

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GM 0498

ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE

**Centre de Thlès**

Département Génie Mécanique

# PROJET DE FIN D'ÉTUDES

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception

SUJET :

Etude de faisabilité d'une unité de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau fonctionnant grâce à une centrale électro-solaire thermodynamique.

Auteurs : M. Mbaye SECK et M. Moussa DIOP

Directeur : M. Banda NDOYE

Juillet 2007

## REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à Dieu, pour nous avoir donné le courage et la grâce d'accomplir ce travail qui est certes le fruit de notre travail mais aussi de l'appui et des conseils de quelques personnes, nous remercions :

- Nos parents, pour leurs sacrifices et inlassables efforts qu'ils ne cessent de déployer afin que nous réussissions et que nous nous épanouissions ;
- Monsieur Banda NDOYE, Directeur du projet (enseignant à l'ESP), pour son encadrement et ses conseils ;
- Monsieur Cheikh THIAM, ingénieur à AIR LIQUIDE, pour sa disponibilité et ses conseils ;
- Monsieur Mamadou SARR, professeur à l'ESP, pour sa disponibilité et sa collaboration ;
- Monsieur Papa Mody NDIAYE, pour ses conseils ;
- Tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à l'accomplissement de ce travail, particulièrement tout le personnel de l'ESP (centre de Thiès) et les camarades de promotion.

## SOMMAIRE

Le but de ce travail est de faire l'étude de faisabilité technique et financière d'une centrale électro-solaire thermodynamique devant produire de l'hydrogène très pur par électrolyse de l'eau. Cette étude est effectuée pour assurer la demande au Sénégal et dans la sous région.

Dans un premier temps, nous avons procédé à une étude de marché au Sénégal, auprès de AIR LIQUIDE, et dans la sous région, à travers Internet. D'après les résultats de cette étude, nous nous sommes rendus compte qu'il existe des privés méconnus dans la commercialisation du produit. La non réglementation du commerce de l'hydrogène nous pousse à estimer la demande future à 2 000 m<sup>3</sup> par an.

En second lieu, sur la base d'une étude bibliographique, nous avons énuméré toutes les utilisations actuelles de l'hydrogène, présenté d'autres méthodes de production et fait le choix de celle à adopter parmi d'autres pour son stockage qui est énergivore.

Dans la partie technique, il était question d'étudier l'unité afin de choisir tous les appareils entrant dans la chaîne de production et de modéliser le système. La simulation pour le dimensionnement de la chaîne, initialement prévue avec FORTRAN, a été annulée par manque de temps. Néanmoins, nous avons réalisé un dimensionnement basé sur le choix de rendements théoriques des éléments du système.

Quant à l'étude financière, elle constitue la phase dans laquelle a été étudiée la rentabilité du projet à travers la détermination d'indices tels que la valeur actuelle nette (VAN) et le délai de récupération des capitaux investis (DRC). Ceux-ci ont révélé que le projet n'était financièrement pas rentable.

A la suite de ce travail, les résultats obtenus montrent qu'un projet de cette nature n'est pas rentable dans les pays en développement où la demande en hydrogène est trop limitée. Cependant, les avantages liés au caractère non polluant de l'hydrogène restent confirmés.

**Mots-clés :** faisabilité – hydrogène - électro-solaire – thermodynamique – modélisation – rentabilité – VAN – DRC – dimensionnement – pollution.

---

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: les utilisations de l'hydrogène.....	6
Tableau 2 : Caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration.....	34
Tableau 3 : caractéristiques du HITEC et son stockage.....	38
Tableau 4 : puissance des appareils.....	71

---

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Présentation du système.....	15
<b>Figure 2</b> : Electrolyseur à électrodes monopolaire.....	19
<b>Figure 3</b> : Electrolyseur à électrodes bipolaires.....	20
<b>Figure 4</b> : Synoptique de l'alimentation stabilisée.....	21
<b>Figure 5</b> : Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.....	28
<b>Figure 6</b> : Système à réflecteur parabolique.....	29
<b>Figure 7</b> : Système de centrale à tour.....	30
<b>Figure 8</b> : Schéma simplifié du système primaire.....	39
<b>Figure 9</b> : Calcul de concentration.....	41
<b>Figure 10</b> : Pertes par réflexion.....	44
<b>Figure 11</b> : Schéma d'un absorbeur.....	45
<b>Figure 12</b> : Schéma simplifié du système secondaire.....	57
<b>Figure 13</b> : Ecoulement en présence de chicane.....	62

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	iv
TABLE DES MATIERES.....	v
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....	2
I-1 : GENERALITES .....	2
I-2 : LES PROPRIETES DE L'HYDROGENE.....	2
I-3 : LES DIFFERENTES UTILISATIONS DE L'HYDROGENE .....	3
I-4 : LES AUTRES METHODES DE PRODUCTION D'HYDROGENE.....	6
<i>I-4-1 : La production à partir de combustibles fossiles.....</i>	<i>6</i>
I-4-1-1 : Par vaporeformage.....	6
I-4-1-2 : Par Oxydation partielle.....	7
I-4-1-3 : Par Reformage auto-thermique.....	8
<i>I-4-2 : La transformation thermochimique de la biomasse.....</i>	<i>8</i>
<i>I-4-3 : Par photolyse de l'eau.....</i>	<i>9</i>
I-5 : LE STOCKAGE DE L'HYDROGENE .....	10
I-5-1 : Sous forme liquide à basse température (liquéfié).....	11
I-5-2 : Sous forme gazeuse sous pression (comprimé).....	11
I-5-3 : Sous forme solide (hydrure métallique).....	12
I-6 : CONCLUSION PARTIELLE.....	12
CHAPITRE II : PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU A L'AIDE D'UNE CENTRALE ELECTRO-SOLAIRE THERMODYNAMIQUE.....	13
II-1 : PRESENTATION DU SYSTEME .....	13
II-2 : L'ETUDE DU SYSTEME .....	16
II-2-1 : <i>Système tertiaire.....</i>	<i>16</i>
II-2-1-1 : Electrolyse de l'eau .....	16

II-2-1-2 : La cellule d'électrolyse.....	16
a : L'électrolyte .....	16
b : Les électrodes.....	17
c : Le diaphragme .....	18
II-2-1-3 : L'électrolyseur.....	18
a : Conception des appareils industriels .....	18
II-2-1-4 : L'alimentation électrique.....	20
a : Alimentation stabilisée .....	21
b : Le transformateur triphasé .....	21
<i>II-2-2 : Système secondaire.....</i>	<i>22</i>
II-2-2-1 : L'alternateur .....	22
II-2-2-2 : La turbine.....	25
a : Définition.....	25
b : Le fonctionnement .....	26
c : Les type de turbines.....	27
d : générateur de vapeur .....	28
<i>II-2-3 : Le système primaire.....</i>	<i>28</i>
II-2-3-1 : Le concentrateur .....	28
II-2-3-2 : Le réflecteur cylindro-parabolique .....	28
II-2-3-3 : Le réflecteur parabolique.....	29
II-2-3-4 : Les héliostats .....	29
<i>II-2-4 : Les aspects techniques.....</i>	<i>30</i>
II-2-4-1 : Concentration .....	30
II-2-4-2 : La Filière parabolique.....	31
II-2-4-3 : La filière centrale à tour (héliostats).....	32
II-2-4-4 : Filière cylindro-parabolique .....	33
a : Réception du rayonnement.....	35
b : L'absorbeur .....	35
c : Le réflecteur .....	36
d : La concentration effective.....	36
e : Le fluide caloporteur .....	36
d : Le stockage du fluide caloporteur .....	37
II-3 : CONCLUSION PARTIELLE .....	38

CHAPITRE III : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME.....	39
III-1 : MODELISATION DU SYSTEME PRIMAIRE .....	39
<i>III-1-1 : Introduction</i> .....	39
<i>III-1-2 : Modèle de l'ensoleillement</i> .....	39
III-1-2-1 : Rappel des données astronomiques.....	40
III-1-2-2 : Flux incident du rayonnement solaire .....	40
<i>III-1-3 : Modèle du miroir cylindro-parabolique</i> .....	41
III-1-3-1 : Calcul de la concentration produite par le miroir cylindro-parabolique .....	41
III-1-3-2 : Calcul des pertes énergétiques dues à la géométrie de la parabole.....	43
<i>III-1-4 : Modèle de l'absorbeur</i> .....	44
a : Les pertes par réflexion .....	44
III-1-4-2 : Deuxième modèle.....	45
a : Transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur .....	47
b : Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'enveloppe de verre.....	48
c : Transfert de chaleur entre l'enveloppe de verre et l'environnement.....	48
d : Différence de température entre le fluide et l'absorbeur .....	49
<i>III-1-5 : Modèle du débit du HITEC</i> .....	51
<i>III-1-6 : Modèle de stockage</i> .....	52
III-1-6-1 : Modèle du stockage « chaud » .....	52
III-1-6-2 : Modèle du stockage « froid».....	54
a : Pertes du stockage .....	54
III-2) MODELISATION DU SYSTEME SECONDAIRE .....	57
<i>III-2-1 : Introduction</i> .....	57
<i>III-2-2 : Modèle des Echangeurs</i> .....	58
III-2-2-1 : Description du modèle .....	58
III-2-2-2 : Equations exprimant les échanges .....	59
a : Coefficient d'échange global.....	61
b : Coefficient d'échange KH à travers le film intérieur.....	61
c : Coefficient d'échange KE à travers le film externe .....	62
<i>III-2-3 : Modèle du générateur de vapeur</i> .....	63
III-2-3-1 : L'économiseur EQ .....	65
III-2-3-2 : L'évaporateur EV.....	66
III-2-3-3 : Le surchauffeur ZU .....	66



III-2-4 : <i>Modèle de la turbine</i> .....	67
III-2-4-1 : <i>Introduction</i> .....	67
III-2-4-2 : <i>Equation de la chute isentropique</i> .....	67
III-2-5 : <i>Le stockage de l'hydrogène</i> .....	68
III-3 : <b>DIMENSIONNEMENT</b> .....	69
III-3-1 : <i>Détermination de la charge</i> .....	69
III-3-1-1 : <i>Puissance de l'électrolyseur</i> .....	69
III-3-1-2 : <i>Quantité d'eau nécessaire</i> .....	70
III-3-1-3 : <i>La puissance des moteurs pour la compression</i> .....	70
III-3-2 : <i>La charge totale</i> .....	70
III-3-3 : <i>La puissance des autres appareils</i> .....	71
III-4 : <b>CONCLUSION PARTIELLE</b> .....	72
<b>CHAPITRE IV : ETUDE FINANCIERE</b> .....	<b>73</b>
IV-1 : <b>ETUDE DE COUT</b> .....	73
IV-1-1 : <i>Coût des équipements de production</i> .....	73
IV-1-2 : <i>Coût du matériel et mobilier de bureau</i> .....	73
IV-1-3 : <i>Coût des matières premières</i> .....	74
IV-1-4 : <i>Coût du personnel</i> .....	74
IV-1-5 : <i>Coût des équipements divers et de maintenance</i> .....	74
IV-1-6 : <i>Coût de construction Génie civil</i> .....	75
IV-2 : <b>ETUDE FINANCIERE</b> .....	75
IV-2-1 : <i>Les investissements</i> .....	75
IV-2-2 : <i>Les projections financières</i> .....	75
IV-2-3 : <i>L'amortissement</i> .....	76
IV-2-4 : <i>Les recettes d'exploitation</i> .....	76
IV-2-5 : <i>Détermination du prix de vente du produit</i> .....	76
IV-2-5-1 : <i>Détermination des coûts variables</i> .....	77
IV-2-5-2 : <i>Détermination des coûts fixes</i> .....	77
IV-2-6 : <i>La rentabilité du projet</i> .....	78
IV-2-6-1 : <i>Le Délai de Récupération du Capital Investi (DRC)</i> .....	78
IV-2-6-2 : <i>La Valeur Actuelle Nette (VAN)</i> .....	78
IV-2-7 : <i>Etude financière en tenant compte de l'oxygène produite par l'électrolyse</i> .....	79
IV-3 : <b>CONCLUSION PARTIELLE</b> .....	79

CONCLUSION GENERALE.....	80
BIBLIOGRAPHIES .....	82
ANNEXES .....	84

## INTRODUCTION

Depuis la révolution industrielle, la production énergétique internationale ne cesse d'augmenter afin de satisfaire les besoins immenses dans ce domaine. En effet, généralement cette production énergétique quantitative se fait avec des dégagements de gaz à effet de serre qui constitue des menaces sérieuses pour la sante publique par destruction de la couche d'ozone. Face à cette situation, les gens s'entendent sur le fait que l'utilisation des sources d'énergie renouvelable devrait remplacer les combustibles actuels qui seront bientôt épuisés. L'hydrogène semble être la source et le vecteur d'énergie idéal. Il est disponible en très grande quantité dans l'eau. Les produits de sa combustion sont non polluants car on régénère l'eau. Il conduit à une meilleure utilisation des ressources ce qui signifie qu'on en retire une plus grande quantité d'énergie que la plupart des combustibles actuels. Il peut servir de moyen de transport et de stockage d'énergie.

Pour des raisons économiques autant qu'écologiques, l'heure de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique semble venue. Pour qu'il puisse s'imposer, il faudra apporter des réponses aux questions cruciales qui se posent encore, la première étant : comment produire cet hydrogène en n'émettant que peu (ou pas) de gaz à effet de serre ?

La seconde question porte sur l'infrastructure à mettre en place, jusqu'au stockage. C'est dans ce contexte que plusieurs axes de recherches sont lancés.

Les méthodes permettant de produire de l'hydrogène sont nombreuses, mais pour répondre à nos questions, nous avons porté notre choix sur la production par électrolyse de l'eau. Pour l'alimentation de notre unité en courant électrique, nous allons étudier plus particulièrement l'énergie solaire (énergie renouvelable et inépuisable) thermodynamique qui vise à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique (et électrique) à travers un cycle thermodynamique.

Après une étude bibliographique, nous passerons à l'étude et au choix de tous les éléments de notre unité de production qui sera subdivisée en trois sous systèmes, ensuite nous passerons à la modélisation et ferons un dimensionnement approximatif de chaque sous système, afin nous terminerons par l'étude financière.

## CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I-1 : Généralités [1]

Le dihydrogène, communément appelé hydrogène, a été découvert en 1971 par Boyle. Cavendish étudia ses propriétés et Lavoisier qui au cours d'une expérience observant que la combustion de l'hydrogène produit de l'eau, lui donna son nom hydrogène ; du grec hydro, eau et gène producteur.

Bien qu'on le trouve en abondance dans l'univers (gaz interstellaire), il n'existe pas à l'état naturel dans l'environnement terrestre : on le trouve plutôt à l'état d'atome lié à d'autres individus chimiques souvent par une liaison dite hydrogène (C, O) et est présent, par exemple dans l'eau, le sucre, les protéines ou les hydrocarbures.

Pourquoi l'hydrogène ?

Certaines réponses à cette question relèvent autant d'un optimisme excessif que d'un pessimisme exagéré. Comme souvent dans de tels débats, la vérité se situe entre ces deux extrêmes. Elle résulte de tendances lourdes : explosion de la demande énergétique, tarissement des ressources fossiles et réchauffement de la planète imputable à un effet de serre excessif.

### I-2 : Les propriétés de l'hydrogène [1]

#### En phase gazeuse

Masse volumique du gaz (1,013 bar et 15 °C) : 0.085 kg/m<sup>3</sup>, gaz le plus léger

Masse volumique du gaz (1,013 bar au point d'ébullition) : 1.312 kg/m<sup>3</sup>

Facteur de compressibilité (Z) (1,013 bar et 15 °C) : 1.001

Densité (air = 1) (1,013 bar et 21 °C) : 0.0696

Volume spécifique (1,013 bar et 21 °C) : 11.986 m<sup>3</sup>/kg

Combustion à haut pouvoir calorifique élevé (essence, 45 Mj/kg) : 120 Mj/kg

#### En phase liquide

Masse volumique phase liquide (1,013 bar au point d'ébullition) : 70.973 kg/ m<sup>3</sup>

Equivalent gaz/liquide (1,013 bar et 15 °C) : 844 vol/vol

Point d'ébullition (1,013 bar) : -252.8 °C

#### En phase solide

Point de fusion / -259 °C

Chaleur latente de fusion (1,013 bar, au point triple) : 58.158 kJ/kg

Étonnamment, l'hydrogène est un métal : lorsqu'il est sous très haute pressions et très basse température, il se cristallise. Dans le tableau périodique des éléments, il est d'ailleurs dans la colonne des métaux alcalins.

N'étant pas présent à l'état solide sur terre, il n'est toutefois pas considéré comme un métal en chimie.

#### **Autres données**

Gaz incolore, inodore, et insipide

Solubilité dans l'eau (1,013 bar et 0 °C) : 0.0214 vol/vol

Concentration dans l'air : 0.00005 % vol

Température d'auto inflammation : 560 °C

### **I-3 : Les différentes utilisations de l'hydrogène [1] [2].**

Les voitures à hydrogène peuvent être une façon importante de résoudre notre dépendance au pétrole et de stopper le réchauffement de la planète. Dans le futur, les énergies renouvelables (énergies éolienne, solaire, hydraulique) seront produites puis stockées dans de l'hydrogène et utilisées dans des voitures à pile à combustible. En outre l'utilisation de réservoirs d'hydrogène et de voitures à piles à combustible fournit aux constructeurs automobiles de nouvelles possibilités dans le design des voitures et leur production.

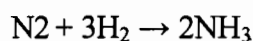
Une voiture à hydrogène utilise de l'hydrogène à la place de l'essence. L'hydrogène est stocké dans un réservoir soit sous pression, sous forme liquide ou dans des hydrures métalliques. Depuis le réservoir, l'hydrogène est conduit à la pile à combustible où il est converti en électricité grâce à un procédé électrochimique. L'électricité est ensuite transmise aux moteurs électriques dans les roues où il nourrit le moteur. Les voitures à l'hydrogène ont une efficacité supérieure aux machines à combustion traditionnelles. Habituellement, l'efficacité des machines à combustion est autour de 20-25%, alors qu'une pile à combustible PEM (à membrane échangeuse de protons) aura une efficacité jusqu'à 60% supérieure. Une pile à combustible produit de l'eau qui est la seule émission, ce qui en fait une technologie énergétique propre et efficace, spécialement si l'hydrogène a été produit à partir d'énergies renouvelables.

Le challenge le plus important des voitures à hydrogène est le stockage de l'hydrogène. Un

autre challenge pour les voitures à pile à combustible est le fait qu'il n'y a que quelques stations service. C'est le problème de la "poule et de l'œuf". Les compagnies énergétiques ne construiront pas de station service hydrogène tant qu'il n'y aura pas de voiture à fournir en hydrogène, et les consommateurs n'achèteront pas de voitures hydrogène tant qu'ils ne pourront pas "faire le plein" partout où ils conduisent. Pour développer l'utilisation de l'hydrogène dans le transport routier, il y a eu beaucoup d'initiatives comme l'autoroute de l'Hydrogène. En Californie le but est d'établir 50-100 stations service hydrogène avant 2010. Avec le Lien Hydrogène les pays du nord (le Danemark, la Suède, la Norvège et le Nord de l'Allemagne) seront reliés ensemble par un réseau établissant un couloir de station service hydrogène.

L'hydrogène est utilisé principalement :

- pour ses propriétés d'agent réducteur dans l'industrie pétrolière pour la désulfuration de l'essence et du gazole (37% de la production totale) ;
- dans l'industrie chimique pour la fabrication d'ammoniaque suivant la réaction chimique exothermique en phase gazeuse (50%) :



de méthanol (8%), de polymères comme les polyuréthanes et les polycarbonates ;

- dans l'industrie du verre ou des semi-conducteurs et dans la métallurgie pour la transformation de l'acier.
- 

Ces informations sont ainsi regroupées dans le tableau 1.

industrie	applications
chimie	L'utilisation la plus importante de l'hydrogène se trouve dans la synthèse de l'ammoniac (50 %) suivant la réaction chimique exothermique en phase gazeuse $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$
Alimentaire et boissons	L'hydrogène pur est utilisé pour la production de plastiques, polyester et nylon. $\text{H}_2$ est aussi utilisé dans

	l'hydrogénation des amines et acides gras (huiles alimentaires)
Verre, chaux et ciment	L'hydrogène est principalement utilisé pour la création en combinaison avec l'azote d'une atmosphère réductrice au-dessus du bain d'étain dans le procédé FLOAT. On utilise l'hydrogène pour le traitement thermique (flamme oxy -hydrogène) du verre creux et des performes en fibre optique.
Industrie des métaux	Atmosphère réductrice pour des procédés de traitement thermique.
Laboratoires et analyses	L'hydrogène est utilisé comme gaz porteur en chromatographie en phase gazeuse et dans de nombreuses techniques analytiques. Les plus communes sont l'utilisation dans les flammes des détecteurs à ionisation de flamme (FID) ou des détecteurs à photométrie de flamme (FPD). On utilise aussi des mélanges contenant de l'hydrogène dans les appareils d'étincelage et dans la mesure des hydrocarbures totaux.
Soudage, coupage et projection thermique	Traitement thermique de divers métaux
Pétrole et divers	Désulfuration du fuel et de l'essence
électronique	L'hydrogène est généralement utilisé comme gaz de balayage lors des étapes de dépôt de silicium ou de croissance cristalline, aussi bien que dans le brassage sous atmosphère et le recuit de film de cuivre. L'emploi d'hydrogène avec des gaz inertes protecteurs (H <sub>2</sub> dilué dans de l'azote) permet théoriquement d'éliminer la totalité de l'oxygène ainsi que ses inconvénients dans un milieu essentiel pour les procédés à haute ou moyenne températures.
Espace et aéronautique	L'hydrogène est utilisé sous forme liquide dans les ergols pour la propulsion des étages cryogéniques des

	fusées Ariane.
divers	Avec l'hydrogène on fabrique de l'eau oxygénée $H_2O_2$ utilisée comme décolorant ou désinfectant ou pour le blanchiment de la pâte à papier.

**Tableau 1 : Les utilisations de l'hydrogène**

### **I-4 : Les autres méthodes de production d'hydrogène [2]**

Hormis l'électrolyse de l'eau, il existe d'autres méthodes de production d'hydrogène que nous avons notées :

#### **I-4-1 : La production à partir de combustibles fossiles**

Dans le passé, la production industrielle de l'hydrogène à partir des hydrocarbures s'est orientée vers les options les plus performantes d'un point de vue économique. Sans, surprise, la matière première utilisée de façon dominante est, de loin, le gaz naturel, constitué principalement de méthane. D'autres énergies fossiles sont parfois utilisées puisqu'elles contiennent aussi de l'hydrogène qui peut être produit par la réaction d'oxydation partielle, toutes ces solutions qui partent des énergies fossiles passent par la production de gaz de synthèse, mélange d'oxyde de carbone (CO) et d'hydrogène ( $H_2$ ).

Les technologies dominantes aujourd'hui pour la production de gaz de synthèse à partir des hydrocarbures sont le vaporeformage (reformage à la vapeur), l'oxydation partielle et le reformage auto thermique, combinaison des deux précédentes, utilisé surtout pour la production de carburant liquide de synthèse.

##### ***I-4-1-1 : Par vaporeformage***

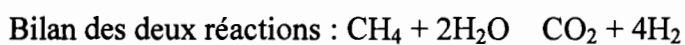
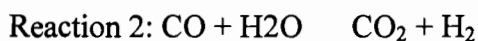
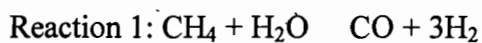
Le reformage à la vapeur consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbure en gaz de synthèse (mélange  $H_2$ , CO,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$  et autres impuretés) par réaction avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel. Cette transformation a lieu à haute température (840 à 950°C) et à pression modérée (de l'ordre de 20 à 30 bars). Elle peut être suivie par différentes opérations qui conduisent à la production d'hydrogène mais donc aussi à l'obtention de



carburant de synthèse. Dans tous les cas, la charge d'une unité de vaporeformage peut être du gaz naturel (charge de référence) ou du méthane.

#### ➤ **Le vaporeformage du gaz naturel**

Le gaz naturel contient essentiellement du méthane. Toutefois, il doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de vaporeformage. Pour maximiser la production de l'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO.



La première réaction correspond au vaporeformage proprement dit. Elle est endothermique et se caractérise par un rapport H<sub>2</sub>/CO de l'ordre de 3. La deuxième réaction correspond à la conversion du CO. Elle est légèrement exothermique et plus ou moins complète, selon qu'elle est effectuée en 1 ou 2 étapes. Globalement, le bilan des deux réactions est endothermique. Les deux dernières étapes consistent à séparer le CO<sub>2</sub> et l'hydrogène puis à éliminer les dernières traces d'impuretés.

#### ***1-4-1-2 : Par Oxydation partielle***

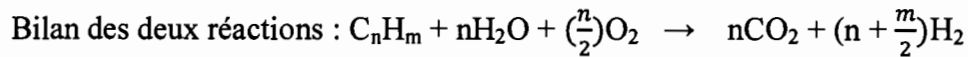
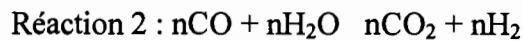
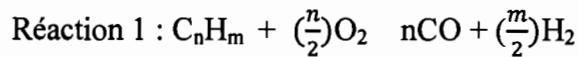
L'oxydation partielle peut être effectuée sur un éventail de produits beaucoup plus large allant du gaz naturel aux résidus lourds, et même au charbon. D'un point de vue économique, le traitement des charges lourdes se justifie quand le surinvestissement consenti est compensé par un coût réduit de la matière première, le coke de pétrole par exemple. En revanche, les investissements et les conditions opératoires sont plus contraignants.

A haute température (1200 à 1500 °C) et à pression élevée (20 à 90 bars ou plus), en présence d'un oxydant (l'air ou plus couramment l'oxygène) et d'un modérateur de température (la vapeur d'eau), l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit, à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur.

#### ➤ **Oxydation partielle de résidu sous vide**

Les deux principales réactions sont la production de gaz de synthèse (réaction globale simplifiée) et la conversion du monoxyde de carbone

Un résidu sous vide type contient plus d'une cinquantaine d'atomes de carbone. Il est symbolisé ici par la chaîne hydrocarbonée  $C_nH_m$  qui correspond à une réaction H/C égal à  $m/n$ .



La première réaction (température comprise entre 1300 et 1400 °C) correspond à l'oxydation partielle proprement dit. Elle est exothermique et se caractérise par un rapport H/CO de l'ordre de 0.75 (pour un rapport H/C de l'ordre de 1.5). Elle représente le résultat global d'un grand nombre de réactions qui conduisent à la formation de CO et d' $H_2$  mais aussi de :  $H_2O$ , C et CH.

### ***1-4-1-3 : Par Reformage auto-thermique***

Le procédé auto-therme de reformage auto-thermique est probablement la plus intéressante des prochaines évolutions des procédés de production d'hydrogène à partir d'hydrocarbure. Son principal atout est de compenser (dans un même réacteur à lit fixe) les réactions endothermiques du vaporeformage par les réactions exothermiques de l'oxydation partielle. Ce procédé suscite beaucoup d'intérêt pour les grosses capacités et notamment la filière GtL (filrière qui permet de convertir le gaz naturel en produit liquide « pétrolier et notamment en carburant diesel ») car le rapport CO/H peut être ajusté avant entrée dans le réacteur. Comme pour l'oxydation partielle, le coût de l'oxygène est ici un paramètre important. Grâce à des membranes céramiques qui restent à valider en production industrielle, il serait possible d'éviter la dispendieuse étape du fractionnement d'air. La filière GtL est riche de potentiel car elle offre une source alternative de très bonne qualité aux carburants conventionnels issus du pétrole et est aussi une voie alternative à la filière gaz naturel liquéfié pour la mise en exploitation.

### **1-4-2 : La transformation thermochimique de la biomasse.**

La biomasse est constituée de tous les végétaux qui se développent à la surface de la terre. Elle effectue le captage et le stockage de l'énergie solaire qu'il est ensuite possible de restituer sous forme de combustion ou de carburant, sans impact sur l'effet de serre, par des transformations plus ou moins efficaces aux plans énergétique et économique.

La transformation thermochimique, qui conduit à la gazéification des

substances organiques et végétales, convient particulièrement bien à la valorisation des produits lignocellulogiques comme le bois et les pailles.

### **Procédé de gazéification de la biomasse**

Il comporte une succession d'opérations qui nécessitent simultanément le transfert de grandes quantités de chaleur et le contrôle de la proportion et du temps de contact des réactifs en présence.

Après l'opération de séchage très endothermique, la thermolyse consiste en la dégradation thermique des produits qui aux alentours de 600°C ont perdu 70 % de leur masse devenue gazeuse alors que 30 % de la masse d'origine demeure solide et représente le charbon de bois, essentiellement constitué de carbone (C). La gazéification du carbone se poursuit jusque vers 900 et 1000 °C à l'aide d'un réactif comme l'air, l'oxygène (O<sub>2</sub>) ou de la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), qui réalise une oxydation plus ou moins complète du carbone en monoxyde de carbone (CO) ou en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). L'utilisation d'air, à ce stade, est peu coûteuse mais introduit dans le produit final de l'azote indésirable. L'oxygène provenant de la distillation de l'air, est cher est dangereux. L'utilisation d'oxygène ou d'air favorise la formation d'oxyde de carbone. Avec la vapeur d'eau en tant que réactif, une quantité supplémentaire d'hydrogène (H<sub>2</sub>) est récupérée. Toutefois, un moyen de chauffage annexe doit être employé, par exemple par combustion de carbone ou de gaz de purge résiduels ou encore un apport d'énergie externe. L'obtention d'un gaz de bonne qualité et non corrosif nécessite l'élimination des acides et des goudrons résultant de la thermolyse. Il faut pour cela porter ces produits aux environs de 1200 ou 1300 °C ( étage haute température) afin de réaliser leur dégradation thermique (craquage) ou effectuer vers 800 à 900 °C une réaction catalysée qui permet d'éviter la fusion des cendres et la création de mâchefers constatées entre 900 et 1000 °C. L'utilisation d'un étage haute température permet aussi de réaliser simultanément le reformage du méthane (CH<sub>4</sub>) résiduel en CO et H<sub>2</sub>. Le gaz obtenu peut être raffiné pour en extraire l'hydrogène qui deviendra par cette filière le combustible propre et renouvelable.

### **I-4-3 : Par photolyse de l'eau**

Photolyse (décomposition chimique d'un corps par la lumière)

Des cellules photo électrochimiques (PEC) illuminées par la lumière solaire peuvent décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. De telles cellules emploient des électrodes photo actives immergées dans un électrolyte aqueux ou dans l'eau. Sous leur forme la plus

simple, elles peuvent être décrites comme des dispositifs photovoltaïque/électrolyte intégrés ou monolithiques. Une large variété de processus PEC et de photo catalyse susceptibles de dissocier l'eau sont étudiés de par le monde.

Bien qu'intrinsèquement simples, les aspects scientifiques et de développement des matériaux de cellules PEC pour la production d'hydrogène en sont encore au stade préliminaire mais fascinant de la recherche fondamentale.

Quatre étapes principales sont mises en jeu dans le processus photo électrochimique de dissociation de l'eau. La première est la génération d'une charge électronique à la surface de la photoanode soumise au rayonnement solaire, produisant des paires électron-trou. La deuxième est l'oxydation de l'eau à la photoanode par les trous, produisant des molécules d'oxygène ( $O_2$ ). La troisième étape est celle du transport des ions ( $H^+$ ) et des électrons de la photoanode à la cathode, respectivement via l'électrolyte et la connexion électrique (la cathode pouvant être une photocathode induite par la lumière). Enfin, la réduction des  $H^+$  à la cathode forme des molécules d'hydrogène ( $H_2$ ) à l'aide des électrons.

Le choix des matériaux de type n de la photoanode est déterminant pour les cellules PEC, avec deux critères : l'existence d'une bande interdite « parfaite » et la possibilité d'éviter la recombinaison des porteurs de charge. L'énergie minimale théorique du photon devant être absorbé par une photoanode « parfaite » est de 1.23 électronvolt (eV). C'est la force électromotrice minimale théorique nécessaire aux cellules PEC pour dissocier la molécule d'eau.

### **I-5 : Le stockage de l'hydrogène [3]**

L'hydrogène est un produit très volatil et inflammable, ce qui explique les difficultés rencontrées pour son stockage. En effet, il doit offrir un haut degré de sécurité et d'autre part des facilités d'usage en terme de densité d'énergie et de dynamique de stockage/déstockage pour permettre aux différentes applications de fonctionner dans des conditions techniques acceptables.

Aujourd'hui, il existe principalement trois modes de stockage. Ces différentes modes présentent chacun leurs avantages et leurs inconvénients selon des critères économiques, énergétiques, de capacité massique et volumique, de sécurité de stockage/déstockage.

### **I-5-1 : Sous forme liquide à basse température (liquéfié)**

Conditionner l'hydrogène sous forme liquide est une solution a priori attrayante. C'est d'ailleurs sous cette forme qu'il est utilisé dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est, après l'hélium, le gaz le plus difficile à liquéfier. Cette voie est séduisante en termes de capacité mais pose des problèmes énergétiques importants et des coûts élevés qui rendent son application plus difficile pour le grand public. En particulier, l'énergie nécessaire pour la liquéfaction pénalise gravement le rendement global de ce mode de stockage.

### **I-5-2 : Sous forme gazeuse sous pression (comprimé)**

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses.

Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Toutefois, pour atteindre des capacités compétitives, les réservoirs doivent résister à de très fortes tensions jusqu'à 700 bars. Mais cette compression a un coût.

Le risque de fuite d'hydrogène doit être également pris en considération compte tenu du caractère inflammable et explosif de ce gaz dans certaines conditions. Or en raison de la petite taille de sa molécule. L'hydrogène est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux. Il en fragilise, de plus, certains en les rendant cassants. L'étude du stockage haute pression consiste donc, pour l'essentiel, à éprouver la résistance des matériaux à l'hydrogène sous pression. Ces matériaux doivent être résistants mais relativement légers (mobilité oblige).

Les réservoirs métalliques, utilisés actuellement, se révèlent encore coûteux et lourds au regard de la quantité de gaz qu'ils peuvent emporter. Des réservoirs non métalliques mais en matériaux polymères sont en cours d'élaboration pour répondre à ces contraintes.

En conséquence, les procédés de liquéfaction comprennent obligatoirement les phases suivantes :

- purification et compression de l'hydrogène,
- pré refroidissement (cascade classique),
- conversion ortho-para à l'aide de catalyseurs (oxyde de chrome),
- liquéfaction,
- stockage en réservoir.

### **I-5-3 : Sous forme solide (hydrure métallique)**

Cette méthode repose sur la mise au point de matériaux à haute capacité de stockage :hydrures métalliques réversibles dans des conditions de température et de pression voisines des conditions ambiantes et matériaux carbonés (nanostructures, charbon activés etc....) pour le stockage de l'hydrogène par adsorption/compression à pression réduite. D'autres matériaux tels que les composés moléculaires à large cavité, présentent également des performances intéressantes. Les principales difficultés concernent la mise au point de ces matériaux et leurs systèmes associés de stockage satisfaisant aux critères principaux définis précédemment. De nombreuses recherches sont menées pour développer la conception à des coûts raisonnables. Une meilleure compréhension des phénomènes physico-chimiques d'interaction entre hydrogène et matériaux s'avère nécessaire. D'autre part, la maîtrise de la mise en œuvre de ces matériaux dans les, réservoirs adaptés doit être développé.

De nombreux éléments peuvent fixer l'hydrogène de façon réversible en quantité intéressantes.

Les critères de sélection pour un bon hydrure sont :

- absorption et désorption de  $H_2$  à température et pression modérées,
- durée de stockage à peu près illimitée,
- manipulation facile,
- capacité de stockage (d'absorption) élevée, même après un nombre de cycles,

sous pression modérée, les hydrures absorbent l'hydrogène ; en heure de pointe, on réduit la pression, augmente la température et l'on dégage ainsi l'hydrogène.

### **I-6 : Conclusion partielle**

L'hydrogène est très difficile à stocker, d'énormes moyens sont utilisés pour ne stocker que de faibles quantités. C'est pour quoi les constructeurs d'automobiles ont d'énormes problèmes pour le suffisamment et sûrement.

Son utilisation dans le transport n'est plus considérée comme impossible puisque en Irlande 30% des bus fonctionnent actuellement avec de l'hydrogène

C'est un produit très utilisé dans le monde surtout pour la production de l'ammoniac. En effet 50% de la production mondiale d'hydrogène est utilisée pour produire de l'ammoniac.

## **CHAPITRE II : PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE L'EAU A L'AIDE D'UNE CENTRALE ELECTRO-SOLAIRE THERMODYNAMIQUE**

### **II-1 : Présentation du système**

Le système peut être divisé en trois sous systèmes selon l'état de l'énergie, il se présente comme suit :

#### **Le système primaire**

Dans ce système l'énergie est essentiellement thermique. Les rayonnements solaires sont concentrés dans un récepteur qui transmet cette chaleur à un fluide caloporteur. Ce fluide transmet son énergie thermique au système secondaire par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur.

#### **Le système secondaire**

L'énergie cédée par le système primaire est recueillie et transformée à ce stade en énergie thermodynamique. Celui-ci nous permet d'obtenir une énergie mécanique via une turbine. Un alternateur transforme cette énergie en électricité et la transmet au système tertiaire.

#### **Système tertiaire**

L'énergie électrique reçue est transformée en énergie chimique par un électrolyseur. Nous obtenons ainsi de l'hydrogène et de l'oxygène à la sortie.

Le schéma suivant nous résume les différentes phases de notre système.

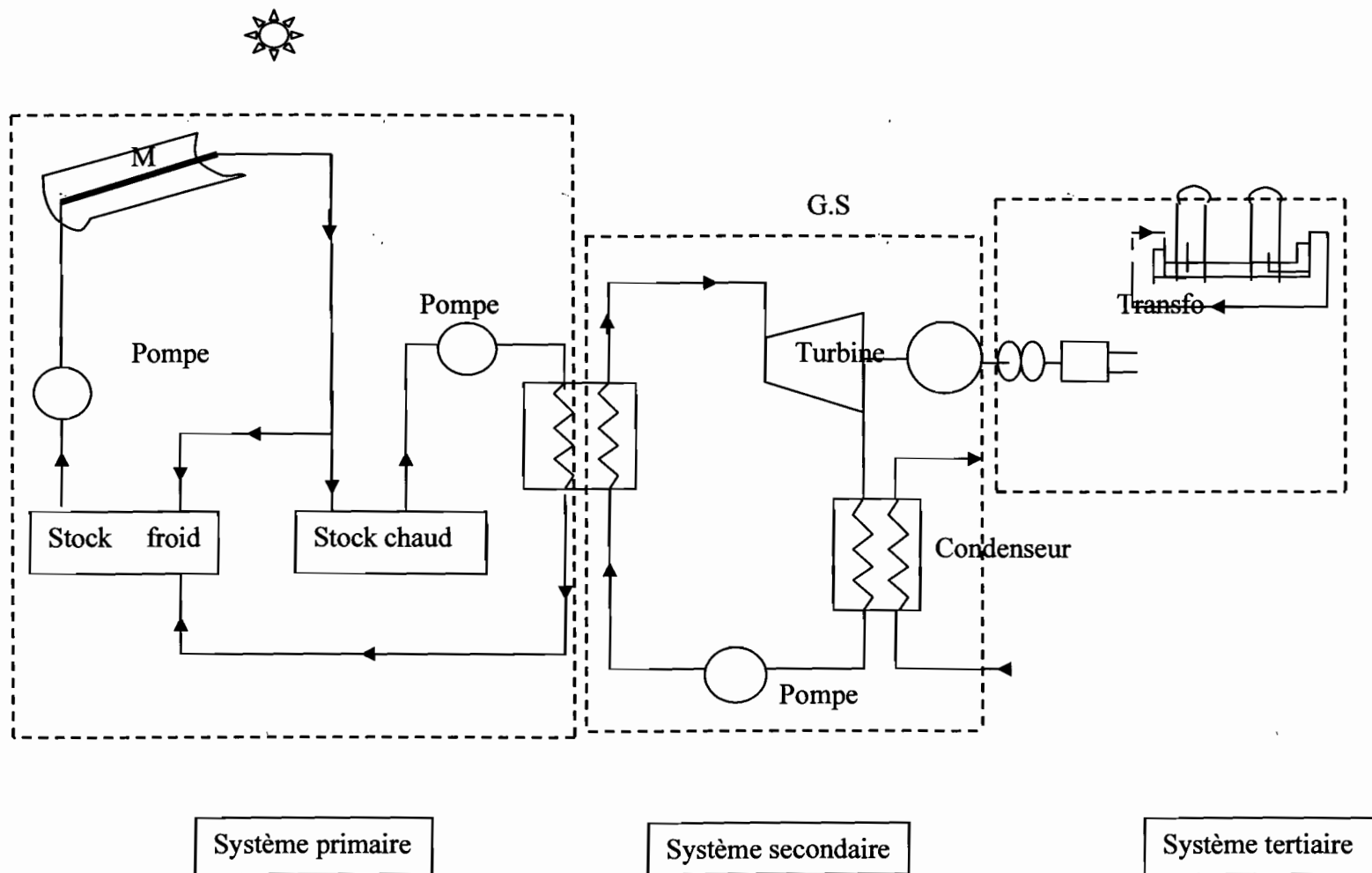


Figure 1 : Présentation du système



## **II-2 : L'étude du système**

Le choix des éléments du système dépend de la quantité d'hydrogène à produire et de leurs coûts. Pour plus de cohérence, nous commençons l'étude du système par le système tertiaire, puis le système secondaire et terminer avec le système tertiaire.

### **II-2-1 : Système tertiaire**

#### **II-2-1-1 : Electrolyse de l'eau**

L'électrolyse de l'eau consiste à faire passer un courant électrique dans une saumure d'hydroxyde de potassium. C'est un procédé aujourd'hui coûteux de production d'hydrogène. Il peut être mis en œuvre industriellement, dans les installations de plusieurs mégawatts, lorsque l'électricité est disponible à faible coût. Elle pourrait se développer aussi bien dans de petites installations utilisant des énergies renouvelables [4].

#### **II-2-1-2 : La cellule d'électrolyse**

Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) conducteurs électroniques reliées à un générateur de courant continu et d'un électrolyte (milieu conducteur ionique).

##### **a : L'électrolyte**

C'est une solution aqueuse conductrice de courant électrique à laquelle on peut faire subir une décomposition.

L'électrolyte de l'eau est en général une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration variable en fonction de la température de fonctionnement est :

- de 25 % en masse pour une température de 80 à 90 °C
- de 30 à 35 % à 120 °C
- de 40 % à 160 °C.

Ces concentrations correspondent à la conductivité électrique maximale de la solution à la température considérée. Le choix se porte de préférence sur des solutions de potasse au lieu de solution de soude, car :

- ✓ Pour une température donnée leur conductivité est supérieure à celle des solutions de soude ;
- ✓ Elles ont en générale une teneur plus faible en impureté chlorure liée à la fabrication d'hydroxyde ;

- ✓ Leur pression de vapeur saturante est inférieure pour une même température, ce qui permet de réduire le débit d'eau de réfrigération destiné à condenser la vapeur entraînée par l'hydrogène [4].

#### ➤ **Qualité de l'eau d'alimentation**

L'eau introduite dans l'électrolyseur doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'appareil et s'accumulent au fil de l'électrolyse. Elles finissent par perturber les réactions électrolytiques :

- ✓ Formation de boues ;
- ✓ Action des chlorures qui détruisent la protection par nickelage ou le nickel massif des anodes.

Après une première épuration, l'eau traverse un filtre à charbon actif, puis subit une déminéralisation totale par passage sur un filtre à couche mixte à échangeur d'ions.

#### ➤ **Qualité de l'hydroxyde de potassium**

Les concentrations en chlorure et en sulfate doivent être inférieures à 0.01 % en masse. Il est parfois ajouté directement du silicate de sodium ou de potassium en concentration correspondant à l'équilibre de la dissolution de l'amiante à la température considérée. Il est souhaitable d'éviter les renouvellements trop fréquents de la solution d'hydroxyde [4].

### **b : Les électrodes**

une bonne électrode doit être peu coûteuse, avoir une bonne rigidité mécanique, être résistante à la corrosion, avoir une bonne stabilité à long terme même lorsque l'on inverse la polarité du système ou qu'on laisse le système en circuit ouvert, avoir une bonne conductivité électrique et thermique, être sensible aux poisons, montrer une grande surface réelle, avoir une bonne activité catalytique et être relativement facile à fabriquer.

#### ➤ **L'anode**

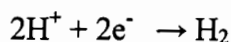
C'est l'électrode par où entre le courant électrique, elle est reliée à la borne positive du générateur. L'oxygène est recueilli du côté de l'anode.

#### ➤ **La cathode**

C'est l'électrode par où sort le courant électrique ; elle est reliée à la borne négative du générateur. C'est elle qui recueille l'hydrogène.

En milieu acide, on admet généralement que la décomposition de l'eau s'effectue suivant les réactions :

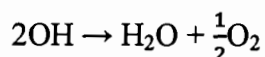
À la cathode :



À l'anode :

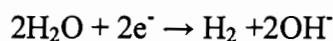


Puis :

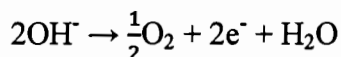


En solution alcaline, par contre, les ions  $\text{OH}^-$  prédominent et le phénomène est habituellement exprimé par :

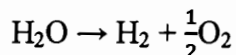
à la cathode



à l'anode



Dans les deux cas, la réaction globale s'écrit :



Avec  $\Delta H = 285 \text{ kJ/mol H}_2\text{O}$  enthalpie de dissociation de l'eau [4].

### c : Le diaphragme

Membrane poreuse disposée entre l'anode et la cathode, le diaphragme sépare les bulles d'hydrogène des bulles d'oxygène en permettant le passage des ions. Le diamètre moyen des pores demeure de préférence inférieure à  $1 \mu\text{m}$ . Il est nécessairement constitué d'un matériau hydrophile [4].

## II-2-1-3 : L'électrolyseur

### a : Conception des appareils industriels

Les premiers appareils d'électrolyse disposaient d'électrodes **monopolaire** (figure 2) : chaque anode est connectée au pôle plus, chaque cathode au pôle moins. Cette disposition conduit à utiliser des transformateurs fonctionnant sous basse tension et forte intensité, de coût onéreux et engendrant des chutes ohmiques de contact importantes. Une première amélioration consiste à mettre en série des cuves d'électrolyse, mais la liaison de cuve à cuve nécessite toujours des conducteurs de forte section.

Le perfectionnement ultime est obtenu grâce aux **électrodes bipolaires** (figure 3) : une cellule d'électrolyse est définie par deux électrodes se faisant face et constituant les fonds. Chaque électrode est cathode sur une face et anode sur l'autre face. Les liaisons externes de cuve à cuve sont supprimées, la conduction s'opère à l'intérieur de l'électrode au travers de son épaisseur : la chute ohmique devient minimale. Cette conception se retrouve aujourd'hui sur tous les appareils industriels. Cette conception introduit cependant une difficulté : l'électrode présente une face en milieu oxydant (l'anode) et une face en milieu réducteur (la cathode). En milieu basique, le choix du matériau d'électrode devient alors fort limité. Jusqu'à 90 °C, l'acier doux muni d'un nickelage soigné du côté anodique convient parfaitement ; au-delà, les nickelages ne présentent pas une durée de vie suffisante, il devient nécessaire de faire appel au nickel massif [4].

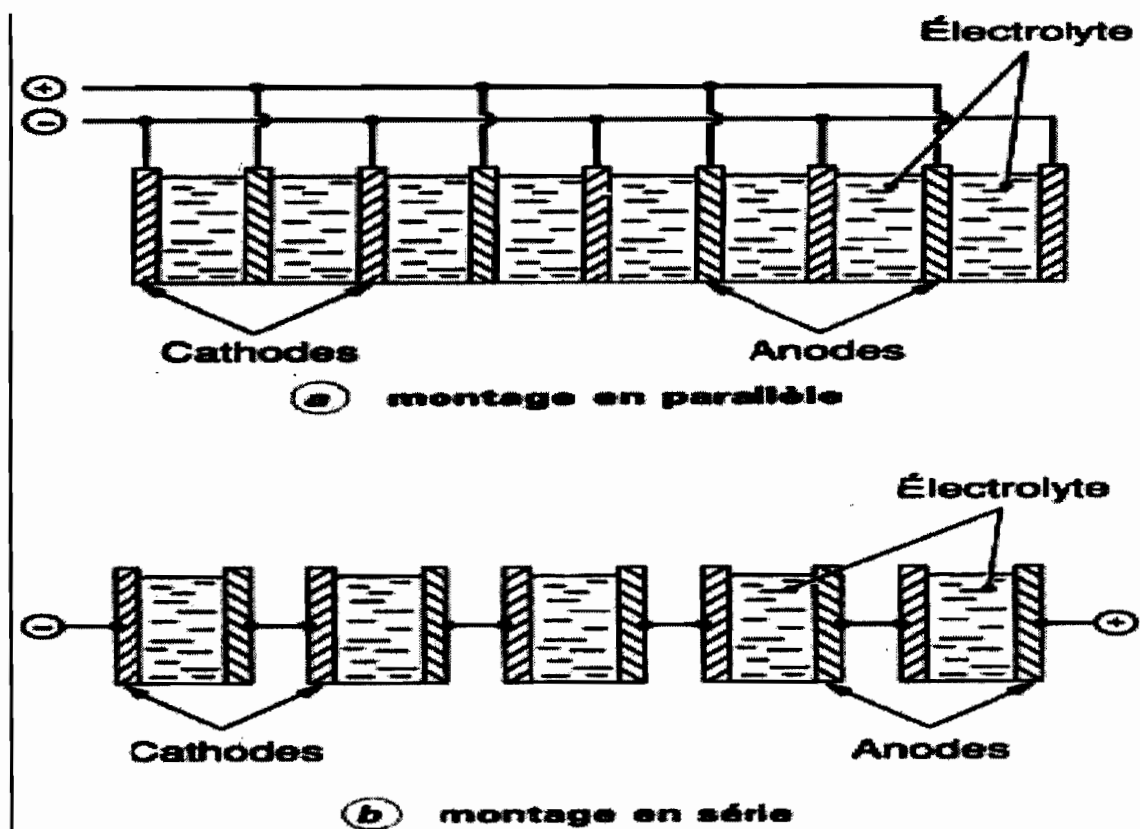


Figure 2 : Electrolyseur à électrodes monopolaire

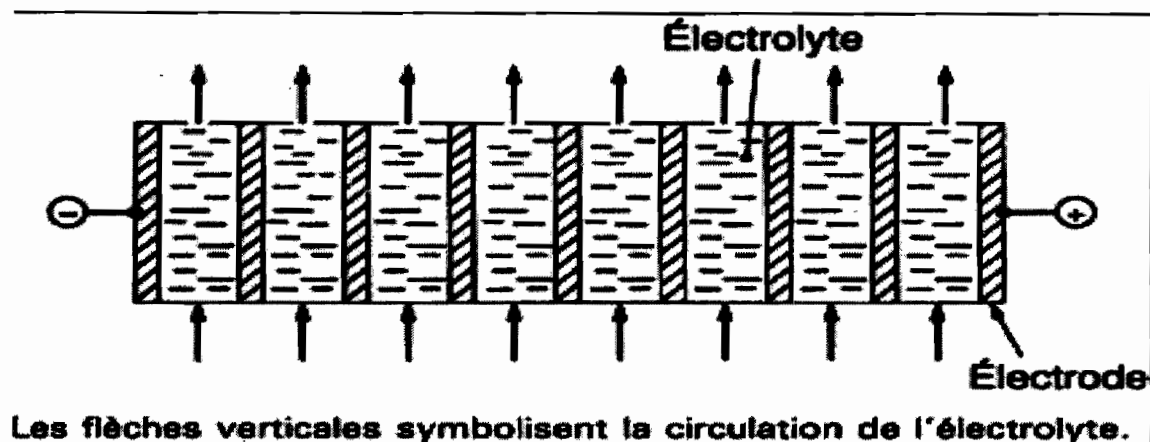


Figure 3 : Electrolyseur à électrodes bipolaires

### b : Contrôle des températures et des concentrations

Un électrolyseur industriel fonctionne en général sous une tension comprise entre 1,8 et 2,2 V, située au-dessus de la tension thermoneutre. La consommation énergétique est comprise entre 4,5 et 5 kWh/Nm<sup>3</sup> d'hydrogène. Le rendement énergétique est donc toujours inférieur à 1 et il convient d'éliminer en permanence la chaleur dégagée liée aux irréversibilités. De plus, les réactions qui s'opèrent aux électrodes engendrent des déséquilibres de concentration qu'il convient de compenser. La circulation de l'électrolyte dans tous les compartiments anodiques et cathodiques assure le refroidissement des cellules et le maintien des concentrations ioniques. L'écart de température entre l'entrée et la sortie des cellules d'électrolyse est généralement compris entre 5 et 15 °C. Dans ces conditions, l'écart de concentrations ioniques entre l'anolyte et le catholyte demeure limité.

Pour un souci d'équilibre au niveau des intensités, nous allons utiliser trois cellules d'électrolyte en parallèle et chacune est reliée à une phase de l'alternateur [4].

#### II-2-1-4 : L'alimentation électrique

Il sera composé de deux parties :

- L'alimentation stabilisée : elle nous permettra d'alimenter notre électrolyseur qui consomme une tension continue de l'ordre de 1,8 à 2,2 volts,
- Le transformateur triphasé : comme son nom l'indique, il permet de transformer la haute tension en tension d'utilisation 220/380.

### a : Alimentation stabilisée

Une alimentation est un montage transformant la tension alternative du secteur en une tension continue basse tension.

Une alimentation secteur est composée d'un transformateur, d'un redresseur, d'un filtre et d'une stabilisation/régulation selon les besoins.

C'est un dispositif électronique destiné à réaliser la transformation alternatif-continu. Cette transformation trouve son importance en la possibilité qu'elle offre d'alimenter, à partir du même réseau de distribution électrique, à la fois des machines à courant continu et des machines à courant alternatif. Il n'est plus nécessaire d'avoir deux sources de production électrique, ce qui est particulièrement intéressant pour des questions de coût mais aussi de poids et d'encombrement. Le développement des semi-conducteurs de puissance a largement contribué à l'expansion de ces dispositifs qui autorisent la transition de façon sûre, avec des rendements excellents tout en restant peu encombrants et peu onéreux.

Le principe de fonctionnement consiste à une modification périodique du circuit électrique entre les connections d'entrée (réseau) et de sortie (récepteur) du dispositif redresseur, de façon à recueillir en sortie des tensions et des courants d'ondulations suffisamment faibles pour être négligés.

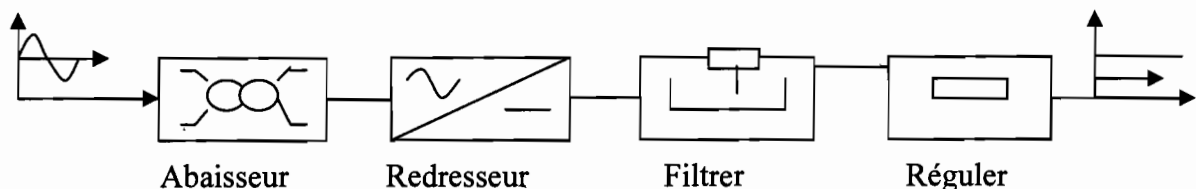


Figure 4 : Synoptique de l'alimentation stabilisée

### b : Le transformateur triphasé

Tout comme sur les lignes monophasées, on utilise des transformateurs pour élever ou abaisser la tension des lignes triphasées.

Pour changer la tension d'un système triphasé, on peut fort bien utiliser trois transformateurs monophasés ; chaque primaire étant lié à une phase mais il est plus avantageux d'utiliser un seul transfo triphasé. On gagnerait à la fois sur l'encombrement et sur le poids de fer utilisé.

Il est constitué d'un circuit magnétique à trois (3) noyaux et chaque noyau supporte un enroulement primaire et un enroulement secondaire.

Les trois enroulements primaires du transfo triphasé peuvent être couplés en étoile ou en triangle ; tandis que les trois enroulements secondaires peuvent être couplés en étoile, en triangle ou en zigzag.

Il transforme la tension à la borne de l'alternateur qui est de 24 kV en 380 V, avec un rendement de 95 %.

## II-2-2 : Système secondaire

### II-2-2-1 : L'alternateur

Un alternateur est une machine électromagnétique rotative fournissant des tensions de fréquences proportionnelles à leur vitesse de rotation qui convertit l'énergie mécanique fournie par un moteur ( turbine pour notre cas) en énergie électrique à courant alternatif. Ces machines sont moins coûteuses et ont un meilleur rendement que les machines à courant continu (dynamo) qui délivrent des tensions continues (95 % au lieu de 85 %).

L'alternateur est aussi appelé Générateur Synchrone. Pour cette raison, les lettres conventionnelles de repérages sont G.S.

Pour alimenter notre charge (électrolyseur et moteurs) nous aurons besoin d'un alternateur triphasé. Il est constitué de trois enroulements monophasés, décalés d'un tiers de l'intervalle, compris entre deux pôles consécutifs de même nom.

Cette machine est constituée essentiellement de deux parties : une partie fixe appelée stator qui a pour rôle de produire une f.é.m. induite (induit) et une partie mobile appelée rotor (inducteur) destiné à produire le flux magnétique.

#### Principe

Les alternateurs commerciaux sont construits avec un inducteur fixe ou un inducteur rotatif. L'inducteur est composé de deux ou de plusieurs pôles produisant un champ magnétique constant.

**Un alternateur à inducteur fixe** : les pôles saillants produisent le champ magnétique qui est coupé par les conducteurs situés sur l'induit. L'induit porte un enroulement triphasé dont les bornes sont connectées à trois bagues montées sur l'arbre. Un groupe de balais recueille la tension triphasée qui est appliquée à la charge.

La valeur de la tension triphasée dépend de la vitesse de rotation et de l'intensité du champ magnétique. La fréquence dépend de la vitesse et du nombre de pôles de l'inducteur. Les alternateurs à inducteur fixe sont utilisés pour des puissances inférieures à 5 KVA. Pour des

puissances plus importantes, il est plus économique, plus sécuritaire et plus pratique d'employer un inducteur tournant.

**Un alternateur à inducteur tournant :** cette construction est plus avantageuse car elle permet d'alimenter directement le circuit d'alimentation sans passer par les bagues de fortes dimensions qui seraient requises avec un induit tournant. De plus, l'isolement des bobinages du stator est grandement simplifié du fait qu'ils ne sont soumis à aucune force centrifuge.

Une générateur à courant continu, appelée excitatrice, habituellement montée sur le même arbre que l'alternateur, fournit le courant d'excitation aux électro-aimants inducteurs.

**Nombre de pôles :** Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor. Si la tension induite dans ce conducteur prend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation :

$$f = \frac{pn}{120}$$

Où :

f = fréquence de la tension induite [Hz]

P = nombre de pôles du rotor

n = vitesse du rotor [tr/min]

**Stator :** Le stator est l'induit. Il est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par le champ magnétique en mouvement de l'inducteur.

Il se compose d'un noyau feuilleté ayant la forme d'un cylindre vide et comportant des encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs d'un enroulement triphasé. L'enroulement est toujours raccordé en étoile et le neutre est accessible pour permettre sa mise à la terre. On préfère la connexion en étoile à celle en triangle pour les raisons suivantes :

- La tension par phase étant seulement  $i/\sqrt{3}$ , ou 58 % de celle entre les lignes, on peut réduire l'épaisseur de l'isolant dans les encoches. Cela permet de grossir la section des conducteurs et, par conséquent, la puissance de la machine.



- Lorsque l'alternateur est en charge, la tension induite par phase se déforme de sorte que la forme d'onde n'est plus tout à fait sinusoïdale. Cette distorsion est due principalement à la présence des tensions de troisième harmonique qui se superposent à la tension fondamentale. Avec une connexion en étoile, les troisièmes harmoniques n'apparaissent pas entre les fils de ligne, car elles s'annulent. Par conséquent, si l'on utilise une connexion en triangle, ces tensions s'additionnent et provoquent la circulation d'un courant dans le triangle et, par conséquent, occasionnent des pertes joules supplémentaires.

**Rotor :** Le rotor est l'inducteur :

Il peut être un aimant permanent, la régulation de la tension de sortie se fera en régulant la vitesse de rotation de l'alternateur, (la fréquence du courant variera également). C'est le principe de la dynamo de vélo, qui est en fait un petit alternateur.

Plus couramment un électroaimant assure l'induction. Ce bobinage est alimenté en courant continu, soit à l'aide d'un collecteur à bague rotatif (un double bague avec balais) amenant une source extérieure, soit par un exciteur à diodes tournantes et sans balais. Un système de régulation permet l'ajustement de la tension et de la phase du courant produit.

Si l'on fait tourner le rotor, les lignes de flux produites par les pôles inducteurs balayent les trois enroulements du stator et induisent dans ceux-ci des tensions triphasées. Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à haute vitesse par des turbines à vapeur.

**Rotor à pôles saillants :** Comme les alternateurs sont raccordés directement aux turbines et puisqu'une fréquence de 50 Hz (ou 60 Hz) est imposée, on doit placer un grand nombre de pôles sur le rotor. Les alternateurs à basse vitesse ont donc toujours un grand diamètre, de façon à donner l'espace nécessaire pour loger le nombre de pôles requis.

**Rotor à pôles lisses :** Les turbines à vapeur tournent toujours à haute vitesse : 3600 r/min ou 1800 r/min sur les réseaux de 60 Hz, et 3000 ou 1500 r/min sur ceux à 50 Hz. Par conséquent, les alternateurs qu'elles entraînent comportent 2 ou 4 pôles seulement, on les désigne sous le nom de turbo-alternateurs. Leur rotor a une forme cylindrique, car les pôles sont formés en plaçant des bobines dans les encoches taillées dans la masse du rotor. Les forces centrifuges intenses dues à la haute vitesse de rotation imposent une limite au diamètre du rotor ; comme, d'autre part, les grandes puissances nécessitent un gros rotor, on est obligé de lui donner une forme allongée.

**Excitatrice :** L'excitatrice d'un alternateur constitue un de ses éléments les plus importants. En effet, le champ doit non seulement induire une tension appropriée, mais il doit aussi pouvoir varier rapidement lorsque la charge varie brusquement.

**Excitation sans balais :** à cause de l'usure des balais et de la poussière conductrice qu'ils dégagent, il faut effectuer une maintenance constante des bagues et du collecteur, sinon on risque des courts circuits. Pour éviter ce problème, on utilise de nos jours les systèmes d'excitation sans balais dans lesquels un alternateur-excitatrice et un groupe de redresseurs fournissent le courant continu à l'alternateur principal.

Si on compare avec le système d'excitation avec balais, on constate qu'ils sont identiques, sauf que le redresseur remplace le collecteur, les bagues et les balais. Le courant de commande  $I_c$  provenant de l'excitatrice pilote régularise  $I_x$ , comme dans le cas d'une excitatrice à courant conventionnelle.

L'alternateur-excitatrice et les redresseurs sont montés en bout d'arbre et tournent ensemble avec l'alternateur principal.

**Choix de l'alternateur :** Nous allons choisir un alternateur avec un rendement de 95 %. Il sera à inducteur tournant qui tourne à une vitesse de 3.000 tr/min sur une fréquence de 50 Hz, ce qui impose le nombre de pôle  $p = 1$ . On préfère la connexion en étoile d'après les raisons citées plus haut avec un rotor à pôle lisse qui est toujours utilisé pour les turbines à vapeur ou à gaz.

## **II-2-2-2 : La turbine**

### **a : Définition**

Une turbine à vapeur est constituée d'un grand nombre de roues (une centaine pour un modèle de puissance) portant des ailettes. La vapeur sous pression traverse d'abord les roues de petit diamètre avant d'atteindre les roues de plus grand diamètre. La turbine tourne alors en entraînant l'alternateur qui lui est accouplé.

Une turbine est essentiellement une roue destinée à transformer le mouvement d'un corps fluide (eau ou gaz) en un mouvement de rotation. Les centrales électriques utilisent principalement deux types de turbines couplées à un alternateur : les turbines à eau et à vapeur.

Dans notre cas nous utiliserons la turbine à vapeur.

### **b : Le fonctionnement**

Bien que les turbines à vapeur soient construites selon deux principes différents (à action ou à réaction : voir ci-après), leurs éléments essentiels sont similaires. Elles se composent de tuyères ou de jets, et d'ailettes. La vapeur s'écoule dans les tuyères, dans lesquelles elle se dilate. Ainsi, sa température diminue et son énergie cinétique augmente. La vapeur en mouvement exerce une pression contre les ailettes, entraînant leur rotation. La disposition des jets et des ailettes, fixes ou stationnaires, dépend du type de turbine. À la sortie du dernier condenseur (échangeur thermique), l'eau peut être de nouveau vaporisée et surchauffée. L'eau ou la vapeur en sortie est alors ramenée vers la chaudière et la pompe « alimentaire », qui compresse de l'eau à l'état liquide. Il s'agit d'une turbine auxiliaire intégrée au cycle thermodynamique de la turbine principale utilisant de la vapeur soutirée dans celle-ci.

Les turbines à vapeur sont des machines relativement simples dont la seule partie mobile importante est le rotor. Elles possèdent toutefois un équipement annexe, nécessaire à leur fonctionnement. Parmi celui-ci, un palier de tourillon supporte l'arbre et un palier de butée le positionne de manière axiale. Un système d'huile assure le graissage des paliers ; des joints réduisent les pertes de vapeur tout au long de son trajet. Enfin, un système d'étanchéité empêche la vapeur de s'échapper à l'extérieur de la turbine et l'air d'y entrer. La vitesse de rotation est commandée par des soupapes situées aux entrées d'admission de la machine et pilotées par des systèmes de régulation électroniques ou mécaniques. Les turbines à réaction développent une poussée axiale considérable, du fait de la chute de pression sur les ailettes mobiles. Cette poussée est généralement compensée par l'utilisation d'un piston d'équilibrage. La turbine à vapeur utilise des principes thermodynamiques. Lorsque la vapeur se dilate, sa température et donc son énergie interne diminuent. Cette réduction de l'énergie interne s'accompagne d'une augmentation de l'énergie cinétique sous la forme d'une accélération des particules de vapeur. Cette transformation rend une grande partie de l'énergie disponible. Ainsi, une réduction de 100 kJ de l'énergie interne, du fait de la dilatation, peut provoquer un accroissement de la vitesse des particules de vapeur de l'ordre de 2 800 km/h. À de telles vitesses, l'énergie disponible est importante. Lorsque la pression de la vapeur d'eau en sortie de la turbine est égale à la pression atmosphérique, la turbine est dite à *condensation*.

Aujourd'hui, les turbines à vapeur sont généralement limitées à une température maximale de 580 °C dans le premier étage, et à une pression maximale d'admission de 170 à 180 bars.

## **c : Les type de turbines**

### **➤ Turbines à action**

La forme la plus simple de turbine à vapeur est la turbine à action, dans laquelle les jets sont fixés sur la partie intérieure de l'enveloppe de la turbine, et les ailettes placées sur le bord des roues tournantes montées sur un arbre central. La vapeur se déplaçant dans une tuyère fixe passe sur les ailettes incurvées, qui absorbent une partie de l'énergie cinétique de la vapeur dilatée, faisant ainsi tourner la roue et l'arbre sur lesquels elles sont montées. Cette turbine est conçue de manière à ce que la vapeur entrant par une extrémité de la turbine se dilate à travers une succession de tuyères jusqu'à ce qu'elle ait perdu la majeure partie de son énergie interne.

### **➤ Turbines à réaction**

Dans la turbine à réaction, une partie de l'énergie mécanique est obtenue par l'impact de la vapeur sur les ailettes. La partie la plus importante est obtenue par l'accélération de la vapeur lors de son passage dans la roue de la turbine, où elle se dilate. Une turbine de ce type se compose de deux jeux d'ailettes, l'un fixe, l'autre mobile. Ces ailettes sont disposées de telle façon que chaque paire joue le rôle de tuyère, à travers laquelle la vapeur se dilate lors de son passage. Dans chaque étage, une faible quantité d'énergie thermique est convertie en énergie cinétique. La vapeur se détend dans les aubes fixes, puis entraîne les aubes mobiles disposées sur la roue ou le tambour de la turbine. Les ailettes d'une turbine à réaction sont en général montées sur un tambour, qui fait alors office d'arbre.

Les turbines à réaction nécessitent en général davantage d'étages que les turbines à action. Il a pu être démontré que, pour le même diamètre et la même gamme énergétique, une turbine à réaction a besoin de deux fois plus d'étages pour obtenir un rendement maximal. Les grosses turbines, qui sont généralement à action, utilisent une certaine réaction à la base du trajet de vapeur pour assurer un débit efficace à travers les aubes. Nombre de turbines, qui sont normalement à réaction, disposent d'un premier étage de commande d'impulsion, qui permet d'envisager la réduction du nombre total d'étages nécessaires. Les arbres des turbines de chaque étage sont reliés entre eux au moyen d'accouplements.

**Choix :** D'après l'étude de toutes ces informations, nous avons porté notre choix sur une turbine axiale à action. Ainsi on n'aura pas à prévoir l'utilisation d'un piston d'équilibrage. La turbine à action coûte aussi moins chère.

### **d : générateur de vapeur**

C'est lui qui fait la transmission de la chaleur du liquide caloporteur vers l'eau distillée à l'entrée pour transformer celle-ci en vapeur à la sortie. C'est un gros échangeur divisé en sous échangeurs en séries qui sont : l'économiseur, l'évaporateur et le surchauffeur.

### **II-2-3 : Le système primaire**

Ce système est composé essentiellement du concentrateur, de l'absorbeur ou récepteur et du fluide caloporteur et le stockage du fluide.

#### **II-2-3-1 : Le concentrateur**

Un capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu (d'où le nom de capteur à concentration). Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente son efficacité à hautes températures. Un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux, par unité de surface, que les capteurs.

Ce qui nous amène à porter notre choix sur les réflecteurs.

Parmi les réflecteurs on peut citer trois types qui sont les plus utilisés :

- Réflecteur cylindro-parabolique
- Réflecteur parabolique
- héliostats

Les réflecteurs permettent d'obtenir une température élevée au foyer, cependant ils n'utilisent que les rayons directs du soleil et il faut que les capteurs soient orientés en permanence vers le soleil, on utilise en général pour cela des systèmes asservis [A] [B] [C].

#### **II-2-3-2 : Le réflecteur cylindro-parabolique**

Un capteur cylindro-parabolique est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Dans un concentrateur cylindro-parabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à environ 400 °C.



Figure 5 : Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique

### II-2-3-3 : Le réflecteur parabolique

Un capteur parabolique est un capteur à concentration utilisant un réflecteur en forme de parabole de révolution et qui concentre les rayons solaires dans un foyer ponctuel. Dans les concentrateurs paraboliques, on peut obtenir des températures élevées (jusqu'à 1500 °C).

Un capteur parabolique est un capteur à concentration utilisant un réflecteur en forme de parabole de révolution et qui concentre les rayons solaires dans un foyer ponctuel. Dans les concentrateurs paraboliques, on peut obtenir des températures élevées (jusqu'à 1500 °C).

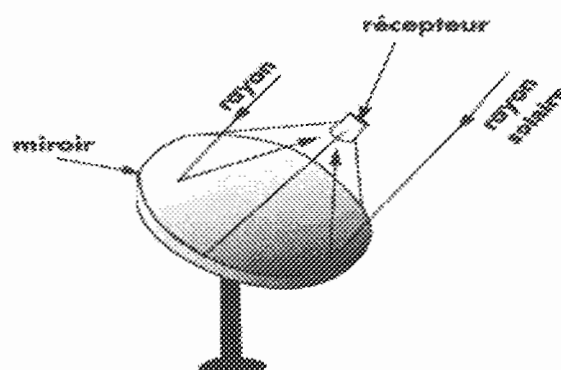


Figure 6 : système à réflecteur parabolique

### II-2-3-4 : Les héliostats

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaires à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. A ce jour, la seule application du capteur héliostat est la production d'énergie dans un système dénommé «centrale à tour». Une centrale à tour possède un ensemble de grands miroirs qui suit le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur en haut de la grande tour. Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que les rayons du soleil, qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur, où la température peut dépasser 1000 °C. De la vapeur à haute pression est générée afin de produire de l'électricité.

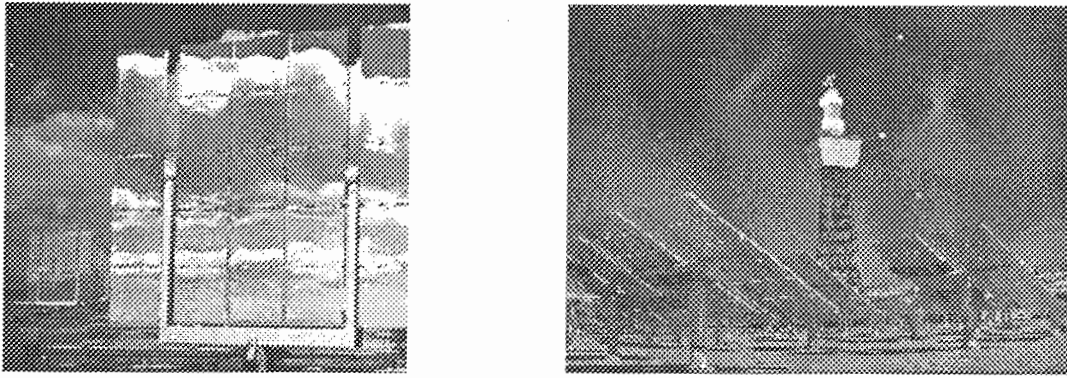


Figure 7 : Système de centrale à tour

#### II-2-4 : Les aspects techniques

Toute installation thermodynamique solaire doit remplir les mêmes fonctions pour transformer l'énergie du rayonnement incident en énergie électrique avec la meilleure efficacité possible. On les examine ci-après dans l'ordre suivant :

- ✓ La concentration du rayonnement sur l'entrée du récepteur.
- ✓ son absorption sur les parois du récepteur et la transformation de son énergie en chaleur,
- ✓ le transport et, éventuellement, le stockage de cette chaleur,
- ✓ sa délivrance à un cycle thermodynamique associé à un alternateur pour la production d'électricité.

Nous allons limiter notre étude que sur les deux premiers points.

##### II-2-4-1 : Concentration

Pour transformer le rayonnement solaire en chaleur, il suffit en principe de le réceptionner sur une plaque noire. Mais un tel capteur, même parfaitement absorbant, doit supporter les pertes que son propre échauffement provoque au bénéfice de l'air ambiant. Ces pertes sont, en première approximation, proportionnelles à cet échauffement et à la surface développée.

Pour travailler à température élevée, ce qui est nécessaire ici pour alimenter un cycle thermodynamique performant, il faut diminuer fortement la surface de réception pour maintenir, en proportion, ces pertes à un niveau raisonnable. C'est ce que l'on fait en disposant devant le récepteur une optique qui concentre sur celui-ci le rayonnement capté sur une surface bien supérieure. On caractérise la performance du système par le chiffre de sa " concentration " qui est le rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur.

Dans la pratique cette optique est systématiquement constituée de miroirs. C'est la nature géométrique des surfaces réfléchissantes mises en œuvre qui va définir la " filière " utilisée.

### ***II-2-4-2 : La Filière parabolique***

#### **➤ Les principes**

Cette filière est un peu la référence en ce sens qu'elle met en œuvre la meilleure surface réfléchissante possible : une parabole de révolution. Avec ce miroir, tout rayon incident parallèle à l'axe optique passe, après réflexion, par un même point. On appelle ce point le " foyer ". Pour fonctionner correctement, un tel miroir doit viser en permanence le soleil (dont l'image se forme alors au foyer). On y parvient en animant son axe d'une double rotation. Mais ceci implique, sans doute, une limitation de taille, la surface de collecte ne pouvant guère dépasser ici quelques centaines de mètres carrés dans des conditions économiques raisonnables. C'est là que réside la spécificité de la filière qui n'a d'intérêt que si l'on parvient à utiliser le faible débit de chaleur récolté dans une installation compacte, mobile avec le miroir (et si possible sans liaison avec l'extérieur autre qu'électrique) et installée dans une position voisine du foyer.

L'optique peut ici, théoriquement, délivrer des concentrations supérieures à 10000, ce qui est énorme. Dans la pratique, on réalise éventuellement des miroirs moins performants (en s'autorisant des marges d'erreur sur la qualité géométrique des surfaces mises en œuvre). Ils peuvent alors être économiques tout en délivrant des concentrations d'un excellent niveau. Plusieurs réalisations récentes de qualité délivrent ainsi des concentrations de l'ordre de 4000.

#### **➤ La technologie**

La réalisation de surfaces réfléchissantes paraboliques de révolution pose des problèmes particuliers auxquels il est possible d'apporter des réponses variées. Presque toutes sont aujourd'hui basées sur la mise en œuvre de verre argenté en face arrière comme surface réfléchissante. C'est de loin celle qui présente le meilleur rapport qualité-prix : excellent coefficient de réflexion, bonne tenue aux intempéries, prix modéré d'un produit industriel d'utilisation massive et ancienne.

La mise en œuvre de ce matériau en vue de réaliser une parabole de révolution peut être effectuée selon deux voies principales :



Juxtaposition de nombreux trapèzes plans pour approcher au mieux la surface parabolique théorique,

Utilisation de verre mince cintré en double courbure qui permet, théoriquement, d'obtenir une parabole parfaite.

La première solution n'est valable que si elle est plus économique car elle est obligatoirement moins performante.

Dans les deux cas, un problème central sera le collage des miroirs élémentaires sur la surface support qui leur imposera la géométrie et le positionnement adéquat. En effet, il y a de difficiles problèmes de compatibilité chimique entre les colles et les vernis qui protègent l'argenture des miroirs.

### **II-2-4-3 : La filière centrale à tour (héliostats)**

#### **➤ Les principes**

Ici, on ambitionne d'emblée de déployer des surfaces de miroir très importantes. On renonce donc à utiliser une vraie parabole (qui devrait être mobile ce qui est inimaginable en grande taille) et on la remplace par une pseudo-parabole, à foyer fixe, d'une taille pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers de mètres carrés, et constituée de centaines ou de milliers de miroirs plans orientables. On appelle ces miroirs " héliostats " (en grec : qui fixe le soleil). Leur ensemble constitue le " champ d'héliostats ". On utilise ici l'image de la pseudo-parabole parce que, à chaque instant, les rayons solaires atteignant le centre de chaque héliostat sont réfléchis par le dispositif en direction d'un point unique, fixe dans le temps, et qui joue donc le rôle du foyer de la parabole. La surface réfléchissante de cette " parabole " étant fatalement déployée au sol, son " foyer " se trouve en altitude. Pour y disposer le récepteur, on est amené à construire une tour de grande hauteur qui donne son nom à la filière.

Pour faire fonctionner ce dispositif, il faut réaliser un " tir croisé " des héliostats et pour cela animer chaque miroir d'un mouvement de suivi du soleil particulier. Comme dans le cas précédent, ce mouvement peut être obtenu par la combinaison de deux rotations.

Il faut encore avoir optimisé la position des miroirs (ou plutôt la distribution de leur densité sur le terrain), la hauteur du foyer (qui conditionne la hauteur de tour et donc son coût) et la géométrie de l'ouverture du récepteur. A travers un calcul difficile, on minimise le rapport

coût d'investissement/rendement thermo-optique de l'ensemble champ d'héliostats-récepteur. Les optima trouvés, en particulier en ce qui concerne l'altitude du foyer, se traduisent par des courbes très plates qui laissent pas mal de liberté au concepteur (autrement dit, il peut faire varier dans une large fourchette la hauteur de tour sans dégrader gravement le rendement).

Si ce travail a été bien mené, et si l'ouverture du récepteur est située dans le plan focal de l'optique, on peut obtenir par ce moyen des concentrations de l'ordre de 700 (cas de Thémis par exemple à  $42,5^\circ$  de latitude).

### ➤ La technologie

On va donc mettre en œuvre ici des héliostats qui sont des miroirs plans animés d'un mouvement continu obtenu à partir d'une double rotation.

La première question qui se pose lors de leur conception est celle de leur taille. Sur le plan optique, on peut démontrer que les performances d'une pseudo-parabole s'améliorent avec la finesse de son découpage en miroirs élémentaires. On a donc de ce point de vue intérêt à construire des héliostats de petite taille. Du point de vue structurel, les petits héliostats sont également avantageux dans la mesure où les efforts qu'ils supportent (et qui sont essentiellement ceux dus au vent) sont proportionnels au cube des dimensions linéaires de l'appareil : cela signifie qu'ils augmentent proportionnellement plus vite que la surface développée, et donc que la rigidité de la structure (pour une tolérance donnée sur sa déformation relative) doit augmenter avec la taille. Autrement dit, les petits héliostats peuvent être construits plus " souples " que les grands et mettre en œuvre moins de matériau au mètre carré. De ce point de vue, ils devraient être plus économiques.

#### II-2-4-4 : Filière cylindro-parabolique

### ➤ Les principes

On va donc mettre en œuvre ici des miroirs cylindro-paraboliques d'orientation est-ouest (dans ce cas le mouvement de suivi du soleil se limite à une rotation si lente qu'elle peut être assurée sans automatisme), ou nord-sud, ce qui suppose toujours une rotation unique, mais à plus grande vitesse et qui doit donc être automatisée.

Les avantages recherchés portent surtout sur la simplification de la motorisation et de la commande du mouvement. En substance, le passage de deux axes à un seul.

Les inconvénients de la formule sont cependant importants. En premier lieu, le passage d'une focalisation ponctuelle telle que réalisée dans les deux filières précédentes à une focalisation linéaire fait chuter la concentration aux environs de 80 (au mieux, c'est à dire dans les réalisations de Luz les plus récentes). En second lieu, la surface des miroirs est plus inclinée par rapport au vecteur soleil quand celui-ci est bas sur l'horizon, et ce qu'on appelle le " rendement cosinus " du champ de miroirs en est dégradé.

C'est surtout le premier de ces éléments qui caractérise la filière. On l'utilisera de ce fait à des températures modérées, quitte à perdre en rendement de conversion thermomécanique.

### ➤ La technologie

Le miroir cylindro-parabolique est constitué en général de panneaux en verre sans fer relativement épais, cintrés en forme à chaud, et argentés et vernis en face arrière. Ils sont largement autoportants, ce qui permet de les assembler sur une charpente relativement légère. Celle-ci est supportée par des pylônes en charpente métallique fondés au sol [A] [B] [C].

technologie	Cylindro-parabolique	tour	parabole
Rendement thermique nominal	70 %	73%	75 %
Concentration	60 - 400	700 - 1200	6000 - 10000
Prix du champ solaire	210-250 €/m <sup>2</sup>	140-220 €/m <sup>2</sup>	150 €/m <sup>2</sup>
Coût total d'investissement	2,8 - 3,5 €/We	3 - 4 €/We	10 - 14 €/We

**Tableau 2: Caractéristiques actuelles des dispositifs à concentration**

Le tableau ci-dessus nous donne les caractéristiques des différents réflecteurs. Son exploitation (facteurs technico-économiques) ainsi que les informations données comme la facilité de l'orientation parmi d'autres avantages, nous permet de choisir les cylindro-

paraboliques comme réflecteurs pour la centrale. Il faut noter que le paramètre coût d'investissement a beaucoup influé sur ce choix et il est conseillé d'utiliser ces réflecteurs pour les centrales de petites tailles.

#### **a : Réception du rayonnement.**

Il faut maintenant absorber le rayonnement concentré sur une surface noire (ou dans un volume semi-transparent, noir dans son épaisseur), et de ce seul fait absorbante pour le spectre visible (et donc pour le spectre solaire qui en est énergétiquement très proche), et transférer la chaleur ainsi générée à un fluide caloporteur.

Le récepteur est ici complètement différent des autres à beaucoup de points de vue et d'abord parce qu'il est linéaire au lieu de surfacique. Ensuite parce que, disposé au foyer d'un système optique peu performant, on le fait travailler, comme nous l'avons déjà signalé, à température modérée (inférieure à 400°C), ce qui permet d'utiliser comme fluide caloporteur une huile de synthèse. Enfin parce que, pour la même raison, il est protégé de pertes thermiques par deux dispositions originales et efficaces :

- ✓ le placement de l'absorbeur dans un tube de verre sans fer vidé de son air, ce qui supprime radicalement les pertes convectives et limite les pertes radiatives.
- ✓ le revêtement du tube chaudière d'une couche de cermet (il s'agit d'un composite céramique/métal projeté par plasma) qui joue le rôle d'un absorbeur sélectif (96% d'absorptivité pour 20% d'émissivité à la température de travail) bien plus performant que la peinture utilisée dans les cas précédents ; cette disposition est rendue possible ici par la mise sous vide de l'environnement du tube chaudière (le cermet ne résisterait pas à la présence d'oxygène).

La mise au point de l'enveloppe à vide est particulièrement remarquable en ce qu'elle suppose la mise en œuvre de quantités impressionnantes de joints d'étanchéité et de joints de dilatation (soufflets inox) qui tous assurent leurs fonctions dans un environnement météorologique non protégé.

#### **b : L'absorbeur**

Afin

d'augmenter encore la température du liquide caloporteur, on utilise des capteurs isolés avec vitrage. Pour cela, l'absorbeur doit être enfermé dans un tube de verre vidé de son air (tout en

laissant le rayon solaire entrer, la vitre empêche les rayons infrarouges diffusés de sortir : on réalise ainsi « l'effet de serre ». Le verre, fragile, peut être remplacé par certains matériaux plastiques ayant la propriété de réaliser « l'effet de serre » (c'est le cas de matériaux comme le polycarbonate, le méthacrylate et le tedlar). L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres.

Le foyer est un tube de 2 cm de diamètre, de même longueur que le réflecteur. Il faudrait utiliser un tube de cuivre (bon coefficient de conduction)

L'énergie est ensuite cédée au fluide caloporteur et transférée vers un réservoir de stockage d'énergie [5].

#### **c : Le réflecteur**

Le capteur doit permettre de transmettre le plus de chaleur possible au fluide. Pour cela, il faut que la plaque soit métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre : 300, aluminium : 200, acier : 60). En effet, plus le coefficient de conduction est faible et plus la plaque doit être épaisse, ce qui augmente le prix.

Le plus efficace serait une plaque d'inox avec une face polie miroir et protégée par un film plastique [5].

#### **d : La concentration effective**

La théorie développée suppose que le miroir est parfait et qu'il n'y a pas d'obstacle entre le soleil et le miroir. En réalité, de nombreux facteurs diminuent l'énergie disponible sur le plan focal. Les pertes sont dues à la réflexion, à la convection, à l'absorption, aux irrégularités géométriques de la surface du réflecteur, aux imperfections de réglage, etc. tous ces petits détails prennent une importance considérable si l'on veut une concentration élevée.

Le rapport entre l'énergie effectivement reçue et celle qui est calculée à partir du facteur de concentration est noté  $F_c$ . la concentration effective est  $C_E = F_c C$ . dans les meilleures conditions, on ne dépasse pas  $F_c = 0,6$  [3].

#### **e : Le fluide caloporteur**

C'est un fluide en mouvement qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et en cède en un autre point. Le rôle joué par les fluides caloporteurs est fondamental.

Le choix de ces fluides doit être effectué en tenant compte de certains critères :

Soit un fluide froid qui se réchauffe de  $T_1$  à  $T_2$  par échange de chaleur avec un fluide chaud à la température  $T_2$  constante. Si l'échangeur était de très grande dimension, on aurait  $T_2 \sim T_2$  et en supposant qu'il n'y a pas de pertes de chaleur, le flux de chaleur échangé a pour valeur :

$$Q = m C (T_2 - T_1)$$

$m$ : débit de fluide caloporteur

$C$  : chaleur massique a pression constante de ce fluide.

Pour un débit donné  $m$  et une différence de température imposée  $T_2 - T_1$  ; on voit que  $Q = f(C)$

Donc un fluide caloporteur doit avoir une chaleur massique élevée.

L'équation de débit relative au fluide caloporteur est :  $m = \rho VS$

$S$  : section de passage du fluide,

$V$  : vitesse de circulation du fluide,

$\rho$  : masse volumique du fluide pour les conditions température et de pression considérées.

On a donc  $S = m/V\rho$ .

Donc pour un débit et une vitesse de circulation imposée on a  $S = f(1/\rho)$ .

Donc pour diminuer les dimensions des installations, on a intérêt à prendre un liquide comme fluide caloporteur de préférence à un gaz.

En résumé un fluide caloporteur doit avoir une chaleur massique et une masse volumique forte. Cependant, d'autres éléments de choix interviennent :

le coût du fluide,

les phénomènes de corrosion,

les risques de congélation et d'ébullition [6].

**Choix** : Pour toutes ces raisons on peut choisir un sel nommé HITEC comme fluide caloporteur ; ses propriétés sont très adaptées et il est très utilisé dans beaucoup de centrales solaires à travers le monde. C'est un mélange de sels (40%  $\text{NaNO}_2$ , 7%  $\text{NaNO}_3$  et 53%  $\text{KNO}_3$ ) dont le point de fusion est voisin de  $150^\circ\text{C}$ .

#### **d : Le stockage du fluide caloporteur**

Il nous permet de disposer d'une énergie suffisante pour le démarrage de la turbine à chaque fois qu'il est nécessaire et une forte autonomie à l'absence du soleil (réservoir chaud). Ces

réservoirs sont surtout des tampons pour le fluide caloporteur ; on peut contrôler la température du fluide à l'entrée de l'absorbeur via le réservoir du fluide froid.

Les réservoirs doivent pouvoir garder les températures des fluides respectifs constantes pendant un temps acceptable.

Pour ces raisons leurs parois seront constituées de l'intérieur vers l'extérieur d'un Acier nuancé A, d'un calorifuge (laine de roche C) et d'un feuillard galvanisé G [7].

Libelle	Chaleur spécifique Cp (j/kg. °C)	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m. °K)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
HITEC	1561,2	0,5	2082-0,72835T (T°C)
nuance acier A	475	45	7850
Calorifuge : Laine de roche	837	0,0372	
Feuillard galvanisé	61	43	

**Tableau 3 : Caractéristiques du HITEC et son stockage [A] [B]**

### II-3 : Conclusion partielle

Le fonctionnement de la turbine risque de poser des problèmes si le constructeur de la turbine ne prend pas en compte le fait que la turbine s'arrête chaque soir après disparition du soleil pour redémarrer le lendemain. C'est un fonctionnement pas très habituel pour les turbines, cette information va être donnée lors de la commande.

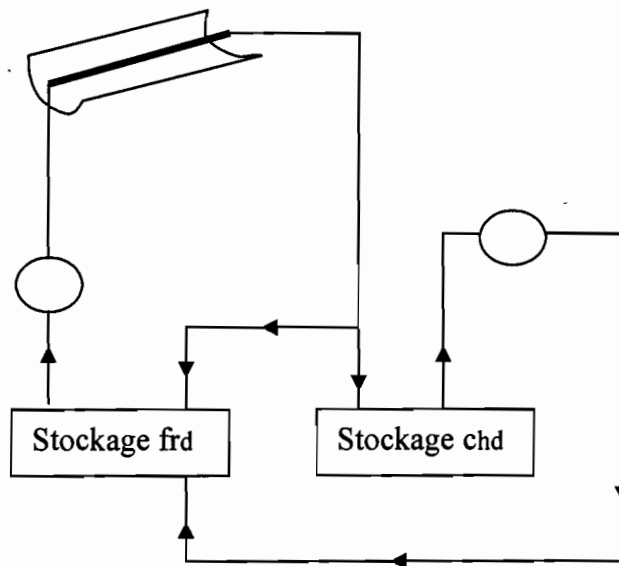
Un problème d'obtention de miroir peut se poser si on veut fabriquer les miroirs sur place puisqu'il faut d'abord une main d'œuvre qualifiée difficile à trouver car ces miroirs sont presque inconnus du grand public. En plus la mise d'une couche d'argent sur la face réfléchissante du miroir nécessite une très grande précision.

## CHAPITRE III : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME

### III-1 : Modélisation du système primaire

#### III-1-1 : Introduction

Modéliser le système primaire consiste à établir successivement les modèles de l'ensoleillement solaire, du miroir cylindro-parabolique, du récepteur solaire et du stockage.



La figure 8 : Schéma simplifié du système primaire.

#### III-1-2 : Modèle de l'ensoleillement

Nous présentons ici le modèle du flux solaire qui arrive effectivement à la surface du miroir par un ciel sans nuage. Ce flux varie en fonction de la direction du soleil et de la couche d'atmosphère traversée. Les paramètres sont donc d'une part, la latitude du lieu, la date et l'heure, d'autre part, un effet global d'atténuation atmosphérique. C'est ce dernier qui est le plus difficile à cerner. Aussi proposons-nous une modélisation dans les conditions moyennes sénégalaise d'ensoleillement. Notre modèle permet de calculer le rayonnement solaire direct à différentes dates et heures sur le site.



### III-1-2-1 : Rappel des données astronomiques

**Déclinaison solaire  $\delta$**  : C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année, passant par un maximum de  $23^{\circ}27'$  au solstice d'été, un minimum de  $-23^{\circ}27'$  au solstice d'hiver et devenant nulle aux équinoxes.

Au jour  $J$  de l'année, compté depuis le premier janvier, cette déclinaison  $\delta$  peut être calculée à l'aide de la formule de type sinusoïdale suivante :

$$\delta = 23,45^{\circ} \times \sin \frac{360}{365} (J + 284) \quad (3.1.2.1.1a)$$

Où  $\delta$  est exprimé en degrés.

Dans la pratique, on utilise la formule

$$\sin \delta = 0,4 \times \sin \frac{360}{365} (J - 80) \quad (3.1.2.1.1b)$$

**Angle horaire du soleil  $\omega$**  : Il est délimité par le méridien céleste plan et le cercle horaire de l'astre plan. Les conventions habituellement retenues lui donnent la valeur  $0^{\circ}$  lorsque le soleil passe au plan méridien d'un lieu : il est alors midi vrai au soleil. L'intervalle de temps entre deux passages successifs du soleil au méridien étant de 24 heures, l'angle horaire  $\omega$  au temps solaire vrai  $t$  est donc :

$$\omega = 15 \times (t - 12) \quad \text{en degrés.}$$

**Hauteur angulaire du soleil ( $h$ ) et Azimut du soleil ( $\alpha$ )** : Si on connaît la latitude  $\emptyset$  du lieu d'observation, les relations de trigonométrie sphérique permettent de relier les coordonnées horizontales et horaires par les formules suivantes :

$$\sin h = \sin \emptyset \times \sin \delta + \cos \emptyset \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (3.1.2.1.2)$$

$$\sin \alpha = \cos \delta \times \frac{\sin \omega}{\cosh} \quad (3.1.2.1.3)$$

**Position du soleil** : Soit  $\vec{S}$  le vecteur représentant la position du soleil au jour  $J$  à l'heure  $t$  et à la latitude  $\emptyset$ . Ses coordonnées sont les suivantes :

$$S_x = \sin \emptyset \times \cos \delta \times \cos \omega - \cos \emptyset \times \sin \delta = \cosh \times \cos \alpha \quad (3.1.2.1.4)$$

$$S_y = -\cos \delta \times \sin \omega = \cos h \times \sin \alpha \quad (3.1.2.1.5)$$

$$S_z = -(\cos \emptyset \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \emptyset \times \sin \delta) = \sinh \quad (3.1.2.1.6)$$

### III-1-2-2 : Flux incident du rayonnement solaire

L'intensité du rayonnement solaire direct au sol pour la position  $\vec{S}$  du soleil est déterminée par la formule suivante [3]:

$$E = E_o \times EXP\left(\frac{-1}{A \times \sinh}\right) \quad \text{en } w/m^2 \quad (3.1.2.2.1)$$

$E_o$ : constante solaire

A: constante traduisant l'influence de l'épaisseur de l'atmosphère et dont les valeurs courantes se situent entre 2 et 7.

Compte tenu des conditions climatiques moyennes au Sénégal, de l'influence de divers facteurs, d'un coefficient de trouble moyen égale à 0.1 et d'une épaisseur d'eau condensable de 1 à 4 cm, on peut écrire les équations suivantes :

$$E_{moyen} = 1230 \times EXP\left(\frac{-1}{4 \times \sin(h+2)}\right) : \text{ dans les conditions normales.} \quad (3.1.2.2.2)$$

$$E_{max} = 1210 \times EXP\left(\frac{-1}{6 \times \sin(h+1)}\right) : \text{ par ciel très pur.} \quad (3.1.2.2.3)$$

$$E_{min} = 1260 \times EXP\left(\frac{-1}{2,3 \times \sin(h+3)}\right) : \text{ en zone industrielle.} \quad (3.1.2.2.4)$$

Où E est exprimé en  $w/m^2$  et h en degrés.

Compte tenu de l'altitude et des conditions atmosphériques au Sénégal, on peut retenir la formule suivante :

$$E_{max} = 1210 \times EXP\left(\frac{-1}{6 \times \sin(h+1)}\right) \quad (3.1.2.2.5)$$

### III-1-3 : Modèle du miroir cylindro-parabolique

#### III-1-3-1: Calcul de la concentration produite par le miroir cylindro-parabolique

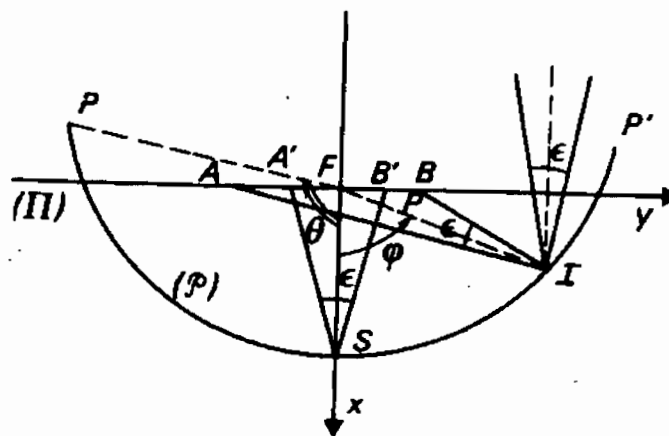


Figure 9 : calcul de concentration [3]

Considerons la parabole (p), de foyer F, de sommet S et soit un pinceau plat de rayons lumineux issus du soleil, d'ouverture  $\varepsilon$  convergeant au point I. Après reflexion, il coupe la trace ( $\pi$ ) du plan horizontal passant par F suivant un segment AB. Un pinceau plat, de même ouverture tombant en S coupe ( $\pi$ ) suivant le segment A'B'. Si l'on choisit F comme origine des coordonnées et des axes Fx et Fy comme indiqué sur la figure 9, on trouve, en appelant  $\rho$  et  $\phi$  les coordonnées polaires du point I et en admettant avec une erreur du second ordre que F est le milieu de AB, nous aurons :

Soit I' et F' les projections orthogonales de B respectivement sur AI et FI. On peut écrire :

$$FI \approx IB \approx \rho$$

$$\begin{cases} BI' \approx \varepsilon \rho \\ BF' \approx \frac{\varepsilon}{2} \rho \end{cases}$$

Nous avons :

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \frac{F'I}{FI} = 2 \times \left(\frac{F'B}{AB}\right) \quad (3.1.3.1.a)$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \cos \phi \quad (3.1.3.1.b)$$

$$\cos \phi = 2 \times \left(\frac{F'B}{AB}\right) = 2 \times \left(\frac{\frac{\varepsilon}{2} \rho}{AB}\right) \quad ; \rightarrow \quad AB = \frac{\varepsilon \rho}{\cos \phi} \quad (3.1.3.1.2)$$

Puis :

$$f = A'S = B'S \quad ; \quad \rightarrow \quad A'B' = f \varepsilon$$

La fraction de l'énergie reçue sur le segment focal AB est :

$$\xi_{\phi} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{f \cos \phi}{\varepsilon} \quad (3.1.3.1.3)$$

en tenant compte de l'équation de la polaire :  $\rho = \frac{2 \times f}{1 + \cos \phi}$ ,

il vient :

$$\xi_{\phi} = \frac{\cos\phi(1+\cos\phi)}{2} \quad (3.1.3.1.4)$$

Si  $I^*$  est la puissance reçue du soleil par unité d'air terrestre et H la longueur du miroir, l'énergie correspondant au diamètre d'ouverture D du miroir est :

$$I_D^* = 2 I^* \int_0^{\theta} H \rho \xi d\phi \quad (3.1.3.1.5a)$$

$$= 2 I \int_0^{\theta} H \frac{2F}{1+\cos\phi} \times \frac{\cos\phi(1+\cos\phi)}{2} d\phi \quad (3.1.3.1.5b)$$

$$= 2I^* f H \int_0^{\theta} \cos\phi d\phi$$

$$\rightarrow I_D^* = 2 I^* H f \sin\theta \quad (3.1.3.1.5c)$$

Cette énergie est reçue sur un rectangle d'aire H f ε.

La puissance par unité d'aire est donc :

$$\frac{I_D^*}{H f \varepsilon} = \frac{2 H f \sin\theta I^*}{H f \varepsilon} \quad (3.1.3.1.4)$$

Ce qui entraîne :

$$\frac{I_D^*}{H f \varepsilon} = \frac{2 \sin\theta I^*}{\varepsilon}$$

Et le facteur de concentration est :

$$C = \frac{2 \times \sin\theta}{\varepsilon} \quad (3.1.3.1.5)$$

### III-1-3-2 : Calcul des pertes énergétiques dues à la géométrie de la parabole

On peut appeler efficacité du miroir le rapport η entre l'énergie dans l'image de Gauss et l'énergie incidente reçue par la surface d'ouverture normale aux rayons lumineux :

$$\eta = \frac{I^* \times \pi \times f^2 \times \sin\theta}{I^* \times 4\pi \times f^2 \times \tan^2\frac{\theta}{2}} ; \quad \eta = \cos^4\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3.1.3.2.1)$$

Si  $\theta = 90^\circ$ ,  $\eta = 1/2 = 0,5$  alors l'image de Gauss ne recueille que la moitié de l'énergie incidente

### III-1-4 : Modèle de l'absorbeur

On va présenter deux modèles, le premier utilise l'optique géométrique et l'autre des équations thermodynamiques.

#### III-1-4-1 : Premier modèle

Dans ce modèle on utilise l'optique géométrique, pour considérer les pertes par réflexion et déduire ensuite le rayonnement transmis. On suppose que le verre n'est pas absorbant et que le corps noir (métal absorbant la chaleur) est parfait (il ne réfléchit pas la lumière).

##### a : Les pertes par réflexion

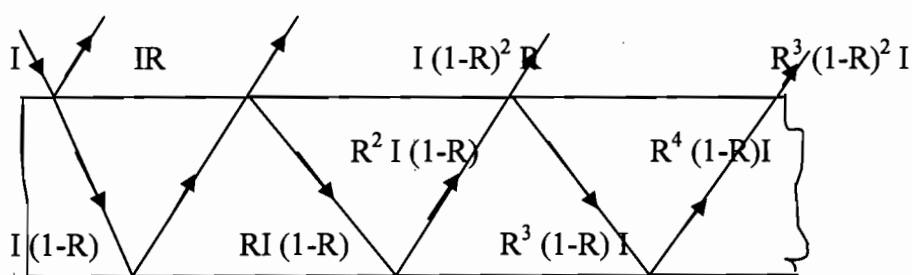


Figure 10 : pertes par réflexion

$$R = \frac{n_{\text{verre}} - n_{\text{air}}}{n_{\text{verre}} + n_{\text{air}}}$$

Avec :  $\begin{cases} n_{\text{verre}} = 1.5 : \text{indice de refraction du verre} \\ n_{\text{air}} = 1 : \text{ndice de refraction du verre} \\ R : \text{coefficient de convection verre - air} \end{cases}$

$$R = \left( \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right) = 0.04 = 4 \%$$

On suppose que le verre n'est pas absorbant et que le corps noir est parfait (il ne réfléchit pas la lumière). Si on désigne par  $\rho$  le coefficient global de ~~convection~~ <sup>réflexion</sup>, alors on peut écrire :

$$\rho I = RI + R(1-R)^2 I + R^3(1-R)^2 I + R^5(1-R)^2 I + \dots \tag{3.1.4.1a}$$

$$\rho = R + R(1-R)^2 + R^3(1-R)^2 + R^5(1-R)^2 + \dots \tag{3.1.4.1b}$$

En factorisant par R on voit apparaitre le développement limité de  $(1-R)/(1+R)$

$$\rho = R + R \times \left( \frac{1-\delta}{1+\delta} \right) \quad (3.1.4.2a)$$

$$\rho = \frac{2R}{1+\delta} \quad (3.1.4.2b)$$

$$\text{AN : } \rho = \frac{2 \times 0,04}{1 + 0,01} \rightarrow \rho = 7,7\%$$

### III-1-4-2 : Deuxième modèle

la figure suivante montre l'absorbeur en coupe

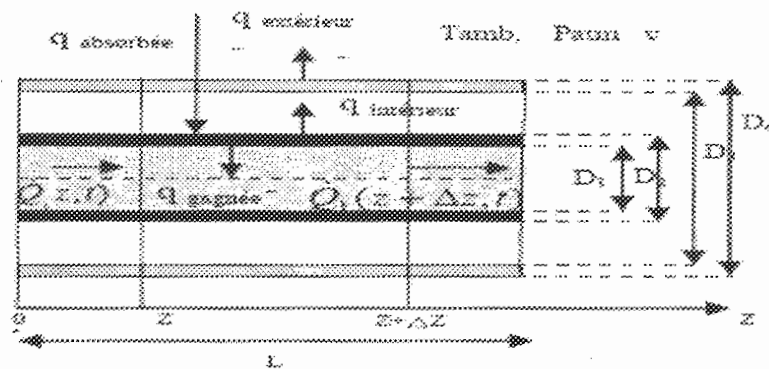


Figure 11 : Schéma d'un absorbeur

**Bilan thermique :** La figure 11 présente un schéma d'un absorbeur et ses différents éléments. On commence par un bilan énergétique du fluide caloporteur (HITEC), qui conduit à une équation partielle de température, la distance le long du tube absorbeur est indiquée par  $z$ . Donc l'équation du fluide caloporteur pendant le temps  $t$  dans un élément de la longueur  $\Delta z$  à la position  $z$  est donnée par [8] :

$$\frac{\partial(\Delta Q_1(z,t))}{\partial t} = \dot{Q}_1(z,t) - \dot{Q}_1(z + \Delta z, t) + q_{gagnée}(z,t)\Delta z \quad (3.1.4.2.1)$$

$q_{gagnée}$  est le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur. D'après la loi de la thermodynamique on a :

$$\Delta(Q_1(z,t)) = \rho_1 c_1 A_1 \Delta z T_1(z,t) \quad (3.1.4.2.2)$$

Avec :

$\rho_1, c_1,$  et  $T_1$  sont la densité, la chaleur spécifique et la température du fluide caloporteur respectivement où  $\rho_1, c_1,$  dépendent de la température  $T_1$ .

Par ailleurs, si  $\dot{V}$  est le débit volumique du fluide caloporteur, on peut écrire :

$$\dot{Q}_1(z, t) = \frac{\partial Q_1(z, t)}{\partial t} = \rho_1 c_1 \dot{V} T_1(z, t) \quad (3.1.4.2.3)$$

Après l'insertion de l'équation (3.1.4.2.2) et (3.1.4.2.3) dans l'équation (3.1.4.2.1) on trouve :

$$\rho_1 c_1 A_1 \Delta z \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial t} = \rho_1 c_1 \dot{V} T_1(z, t) - \rho_1 c_1 \dot{V} T_1(z + \Delta z, t) + q_{gagnée}(z, t) \Delta z \quad (3.1.4.2.4)$$

Après des simplifications l'équation (3.1.4.2.4) devient :

$$\rho_1 c_1 A_1 \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial t} = -\rho_1 c_1 \dot{V} \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} + q_{gagnée}(z, t) \quad (3.1.4.2.5)$$

La condition à la limite de l'équation (3.1.4.2.5) est :

$$T_1(0, t) = T_e \quad (3.1.4.2.6)$$

Où :  $T_e$  est la température d'entrée du fluide caloporteur.

La condition initiale s'écrit :

$$T_1(z, 0) = T_{amb} \quad (3.1.4.2.7)$$

$T_{amb}$  est la température ambiante.

Par l'analogie avec l'équation de la température du tube absorbeur  $T_2$  est obtenue :

$$\frac{\partial(\Delta Q_2(z, t))}{\partial t} = (q_{absorbée}(t) - q_{interieur}(z, t) - q_{gagnée}(z, t)) \Delta z \quad (3.1.4.2.8)$$

Avec :

$q_{interieur}$  le transfert thermique entre le tube en cuivre et l'enveloppe en verre

$q_{absorbée}$  l'énergie solaire absorbée

De la thermodynamique on a :

$$\Delta Q_2(Z, t) = \rho_2 c_2 A_2 \Delta z T_2(z, t) \quad (3.1.4.2.9)$$

$\rho_2$ ,  $c_2$  et  $T_2$  sont la densité, la chaleur spécifique et la température du tube absorbeur respectivement. La substitution de l'équation (3.1.4.2.9) dans l'équation (3.1.4.2.8) entraîne :

$$\rho_2 c_2 A_2 \frac{\partial T_2(z,t)}{\partial t} = q_{\text{absorbée}}(t) - q_{\text{interieur}}(z,t) - q_{\text{gagnée}}(z,t) \quad (3.1.4.2.10)$$

La condition initiale de l'équation (3.1.4.2.10) est :

$$T_2(z,0) = T_{\text{amb}} \quad (3.1.4.2.11)$$

Et de même pour la température du tube en verre  $T_3$ , on peut écrire :

$$\rho_3 c_3 A_3 \frac{\partial T_3(z,t)}{\partial t} = q_{\text{interieur}}(z,t) - q_{\text{exterieur}}(z,t) \quad (3.1.4.2.12)$$

$\rho_3$ ,  $c_3$  et  $T_3$  sont la densité, la chaleur spécifique et la température d'enveloppe en verre respectivement.

$q_{\text{exterieur}}$  est le transfert de chaleur entre le verre et l'environnement extérieur.

La condition initiale de l'équation (3.1.4.2.12) est :

$$T_3(z,0) = T_{\text{amb}} \quad (3.1.4.2.13)$$

#### a : Transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

En considérant la convection forcée dans le tube du fluide caloporteur.  $q_{\text{gagnée}}$  est calculée par l'équation de Dittus-Boelter pour l'écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent le nombre de Nusselt local est donnée par :

$$Nu_1 = 0.23 Re_1^{4/5} Pr_1^n \quad (3.1.4.2.14)$$

Où :  $n=0.4$  pour :  $T_2 > T_1$

$n = 0.3$  pour  $T_2 < T_1$

$Pr_1, Re_1$  est le nombre de Prandtl et le nombre de Reynolds respectivement.

Donc :  $q_{\text{gagnée}}$  est donnée par :

$$q_{\text{gagnée}} = h_1 \pi D_1 (T_2 - T_1) \quad (3.1.4.2.15)$$



Avec :  $h_1$ , le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur.

### **b : Transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'enveloppe de verre**

ce transfert  $q_{interieure}$  s'effectue par convection et le rayonnement, il est donc obtenue par la relation :

$$q_{interieure} = q_{interieure\ convection} + q_{interieure\ rayonnement}$$

L'échange par convection est calculé par les relations établies pour une convection naturelle entre deux cylindres horizontaux et concentriques.

$$q_{interieure\ convection} = \frac{2\pi\lambda g}{\ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)} (T_2 - T_3) \quad (3.1.4.2.16)$$

$\lambda g$  est le coefficient de conductivité thermique du vide dans le tube en verre. On peut assimiler cette convection à une conduction puisqu'il n'y a pas d'air à ce niveau.

$q_{interieure\ rayonnement}$  est donnée par la formule suivante:

$$q_{interieure\ rayonnement} = \frac{6D_2\pi(T_2^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_g}{\varepsilon_g} \left(\frac{D_2}{D_3}\right)} \quad (3.1.4.2.17)$$

Où :

- $\varepsilon_{abs}$  est l'émissivité de l'absorbeur, elle dépend de la température de l'absorbeur
- $\varepsilon_g$  est l'émissivité de l'enveloppe de verre
- $\sigma$  est la constante de Stefan Boltzmann [8].

### **c : Transfert de chaleur entre l'enveloppe de verre et l'environnement**

$$q_{exterieur} = q_{exterieur\ convection} + q_{exterieur\ rayonnement}$$

Dans le cas des cylindres fins dans l'air, Collis et Williams donnent le nombre de nusselt  $N_{ud}$  [6] :

$$N_{ud} = 0.3 + 0.5Re^{0.6}$$

Ainsi, nous pouvons calculer le coefficient de convection  $h_c$  sachant que :

$$h_c = \frac{N_{UD} \times \lambda}{D_4}$$

Donc :

$$q_{\text{extérieur convection}} = h_c \pi D_4 (T_3 - T_{amb})$$

Avec :

$\lambda$  : coefficient de conductivité thermique du verre = 1,35 w/m.K [8] ;

D : le diamètre du cylindre.

#### **d : Différence de température entre le fluide et l'absorbeur**

Maintenant que nous connaissons la puissance reçue par la parabole, nous admettons que celle ci est intégralement transmise au tube se trouvant au foyer.

Nous allons maintenant déterminer le gain de température pour le fluide caloporteur circulant dans la conduite.

Pour cela considérons l'équation de la chaleur en régime transitoire en deux dimensions en admettant que les propriétés physiques C et  $\lambda$  sont indépendants de T [6] [7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q/\lambda \right) \quad (3.1.4.2.18)$$

Avec :

- $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  est la diffusivité thermique en  $m^2/s$  ;
- q une source de chaleur en  $W/m^3$

En régime permanent on peut approximer l'équation par :

$$\rho C u \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + P \quad (3.1.4.2.19)$$

Puisque  $z = u \cdot t$

Avec :

- $u = u_0$  la vitesse (constante) du fluide.
- $\rho$  sa masse volumique.
- $C$ , sa chaleur massique.
- $\lambda$  sa conductivité thermique.

$$P = q / \rho C$$

Considérant d'ordre 1 tous les termes dans la direction de l'écoulement, et d'ordre  $\varepsilon$  tous les termes dans la direction normale à l'écoulement, cette équation devient :

$$\rho c u \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + P \quad (3.1.4.2.20)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q - K \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.1.4.2.21)$$

Avec :

- $Q = P / \lambda$
- $K = \rho c u / \lambda$

Pour résoudre l'équation différentielle posons  $\frac{\partial T}{\partial z} = U$ ,

On obtient :

$$U = \frac{Q}{K} + A \cdot \exp(Kz) \quad (3.1.4.2.21)$$

$$\Delta T = T(z) - T(0) = \frac{Q}{K} z + \frac{A}{K} \cdot \exp(Kz) + \frac{A}{K}$$

avec :

- $\Delta T$  la différence de température entre l'absorbeur et le fluide caloporteur. En  $z=L$ , la variation de température est nulle :

$$A = \frac{Q}{K \cdot \exp(KL)}$$

### ➤ Les pertes de charges

Elles s'écrivent :

$$H = f \frac{Lu^2}{D2g}$$

Avec :

- H : les pertes de charges ;                      m
- f : coefficient des pertes de charges ;
- L : la longueur de la conduite ;                m
- D : le diamètre hydraulique ;                    mm
- u : la vitesse du fluide.                            m/s

Pour faire augmenter ou diminuer cet écart de température, nous pouvons jouer sur plusieurs paramètres :

- Le débit : plus il sera grand, plus l'écart de température sera faible (et les pertes de charges augmenteront).
- Le diamètre de notre tuyau : plus il sera faible plus l'écart de température sera grand (mais les pertes de charges aussi).
- On peut également tenter de construire un tuyau en serpentin afin que le fluide caloporteur passe plusieurs fois dans la ligne focale [A] [B] [C].

### III-1-5 : Modèle du débit du HITEC

Dans un premier temps, le débit du HITEC à l'entrée du récepteur ou absorbeur solaire est donné par la relation :

$$Qa = \frac{\text{Puissance totale incidente} - \text{pertes totales}}{CP \times (THSN - THEN)} \quad (3.1.5.1)$$

Avec :

- CP : capacité calorifique ;
- THSN : température nominale de sortie du HITEC ;
- THEN : température nominale d'entrée du HITEC.

Nous allons ensuite procéder par itération pour trouver le débit, les pertes et la température à la sortie du récepteur solaire. Le test de convergence est fait sur la température de sortie du HITEC ; il doit vérifier la condition suivante

$$(THSN - \text{temperature nominale de sortie})^2 < 1^\circ\text{C} \quad (3.1.5.2)$$

Finalement, le débit  $Q_a$  s'écrit :

$$Q_a = \frac{Q_t \times CP \times (TH - \text{temperature d'arrivée du HITEC})}{CP \times (THSN - THEN)} \quad (3.1.5.3)$$

Après être sortie du tube absorbeur une grande partie du HITEC est acheminée vers le générateur de vapeur ; l'autre est soutiré pour maintenir constante la température du HITEC « froid ».

Soit :  $Q_1$  et  $Q_2$  les débits acheminés respectivement vers le générateur de vapeur ( $\mu < 1$ ) et vers le ballon « froid », on peut écrire :

$$Q_1 = \mu \times Q_a$$

$$Q_2 = Q_a - Q_1$$

### III-1-6 : Modèle de stockage

#### ➤ Hypothèses

La température du HITEC est homogène dans le réservoir de stockage.

La variation d'énergie interne du HITEC est égale aux pertes thermiques totales du stockage.

Les pertes thermiques du réservoir sont celles d'une cuve cylindrique isotherme.

#### ➤ Description du modèle

Les deux réservoirs de stockage ont un volume identique de  $x \text{ m}^3$  chacun. Le stockage « chaud » et le stockage « froid » contiennent du sel dont la température est à fixer.

Nous allons présenter un modèle énergétique de ce système de stockage, obtenu en écrivant l'équation différentielle du bilan énergétique et la loi de conservation de la masse. Il nous permettra d'étudier la gestion de la centrale pour un stockage thermique et une prévision météorologique donnés. Le modèle des pertes thermiques permet d'étudier le refroidissement du stockage après arrêt de la centrale.

#### III-1-6-1 : Modèle du stockage « chaud »

Le stockage « chaud » est caractérisé par la masse  $M_H$  et la température  $TH$  de stockage du liquide HITEC.

Le système considéré est le réservoir de stockage de liquide chaud.

Selon la loi de conservation de la masse, nous pouvons écrire l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d}{dt}(MH) = QHE - QHS \quad (3.1.6.1.1)$$

Soit :

$$MH = MH_0 + (QHE - QHS) \times t \quad (3.1.6.1.2)$$

Avec :

- $MH_0$  la masse du HITEC à  $t = 0$ ,  $t$  est le temps écoulé ;
- $QHE$  est le débit massique entrant dans le réservoir et  $QHS$  celui sortant.

Le bilan énergétique instantané dans le réservoir s'écrit sous la forme :

$$\frac{d}{dt}(MH \times CP \times TH) = QHE \times CP \times THE - QHS \times CP \times TH - Wp \quad (3.1.6.1.3)$$

Avec :

- $THE$  et  $TH$  sont respectivement les températures à l'entrée et à la sortie ou à l'intérieur du système.
- $Wp$  représente les pertes énergétiques.
- $CP$  est la capacité calorifique du liquide et est supposée constante durant tout le processus.

Par suite on obtient :

$$\frac{d}{dt}(MH \times TH) = QHE \times THE - QHS \times TH - \frac{Wp}{CP} \quad (3.1.6.1.4)$$

$$MH \times \frac{d}{dt}TH + TH \times \frac{d}{dt}MH = QHE \times THE - QHS \times TH - \frac{Wp}{CP}$$

En remplaçant  $\frac{d}{dt}MH$  par son expression dans l'équation (3.1.6.1.1), nous obtenons

$$MH \times \frac{d}{dt}TH = QHE \times THE - QHS \times TH - \frac{Wp}{CP} - TH \times (QHE - QHS)$$

$$MH \times \frac{d}{dt}TH = QHE \times THE - QHE \times TH - \frac{Wp}{CP}$$

$$MH \times \frac{d}{dt}TH = -QHE \times \left( TH - \left( THE - \frac{Wp}{QHE \times CP} \right) \right)$$

$$\frac{d}{dt}TH = -\frac{QHE}{MH} \times \left( TH - \left( THE - \frac{Wp}{QHE \times CP} \right) \right)$$

Soit

$$TH = A + (TH_0 - A) \times e^{(B \times t)} \quad (3.1.6.1.10)$$

Avec :

$$A = THE - \frac{Wp}{QHE \times CP}$$

$$B = -\frac{QHE}{MH}$$

$TH0 =$  température du stockage "chaud" à  $t = 0$ .

### III-1-6-2 : Modèle du stockage « froid »

Les calculs sont analogues à ceux appliqués au stockage « chaud » les hypothèses restent valables aussi au niveau du système réservoir liquide froid.

La conservation de la masse donne :

$$\frac{d}{dt} MH = QHE + QHB - QHS \quad (3.1.6.2.1)$$

Soit :

$$MH = MHS + (QHE + QHB - QHS). t \quad (3.1.6.2.2)$$

QHB est le débit massique soutiré du débit sortant de l'absorbeur.

Et la conservation de l'énergie s'exprime par :

$$\frac{d}{dt} (MH \times CP \times TH) = QH \times CP \times THE + QHB \times CP \times THB - QHS \times CP \times THS - Wp$$

Soit :

$$TH = D + (TH0 - D) \times e^{(C \times t)} \quad (3.1.6.2.2)$$

Avec :

$$D = (QHE \times THE + QHB \times THB - \frac{Wp}{CP}) / (QHE + QHB)$$

$$C = -\frac{QHE + QHB}{MH}$$

$TH =$  température du stockage "froid" à  $t = 0$

#### a : Pertes du stockage

Les pertes thermiques totales du stockage correspondent à une diminution de l'énergie interne du HITEC. Le bilan énergétique du réservoir au temps  $t$  s'écrit :

$$Wp = -MH \times CP \times \frac{d}{dt} TH \quad (3.1.6.2.3)$$

Le flux de chaleur  $Wp$  entre le HITEC à la température  $TH$  et l'air ambiant TAM est conservatif et s'écrit :

$$W_p = \sum (K \times S) \times (T_H - T_{AM}) \quad (3.1.6.2.4)$$

Avec :

$$\sum (K \times S) = K_1 \times S_1 + K_2 \times S_2$$

Où :

$K_1, K_2$  désignent respectivement les coefficients d'échange global du cylindre et des deux disques.

$S_1, S_2$  désignent respectivement les surfaces d'échanges du cylindre et des deux disques.

$$S_1 = 2\pi RL$$

$$S_2 = \pi R^2 + \pi R^2 = 2\pi R^2$$

#### ➤ Coefficient d'échange global

Pour le cylindre, le coefficient d'échange global rapporté à la surface interne  $S_1$  s'écrit :

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{KH} + \frac{R}{\lambda A} \ln \frac{RA}{R} + \frac{R}{\lambda C} \ln \frac{RC}{RA} + \frac{R}{\lambda G} \ln \frac{RG}{RC} + \frac{R}{RG.K_0} \quad (3.1.6.2.5)$$

Pour les deux disques fermant le cylindre

$$\frac{1}{K_2} = \frac{1}{KH} + \frac{EA}{\lambda A} + \frac{EC}{\lambda C} + \frac{EG}{\lambda G} + \frac{1}{K_0} \quad (3.1.6.2.6)$$

Avec

$K_1$  : le coefficient d'échange global rapporté à la surface interne  $S_1$  en  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$KH$  et  $K_0$  sont respectivement les coefficients de convection interne et externe en  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$K_2$  : le coefficient d'échange global rapporté à la surface interne  $S_2$  en  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$R, RA, RG$  et  $RC$  résistances thermiques respectivement global, de l'acier, laine de roche et du calorifuge en  $m^2 \cdot K/W$

$\lambda A, \lambda C$  et  $\lambda G$  les coefficients de conductivité thermique de l'acier, du calorifuge et du laine de roche en  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ .



### ➤ Coefficient d'échange du HITEC

On se place dans le cas du liquide circulant à faible vitesse dans un cylindre horizontal. La relation de Colburn et Hougen donne alors :

$$Nu = 0.64 \times (GrGr.Pr)^{0.25}$$

$$\frac{K.D}{\lambda} = 0.64 \times \left( \frac{g.d^3.\rho^2.\beta.CP.\Delta t}{\mu} \right)^{0.25}$$

Avec :

K : coefficient d'échange exprimé en  $w/m^2 \text{ } ^\circ C$

G :  $9.81 m/s^2$ , intensité du champ terrestre

D : diamètre intérieur du tube m

$\lambda$  : conductivité du fluide  $w/m \text{ } ^\circ C$

$\rho$  : masse volumique du fluide  $Kg/m^3$

$\beta$  : Coefficient de dilatation en volume  $1/^\circ C$

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide  $Kg/m/s$

$\Delta t$  : Différence de température entre la paroi et le fluide  $^\circ C$

Nu : Nombre de Nusselt

Gr : Nombre de Grashof

Pr : Nombre de Prandtl

L'application numérique au HITEC donne :

$$KH = 4.4546 \times (2082 - 0.7288 \times TH)^{0.5} \times (TH - TA)^{0.25} \times \text{Exp}\left(\frac{-561.75}{TH+273.15}\right) \quad (3.1.6.2.6)$$

### ➤ Coefficient d'échange externe

Le coefficient d'échange externe comprend le coefficient de convection KF et le coefficient de rayonnement KR [7].

Si l'on chauffe l'air à la température ambiante à l'aide du cylindre horizontal de diamètre D, la relation de Colburn et Hougen donne [7]:

$$KF = 6.16 \times \left(\frac{\Delta t}{D}\right)^{0.25} \quad (3.1.6.2.7)$$

Où D est exprimé en mm.

Selon la loi de STEFAN-BOLTZMANN, le coefficient de transfert par rayonnement externe entre le réservoir à la température TG et l'air ambiant à la température TAM peut s'écrire

$$KR = \frac{6.\varepsilon(TG+273.15)^4 - (TAM+273.15)^4}{TG - TAM} \quad (3.1.6.2.7)$$

Avec :

- $\sigma$  : constante de STEFAN-BOLZMANN =  $5.67.10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ K}^4$
- $\varepsilon$  : Emissivité de la surface = 0.26 pour l'acier galvanisé.

Nous obtenons donc le coefficient d'échange externe :

$$K0 = KF + KR \quad (3.1.6.2.8)$$

En résolvant l'équation obtenue en égalisant (3.1.6.2.3) et (3.1.6.2.4)

$$-MH \times CP \times \frac{d}{dt} TH = \Sigma(K \times S) \times (TH - TAM),$$

il vient:

$$TH = TAM + (TH0 - TAM) \cdot \text{EXP}\left(\frac{-\Sigma(K \times S)}{MH \times CPH} t\right) \quad (3.1.6.2.9)$$

Nous obtenons ainsi la température du HITEC après refroidissement à l'instant t. Nous pouvons alors calculer successivement les pertes thermiques  $Wp$  pour chaque pas de temps.

### III-2) Modélisation du système secondaire

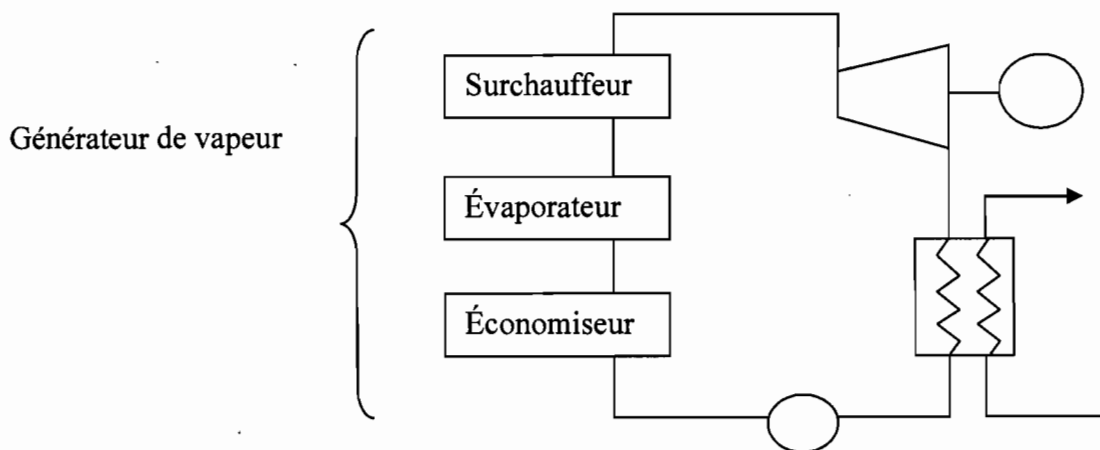


Figure 12 : schéma du système secondaire

#### III-2-1 : Introduction

Ce système se compose de deux circuits principaux : le circuit HITEC « H » et le circuit EAU-VAPEUR « E-V ». Le modèle du premier fait intervenir la masse et la température tandis que le modèle du second fait, de plus intervenir la pression.

Il s'agit d'un modèle établi en régime permanent en écrivant des équations algébriques qui traduisent les bilans globaux aux bornes des éléments.

Les bilans de masses s'expriment par des égalités entre les débits d'entrée et de sortie. De la même façon, les bilans d'énergie sont effectués globalement entre les entrées et les sorties des éléments.

La conservation de la quantité de mouvement conduit à des équations algébriques traduisant soit les effets de pertes de charge, soit les phénomènes de détente dans les turbines.

Le modèle décrit dans ce chapitre permet de représenter, d'une manière simple, les différents régimes de fonctionnement du système secondaire lorsque sa charge varie.

### **III-2-2 : Modèle des Echangeurs**

Un échangeur se caractérise par les débits et les températures des deux fluides à l'entrée et à la sortie. Nous n'étudions ici que l'aspect thermique des échanges en nous limitant au régime permanent de fonctionnement.

#### **III-2-2-1 : Description du modèle**

Ce modèle permet de déterminer les nouvelles conditions de fonctionnement d'un échangeur en connaissant un état de référence (régime nominal de fonctionnement) qui est défini par les débits des deux fluides et les quatre températures. Pour calculer le nouvel état, il faut connaître les deux débits et deux des quatre températures.

Normalement, le coefficient d'échange global  $K$  est un paramètre local, qui peut varier le long de l'échangeur. Pour simplifier le modèle, nous admettons que ce coefficient reste constant tout le long de l'échangeur. D'ailleurs, nous posons que les capacités calorifiques massiques des fluides ne varient pas d'un pas d'un état de fonctionnement à l'autre. La nomenclature suivante est relative aux équations qui traduisent le modèle décrit.

#### **NOMENCLATURE**

CPE	capacité calorifique du fluide froid (eau ou vapeur)	J/kg.°C
CPH	capacité calorifique du fluide chaud (HITEC)	J/kg.°C
de	diamètre extérieur du tube	mm
di	diamètre intérieur du tube	mm

dh	diamètre hydraulique	mm
Di	diamètre intérieur de la calandre	mm
Fe, fi	facteur d'encrassement extérieur et intérieur	
K, $K_G$	coefficient d'échange global	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
KE, KH	coefficient des films externe et interne	
KEl	coefficient du film externe longitudinal	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
l	espacement des chicanes	mm
pas	pas des tubes	mm
PM	périmètre mouillé	mm
QE, QH	débit massique du fluide froid et du fluide chaud	kg/s
re, ri	rayons extérieur et intérieur du tube	mm
Pr	nombre de Prandtl	
Nu	Nombre de Nusselt	
Re	Nombre de Reynolds	
Sp	section de passage	m <sup>2</sup>
S	surface totale d'échange	m <sup>2</sup>
TEE, TES	température du fluide froid à l'entrée et à la sortie	°K
THE, THS	température du fluide à l'entrée et à la sortie	°K
TM	écart logarithmique des températures	°K
V	vitesse du fluide	m/s
W	puissance échangée	watt
$\rho$	masse volumique du fluide	kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	Conductivité du fluide	W/m.°C
$\lambda_A$	conductivité du matériau du tube	W/m.°C
$\mu$	viscosité dynamique du fluide à la température du fluide	kg/m/s
$\mu_t$	viscosité dynamique du fluide à la température de la paroi.	kg/m/s

### **III-2-2-2 : Equations exprimant les échanges**

Nous allons utiliser un échangeur à contre courant a cause de son rendement plus élevé que celui d'un échangeur à courants parallèles

La chaleur échangée  $W_e$  à travers la surface S peut s'exprimer de trois manières [7] :

$$We = K \times S \times TM \quad (3.2.2.2.1)$$

$$We = QH \times CPH \times (THE - THS) \quad \text{Chaleur cédée par le HITEC} \quad (3.2.2.2.2)$$

$$We = QE \times CPE \times (TES - TEE) \quad \text{Chaleur reçue par la vapeur} \quad (3.2.2.2.3)$$

Avec :

$$TM = \frac{(THE - TES) - (THS - TEE)}{\text{Log}\left(\frac{THE - TES}{THS - TEE}\right)} = \frac{(THE - THS) - (TES - TEE)}{\text{Log}\left(\frac{THE - TES}{THS - TEE}\right)} \quad (3.2.2.2.4)$$

Ou encore :

$$TM = \frac{We \left( \frac{1}{QH \times CPH} - \frac{1}{QE \times CPE} \right)}{\text{Log}\left(\frac{THE - TES}{THS - TEE}\right)}$$

En introduisant la valeur de TM, nous obtenons donc :

$$\text{Log}\left(\frac{THE - TES}{THS - TEE}\right) = \frac{K \times S}{QE \times CPE} \times \left( \frac{QE \times CPE}{QH \times CPH} - 1 \right) \quad (3.2.2.2.5)$$

Posons :

$$R = \frac{QE \times CPE}{QH \times CPH}$$

$$U = \text{Exp}\left(\frac{K \times S}{QE \times CPE}\right) \times (R - 1)$$

Il en résulte :

$$TH - TEE = (THE - TES) / U \quad (3.2.2.2.6)$$

En égalisant (3.2.2.2.2) et (3.2.2.2.3), il vient la relation :

$$THE - THS = R \times (TES - TEE) \quad (3.2.2.2.7)$$

Connaissant les deux températures à l'entrée *THE* et *TEE*, nous pouvons déterminer les deux températures à la sortie suivantes.

D'après (3.2.2.2.6) et (3.2.2.2.7), nous pouvons écrire :

$$TES = TEE + (THE - TEE)$$

En introduisant l'équation précédente dans (3.2.2.2.6), il vient :

$$THS = TEE + \frac{R-1}{U \times R - 1} \times (THE - TEE)$$

### a : Coefficient d'échange global

Le coefficient d'échange global représente la conductance thermique interposée entre les deux fluides. Il comprend principalement trois termes [7]:

- coefficient de convection fluide chaud-paroi, KH,
- coefficient de conduction à travers la paroi, en fonction de la conductivité du matériau et de l'épaisseur de la paroi,
- coefficient de convection paroi-fluide froid, KF.

Pour le cylindre, le coefficient d'échange rapporté à la surface externe S s'écrit :

$$\frac{1}{KG} = \frac{re}{ri} \times \frac{1}{KH} + \frac{re}{ri} \times fi + \frac{re}{\lambda a} \times \text{Log} \left( \frac{re}{ri} \right) + fe + \frac{1}{KE} \quad (3.2.2.2.8)$$

KG est le coefficient d'échange global avec encrassement. Lorsque l'échangeur est neuf, les résistances d'encrassement intérieure fi et extérieure fe sont nulles et on définit un coefficient d'échange global propre K en négligeant le terme de conduction :

$$\frac{1}{K} = \frac{re}{ri} \times \frac{1}{KH} + \frac{1}{KE} \quad (3.2.2.2.9)$$

### b : Coefficient d'échange KH à travers le film intérieur

La formule générale de Colburn s'écrit [7]:

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

Avec :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot di}{\mu} = \frac{4 \cdot QH}{\pi \cdot di \cdot \mu}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot CP}{\lambda}$$

Nous avons donc :

$$KH = \frac{\lambda}{di} \cdot Nu = 0.023 \times \frac{\lambda}{di} \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (3.2.2.2.10)$$

Ou encore :

$$KH = 0.023 \times \frac{\lambda}{di} \times \left( \frac{4}{\pi \cdot di \cdot \mu} \right)^{0.8} \times Pr^{0.4} \times QH^{0.8}$$

En régime nominal :

$$KH_N = 0.023 \times \frac{\lambda}{di} \times \left( \frac{4}{\pi \cdot di \cdot \mu} \right)^{0.8} \times Pr^{0.4} \times QH^{0.8}$$

Et pour tout état en faisant le rapport des deux équations précédentes on a :

$$KH = KHN \left( \frac{QH}{QHN} \right)^{0.8} \quad (3.2.2.2.11)$$

### c : Coefficient d'échange KE à travers le film externe

#### ➤ Ecoulement sans chicane

Considérons que la formule générale de Colburn reste valable dans le cas d'un écoulement longitudinal à condition d'utiliser le diamètre hydraulique  $dh$ , au lieu de  $di$ . Il vient donc [7]:

$$KEl = 0.023 \times \frac{\lambda}{dh} \times Re^{0.8} \times Pr^{1/3}$$

Où :

$$dh = \frac{4 \times \text{section de passage}}{\text{perimetre mouillé}} = \frac{4.Sp}{PM} \quad (3.2.2.2.12)$$

$$Re = \frac{\rho \times V \times dh}{\mu} = \frac{4 \times QE}{\mu \times PM} = \frac{QE \times dh}{\mu \times Sp} \quad (3.2.2.2.13)$$

$$Pr = \frac{\mu \times CP}{\lambda} \quad (3.2.2.2.14)$$

#### ➤ Ecoulement en présence de chicanes

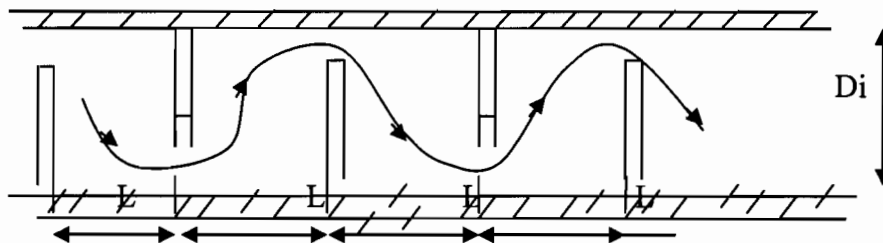


Figure 13 : Ecoulement en présence de chicane

Nous utilisons les formules données par Grégorig concernant les courants croisés ; celle relative au nombre de Nusselt est :

$$Nu = \frac{K1 \times K2}{0.908} \times Re^m \times Pr^{0.31} \quad \text{pour : } 2000 < Re < 40000$$

Avec :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot de}{\mu} = \frac{QE \times de}{\mu \times Sp}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot CP}{\lambda}$$

$$KE = \frac{\lambda}{de} \times Nu$$

$$Sp = \frac{l \times (pas - de) \times Di}{Pas} \quad (3.2.2.2.15)$$

Où :

*l* : espacement des chicanes

*Pas* : pas des tubes

*De* : diamètre intérieur de la calandre

*Di* : Diamètre intérieur de la calandre

*K1* : facteur dû à l'inclinaison du courant moyen par rapport à l'horizontale.

*K2* et *m* sont des constantes.

### III-2-3 : Modèle du générateur de vapeur

NOMENCLATURE relative à ce modèle

#### NOMENCLATURE

EV désigne évaporateur, GV désigne générateur de vapeur, EQ économiseur et ZU surchauffeur.

QHGV est le débit massique du fluide HITEC dans le générateur de vapeur

QEEGV est le débit massique d'entrée de l'eau dans le générateur de vapeur

QEEEQ est le débit massique d'entrée de l'eau dans l'économiseur.

QEEEV est le débit massique d'entrée de l'eau dans l'évaporateur.

QVEZU est le débit massique d'entrée de la vapeur dans le surchauffeur.

QVSGV est le débit massique de sortie de la vapeur dans le générateur de vapeur.

THE et THS désignent les températures d'entrée et de sortie du HITEC de même TEE et TES désignent les températures d'entrée et de sortie de l'eau. TV désigne température de vapeur.

Ces notations de températures peuvent être suivies d'une notation d'appareil comme EQ qui donne par exemple THEEQ qui désigne la température d'entrée du fluide HITEC dans l'économiseur. On peut ajouter la lettre N pour signifier « nominal » donc :

TEEEV est la température d'eau entrant dans l'évaporateur.



$T_{EEEQ}$  est la température d'eau entrant dans l'économiseur.

$T_{VSEV}$  est la température de vapeur sortante de l'évaporateur.

$T_{SV}$  est la température de vapeur sortante de du générateur de vapeur.

$T_{HEGV}$  est la température du HITEC entrant dans le générateur de vapeur.

$T_{HSEV}$  est la température du HITEC sortant de l'évaporateur

$T_{HSGV}$  est la température du HITEC sortant du générateur de vapeur

$T_{HSEQ}$  est la température du HITEC sortant de l'

$T_{ESEQ}$  est la température d'eau sortante de l'économiseur

$T_{HEEQ}$  est la température du HITEC entrant dans l'économiseur

$T_{EMEV}$  est la température moyenne de HAUSBRAND de l'eau dans l'évaporateur.

$T_{MEQ}$  est la température moyenne de HAUSBRAND dans l'économiseur.

$T_{MZU}$  est la température moyenne de HAUSBRAND dans le surchauffeur.

$T_{HEEV}$  est la température du HITEC entrant dans l'évaporateur.

$KEQ$  et  $SEQ$  sont le coefficient global d'échange et la surface d'échange dans l'économiseur

$KEV$  et  $SEV$  sont le coefficient global d'échange et le surface d'échange dans l'évaporateur

$KZU$  le coefficient global d'échange dans le surchauffeur

$WZU$  est le travail échangé à travers la surface d'échange  $SZU$

$WEQ$  est le travail échangé à travers la surface d'échange  $SEQ$

$WEV$  est le travail échangé à travers la surface d'échange  $SEV$

$CPVZU$  est la capacité calorifique de la vapeur dans le surchauffeur.

### ➤ Hypothèses

Le générateur de vapeur comprend l'économiseur, l'évaporateur, et le surchauffeur à l'intérieur d'une seule calandre.

Le HITEC liquide circule dans les tubes et cède ses calories à l'eau sous-saturée pour la transformer en vapeur surchauffée.

Pour simplifier le modèle, nous avons posé les hypothèses suivantes :

- Les régimes hydrauliques des deux fluides sont considérés comme quasiment permanents. A chaque instant, le générateur de vapeur est traversé par deux débits QHGV et QEEGV uniformes tout au long de l'échangeur. Nous avons donc :  
 $QEEGV=QEEEQ=QEEEV=QVEZU=QVSGV$
- La température du HITEC THEGV à l'entrée du générateur de vapeur est constante et égale à 400°C.
- L'évaporateur EV ne contient que de l'eau en ébullition à pression constante d'où :  
 $TEEEV=TVSEV=TSV$
- Le coefficient d'échange global K varie comme la puissance 0.8 du débit de vapeur. D'après (3.2.2.2.11):  

$$K = KN \times \left(\frac{QV}{QVN}\right)^{0.8}$$
- La chaleur massique de la vapeur CPV est constante et égale au rapport de l'enthalpie à la température en régime nominal :

$$CPV = \frac{HVS_N - HVEN}{TVSN - TVEN}$$

### ➤ Description du modèle

Le modèle des échangeurs établi au paragraphe précédent permet de déterminer les différents régimes de fonctionnement du générateur de vapeur.

Nous avons 4 variables d'entrée : les deux températures d'entrée THEGV, TEEGV, la pression PGV et le débit d'eau QEEGV qui correspond au besoin de la turbine.

Ce modèle permet de calculer les températures des deux fluides à l'entrée et à la sortie de l'économiseur, de l'évaporateur et du surchauffeur [7].

### III-2-3-1 : L'économiseur EQ

D'après les équations d'échange, nous pouvons écrire en adaptant les notations :

$$WEQ = KEQ \times SEQ \times TMEQ = KEQN \times SEQ \times TMEQ \times \left(\frac{QEEGV}{QEEGVN}\right)^{0.8} \quad (3.2.3.1)$$

$$= QEEEQ \times CPEEQ \times (TESEQ - TEEEQ) \quad (3.2.3.2)$$

$$= QHGV \times CPH \times (THEEQ - THSEQ) \quad (3.2.3.3)$$

Ou encore :

$$WEQ = QEEEQ \times (HSE - HEEEQ) = QHGV \times CPH \times (THSEV - THSGV) \quad (3.2.3.4)$$

L'écart de température  $\Delta T_{HEQ}$  au niveau du HITEC s'écrit :

$$\Delta THEQ = THEEQ - THSGV = \frac{QEEGV \times (HSE - HEEEQ)}{QHGV \times CPH} \quad (3.2.3.4)$$

### III-2-3-2 : L'évaporateur EV

La température de l'émulsion eau-vapeur reste constante et égale à la température saturante TSV, nous avons donc :

$$TVSEV = TEEEV = TSV$$

En adaptant les notations, les équations peuvent s'écrire:

$$WEV = KEV \times SEV \times TEMEV = QEEEV \times LEV = QHGV \times CPH \times (THEEV - THSEV) \quad \text{et}$$

$$TMEV = \frac{THEEV - THSEV}{\text{Log}\left(\frac{THEEV - TSV}{THSEV - TSV}\right)} \quad (3.2.3.5)$$

En raisonnant comme pour la modélisation des échangeurs. Nous pouvons écrire :

$$\text{Log} \frac{THEEV - TSV}{THSEV - TSV} = \frac{KEV \times SEV}{QHGV \times CPH} \quad (3.2.3.6)$$

Posons :

$$U1 = \text{EXP}\left(\frac{-KEV \times SEV}{QHGV \times CPH}\right)$$

$$\Delta THEV = THEEV - THSEV$$

Il s'ensuit :

$$THSEV = TSV + \Delta THEV \times \frac{U1}{1 - U1} \quad (3.2.3.7)$$

$$TEEV = THSEV + \Delta THEV \quad (3.2.3.8)$$

Calculons le coefficient d'échange global de l'évaporateur en régime nominal:

$$KEVN = \frac{QEEEVN \times LEVN}{SEV \times TMEVN} \quad (3.2.3.9)$$

D'après (3.2.2.2.11), nous avons :

$$KEV = KEVN \times \left(\frac{QEEGV}{QEEGVN}\right)^{0.8} \quad (3.2.3.10)$$

### III-2-3-3 : Le surchauffeur ZU

En effectuant les calculs utilisés pour modéliser les échangeurs, nous obtenons :

$$\begin{aligned} WZU &= KZU \times SZU \times TMZU \\ &= QEEGV \times CPVZU \times (TVSGV - TSV) = QEEGV \times (HVSGV - HSV) \\ &= QHGV \times CPH \times (THEGV - THEEV) \end{aligned} \quad (3.2.3.11)$$

$$TMZU = \frac{(THEGV - THEEV) - (TVSGV - TSV)}{\text{Log}\left(\frac{THEGV - TVSGV}{THEEV - TSV}\right)}$$

Posons :

$$U2 = \text{EXP}\left(\frac{KZU \times SZU}{QEEGV \times CPVZU} \times \left(\frac{QEEGV \times CPVZU}{QHGV \times CPH} - 1\right)\right)$$

Il en résulte :

$$TVSGV = THEGV - (THEEV - TSV) \times U2 \quad (3.2.3.12)$$

Nous avons :

$$KZUN = \frac{QEEGVN \times (HVSGVN - HSVN)}{SZU \times TMZUN}$$

Et d'après (3.2.2.2.12) : (3.2.3.13)

$$KZU = KZUN \times \left(\frac{QEEGV}{QEEGVN}\right)^{0.8}$$

Ou encore :

$$KZU \times SZU = KZUN \times SZUN \times \left(\frac{QEEGV}{QEEGVN}\right)^{0.8} \quad (3.2.3.14)$$

$$KSZU = KSZUN \times \left(\frac{QEEGV}{QEEGVN}\right)^{0.8} \quad (3.2.3.15)$$

$$\text{Et } CPVZU = \frac{HVSZUN - HSVN}{TVSZUN - TSVN} \quad (3.2.3.16)$$

### III-2-4 : Modèle de la turbine

#### III-2-4-1 : Introduction

C'est une turbine à action de type axial à 1 étage tournant à 3 000 tr/mn.

##### ➤ Hypothèses

Nous envisageons un modèle simplifié ne faisant intervenir que des valeurs globales des différents paramètres de l'écoulement : le débit de vapeur QV, la pression PV et la température TV.

Nous considérons que le rendement isentropique et le rendement interne de la turbine sont constants et égaux à leur valeur en régime nominal.

#### III-2-4-2 : Equation de la chute isentropique

Une détente isentropique correspond à un écoulement théorique réversible ou l'échange calorifique avec l'extérieur est nul (Q=0).

En transformant l'expression du premier principe de la thermodynamique afin de n'y faire apparaître comme travail que le travail externe sur l'arbre  $WI$ , nous trouvons dans le cas d'un écoulement adiabatique permanent dans un canal mobile :

$$WI + Q = \int dh + \Delta \frac{V^2}{2} \quad (2.4.2.2.1)$$

Ou encore :

$$WI = \int dh + \Delta \frac{V^2}{2} \quad (2.4.2.2.2)$$

En pratique, l'énergie cinétique du fluide aux deux extrémités de la machine est petite et plus souvent encore, de même importance. De la sorte  $\Delta \frac{V^2}{2} \approx 0$ .

Le terme  $WI$  s'identifie alors à la variation d'enthalpie statique  $\int dh$ . il vient donc :

$$WI = \int dh = HE - HSS \quad (2.4.2.2.3)$$

Dans une transformation adiabatique réversible ne possédant pas nécessairement le caractère de performance, il vient :

$$dh = dU + d(pV) = dU + pdV + VdP \quad (2.4.2.2.4)$$

$$dh = dW + dQ + pdV + Vdp = VdP \quad (2.4.2.2.5)$$

Nous avons donc :

$$WI = \int VdP \quad (2.4.2.2.6)$$

Avec  $PV^N = PE.VE^N = PS.VS^N = \text{constante}$ , nous trouvons la chute isentropique  $WI$  :

$$WI = \int_{PS}^{PE} VE \cdot \left(\frac{PE}{PS}\right)^{1/N} \cdot dP$$

$$WI = HE - HSS = \frac{N}{N-1} \times PE \times VE \times \left(1 - \left(\frac{PS}{PE}\right)^{\frac{N-1}{N}}\right) \quad (2.4.2.2.1)$$

### III-2-5 : Le stockage de l'hydrogène

De façon générale, le stockage de l'hydrogène est un véritable problème car pour la plupart des systèmes consommant de l'hydrogène, la production de ce gaz ne se fait pas sur place. Des méthodes sécuritaires de stockage d'hydrogène en grande quantité s'imposent. Dans le cas de notre installation, le stockage en gaz comprimé suffit, car la quantité stockée n'est pas très importante et le coût est moindre comparé aux autres types de stockage. La compression de l'hydrogène gazeux est donc un moyen d'augmenter la quantité stockée dans un volume fixe de réservoir. Pour cela, on utilise de réservoir de forme cylindrique en matériau composite renforcés avec de l'aluminium.

Nous remarquons que la pression de stockage nécessaire pour l'alimentation correspond à la pression de remplissage du réservoir.

Données du réservoir :

Pression maximale supportable par le réservoir  $P_{max} = 250$  bars

Volume du réservoir  $V = 50$  m<sup>3</sup>

Durée de vie du réservoir : 15 ans

Durée de fonctionnement du réservoir = 24h/24h

Prix du réservoir en moyenne = 1 189 000 Fcfa

#### **Données sur les conduites :**

Nous aurons une conduite liant l'électrolyseur et le réservoir de stockage. La conduite peut être approximée à 10 m de longueur et 2 cm de diamètre.

Prix par mètre de ce type de conduite avec protection extérieure à l'aluminium égale à 11 429 Fcfa/m.

Durée de fonctionnement de la conduite : 24h / 24h

Durée de vie de la conduite : 15 ans.

### **III-3 : Dimensionnement**

La méthodologie consiste estimer le besoin en hydrogène, puis à calculer la puissance nominale de l'électrolyseur, puis la charge globale en incluant la puissance absorbée par les moteurs et en fin de proche en proche, on déterminera les puissances des appareils de production d'énergie.

#### **III-3-1 : Détermination de la charge**

Au Sénégal 79.2m<sup>3</sup> d'hydrogène sont vendus en moyenne par AIR LIQUIDE et cette quantité équivaut à celle qui est vendue dans les pays de la sous région comme le MALI, la MAURITANIE, le BURKINA etc.

Notre installation devra donc prendre en compte ce marché potentiel plus celui des pays limitrophes qui n'ont pas été cités encore non cités.

Nous estimons la charge globale à 2000m<sup>3</sup>.

##### **III-3-1-1 : Puissance de l'électrolyseur**

Les électrolyseurs ont en général un rendement de 0.8. Des données concernant des électrolyseurs industriels donnent les indications suivantes : on a besoin environ de 5 kWh pour produire 1 m<sup>3</sup> d'hydrogène.

Donc pour ces 2000m<sup>3</sup> on aura besoin de :  $E_e = 10.000$  kWh par an

$$P_e = \frac{5 \times 2000}{52 \times 5 \times 8} \quad \text{puisque l'unité ne fonctionne que 8h/jour. Par suite,}$$

$$P_e = 4.81 \text{ KW}$$

La puissance absorbée par l'électrolyseur est de :

$$P_{ab} = \frac{P_e}{\eta}$$

$$P_{ab} = 4.81/0.8 = 6 \text{ KW}$$

### III-3-1-2 : Quantité d'eau nécessaire

pour produire un  $m^3$  d'hydrogène, il nous faut 0.8l d'eau distillée.

On aura besoin donc de  $V_{eau} = 0.8 \times 2000$

$$V_{eau} = 1600 \text{ l}$$

### III-3-1-3 : La puissance des moteurs pour la compression

L'énergie requise pour la compression de l'hydrogène de la pression ambiante à une pression de 20 MPa est de l'ordre de 7 % de l'énergie contenue dans l'hydrogène qui est de 3.55 kWh /  $m^3$ .

La puissance des moteurs pour la compression est donc :

$$P_{com} = 2000 \times \frac{3.55}{52 \times 5 \times 8} \times 0.07$$

$$P_{com} = 0.24 \text{ Kw}$$

### III-3-2 : La charge totale

La charge totale est constituée de l'électrolyseur, de l'éclairage et des moteurs asynchrones (rendement = 0,76) qui alimentent les compresseurs (2) et les pompes (4). Nous en dénombrons une entre le stockage froid est le miroir, une entre la source d'eau et le compresseur, une entre le compresseur et le générateur de vapeur. La dernière pompe alimente l'électrolyseur.

$$\text{Puissance électrolyseur } P_{ab} = 6 \text{ KW}$$

$$\text{Puissance des moteurs } P_{asy} = \frac{6 \times 0.24}{0.62} = 2,32 \text{ KW}$$

$$\text{Divers} = 15\% (6+2,32) = 1,25 \text{ KW}$$

Puissance correspondant à la charge totale est :

$$P_T = P_{ab} + P_{asy} + P_d = 9,57 \text{ KW}$$

C'est la puissance requise à la sortie du transformateur.

### III-3-3 : La puissance des autres appareils

Pour la suite, du processus de dimensionnement des autres éléments de notre unité, nous avons recensé les rendements moyens théoriques des différentes parties de l'unité afin d'estimer la puissance de chaque appareil. Ces informations sont regroupées dans le tableau suivant :

libellé	Rendement	Puissance (KW)
Charge totale		9.57
transformateur	0.95	10.07
alternateur	0.95	10.6
Cycle thermodynamique	0.4	26.51
absorbeur	0.4	66.3

**Tableau 4 : Puissance des appareils**

En définitif, nous aurons le rendement global théorique de toute l'installation :

$$\eta_{global} = \frac{Puissance_{entrée}}{Puissance_{sortie}} = \frac{9.57}{66.3}$$

$$\eta_{global} = 15 \%$$

Puisque, nous connaissons la puissance par unité d'aire de la parabole, nous allons déterminer maintenant la longueur minimale (Hmin) qui nous permettra de fournir à notre turbine la puissance optimale pour vaincre la charge.

Pour une unité d'aire  $A = 1 \text{ m}^2$ , on a une puissance  $P = \frac{2 \times \sin \theta \times I^*}{\epsilon}$ . Donc, pour la puissance souhaitée  $P = 64.3 \text{ KW}$ , nous aurons une surface  $A = \pi \times A'B' \times H$ .



Données :

A'B' : diamètre du tube = 2 cm

$\varepsilon$  : ouverture = 0.0093

$I^*$  : la luminance = 1000

$\theta$  : angle = 90°

Ceci nous permettra de calculer ( $H_{min}$ ) :

$$H_{min} = \frac{66.3 \times \varepsilon}{2 \times A'B' \times \sin \theta \times \pi \times I^*}$$

$$\text{A.N : } H_{min} = \frac{66.3 \times 10^3 \times 0.0093}{2 \times 0.02 \times \sin \theta \times \pi \times 1000}$$

$$H_{min} = 4.906 \text{ m} \approx 5 \text{ m}$$

### III-4 : Conclusion partielle

Cette modélisation n'est pas exhaustive, elle n'a concerné que certaines parties du système à cause du manque de temps. Une simulation aussi n'a pas été faite pour les mêmes raisons.

On note la présence de beaucoup d'inconnus à cause d'un manque de données très significatives sur plusieurs appareils du système.

## CHAPITRE IV : ETUDE FINANCIERE

### IV-1 : Etude de coût

Avant de faire une analyse de rentabilité financière, il faut d'abord avoir une idée sur les coûts et les recettes. Les coûts des divers éléments ont été obtenus auprès des fournisseurs après des recherches à travers l'internet.

#### IV-1-1 : Coût des équipements de production

Miroir cylindro-parabolique :	230*10*660 =	1 518 000 Fcfa
Tube sous vide :	40*660 =	26 400 Fcfa
Alimentation stabilisée :	EURO-CB EPS-1012 30*660 =	19 800 Fcfa
Alternateur :	A13N137 50*660 =	33 000 Fcfa
Turbine :	10 070 W * 40*0.62*660 =	164 825 740 Fcfa
Pompe (3) :	3*150*660 =	297 000 Fcfa
Stockage (2):	2* 200 000 =	400 000 Fcfa
Générateur de vapeur :=	=	15 552 000 Fcfa
Electrolyseur :	10 070 W * 3600 =	32 860 800 Fcfa
Réservoir de stockage pour l'hydrogène :	=	1 189 000 Fcfa
Conduites liants l'électrolyseur au réservoir :	15m * 11429 =	171 435 Fcfa
Distillateur d'eau :	AQUATRON réf : 75338 228*660 =	150 480 Fcfa
Suiveur solaire avec régulateur	349*660 =	230 340 Fcfa
Transformateur 24KV/358V	5600*660 =	3 696 000 Fcfa
Matériels électriques	=	8 000 Fcfa
Total	=	220 977 995 Fcfa
Coût d'installation (10%)	=	22 097 796 Fcfa
<b>Coût total</b>	=	<b>243 075 791 Fcfa</b>

#### IV-1-2 : Coût du matériel et mobilier de bureau

Voiture de service	=	7 000 000 Fcfa
2 ordinateurs	2*400 000 =	8 000 000 Fcfa
Une photocopieuse OKI FAX 5680	=	500 000 Fcfa
6 tables de bureau	6*30 000 =	180 000 Fcfa

15 chaises	15*5000	=	75 000 Fcfa
2 armoires de rangement	2*50 000	=	100 000 Fcfa
<b>Total</b>		=	<b>15 855 000 Fcfa</b>

#### IV-1-3 : Coût des matières premières

Les données suivantes sont les coûts unitaires de matières premières. Elles permettront de déterminer les coûts de matières premières pour chaque année. Il s'agit des prix.

Electrodes en nickel lourd (2/2 jours) :	52*5*2 000Fcfa	=	520 000 Fcfa
Carburant (véhicule) :(30*0,1*5*52) litres*550Fcfa		=	429 000 Fcfa
Hydroxyde de potassium (0,8*2 000 *20%) litres*2 000Fcfa		=	640 000Fcfa
Divers		=	50 000 Fcfa
<b>Total</b>		=	<b>1639 000 Fcfa</b>

#### IV-1-4 : Coût du personnel

Nous estimons les salaires mensuels bruts du personnel comme suit :

Directeur (ingénieur)	500 000 Fcfa
Deux ouvriers 2*80 000	160 000 Fcfa
Secrétaire	125 000 Fcfa
Technicien de surface	70 000 Fcfa
Gardien	75 000 Fcfa
Total	930 000 Fcfa/mois
Charge sociale (10%)	93 000 Fcfa
Total	1 023 000 Fcfa

Donc le montant total annuel des salaires bruts sera : **12 276 000 Fcfa/an**

#### IV-1-5 : Coût des équipements divers et de maintenance

Nous estimons ces coûts à 2 000 000 de Fcfa par an. Ces équipements concernent les outils (clé, marteau, pince...), les bouteilles d'huile...

#### IV-1-6 : Coût de construction Génie civil

A partir des données fournies par l'Institut Sénégalais de Normalisation évaluées en mètre carré bâti, nous allons estimer le coût de la construction à 120 000 Fcfa pour un bâtiment industriel et à 80 000 Fcfa pour un bâtiment à usage domestiques et 17 500 Fcfa pour la voirie (bitume).

#### IV-2 : Etude financière

L'étude financière a pour but de veiller à la rentabilité des capitaux investis et à l'équilibre financier des services chargés de gérer le projet.

Sur la base des informations disponibles, l'analyse financière cherchera à savoir si l'entreprise peut recouvrer les fonds investis à partir des recettes générées par le projet.

##### IV-2-1 : Les investissements

Un investissement est un engagement des ressources d'une organisation réalisé dans le présent dans l'espoir de réaliser des bénéfices futurs.

Avant tout investissement dans un projet, il faut s'assurer de sa rentabilité et de sa faisabilité.

Pour notre unité, nous allons considérer la rentabilité économique.

L'investissement de notre projet se présente comme suit :

Construction Génie civil	=	20 000 000 Fcfa
Equipement de production	=	243 075 791 Fcfa
Matériel et mobilier de bureau	=	15 855 000 Fcfa
Matériel divers	=	2 000 000 Fcfa
<b>Total</b>	<b>=</b>	<b>280 930 791 Fcfa</b>

##### IV-2-2 : Les projections financières

Le taux d'imposition actuel appliqué aux entreprises sénégalaises est de 25 % et nous allons considérer dans la suite de nos calculs un taux d'actualisation de 12%. En effet, le taux d'actualisation est le taux de rendement employé pour convertir une somme, payable ou recevable ultérieurement, à sa valeur actuelle.

### **IV-2-3 : L'amortissement (annexe 2)**

L'amortissement est une constatation comptable de la perte subie sur la valeur d'actif des immobilisations qui se déprécie par l'effet du temps, de l'usage et du changement technologique.

C'est une dépense qui n'entraîne aucune sortie d'argent ; elle est donc déductible d'impôts ; elle influence les flux monétaires en diminuant l'impôt payé.

L'amortissement dégressif peut être utilisé pour les biens d'équipements neufs et autres sauf les immeubles d'habitation, les chantiers et les locaux servant à l'exploitation de la profession acquis ou fabriqués depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1987 par les entreprises industrielles.

Nous allons l'utiliser dans le cadre de ce projet, car il varie avec le temps permettant de payer moins d'impôts lors des premières années où les recettes sont faibles et plus d'impôts pendant les dernières années où les recettes sont plus substantielles.

Dans l'amortissement dégressif le taux d'amortissement est obtenu à partir du taux linéaire affecté d'un coefficient égal à :

2 si la durée normale d'utilisation est inférieure ou égale à 5 ans ;

2.5 Si la durée normale d'utilisation est supérieure ou égale à 5 ans.

Lorsque l'amortissement calculé à partir du taux devient inférieur au quotient de la valeur résiduelle sur le nombre d'années d'utilisation normale restant à courir, il convient de terminer le tableau d'amortissement en prenant constantes égales au quotient de la valeur résiduelle sur le nombre d'années d'utilisation restantes.

### **IV-2-4 : Les recettes d'exploitation (annexes 3 et 5)**

Elles représentent le montant des ventes qui s'est concrètement traduit en cash. Pour pouvoir les déterminer, il faut connaître le prix de vente unitaire des produits.

C'est ainsi que nous allons déterminer le prix de vente unitaire en nous basant sur la notion du seuil de rentabilité. En effet, le seuil de rentabilité nous permettra d'avoir une approximation du prix de revient afin d'en déduire un prix de vente. Il faut noter que cette méthode n'est pas exacte car elle ne tient pas compte de la dépréciation de la valeur dans le temps.

### **IV-2-5 : Détermination du prix de vente du produit**

Nous supposons que la vente annuelle est constante et est égale à 2 000 m<sup>3</sup> par années.

D'après les informations obtenues à travers AIR LIQUIDE, le prix de vente du mètre cube ( $m^3$ ) d'hydrogène (hors taxe) sur le marché sénégalais est de **29 500 Fcfa**. Soit :

CV : coût variable ;

CF : coût fixe ;

Q : quantité de produit.

#### IV-2-5-1 : Détermination des coûts variables

Ce sont les coûts qui sont liés directement au volume de production. Ils se composent essentiellement des coûts de l'énergie, de maintenance et de la matière première. Nous aurons donc :

Equipement divers et maintenance :	$2\,000\,000/5/2000 =$	200 Fcfa
Coût annuel matières premières/Q :	$1\,639\,000/2\,000 =$	820 Fcfa
Main d'œuvre	$355\,500/2000$	$= 167,75$ Fcfa
<b>Total = CV</b>		<b>= 1187,75 Fcfa</b>

#### IV-2-5-2 : Détermination des coûts fixes

Ce sont tous les coûts qui sont indépendants de la quantité produite, ils sont constitués de la dépréciation dans le temps et des salaires du personnel.

##### Amortissement

Génie civil	$20\,000\,000 / 20$	1 000 000 Fcfa
équipement de production	$243\,075\,791 / 10$	24 307 591 Fcfa
Coût de fonct + mat divers	$17\,855\,000 / 5$	3 571 000 Fcfa
<b>Total</b>		<b>28 878 591 Fcfa</b>
Personnel de la direction :		625 000 Fcfa
<b>Total = CF</b>		<b>29 503 591 Fcfa</b>

Nous fixons le prix de vente unitaire de notre produit à 29 500 Fcfa, car par rapport à la concurrence, le prix du marché est de **29 500 Fcfa**. On calculera donc toutes recettes à partir de ce prix.

#### IV-2-6 : La rentabilité du projet

Nous utilisons deux critères de rentabilité des projets d'investissements industriels le DRC et la VAN.

##### IV-2-6-1 : Le Délai de Récupération du Capital Investi (DRC) (annexe 1)

C'est le délai nécessaire pour que les recettes du projet équilibrent le montant des dépenses d'investissement.

$$DRC = \frac{\text{deboursés requis}}{\text{total des encaissements annuels nets}}$$

Pour ce projet, nous avons supposé que les entrées de fond sont constantes d'une année à une autre. Ce critère tient compte de l'impact que peut avoir un projet sur la liquidité de l'entreprise. C'est aussi une façon de tenir compte du risque, si on accepte l'hypothèse que le risque augmente avec le temps.

Pour notre étude, le capital investi est de **280 930 791 Fcfa**,

A la fin de la dix-huitième année, le capital récupéré est de **279902029 Fcfa**. Il reste donc à récupérer 1 028 762 Fcfa.

Le temps requis pour récupérer cette somme est de : 1 028 762/716 277.6

Avec 6 629 835,39 le flux net actualisé de la quatorzième année.

Le délai de récupération du capital est donc de **18, 14 ans**.

##### IV-2-6-2 : La Valeur Actuelle Nette (VAN) (annexes 3)

Elle s'évalue par la valeur actualisée des rentrées de fonds moins la valeur actualisée des sorties de fonds pour la durée du projet. Elle traduit aussi la richesse supplémentaire apportée par le projet.

$$VAN = -\text{investissement}$$

$$+ \sum \text{recettes nettes} \times \left( \frac{P}{F_n}, i\%, n \right) - \sum \text{coûts nets} \times \left( \frac{P}{F_n}, i\%, n \right)$$

$i\% = 12\%$  = taux d'actualisation. C'est le taux d'intérêt dont on se sert pour déterminer la VAN d'un montant futur en l'actualisant.

$n$  = durée du projet ;

$P$  = valeur actuelle ;

$F_n$  = valeur future en l'année  $n$  ;

$(P/F_n, i\%, n)$  = valeur actuelle P du montant futur  $F_n$  à l'année n au taux de  $i\%$ .

$$(P/F_n, i\%, n) = 1 / (1+i)^n$$

Si  $VAN > 0$  le projet est rentable

Si  $VAN < 0$  le projet n'est pas rentable

Si les projets sont exclusifs, choisir celui dont la VAN est la plus élevée même si les valeurs sont négatives.

Il existe deux méthodes pour calculer la VAN :

La méthode fiscale ;

La méthode des cash-flows que nous avons utilisée, car plus aisée pour notre cas.

$VAN =$  Valeur actuelle des cash-flows – investissement.

En appliquant cette relation, nous avons trouvé  $VAN = - 76 197 373, 5$  Fcfa.

#### **IV-2-7 : Etude financière en tenant compte de l'oxygène produite par l'électrolyse (annexes 4 et 5)**

Dans cette partie nous allons considérer les 1 000 m<sup>3</sup> d'oxygène que nous avons produit à la suite de l'électrolyse. Le prix concurrentiel que nous utiliserons dans nos calcul est de  $1.2 * 660 = 792$  Fcfa hors taxe.

Donc d'après l'annexe x nous avons :

$$DRC = 17,95$$

$$VAN = - 75 483 039, 5 \text{ Fcfa}$$

#### **IV-3 : Conclusion partielle**

Au vu des résultats de cette analyse de rentabilité financière, il en résulte que le projet n'est pas du tout rentable car tous les indicateurs utilisés le confirment.



## CONCLUSION GENERALE

Le niveau atteint par la communauté scientifique dans le domaine de la chimie, l'électrochimie et l'électrolyse en particulier reste encore à un niveau bas surtout par rapport au besoin pressant de remplacement des énergies fossiles par les énergies propres.

Cette étude nous a permis de comprendre combien il est encore difficile de produire de l'hydrogène en grande quantité. La production par électrolyse demande des équipements très complexes, et une connaissance scientifique pluridisciplinaire. C'est ainsi qu'on a eu l'occasion de mettre en application beaucoup de nos connaissances acquises lors de notre formation. Elle nous a révélé toutes les difficultés qu'il y a à mener une étude de bout en bout, surtout quant il s'agit de faire une modélisation sans vraiment disposer toutes les données. Ce manque de données nous a empêché d'aller jusqu'au bout de l'étude de certains éléments de la chaîne comme la turbine, l'alternateur, le générateur de vapeur et l'électrolyseur. Les caractéristiques de ces éléments sont obtenus en général par commande accompagnée des données de fonctionnement.

Nous déplorons vraiment l'absence dans ce rapport de simulation informatique qui aurait donné une vision plus claire du comportement et de la performance du système ou certaines grandeurs au fonctionnement. Le manque de temps en est la principale cause, car il faut noter que les cours de la cinquième année sont très importants, nous les <sup>Suivons</sup> suivons de près et faisons beaucoup de déplacement pour chercher des données <sup>officielles</sup> officielles à obtenir.

Il faut noter que c'est très coûteux de produire de l'hydrogène par électrolyse, l'investissement est très lourd même avec une centrale électro-solaire thermodynamique. Si l'objectif d'utiliser la centrale est d'amoindrir le coût du mètre cube, il faut noter que l'installation des centrales d'énergies renouvelables coûte chère et la demande en hydrogène est encore très faible.

Faut-il donc produire pour que la demande suive ? Ou faut-il attendre que la demande soit suffisante pour la satisfaire ? Dans tous les cas la compétitivité de l'hydrogène devra passer par la diminution du coût de l'électricité et de l'amélioration du matériel de stockage toujours très cher.

Mais quelqu'un disait que « la qualité a un prix mais la non-qualité coûte plus chère ».

---

On devrait peut être y réfléchir et voir si c'est plus chère de s'offrir une énergie propre ou de subir la pollution des énergies fossiles et faire un gain d'argent.

Au demeurant, la valorisation de l'oxygène produite lors de l'électrolyse contribuerait à relever de façon significative le niveau de rentabilité de ce procédé.

De ce fait, comme toute œuvre scientifique de recherche, ce travail comporte certainement des insuffisances. Il conviendrait alors de le parfaire en modélisant toutes parties du système, en comparant les coûts de conception et de réalisation de certains appareils comme l'électrolyseur afin de diminuer le coût de l'investissement.

## **BIBLIOGRAPHIES**

[1] Documentation AIR LIQUIDE

Par Cheikh THIAM, ingénieur polytechnicien.

[2] L'hydrogène : les nouvelles technologies de l'énergie.

CLEFS CEA (n 50/51 hiver 2004-2005)

[3] Energie solaire et stockage d'énergie (2<sup>e</sup> édition)

Roger DUMON : MASSON

[4] Technique de L'ingénieur

[5] Capteur solaire

K. EDWARDS / traduit par L. MARLOT

[6] Cours de transfert de chaleur

Professeur : M. Salif GAYE

[7] Karnol LIAMSIRIWATANA, modélisation du fonctionnement d'ensemble de la centrale électro-solaire Thémis, thèse de docteur-ingénieur, université de Perpignan.

[8] Wassila CHEKIROU, Analyse thermique pour l'absorbeur d'un concentrateur solaire cylindro- parabolique, thèse, Département de physique, Faculté des Sciences, Université Mentouri Constantine

[7] Cours de gestion de la production et de gestion des projets.

Professeur : M. Ngor SARR

[8] Cours d'énergie renouvelable.

Professeur : M. Papa M NDIAYE

[9] Le rayonnement solaire : conversion thermique et application

R. BERNARD G. MENGUY M. SCHWARTZ

(2<sup>e</sup> édition augmentée)

[10] ÉLECTRONIQUE " Theodore WILDI"

Avec la collaboration de Gilbert SYBILLE

### **SITES VISITES**

[A] <http://perso.wanadoo.fr/jean.boubour/captfr.htm>

[B] <http://www.energiesolaire.host.sk/>

[C] <http://www.mueller-solartechnik.de/>

[D] <http://www.bysun.fr>

[E] <http://www.priceminister.com>

[F] <http://www.thermoptim.org>

[G] <http://www.cgi.ebay>.

[H] [http:// www.hitachi.fr/products/business.jsp](http://www.hitachi.fr/products/business.jsp)

## **ANNEXES**

ANNEXE 1 : tableaux des flux financiers

ANNEXE 2 : Tableaux des amortissements dégressifs

ANNEXE 3 : Compte d'exploitation prévisionnel

ANNEXE 4 : Tableau des flux financiers en tenant compte de l'oxygène

ANNEXE 5 : Compte d'exploitation prévisionnel en tenant compte de  
L'oxygène

**Tableaux des flux financiers (Annexe 1)**

Libellé	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Investissement</b>										
Génie civil	20 000 000									
Matériel de production	243 075 791									
Matériel et mobilier de bureau	15 855 000									
Imprévus	2 000 000									
<b>Total investissement</b>	<b>280 930 791</b>									
Matières premières	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000
Personnel	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000
Mat divers et maintenance	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000
<b>Total charges d'exploitation</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>
<b>Recettes</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>	<b>59000000</b>
Bénéfice brut	-26 209 948	-7 848 411	5 533 284	15 346 623	22 582 268	27 942 610	31 930 227	34 907 655	37 138 263	38 814 563
Bénéfice net	-26 209 948	-7 848 411	4149963,29	11509967,6	16936700,9	20956957,2	23947670,6	26180741	27853697,3	29110922,4
Flux financier net	44 201 000	44 201 000	42 817 679	40 364 344	38 555 433	37 215 348	36 218 443	35 474 086	34 916 434	34 497 359
Flux financier net actualisé	39465178,57	35236766,6	30476778,1	25652270,4	21877388,1	18854453,3	16383384,3	14327388,5	12591216,2	11107226,4
<b>Cumul des flux fin net actualisé</b>	<b>39465178,57</b>	<b>74701945,2</b>	<b>105178723</b>	<b>130830994</b>	<b>152708382</b>	<b>171562835</b>	<b>187946219</b>	<b>202273608</b>	<b>214864824</b>	<b>225972051</b>

Annexe 1 : suite

Libellé	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
<b>Investissement</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Génie civil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matériel de production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matériel et mobilier de bureau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imprévus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total investissement</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matières premières	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000
Personnel	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000
Mat divers et maintenance	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000
<b>Total charges d'exploitation</b>	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000
<b>Recettes</b>	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000
Bénéfice brut	40078013,08	41033026,4	41756971,7	42307367,9	42727100,1	43048223,9	43294754,8	43484722,4	43631689,2	43745877,2
Bénéfice net	30058509,81	30774769,8	31317728,8	31730525,9	32045325,1	32286168	32471066,1	32613541,8	32723766,9	32809407,9
Flux financier net	34181496,73	33942743,4	33761757,1	33624158	33519225	33438944	33377311,3	33329819,4	33293077,7	33264530,7
Flux financier net actualisé	9826363,512	8712256,81	7737323,33	6880168,91	6123837,08	5454616,12	4861216,5	4334196,05	3865551,95	3448426,29
<b>Cumul des flux fin net actualisé</b>	235798414,1	244510671	252247994	259128163	265252000	270706616	275567833	279902029	283767581	287216007

Tableaux des amortissements dégressifs (Annexe 2)

libellé	montant	durée (ans)	taux constant	taux dégressif
génie civil	20 000 000	20	0,05	0,125
equip de prod	243 075 791	10	0,1	0,25
meublier de bureau	15 855 000	5	0,2	0,4
mat divers	2 000 000	5	0,2	0,4

libellé	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Génie civil</b>										
Annuités	2500000	2187500	1914062,5	1674804,69	1465454,1	1282272,34	1121988,3	981739,759	859022,29	751644,503
Cumul	2500000	4687500	6601562,5	8276367,19	9741821,29	11024093,6	12146081,9	13127821,7	13986844	14738488,5
Valeur résiduelle	17 500 000	15 312 500	13 398 438	11 723 633	10 258 179	8 975 906	7 853 918	6 872 178	6 013 156	5 261 512
<b>Equipement de production</b>										
Annuités	60768947,75	45576710,8	34182533,11	25636899,8	19227674,9	14420756,2	10815567,1	8111675,34	6083756,5	4562817,38
Cumul	60768947,75	106345659	140528191,7	166165092	185392766	199813523	210629090	218740765	224824521	229387339
Valeur résiduelle	182306843,3	136730132	102547599,3	76910699,5	57683024,6	43262268,5	32446701,3	24335026	18251269,5	13688452,1
<b>Coût de fonctionnement</b>										
Annuités	6342000	3805200	2283120	1369872	821923,2	493153,92	295892,352	177535,411	106521,247	63912,748
Cumul	6342000	10147200	12430320	13800192	14622115,2	15115269,1	15411161,5	15588696,9	15695218,1	15759130,9
Valeur résiduelle	9 513 000	5 707 800	3 424 680	2 054 808	1 232 885	739 731	443 839	266 303	159 782	95 869
<b>Matériels divers</b>										
Annuités	800000	480000	288000	172800	103680	62208	37324,8	22394,88	13436,928	8062,1568
Cumul	800000	1280000	1568000	1740800	1844480	1906688	1944012,8	1966407,68	1979844,61	1987906,76
Valeur résiduelle	1200000	720000	432000	259200	155520	93312	55987,2	33592,32	20155,392	12093,2352
<b>Total amortissement</b>	<b>70410947,75</b>	<b>52049410,8</b>	<b>38667715,61</b>	<b>28854376,5</b>	<b>21618732,2</b>	<b>16258390,4</b>	<b>12270772,6</b>	<b>9293345,39</b>	<b>7062736,97</b>	<b>5386436,79</b>



**Tableau des amortissements  
dégressifs (Suite annexes 2)**

libellé	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
<b>Génie civil</b>										
<b>Annuités</b>	657688,9404	575477,823	503543,095	440600,208	385525,182	337334,534	295167,718	258271,753	225987,784	197739,311
<b>Cumul</b>	15396177,42	15971655,2	16475198,3	16915798,5	17301323,7	17638658,3	17933826	18192097,7	18418085,5	18615824,8
<b>Valeur résiduelle</b>	4603822,583	4028344,76	3524801,67	3084201,46	2698676,27	2361341,74	2066174,02	1807902,27	1581914,49	1384175,18
<b>Equipement de production</b>										
<b>Annuités</b>	3422113,033	2566584,77	1924938,58	1443703,94	1082777,95	812083,464	609062,598	456796,948	342597,711	256948,283
<b>Cumul</b>	232809451,9	235376037	237300975	238744679	239827457	240639541	241248603	241705400	242047998	242304946
<b>Valeur résiduelle</b>	10266339,1	7699754,32	5774815,74	4331111,81	3248333,86	2436250,39	1827187,79	1370390,85	1027793,13	770844,85
<b>Coût de fonctionnement</b>										
<b>Annuités</b>	38347,64882	23008,5893	13805,1536	8283,09214	4969,85529	2981,91317	1789,1479	1073,48874	644,093245	386,455947
<b>Cumul</b>	15797478,53	15820487,1	15834292,3	15842575,4	15847545,2	15850527,1	15852316,3	15853389,8	15854033,9	15854420,3
<b>Valeur résiduelle</b>	57521,47323	34512,8839	20707,7304	12424,6382	7454,78293	4472,86976	2683,72185	1610,23311	966,139868	579,683921
<b>Matériels divers</b>										
<b>Annuités</b>	4837,29408	2902,37645	1741,42587	1044,85552	626,913313	376,147988	225,688793	135,413276	81,2479653	48,7487792
<b>Cumul</b>	1992744,059	1995646,44	1997387,86	1998432,72	1999059,63	1999435,78	1999661,47	1999796,88	1999878,13	1999926,88
<b>Valeur résiduelle</b>	7255,94112	4353,56467	2612,1388	1567,28328	940,369969	564,221981	338,533189	203,119913	121,871948	73,1231688
<b>Total amortissement</b>	4122986,916	3167973,56	2444028,26	1893632,09	1473899,9	1152776,06	906245,152	716277,603	569310,836	455122,799

a

d

**Compte d'exploitation  
prévisionnel (Annexe 3)**

Désignation	2008	2009	2010	2011	2012	2103	2014	2015	2016
Matières premières	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000
Personnel	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000
Divers	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000
Amortissement	70410947,75	52049410,8	38667715,6	28854376,5	21618732,2	16258390,4	12270772,6	9293345,39	7062736,97
Total charge	85209947,75	66848410,8	53466715,6	43653376,5	36417732,2	31057390,4	27069772,6	24092345,4	21861737
Chiffre d'affaire	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000	59000000
Valeur ajoutée	15049947,75	3311589,19	16693284,4	26506623,5	33742267,8	39102609,6	43090227,4	46067654,6	48298263
Résultat brut	26209947,75	7848410,81	5533284,39	15346623,5	22582267,8	27942609,6	31930227,4	34907654,6	37138263
Impôts	0	0	1383321,1	3836655,87	5645566,96	6985652,4	7982556,86	8726913,65	9284565,76
Résultat net	26209947,75	7848410,81	4149963,29	11509967,6	16936700,9	20956957,2	23947670,6	26180741	27853697,3
Cash-flow	44201000	44201000	42817678,9	40364344,1	38555433	37215347,6	36218443,1	35474086,3	34916434,2
Valeur actuelle des cash-flows	39465178,57	35236766,6	30476778,1	25652270,4	21877388,1	18854453,3	16383384,3	14327388,5	12591216,2
Cumul	<b>39465178,57</b>	<b>74701945,2</b>	<b>105178723</b>	<b>130830994</b>	<b>152708382</b>	<b>171562835</b>	<b>187946219</b>	<b>202273608</b>	<b>214864824</b>

**valeur actuelle nette pour 9 ans**

valeur actuelle des investissements =  $248\,394\,533 + 17\,855\,000 / (1,12)^5 = 291\,062\,197,5\text{cfa}$

valeur actuelle nette des cash-flow =  $214\,864\,824\text{ Fcfa}$

VAN (9 ans) =  $-76\,197\,373,5\text{ Fcfa}$

**Tableau des flux financiers en tenant compte de l'oxygène (annexes 4)**

Libellé	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Investissement</b>										
Génie civil	20 000 000									
Matériel de production	243 075 791									
Matériel et mobilier de bureau	15 855 000									
Imprévus	2 000 000									
<b>Total investissement</b>	<b>280 930 791</b>									
Matières premières	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000	1 639 000
Personnel	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000	11 160 000
Mat divers et maintenance	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000	2 000 000
<b>Total charges d'exploitation</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>	<b>14 799 000</b>
<b>Recettes</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>
Bénéfice brut	-25 429 948	-7 068 411	6 313 284	16 126 623	23 362 268	28 722 610	32 710 227	35 687 655	37 918 263	39 594 563
Bénéfice net	-25 429 948	-7 068 411	4734963,29	12094967,6	17521700,9	21541957,2	24532670,6	26765741	28438697,3	29695922,4
Flux financier net	44 981 000	44 981 000	43 402 679	40 949 344	39 140 433	37 800 348	36 803 443	36 059 086	35 501 434	35 082 359
Flux financier net actualisé	40161607,14	35858577,8	30893169,5	26024048,5	22209332,9	19150832,5	16648008,6	14563660,2	12802173,1	11295580,7
<b>Cumul des flux fin net actualisé</b>	<b>40161607,14</b>	<b>76020184,9</b>	<b>106913354</b>	<b>132937403</b>	<b>155146736</b>	<b>174297568</b>	<b>190945577</b>	<b>205509237</b>	<b>218311410</b>	<b>229606991</b>

**Tableau des flux financiers en tenant compte de l'oxygène (Suite annexe 4)**

<b>Libellé</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>
<b>Investissement</b>										
<b>Génie civil</b>										
<b>Matériel de production</b>										
<b>Matériel et mobilier de bureau</b>										
<b>Imprévus</b>										
<b>Total investissement</b>										
<b>Matières premières</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>	<b>1639000</b>
<b>Personnel</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>	<b>11160000</b>
<b>Mat divers et maintenance</b>	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000
<b>Total charges d'exploitation</b>	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000	14799000
<b>Recettes</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>	<b>59780000</b>
<b>Bénéfice brut</b>	40858013,08	41813026,4	42536971,7	43087367,9	43507100,1	43828223,9	44074754,8	44264722,4	44411689,2	44525877,2
<b>Bénéfice net</b>	30643509,81	31359769,8	31902728,8	32315525,9	32630325,1	32871168	33056066,1	33198541,8	33308766,9	33394407,9
<b>Flux financier net</b>	34766496,73	34527743,4	34346757,1	34209158	34104225	34023944	33962311,3	33914819,4	33878077,7	33849530,7
<b>Flux financier net actualisé</b>	9994537,033	8862411,74	7871390,23	6999871,5	6230714,4	5550042,29	4946418,44	4410269,21	3933474,41	3509071,35
<b>Cumul des flux fin net actualisé</b>	<b>239601528</b>	<b>248463940</b>	<b>256335330</b>	<b>263335201</b>	<b>269565916</b>	<b>275115958</b>	<b>280062377</b>	<b>284472646</b>	<b>288406120</b>	<b>291915192</b>

compte d'exploitation prévisionnel en tenant compte de l'oxygène (Annexe 5)

Désignation	2008	2009	2010	2011	2012	2103	2014	2015	2016
<b>Matières premières</b>	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000	1639000
<b>Personnel</b>	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000	11160000
<b>Divers</b>	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000	2000000
<b>Amortissement</b>	40161607,14	35858577,8	30893169,5	26024048,5	22209332,9	19150832,5	16648008,6	14563660,2	12802173,1
<b>Total charge</b>	54960607,14	50657577,8	45692169,5	40823048,5	37008332,9	33949832,5	31447008,6	29362660,2	27601173,1
<b>Chiffre d'affaire</b>	59780000	59780000	59780000	59780000	59780000	59780000	59780000	59780000	59780000
<b>Valeur ajoutée</b>	15979392,86	20282422,2	25247830,5	30116951,5	33931667,1	36990167,5	39492991,4	41577339,8	43338826,9
<b>Résultat brut</b>	4819392,857	9122422,19	14087830,5	18956951,5	22771667,1	25830167,5	28332991,4	30417339,8	32178826,9
<b>Impôts</b>	1204848,214	2280605,55	3521957,61	4739237,88	5692916,79	6457541,88	7083247,84	7604334,95	8044706,73
<b>Résultat net</b>	3614544,643	6841816,65	10565872,8	14217713,6	17078750,4	19372625,6	21249743,5	22813004,9	24134120,2
<b>Cash-flow</b>	43776151,79	42700394,5	41459042,4	40241762,1	39288083,2	38523458,1	37897752,2	37376665	36936293,3
<b>Valeur actuelle des cash-flows</b>	39085849,81	34040493	29509727,5	25574367,3	22293113,5	19517182,8	17143018,5	15095808,1	13319597,6
<b>Cumul</b>	<b>39085849,81</b>	<b>73126342,8</b>	<b>102636070</b>	<b>128210438</b>	<b>150503551</b>	<b>170020734</b>	<b>187163752</b>	<b>202259561</b>	<b>215579158</b>

**valeur actuelle nette pour 9 ans**

valeur actuelle des investissements =  $280\,930\,791 + 17\,855\,000 / (1,12)^5 = 291\,062\,197,5$  cfa

valeur actuelle nette des cash-flows =  $215\,579\,158$  Fcfa

VAN (9 ans) =  $-75\,483\,039,5$  Fcfa