-4. Turbine à gaz. [1,28]

Dans un cycle fermé, les gaz en sortie de turbine sont refroidis dans l'échangeur à basse température, avant d'être circulés vers le compresseur. A la sortie du compresseur, la chaleur est alors fournie par un échangeur à haute température ; la compression directe du fluide de travail n'étant plus possible.

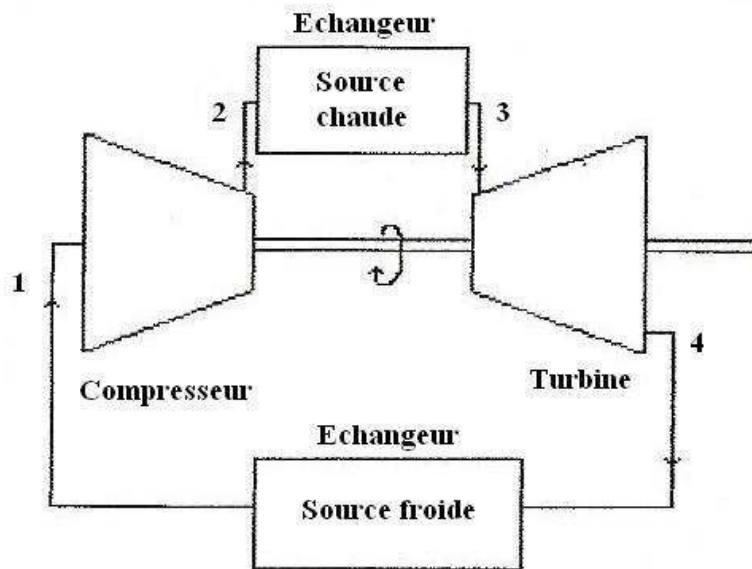


Figure 18 : Cycle de Turbine à gaz.

Avec l'hypothèse d'un débit constant dans le compresseur, le rendement du cycle vaut :

$$\text{Voir } \eta = \frac{(h_3 - h_4) + (h_1 - h_2)}{h_3 - h_2} \quad (\text{V-8})$$

L'air étant supposé parfait, on a : $h = C_p T + \text{const.}$ Ou encore $\Delta h = C_p \Delta T$ (V-9).

$$\text{On a : } \eta = \frac{(h_3 - h_2) + (h_1 - h_4)}{h_3 - h_2} = 1 + \frac{h_1 - h_4}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (\text{V-10}).$$

De même, les relations ci après sont valables :

$$P_1 V_1^\delta = P_2 V_2^\delta; P_2 V_2^\delta = P_3 V_3^\delta; P_3 V_3^\delta = P_4 V_4^\delta \Rightarrow P_1 V_1^\delta = P_2 V_2^\delta = P_3 V_3^\delta = P_4 V_4^\delta \quad (\text{V-11})$$

$$\text{et } T_1 V_1^{\delta-1} = T_2 V_2^{\delta-1} \cdot T_2 V_2^{\delta-1} = T_3 V_3^{\delta-1}$$

$$; T_3 V_3^{\delta-1} = T_4 V_4^{\delta-1} \Rightarrow T_1 V_1^{\delta-1} = T_2 V_2^{\delta-1} = T_3 V_3^{\delta-1} = T_4 V_4^{\delta-1} \quad (\text{V-12})$$

$$\text{De (V-10) : } \eta = 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}; \quad T_4 \text{ supérieur à } T_1 \quad (\text{V-13})$$

Notons que :

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{T_4}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{V-14})$$

$$\text{En effet, soit } \frac{a}{b} = \frac{c}{d}; \quad \frac{a \pm c}{b \pm d} = \frac{a}{b} \left(\frac{1 \pm \frac{c}{d}}{1 \pm \frac{c}{d}} \right) = \frac{a}{b} \left(\frac{1 \pm \frac{c}{d}}{1 \pm \frac{c}{d}} \right) = \frac{a}{b} = \frac{c}{d}$$

$$\text{Finalement : } \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{V-15})$$

$$\text{Or de (V-12) : } \frac{T_1}{T_2} = \frac{V_2^{\partial-1}}{V_1^{\partial-1}} = \frac{P_1^{\frac{\partial}{\partial-1}}}{P_2^{\frac{\partial}{\partial-1}}} \quad \text{d'après (V-11)}$$

$$\text{D'où } \eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{P_1^{\frac{\partial}{\partial-1}}}{P_2^{\frac{\partial}{\partial-1}}}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\frac{P_2^{\frac{\partial}{\partial-1}}}{P_1^{\frac{\partial}{\partial-1}}}} \quad \text{Avec } P_2, \text{ supérieur, à } P_1 \quad (\text{V-16})$$

On voit que le rendement est une fonction croissante du rapport de compression P_2/P_1 pour un gaz assimilable à un gaz parfait en transformation adiabatique réversible.

V-4-1. Cycle à gaz parfait avec irréversibilité. [1]

Dans la réalité, on sait que la compression et la détente ne suivent pas des isentropiques mais des adiabatiques irréversibles.

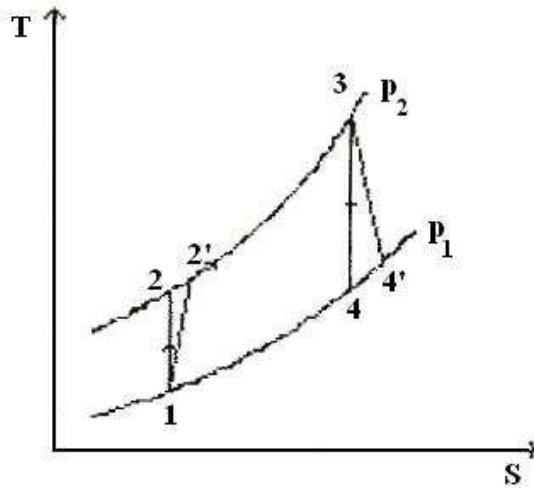


Figure 19 : Cycle de Baryton réel : cycle à gaz parfait irréversible.

Si on conserve l'hypothèse de l'air parfait, il est donc souhaitable d'affiner le modèle en prenant en compte de ces irréversibilités.

Mais le problème reste complexe, et on a fait appel à la formulation dite polytropique, ayant plutôt un caractère empirique. Nous préférons d'en passer.

V-5. Adaptation des schémas classiques.

Comme il a été mentionné au chapitre IV précédent, notre objectif essentiel est d'utiliser les Energies Nouvelles et Renouvelables, et en particulier l'Energie Géothermique. Dans le cas de turbine à gaz décrit au paragraphe V-4 précédent, le gaz mis en œuvre doit être celui obtenu à partir d'une source géothermique, conformément aux adaptations préconisées au chapitre IV.

Chapitre VI. Les différents types de turbines à vapeur.

En fonction de leur utilisation, on distingue quatre grandes catégories de turbines à vapeur : turbine à condensation, turbine à contre pression, turbine à soutirage et condensation, et turbine à soutirage et contre pression.

VI-1. Turbine à condensation. [1]

Ce sont les turbines dans lesquelles la vapeur est complètement détendue jusqu'à une pression voisine de 0,02 à 0,04 bars, puis liquéfiée dans un condenseur refroidi soit par l'air ambiant, soit par de l'eau. Condenseur : processus par lequel, le volume d'un gaz diminue et sa densité augmente en général par liquéfaction. La condensation d'un gaz est caractérisée par l'abaissement de sa température. Le produit résultant est appelé condensât.

Ce type de turbine est surtout utilisé dans les installations de production de force motrice.

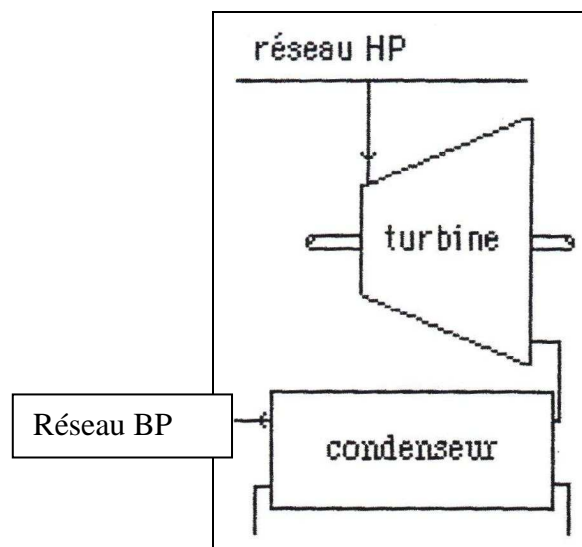


Figure 20 : Turbine à condensation

VI-2 Turbine à contre pression. [1]

Les turbines à contre pression, ce sont celles dans lesquelles, la vapeur est détendue de pression HP (haute pression) supérieure à 40 bars jusqu' à une pression BP (basse pression) de l'ordre de 4 bars.

Ce type de turbine permet de produire de la puissance mécanique ou de l'électricité grâce aux hautes températures et pressions que l'on peut obtenir dans une chaudière, tout en utilisant l'enthalpie résiduelle pour des procédés divers (réseau BP) d'utilisation.

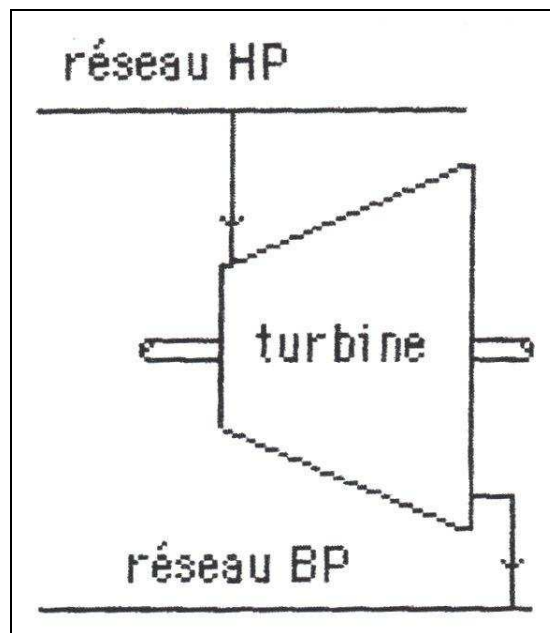


Figure 21 : Turbine à contre pression.

VI-3. Turbine à soutirage et condensation. [1]

Ce sont les turbines dans lesquelles la vapeur subit une détente partielle jusqu'à une moyenne pression (environ 20bars) dans un corps haute pression. Une partie est dirigée vers un réseau d'utilisation, basse pression, comme dans une turbine à condensation.

Ce type de turbine trouve un champ d'application important dans les usines de cogénération (exemple voir cogénération) dont les demandes de chaleur sont susceptibles de varier fortement au cours du temps.

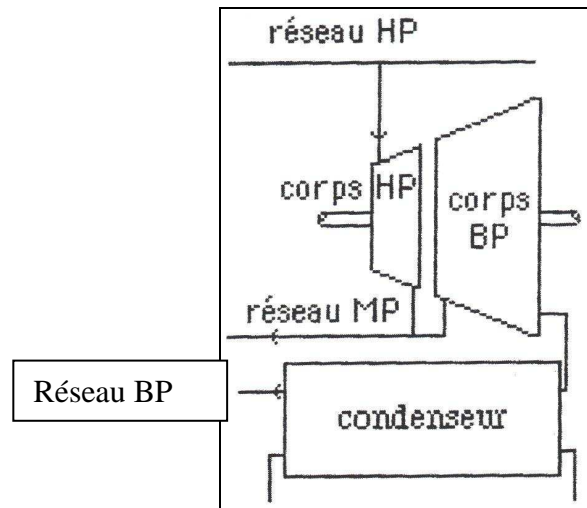


Figure 22 : Turbine à soutirage et à condensation.

VI-4. Turbine à soutirage et contre pression. [1]

Ce sont les turbines dont la vapeur s'échappe à basse pression dans un réseau BP au lieu d'être condensée.

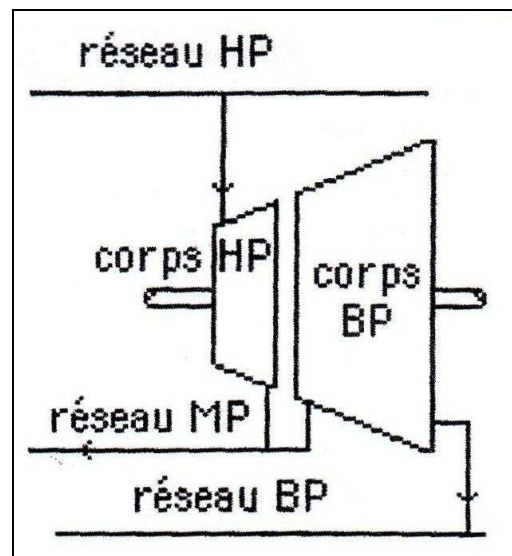


Figure 23 : Turbine à soutirage et contre pression.

On obtient ici un réseau d'utilisation moyenne pression de gaz (MP) comme le cas d'une turbine à soutirage et condensation et un réseau d'utilisation basse pression de gaz (BP).

Conclusions.

La question posée dans notre introduction trouve-t-elle une réponse ?

L'énergie géothermique ne serait- elle pas aussi une énergie du futur ? Une énergie capable de révolutionner par rapport à d'autres et de rendre saine notre planète Terre ?

Nous venons de montrer, à travers ce mémoire que la géothermie est une source d'Energie Nouvelle et Renouvelables qui présente un potentiel de développement considérable.

Elle a aussi des avantages écologiques car :

- les installations géothermiques ne nécessitent pas de combustion qui est responsable d'émission de gaz toxiques à effet de serre (CO_2 , NO_2) ;
- elle ne nécessite pas également le transfert et le stockage de matières dangereuses
- elle est une énergie propre qui n'utilise, le plus souvent, que des éléments naturels : la chaleur de la terre et de l'eau. En effet, après utilisation, elle est, soit renvoyée artificiellement, soit de manière naturelle dans la terre.
- Aucune réaction chimique ni nucléaire n'est nécessaire pour obtenir de la chaleur ou de l'électricité.
- Sa durée de vie est illimitée

Durant notre étude de Recherche, nous sommes partis la source Thermale, pour arriver à des utilisations, comme la production de vapeur d'Eau Thermale et son adaptation (chapitre IV) et comme la conception et l'adaptation d'une centrale à vapeur, notamment au chapitre V.

Actuellement, il existe parmi les universitaires travaillant aux Energies Nouvelles et Renouvelables des équipes de Géo thermiciens. Le but de ces équipes est la mise en valeur de la géothermie. A Madagascar, un programme de campagne géothermique géophysique est au stade de la recherche de financement. [17]

Nous avons constaté que l'énergie géothermique haute enthalpie qui produit de la vapeur à haute température est destinée à la production d'électricité : objectifs visés dans notre axe de recherche.

Par ailleurs nous avons proposé certaines adaptations de schémas classiques et d'autres innovations.

Elles sont plus accessibles aux pays en développement.

En définitive cette étude de recherche montre que la géothermie est une source d'énergie moins chère que les autres sources conventionnelles, là où les conditions géologiques, techniques, géographiques et économiques permettent de l'exploiter.

ANNEXES

Annexe A.

Caractéristiques physico-chimiques de l'eau thermale de Ranomafana

Tableau

	Source N°1	Source N°2
Température de l'eau en 0°C	39°C bassin ouest 42,5°C bassin Est	46°C (à la source)
Aspect	limpide	limpide
Turbidité NT ₄	0,6	0,4
Couleur	incolore	incolore
Odeur	Inodore	Sulfureuse
Saveur : résistivité électrique à 20°C Ω/cm	Sans désagrément 3699	Sans désagrément 3338
Conductivité électrique à 20°C NH ₄ /CMP ₄	2703.10 ⁻⁷	2995.10 ⁻⁷
Résidu sec en Mg/l	211,5mg/p	228,5

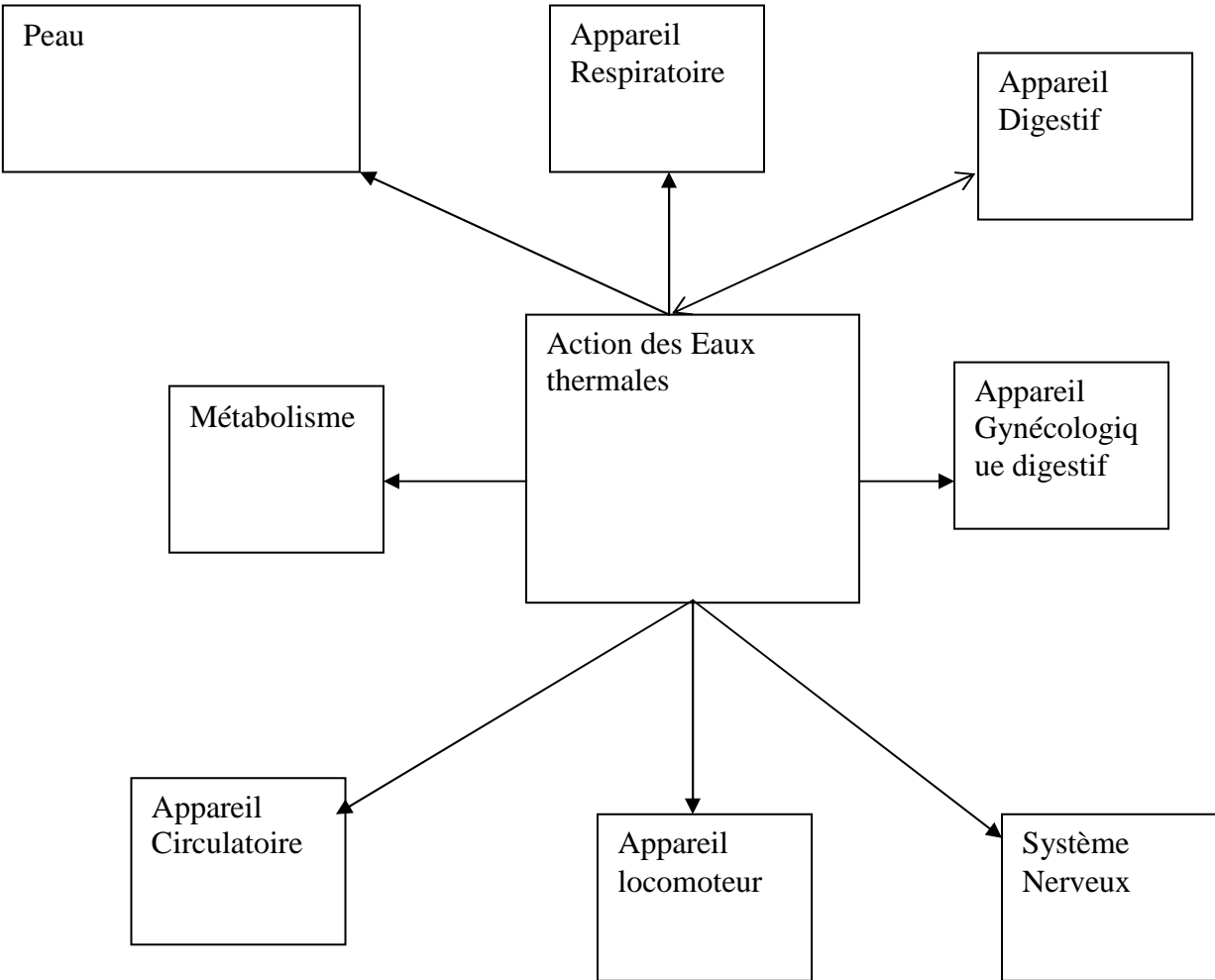
Annexe B

Analyse Chimique de l'Eau Thermale de Ranomafana.

	Source N°2		Source N°1	
1- Caractéristiques Générales et Corps Non coursés				
Matières en suspension				
Matières organiques M.O.	0,0 mg/l		0,2 mg/l	
Dureté Totale TN	0,0°F		0,6°F	
Titre Alcalimétrique complet (TAG)	5,70°F		5,30°F	
Titre Alcalimétrique complet (TA)	2,50F		1,50F	
Chlore libre Cl ₂				
Minéralisation totale	230mg/l		208,5mg/l	
2- Composition Ionique Cations	Mé au litre	Mg au litre	Mé au litre	Mg au litre
Magnésium Mg ⁺⁺	0,160	3,200	0,120	2,400
Calcium Ca ⁺⁺				
Ammonium NH ₄ ⁺				
Sodium Na ⁺	3,452	79,40	2,50	58,90
Potassium K ⁺				
Fer Fe ⁺				
Manganèse Mn ⁺				
Somme	3,162		2,680	
Ammoniums				
Bicarbonate HCO ₃ ⁻⁻	1,40	8,540	0,460	28,060
Carbonate CO ₃ ⁻⁻	1,000	30,000	0,600	18,000
Hydroxyde O ₄ ⁻				
Chlorure Cl ⁻	0,200	7,100	0,200	7,11
Sulfate SO ₄ ⁻⁻	2,083	100,000	1,250	60,000
Nitrite NO ₂ ⁻				
Nitrate NO ₃ ⁻				
Somme	3,423		2,510	

Annexe C.

Mode de fonctionnement de la source thermique de Ranomafana.



Annexe D- Poussée exercée par un liquide sur un obstacle.

Applications aux hélices hydrauliques et aériennes [29].

Nous nous proposons de rappeler ci-après, les notes de cours du **Docteur** Edmond [29] relatif au sujet :

D-1. Equation de mouvement sous forme intégrale.

Considérons un milieu fluide en isolant un volume $V(t)$ variable dans le temps. Soient $\rho(\vec{r}, t)$ et $\vec{v}(\vec{r}, t)$ la masse volumique et vecteur vitesse au point \vec{r} et au temps t centré à l'élément de volume dV

Calculons l'expression suivante :

$$\frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \rho \vec{v} dV = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \left[\iiint_{V(t+\tau)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) - \iiint_{V(t)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t) dV \right]$$

Grâce à l'additivité des intégrales :

$$\begin{aligned} \iiint_{V(t+\tau)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) dV &= \iiint_{V(t)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) dV + \iiint_{V(t+\tau)-V(t)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) dV \\ \Rightarrow \frac{d}{dt} \iiint (\rho \vec{v}) dV &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \left\{ \iiint_{V(t)} [\rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) - \rho \vec{v}(\vec{r}, t)] dV \right\} + \\ \frac{\lim_{\tau \rightarrow 0} 1}{\tau} \frac{1}{\tau} \iiint_{V(t+\tau)-V(t)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) dV &= \iiint_{V(t)} \left\{ \lim_{\tau \rightarrow 0} \left[\frac{\rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) - \rho \vec{v}(\vec{r}, t)}{\tau} \right] \right\} dV + \\ \frac{\lim_{\tau \rightarrow 0}}{\tau} \iiint_{V(t+\tau)-V(t)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) \frac{dV}{\tau} & \end{aligned}$$

$$\text{Soit : } \frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} (\rho \vec{v}) dV = \iiint_{V(t)} \left\{ \lim_{\tau \rightarrow 0} \left[\frac{\rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) - \rho \vec{v}(\vec{r}, t)}{\tau} \right] \right\} dV + \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} \iiint_{V(t+\tau)-V(t)} \rho \vec{v}(\vec{r}, t+\tau) dV$$

La première intégrale se réduit à : $\iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} [\rho \vec{v}(\vec{r}, t)] dV$.

Pour la deuxième intégrale, on sait que :

$$dV = d\vec{S} \cdot d\vec{r} = (\vec{n} \cdot d\vec{S})(\vec{v} \cdot dt)$$

Avec \vec{n} le vecteur unitaire au point dS et orienté vers l'extérieur de S .

$$dV \Rightarrow \frac{dV}{\tau} = \vec{n} \cdot \vec{v} dS \frac{dt}{\tau};$$

$\vec{n} \cdot \vec{v} = v_n$ = la projection de la vitesse sur la normale \vec{n} .

Quand $\tau \rightarrow 0$, et $\tau \neq 0$, $\frac{dt}{\tau} \rightarrow 1$ et finalement la deuxième intégrale se réduit à :

$$\iint_{S(t)} \rho \vec{v} \cdot \vec{v}_n dS$$

D'où :

$$\frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \rho \vec{v} dV = \iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV + \iint_{S(t)} \rho \vec{v} \cdot \vec{v}_n dS$$

Soit :

$$\iint_{S(t)} \rho \vec{v} \cdot \vec{v}_n dS = \frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \rho \vec{v} dV - \iiint_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) dV .$$

En régime stationnaire : $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) = 0$

On sait que : $\frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \rho \vec{v} dV = \iiint_{V(t)} \rho \frac{d\vec{v}}{dt} dV$ compte tenue de l'équation de continuité

Or, d'après l'équation de Navier-Stokes :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad} p + \left(\eta + \frac{\mu}{3}\right) \text{grad} \text{div} \vec{v} + \mu \Delta \vec{v}$$

D'où :

$$\iint_S \rho \vec{v} \cdot \vec{v}_n dS = \iiint_V \left[\rho \vec{F} - \text{grad} p + \left(\eta + \frac{\mu}{3}\right) \text{grad} (\text{div} \vec{v}) + \mu \Delta \vec{v} \right] dV$$

Comme $\iint_S \theta \cdot \vec{n} dS = \iiint_V \text{grad} \theta dV$

$$\iint_S \left\{ \rho \vec{v}_n \cdot \vec{v} + \left[P - \left(\eta + \frac{\mu}{3}\right) \text{div} \vec{v} \right] \vec{n} \right\} dS = \iiint_V (\rho \vec{F} + \mu \Delta \vec{v}) dV$$

C'est l'équation de mouvement sous forme intégrale.

D-2. Poussée exercée par un liquide sur un obstacle solide

.

Rappel de l'équation de mouvement sous forme intégrale.

$$\iint_S \rho_0 \vec{v}_n \cdot \vec{v} dS = - \iint_S \left[P - \left(\eta + \frac{\mu}{3}\right) \text{div} \vec{v} \right] \vec{n}_s ds + \iiint_V (\rho_0 \vec{F} + \mu \Delta \vec{v}) dV$$

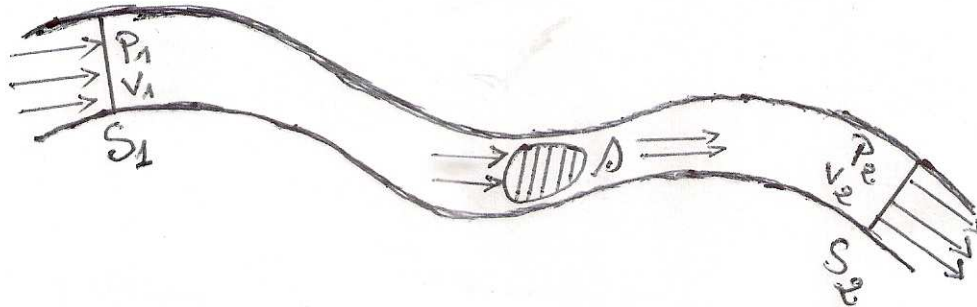
Avec S une surface fermée délimitant un volume V dans le liquide.

Ici : $\text{div} \vec{v} = 0$ pour un liquide

$\vec{F} = 0$ (Par équilibre de contact)

$\mu = 0$ (On néglige la viscosité du liquide)

$$\text{Alors } \iiint_S (\rho_0 v_n \vec{v} + P \vec{n}_s) dS = 0$$



Il s'agit ici d'un tube de courant.

Définitions.

Une ligne de courant est une ligne dans le fluide sur chaque point de laquelle la vitesse est tangente.

Un tube de courant est un ensemble continu de lignes de courant.

$$S = S_1 + S_2 + s + S_0$$

S_1 et S_2 , deux sections droites en amont et en aval

S_0 , Surface latérale du tube de courant

s , Surface d'un solide immergé dans le tube du courant

$$\iint_S (\rho_0 v_n \vec{v} + P \vec{n}_s) dS = 0$$

$$\iint_{S_1} (\rho_0 V_{1n} \vec{V}_1 + p_1 \vec{n}_{s1}) dS_1 + \iint_{S_2} (\rho_0 V_{2n} \vec{V}_2 + P_2 \vec{n}_{s2}) dS_2 + \iint_s (\rho_0 v_{sn} \vec{v}_s + p_s \vec{n}_s) ds + \iint_{S_0} (\rho_0 v_{s0n} \vec{v}_{s0} + p_{s0} \vec{n}_{s0}) dS_0 = 0$$

$$V_{1n} = V_1 \cdot \vec{n}_{s1} = V_1 \cdot 1 \cdot \cos \pi = -V_1$$

$$V_{2n} = \vec{V}_2 \cdot \vec{n}_{s2} = V_2 \cdot \cos 0 = V_2$$

Avec :

$$\vec{V}_1 = -V_1 \cdot \vec{n}_{s1}$$

$$v_{sn} = \vec{v}_s \cdot \vec{n}_s = 0; \vec{V}_2 = +V_2 \cdot \vec{n}_{S_2}$$

Solide de surface lisse

De même

$$v_{s0} = \vec{v}_{s0} \cdot \vec{n}_{s0} = v_{s0} \cdot 1 \cos \frac{\pi}{2} = 0 \quad \text{: Tube de courant}$$

D'où :

$$\iint_S (\rho_0 V_1^2 + p_1) \vec{n}_{S_1} dS_1 + \iint_{S_2} (\rho_0 V_2^2 + p_2) \vec{n}_{S_2} dS_2 + \iint_s p_s \vec{n}_s ds + \iint_{S_0} p_{S_0} \vec{n}_{S_0} dS_0 = 0$$

Avec encore :

$$\vec{R} = \iint_{s0} p_s \vec{n}_s ds \quad \text{: Force exercée par le liquide sur la surface s du solide}$$

$$\vec{R}_0 = \iint_{S_0} p_{S_0} \vec{n}_{S_0} dS_0 \quad \text{: Force exercée par le liquide sur la surface latérale } S_0 \text{ du tube}$$

de courant

Soit :

$$\vec{R} + \vec{R}_0 = - \iint_{S_1} (\rho_0 V_1^2 + p_1) \vec{n}_{S_1} dS_1 - \iint_{S_2} (\rho_0 V_2^2 + p_2) \vec{n}_{S_2} dS_2$$

D'après la définition même du tube de courant, les termes entre parenthèses ne dépendent pas des variables d'intégration.

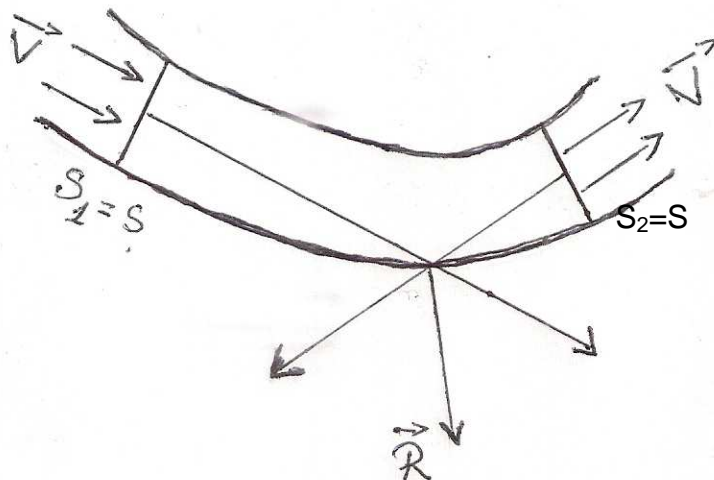
$$\vec{R} + \vec{R}_0 = - (p_1 + \rho_0 V_1^2) S_1 \vec{n}_{S_1} - (p_2 + \rho_0 V_2^2) S_2 \vec{n}_{S_2}$$

D- 3. Application au tourniquet hydraulique.

Soit un tuyau mobile autour d'un axe vertical et présentant un coude, et conduisant de l'eau. On posera :

$P_1 = P_2 = P$: pression de l'eau en amont et en aval du coude

P_0 : pression atmosphérique :



On montre que :

$$\iint_{S_0} (P - P_0) \vec{n}_{S_0} ds = - \iint_{S_1} (p_1 - p_0 + \rho v_1^2) \vec{n}_1 d s_1 = - \iint_{S_2} (p_2 - p_0 + \rho v_2^2) \vec{n}_{S_2} d s_2$$

En effet $P_0 = \text{constante}$ $\text{grad } p_0 = 0 \Rightarrow \iiint_V \text{grad } P dV = \iint_S P_0 d\vec{S} = 0$; V : volume

délimité par S .

$$\Rightarrow \iint_{S_1} p_0 d\vec{S}_1 + \iint_{S_2} p_0 d\vec{S}_2 + \iint_{S_0} p_0 d\vec{S}_0 = 0 \quad (1)$$

$$\iint_{S_1} (\rho v_{n1} \vec{v}_1 + p_1 \vec{n}_1) d s_1 + \iint_{S_2} (\rho v_2 \vec{v}_2 + p_2 \vec{v}_2) d s_2 + \iint_{S_0} (\rho v_{n0} \vec{v}_0 + p_{s_0} \vec{n}_0) d s_0 = 0 \quad (2)$$

(2)-(1)

$$\Rightarrow \iint_{S_1} (\rho V_{n1} \vec{v}_1 + p_1 \vec{n}_1 - p_0 \vec{n}_1) d s_{s1} + \iint_{S_2} (\rho V_{n2} \vec{V}_2 + p_2 \vec{n}_2 - p_0 \vec{n}_2) d s_2 + \iint_{S_0} (\rho v_{n0} \vec{v}_0 + p_{s_0} \vec{n}_0 - p_0 \vec{n}_0) ds = 0$$

$\vec{R}_0 = \iint_{S_0} (\rho v_{n0} \vec{v}_0 + p_{s_0} \vec{n}_0 - p_0 \vec{n}_0) d s_0$: force exercée par l'eau sur la surface S_0

$$\vec{R}_0 = - \iint_{S_1} (\rho V_1^2 + p_1 - p_0) \vec{n}_1 d s_1 - \iint_{S_2} (\rho V_2^2 + p_2 - p_0) \vec{n}_2 d s_2$$

$$\vec{R}_0 = -(p_1 - p_0 + \rho V_1^2) S_1 \vec{n}_1 - (p_2 - p_0 + \rho V_2^2) S_2 \vec{n}_2$$

$$p_1 = p_2 = P; V_1 = V_2 = V; S_1 = S_2 = S, \Rightarrow$$

$$\vec{R}_0 = -(P - P_0 + \rho V^2) S \vec{n}_1 - (P - P_0 + \rho V^2) S \vec{n}_2$$

$$\vec{R}_0 = -(P - P_0 + \rho V^2) S (\vec{n}_1 + \vec{n}_2) :$$

\vec{R}_0 : est la force exercée par le liquide sur le coude du tourniquet hydraulique à condition de choisir la forme du coude pour que le point d'application de cette force coïncide sur le sommet intérieur de ce coude, compte tenu des valeurs des données.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Renaud. Gic quel : professeur à l'école de Mines de Paris. Système Energétique Tomes 1et 2. 264 et 330 pages. Les Presse de l'Ecole des Mines de Paris 2001.
2. Chaussin. G. Hilly. J. Barralis: Professeur agrégé à l'école Nationale supérieure d'art et métiers école d'ingénieur. Chaleur et Thermodynamique 370 pages. DUNOD Paris 1969
3. Lucien Borel : Professeur à l'école polytechnique fédérale de Lausanne. Thermodynamique et Energétique Tome 1 et 2. 211 ET 499 pages. Presses polytechniques romandes 1984
4. Jacques Boutigny : Professeur en de Mathématiques spéciales. Thermodynamique. 233pages. Librairie Vuibert, septembre 1986
63, bd st-Germain 75005 Paris.
5. Alin Ricaud. Photopiles Solaires de la physique, de conversion photovoltaïque. 332pages.
6. A. Preychkine et Rodine. Physique - Mécanique. Phénomène thermique Electricité 359pages.
7. Daniel Fauré, Daniel Roux. Chauffage de l'habitat et Energie solaire Tome 1 confort thermique et technique de chauffage. 312pages.
8. L. Couture ch. Chahine R. Zitoun. Thermodynamique Cours exercices et problemes résolus, 330 pages. BORDAS, Paris, 1989 ISBN 2-04-018826-6
9. Luc. Chancelier et Eric Laurant. L'électricité photovoltaïque. 255pages.
10. Roger KLING. Professeur à l'Ecole centrale des Arts et Manufactures, Thermodynamique générale et Applications. 471 pages, Editions Technip-Paris 1980
11. Ministère de la coopération. Commissariat de l'énergie solaire (COMES) « Technologie et Développement ». Evaluation des Energies Renouvelables pour les en développement.
12. Robert STAUGH ET Daniel Yergin. Energie du futur. Rapport présenté par le groupe du « Projet Energie » à la Harvard busness school. 315pages.
13. Lucien Thiriet. L'énergie nucléaire. Charge des études économiques générales commissariat à l'énergie atomique. 253pages
14. Bonnim, J. Energie éolienne. 80pages. SC M : Paris 1980
15. FAIN, A. Monun, J. P. Energies Renouvelables et Réseau de Communication. Ministère de Coopération. 223pages Paris 1980

16. Olivet, Jacques. Le chauffage géothermique. 282pages. EYROLLES : Paris 1982
17. Symposium international sur les Energies Nouvelles et Renouvelables. CIST : Antananarivo, 1990. 400pages
18. Lambert, Y ; Vergnet, M. Mission de M.M. Lambert et Vergnet à Madagascar du 22 janvier au 01 février 1979. 102pages
19. R. Dipippo, Small geothermal Power plants: Design, performance and economics, GHC Bulletin Jun 1999
20. R. Dipippo, Second law assesment of biary plants generating power from low-temperature geothermal fluids, geothermics. 33P.P. 556-586, 2004
21. P. Bombarda, E. Maccihi, optimum cycles for geothermal power plants, Proceedings Wold geothermal congress 2000, Kyuhu- Thoko, Japan, June 10.2000
22. La géothermie, une énergie d'avenir Georaina, n°12, Journal d'information du BRGM juin 2004
23. R.I. Grane. Thermodynamique of combined cycle plant, van karman institute for fluid Dynamics, Lecture series 1993 combined cycle for.
24. Combined power plants, past, present and future congen Turbo conference, portand 1994.
25. J. H. Horlock. Les centrales électriques à cycles combinés, revus de la société des Electriciens et électroniciens décembre, Paris 1999.
26. C. KEMF. Energétique avancée des cycles turbomachines cours de DEA thermique, Energétique et Génie des procédés, septembre 1996 ; Nantes
27. EDMOND. Physique- statistique Appliquée. Notes de cours à la formation Doctorale Université de Tuléar Madagascar 2008
28. R. HERY : Energétique Appliquée : Notes de cours à la formation Doctorale Université de Tuléar Madagascar 2008
29. EDMOND. Mécanique de fluide : Notes de cours à la formation Doctorale Université de Tuléar Madagascar 2008
30. L. Sédov. Mécanique des milieux continus. Tome. 1 et 2. Editions MIR Moscou 1975

Liens Internet :

- <http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/pacg/indexhtm>
- <http://perso.Wanadoo.fr/cle-nergie/pdt/3-%20fiche%20PAC%.pdf>
- <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S06seance.html>
- [fr.wikipedia.org/wiki/Turbine à gaz](http://fr.wikipedia.org/wiki/Turbine_à_gaz)
- www.thermodynamique.com/spip.php

LISTE DETABLEAUX

Tableau 1 Comparaison des Estimations de coûts	9
Tableau 2 : Les températures estimées dans les différentes zones géothermiques à Madagascar.....	12

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de configuration.....	5
Figure 2 : Géothermie basse énergie (internet).....	7
Figure 3Géothermie à haute énergie (internet).....	8
Figure 5. (internet).....	17
Figure 8 : (internet).....	20
Figure 9. Centrale Directe.....	21
Figure 10. Centrale à simple flash.....	23
Figure 11. Centrale à double flash.	24
Figure 12. Centrale géo watt.....	25
Figure 13 :Centrale binaire.....	26
Figure 14 :Cycle Combiné.....	27
Figure 15 :Cycle combiné.....	27
Figure 16 : Cycle mixte.	28
Figure 17 : Modification de microcentrale à fluide secondaire.	30
Figure 18 : Tourniquet hydraulique.....	34
Figure 19 :Schéma d'une centrale à vapeur.....	35
Figure 20 : Description du cycle	35
Figure 21 : Cycle de Turbine à gaz.....	37
Figure 22 : Cycle de Baryton réel : cycle à gaz parfait irréversible.	39
Figure 23 :Turbine à condensation.....	40
Figure 24 : Turbine à contre pression.	41
Figure 25 : Turbine à soutirage et à condensation.....	42
Figure 26 : Turbine à soutirage et contre pression.....	42

LISTE DES PHOTOS

Photo N° 1 : Centrale thermique de Tuléar	15
Photo N° 2: Dénivellation de la Centrale hydroélectrique de Ranomafana.....	17
Photo N° 3 : Tableau synoptique de la Centrale de Ranomafana	17