



ZIE
Fondation ZIE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

**PROJET DE CONCEPTION ET REALISATION D'UNE CENTRALE
ELECTRIQUE GEOTHERMIQUE DE 5 MW AU CAMEROUN**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER 2 SPECIALISE EN GENIE ELECTRIQUE ENERGETIQUE
ET ENERGIES RENOUVELABLES
OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES**

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Fidèle AMANA OMOKO

Travaux dirigés par : Yézouma COULIBALY

Titre : Doctorat d'Etat de l'UCAD de Dakar
(Sénégal) - Docteur 3ème cycle INPG
Grenoble (France) CHEF D'UNITE,
Enseignant Chercheur
UTER : Génie Energétique et Industriel

Augustin KEMFACK

Directeur Général EXTERRAN Gabon

Docteur Albert EYIKE

Enseignant Chercheur Université de Douala
Chargé Des Cours

Jury d'évaluation du stage :

Président : Yezouma COULIBALY

Membres et correcteurs : Sayon SIDIBE
Francis SEMPORE
Madieumbe GUEYE

Promotion [2010/2011]

CITATIONS

La chaleur de la Terre est une énergie propre et durable pour tous
Saisissons la chance offerte par la géothermie:une énergie d'avenir pour la production d'électricité.
L'ère post-fossile arrive plus vite que nous le pensons!

REMERCIEMENTS/ DEDICACES

J'ai le plaisir de dire un sincère **merci**, à tous ceux qui ont contribué sous une forme quelconque de près ou de loin à la réussite de ma formation et à la réalisation de ce mémoire.

En particulier j'exprime ici, ma profonde gratitude à l'endroit de mon maître de mémoire, **Yézouma COULIBALY**, Enseignant chercheur au 2iE, pour son accompagnement, **Albert EYIKE**, Enseignant chercheur à l'Université de Douala **Isidore Blaise FONGANG** Enseignant chercheur à l'ISTAC pour leur accompagnement ainsi qu'à mon maître de stage **Augustin KEMFACK**, Ingénieur, Directeur Général EXTERRAN Gabon pour sa disponibilité et ses encouragements tout au long du processus d'élaboration de ce document.

- les responsables et coordonnateurs de la formation à distance au 2iE, particulièrement Monsieur **Kone TOFANGUY** et Madame **Sylvie OUEDRAOGO** respectivement Chef du Service de la formation à distance et Coordonnateur de la filière du Master spécialisé M2 GEER Groupe 1 ;
- les enseignants du 2iE pour leur tutorat très apprécié et leur esprit pédagogique ;
- aux camarades de la promotion 2010-2011 du Master II Spécialisé GEER ;
- à tous mes amis qui m'ont soutenu de diverses manières ;

Je dédie également ce travail à mon épouse **Emilie Rachel AMANA** pour son esprit d'écoute et d'attention, mes enfants **Sarah Lucie OMONA AMANA**, **Fidèle Gabriel AMANA AMANA**, **Valérie Melissa AMOUGUI AMANA**, mes parents ainsi qu'à mes frères et soeurs.

RESUME

Le Cameroun aujourd'hui est l'un des pays africains ayant un bon potentiel électrique, vu le nombre de barrages hydroélectriques et les centrales thermiques qui y sont présents sur l'ensemble du territoire et pilotés par la société AES Sonel qui a une puissance installée de 1557 MW. Malgré toutes ces installations cette société n'arrive pas à aligner l'offre à la demande en électricité dans le pays d'où la nécessité de trouver de nouvelles solutions pour améliorer l'accès à l'énergie et la pérennisation de celle-ci.

Actuellement, le territoire Camerounais est en majorité alimenté par des centrales thermiques soit à Gaz, soit Diesel ou alors à fioul lourds, et qui dit thermique dit consommation d'énergies fossiles et émissions des gaz à effet de serre, or selon les spécialistes, ces énergies sont appelées à disparaître ce qui implique l'importance d'utiliser des énergies inépuisables qui respectent l'environnement.

L'étude que nous avons réalisé est une étude pour un projet réalisation d'une Centrale Electrique Géothermique au Cameroun qui respectera donc les critères d'environnement en ce sens qu'elle utilisera la chaleur de la terre pour réchauffer de l'eau injectée dans celle-ci, la vapeur récupérée sera utilisée pour faire tourner une turbine à vapeur qui entraîne un alternateur ce qui nous permettra d'avoir de l'électricité, les condensats de la vapeur seront rejetés à l'air libre, sans conséquence d'émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère ou selon le cas échéant récupérés.

Le but de ce travail consistait à élaborer les méthodes qui nous permettront de concevoir et réaliser le projet, étudier la géothermie du Cameroun et la production d'énergie électrique à partir des sources thermales trouvées. La difficulté, qui a rendu le projet vaste, fut l'obligation d'une progression dans un environnement indéterminé où toutes les données devaient être recherchées sur le terrain.

En premier lieu nous avons essayé d'étudier la géothermie et particulièrement le cas du Cameroun, en second lieu nous avons essayé d'expliquer les technologies qu'il faut pour extraire et convertir cette chaleur en énergie électrique.

Cette étude a pu ainsi confirmer que la production d'énergie électrique à partir de la géothermie est possible dans certaines régions du Cameroun dépendamment du gradient géothermique, de la source thermales et de la profondeur des forages par rapport à la puissance électrique voulue

En ce qui concerne la méthodologie utilisée il s'agissait de faire :

- Une étude de faisabilité pour savoir d'où provient la chaleur terrestre en faisant une étude la géothermie qui nous permettra de mieux choisir l'emplacement de notre centrale.
- D'énumérer les techniques d'extraction et de production de l'électricité à partir de la chaleur géothermique.
- Faire une étude des Impacts Environnementaux et Socio-économiques entraînés par la réalisation de la Centrale.
- Faire une étude des coûts de la centrale
- Enumérer les techniques de recherche des financements du projet

Mot clés : turbine - alternateur - échangeur de chaleur - source thermique - gradient

Géothermique - logiciel Metamod.

ABSTRACT

Today, Cameroon is one of the African countries who having a good electric potential, considering the number of hydroelectric barrage and the power stations which present on the whole of the territory and are controlled by the company AES Sonel which has a working installed capacity of 1557 MW. Despite everything these installations this company does not manage to align the quotation at the request of electricity in the country from where the need for finding new solutions to improve the access to energy and the perennisation of this one.

Currently, the Cameroonian territory in majority is fed by power stations either with Gas, or Diesel or then with fuel heavy, and which says thermal said consumption of fossil energies, gold according to specialists', these energies have to disappear this implies the importance to use inexhaustible energies which respect the environment.

The study that we carried out is a study for a realization project of a Geothermic Power station which will thus respect the criteria of environment in the sense that it will use the heat of the ground to heat water injected into that - Ci, the recovered vapor will be used to drive a steam turbine which drive an alternator this will enable us to have electricity, the condensât of the vapor will be rejected with the free air, without consequence of gas emissions (GES) in the atmosphere or if necessary saved.

The goal of this work consisted in working out the methods which will enable us to conceive and carry out the project, to study geothermic in Cameroon and the electrical energy production. The difficulty, which made the project vast, was the obligation of a progression in an unspecified environment where all the data were to be required on the ground.

Initially we tried to study geothermic and specially the Cameroon case, in the second place we tried to explain technologies which it is necessary to extract and convert this heat into electric power. This study thus could confirm that the production of electrical energy from geothermic is possible in some area in Cameroon depending on the geothermic gradient, the thermal source, and the depth of drillings to obtain desired power.

With regard to methodology used it was a question of making:

- A feasibility study to know from were comes terrestrial heat by making a study the geothermic which will enable us to better choose the site of our power station.
- . To enumerate the techniques of extraction and production of electricity starting from geothermic heat.

- . To make a study of the Environmental and Socio-economic Impacts pulled by the realization of the Power station.
- To make a study of the costs of the power station
- To enumerate the techniques of research of the financings of the project

Keys words : turbine - alternator – heat exchanger – Thermal spring – Geothermal Gradient

LISTE DES ABREVIATIONS

Centrale ORC : centrale à fluide binaire

CO₂ : Dioxyde de carbone

EDF : Electricité de France

EnR : Energie Renouvelables

gradT : Gradient de la température

GES : Gaz à Effet de Serre

Km : kilomètre

KW : kilo Watt

KWh : kilo Watts Heure

Ma : Million d'années

MDP : Mécanisme de développement Propre

MW : Méga Watt

MWe: Méga Watt Electrique

ORC : Organic Rankine Cycle

ORSTOM: Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en
Coopération

P : Pression

Pa : Pays en voie de Développement

PED : Pays en voie de Développement

S : Surface

S_{0x} : Oxyde de soufre

t : Temps

T : Température

T_{equCO2} : Tonne Equivalent de Dioxyde de carbone

u : Vitesse

UE : Union Européenne

US\$: Dollars Américain

USc : Centimes de Dollars Américain

°C = degré Celsius

T° = 530°C Température de sortie de vapeur (entrée turbine)

\dot{Q} : Puissance Reçue par l'eau pour s'évaporer

\dot{W} :Puissance mécanique sur l'arbre de la turbine

C_e : Chaleur massique de l'eau (4,18)

C_v :Chaleur massique de la vapeur(2676)

q_e :Débit d'eau

η_T :Rendement de la turbine 40%

η_{eff} :Rendement Effectif 80%

P_e :Puissance Electrique 5 MW

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX.....	1
LISTE DES FIGURES ET GRAPHIQUES.....	2
I.INTRODUCTION	3
II.OBJECTIFS DE TRAVAIL.....	5
2.1. OBJECTIF GENERAL	5
2.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES	5
III METHODES ET OUTILS.....	5
3.1. ETUDE DE FAISABILITE.....	5
3.1.1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
A. Définition de la Géothermie.....	5
B. Principe de la Géothermie.....	6
C. Types de Géothermie.....	8
C.1 La Géothermie HauteEnthalpie.....	8
C.2 La Géothermie Basse Enthalpie.....	9
C.3 La Géothermie Très Basse Enthalpie.....	9
D.Méthodes et Etudes d'Extraction de la Chaleur du Sous-Sol et Production d'Electricité.....	10
D.1.En Géothermie Basse Enthalpie.....	10
D.2.En Géothermie Haute Enthalpie.....	10
D.3. Principaux Types de Ressources Géothermiques.....	10
E. Production d'Electricité.....	11
E.1 Avec Réservoir de Vapeur.....	11
E.2 Avec Réservoir d'Eau Chaude.....	12
E.3 Avec les Gisements des Roches Chaudes Sèches.....	13
3.1.2. ETUDE EXPERIMENTALE DU PROJET.....	14
Sources Thermales du Cameroun.....	14
Les Températures Possibles par la Géothermie au Cameroun.....	17
A. Choix du site.....	19
A.1. Motivation du choix par rapport aux caractéristiques du site.....	20
A.2. Présentation Géographique.....	20
3.1.3. SIMULATION AVEC DES PUISSANCES DES RENDEMENTS DES NIVEAUX DE TEMPERATURES.....	20
Turbines à Vapeur.....	19
B.1 Calculs des puissances et rendements.....	23

B.2 Autres solutions de Réalisation de la Centrale si on utilise juste la Température de 74°C (Woulndé)	23
B.3 Calculs des puissances et rendements théoriques de la Centrale (Figure 14).....	26
B.4 Autres applications de la Géothermie.....	29
B.5 Profondeur des puits par rapport au gradient thermique.....	29
B.6 Motivations du choix de la turbine par rapport aux puissances à produire et des caractéristiques du site.....	30
3.1.4.ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIO-ECONOMIQUE DU PROJET.....	30
A. Impacts Environnementaux du Projet.....	31
B. Impacts Socio-économique.....	31
C. Contribution à la Balance Energétique du Cameroun.....	31
3.1.5.ETUDE DES COÛTS DU PROJET.....	32
A. Coût de l'électricité géothermique calculé avec une ressource de qualité moyenne (température de 150 à 250°C).....	32
3.1.6. TECHNIQUES DE RECHERCHE DE FINANCEMENTS DU PROJET	33
A. Compensation Carbone et Crédits Carbone.....	33
B. Mécanisme de Développement Propre.....	34
IV.RESULTATS.....	36
A. Caractéristiques de la turbine.....	37
B. Coût pour une Centrale de 5 MW.....	37
C. Calculs de crédits carbones pour une centrale géothermique de 5 MW sur 10 ans en supposant qu'elle produit 35000 MWh par an.....	38
V. DISCUSSIONS ET ANALYSES	39
A. Avantages de l'Energie Géothermique pour la production d'Electricité.....	39
B. Inconvénients de l'Energie Géothermique pour la production d'Electricité.....	40
VI. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	42
VII. BIBLIOGRAPHIE	43
VIII. ANNEXES	44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I – Tableau des 19 sources certainement thermales

Tableau II – Tableau des sources probablement thermales

Tableau III - Les Coûts par la Banque Mondiale

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Réservoir Géothermique (Par : volcanoes : crucible of change Princeton university USA, 1997)

Figure 2: Réservoir Géothermique (Par : EDF France)

Figure 3 : Schéma de principe d'une centrale géothermique utilisant la vapeur géothermale pour la production d'électricité

Figure 4 : Production d'électricité avec réservoir de vapeur (IDHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY, USA)

Figure 5 : Production d'électricité avec réservoir d'eau chaude (IDHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY, USA)

Figure 6 : production d'électricité avec les gisements de roches chaudes sèches (IDHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY, USA)

Figure 7 : Histogramme des températures de 114 sources thermominérales du Cameroun.

Figure 8 : Structure du sol (Source Département forage Addax Petroleum Cameroun)

Figure 9 : Représentation de la ligne volcanique du Cameroun (En rouge).

Figure 10 : Cycle de rankine en vapeur humide.

Figure 11 : Cycle d'une turbine à vapeur.

Figure 12 : Cycle de Rankine.

Figure 13 : Schéma de Principe du Système.

Figure 14 : Schéma d'une installation ORC Par la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG)

Figure 15 : Puissance électrique nette fournie par une centrale à fluide binaire, en fonction d'une température du réservoir et du débit de production. Par la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG) d'Electrosuisse

Figure 16 Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures (Par le CFG Groupe BRGM)

Figure 17 : Ouvrages souterrains de la centrale par Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG) d'Electrosuisse

Figure 18 : Turbine à vapeur SST-060.Par siemens

Figure 19: Comparaison des taux d'émission de CO₂ et de SO_x selon les sources d'énergie utilisées. (Par le CFG Groupe BRGM)

Figure20: Disponibilité comparée des centrales électriques utilisant la vapeur géothermale, le charbon et le nucléaire comme source d'énergie. Les centrales géothermiques nécessitent peu d'arrêts pour les opérations de maintenance et d'entretien (Par le CFG Groupe BRGM)

I. INTRODUCTION

Depuis l'aube de l'humanité, l'homme a toujours su tirer parti des énergies provenant des geysers, sources chaudes et éruptions volcaniques qui manifestaient leur existence. Mais la découverte d'énergies plus facilement mobilisables (charbon, pétrole) n'a guère encouragé son développement.

Aujourd'hui, la donne change. L'épuisement programmé des réserves d'énergies fossiles, la nécessité de préserver l'environnement et le réchauffement climatique dû à l'effet de serre imposent de faire toute leur place aux énergies renouvelables. La géothermie est de celles-ci.

La chaleur de la terre provient de la désintégration d'éléments radioactifs présents dans les roches et du noyau terrestre qui génèrent un flux de chaleur vers la surface. Plus la profondeur est grande, plus la chaleur est élevée, augmentant en moyenne de 3°C tous les 100 mètres. Mais ce gradient géothermique peut être beaucoup plus élevé dans certaines configurations géologiques particulières.

Certaines formations géologiques du sous-sol recèlent naturellement des aquifères dont les eaux (et/ou la vapeur selon les conditions de température et de pression) sont le vecteur de l'énergie thermique. La géothermie très basse énergie exploite des réservoirs situés à moins de 100 mètres et dont les eaux ont une température inférieure à 30°C. On l'utilise pour le chauffage et/ou la climatisation, via une pompe à chaleur. La géothermie basse énergie s'appuie, elle, sur des aquifères à des températures comprises entre 30° et 100°C. On l'exploite dans des réseaux de chaleur pour le chauffage urbain ou dans le cadre de procédés industriels, par exemple. La géothermie moyenne énergie et haute énergie (jusqu'à 250°C) est utilisée pour produire de l'électricité, au moyen de turbines.

Une directive européenne prévoit d'ailleurs qu'au moins 21 % de la production d'électricité de l'U.E. provienne d'énergies renouvelables d'ici 2010... La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui s'adresse aux deux grandes filières énergétiques : production d'électricité et production de chaleur, comme le solaire et la biomasse. Elle est régulière, avec une disponibilité moyenne de 80 %, et non-polluante. Et elle a atteint un niveau de maturité technique et commerciale qui lui permet de rivaliser sans complexe avec les autres énergies renouvelables.

Pourtant, les ressources sont considérables et, en certains points du monde (îles volcaniques notamment), facilement mobilisables. Quant aux coûts de production d'énergie, dans le cas de l'électricité plus élevés qu'avec les énergies fossiles sauf exception, un fort développement de

la géothermie, gage d'acquis scientifiques et techniques, permettrait de les réduire, tout en limitant les risques encourus par les investisseurs.

En ce qui concerne la méthodologie utilisée dans ce travail il s'agira de faire :

- Une étude de faisabilité pour savoir d'où provient la chaleur terrestre en faisant une étude de la géothermie du Cameroun qui nous permettra de mieux choisir l'emplacement de notre centrale.
- D'énumérer les techniques d'extraction et de production de l'électricité à partir de la chaleur géothermique et des températures trouvées.
- Faire une étude des Impacts Environnementaux et Socio-économiques entraînés par la réalisation de la Centrale.
- Faire une étude des coûts de la centrale
- Enumérer les techniques de recherche des financements du projet

II. OBJECTIFS DU TRAVAIL

2.1. OBJECTIF GENERAL

L'objectif général était de faire une étude du projet de conception d'une centrale qui produirait de l'électricité à partir de la température de la terre en respectant les normes de l'environnement et éviter les émissions de gaz à effets de serre au Cameroun.

2.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES

L'atteinte de cet objectif nous fixait inévitablement les objectifs spécifiques ci-dessus.

- Explorer les sources thermales du Cameroun
- Introduire une nouvelle technologie de production d'électricité au Cameroun
- Amélioration du potentiel Electrique du Cameroun
- Participer au respect des engagements du protocole de Kyoto
- Obtention des crédits carbones pour la réalisation du projet

III. MATERIELS ET METHODES

3.1. ETUDE DE FAISABILITE

C'est une analyse qui nous permet de situer le contexte du projet, de savoir si l'on est capable de mobiliser les ressources technologique pour la réalisation du projet, de recueillir les informations et document nécessaires, d'évaluer la rentabilité, d'identifier les impacts environnementaux et socio-économique du projet. C'est cette étude qui doit permettre de décider si on fait ou non le projet.

3.1.1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

A. Définition de la Géothermie

La géothermie, est la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre et la technique qui vise à l'exploiter. Par abus de langage, la géothermie désigne aussi l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur et/ou en électricité.

On distingue trois types de géothermie :

- la géothermie à haute énergie (production d'électricité),
- la géothermie à basse énergie (production de chaleur),
- la géothermie à très basse énergie (pompe à chaleur géothermique prélevant la chaleur contenue dans le sol)

B. Principe de la Géothermie

Il s'agit d'extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Il existe un flux géothermique naturel à la surface du globe, mais il est si faible qu'il ne peut être directement capté. En réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol (nappes d'eau) en faisant un ou plusieurs forages, plus ou moins profond(s) selon la température désirée ou le gradient thermique local.

Au centre de la terre règne une chaleur dont l'ordre de température varie entre 4000°C et 5000°C, et cette chaleur arrive lentement par le manteau jusqu'à l'écorce terrestre où, à certains endroits, elle peut être facilement récupérée.

En effet, c'est cette chaleur qui réchauffe les eaux d'infiltration et les expulse vers la surface sous forme de vapeur ou d'eau chaude créant ainsi les sources thermales (voir figure 1 ci - dessous).

Mais pour utiliser cette chaleur, on ne peut forer n'importe où : la température de la terre augmente en moyenne de 3°C par 100 m de profondeur, ce qui nous donne une différence de 30°C à 1000m sous la surface. Cette différence est insuffisante pour une exploitation géothermique. C'est pourquoi l'on doit chercher des zones de faiblesse de l'écorce terrestre: ce n'est que lorsque le magma se trouve près de la surface que les frais de forage permettent la rentabilité de la récupération de la chaleur terrestre. Une fois que le forage est effectué et les canalisations mise en place, l'eau est récupérée, sous forme de vapeur ou d'eau chaude, provenant soit des eaux d'infiltration soit des eaux injectées par un deuxième système de canalisations (ce procédé s'appelle "roche chaude sèche"). On peut utiliser une centrale de deux manières, selon l'état de l'eau récupérée : si on récupère de l'eau chaude, la centrale fonctionne comme un énorme chauffage central et si l'on récupère de la vapeur, la centrale devient une centrale électrique en utilisant cette vapeur pour faire tourner une turbine et ainsi grâce à un alternateur, produire de l'électricité de manière non polluante.

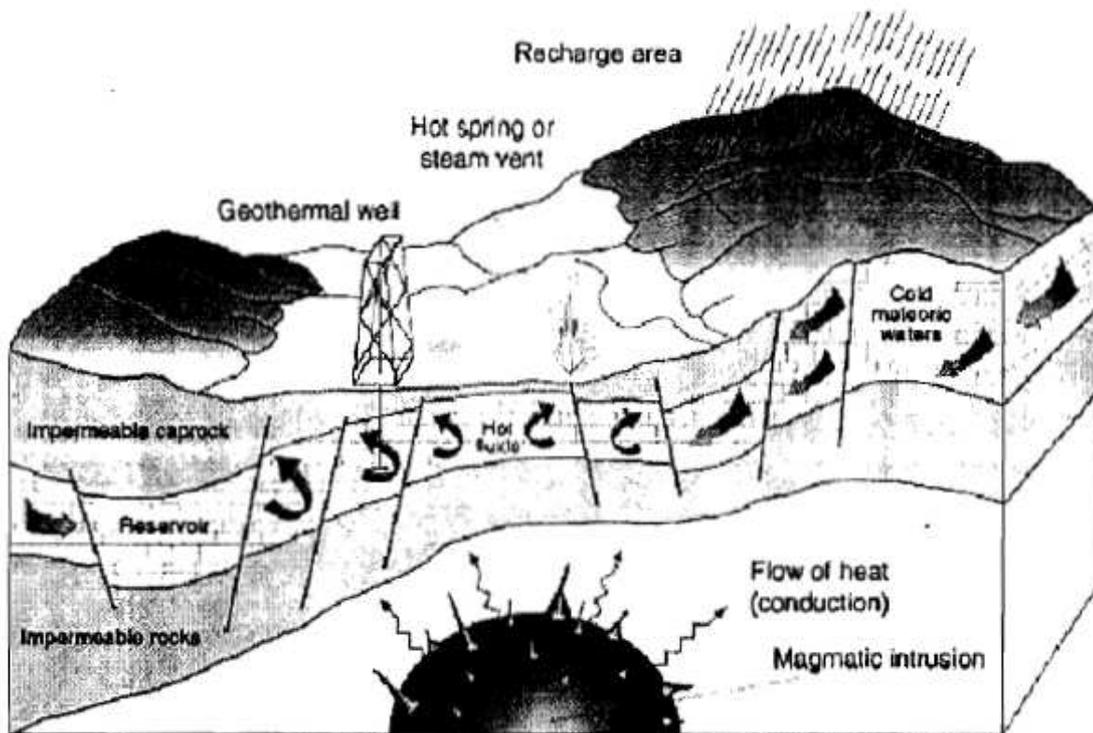


Figure 1: Réservoir Géothermique
(Par : volcanoes : crucible of change Princeton university USA, 1997)

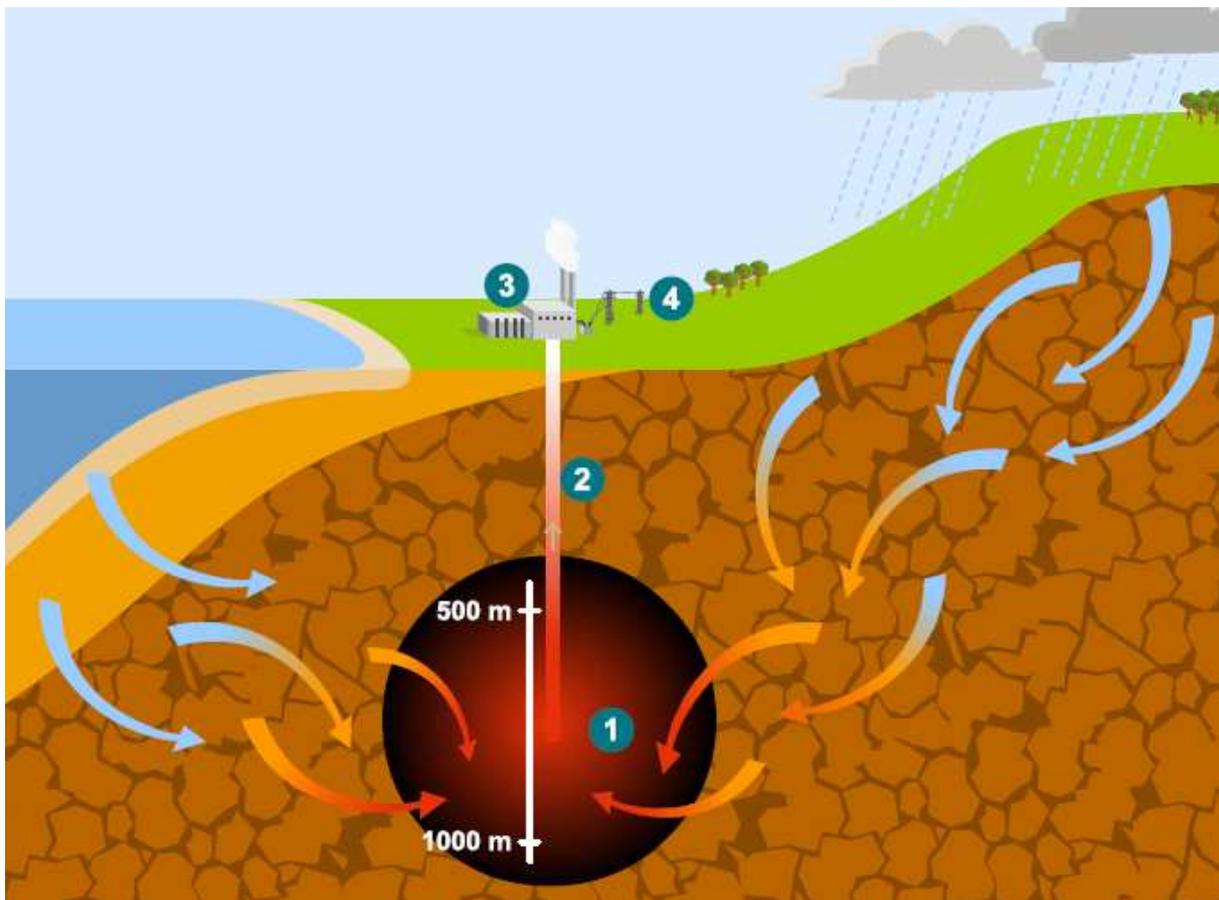


Figure 2: Réservoir Géothermique
(Par : EDF France)

La chaleur de la terre augmente avec la profondeur. Les mesures récentes de l'accroissement de la température avec la profondeur, appelée gradient géothermique, ont montré que cette valeur n'était pas uniforme à la surface du globe. En moyenne, la température croît d'environ 3°C pour 100 mètres, mais de nombreuses régions ont des gradients géothermiques anormaux: 10°C par 100 mètres en Alsace et même exceptionnellement 100°C par 100 mètres à Larderello (Italie), par contre 1°C par 100 mètres près de Padoue. Dans le nord-Est du Maroc, le gradient élevé de 35 à 50°C/ Km et jusqu'à plus de 65°C/Km en Aboran. Ce gradient dépend de la conductivité thermique des roches et du flux géothermique qui est de l'ordre de 0,05 W/m², soit environ 4 000 fois moins que la valeur moyenne du flux solaire (200 W/m²). En France il varie entre 0,05 W/m² et 0,13 W/m². Les fortes valeurs sont expliquées par la présence, à quelques milliers de mètres sous la surface de la terre, de roches chaudes correspondant, soit à des poches magmatiques liées à des phénomènes volcaniques actuels ou assez récents, soit à une remontée locale du manteau (partie du globe terrestre, intermédiaire entre le noyau et l'écorce.' épaisse de 3000 km) dont la profondeur habituelle varie de 70 à 2900 km. Sur la base de ce critère, on distingue trois sortes d'énergie géothermique fort différentes dans leur manifestation et leurs utilisations:

C. Types de Géothermie

On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation par rapport au gradient thermique des zones:

C.1. la Géothermie à Haute énergie ou Haute enthalpie

la géothermie à haute énergie elle exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisé pour produire de l'électricité. Elle est parfois subdivisée en deux sous-catégories :

- la géothermie moyenne énergie (aux températures comprises entre 100 et 150°C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire
- la géothermie haute énergie (aux températures supérieures à 150°C) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

La géothermie haute énergie, ou géothermie profonde, appelée plus rarement géothermie haute température, ou géothermie haute enthalpie, est une source d'énergie contenue dans des réservoirs localisés généralement à plus de 1500 mètres de profondeur et dont la température

est supérieure à 80°C. Grâce aux températures élevées, il est possible de produire de l'électricité et de faire de la cogénération (production conjointe d'électricité grâce à des turbines à vapeur et de chaleur avec la récupération des condensateurs de la vapeur).

Plus l'on fore profond dans la croûte terrestre, plus la température augmente. En moyenne, l'augmentation de température atteint 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région du globe considérée. Les zones où les températures sont beaucoup plus fortes, appelées anomalies de température, peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés pour de faibles profondeurs. Ces anomalies sont observées le plus souvent dans les régions volcaniques. En géothermie, elles sont désignées comme des gisements de haute enthalpie, et utilisées pour fournir de l'énergie, la température élevée du gisement (entre 80°C et 300°C) permettant la production d'électricité.

L'exploitation de la chaleur provenant de la géothermie haute énergie est ancienne. Les bains dans des sources chaudes étaient déjà pratiqués dans l'Antiquité dans de nombreuses régions du monde. C'est au début du XX^e siècle qu'une centrale géothermique de production d'électricité a été pour la première fois réalisée à Larderello (Italie). La géothermie haute température connaît actuellement un renouveau important, notamment parce que la protection contre la corrosion et les techniques de forage se sont fortement améliorées.

De nouvelles applications technologiques sont envisageables pour récupérer la chaleur de la Terre. La cogénération permet déjà de combiner la production de chaleur et d'électricité sur une même unité, et augmente ainsi le rendement de l'installation. Un projet européen de géothermie profonde à Soultz-sous-Forêts vise à produire de l'électricité grâce au potentiel énergétique des roches chaudes fissurées (en anglais *Hot Dry Rock*).

C.2. la Géothermie à Basse énergie ou Basse enthalpie

On parle de " géothermie basse énergie " lorsque le forage permet d'atteindre une température de l'eau entre 30°C et 100°C dans des gisements situés entre 1500 et 2500 m de profondeur. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, et certaines applications industrielles.

C.3. la Géothermie de Très Basse énergie

La géothermie très basse énergie est une géothermie au niveau des températures comprises entre 10°C et 30°C. Dans ce cas, la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique. Cette technologie est appliquée à :

- la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal,
- le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique

D. Méthodes et Études d'Extraction de la Chaleur du Sous-sol et Production de l'Électricité.

D.1. En Géothermie Basse Enthalpie ou Basse Énergie

En géothermie basse enthalpie l'exploitation se fait à l'aide de forages. Dans la majorité des cas, l'eau étant saumâtre, on prévoit un puit d'arrivée d'eau chaude et un puit de réinjection, ce qui permet aussi de maintenir la pression dans la nappe aquifère. La réinjection provoque de façon très lente le refroidissement du gisement il y a donc une baisse progressive de l'énergie récupérée après une période d'exploitation d'environ 30 ans. En raison de risques de corrosion, l'eau géothermale ne circule pas directement dans les appareils de chauffage chez l'utilisateur: on utilise un échangeur de chaleur avec un circuit secondaire d'eau douce. On peut aussi utiliser un système de pompes à chaleur afin de mieux valoriser l'investissement d'un doublet de forage (l'eau géothermale est ainsi réinjectée à très basse température).

D.2. En Géothermie Haute Enthalpie ou Haute Énergie

En géothermie haute enthalpie dans les rares cas où de la vapeur sèche peut être récupérée, l'exploitation est simple puisqu'on a affaire à une centrale thermique dans laquelle la vapeur est fabriquée gratuitement. Dans la majorité des cas, c'est un mélange eau- vapeur que l'on récupère. Il faut alors séparer les deux phases avant d'utiliser la vapeur.

D.3. Principaux Types de Ressources Géothermiques

La chaleur géothermique peut-être exploitée grâce à la présence dans le sous-sol de véritables gisements où se trouve stockée l'énergie calorifique. Selon la nature des terrains, on classera ces gisements en trois catégories:

- Réservoirs de vapeur,
- Réservoirs d'eau chaude
- Roches chaudes sèches.

Les deux premiers types de gisements sont constitués par des infiltrations d'eau circulant dans une couche géologique perméable et poreuse .recouverte de terrains imperméables.

E. Production d'électricité

Principe

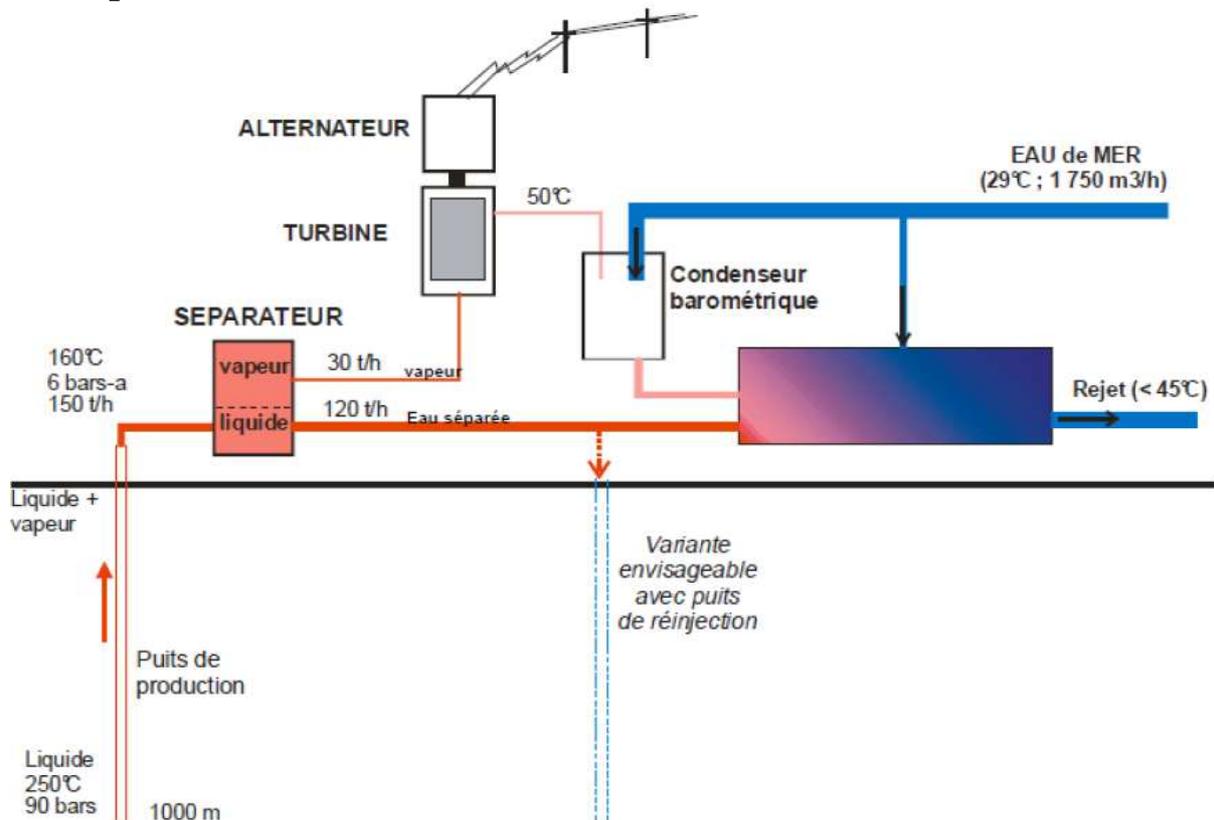


Figure 3 : Schéma de principe d'une centrale géothermique utilisant la vapeur géothermale pour la production d'électricité (Par le CFG Groupe BRGM)

E.1 Avec Réservoirs de Vapeur

Si l'eau de gisement est partiellement vaporisée, elle pourra être récupérée sous la forme de vapeur sèche directement utilisable pour faire tourner les turbines des centrales électriques. Puis cette vapeur est condensée à la sortie de la turbine avant d'être réinjectée dans le gisement (voir le Figure 4). Cependant, ces gisements de vapeur sont relativement rares: dans le monde entier, on ne connaît guère que Larderello (Italie), les Geysers (Californie), Matsubara (Japon).

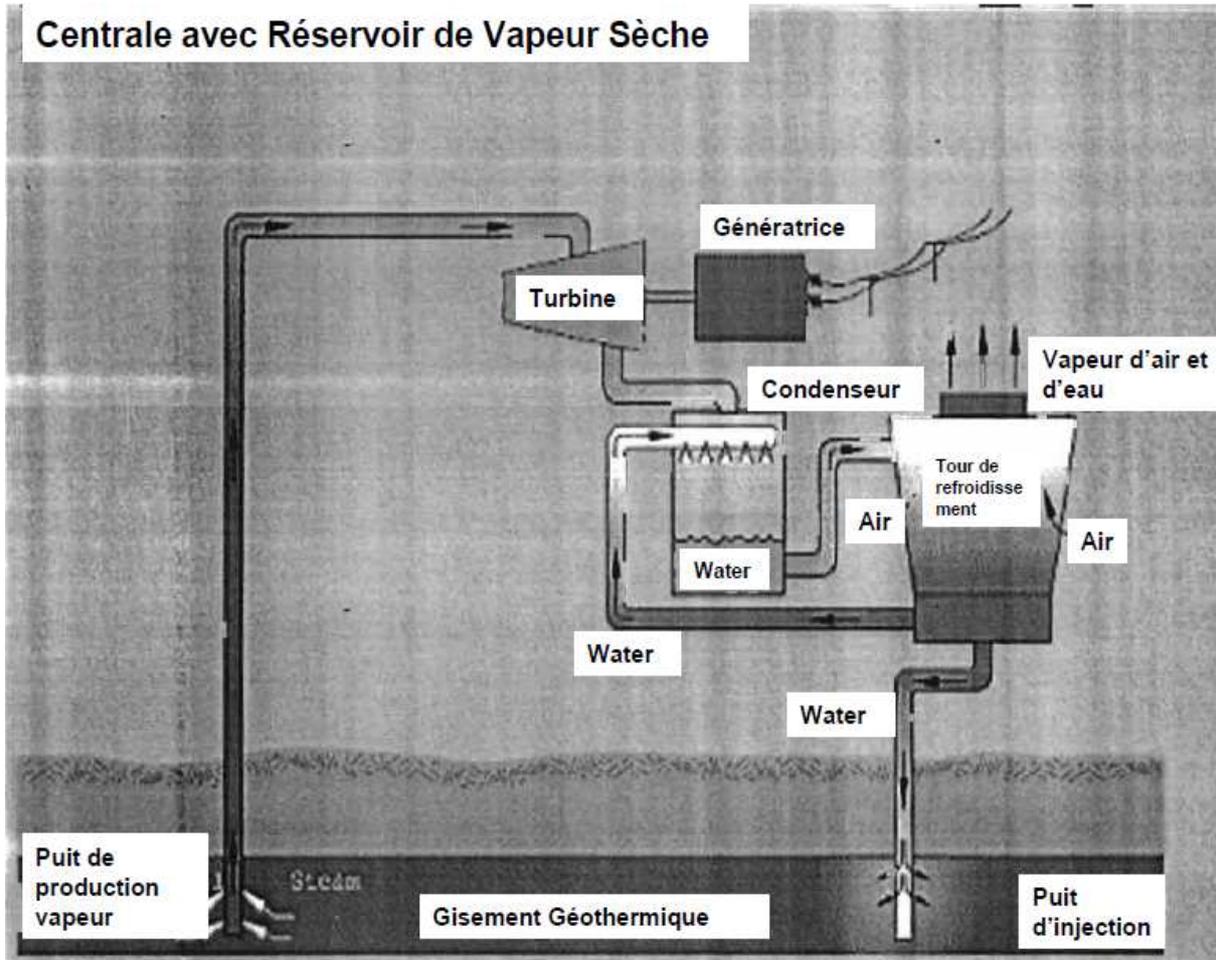


Figure 4 : Production d'électricité avec réservoir de vapeur
(By IDHO NATIONAL Engineering AND ENVIRONMENTAL LABORATORY, USA)

E.2 Avec Réservoirs d'eau chaude

Le plus souvent, l'eau des gisements géothermiques reste liquide et suivant sa température, elle peut-être utilisée soit pour le chauffage, soit pour la production d'électricité. Dans ce dernier cas, la baisse de pression que subit l'eau chaude pendant sa remontée vers la surface produit sa vaporisation de sorte qu'en tête de puits on dispose d'un mélange phasique eau-vapeur. Cette vapeur sera séparée de l'eau pour faire tourner une turbine qui est accouplée à un alternateur pour produire de l'électricité. L'eau qui est séparée de la vapeur peut être utilisée pour le chauffage. La vapeur est condensée à la sortie de la turbine puis réinjectée dans le gisement.

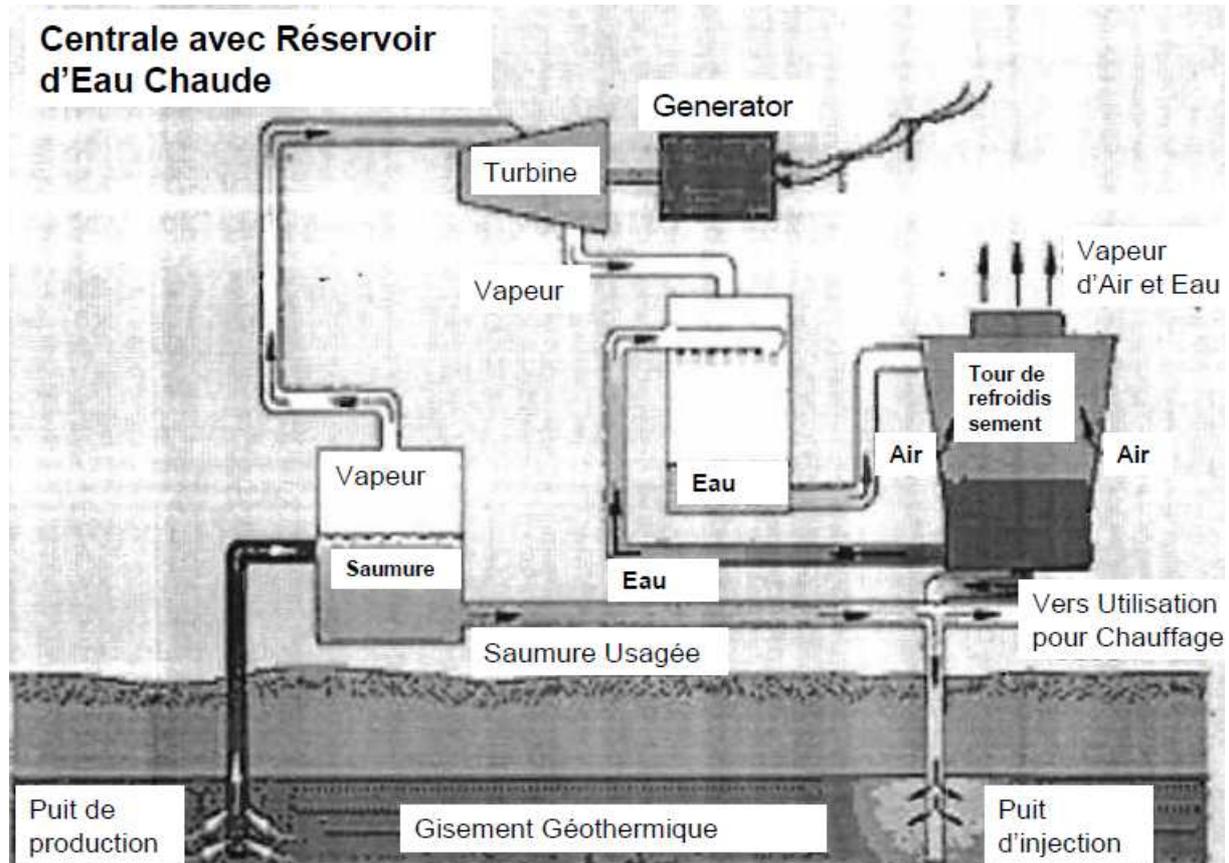


Figure 5 : Production d'électricité avec réservoir d'eau chaude
(By IDHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY, USA)

E.3 Avec les Gisements des Roches Chaudes Sèches

Les gisements de roches chaudes sèches constituent une réserve de chaleur très importante. Si l'existence du gisement est évidente il existe en tous points du globe des roches sèches, comme le granite par exemple, qui sont à des températures de l'ordre de 2500 à 3000°C à 600 mètres de profondeur son accessibilité reste à démontrer : en effet, pour utiliser cette chaleur, il faut un fluide caloporteur (l'eau par exemple), qui circule dans un échangeur créé artificiellement par fracturation fine de la roche. Un deuxième fluide dont la température de vaporisation est inférieure à celle du fluide circulant dans les roches (l'isobutane par exemple) est utilisé dans un deuxième circuit pour faire tourner une turbine.

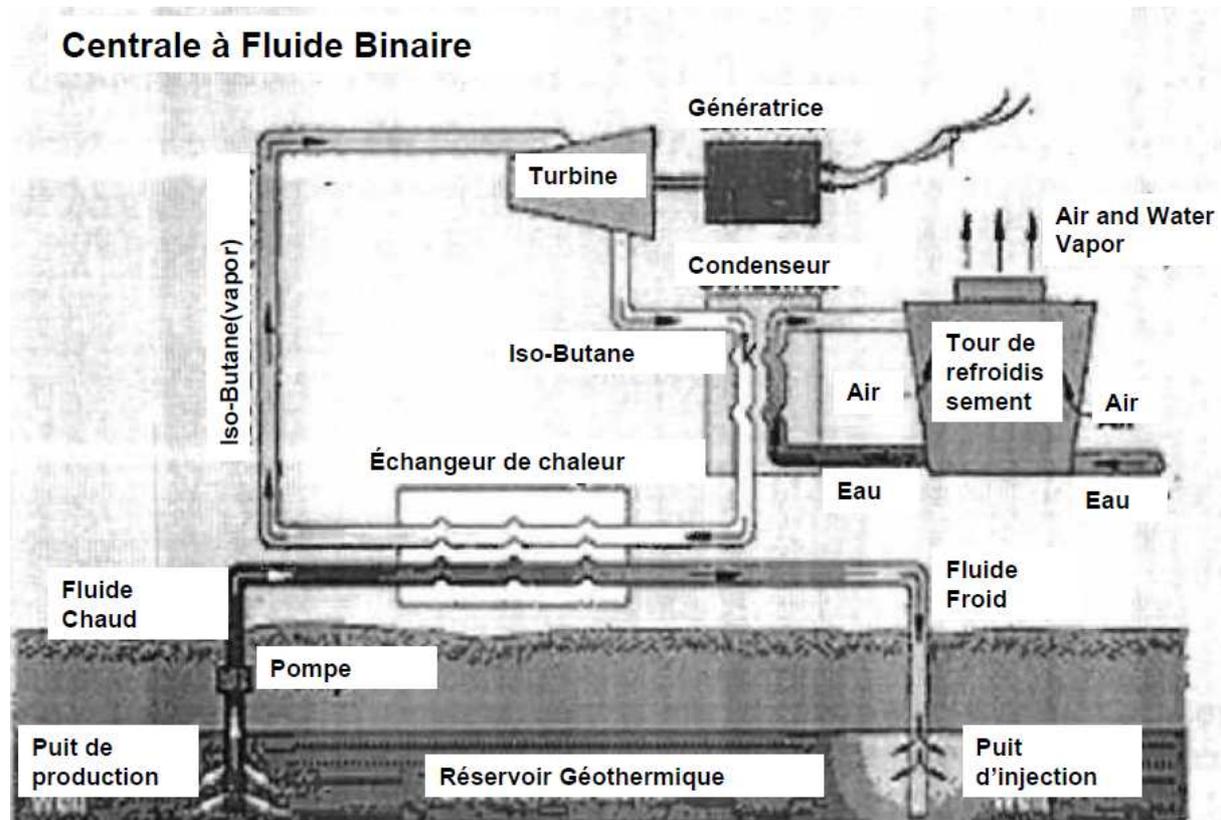


Figure 6 : production d'électricité avec les gisements de roches chaudes sèches
(By IDHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY, USA)

3.1.2. ETUDE EXPERIMENTALE DU PROJET

LES SOURCES THERMALES DU CAMEROUN

La production d'énergie d'origine géothermique repose sur l'utilisation de vapeur d'eau naturelle généralement issue de la vaporisation d'eau surchauffée présente dans le sous-sol sous pression élevée. Cette forme d'énergie est la moins onéreuse de toutes et l'intérêt qu'elle suscite ne cesse de grandir depuis quelques années. La prospection géothermique a pour but la découverte de gisements d'eau chaude lesquels supposent l'existence d'un réservoir, d'une source de chaleur et d'eau présentant des propriétés thermodynamiques favorables. Les techniques actuelles de prospection font donc appel d'une part à des méthodes géophysiques pour déceler des réservoirs, à des méthodes géothermométriques pour détecter des anomalies de température et à des méthodes géochimiques pour déceler les propriétés des fluides profonds. L'intérêt des sources thermominérales dans cette prospection réside dans le fait qu'elles peuvent être parfois les témoins d'un réservoir géothermique dont elles seraient des fuites. Leur étude apporte alors de précieux renseignements. Il était donc normal d'aborder l'examen des sources thermominérales du Cameroun dans cette optique afin de mettre en évidence d'éventuels indices favorables à l'existence d'une source d'énergie géothermique. Nous examinerons successivement les critères thermiques, les critères structuraux et les critères géochimiques donnés par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-

3.1 Critères thermiques.

Les premiers indices favorables sont les sources thermales. Les zones intéressantes à ce point de vue sont :

- la région du volcanisme quaternaire de Ngaoundéré avec deux sources à 40°C (Laopanga et Katil Foulbé),
- la région du volcanisme quaternaire du pays Bamoun avec une source à 29°C (Fossette),
- la région du volcanisme quaternaire actuel du mont Cameroun avec les sources de Lobé à 49°C,
- la région des sources de Woulné à 74°C.

On ne peut que remarquer la faible ampleur de ces manifestations superficielles. En soi ce n'est pas un inconvénient et en supposant l'existence d'un réservoir cela indiquerait qu'il est bien fermé (comme dans la région de Monte Amiata en Toscane). Toutefois les manifestations de surface, quand elles existent, sont la plupart du temps plus importantes.

3.2 Critères structuraux.

Il s'agit de savoir quelles sont les possibilités d'existence d'un réservoir offertes par le sous-sol des régions définies précédemment. Si l'on excepte les environs du mont Cameroun le sous-sol est constitué par le socle parfois recouvert de formations volcaniques. Dans ce contexte il est assez peu probable de rencontrer un réservoir important sauf dans le cas d'une intense fracturation des roches et d'une couverture formée par des niveaux altérés plus ou moins imperméables, cette altération pouvant être de type hydrothermal, provoquée par les fluides chauds (serf-seaZing de Facca et Tonani, 1967). Mais aucune observation dans ce sens n'a été faite au Cameroun. Dans les environs du mont Cameroun se trouvent des terrains sédimentaires, en particulier la source de Lobé est située dans une série d'intercalations volcano-sédimentaires dont la structure a pu être étudiée par les méthodes géophysiques au cours de la prospection pétrolière par la Gulf Company of Cameroon. Des structures anticlinales auraient été décelées, qui pourraient être compatibles avec l'existence d'un réservoir géothermique.

3.3 Critères géochimiques.

Ces critères concernent directement les eaux thermominérales. Si une eau thermominérale provient d'un réservoir géothermique, certaines de ses caractéristiques géochimiques pourront renseigner sur les conditions physicochimiques régnant dans le réservoir en particulier la température et l'état physique des fluides géothermiques. Une étude détaillée des méthodes géochimiques utilisées actuellement dans la prospection géothermique est donnée par Tonani

(1971) mais seuls vont être examinés les renseignements que peuvent fournir les données analytiques disponibles. Ces données permettent seulement d'avoir des indications sur la température des fluides en profondeur. Il s'agit essentiellement de la teneur en silice. La silice ne se met en équilibre que lentement et sa teneur et l'émergence témoigne de la température de l'eau au moment où l'équilibre est atteint. Donc s'il y a sur-saturation en silice pour la température de l'eau et l'émergence on déduira la température du réservoir à partir des courbes de solubilité de la silice en fonction de la température. Ceci est un critère vraiment défavorable quant à l'existence d'une source d'énergie géothermique. Si nous considérons comme thermale toute eau dont la température à l'émergence est supérieure à la température moyenne annuelle locale. Théoriquement cette température varie d'un point à un autre. Cependant les données climatologiques du Cameroun (Atlas du Cameroun - ORSTOM Yaoundé) montrent qu'on peut adopter la température de 23°C comme température critique pour l'ensemble des régions prospectées. Elle est très valable dans l'Adamaoua et un peu trop élevée pour l'Ouest-Cameroun. L'histogramme de la figure 7 montre la distribution des températures de l'ensemble des sources : 50 ont une température inférieure à 23°C et 65 devraient donc être considérées comme thermales. En fait les remarques du paragraphe précédent incitent à être prudent avant de déclarer thermale une eau dont la température est trop voisine de 23°C et finalement il y a souvent doute quand la température est comprise entre 23 et 27°C.

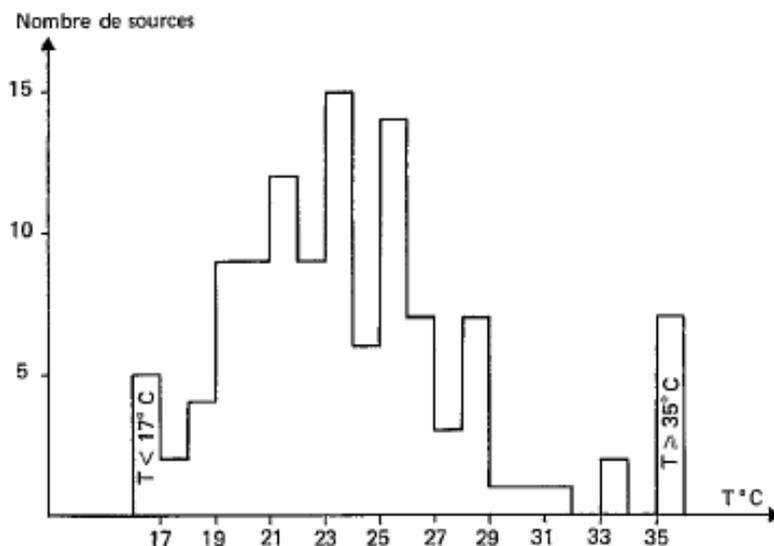


Figure 7 : Histogramme des températures de 114 sources thermominérales du Cameroun, par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM) dans GÉOLOGIE ET GEOCHIMIE DES SOURCES THERMOMINÉRALES – DU CAMEROUN par Alain le MARECHAL.

Il existe 19 sources certainement thermales

N°	Noms	Températures °C	N°	Noms	Températures
94	Woulndé	74	87	SepSep Djarandi	30
115	Lobé	49			
4	Bajao	40	109	Fossette	29
42	Katil Foulbé	40	104	Ayukaba	28.6
52	Laopanga	40	16	Déodéo	28.5
67	Mayo Lidi	37	121	Ndibisi	28.5
124	Nsoug	35	102	Ayio	28
123	Nilli	33.3	128	Ebinsi	28
100	Mberduga	33	130	Akan	27.6
122	Ngol	31	99	Mamdugu	26.8

Tableau I – Tableau des 19 sources certainement thermales par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM) dans GÉOLOGIE ET GEOCHIMIE DES SOURCES THERMOMINÉRALES – DU CAMEROUN par Alain le MARECHAL.

D'autres le sont probablement mais peu :

125	Ntem	27	106	Baré	26.5
13	Burlel 1	27.3	119	Mélong	26.5
20	Donkéré	26.4	43	Koulania	26
107	Ebuku	26.4			

Tableau II – Tableau des sources probablement thermales par l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM) dans GÉOLOGIE ET GEOCHIMIE DES SOURCES THERMOMINÉRALES – DU CAMEROUN par Alain le MARECHAL.

La localisation de ces sources thermales est caractéristique

- **Dans les régions de volcanisme récent** : Laopanga et Katil près de Ngaoundéré; Fossette près de Foumban ; Nilli près du mont Oku ; Nsoug, Ngol, Ndibisi, Ahio, Ebuku, Baré et Mélong autour et dans le massif de Manengouba ; Lobé près du mont Cameroun. Cependant butes les sources de ces régions ne sont pas thermales.

- **Dans les vallées et sur les grandes failles d'effondrement** : Woulndé

(vallée du mayo Baléo) ; Mayo Lidi, Mberduga, Déodéo, Mamdugu (vallée du mayoMo, au peid du tchabal Mbabo) ; Burlel 1 , Donkéré (vallée du mayo Déo, plus au nord) ; Ntem (ouest de la plaine Tikar) ; Bajao, Sep Sep Djarandi, Koulania (dans la vallée de la Mbéré) ; Ayukaba, Ebinsi, *k a n* (bord sud du bassin de Mamfé).

LES TEMPERATURES POSSIBLES PAR LA GEOTHERMIE AU CAMEROUN

Ces températures sont déterminées par le gradient de géothermique du Cameroun et la profondeur du forage. Nous nous sommes rapproché du département forage de la société Addax Petroleum Cameroun et avons obtenu les informations suivantes : le gradient thermique au Cameroun est de 1,8°F/100 ft, la profondeur moyenne d'un forage droit est de 1000 m .Pour trouver la valeur de la température géothermique, on ajoute au gradient thermique la valeur de la source thermique trouvée et la valeur de la profondeur du forage. (*La source thermique étant un gisement d'eau chaude ou une source de chaleur en surface qui*

suppose l'existence d'un réservoir géothermique). La figure 8 est une illustration de la structure du sol avec le gradient thermique du Cameroun et une profondeur de forage de 1000 m

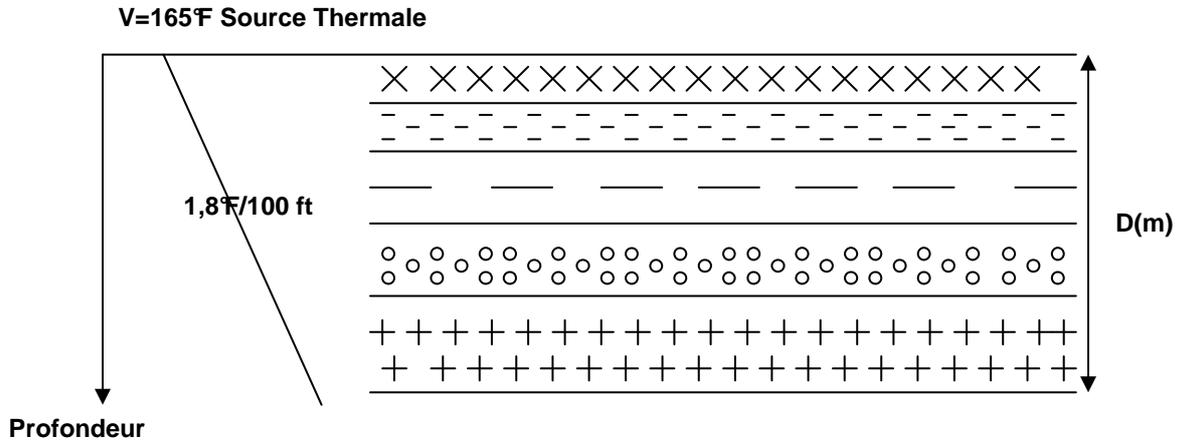


Figure 8 : Structure du sol (Source Département forage Addax Petroleum Cameroun)

Pour calculer la température finale par rapport au gradient géothermique, la profondeur du forage et la source thermique trouvée, on a la formule suivante :

$$T^{\circ}\text{F} = \frac{V + (Dm) \times 1,8}{0,3048 \times 100}$$

Avec :

V = Température de la source thermique trouvée ($74^{\circ}\text{C} = 165^{\circ}\text{F}$)

Dm = Profondeur Moyenne du forage (1000 m)

$1,8^{\circ}\text{F}/100 \text{ ft}$ = Le gradient thermique au Cameroun

$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$

Pour convertir les $^{\circ}\text{F}$ en $^{\circ}\text{C}$ on a la formule ci-dessous

$$T^{\circ}\text{C} = (T^{\circ}\text{F} - 32) \frac{5}{9}$$

Application Numérique

$$T^{\circ}\text{F} = \frac{165 + (1000) \times 1,8}{0,3048 \times 100} = 64,46 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Conversion en $^{\circ}\text{C}$

$$T^{\circ}\text{C} = (64,46 - 32) \frac{5}{9} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Avec une source thermique de 74°C et un forage de profondeur moyenne de 1000 m on a 18°C tous les 30 m de profondeur on atteint donc des températures de 600°C dans cette localité du Cameroun (Woulndé).

A. CHOIX DU SITE

A.1 Motivations du choix du site par rapport aux puissances à produire et des caractéristiques du site

Au Cameroun, on a vu que les eaux thermominérales ont des températures peu élevées, à l'exception de la source de Woulnié (74°C), et que, d'après les observations de surface, on pouvait distinguer des sources en relation avec les phénomènes volcaniques et d'autres en relation avec les phénomènes tectoniques. Si la chaleur est uniquement due à l'influence du gradient géothermique l'eau de la source la plus chaude qui est apparemment indépendante de phénomènes volcaniques récents, aurait atteint une profondeur d'environ 1700 m (gradient de 3°C/100 m et température moyenne annuelle de 23°C) ce qui ne semble pas excessif étant donné les rejets de l'ordre de 500 m constatés dans les mouvements tectoniques.

La plupart des eaux thermominérales du Cameroun, froides et chaudes, circulent à faible profondeur. Mais ce stade des connaissances régionales, on ne peut guère sortir du domaine des hypothèses et le gradient géothermique normal peut suffire à expliquer la thermalité des eaux minérales du Cameroun mais des influences magmatiques ne sont pas à exclure.

Finalement l'ensemble des critères examinés semblent suffisamment concordants pour dire que les sources thermales du Cameroun ne constituent pas des indices de sources d'énergie géothermique, en émettant toutefois quelques réserves pour la bordure occidentale du Mont Cameroun (Possibilités d'éruptions Volcaniques) et de l'Adamaoua, et particulièrement le site de Woulnié dans l'Adamaoua qui serait donc la zone propice pour la construction de la Centrale car dans cette zone la température de la source thermale est de 74°C et est la plus grande température sur la ligne volcanique du Cameroun (Voir Figure 9), et il n'y a pas de risques d'éruptions volcaniques. Le gradient thermique du Cameroun étant de 1,8°F/100ft nous pourrions atteindre des températures de 600°C avec un forage de profondeur moyenne de 1000 m comme calculé ci-dessus.

A.2 Présentation géographique

La zone de Woulndé est située dans la vallée du mayo Baléo dans l'arrondissement de Tignère sur une longitude Est 12° 28' 30'' et sur une latitude Nord 7° 26' 10'' dans les plateaux de l'Adamaoua, voir la figure 8 représentant la ligne volcanique du Cameroun.

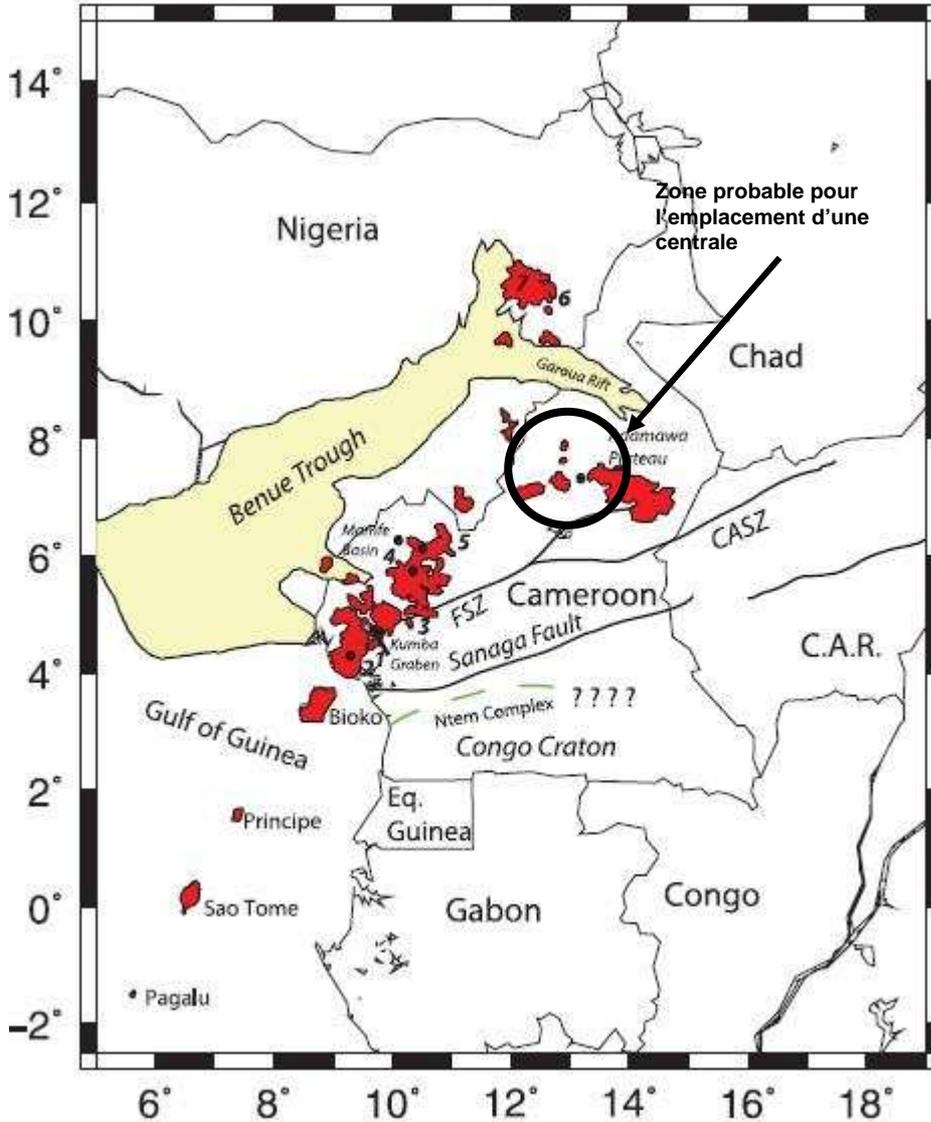


Figure 9 : Représentation de la ligne volcanique du Cameroun (En rouge).Par Tokam, A-P., C.T Tabod,A.Nyblade,J.Julia,D.A,Wiens, and M.E. Pasyanos(2010),Structure of the crust beneath Cameroon, West Africa, from the joint inversion of Rayleigh wave group velocities and receiver functions,Geophys. J.Int...183. 1061 – 1076

3.1.3. SIMULATION AVEC DES PUISSANCES DES RENDEMENTS DES NIVEAUX DE TEMPERATURES TURBINES A VAPEUR

Les cycles des turbines a vapeur utilisent un fluide compressible, qui change d'état au cours du cycle. Le changement d'état de la vapeur génère des variations importantes de l'enthalpie qui permet de transformer de grandes quantités de chaleur en travail. Dans une turbine la vapeur est détendue de façon continue dans un système de roues a aubes. Cette propriété permet de

fonctionner avec des débits importants et de pousser la détente sans l'effet de troncature, comme dans les machines alternatives.

C'est un cycle de Carnot (rectangle dans le diagramme (T-S)), appliqué aux vapeurs condensables :

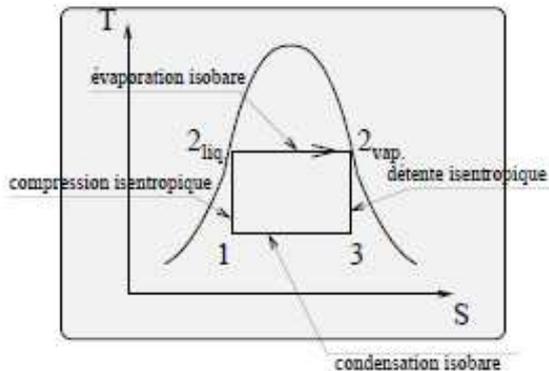


Figure 10 : Cycle de rankine en vapeur humide.

Les éléments constitutifs d'une machine à vapeur sont :

- une chaudière - un condenseur
- une turbine - une pompe de circulation

Remarque :

Pratiquement, ce cycle est difficilement réalisable car :

- il est difficile de comprimer de façon isentropique un mélange à deux phases ($1 \rightarrow 2_{liq}$)
- il est difficile de contrôler la condensation ($3 \rightarrow 1$) pour parvenir précisément au point 1 (titre de vapeur $0 < x_1 < 1$)
- les ailettes de la turbine risquent d'être rapidement érodées par les gouttelettes liquides qui apparaissent lors de la détente.

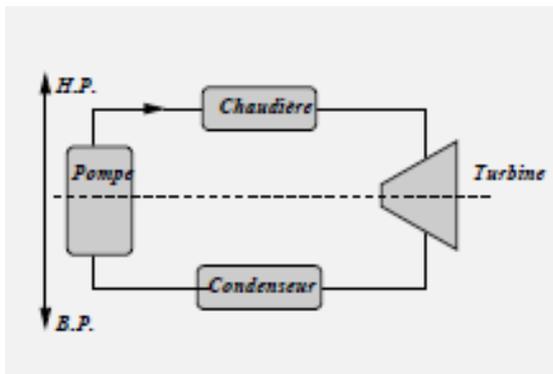


Figure 11 : Cycle d'une turbine à vapeur.

De plus le cycle réel doit vérifier les propriétés suivantes :

1. La surface du cycle dans le diagramme (T - S) doit être maximale. Cette surface représente le bilan de la chaleur échangée, soit le travail total : $W_{det} + W_{comp}$,
2. Le travail de compression doit être minimal,

Dans le cycle réel, la vapeur humide issue de la turbine est totalement condensée (déplacement du point 1 → 1_{liq}). Le liquide subit une compression isentropique jusqu'à la pression de vaporisation (point 2), puis est vaporisé à pression constante jusqu'au point 2_{vap}.

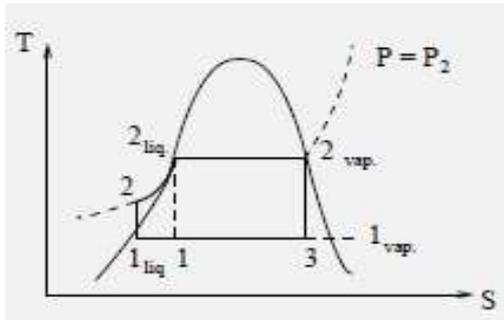


Figure 12 : Cycle de Rankine.

Cycle de Rankine : bilan énergétique

- chaudière $q_{\text{chaud}} = h_{2\text{vap}} - h_2$
- condenseur $q_{\text{cond}} = h_{1\text{liq}} - h_3$
- pompe $w_{\text{pomp}} = h_2 - h_{1\text{liq}}$
- turbine $w_{\text{tur}} = h_3 - h_{2\text{vap}}$

D'après le premier principe :

$$q_{\text{chaud}} + q_{\text{cond}} + w_{\text{pomp}} + w_{\text{tur}} = 0$$

Le rendement est égal à :

$$\eta = - \frac{W_{\text{recup}}}{q_{\text{chaud}}} = - \frac{W_{\text{tur}} + W_{\text{pomp}}}{q_{\text{chaud}}} = \frac{q_{\text{chaud}} + q_{\text{cond}}}{q_{\text{chaud}}} = 1 + \frac{q_{\text{cond}}}{q_{\text{chaud}}}$$

$$\eta = 1 - \frac{h_3 - h_{1\text{liq}}}{h_{2\text{vap}} - h_2}$$

Pour calculer le rendement (réel), calculons les valeurs de h3 et de h2

Calcul de h3

$$h_3 = m_{\text{liq}} h_{3\text{liq}} + m_{\text{vap}} h_{3\text{vap}}$$

$$h_{3\text{liq}} = h_{1\text{liq}}$$

$$h_{3\text{vap}} = h_{1\text{vap}} \quad \text{puisque } h \text{ ne dépend que de } T \text{ et que } T_3 = T_1$$

On a donc pour la masse unité :

$$h_3 = (1 - x_3) h_{1\text{liq}} + x_3 h_{1\text{vap}}$$

Calcul de h2

Calculons la variation d'enthalpie : $h_2 - h_{1\text{liq}}$

A partir de $H = U + PV$ on a :

$$dH = dU + PdV + VdP = TdS + VdP$$

$$\text{Soit : } h_2 - h_{1\text{liq}} = V_{1\text{liq}} (P_2 - P_1)$$

$$\eta = 1 - \frac{(1 - x_3) h_{1liq} + x_3 h_{1vap} - h_{1liq}}{h_{2vap} - h_{1liq} - V_{1liq} (P_2 - P_1)}$$

$$\eta = 1 - \frac{x_3 L_1}{h_{2vap} - h_{1liq} - V_{1liq} (P_2 - P_1)}$$

(Rendement réel du cycle)

Le cycle de Rankine présente 2 inconvénients

1. le rendement du cycle de Rankine est faible.
2. la détente est humide ce qui provoque une forte usure des turbines.

Le Cycle de Carnot est égal à

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

(Rendement parfait)

Pour avoir le rendement pour l'appréciation des performances du système par rapport au rendement parfait on divise le rendement du cycle de Rankine sur le rendement de Carnot

B.1 Calculs des puissances et rendements

Schéma principe

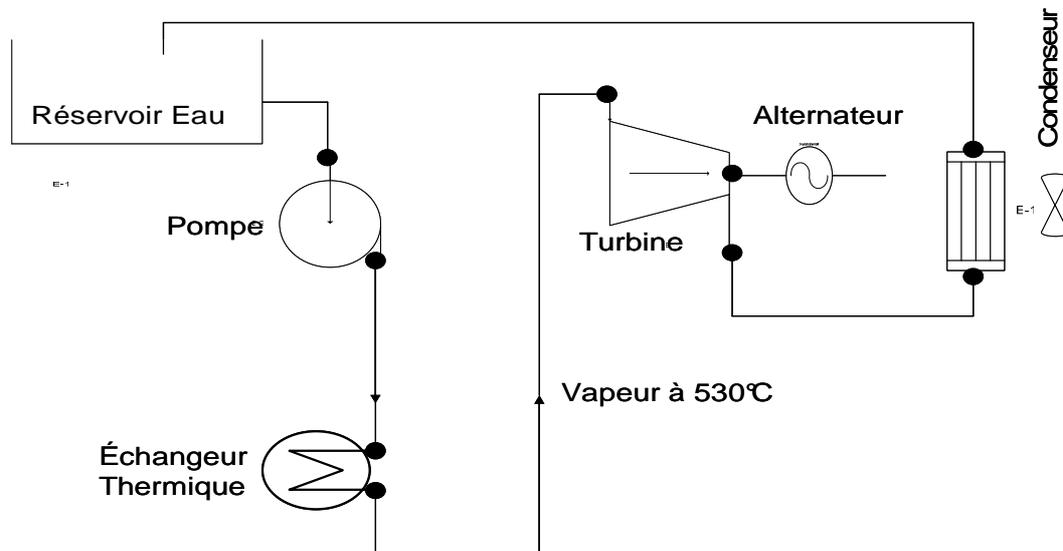


Figure 13 : Schéma de principe du système.

On les données suivantes :

$T^\circ = 530^\circ\text{C}$ Température de sortie de vapeur (entrée turbine)

\dot{Q} : Puissance Reçue par l'eau pour s'évaporer

\dot{W} : Puissance mécanique sur l'arbre de la turbine

C_e : Chaleur massique de l'eau (4,18)

C_v : Chaleur massique de la vapeur (2676)

q_e : Débit d'eau

η_T : Rendement de la turbine 40%

η_{eff} :Rendement Effectif 80%

P_e :Puissance Electrique 5 MW

On a la puissance électrique voulue qui est $P_e = 5.10^3 \text{ KW}$ et la température de la vapeur d'eau à l'entrée de la turbine.Avec la formule ci-dessous :

$$P_e = \eta_{\text{eff}} \cdot \eta_T \cdot q_e \left[C_e(100) + C_v(530 - 100) \right]$$

Trouvons le débit d'eau à envoyer dans le forage d'injection q_e

$$q_e = \frac{P_e}{\eta_{\text{eff}} \cdot \eta_T \cdot \left[C_e(100) + C_v(530 - 100) \right]}$$

Trouvons la puissance reçue par l'eau pour s'évaporer \dot{Q}

$$\dot{Q} = q_e C_e(100) + q_e C_v(530 - 100)$$

Trouvons la puissance mécanique sur l'arbre de la turbine \dot{W}

$$\eta_T = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}} \rightarrow \dot{W} = \eta_T \cdot \dot{Q}$$

B.2 Autres Solution de Réalisation de la Centrale si on utilise juste la température de 74°C (Woulndé).

Nous avons calculé que le rendement de Carnot d'une telle centrale et avons trouvé qu'il ne ferait que 13 % avec une température de source froide de 30°C. La valorisation des systèmes possédant un faible écart de température entre la source chaude et la source froide est la technologie ORC.

La technologie des Cycles Organiques de Rankine (ORC) est très proche de la technologie utilisée dans les cycles vapeur (Cycle de Rankine): un fluide de travail est chauffé puis vaporisé grâce à une source de chaleur. La vapeur produite est ensuite détendue dans une turbine pour produire de l'énergie mécanique puis de l'électricité grâce à un alternateur. Le fluide est ensuite condensé pour fermer le cycle thermodynamique. La différence entre un cycle classique et un cycle organique tient au choix du fluide de travail : dans les ORC, l'eau est remplacée par un fluide organique. En remplaçant l'eau par un autre fluide choisi en fonction de la température de la source chaude on obtient des modules performants et compacts adaptés à de nombreuses applications (petite cogénération biomasse, solaire

thermodynamique, récupération de chaleur, géothermie basse température) parmi tous les fluides, ceux issus de la chimie du carbone ont la préférence d'où l'appellation de Cycle Organique de Rankine appelé aussi ORC (Organic Rankine Cycle en anglais).

Le cycle de Rankine (Cycle Organique de Rankine ou ORC) utilise un fluide organique (isobutane, iso pentane) comme fluide de fonctionnement, La technologie du cycle binaire a été mise au point au début des années 80. Le principe de production binaire d'électricité géothermique est d'utiliser les eaux géothermales dont la température se situe entre 90 et 150°C pour chauffer un fluide caloporteur (isobutane, isopentane, ammoniac). Au contact de la chaleur d'origine géothermique, ce fluide intermédiaire va se vaporiser et passer à travers une turbine pour la fabrication d'électricité. Les centrales géothermiques à cycle binaire sont limitées à de petites puissances (de l'ordre de quelques centaines de kW à quelques MW). Elles sont particulièrement adaptées à l'alimentation en électricité de zones isolées éloignées des réseaux de distribution d'énergie électrique telles que les zones insulaires ou les zones de montagne.

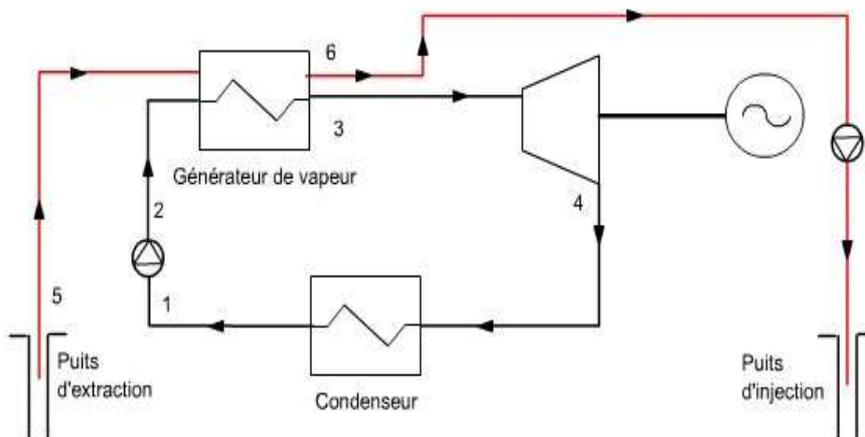


Figure 14 : Schéma d'une installation ORC Par la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG) d'Electrosuisse

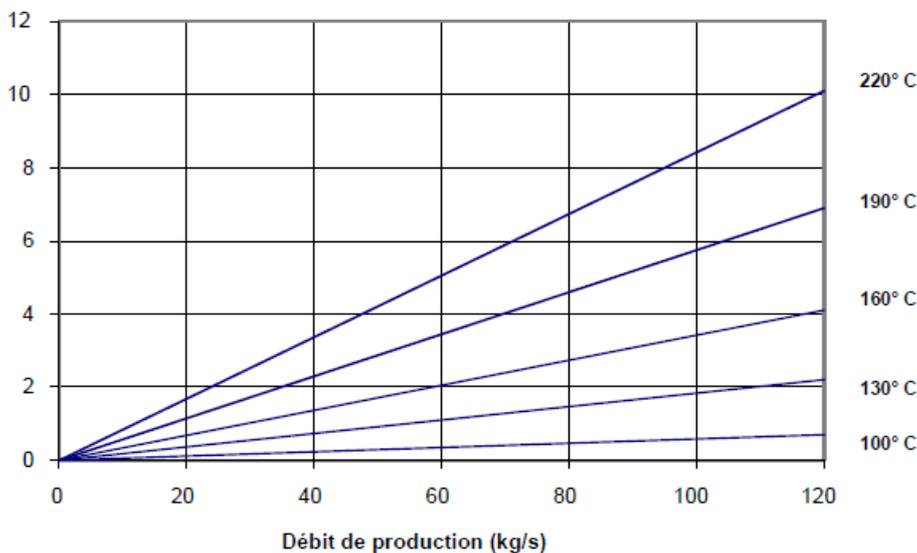


Figure 15 : Puissance électrique nette fournie par une centrale à fluide binaire, en fonction d'une température du réservoir et du débit de production. Par la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG) d'Electrosuisse

B.3 Calculs des puissances et rendements théoriques de la Centrale(Figure 14)

Bilan Thermique du Générateur de Vapeur

Avec :

m_1 = Chaleur massique 1

m_2 = Chaleur massique 2

h_5 = Enthalpie 5

h_6 = Enthalpie 6

$$\dot{m}_1 h_5 - \dot{m}_1 h_6 = \dot{m}_2 h_3 - \dot{m}_2 h_2 \quad \dot{m}_1 (h_5 - h_6) = \dot{m}_2 (h_3 - h_2)$$

Bilan Thermique de la turbine

Avec :

m_2 = Chaleur massique 2

W_T = Puissance Théorique de la Turbine

h_3 = Enthalpie 3

h_4 = Enthalpie 4

$$\dot{m}_2 h_3 - \dot{m}_2 h_4 = W_T \quad W_T = \dot{m}_2 (h_3 - h_4)$$

Bilan Thermique du Condenseur

Avec :

m_2 = Chaleur massique 2

\emptyset_K = Puissance Evacuée au Condenseur

h_4 = Enthalpie 4

h_1 = Enthalpie 1

$$\emptyset_K = \dot{m}_2 (h_4 - h_1)$$

Rendement du Système

Avec :

Q_d = Puissance disponible dans les vapeurs traversant le générateur (échangeur)

W_T = Puissance Théorique de la Turbine

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{\dot{W}_T}{\dot{Q}_d} \quad \dot{Q}_d = \dot{m}_1 (h_5 - h_6) \quad \dot{W}_T = \dot{m}_2 (h_3 - h_4)$$

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{\dot{m}_2 (h_3 - h_4)}{\dot{m}_1 (h_5 - h_6)}$$

Bilan Globale

Avec :

W_T = Puissance Théorique de la Turbine

Q_d = Puissance disponible dans les vapeurs traversant le générateur (échangeur)

\emptyset_K = Puissance Evacuée au Condenseur

W_{pompe} = Puissance de la pompe

$$\dot{Q}_{\text{Géné}} + \dot{W}_{\text{Pompe}} = \dot{W}_T + \emptyset_K \quad \dot{m}_1 (h_5 - h_6) + \dot{m}_2 (h_2 - h_1) = \dot{m}_2 (h_3 - h_4) + \dot{m}_2 (h_4 - h_1)$$

Effacité du Système

$$\eta = \frac{W_T}{\dot{Q}_{\text{géné}} + \dot{W}_{\text{pompe}}}$$

Donc

$$\eta = \frac{W_T}{\dot{Q}_{\text{géné}}}$$

Evolution de la vapeur provenant du puit.

Voir le diagramme de Mollier en annexe IX

Enthalpies du fluide secondaire (R22).

Voir le diagramme enthalpique du R22 en annexe X

Application Numérique

Après interprétation des abaques de Mollier et Enthalpique du R22, en annexes IX et X, nous avons eu les valeurs ci-dessous.

$$P_3 = 30 \text{ bar}, h_3 = 482 \text{ Kj/Kg}, T_3 = 130^\circ\text{C}$$

$$P_4 = 7 \text{ bar}, h_4 = 439 \text{ Kj/Kg}, T_4 = 50^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 7 \text{ bar}, h_1 = 213 \text{ Kj/Kg}, T_1 = 10^\circ\text{C}$$

$$P_2 = 30 \text{ bar}, h_2 = 293 \text{ Kj/Kg}, T_2 = 70^\circ\text{C}$$

$$P_5 = 100 \text{ bar}, h_5 = 3330 \text{ Kj/Kg}, T_5 = 500^\circ\text{C}$$

$$P_6 = P_5, T_6 = 350^\circ\text{C}, h_6 = 2900 \text{ KJ/Kg}$$

On a la puissance voulue de la Centrale 5MW

Trouvons m_2

$$W_T = \dot{m}_2(h_3 - h_4) \rightarrow \dot{m}_2 = \frac{\dot{W}_T}{h_3 - h_4} \quad \left| \quad \dot{m}_2 = \frac{5.10^6}{482 - 439} \right.$$

$$m_2 = 116279,06 \text{ Kg/s}$$

Trouvons m_1

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m}_2(h_3 - h_2)}{h_5 - h_6} = \frac{116279,06 (482 - 293)}{3330 - 2900}$$

$$\dot{m}_1 = 51108,7 \text{ Kg/s}$$

Puissance disponible

$$\dot{Q}_1 = m_1(h_5 - h_6) = 51108,7(3330 - 2900) \quad \dot{Q}_1 = 21976,737 \text{ W donc } Q_1 \approx 22 \text{ MW}$$

Le rendement sera donc

$$\eta = \frac{5}{22}$$

$$\eta = 22\%$$

Avantages des ORC

Quand on se penche sur la technologie des ORC on se pose tout d'abord la question de l'intérêt qu'il y a à remplacer l'eau par un fluide organique. L'eau est gratuite, sans risque pour l'homme et l'environnement et est utilisée depuis le 18ème siècle pour les applications de cycle thermodynamique. Pourquoi changer ? De fait l'eau n'a pas que des avantages. On peut citer en particulier :

- *La nécessité de posséder une source chaude à plus de 400°C pour obtenir une efficacité de cycle économiquement rentable

- *Un fonctionnement à des pressions supérieures à 40 bars qui obligent à une surveillance permanente

- *La nécessité de mettre en place des auxiliaires coûteux comme des systèmes de déminéralisation. Ces coûts fixes empêchent les installations de petites tailles (moins de 2MWe)

- *La difficulté de trouver des constructeurs fiables pour des petites puissances

- *L'usure de la turbine à cause de la présence d'eau en fin de détente

Ce dernier point est particulièrement important lorsque l'on compare cycle ORC et cycle vapeur. L'eau est un fluide dit « mouillant » Lorsque l'on détend la vapeur d'eau dans la turbine, des gouttes peuvent apparaître et abîmer les ailettes. Au contraire, les fluides organiques utilisés dans les cycles ORC sont des fluides dits « séchants », c'est-à-dire que la détente dans la turbine se fait en permanence à l'état de vapeur. Ceci permet d'augmenter la durée de vie des turbines et de diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance. Les ORC apportent de vraies solutions vis-à-vis de ces problèmes. La technologie permet de produire de l'électricité à partir d'une source de chaleur à basse température (jusqu'à 70°C). En fonction de la température de la source chaude, il est également possible de faire de la cogénération (production combinée d'électricité et de chaleur). Les modules ORC permettent une production décentralisée grâce à leur puissance relativement faible - entre 100kW et 2,5MWe – qui correspond ainsi parfaitement aux besoins actuels des réseaux électriques. Les modules ORC sont compacts, autonomes – l'exploitation et la maintenance sont légères – et possèdent une durée de vie supérieure à 20 ans. La technologie des ORC est mûre. Aujourd'hui, il existe plus de 350 sites ORC à travers le monde pour une puissance installée supérieure à 1,5GW. A ceux-ci il convient de rajouter 50 références en cours d'installation. Le nombre de références et la puissance installée est en augmentation continue depuis plus de 20 ans. On observe même une accélération du nombre de projets depuis le début des années 2000. Dans le cas de notre centrale, et avec une source de 74°C tout se jouera donc au niveau du choix du fluide organique et du rendement du module ORC

B.3 Autres applications de la Géothermie

Le tableau ci-dessous nous montre les autres applications possibles de la Géothermie en fonction des températures, à partir de notre source la plus chaude Woulndé (74°C) on pourra faire un choix de l'utilisation directe de ce potentiel.

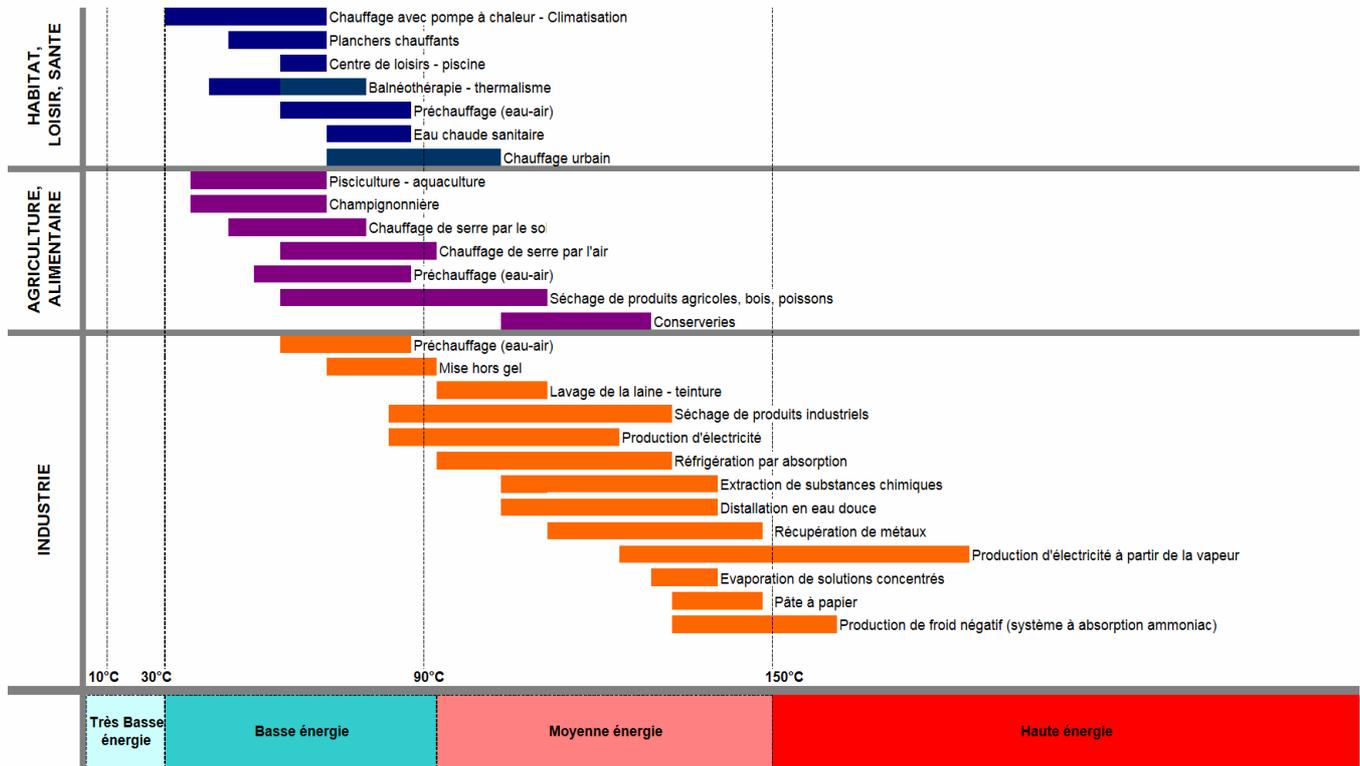


Figure 16 Principales utilisations de la géothermie en fonction des températures (Source CFG Groupe BRGM)

B.4 Profondeur des puits par rapport au gradient thermique général

Au niveau de la source thermale la plus chaude du Cameroun, Woulndé on a 74°C pour un gradient de 3°C/100 m d'une manière générale ce gradient peut être plus ou moins supérieure selon qu'on se trouve sur une zone sismique ou pas. On utilisera donc pour le calcul un gradient de 10°C/100 m pour notre zone choisie par rapport à la figure 8. Pour obtenir nos 5 MW, nous aurons besoin de 3 forages, 1 forage d'injection et 2 forage de production. Selon le abaques (Siemens), pour produire 5MW il nous faut une température de vapeur de 530°C à une pression de 131 bars, nous prévoyons 2 forages de production donc chaque forage fournira minimum 200°C et un forage de d'injection. Pour connaître la profondeur des forages on utilisera la formule du gradient thermique :

10°C pour 100 m, 265°C T° par rapport à la profondeur du forage (la profondeur du puit dépend de la zone et du gradient thermique de la zone)

on aura

$$\text{Profondeur des forages} = 265 \times 100 / 10 = 2650 \text{ m}$$

B.5 Motivations du choix de la turbine par rapport aux puissances à produire et des caractéristiques du site

Nous choisirons une turbine Siemens car ils offrent une gamme complète des turbines à vapeurs pré-étudiées jusqu'à 10 MW. La conception modulaire simple de ces machines économiques et néanmoins novatrices permet d'optimiser les performances selon l'application considérée. Forts des différentes séries, toutes entièrement compatibles entre elles, Siemens est en mesure de proposer une configuration optimale, convenant le mieux possible aux besoins du client. Les turbines à vapeur pré-étudiées Siemens répondent aux exigences des clients en matière de rentabilité d'installation et d'exploitation. Elles offrent également une très grande souplesse pour les processus industriels complexes. Que vous recherchiez un entraînement d'alternateur pour la production d'énergie ou un entraînement mécanique pour des compresseurs, des soufflantes ou des pompes. Siemens respecte bien évidemment les lignes directrices définies dans les normes de qualité ISO 9001 et ISO 14001.

Type	Paramètres de vapeur (valeurs maximales)	Puissance (MW)										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SST-010	70 bars, 5 °C											
SST-040	40 bars, 400 °C											
SST-050	101 bars, 500 °C											
SST-060	131 bars, 530 °C											
SST-110	131 bars, 530 °C											
SST-120	131 bars, 530 °C											

Tableau III Tableau des Types, Paramètres de vapeur et pression, Puissance (MW) par Siemens

Le tableau III ci-dessus nous permet de faire un choix par rapport à la puissance voulue, nous choisirons une turbine de type SST-060.

La turbine à vapeur SST-060 est caractérisée par sa conception robuste et sa fiabilité légendaire, même dans les conditions d'exploitation les plus difficiles. Elle est parfaitement adaptée à une exploitation avec de la vapeur saturée. Pouvant être utilisée comme turbine à condensation ou à contrepression en combinaison avec différents modules de réducteur intégré, cette turbine se prête à un grand nombre d'applications.

3.1.4 ETUDES D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIO-ECONOMIQUE DU PROJET

La construction et la mise en fonction d'une unité de production électrique répond à un choix stratégique. Il est donc important pour les décideurs d'évaluer l'ensemble des impacts à la fois économiques, sociaux et environnementaux. L'EIE peut être définie comme un outil prospectif qui s'intéresse à l'identification et à l'évaluation des effets d'un projet sur l'environnement en général et sur ses composantes biophysiques et humaines en particulier.

A. Impacts Environnementaux

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂) dégagés par la combustion des énergies fossiles
- Réduction des risques de pollution liés à l'extraction, au traitement et aux transports des hydrocarbures

B. Impacts Socio-Economique

- Création d'emplois directs car l'exploitation de la centrale génère des emplois pérennes
- Création d'emplois indirects dans les entreprises locales sous-traitantes chargées des travaux de maintenance et construction
 - chaudronnerie
 - mécanique générale
 - électricité et automatisme
 - maçonnerie (gros oeuvre et entretien)
 - restauration et hébergements

-La centrale peut générer des recettes fiscales pour la localité (taxe professionnelle,...)

- Fréquentation touristique de la centrale

- Développement d'un pôle éco touristique prenant en compte les richesses de la localité choisie.

C. Contribution à la Balance Energétique De la zone choisie pour le projet (Cameroun)

Les chiffres de la production d'électricité au Cameroun (Source Rapport SIE Cameroun 2010)

Capacité de production installée 1558 (MW) hors mis la centrale de kribi (216 MW)

Production énergies fossiles

- Thermique Publique 303 MW (19%)
- Thermique Offshore 47 MW (3%)
- Thermique onshore 488 MW (31%)

Production EnR 0 MW

Production Hydroélectrique 719 MW (46%)

Production Géothermie 0 MW

Contribution de la Centrale à la demande énergétique du Cameroun

Avec cette centrale géothermique, on aura donc 5 MW de plus dans le potentiel de production installée en électricité et un transfert de technologie pour des futurs projets de grande envergure dans le domaine de la géothermie tout en respectant les engagements du protocole de kyoto.

3.1.5. ETUDE DES COUTS DU PROJET

A. Coût de l'électricité géothermique calculé avec une ressource de qualité moyenne (Température 150 à 250 °C)

Les coûts d'investissement sont variables en fonction des conditions locales. Les constructeurs de turbine ont standardisé leur gamme: les puissances s'échelonnent de 300 kW à 55 MW, ce qui permet une mise en production progressive d'un champ géothermal pour s'accommoder à la fois des capacités de financement et de la demande en électricité. L'effet d'échelle joue: le mégawatt de puissance installé est moins cher pour les puissances élevées. Pour ces dix dernières années, on observe les fourchettes suivantes : (ces coûts sont calculés avec une ressource de qualité moyenne (150-250°C) voir le tableau IV établi par la banque mondiale).

Puissance centrale de production (MWe)	Coût investissement : Exploration +réservoir+ centrale US\$/KW installé	Coûts opération. + maintenance: réservoir + centrale (USc/kWh)	Coût électricité (USc/kWh)
Inférieure à 5	1800 à 3000	0.8 -1.4	5.5 -8.5
Entre 5 et 30	1600 à 2500	0.6 -0.8	4.5 -7.0
Supérieure à 30	1350 à 2200	0.4 -0.7	4.0 -6.0

Tableau IV - Les Coûts, par la Banque Mondiale

La technologie mise en oeuvre, imposée par les caractéristiques dû champ et le type de valorisation, influe sur ce coût, tout comme le coût des forages, fonction de la profondeur, l'accessibilité du site et la géologie. Pour produire économiquement de l'électricité, de nombreux problèmes doivent être résolus, notamment la maîtrise de la perméabilité de la zone visée. En effet, il faut qu'entre le puits d'injection d'eau et le ou les puits de collecte de vapeur il y ait le moins de pertes possible. C'est un des objectifs du programme de Soultz, où des techniques de fracturation hydraulique pour stimuler le réservoir (élargir les fracturations naturelles) sont étudiées. Actuellement, deux puits profonds (3600 m et 5000 m) et cinq puits d'observation entre 1400 et 2200 m sont forés. A 3900 m, la température est de 165 °C. et atteint 200°C à 5000 m. Des essais de circulation d'eau à 140°C entre deux forages distants de 450 m ont été menés avec succès. L'apprentissage se fait de manière progressive sur le forage dans les roches dures, chaudes et profondes (réduire les coûts), sur la stimulation pour créer des réservoirs suffisamment vastes et sur l'ingénierie de production. En cas de succès du pilote scientifique, on envisage un prototype industriel de 25 MWe comportant neuf puits (trois d'injection, six de production), dont les têtes seront regroupées sur une seule plate-forme géothermique (forages déviés). Ensuite se posera la question des coûts d'une telle installation (investissement, exploitation) et la compétitivité avec les énergies en place (pétrole, gaz, nucléaire). Les prix de revient estimés pour le projet de Soultz se situent entre 0,05 et 0,09

euro/kWh, prix qui pourraient descendre à 0,04 euro/kWh en cas d'industrialisation de ce mode de production.

3.1.6. TECHNIQUES DE RECHERCHE DE FINANCEMENTS DU PROJET

Le Protocole de Kyoto (PK), établie en 1997 a permis de mettre en place un ensemble de mécanismes appelés « mécanismes de flexibilité », pour pouvoir contribuer à la réduction d'émission de GES de 5,2% par rapport à 1990 sur une période de 2008- 2012. Certains de ces mécanismes peuvent aider les Pays en Voie de développement (PED) à réaliser des projets contribuant à la réduction des GES dans les pays de l'Annexe 1(pays développés)On peut citer :

La Compensation Carbone par Crédits Carbone

Le Mécanisme de Développement Propre (MDP)

A. La Compensation Carbone par Crédits Carbone

Commençons par définir les crédits carbones comme étant des unités qui sont attribuées au porteur de projet qui réduit les émissions des GES (séquestration ou évitement): ils ont une valeur commerciale. Les crédits carbones apparaissent comme une ressource financière additionnelle pouvant influencer favorablement sur la décision d'investissement de l'investisseur/opérateur public ou privé dans des domaines aussi divers que la distribution et le traitement de l'eau, la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, la réduction des consommations énergétiques dans une cimenterie par utilisation de cendres volantes ou la reforestation. L'attribution de ces crédits carbone s'articule autour de plusieurs mécanismes. L'un d'entre eux s'intéresse plus particulièrement à la collaboration entre les pays industrialisés et les pays en voie de développement ; il s'agit du Mécanisme de développement propre (MDP), qui conditionne l'obtention de « crédits carbone » au financement d'un projet de réduction dans les pays en développement.

La compensation carbone est une démarche qui consiste, à mettre en place des projets de réduction ou de capture et séquestration du carbone en un autre lieu lorsqu'on a cherché à réduire sur place ses émissions de CO₂. Ces projets peuvent porter sur l'efficacité énergétique, la production d'énergie renouvelable ou encore le reboisement. Le principe sous-jacent étant qu'une quantité donnée de CO₂ émise dans un endroit peut être « compensée » par la réduction ou la séquestration d'une quantité équivalente de CO₂ en un autre lieu. Ce principe de « neutralité géographique » est au coeur des mécanismes mis en place par le Protocole de Kyoto. La compensation carbone est un mécanisme de financement par lequel une personne physique ou morale substitue partiellement ou totalement une réduction à la source de ses propres émissions de GES en achetant auprès d'un tiers une quantité équivalente de crédits carbone.

Pour obtenir les crédits carbone, la procédure est la suivante (mais des étapes peuvent s'ajouter en fonction du marché visé, des acteurs, du type de projet, des contraintes locales...)

1. Le porteur de projet doit démontrer que son projet répond à certains critères (mesurabilité des GES, additionalité, absence de double compte, présence d'un plan de suivi,...).**voir en Annexe 3 le test d'éligibilité pour le MDP**
2. Il fait ensuite vérifier ses calculs par un consultant homologué et rendre un rapport de validation
3. Il fait ensuite enregistrer son projet
4. Une fois que le projet est enregistré, il fait vérifier tous les ans la réalité des réductions générées par le projet par un consultant homologué
5. Sur la base du rapport de vérification, on attribue les crédits carbone au porteur de projet.
6. Le porteur de projet peut les commercialiser et s'assurer un revenu qui lui permet de financer son projet.

B. Le Mécanisme de Développement Propre

Le mécanisme de développement propre (MDP) est un mécanisme économique de la finance du carbone qui fut élaboré dans le cadre du Protocole de Kyoto. Son but premier est de réduire les émissions de GES au niveau mondial. L'augmentation des GES est un phénomène mondial avec l'internationalisation des échanges économiques et la source d'émission n'a que peu d'importance. L'utilisation de mécanismes de marché vise donc à récompenser l'instauration de technologies de réduction d'émissions dans les pays en développement, et à en monétiser la valeur, négociée en unités d'équivalent d'une tonne de CO₂.

Dans le cadre du MDP, un Etat ou une entreprise d'un pays développé ou d'un pays en transition (définis comme pays dits de l'annexe 1 par le protocole de Kyoto) investit dans un projet de réduction des émissions de GES dans un PED. En échange des réductions constatées, un volume équivalent d'Unités de Réductions Certifiées d'Emissions (URCE en français, Certified Emission Reduction-CER en anglais) lui est délivré : ce sont des crédits carbone. Cet investisseur pourra vendre ces Unités sur le marché ou les déduire de ses obligations internationales de réduction.

Le Protocole de Kyoto impose 4 conditions pour les projets MDP(critères d'éligibilité):

- Ratification du Protocole de Kyoto par les deux Etats (investisseur et hôte)
- Le projet doit contribuer au développement durable (*développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs*) du pays hôte : il revient à chaque PED de définir et d'établir ses propres critères de développement durable.
- Le projet doit être approuvé par le pays hôte

- Le projet MDP doit être additionnel : un projet est additionnel s'il permet des réductions d'émissions qui n'auraient pas été réalisées sans la création d'une obligation de réduction des émissions

IV. RESULTATS

En pratique on aura les infos ci-dessous

q_e	Q	W	η_T	H_{eff}	P_e	C_e	C_v
135 l/s	16116 W	6446 W	0,4	0,8	5 MW	4,8	2676

Tableau V – Résultats des calculs

2 forages d'exploration et de contrôle/écoute

2 forages de production (2x 67,5 l/s) et 1 forage d'injection (135 l/s) à 2650 m

Exemples d'ouvrages souterrains

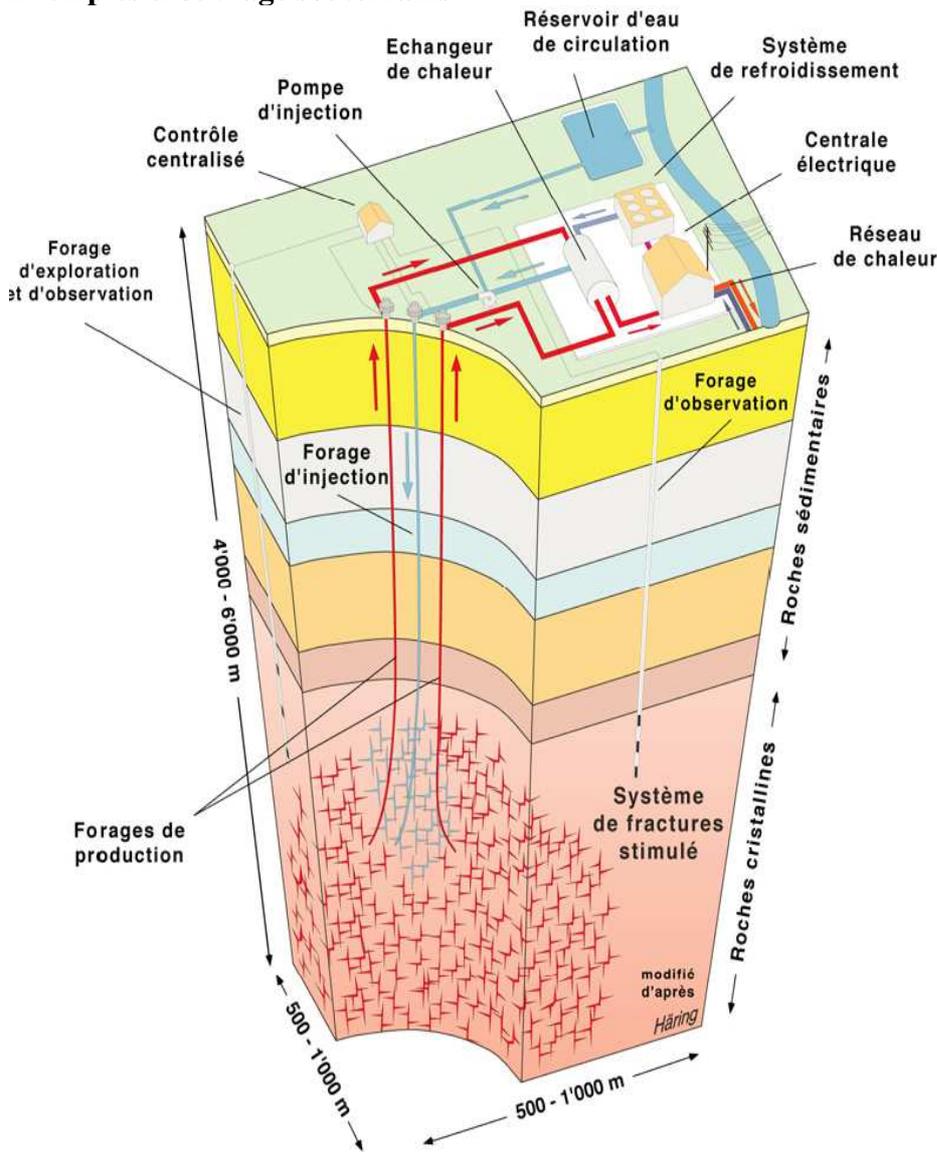


Figure 17 : Ouvrages souterrains de la centrale par Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG) d'Electrosuisse

Installations de surface

Centrale de production d'électricité de type ORC (5 MWe)

B. Caractéristiques de la turbine

Données techniques

- Puissance : 6 MW maximale.
- Pression d'admission : 131 bars maximale.
- Température d'admission de la vapeur saturée sèche : 530°C max.
- Vitesse de rotation : en fonction de la machine entraînée
- Pression d'échappement : contre-pression de 29 bars maximal.

Dimensions standard

Longueur : 1,5 m , Largeur : 2,5 m, Hauteur : 2,5 m

Caractéristiques

- Turbine à contre-pression ou à condensation
- Conception en package
- Système d'huile intégré dans le cadre de base
- Possibilité de réglage par groupe de tuyères
- Démarrage rapide sans réchauffage
- Fabrication personnalisée
- Répond aux exigences de la spécification API 611/612**
- Version ATEX disponible
- Adaptée au cycle organique de Rankine (ORC)
- Convient pour la détente de gaz



Figure 18 : Turbine à vapeur SST-060. Par Siemens

B. Coût pour une Centrale de 5 MW

En se basant sur les coûts donnés par la banque mondiale ci-dessus, nous ferons une étude pour notre centrale de 5 MW. On a :

1MW = 1000 KW nous aurons donc 5000 KW pour 5 MW.

En Coût investissement c'est-à-dire : Exploration + Réservoir + Centrale nous aurons
5000 x 2500(Coût/KW installé)

Ce qui fera 12500000 \$ Pour l'investissement soit 6.000.000.000 Fcfa (avec 1 US\$ = 480 Fcfa)

Pour les coûts d'opération plus la maintenance c'est-à-dire : réservoir + centrale on aura 0.8 (USc/kWh) soit 384 Fcfa/kWh

Avec 30USc = 480 Fcfa = 1US\$

$$0.8USc = X$$

Le coût d'opération + la maintenance sera de 12,8 Fcfa/kWh

Pour le coût de l'électricité on aura 7.0 (USc/kWh)

On a 30USc = 480 Fcfa = 1US\$

$$7USc = X$$

Le coût de l'électricité sera de 112 Fcfa/kWh

(Les coûts choisis sont les plus élevés mais ils peuvent varier selon les puissances)

C. Calculs de crédits carbones pour une centrale géothermique de 5 MW sur 10 ans en supposant qu'elle produit 35000 MWh par an

- Facteur d'émission d'une centrale thermique : **1,2 tequCO₂/MWh**

- Production annuelle de la centrale géothermique : **35 000 MWh**

- Valeur d'un crédit carbone : **10 €**

Calculons les crédits carbones générés annuellement

$$URCE = 35\ 000 * 1,2 = 42\ 000\ tequCO_2$$

URCE = 42 000 tequCO₂

Soit 42 000 x 10 dont 420 000€ /an soit **275.501.940 Fcfa/an**

Sur dix (10) ans les revenus en crédit carbone de ce projet serait de :

$$RURCE = 42\ 000 * 10 * 10 = 4\ 200\ 000\ €$$

RURCE= 4 200 000 €/10anssoit 2.755.019.400 Fcfa/10ans

Si ces revenus paraissent bien intéressants, il faut bien de procédures pour pouvoir en bénéficier. En effet il faudra faire enregistrer le projet au Mécanisme de Développement Propre auprès du Conseil Exécutif de l' UNFCCC (en accord avec le protocole de Kyoto qui a institué a compensation carbone). Cette procédure est longue et a des coûts liés aux activités ci après

* Étude de faisabilité du projet (prestation par un consultant et ou autres frais)

* La rédaction et la vérification du DDP (prestation par une EOD)

* Les coût de transport, d'envoi de document et autres

Ces coûts varient entre 20 000€ à 200 000€

Donc dans un scénario optimiste on aura donc les coûts de transaction de 20 000 €

6) Les coûts de transaction sont de 20 000 €. Ils sont inférieurs aux RURCE et représentent 0,0047% de ceux-ci.

$$CT/RURCE = 20\ 000 / 4\ 200\ 000 = 0.0047\%$$

V. DISCUSSION ET ANALYSES

A. Avantages de l'Energie Géothermique pour la production d'Electricité

- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport (Risques de pollution évités)
- Ressource énergétique renouvelable (EnR) préservant l'environnement (pas de déchet, émissions gazeuses très réduites)
- Capacités de production importantes comparées aux autres EnRs (quelques MWe à quelques dizaines MWe - Les Geysers: 600 MWe)
- Énergie de base, indépendant des conditions climatiques (fonctionne 24hx24h, 365j/an)
- Indépendance: énergie indigène.
- Durabilité:inépuisable à l'échelle humaine, gestion de type renouvelable.
- Disponibilité:24 heures par jour et 365 jours par an.
- Propreté:pas de déchets et ni d'émission de gaz à effet de serre (CO₂)
- Universalité: utilisable dans tous les pays et sous tous les climats.
- Variété:large gamme de températures (10-350°C) et de profondeurs (50 -5000 m).
- Discrétion: installations compactes, qui n'occupent que peu de surface de terrain.
- Sécurité:pas de transport ni de stockage de substances polluantes ou dangereuses.
- Economie: parmi les plus rentables des énergies renouvelables.
- Innovation: stimule les nouvelles technologies et crée des places de travail.

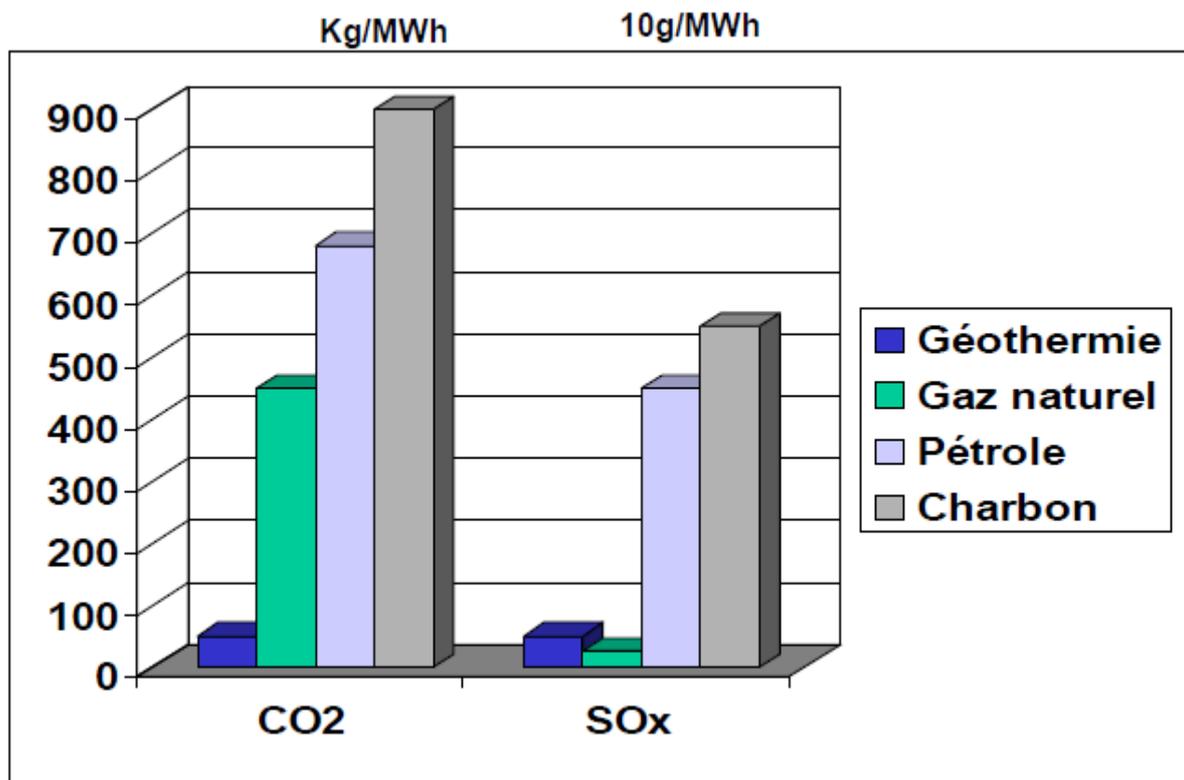


Figure 19: Comparaison des taux d'émission de CO₂ et de SO_x selon les sources d'énergie utilisées. (Par le CFG Groupe BRGM)

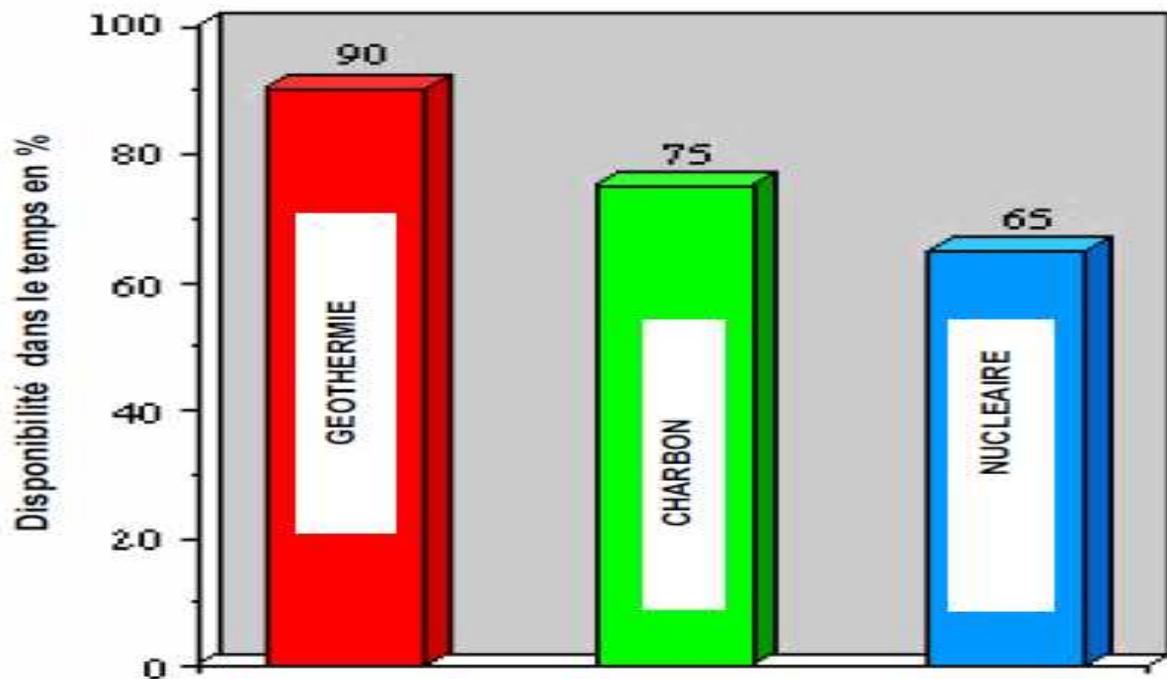


Figure 20 : Disponibilité comparée des centrales électriques utilisant la vapeur géothermale, le charbon et le nucléaire comme source d'énergie. Les centrales géothermiques nécessitent peu d'arrêts pour les opérations de maintenance et d'entretien (Par le CFG Groupe BRGM)

B. Inconvénients de l'Energie Géothermique pour la production d'Electricité

- Ressource naturelle du sous-sol dont l'extraction nécessite la réalisation de forages dont les résultats sont parfois aléatoires (« risque géologique »).
- Délai important dans la mise en valeur d'une ressource géothermique (voir ci-dessous l'exemple de Bouillante).
- Coût d'investissement important comparé aux autres EnRs (travaux d'exploration, réalisation de forages).
- Actuellement, peu de forages profonds dans le socle cristallin, donc pas de connaissances sur la structure des roches et la distribution des températures.
- Pas d'installations fonctionnant actuellement selon cette technologie, donc peu de connaissances sur le comportement à long terme d'un réservoir géothermique de ce type (durée de vie et coût d'exploitation).
- Les critères de dépendance géologique/géographique sont encore trop peu connus.
- Les coûts de développement du réservoir profond sont encore difficilement estimables et les risques de coûts supplémentaires encore élevés.
- L'attrait politique reste encore faible (manque de promotion).
- La pression est encore trop faible à cause du prix encore relativement bon marché des énergies fossiles.

Exemple de Bouillante



(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le développement des énergies renouvelables est une exigence politique actuelle. A court terme, un déficit d'énergie à partir des ressources connues n'est pas prévisible, mais des scénarios à long terme existent déjà, qui demandent une réduction globale de la production de substances polluantes, en particulier du CO₂.

Afin de s'assurer une position sur le marché dans le secteur de l'énergie, il ne suffit pas de convaincre sur le plan écologique. La capacité de concurrence sur le plan économique doit aussi être garantie. Les énergies solaires et éoliennes sont bien connues, mais toutes deux possèdent malheureusement une disponibilité assez aléatoire. La chaleur de la terre se présente comme seule source d'énergie disponible de manière interrompue sans production de CO₂, qui soit modulable en fonction des besoins. Elle est disponible pendant toute l'année, de jour comme de nuit, et ne nécessite aucun processus de stockage.

Au moins huit bonnes raisons peuvent être énumérées en faveur de la géothermie:

- Couplage chaleur- force sans production de CO₂.
- Source d'énergie autonome par rapport aux cycles journaliers et saisonniers.
- Potentiel de la ressource presque inépuisable.
- Installations asservies selon les besoins.
- Transport réduit des fluides géothermiques en surface.
- Incidence minimale sur l'environnement.
- Faible encombrement des installations de surface.
- Energie purement indigène.

La géothermie gardera encore son statut d'énergie nouvelle. Il est essentiel d'entrer au plus vite dans une période d'utilisation courante de cette énergie, et d'édifier les structures industrielles que son développement nécessite. Cette énergie nouvelle, nécessairement régionale, intégrée dans l'espace naturel, et de gestion décentralisé, convient aux aspirations actuelles.

Nous ne pouvons terminer ce projet sans énumérer quelques recommandations découlant de cette étude :

- Un important effort de recherche appliquée doit être mis en place pour mieux dominer cette énergie et abaisser les coûts de production d'électricité.

- En ce qui concerne l'énergie géothermique les résultats sont assez défavorables

à l'existence de sources d'énergie de ce type au Cameroun sauf peut-être dans la région située à l'Ouest du mont Cameroun et certaines zones des plateaux de l'Adamaoua(Wouldé) ou des études plus poussées sont nécessaires. Si jamais notre projet venait à être financé, une étude devra être faite pour dimensionner une centrale électrique géothermique dans la localité de Wouldé car il n'ya pas de possibilités d'éruptions volcaniques comme dans l'Ouest du Mont Cameroun. Compte tenu des températures basses trouvées au Cameroun, la solution serait donc d'utiliser la technologie ORC (Organic Rankine Cycle).Le potentiel géothermique du Cameroun en occurrence la source de Wouldé (74°C) pourrait être directement utilisée pour les utilisations suivantes :

- Eau chaude sanitaire
- Pisciculture Aquaculture
- Séchage des produits agricoles, bois, poissons
- Centres de loisirs Piscine

Voir figure 16

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Traité de géophysique interne, Sismologie et pesanteur, publié sous la direction de J.COULOMB & G, JOBERT
 - 2 - B.F. HOWELL, Introduction à la géophysique, avec une présentation et des notes complémentaires par H. TAZIEFF
 - 3 – Rapport SIE Cameroun 2010
 - 4 - Cours de transmission de chaleur Ecole Supérieure Polytechnique Centre de Thiès.
 - 5 - Cours de moteur - turbine – compresseur (Ecole Supérieure Polytechnique Centre de Thiès)
 - 6 - Cours Les Mécanismes de Développement Propre Master M2 en Génie Énergétique et Énergies Renouvelables par Elodie Hanff 2IE
 - 7 - Lycée Pilote Innovant Christophe Alleau Enseignant de BTS CIRATéléport 5 86130 JAUNAY-CLAN
 - 8 - Carnet du Régleur de J.M. Valance,
 - 9 - Les techniques de l'ingénieur,
- B.Internet

Sites Internet

[http : webcache.googleusercontent.com](http://webcache.googleusercontent.com)

<http://www.brgm.fr>

<http://www.cfgservices.fr/>

<http://www.geothermie-perspectives.fr/07-geothermie-france/03-haute-energie-02.html>

<http://www.bouillante-guadeloupe.com>

<http://www.geothermal-energy.ch/download/ee/603Geothermie-fr.pdf>

<http://www.eere.energy.gov/geothermal/geofaq.htm/>

<http://www.adobe.com/products/acrobat/readstep2.html>

www.geothermal-energy.ch (Geothermal programmes of the Swiss Federal Office of Energy)

www.dhm.ch (Deep Heat Mining Project(DHM), Switzerland

www.geothermal.ch (Geothermal Explores Ltd, DHM-Based, Switzerland

www.soultz.net (European HDR project, Soultz-sous foret, France

www.geothermie.de (Geothermische Vereinigung e.V, Germany

www.geothermal-energy.org (International Geothermal Association (IGA)

www.geodynamics.com.au (Geodynamics Ltd, EGS projects in Australia

www.petrathem.com.au (Petrathem, Exploring for and Developing Geothermal Energy, Australia

www.geothermal.org Geothermal Resources Council (GRC), activities and services, California, USA

geothermal.marin.org (Geothermal Education Office, USA

geoheat.oit.edu (Geo-Heat Center (GHC), Oregon, USA

www.worldbank.org/html/fpd/energy/geothermal/index.htm (The World Bank Group, Geothermal Energy, USA

www.geothermal-biz.com (Geo Powering the West (GPW),programme to increase the use of geothermal energy in the Western States, US DOE

www.ormat.com (Ormat International, Inc, Power Plants Manufacturer,USA)

[http://www.chemicalogic.com/.](http://www.chemicalogic.com/)

[http://www.trouvay-cauvin.fr/.](http://www.trouvay-cauvin.fr/)

[http://www.processs.com/.](http://www.processs.com/)

ANNEXES

Annexe I : Types de Centrales Géothermique dans le Monde

Annexe II : Exemples de Projets Géothermique pour la Production d'Electricité

Annexe III : Test d'éligibilité

Annexe IV : Quelques Centrales Géothermiques.

Annexe V : Production d'électricité géothermique dans le monde

Annexe VI Devis estimatif d'une installation pilote EGS à 3 puits du type de celle de Bâle

Annexe VII : Répertoire et Localisation des Sources Thermominérales du Cameroun (ORSTOM)

Annexe VIII : Table de vérité de la vapeur saturée

Annexe IX : Diagramme de Mollier de la Vapeur

Annexe X : Diagramme Enthalpique du R22

Annexe I : Types de Centrales Géothermiques dans le Monde

ORC

Ce type de centrale permet la production d'électricité à l'aide d'un fluide secondaire organique à bas point de vaporisation (isopentane, isobutane, etc.); centrale de type Organic Rankine Cycle (ORC). Avec ce système, on a les avantages suivants :

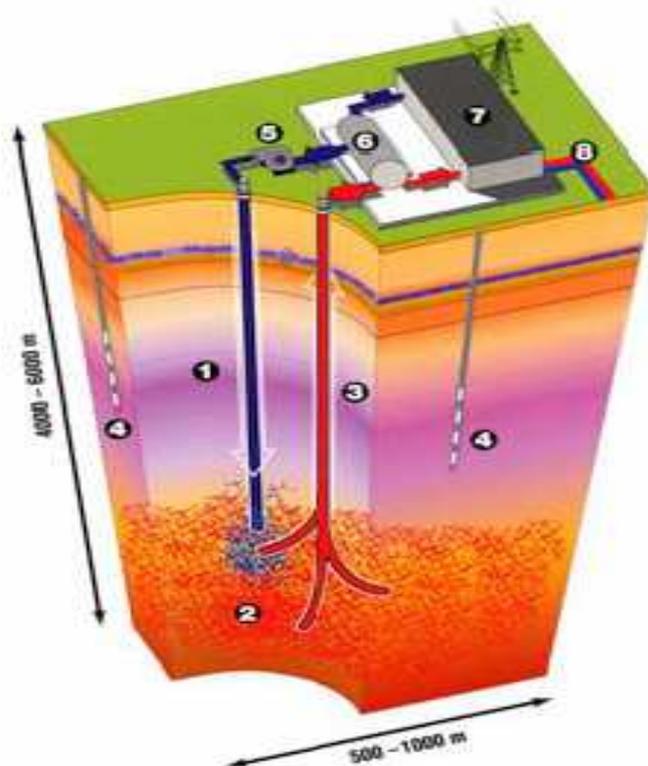
- Fluide à bas point de vaporisation (ammoniac, isobutane, etc.)
- Aucune émission dans l'atmosphère : 2 circuits fermés sous pression.
- Efficacité de la conversion énergétique : 7 à 12%.
- Coefficient d'utilisation : 95 à 98%.
- Tous types de fluides et large gamme de température.

Systèmes Géothermique Stimulés

Il s'agit des systèmes HDR, HFR, EGS, DHM qui

- Entre 4 et 6 km de profondeur : température entre 180 à 200°C.
- Injection d'eau froide sous forte pression : ouverture des fissures et création d'un échangeur de chaleur souterrain.
- Forages de production : récupération du fluide réchauffé en profondeur.
- Centrale géothermique : production d'électricité par un turbo-générateur.

Exemple de système géothermique stimulé



1. Forage d'injection
2. Réservoir fracturé
3. Forage de production
4. Forage d'observation
5. Pompe de circulation
6. Echangeur de chaleur
7. Centrale électrique
8. Départ vers le réseau de chauffage à distance

Principe de fonctionnement d'un système géothermique de type «Roches Chaudes Fracturées» (Par la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

Annexe II : Exemples de Projets Géothermique pour la Production d'Electricité

B.1 Projet EGS européen de Soultz-sous-Forêts, Alsace

Programme européen pour la réalisation d'un système EGS basé sur un réservoir de granite fracturé à 5 km de profondeur et 200°C. La technologie des EGS va permettre la réalisation d'une première centrale pilote de production d'électricité en 2006.

B.2 Projet suisse DHM (Deep Heat Mining)

- Projet initié en 1996.
- Financement : OFEN, IWB, EBL, AET, Axpo, GVM, EWZ, Cantons BL et BS, GEL
- En ville de Bâle, réalisation d'une installation géothermique en exploitant un réservoir de granite fracturé à 5 km de profondeur et 200°C.
- En 2001: premier forage d'exploration de 2.7 km exécuté à Otterbach.
- Dès mai 2006: premier forage à 5 km.
- En 2008: première centrale géothermique pilote produisant électricité et chaleur.

B.3 Projet Bouillante 1

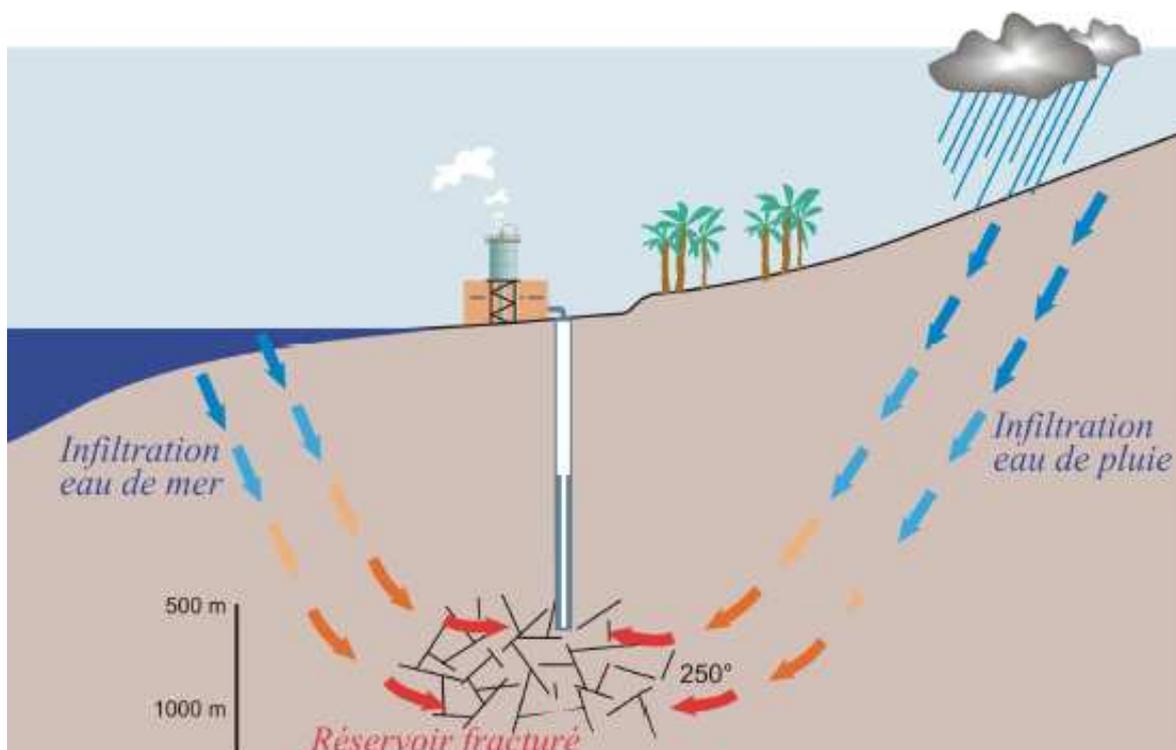


Schéma simplifié de la circulation des fluides à Bouillante.(Par le CFG Groupe BRGM)

L'eau de pluie et l'eau de mer s'infiltrent en profondeur grâce aux failles et fissures présentes dans les roches, et se réchauffent au contact des roches chaudes jusqu'à 250°C environ. L'objectif des forages est de recouper ces zones de failles et de prélever le fluide géothermique à température élevée pour la production de vapeur qui sera utilisée dans les turbines pour la production d'électricité.



Vue de l'unité Bouillante 1 (5 MWe) en service depuis 1986(Par le CFG Groupe BRGM)

Annexe III : Test d'éligibilité MDP

Test d'éligibilité : mon projet est-il susceptible d'être éligible au MDP ?

1 Le pays hôte remplit-il les conditions suivantes ?

- il a ratifié le protocole de Kyoto^(a) ;
- il a désigné une instance nationale (point focal) pour la CCNUCC ;
- il a exprimé sa volonté de soutenir des projets MDP ;
- il a mis en place ou est en train de mettre en place un bureau du MDP (Designated National Authority ou DNA, autorité nationale désignée ou AND)^(b).

2 Le projet est-il un projet de réduction des émissions ou de séquestration de GES ? À titre d'exemple, les projets MDP typiquement développés sont dans les secteurs suivants :

- secteur énergétique ;
- déchets ;
- changements de procédés industriels ;
- transport ;
- secteur agricole ;
- secteur forestier, boisement ou reboisement, au stade actuel des négociations internationales.

3 Le projet s'inscrit-il dans le cadre de la politique de développement durable du pays hôte ?

4 Est-ce que la technologie retenue remplit les conditions suivantes ?

- une technologie établie et utilisable commercialement ;
- une technologie qui peut être reproduite et transférée effectivement dans le pays hôte.

5 Le projet est-il « additionnel » ? Le projet génère-t-il des réductions d'émissions de GES additionnelles, vérifiables et certifiables par rapport à la situation tendancielle en l'absence de projet (« *business as usual* ») ?

Par exemple, une source d'énergie renouvelable (avec des émissions de GES nulles ou très faibles) qui remplacerait de l'énergie fossile, générerait des réductions d'émissions additionnelles, qui n'auraient pas lieu en l'absence du projet.

Il est conseillé de conduire rapidement une première estimation, purement technique, des réductions d'émissions qui peuvent être réalisées dans le cadre du projet. Pour une première estimation, les facteurs d'émission de GES présentés en annexe 6 peuvent être utilisés.

6 Le projet a-t-il des impacts négatifs inacceptables sur l'environnement ? En cas d'impact significatif sur l'environnement, une étude d'impact spécifique doit être réalisée en accord avec les normes et les procédures du pays hôte.

7 Si le projet est financé par des fonds publics, il faut montrer que ces fonds n'ont pas donné lieu à un détournement de l'aide publique au développement (APD) des pays de l'Annexe I. Il faut, dans ce cas, obtenir une lettre de confirmation du bailleur institutionnel concerné, attestant le non-détournement de l'APD.

(a) Si le pays hôte n'a pas ratifié le protocole de Kyoto, le projet peut tout de même être développé par anticipation d'une ratification ultérieure du pays hôte. Pour plus de détails, voir *infra* la section 1 du chapitre 3 de la 2^e partie « L'approbation par le pays hôte ».

(b) Alors que le point focal est impliqué dans les négociations conduites dans le cadre de la CCNUCC, l'AND joue un rôle très spécifique de suivi et d'approbation des projets MDP.

Annexe IV : Quelques Centrales Géothermiques



(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie (ETG) d'Electrosuisse)



(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)



**Central ORC de Puna (30MWe)
Hawaii**

(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

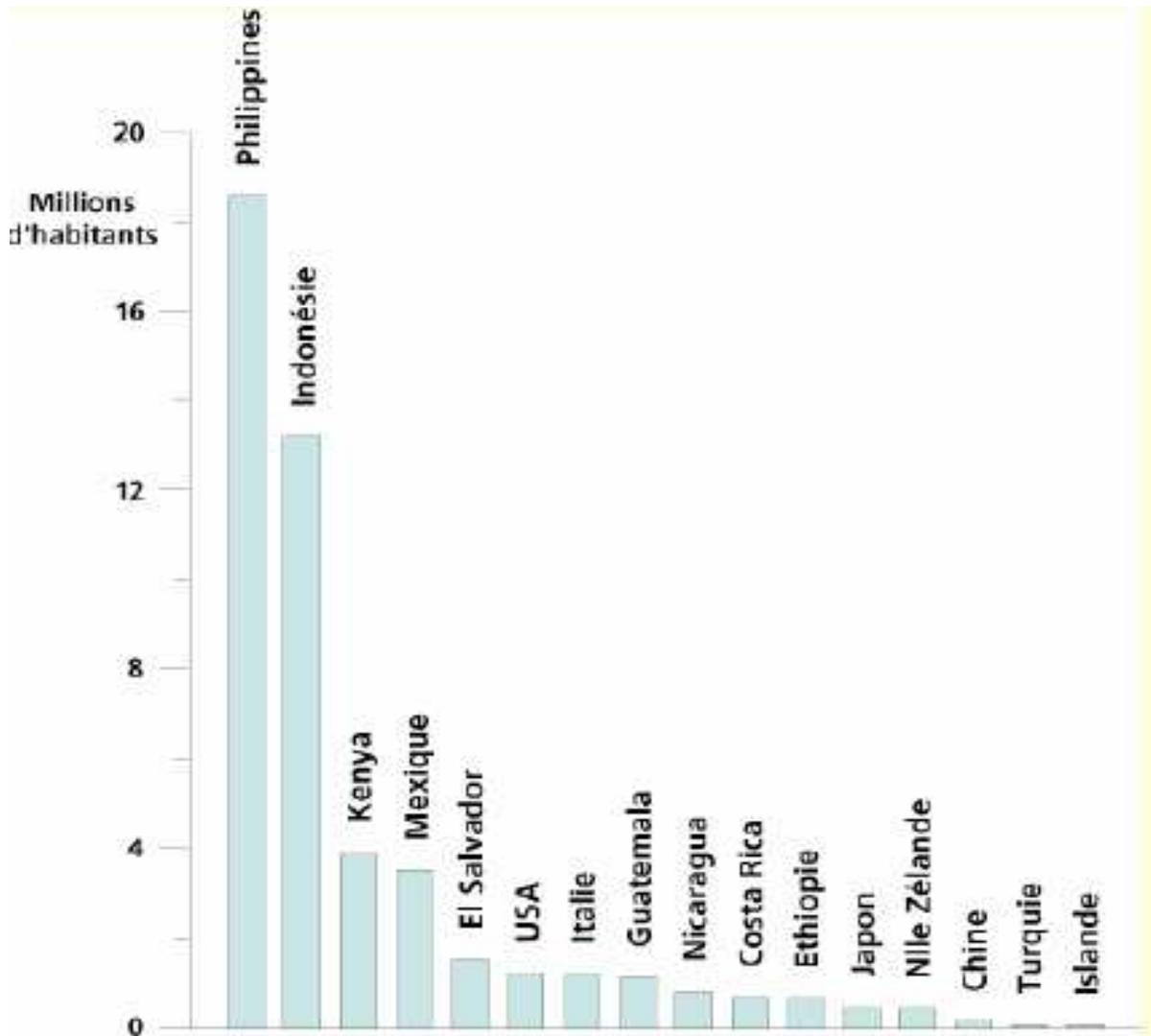


**Une des 23 centrales à vapeur
sèche Geysers, Californie**

(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

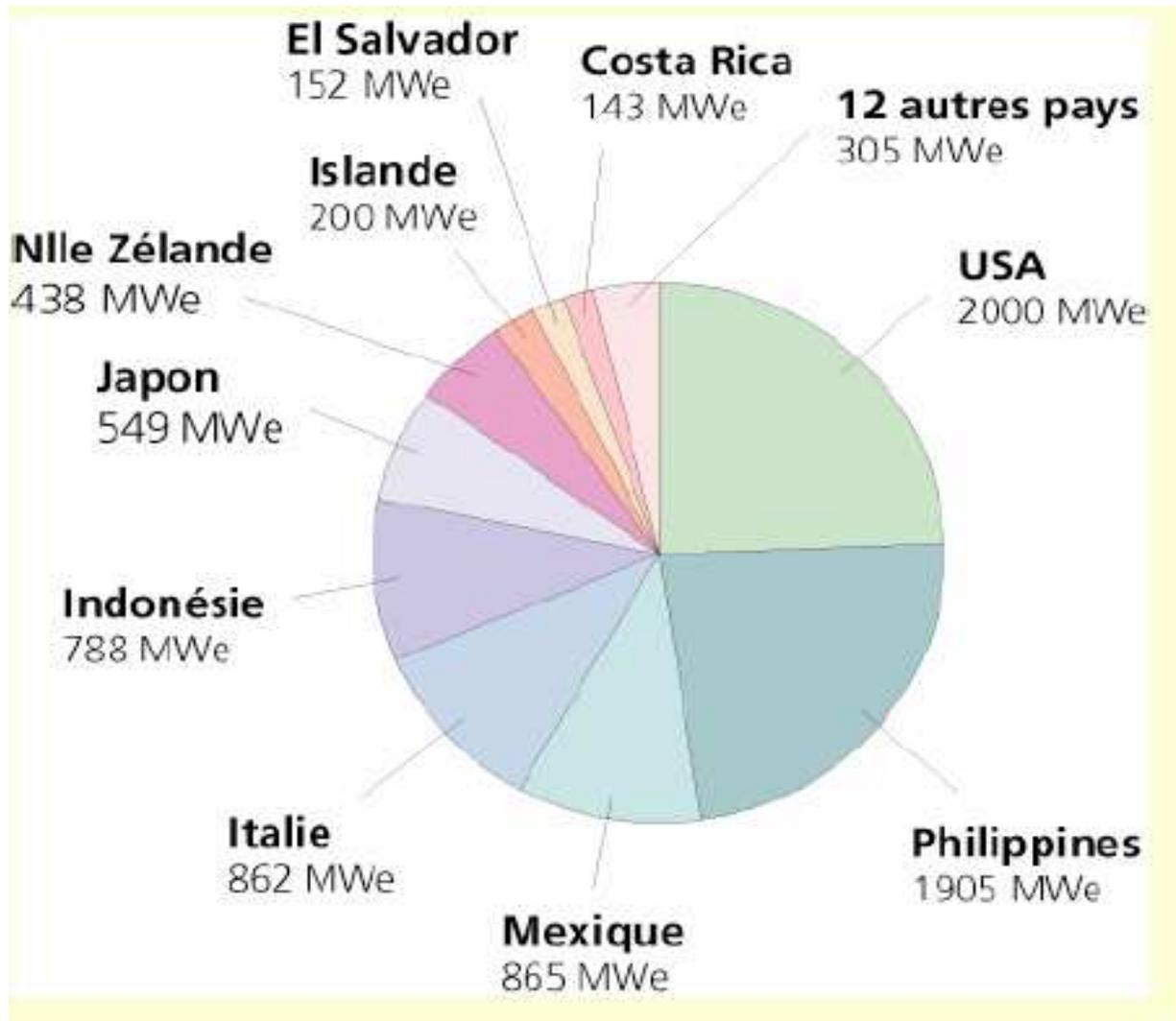
Annexe V : Production d'électricité géothermique dans le monde

Au total, 50 millions d'habitants sont alimentés par de l'électricité géothermique



(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

En 2003, 9028 MWe installés dans 23 pays



Une puissance de 1 MégaWattélectrique permet d'alimenter un peu plus de 1000 habitants en Suisse ... et 9000 aux Philippines (Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

Annexe VI : Devis estimatif d'une installation pilote EGS à 3 puits du type de celle de Bale

Phases du projet	Activités	Devis estimatif (10 ⁶ CHF)
PHASE PRELIMINAIRE 2003-2004	Etudes préliminaires Recherche de sites	0.5
VALIDATION DU SITE 2005-2007	Etude et réalisation du premier forage d'exploration	6.0
Total		6.0
PHASE D'EXPLORATION 2007-2011	1 ^{er} puits profond Stimulation du milieu fissuré	16.0
	2 ^e forage d'exploration	7.5
	2 ^e puits profond Stimulation	16.0
	Tests de circulation et de production avec 2 puits	2.5
Total		42.0
PHASE DE DEVELOPPEMENT 2011-2013	Troisième puits profond Stimulation Tests de circulation et de production	17.0
	Concept de l'installation pilote Construction des installations en surface (centrale + réseaux)	24.5
Total		41.5
Total projet pilote		90.0

Les montant sont en CHF qui est le franc suisse avec **1CHF = 560 Fcfa**, dont le total du projet sera de **50.386.686.702 Fcfa**

(Par Le Groupe spécialisé Géothermie de la Société pour les Techniques de l'Energie(ETG) d'Electrosuisse)

Annexe VII : Répertoire et Localisation des Sources Thermominérales du Cameroun (ORSTOM)

N °	Nom	Arrondissement	Long. (E du Méridien international)	Lat. (Nord)
ADAMAOUA				
1	ALME	Tignère	12°27' 55"	7°48' 25"
2	BA	Meiganga	14 43 30	6 56 35
3	BAJANGA	Ngaoundéré	14 00 35	7 17 10
4	BAJAO	Meiganga	18 06 10	7 08 55
5	BAJERE	Ngaoundéré	13 45 30	7 16 00
6	BAKARI BATA ou MANDIM	Ngaoundéré	14 14 40	7 03 35
7	BARKEJE	Meiganga	14 45 40	7 00 50
8	BEMLARI	Tignère	12 13 30	7 44 25
9	BERA	Ngaoundéré	13 51 25	7 14 45
10	BONJONG	Ngaoundéré	13 37 35	7 16 40
11	BORKOU	Tcholliré	14 29 55	7 16 00
12	BUDEL	Tignère	12 13 50	7 58 30
13	BURLEL 1	Tignère	12 18 55	7 37 15
14	DAMFILI	Tibati	13 00 00	6 96 00
15	DARSO	Tibati	13 07 30	6 46 45
16	DÉODÉO	Tignère	12 02 10	7 28 25
17	DJAMBUTU	Tignère	12 31 20	7 08 55
18	DJAORO AYUBA	Ngaoundéré	13 43 45	7 22 10
19	DJIKIM	Tignère	12 41 15	7 17 05
20	DONKERE	Tignère	12 13 35	7 46 25
21	DOTIA	Ngaoundéré	13 41 05	6 35 30
22	DOUA	Tcholliré	14 37 30	7 08 40
23	DZIR KOYA	Meiganga	14 40 25	6 56 00
24	FALKOUMRE	Tignère	12 35 30	7 19 35
25	FARO	Ngaoundéré	13 05 45	7 23 20
26	FUFANA	Ngaoundéré	13 07 25	7 22 25
27	FURUM	Tignère	12 13 05	7 59 00
28	GADE	Tcholliré	14 37 05	7 12 35
29	GALIM	Tignère	12 28 20	7 05 35
30	GANGASAOU	Ngaoundéré	13 46 35	7 33 35
31	GASANGEL 1	Tignère	12 31 40	7 12 50
32	GASANGEL 2	Banyo	11 55 50	7 03355
33	GBASUM	Meiganga	14 07 30	6 42 10
34	GBENGUBU	Meiganga	14 26 30	6 46 30

35	GIE	Ngaoundéré	14°24' 55	7°06' 20''
36	GOGARMA	Ngaoundéré	14 15 30	7 18 25
38	GUISIRE	Tignère	12 24 25	7 25 10
39	IDOJE	Ngaoundéré	13 11 20	7 19 55
40	KADAM	Ngaoundéré	14 15 50	7 18 30
41	KANTALAN	Ngaoundéré	13 20 40	7 21 15
42	KATIL FOULBE	Ngaoundéré	13 56 00	7 06 00
43	KOULANIA	Meiganga	14 25 15	6 45 50
44	LAOBALA	Ngaoundéré	13 58 45	7 27 55
45	LAOBALEWA 1	Ngaoundéré	13 42 25	7 11 00
46	LAOBALEWA 2	Ngaoundéré	13 32 30	7 12 20
47	LAODOMA	Ngaoundéré	13 32 40	7 18 20
48	LAOFURU	Ngaoundéré	13 35 25	7 12 10
49	LAOGEFI	Ngaoundéré	13 30 00	7 18 05
50	LAOKOUBONG	Ngaoundéré	13 23 50	7 22 20
51	LAOPABA	Ngaoundéré	13 25 25	7 08 50
52	LAOPANGA	Ngaoundéré	13 41 00	7 11 10
53	LASUM	Tignère	12 17 35	7 44 10
54	LAWEL	Tignère	12 37 30	7 17 00
55	LELINGEL	Banyo	11 45 00	6 56 55
56	MALAO	Meiganga	14 02 20	6 46 40
57	MAMA	Meiganga	13 54 20	6 39 15
58	MARBOUI	Ngaoundéré	13 43 15	7 06 05
59	MARMA	Ngaoundéré	13 29 25	7 13 30
60	MARPA	Ngaoundéré	13 31 25	7 11 55
61	MASOLA	Ngaoundéré	13 46 40	7 17 10
62	MASUEL	Ngaoundéré	13 28 45	7 22 05
63	MATARI	Ngaoundéré	13 28 10	7 16 30
64	MAYANG	Tignère	12 38 50	7 17 50
65	MAYO BALÉO	Tignère	12 16 00	7 41 25
66	MAYO DARLÉ	Banyo	11 32 50	6 30 00
67	MAYO LIDI	Tignère	12 06 55	7 23 05
68	MAYO SUFI	Tibati	12 40	6 47
69	MBAWA	Ngaoundéré	13 49 20	7 09 10
70	MINIM	Tibati	12 48 40	6 57 35
71	NAGESE	Meiganga	14 22 45	6 46 45
72	NALTI	Tignère	12 28 00	7 49 30
73	NDOETAYO	Ngaoundéré	13 05 55	7 23 40
74	NGAOUNDAMJI	Ngaoundéré	14 08 55	7 17 35
75	NGOK	Ngaoundéré	14 14 25	7 20 05
76	NGOURA	Ngaoundéré	14 24 20	7 00 20
77	NIALAN	Banyo	11 35 25	6 37 00
78	NIAMSUMRE	Banyo		
79	NIDOUNGA	Tignère	12 37 45	7 18 00
80	OASENDE	Meiganga	13 55 45	6 41 25
81	PATARLAY	Tignère	12 19 40	7 37 35
82	PERKI	Tignère	12 40 40	7 21 00
83	PINKOU	Tignère		
84	POLLA	Tignère	12 54 35	7 28 40
85	SAY HOURI	Ngaoundéré	13 53 55	7 07 20
86	SAMBOLABBO	Banyo	11 59 30	7 04 30
87	SEP SEP DJARANDI	Meiganga	14 58 40	7 05 00
88	SEP SEP MALOKO	Meiganga	13 27 50	6 21 20
89	SOFOL	Tignère	12 14 00	7 57 05
90	SORBERE	Banyo	11 48 15	6 55 10
91	VINA	Ngaoundéré	13 35 45	7 13 10

92	VOURE MBA	Banyo	11° 54' 50"	6° 59' 30"
93	VOURE YELEL	Banyo	11 55 45	6 58 55
94	WOULNDE	Tignère	12 28 30	7 26 10
95	YAISUNU	Meiganga	14 48 20	7 01 35
96	YOUGOUDAWA	Tignère	12 36 45	7 17 05
97	BURLEL 2	Tignère	12 01 25	7 29 25
98	MALAM JUBAIRU	Tignère	12 03 50	7 28 15
99	MAMDUGU	Tignère	12 04 20	7 29 25
100	MBERDUGA	Tignère	12 09 20	7 30 00

QUEST-CAMEROUN

101	ABANG	Manjo	9 45 50	4 56 40
102	AHIO-EKANJO	Bangen	9 41 30	4 56 30
103	ATOKI	Manjo	9 46 35	4 55 15
104	AYUKABA	Mamfé	9 08 50	5 41 55
105 a et b	BAMBUI 1 et 2	Bamenda	10 16 25	6 02 35
			10 15 25	6 01 50
106 a et b	BARE 1 et 2	Mélong	9 58 00	5 00 35
			9 57 20	5 00 30
107	EBUKU	Mélong	9 58 10	5 02 50
108	FONGAKIE	Bamenda	10 15 45	6 03 25
109	FOSSETTE	Foumbot	10 38 40	5 29 25
110	FOUNDONG METEUF	Wum	10 14 20	6 19 25
111	GESEL	Ndop	11 20 25	6 01 15
112	JICHAMI	Njinikom	10 22 50	6 09 15
113	KUCHUANTIUM	Foumban	10 38 55	5 36 45
114	KOUTABA	Foumban	10 50 10	5 42 10
115	LOBE	Ekundu Titi	9 05 25	4 34 25
116	LUIH	Bamenda	10 15 00	6 06 05
117	MANENGOUBA	Nkongsamba	9 53 10	4 57 20
118	MBUEDUM	Mélong	9 55 20	5 08 30
119	MELONG	Mélong	9 59 05	5 09 45
120	NDI	Wum	10 18 20	6 26 30
121	NDIBISI	Bangen	9 45 00	5 06 00
122	NGOL	Manjo	9 46 10	4 51 45
123	NILLI	Njinikom	10 16 30	6 02 00
124	NSOUNG	Manjo	9 49 55	5 00 00
125	NTEM	Nwa	11 00	6 20
126	NYOS	Wum	10 17 55	6 27 15
127	BALIKUMBAT	Ndop		
128	EBINSI	Mamfé	9 09 15	5 41 20
129	MBAKAN	Mamfé	9 08 55	5 40 40
130	AKAN-MBENIAN	Mamfé	9 01 25	5 42 55
131	EPEN	Bangen		

Annexe VIII : Table de la vapeur saturée

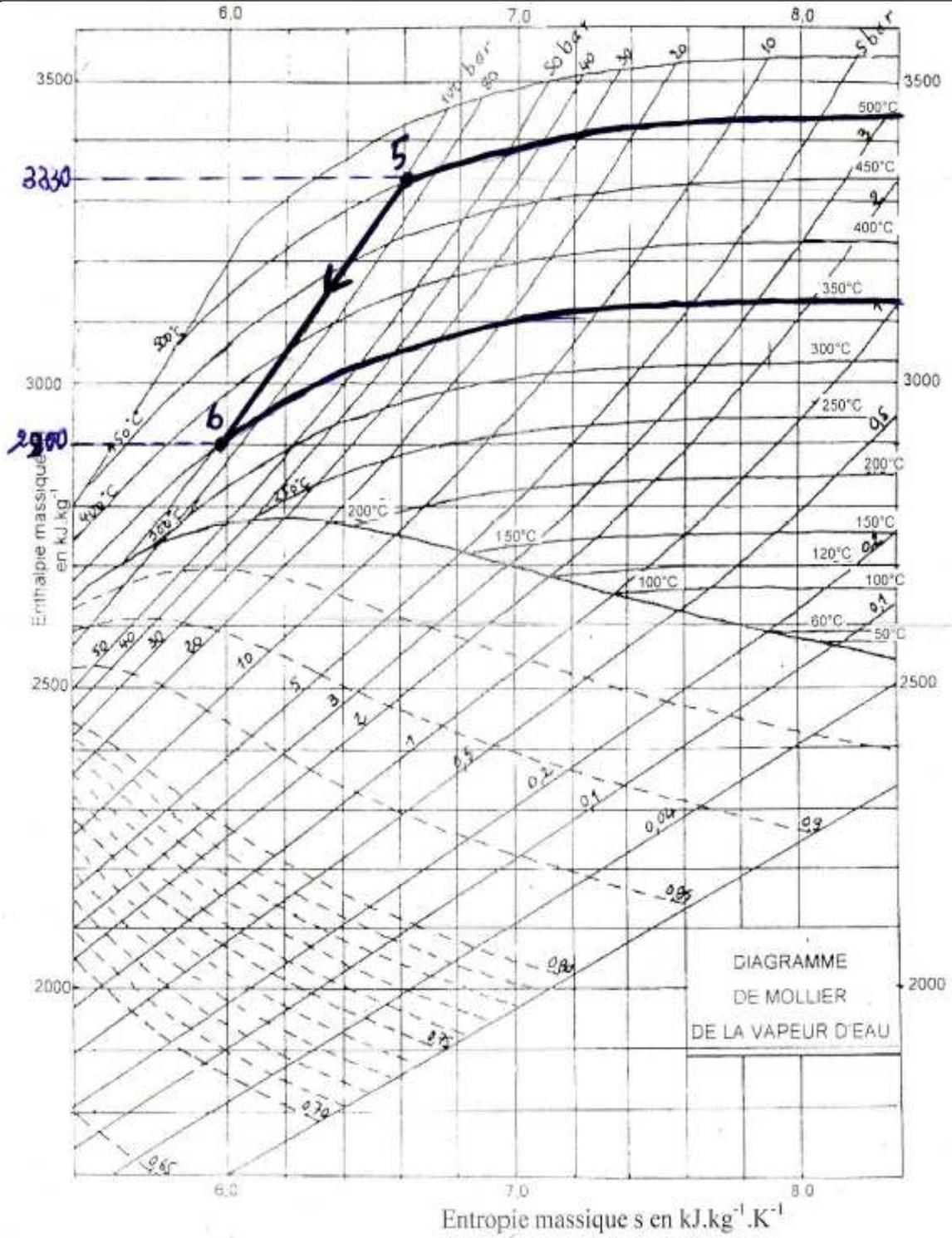
V. Table de la vapeur saturée

Tableau 1 Table de la vapeur saturée

Vapeur saturée					Eau	
P abs. bars	Temp. vapo- risa- tion °C	ρ kg/m ³	enthalpie massique Vaporisa- tion kJ/kg	enthalpie massique Vapeur kJ/kg	Chal. Mas. kJ/kg°C	enthalpie massique Eau liquide kJ/kg
0,1	45,83	0,0682	2392,9	2584,8	4,1857	191,83
0,2	60,09	0,1307	2358,4	2609,9	4,1846	251,45
0,3	69,12	0,1912	2336,1	2625,4	4,1855	289,3
0,4	75,88	0,2504	2319,2	2636,9	4,1862	317,65
0,5	81,34	0,3086	2305,4	2646	4,1869	340,56
0,6	85,95	0,366	2293,6	2653,6	4,1877	359,93
0,7	89,96	0,4228	2283,3	2660,1	4,1882	376,77
0,8	93,51	0,4792	2274	2665,8	4,1891	391,72
0,9	96,71	0,535	2265,6	2670,9	4,1899	405,21
1	99,63	0,5903	2257,9	2675,4	4,1906	417,51
1,0133	100	0,5977	2256,9	2676	4,1906	419,06
1,2	104,81	0,7003	2244,1	2683,4	4,192	439,36
1,3	107,13	0,7547	2237,8	2687	4,1929	449,19
1,6	113,32	0,9166	2220,9	2696,2	4,195	475,38
1,8	116,93	1,0233	2210,8	2701,5	4,1965	490,7
2	120,23	1,1294	2201,6	2706,3	4,1978	504,7
2,5	127,43	1,392	2181	2716,4	4,2011	535,34
3	133,54	1,6513	2163,2	2724,7	4,2042	561,43
3,6	139,86	1,9596	2144,4	2732,9	4,208	588,53
4	143,62	2,1636	2133	2737,6	4,2102	604,67
4,5	147,92	2,4201	2119,7	2742,9	4,2128	623,16
5	151,84	2,6688	2107,4	2747,5	4,2158	640,12
5,5	155,46	2,9197	2095,9	2751,7	4,2183	655,78

6	158,84	3,1696	2085	2755,5	4,2207	670,42
6,5	161,99	3,4188	2074,7	2758,8	4,2232	684,12
7	164,96	3,667	2064,9	2762	4,2256	697,06
7,5	167,75	3,9185	2055,5	2764,8	4,2283	709,29
8	170,41	4,1615	2046,5	2767,5	4,2306	720,94
8,5	172,94	4,4092	2037,9	2769,9	4,2328	732,02
9	175,36	4,6555	2029,5	2772,1	4,2349	742,64
9,5	177,66	4,902	2020,9	2775	4,2374	752,81
10	179,88	5,1467	2013,6	2776,2	4,2395	762,61
11	184,07	5,637	1998,5	2779,7	4,2437	781,13
12	187,96	6,1275	1984,3	2782,7	4,2479	798,43
13	191,61	6,6181	1970,7	2785,4	4,2519	814,7
14	195,04	7,1073	1957,7	2787,8	4,2559	830,08
15	198,29	7,593	1945,2	2789,9	4,2598	844,67
16	201,37	8,0841	1933,2	2791,7	4,2636	858,56
17	204,31	8,5763	1921,5	2793,4	4,2672	871,84
18	207,11	9,0662	1910,3	2794,8	4,2711	884,58
19	209,8	9,5511	1899,3	2796,1	4,2746	896,81
20	212,37	10,0503	1888,6	2797,2	4,2783	908,59
22	217,24	11,0314	1868,1	2799,1	4,2854	930,95
24	221,78	12,0192	1848,5	2800,4	4,2922	951,93
26	226,04	13,0107	1829,6	2801,4	4,2989	971,72
28	230,05	14,0076	1811,5	2802	4,3055	990,48
34	240,88	17,0271	1760,3	2802,1	4,325	1041,80
38	247,31	19,0694	1728,4	2801,1	4,3375	1072,70
42	253,24	21,1372	1697,8	2799,4	4,35	1101,60
46	258,75	23,2342	1668,3	2797	4,3625	1128,80
50	263,91	25,3614	1639,7	2794,20	4,3746	1154,50

Annexe IX : Diagramme de mollier pour la vapeur



Annexe X : Diagramme Enthalpique du Fluide R22

