



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Installation énergétiques et turbo machines

**Etude d'un système de production d'hydrogène pour le
refroidissement d'un alternateur d'une centrale électrique**

Proposé et encadré par :

► M. Guergadj Mohamed

Co-Promoteur :

► M. M'chid Hedjala Ahmed

Réalisé par :

► M'chid Hedjala Ismail

► Chergui Mohamed Salim

2019/2020

Remerciements

A l'issue de ce travail, nous remercions, en premier lieu, le BON DIEU de nous avoir donné la force et le courage de mener à terme ce projet de fin d'études.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur **Guergage Mohamed** maître assistant à l'université Saad Dahleb Blida et Monsieur **M'chid Hedjala Ahmed** ingénieur en génie mécanique, je les remercie pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur disponibilité, leurs conseils et les encouragements durant la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères au staff pédagogique du département de génie mécanique, de la faculté de technologie de l'université de Blida pour la qualité de l'enseignement et le suivi durant nos années d'études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce projet de fin d'étude. Aussi, nous tenons à remercier infiniment :

- Nos chers parents pour leurs soutiens au long de nos études.
- Monsieur **Temmar Mustapha** chef de département GM.
- Monsieur **Bouguerra El Hadi** chef d'option IET.

Résumé

Ce travail examine la production et l'utilisation d'hydrogène pour le refroidissement des alternateurs d'une centrale électrique.

Des généralités sur les centrales électriques (type et principe de fonctionnement), en expliquant la centrale à cycle combiné et ces différentes configurations et auxiliaires.

Une étude théorique en détaillant le système de production de l'hydrogène par électrolyseur de l'eau en prenant l'exemple du système de production dans la centrale électrique de **CAP DJINET** dont le calcul de capacité de la station hydrogène et le débit d'eau de refroidissement sont calculée en considérons le cas de fonctionnement le plus défavorable.

ملخص

يفحص هذا العمل إنتاج واستخدام الهيدروجين لتبريد مولدات محطات توليد الطاقة.

معلومات عامة عن محطات توليد الطاقة (نوع ومبدأ التشغيل)، وشرح محطة توليد الطاقة ذات الدورة المركبة ومختلف مكوناتها والأنظمة المساعدة.

دراسة نظرية بالتفصيل لنظام إنتاج الهيدروجين بواسطة المحلل الكهربائي للماء من خلال أخذ مثال لنظام الإنتاج في محطة توليد الكهرباء "كاب جنات"، مع حساب سعة محطة الهيدروجين وتدفق مياه التبريد مع الأخذ في الاعتبار أسوأ حالات التشغيل.

Abstract

This work examines the production and use of hydrogen for cooling power plant alternators.

General informations on power plants (types and principles of operation), explaining the combined cycle power plant and it differents configurations and auxiliaries.

A theoretical study by detailing the system of production of hydrogen by water electrolyser and taking the example of the production system in the **CAP DJINET** power station, of which the calculation of the capacity of the hydrogen station and the flow of cooling water are calculated considering the worst case of operation.

LISTE DES FIGURES

Figure I.2.1. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique a cycle simple TG.....	14
Figure I.2.2. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique à cycle combiné	15
Figure I.2.3. Schéma de fonctionnement d'une centrale Diesel	15
Figure I.2.4. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique Nucléaire.....	16
Figure I.3.1. Panneaux photovoltaïque	16
Figure I.3.2. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique solaire thermique	17
Figure I.3.3. Principe de fonctionnement des éoliennes	17
Figure I.3.4. Principe de fonctionnement d'une Centrale hydraulique.....	18
Figure I.3.5. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique géothermique	18
Figure II.1.1. Diagramme fonctionnel d'une centrale thermique à cycle combiné	19
Figure II.1.2. Vue d'ensemble, centrale thermique à cycle combiné	20
Figure II.1.3. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné mono-arbre	21
Figure II.1.4. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné mono-arbre sans embrayage	21
Figure II.1.5. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné mono-arbre avec embrayage	22
Figure II.1.6. Schéma des principes de fonctionnement de l'embrayage « SSS clutch ».....	22
Figure II.1.7. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné (1 TG x 1 TV) à configuration à arbres multiples	23
Figure II.1.8. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné (2TG x 1TV) à configuration à arbres multiple.....	24
Figure I.1.9. Plan d'arrangement du bloc usine d'une centrale à cycle combiné « Alstom » .	25
Figure III.2.1. Influence de la pression sur les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur	40
Figure III.2.2. Exemple de décomposition d'une courbe caractéristique tension-densité de courant pour une cellule d'électrolyse de l'eau	40
Figure III.2.3. Courbe de ΔH ; ΔS ; ΔG en fonction de la température.....	43
Figure III.2.4. Tension thermo neutre U_{th} et la tension minimale réversible U_R en fonction la température	44
Figure III.2.5. Évolution des performances, en fonction du temps, d'un électrolyseur industriel avec activation nickel-soufre	46
Figure III.2.6. Concentration d'équilibre du silicate dans la solution de potasse (en g de Si par litre) en fonction de la température d'après [30]	48

Figure III.2.7. Électrolyseur à électrodes mono-polaires.....	49
Figure III.2.8. Électrolyseur à électrodes bipolaires	49
Figure III.2.9. Vue éclatée d'une cellule d'électrolyse	52
Figure III.3.1. Réaction électrochimique	54
Figure III.3.2. Châssis mobile de procédé HySTAT 15	55
Figure III.3.3. La pile de cellules	55
Figure III.3.4. Séparateur gaz-liquide	56
Figure III.3.5. Rinceur	56
Figure III.3.6. Filtre à coalescence.....	56
Figure III.3.7. Échangeur thermique de l'électrolyte	56
Figure III.3.8. Panneau HTO	57
Figure III.3.9. Panneau de conductivité	57
Figure III.3.10. Réservoir avec coupure d'air	58
Figure III.3.11. Sécheur Deoxo.....	59
Figure III.3.12. Panneau Mesure de pureté en ligne	60
Figure III.3.13. Refroidisseur de refroidissement des gaz	61
Figure III.3.14. Refroidisseur de refroidissement de l'électrolyte et du compresseur	61
Figure III.3.15. Réservoir tampon.....	62
Figure III.3.16. Compresseur à piston double effet	63
Figure III.3.17. Poste de remplissage des bouteilles.....	63
Figure III.3.18. Pompe à vide	64
Figure III.3.19 Collecteur d'azote.....	64
Figure III.4.1 courbe de capacité de la station selon les deux cas pour différents heurs de fonctionnement	68
Figure III.4.2 courbe de capacité de la station selon les 3 cas pour différents heurs de fonctionnement	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.2.1: principales installations d'hydrogène à forte capacité en service en 1975...	36
Tableau III.2.2. Paramètres thermodynamique standard.....	42
Tableau III.2.3. Valeurs de ΔH ; ΔS ; ΔG en fonction de la température.....	42
Tableau III.2.4. Tension thermonetre et tension réversible en fonction de la température....	43
Tableau III.4.1 : Capacité de la station selon les deux cas pour différents heurs de fonctionnement.....	68
Tableau III.4.2 : Capacité de la station selon le 3éme cas pour différents heurs de fonctionnement.....	69

LISTE DES SYMBOLES

R : constante molaire des gaz en ($J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

T : température thermodynamique en (K)

E : la tension de cellule en (V)

F : constante de Faraday en ($C \cdot \text{mol}^{-1}$)

ΔH : Enthalpie totale de la réaction en (KJ/Kg)

E_0 : tension de décomposition réversible dans les conditions normales en (V)

E_{th} : la tension de cellule réelle en (V)

E_{rev} : la tension de décomposition réversible en (V)

η_a : surtensions anodique (V)

η_c : surtensions cathodique (V)

R : résistance globale en ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)

J : densité de courant en (A/cm^2)

V : Volume générateur en (Nm^3)

n : nombre de générateurs

P : Pression requise d'hydrogène en (bar)

A : Pertes totales d'hydrogène par générateur en ($\text{Nm}^3 / \text{jour}$)

B : Nécessité d'un remplissage d'un seul générateur en (Nm^3)

V_1 : Hydrogène requis pour l'élimination du gaz inerte en (Nm^3)

V_2 : Hydrogène nécessaire pour remplir le générateur à la pression requise en (Nm^3)

p_1 : Pression du gaz comprimé dans la bouteille en (bar)

v_1 : Volume d'eau interne du cylindre en (m^3)

p_2 : Pression atmosphérique en (bar)

v_2 : Volume de gaz à la pression p_2 en (m^3)

Q : Charge de chaleur en (kW)

\dot{m} : Débit de l'eau de refroidissement en (m^3/h)

T_s : température de sortie d'eau de refroidissement en ($^\circ\text{C}$)

T_e : température d'admission d'eau de refroidissement en ($^\circ\text{C}$)

C_p : capacité thermique massique en ($\text{kJ}/\text{kg}^\circ$)

TABLE DES MATIERS

Introduction	12
Chapitre I : Les Centrales Electriques	14
I.1 Généralité sur les Centrales électriques :.....	14
I.2 Les centrales thermiques:	14
I.2.1 Centrales Thermiques Conventionnelles	14
a. Central électrique a cycle simple TG :	14
b. Central électrique à Cycle Combiné :	15
c. Diesel :	15
I.2.2 Centrale Nucléaire :	16
I.3 Centrales électriques a base des énergies renouvelables:	16
a. Solaire Photovoltaïque :	16
d. solaire Thermique	17
b. Éolienne :	17
c. Hydraulique :.....	18
e. Géothermique :.....	18
Chapitre II : Centrale électrique à cycle combiné	19
Introduction :.....	19
II.2 Différentes configurations de centrale à cycle combiné	21
II.2.1 Configuration mono-arbre «single shaft»	21
II.2.2 Configuration multi-arbre « multi-shaft »	23
II.3 Constitution de la centrale.....	24
II.3.1 Îlot de puissance (“Power Island”) :.....	24
II.3.2 Les auxiliaires de la centrale :	26
II.3.3 Plan d’ensemble	26
II.4 Principe de fonctionnement :.....	28
Chapitre III : Production de l’hydrogène par électrolyseur de l’eau	32
III.1 GENERALITES SUR L’HYDROGENE	32
Introduction :.....	32
III.1.2 Caractéristiques principales :	32
a) Caractéristiques physiques :.....	33

b) Caractéristiques chimiques :.....	34
III.2 Production de l'hydrogène :	35
III.2.1 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau :	35
III.2.1.1 Historique :.....	36
III.2.1.2 Matières premières.....	36
III.2.1.2.1 Qualité de l'eau d'alimentation.....	37
III.2.1.2.2 Qualité de l'hydroxyde de potassium	37
III.2.1.3 Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau	38
III.2.1.3.1 Thermodynamique	38
III.2.1.3.2 Cinétique	39
III.2.1.3.3 Conséquences pratiques	44
III.2.1.4 Matériaux	45
III.2.1.4.1 Matériaux de structure	45
III.2.1.4.2 Cathodes.....	45
III.2.1.4.3 Anodes	47
III.2.1.4.4 Diaphragmes	47
III.2.1.5 Conception des appareils industriels.....	49
III.2.1.5.1 Structures mono-polaire et bipolaire.....	49
III.2.1.5.2 Contrôle des températures et des concentrations	50
III.2.1.5.3 Équilibrage des débits et courants dérivés	50
III.2.1.5.4 Appareils fonctionnant à pression atmosphérique	51
III.2.1.5.5 Appareils fonctionnant sous pression	51
III.2.1.5.6 Évolution de la technologie	53
III.3 Station de production de l'hydrogène de la centrale de CAP DJINET.....	54
III.3.1 Introduction.....	54
III.3.2 GÉNÉRATEUR D'HYDROGÈNE	54
III.3.2.1 Châssis mobile de procédé.....	55
III.3.2.2 Sécheur Deoxo	58
III.3.2.3 Mesure de pureté en ligne (OLP) avec logique de purge.....	60
III.3.3 SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT	60
III.3.3.1 Refroidisseurs pour le refroidissement des gaz	60
III.3.3.2 Refroidisseurs pour le refroidissement de l'électrolyte et du compresseur	61
III.3.4 RÉSERVOIR TAMPON	61

III.3.5 COMPRESSEUR.....	61
III.3.6 POSTE DE REMPLISSAGE DES BOUTEILLES	63
III.3.7 POMPE À VIDE.....	64
III.3.8 POSTE D'AZOTE.....	64
III.3.9 TABLEAUX ÉLECTRIQUES ET DE COMMANDE	65
III.3.10 AUTRES ÉQUIPEMENTS	65
III.3.10.1 HTA (hydrogène vers atmosphère).....	65
III.4 Dimensionnement de nombre de bouteille H2 nécessaire pour le refroidissement des alternateurs de la centrale CAP DJINET	68
III.5 Dimensionnement de débit de la pompe nécessaire pour le refroidissement des alternateurs de la centrale CAP DJINET	71
Conclusion.....	72
Conclusion générale	73
Bibliographie.....	75

Préambule

Dans le cadre de nos études universitaires en génie mécanique option installation énergétique et turbo machine à l'université de SAAD DAHLEB BLIDA 1, et en vue d'obtention un diplôme de master 2 en génie mécanique, nous avons effectué un stage au niveau de la Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz **CEEG** (Groupe Sonalgaz) concernant la centrale électrique de **CAP Djinet** durant la période du 13/09/20 au 13/10/20

Introduction

La Centrale de Cap Djinet (relevant de la Sonelgaz) est située à Djinet, Boumerdes, la centrale est composée de trois tranches fonctionnant en cycle combiné (30% vapeur et 70 % gaz), dotée chacune d'une capacité de production de 400 MW, soit un total de 1113 MW pour les trois.

L'énergie électrique produite au niveau de cette Centrale est transférée vers deux Postes transformateurs à Si Mustapha et El Affroune (Blida), un 3ème transformateur est prévu à l'avenir à Akbou (Béjaia), les dite postes transformateurs servant à transporter cette énergie vers le réseau national de transport d'électricité.

Plusieurs systèmes auxiliaires sont nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de la centrale à savoir, système de filtration et d'admission de l'air, systèmes pour le traitement et l'alimentation du gaz naturel et du combustible de secours (gasoil), système anti incendie, système de refroidissement en boucle fermé (CCW)... Ext.

Dans ce modeste travail, nous avons concentré sur le système de refroidissement de l'alternateur par gaz d'hydrogène, qui présent un système critique pour le fonctionnement de la centrale.

L'utilisation d'hydrogène comme moyen de refroidissement par rapport à l'air améliore considérablement les performances de refroidissement. Grâce aux technologies de matériaux avancées et aux avantages de transfert de chaleur qui en résultent, les composants du générateur sont conçus pour atteindre des performances optimales tout en assurant un fonctionnement sûr et une fiabilité.

L'hydrogène est utilisé pour le refroidissement des alternateurs vue de ses propriétés physiques meilleur que l'air, à savoir [1]:

- Sa densité est quatorze fois inférieure à l'air (1,292 kg/m³ pour l'air et 0.08988 kg/m³ pour l'hydrogène à 0°C) [2].
- Sa conductivité thermique est sept fois plus grande (0.026 W/mK pour l'air et 0.182 W/mK pour l'hydrogène à 27°C) [3].
- Son coefficient de convection est une fois et demi plus grand que l'air.
- Les éventuelles fuites s'échappent à l'air libre.
- L'hydrogène pur ne brûle pas. Le risque de créer un mélange détonant est éliminé en maintenant un taux de pureté > 98%.
- Le silence de fonctionnement est notablement amélioré.
- Les pertes par frottement sont nettement inférieures à celles de l'air.

Le procédé d'électrolyse de l'eau est utilisé pour la production d'hydrogène, dont le calcul de capacité de la station et le débit d'eau de refroidissement sont brièvement détaillés en prenant différents régimes de fonctionnement.

I.1 Généralité sur les Centrales électriques :

Une centrale électrique est un site industriel dédié à la production d'électricité.

Les centrales électriques transforment diverses sources d'énergie primaire en énergie électrique afin d'alimenter en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale.

I.2 Les Centrales thermiques:

Une centrale électrique thermique est une centrale qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur selon le principe des machines thermiques.

Il existe 2 types de centrales thermiques :

I.2.1 Centrales Thermiques Conventionnelles

Les centrales thermiques transforment une énergie mécanique obtenue à partir d'une énergie thermique en énergie électrique. L'énergie thermique provient de la combustion d'une énergie fossile (gaz naturel, fuel ...) en fonction du combustible utilisé [10].

a. Central électrique a cycle simple TG :

Une centrale électrique à cycle simple constituée d'une turbine à gaz qui entraine un alternateur pour produire de l'électricité.

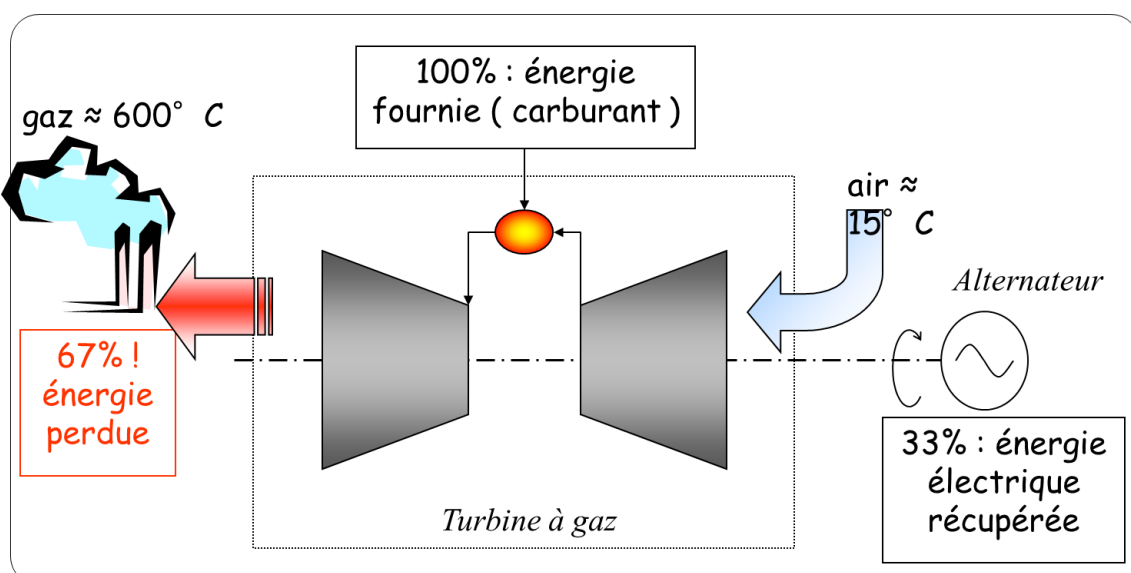


Figure I.2.1. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique a cycle simple TG

b. Centrale électrique à Cycle Combiné :

Une centrale électrique à cycle combiné est constituée d'une ou de plusieurs turbines à gaz, la chaleur des gaz d'échappement des turbines à gaz est récupérée dans des chaudières de récupération pour produire de la vapeur qui actionne des turbines à vapeur qui entraînent les alternateurs associés pour la production de l'électricité.

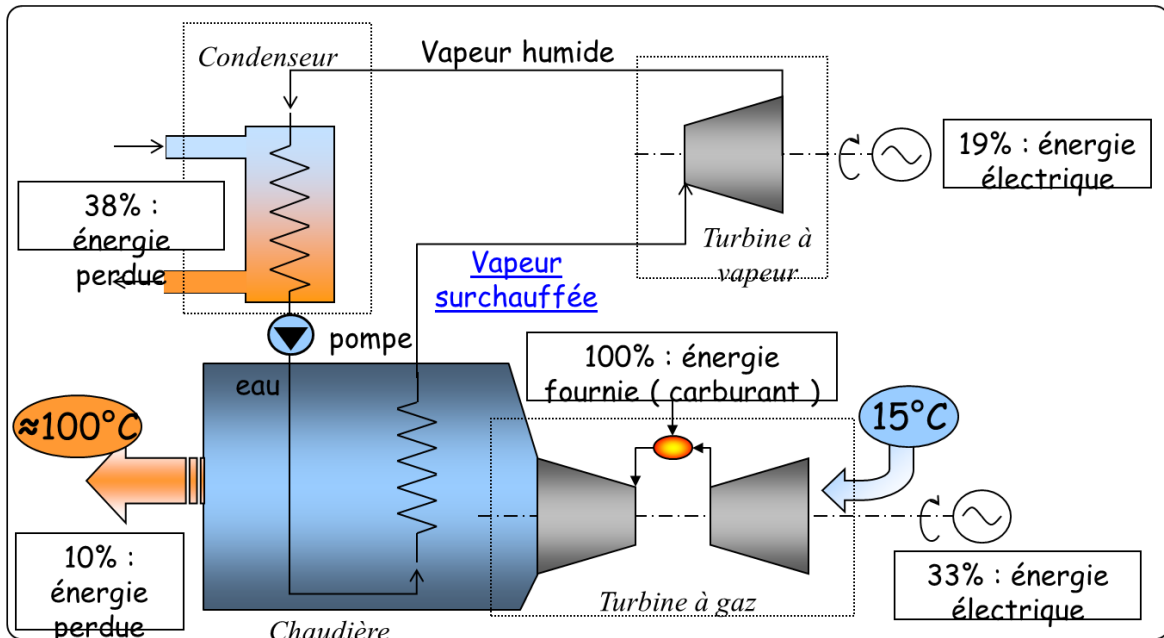


Figure I.2.2. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique à cycle combiné

c. Diesel :

Une centrale électrique diesel est constituée d'un moteur diesel qui entraîne un alternateur pour la production de l'électricité [4].

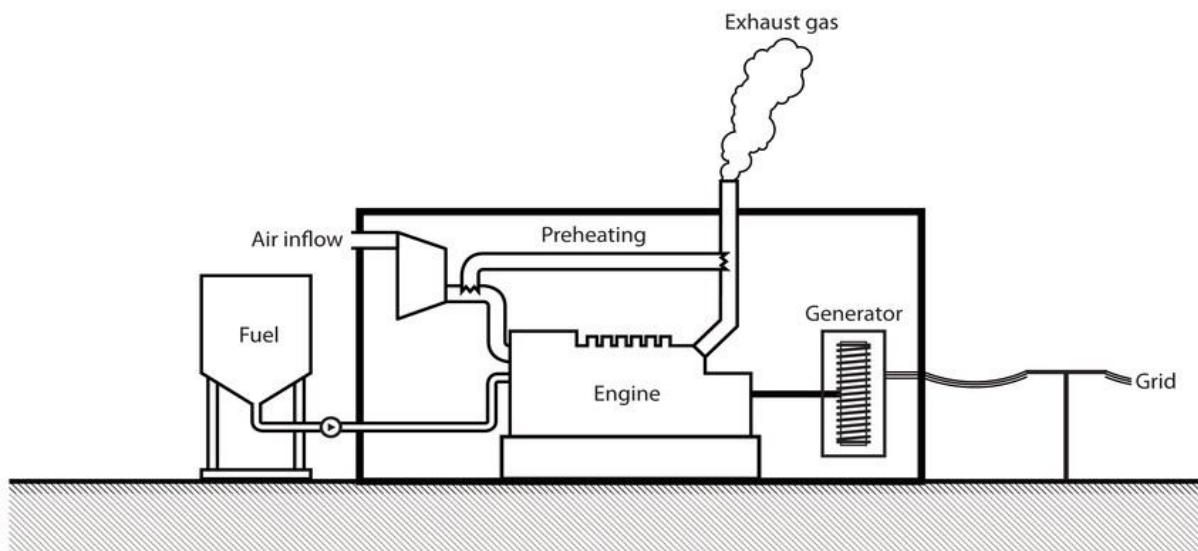


Figure I.2.3. Schéma de fonctionnement d'une centrale Diesel

I.2.2 Centrale Nucléaire :

La fission des atomes d'uranium produit de la chaleur qui transforme alors de l'eau en vapeur et met en mouvement une turbine à vapeur reliée à un alternateur pour produire de l'électricité [5].

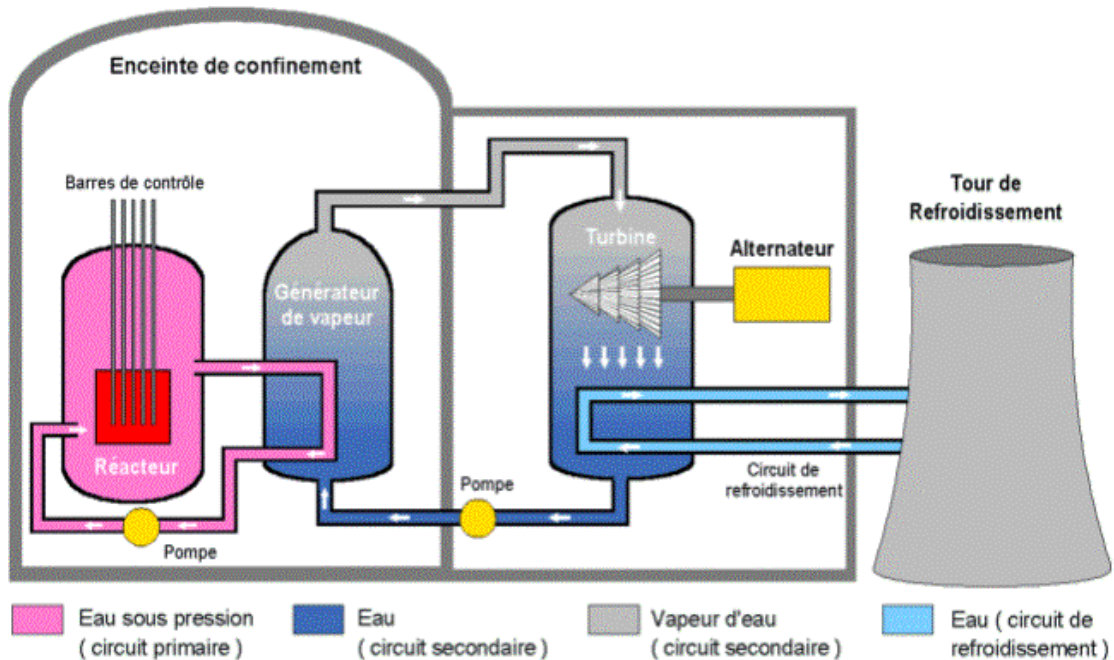


Figure I.2.4. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique Nucléaire

I.3 Centrales électriques a base des énergies renouvelables:

Une centrale électrique a base des énergies renouvelables consiste à produire de l'électricité à partir d'une source d'énergie propre ou énergie renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, géothermie, biomasse, ...)

a. Solaire Photovoltaïque :

Une centrale solaire photovoltaïque est un dispositif technique de production d'électricité par des modules photovoltaïques (PV) reliés entre eux (en série et/ou en parallèle) et utilise des onduleurs et des transformateurs éleveurs de tension pour être raccordée au réseau électrique [6].



Figure I.3.1. Panneaux photovoltaïque

d. solaire Thermique

Les miroirs captent le rayonnement solaire en un point de façon à générer des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C). La chaleur obtenue transforme de l'eau en vapeur d'eau dans une chaudière, la vapeur sous pression fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur qui produit un courant électrique alternatif [7].

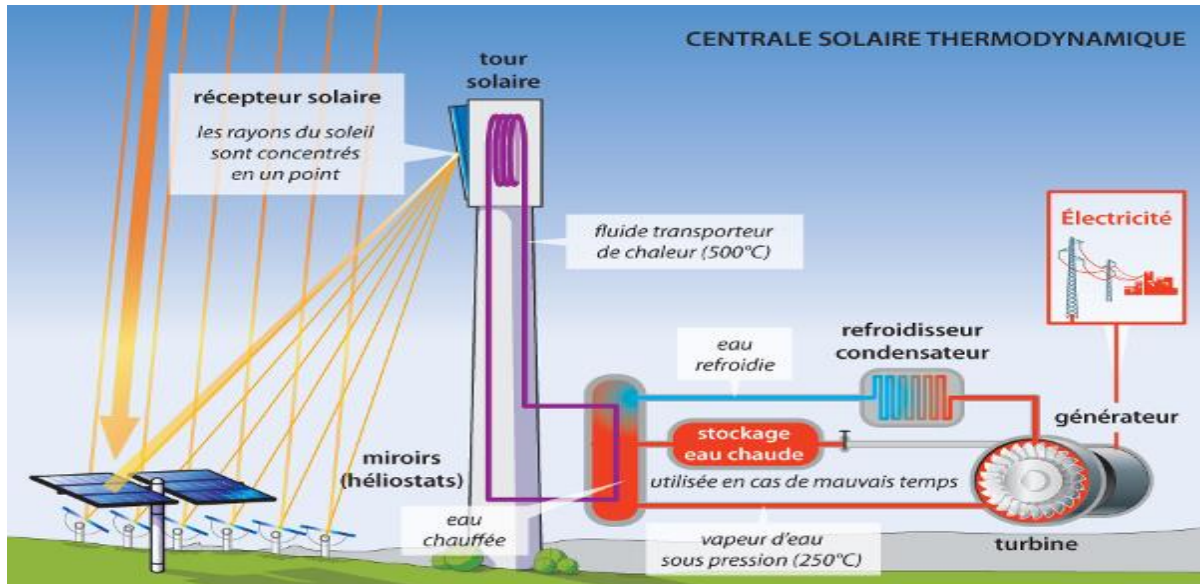


Figure I.3.2. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique solaire

b. Éolienne :

Une éolienne produit de l'électricité grâce au vent qui met en mouvement un rotor, permettant sa transformation en énergie mécanique. La vitesse de rotation de l'arbre entraîné par le mouvement des pales est accélérée par un multiplicateur. Cette énergie mécanique est ensuite transmise au générateur [10].

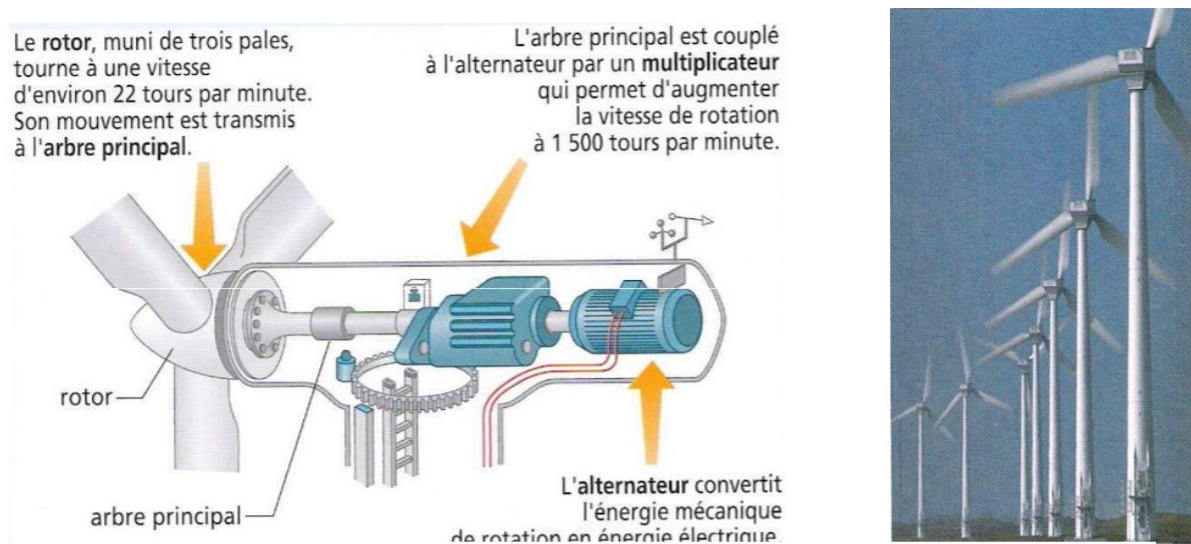


Figure I.3.3. Principe de fonctionnement des éoliennes

c. Hydraulique :

Les centrales hydrauliques utilisent de l'eau stockée dans un barrage, une conduite forcée, située en contrebas, propulse l'eau sur les pales d'une turbine. L'eau remise ensuite dans le milieu naturel par un canal de fuite.

La turbine entraîne un alternateur qui produit de l'énergie électrique : cette énergie est élevée dans un transformateur pour son trajet dans les lignes à haute tension [8].

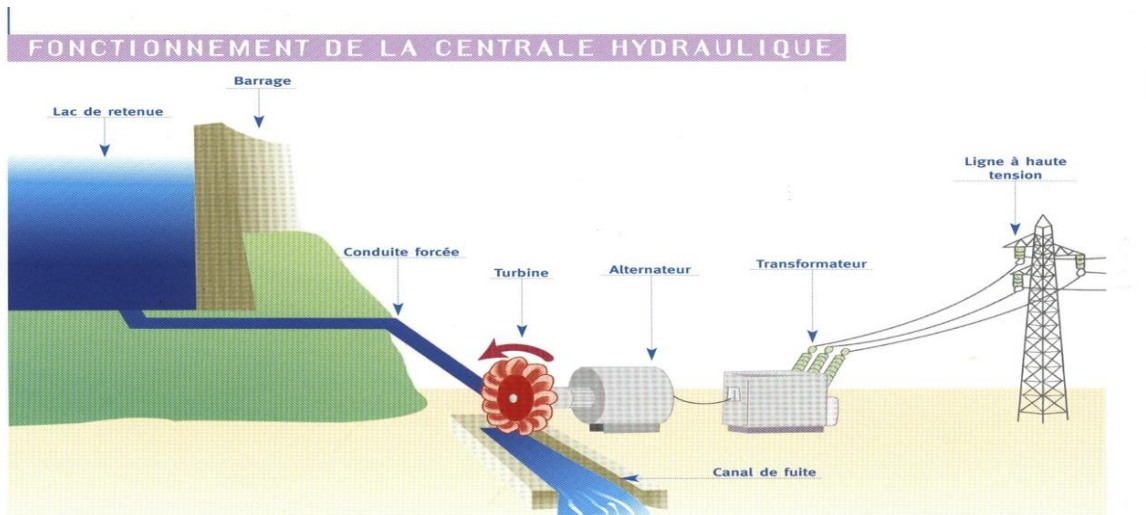


Figure I.3.4. Principe de fonctionnement d'une Centrale hydraulique

e. **Géothermique** : Une centrale géothermique produit de l'électricité grâce à la chaleur de la Terre qui transforme l'eau contenue dans les nappes souterraines en vapeur et permet de faire tourner une turbine à vapeur qui entraîne un alternateur pour la production de l'électricité [9].

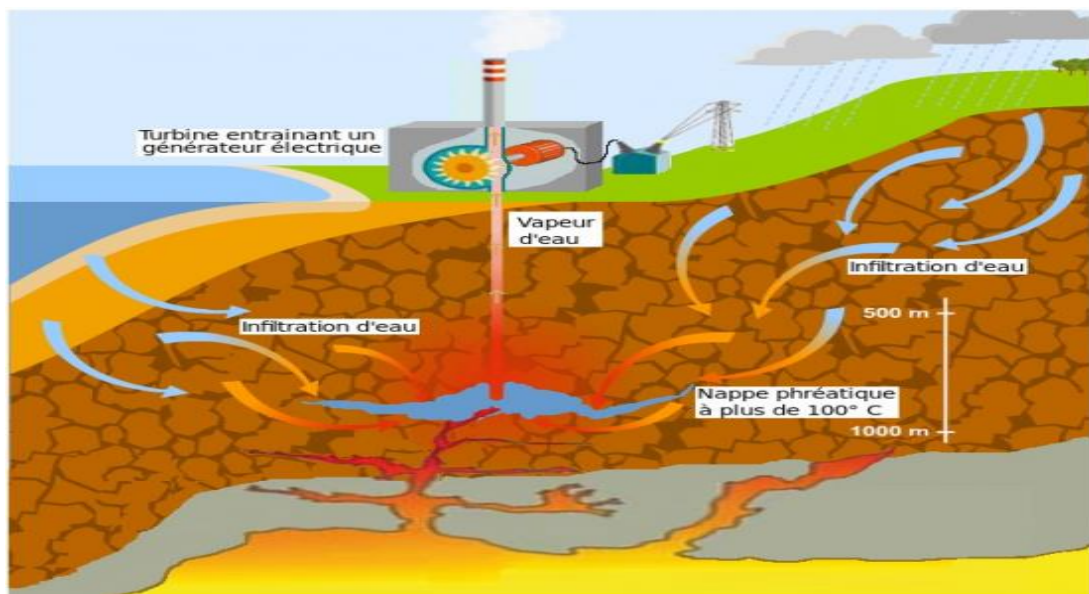


Figure I.3.5. Principe de fonctionnement d'une Centrale électrique géothermique

Chapitre II : Centrale électrique à cycle combiné

Introduction :

Une centrale électrique à cycle combiné généralement appelée en anglais CCGT (Combined Cycle Gas Turbine), ou TGV (Turbine Gaz-Vapeur) est essentiellement constituée d'une ou de plusieurs turbines à gaz, chacune entraînant un alternateur, la chaleur des gaz d'échappement des turbines à gaz est récupérée dans des chaudières de récupération « Heat Recovery Steam Generator – HRSG » pour produire de la vapeur qui actionne des turbines à vapeur qui entraînent les alternateurs associés. La centrale comprend notamment un poste d'eau dont la fonction est de condenser la vapeur dans le condenseur, de conditionner les condensats et de les transférer vers la chaudière, ainsi qu'un système de refroidissement qui assure principalement la circulation d'eau de refroidissement du condenseur. La centrale comprend également tous les systèmes auxiliaires mécaniques, électriques et de commande, ainsi que les installations civiles et les bâtiments associés [10].

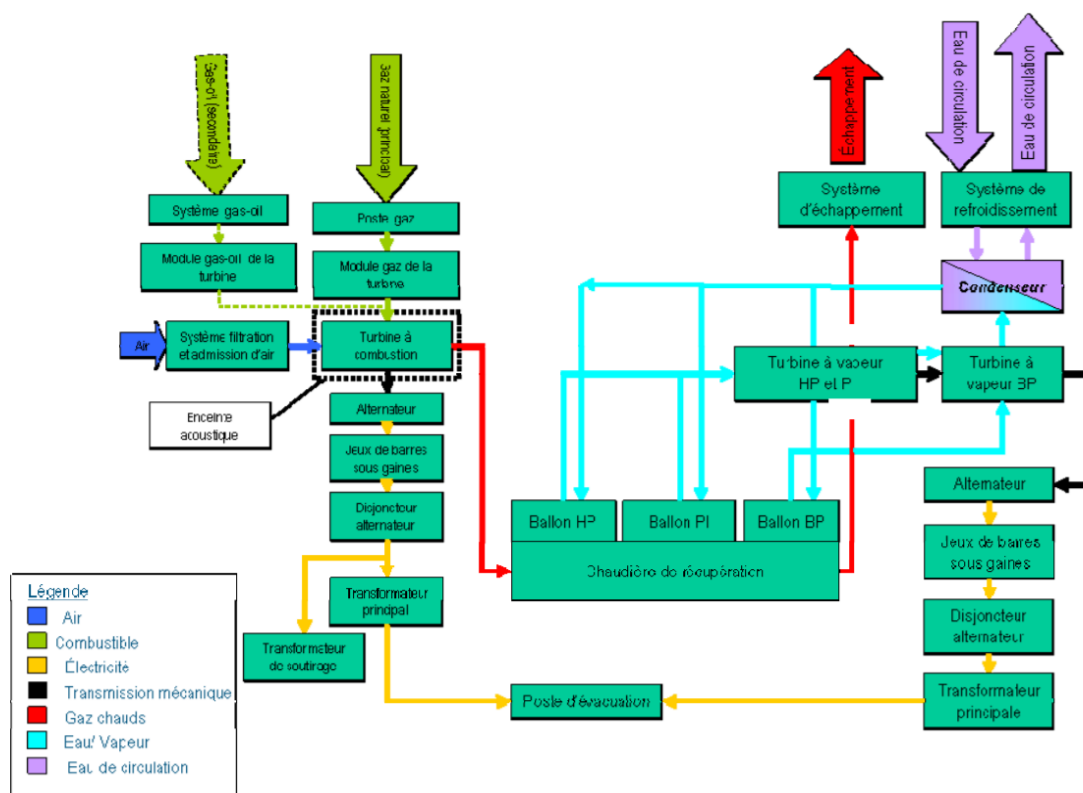


Figure II.1.1. Diagramme fonctionnel d'une centrale thermique à cycle combiné

Les principaux systèmes de la centrale, tels qu'illustrés dans la figure 1, sont :

- ▶ circuit d'air : c'est le système de filtration et d'admission de l'air vers le compresseur de la turbine à gaz.
- ▶ circuit combustible : comprends les systèmes pour le traitement et l'alimentation du gaz naturel et du combustible de secours (gasoil) vers la turbine à gaz où le mélange air – carburant est brûlé.
- ▶ circuit gaz d'échappement : à la sortie de la turbine, les gaz d'échappement sont encore suffisamment chauds pour produire de la vapeur via une chaudière de récupérations avant d'être évacués à l'atmosphère par une cheminée.
- ▶ circuit eau/vapeur : grâce au transfert de chaleur des gaz, l'eau qui circule dans la chaudière de récupération se transforme en vapeur et entraîne la turbine à vapeur.
- ▶ circuit eau de circulation (refroidissement condenseur) : la vapeur à l'échappement de la turbine à vapeur se condense au niveau du condenseur. Un système de refroidissement assure la circulation de l'eau de refroidissement à travers le condenseur.
- ▶ électricité : l'électricité produite par les alternateurs entraînés mécaniquement par la turbine à gaz et par la turbine à vapeur est acheminée vers le réseau par le poste d'évacuation via les jeux de barres sous gaines, les disjoncteurs principaux, les transformateurs principaux. Le transformateur de soutirage assure l'alimentation électrique des systèmes auxiliaires de la centrale. Le système de contrôle commande de la centrale assure quant à lui le contrôle, la supervision et la conduite de la centrale [10].

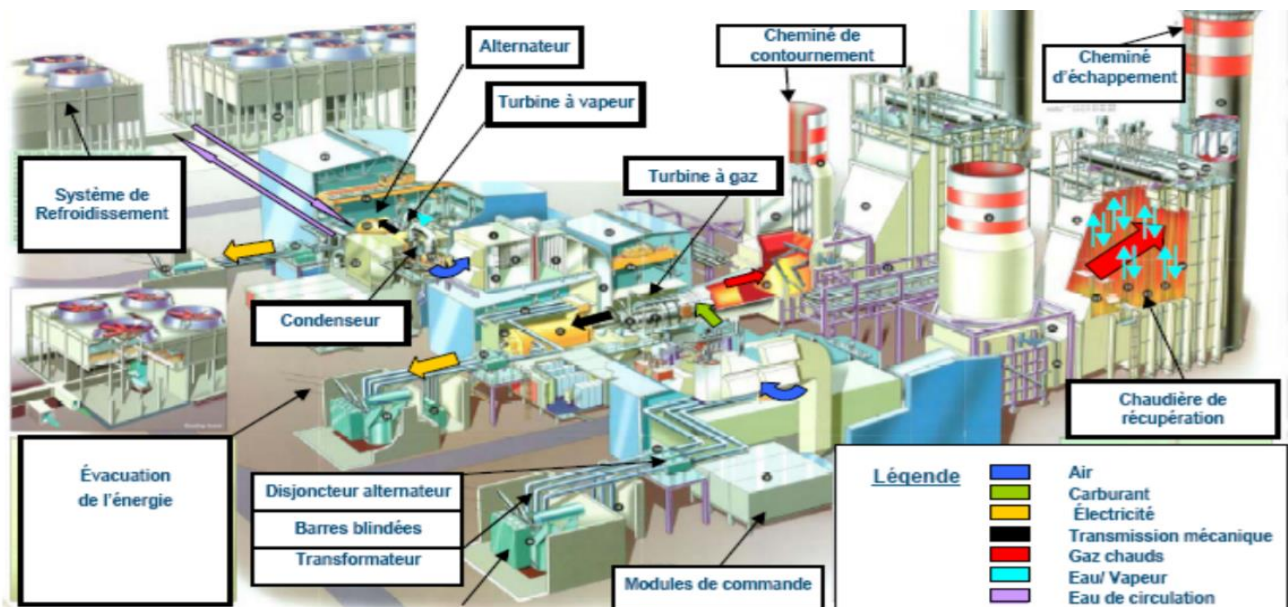


Figure II.1.2. Vue d'ensemble, centrale thermique à cycle combiné

II.2 Différentes configurations des centrales à cycle combiné

Une centrale à cycle combiné associe deux types de turbines : turbine à gaz et turbine à vapeur selon deux configurations possibles :

II.2.1 Configuration

Dans la configuration « mono-arbre » ou « single-shaft », les deux types de turbines (turbine à gaz et turbine à vapeur) sont couplés au même alternateur [10].

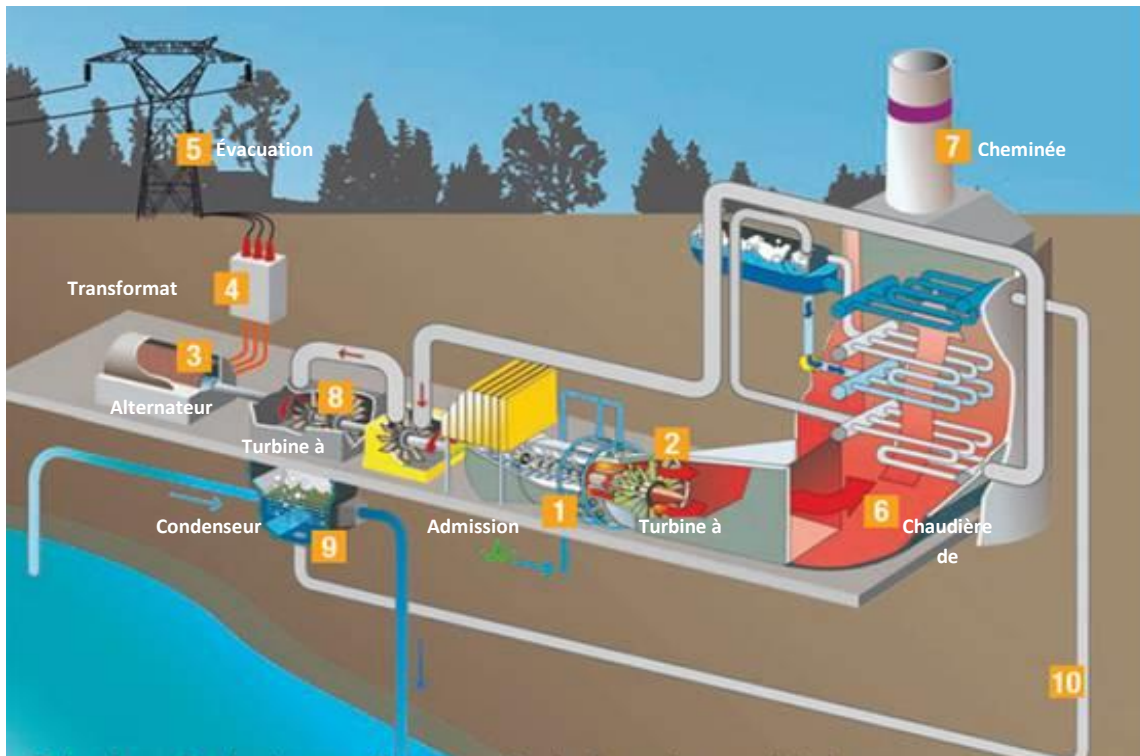


Figure II.1.3. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné mono-arbre

Pour ce type de configuration, on distingue deux conceptions différentes :

► mono-arbre sans embrayage « Single shaft without clutch »

Chaque tranche sera constituée d'une seule ligne d'arbre comprenant une turbine à gaz, une turbine à vapeur et un alternateur commun aux deux.

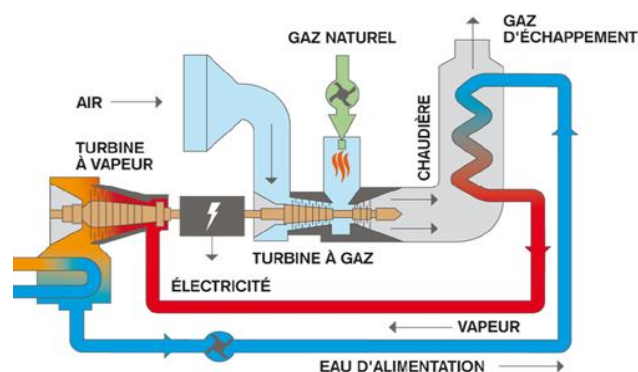


Figure II.1.4. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné mono-arbre sans embrayage

► mono-arbre avec embrayage « Single shaft with clutch »

La configuration de la Tranche est identique à celle citée ci-dessus, elle comprend néanmoins un équipement additionnel, « l'embrayage » ou « Synchro-Self Shifting Clutch », qui sert à déconnecter la turbine à vapeur et à permettre à la turbine à gaz et à l'alternateur de fonctionner séparément.

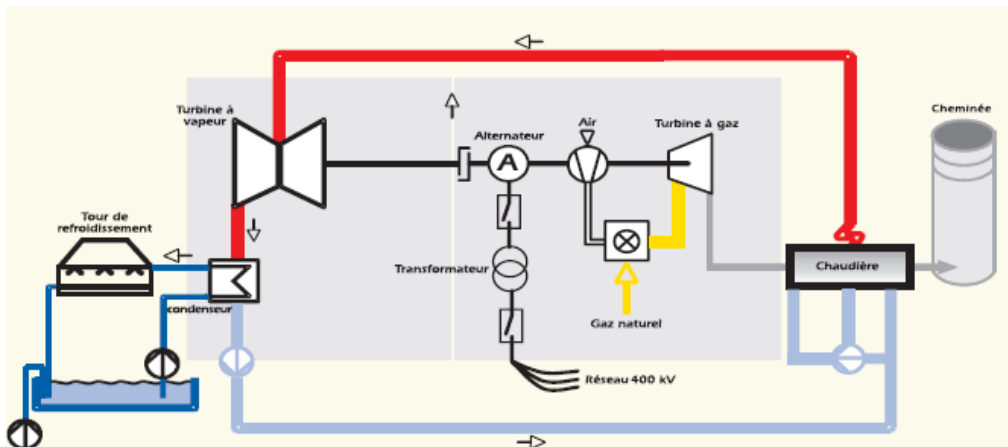


Figure II.1.5. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné mono-arbre avec embrayage

Au démarrage, seule la turbine à gaz est mise en service, la turbine à vapeur est à l'arrêt et entre graduellement en rotation dès que la vapeur atteint les conditions requises.

Dès que la turbine à vapeur atteint le même régime de rotation que la turbine à gaz, l'embrayage s'enclenche automatiquement. De même, dès que la turbine à vapeur décélère par rapport à la turbine à gaz, l'embrayage est déconnecté automatiquement de l'alternateur

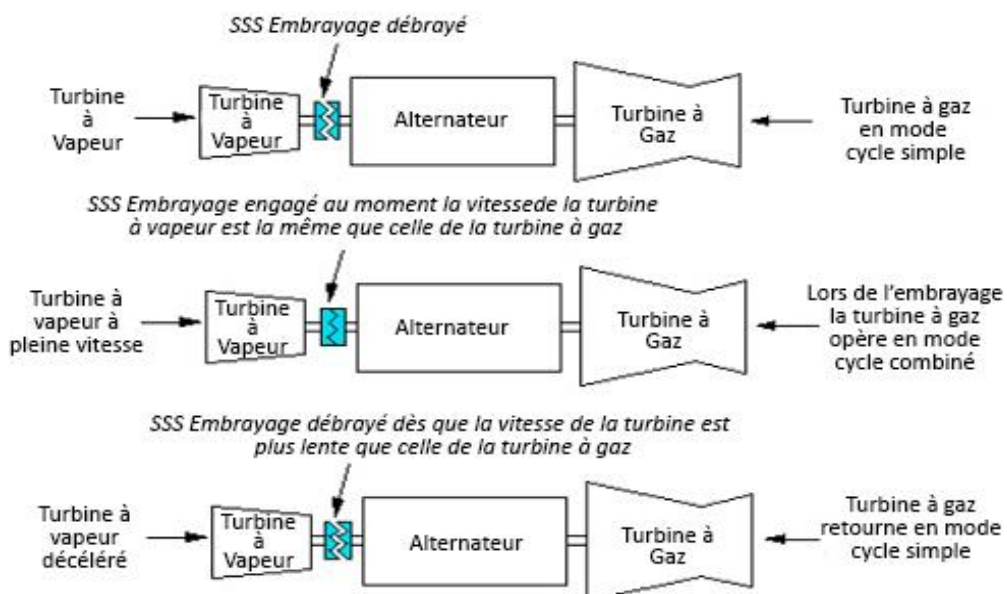


Figure II.1.6. Schéma des principes de fonctionnement de l'embrayage « SSS clutch »

II.2.2 Configuration multi-arbre « multi-shaft » :

Dans la configuration « multi-arbres » ou « multi-shaft », chaque turbine entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

Il existe plusieurs possibilités d'agencer une ou plusieurs turbines à gaz et une turbine à vapeur selon la puissance et le nombre de tranches souhaités pour la centrale [10]. Les deux configurations multi-shaft les plus communes sont :

Multi-arbre 1 TG x 1TV « One on one multi-shaft »

Chaque tranche sera constituée d'une ligne d'arbre comprenant une turbine à gaz et son alternateur, ainsi que d'une deuxième ligne d'arbre pour la turbine à vapeur et son alternateur.

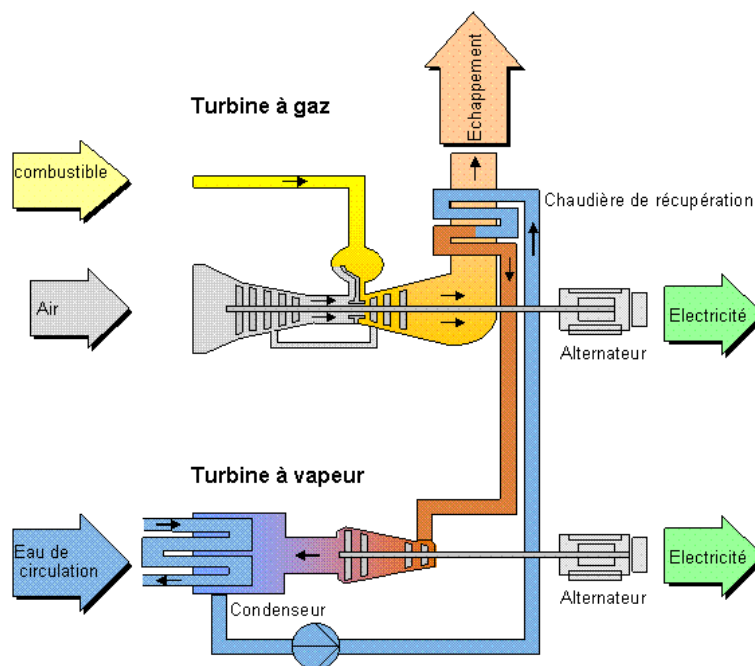


Figure II.1.7. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné (1 TG x 1 TV) à configuration à arbres multiples

Multi-arbre 2 TG x 1TV (« Two on one multi shaft »)

La configuration à arbres multiples permet d'avoir une seule turbine à vapeur (donc un seul condenseur avec ses conduites d'eau de refroidissement/circulation) pour plusieurs turbines à gaz. La figure 9 illustre le schéma simplifié d'une configuration multi-arbre à deux turbines à gaz et une turbine à vapeur.

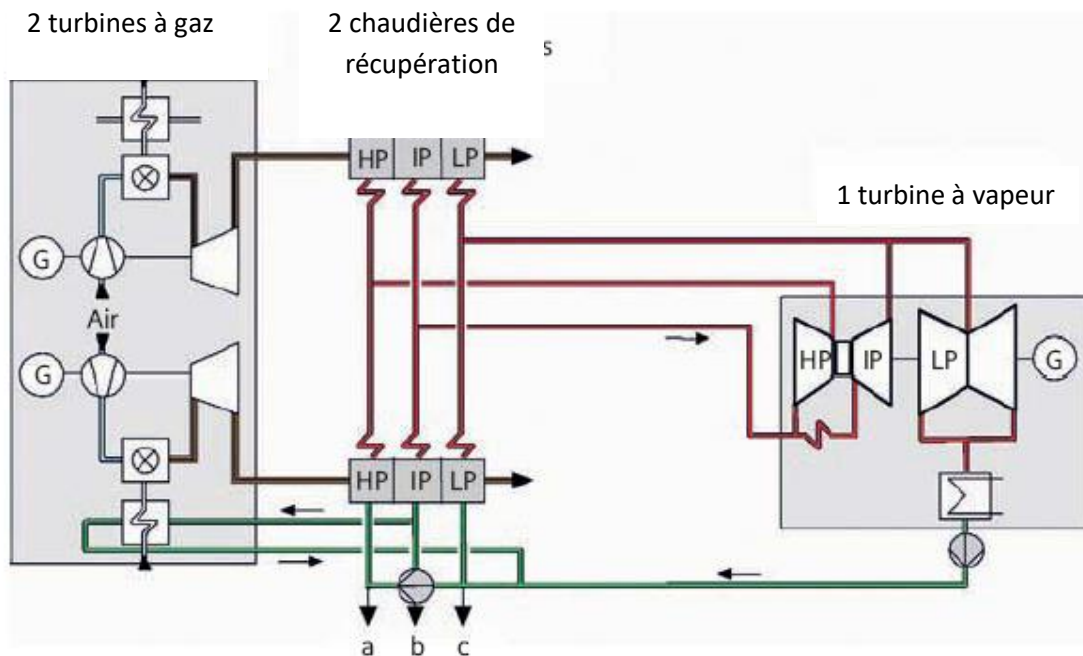


Figure II.1.8. Schéma simplifié d'une centrale à cycle combiné (2TG x 1TV) à configuration à arbres multiple

II.3 Constitution de la centrale

Les installations constituant une centrale à cycle combiné sont comme suivies :

II.3.1 Îlot de puissance ("Power Island") :

Les équipements principaux de production d'électricité de chaque Tranche constituent le « îlot puissance » qui comprend notamment :

- ▶ La ou les turbines à gaz et ses auxiliaires propres qui comprennent principalement :
 - Les systèmes combustibles;
 - Le système de refroidissement;
 - Le système d'huile de lubrification et de commande;
 - Le système de refroidissement de l'huile;
 - Le système de virage;
 - Le système de lavage du compresseur;
 - Le système de filtration et d'admission d'air;
 - Le système d'échappement et le système de contrôle des émissions;
 - Le module turbine à gaz (« Package ») et son système de ventilation.

- ▶ La chaudière de récupération et ses auxiliaires propres qui comprennent principalement :
 - Le circuit de contournement vapeur et les stations de désurchauffe;
 - Le système de purges;
 - Le système d'échantillonnage et de traitement chimique de l'eau;

- ▶ la turbine à vapeur et ses auxiliaires propres qui comprennent principalement :
 - Le système d'huile de lubrification et de commande;
 - Le système de refroidissement de l'huile;
 - Le système de virage;
 - Le système d'étanchéité.

- ▶ le poste d'eau qui comprend principalement :
 - Le condenseur à eau de mer;
 - Les pompes à vide, éjecteurs;
 - Le système de nettoyage du condenseur;
 - Les pompes d'extraction des condensats;
 - La bêche alimentaire;
 - Le dégazeur;
 - Les pompes alimentaires.

- ▶ le ou les alternateurs et ses auxiliaires propres;
- ▶ les jeux de barres sous gaines;
- ▶ le ou les transformateurs principaux;
- ▶ le ou les disjoncteurs principaux;
- ▶ le système de contrôle commande.

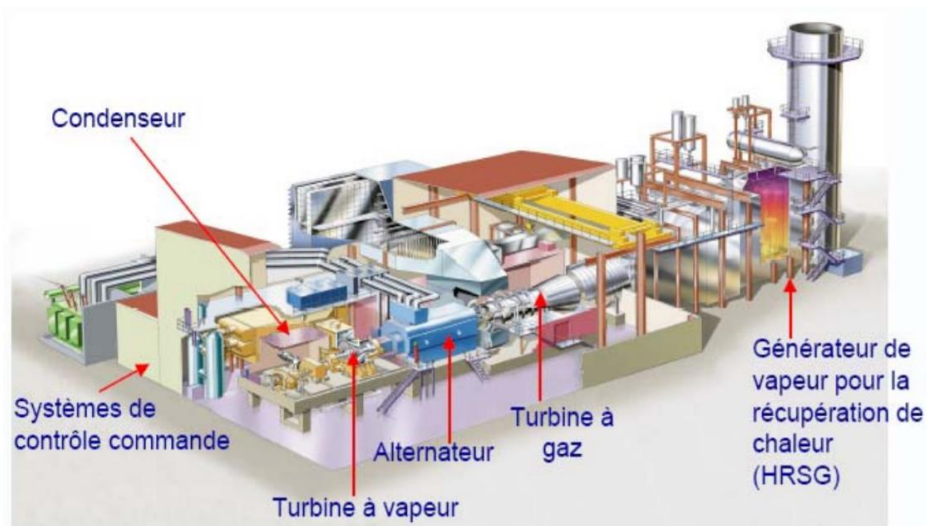


Figure I.1.9. Plan d'arrangement du bloc usine d'une centrale à cycle combiné « Alstom »

II.3.2 Les auxiliaires de la centrale :

Les équipements auxiliaires de la centrale comprennent notamment :

- ▶ Le système de refroidissement par eau de mer de la centrale, qui comprend :
 - Un circuit ouvert : il s'agit du circuit d'eau de mer comprenant une prises d'eau de mer, une station de tamisage, une station d'électrochloration une station de pompage, le condenseur et un canal de rejet.
 - Un circuit fermé : c'est le circuit d'eau déminéralisée destiné à refroidir les autres systèmes de la centrale
- ▶ le poste électrique d'évacuation de l'énergie.
- ▶ les transformateurs de soutirage et les transformateurs auxiliaires.
- ▶ les groupes diesel de démarrage.
- ▶ les tableaux MT, BT, CC.
- ▶ les systèmes de distribution de courant AC, CC, onduleurs, redresseurs.
- ▶ le système de comptage, les protections et appareils de mesures.
- ▶ les systèmes combustibles : système de gaz naturel et système gasoil.
- ▶ le système d'électrochloration.
- ▶ **le système de production d'hydrogène**
- ▶ le système de chauffage, ventilation et conditionnement de l'air.
- ▶ les systèmes d'eaux : système de dessalement, système eau de service, système eau potable, système de déminéralisation, système de neutralisation des eaux chimiques de rejets.
- ▶ les systèmes de protection et de détection incendient.
- ▶ le système d'air comprimé.
- ▶ le système de surveillance de site.
- ▶ le réseau de mise à la terre.
- ▶ le système d'éclairage et de prise de courant.
- ▶ les moyens de manutention.

II.3.3 Plan d'ensemble :

Une centrale à cycle combiné est composée d'une ou de plusieurs « tranches », chaque tranche consistant en une unité complète et autonome de production d'électricité, c'est-à-dire comprenant une turbine à gaz avec son alternateur, son transformateur de puissance et tous les auxiliaires propres associés [10].

La centrale comporte une série de bâtiments, d'ouvrage et d'installations répondant aux divers besoins de la centrale et de ses exploitants :

Bâtiments et locaux fonctionnels

► salle des machines :

La salle des machines abrite les équipements suivants :

- turbine à gaz et auxiliaires.
- turbine à vapeur et auxiliaires.
- alternateurs et auxiliaires.
- condenseurs d'eau de mer (radial ou axial) et auxiliaires.
- pompes d'extraction et auxiliaires.

En fonction de la configuration de la centrale (single-shaft, multi-shaft), la salle des machines peut être à un ou deux niveaux. Selon le standard des différents Constructeurs, une salle des machines peut être prévue commune à l'ensemble des Tranches de la Centrale; ou bien une salle des machines peut être prévue pour chaque Tranche [10].

Bâtiment électrique :

Les équipements électriques et de contrôle commande de la centrale sont regroupés dans le bâtiment. Il comprend notamment la salle de commande de la centrale.

► bâtiment poste électrique d'évacuation : Ce bâtiment est destiné à recevoir le poste d'évacuation.

► bâtiment des systèmes d'eau : Ce bâtiment sert à recueillir les systèmes de traitements d'eau requis et comprend notamment :

- Un local pour les systèmes d'eau (pompes d'eau de service et d'eau potable, station de traitement d'eau potable et armoires de contrôle commandes).
- Un local pour le système de déminéralisation (pompes d'acheminement d'eau, station de déminéralisation, réservoirs de stockage d'eau déminéralisée et de produits chimiques, pompes d'eau déminéralisée et armoire de contrôle commande).
- Un local pour le système de neutralisation des eaux chimiques de rejets.
- Un laboratoire.

► local des groupes électrogènes : Ce local est destiné à recevoir les groupes électrogènes et leurs armoires de commande locale.

► local du système de dépotage, traitement et transfert gas-oil : Ce local est destiné à recevoir les équipements du système gas-oil.

► local d'électrochloration : Ce local est destiné à recevoir les équipements du système d'électrochloration.

► local de production d'hydrogène : Ce local est destiné à recevoir les équipements du système de production d'hydrogène.

- ▶ local du système de dessalement : Ce local est destiné à recevoir les équipements de commande du système de dessalement d'eau de mer.
- ▶ local du système d'injection chimique et d'échantillonnage : Ce local est destiné à recevoir les équipements du système d'injection chimique et d'échantillonnage.
- ▶ local du système d'air comprimé : Ce local est destiné à recevoir les équipements du système d'air comprimé.
- ▶ local station de pompage incendie : Ce local est destiné à recevoir les pompes de protection incendie par eau.

II.4 Principe de fonctionnement :

Au premier cycle (cycle turbine à gaz). L'air extérieur est filtré et envoyé vers le compresseur, il subit une compression avant d'être envoyé dans la chambre de combustion, où est injecté le combustible, le mélange s'enflamme dans la chambre de combustion, produisant des gaz à haute pression qui font tourner l'arbre de la turbine [10].

La turbine à gaz fonctionne en utilisant le gaz naturel comme combustible principal et le gas-oil comme combustible de secours. De ce fait, la centrale est dotée de deux systèmes de traitement de combustible :

- ▶ le système de gaz naturel assure les fonctions de filtration, séparation, comptage, réchauffage, détente (ou compression) du gaz naturel admis aux turbines à gaz et unités de dessalement.
- ▶ le système de gas-oil assure les fonctions de dépotage, de comptage, de stockage, de traitement et de transfert du gas-oil aux utilitaires de la centrales (turbines à gaz, unités de dessalement, groupes diesel, moto pompe incendie).

Au deuxième cycle (cycle turbine à vapeur). Les gaz de combustion qui sortent de la turbine à gaz sont envoyés dans la chaudière de récupération avant d'être rejetés dans l'atmosphère par la cheminée.

L'eau mise sous pression est introduite dans la chaudière de récupération au niveau de l'économiseur inséré à la fin du circuit des gaz d'échappement (en sortie chaudière) avant d'aboutir au ballon BP.

Les différents niveaux de pression de la chaudière fonctionnent selon le même principe, à savoir : l'eau extraite du ballon BP est mise au niveau de pression requise par la pompe

alimentaire et circule par la suite à travers les économiseurs où elle est préchauffée avant d'atteindre le ballon du même niveau de pression, de là l'eau est dirigée vers l'évaporateur où elle se transforme en vapeur saturée grâce au transfert de chaleur des gaz de combustion. La vapeur saturée ainsi formée est envoyée vers le ballon pour assurer la séparation des particules d'eau (séparation eau/vapeur). La vapeur sèche extraite du ballon est surchauffée au niveau de la chaudière avant d'être admise au corps de la turbine à vapeur de même niveau de pression.

La turbine à vapeur est entraînée par la vapeur qui se détend au niveau de ses différents corps HP, PI et BP.

La vapeur sortant du corps basse pression de la turbine à vapeur est admise dans le condenseur, premier élément du poste d'eau. Le condensat est alors conditionné au point de vue teneur en oxygène, pression et température avant de repartir vers la chaudière de récupération. Pour cela le poste d'eau dispose des équipements principaux suivants :

- ▶ le condenseur à surface : Sa fonction principale est de condenser la vapeur à l'échappement du corps basse pression de la turbine à vapeur au contact des surfaces extérieures des tubes froids véhiculant l'eau de mer de circulation. Le condenseur dispose d'un système de nettoyage (en ligne et hors ligne) qui permet de lutter contre les phénomènes d'encrassement et d'entartrage.

- ▶ pompes à vide, éjecteurs : qui permettent de créer le vide dans le condenseur lors du démarrage et son maintien pendant le fonctionnement (l'air qui s'introduit dans le circuit vapeur s'accumule dans le condenseur ce qui entraîne la baisse du vide).

- ▶ pompes d'extraction : elles assurent l'extraction des condensats du puits chaud du condenseur pour les refouler vers l'économiseur BP de la chaudière.

- ▶ bêche alimentaire : la bêche est un réservoir dont la fonction est de maintenir une réserve d'eau suffisante pour équilibrer le débit à l'aspiration des pompes et de recevoir les appoints nécessaires pour compenser les pertes du circuit eau/vapeur. La bêche alimentaire peut ne pas exister en tant qu'équipement indépendant dans le cas où le réservoir de stockage est intégré au condenseur.

- ▶ dégazeur : la fonction de dégazage peut être effectuée au niveau de la bêche alimentaire (procédé conventionnel, et on parle alors d'un dégazeur ou d'une bêche avec dégazage), ou

bien intégrée au condenseur (procédé plus récent utilisé dans les cycles combinés). Elle permet :

- D'amener l'eau à une température acceptable à l'entrée de la chaudière.
- D'éliminer naturellement les gaz dissous.

► pompes alimentaires : elles permettent de conditionner la pression de l'eau alimentaire aux conditions d'admission des différents niveaux de pression de la chaudière de récupération.

Le condenseur est lui-même refroidi par de l'eau de mer. Le système de refroidissement par eau de mer de la centrale comprend principalement :

► un circuit ouvert ou circuit d'eau de mer comprenant :

1. Une prise d'eau de mer permettant de capter l'eau dans une zone calme et d'assurer un écoulement laminaire d'une eau propre et à basse température.
2. Une station de tamisage et de pompage qui assure la filtration de l'eau de mer et sa circulation vers les différents utilitaires de la centrale (condenseurs à eau de mer, échangeurs de chaleur, unités de dessalement...).
3. Des conduites de circulation d'eau de mer qui assurent l'amenée de l'eau de refroidissement jusqu'aux utilitaires de la centrale, et de là son évacuation vers le canal de rejet.
4. Un canal de rejet dans lequel se déversent les eaux de refroidissement des utilitaires de la centrale en vue d'être rejetées à la mer.

► un circuit fermé d'eau déminéralisée qui assure l'alimentation en eau de refroidissement tous les échangeurs de chaleurs de la centrale (échangeurs de refroidissement de l'huile des turbines, de l'air de l'alternateur, ext)

Le ou les alternateurs sont entraînés par la turbine à gaz et la turbine à vapeur et génèrent ainsi du courant électrique qui est acheminé, à travers les jeux de barres sous gaines, vers un transformateur principal. Le transformateur élève la tension du courant électrique au niveau requis par le réseau.

L'électricité est ensuite envoyée via des câbles haute tension vers un poste d'évacuation d'électricité raccordé au réseau de distribution d'électricité.

Une partie de l'électricité produite est soutirée par des transformateurs dédiés à cet effet afin d'assurer l'alimentation électriques des différents systèmes et installations de la centrale.

La centrale dispose de plusieurs systèmes auxiliaires qui ne rentrent pas directement en ligne de compte dans la production d'énergie, mais qui sont indispensables à son bon fonctionnement, dont notamment :

- ▶ le système de détection et protection incendie qui assure :
 1. La prévention contre les risques d'une explosion ou d'un incendie.
 2. La détection immédiate des incendies.
 3. La protection du personnel d'exploitation et des installations et ouvrages de la centrale.
 4. L'enclenchement de procédures d'arrêt en toute sécurité des installations.

- ▶ le système d'air comprimé pour répondre aux besoins en air de procédé et en air service de la centrale.

- ▶ les systèmes d'eau pour fournir et conditionner l'eau pour répondre aux besoins de la centrale en différentes qualités d'eau, et pour traiter les effluents avant de les évacuer vers les réseaux de drainage.

- ▶ les systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA) qui doivent assurer d'une manière continue et fiable les conditions minimales acceptables prescrites de la qualité de l'air, de la température et de l'humidité, nécessaires au confort et à la sécurité du personnel, au bon fonctionnement des équipements de la centrale ainsi que la continuité de l'activité de production d'énergie; Les moyens de manutention prévus pour faciliter le levage des équipements et pièces lourdes lors des opérations d'entretien. Le fonctionnement de chaque système de la centrale à cycle simple sera décrit en détail dans les Guides Techniques Spécifiques de chacun de ces équipements.

III.1 Généralité sur l'hydrogène :

Introduction :

-L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'univers, mais ne représente que 0.9 % en poids de la croûte terrestre.

-Le nom « HYDROGENE » provient de l'inventeur Antoine Laurent Lavoisier qui lui donna ce nom en 1783, signifiant en Grec « HYDRO » : eau ; et « GENE » : producteur, créateur. Mais ses propriétés furent précisées plus avant par Cavendish en 1766.

-C'est un gaz incolore, sans odeur, sans saveur et non toxique; il est très répandu sur la terre sous forme de combinaisons chimiques, les principales étant : l'eau dont il représente 11% du poids et les hydrocarbures. On le trouve à l'état naturel gazeux dans certains gaz de pétrole et dans les gaz dégagés par les volcans.

-L'hydrogène est le plus léger de tous les gaz connus : quinze fois plus léger que l'air et seize fois plus léger que l'oxygène. C'est un gaz très inflammable, et très difficile à liquéfier, sa température de liquéfaction est de (-252.8 °C) ; C'est un assez bon conducteur de la chaleur et de l'électricité.

-La molécule d'hydrogène est très stable thermiquement ce qui explique sa faible réactivité à basse température. Il est donc nécessaire d'amorcer les réactions à chaud où utiliser un catalyseur qui favorise sa dissociation.

-Étonnamment, l'hydrogène est un métal : lorsqu'il est sous forme solide (très hautes pressions et très basses température), il cristallise avec une liaison métallique. 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. De façon simpliste sa nature métallique est due à son électron périphérique sur son unique et dernière couche saturée à deux électrons [11].

III.1.2 Caractéristiques principales :

-L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple; son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. La masse de l'électron étant négligeable devant celles des protons et des neutrons; ce sont ces derniers qui déterminent la masse des atomes (alors leur poids) [11].

a) Caractéristiques physiques :

Sur terre et hormis les composés avec d'autres atomes, il se présente le plus souvent sous la forme d'un gaz : le dihydrogène, sous des très faibles pressions comme celles qui existent dans l'espace. L'hydrogène a tendance à exister sous forme d'atomes individuels, simplement parce qu'il est alors improbable qu'ils entrent en collision pour se combiner. Les principales caractéristiques physiques de l'hydrogène sont résumées ci-dessous [11]:

• Formule chimique	H ₂ .
• Numéro atomique	1.
• Poids moléculaire	2.
• Nombre d'atomes	2.
• Etat à 15 °C	Gazeux.
• Densité / air	0.0695.
• Poids du litre de gaz à (0 °C) (g)	0.08987.
• Poids du litre de gaz à (15 °C) (g)	0.08616.
• Température d'ébullition T _e (°C)	-252.8.
• Température de fusion T _f (°C)	-259.2.
• Température critique T _C (°C)	-239.9.
• Pression critique P _C (atm)	12.98.
• Poids du litre de liquide à T _e (kg)	0.078.
• Volume de gaz par kg de liquide (m ³)	11.743.
• Volume de gaz par litre de liquide (m ³)	0.8315.
• Chaleur latente de vaporisation à T _e (cal/g)	109.
• Chaleur latente de fusion à T _f (cal/g)	15.
• Chaleur spécifique à P= ct (C _p) (cal/g)	3.41.
• Chaleur spécifique à V= ct (C _v) (cal/g)	2.42.
• Rapport des chaleurs spécifiques (γ)	1.41.
• Coefficient de dilatation du gaz à V= ct	3662 10 ⁻⁶
• Magnétisme	diamagnétique.
• Densité liquide à T _e (kg /Nm ³)	70.79.
• Densité gazeuse à T _e (kg/Nm ³)	1.34.
• Densité gazeuse à 273 k (kg/Nm ³)	0.08988.
• Pouvoir calorifique inférieur (PCI) (MJ/kg)	120.

- Pouvoir calorifique supérieur (PCS) (MJ/kg) 142.
 - Energie d'évaporation (kJ/kg) 445.
 - Energie de liquéfaction (kJ/kg) 14112.
- Quand Cela n'est pas spécifié; les caractéristiques ci-dessus correspondent à la pression absolue de 760 mm Hg (une atmosphère).

b) Caractéristiques chimiques :

- - L'hydrogène ne réagit à froid que sur un petit nombre de corps (par exemple : le fluor) ; mais les réactions sont de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que la température augmente, d'autre part, l'hydrogène libéré par réaction possède à l'état naissant une activité supérieure à l'hydrogène gazeux libre. Enfin l'hydrogène atomique obtenu par décharge électrique est également plus actif que l'hydrogène moléculaire.
- Inflammabilité :
L'hydrogène brûle dans l'air et dans l'oxygène en formant de la vapeur d'eau. Le mélange d'hydrogène et d'air brûle en produisant une flamme rougeâtre et peu lumineuse. Alors que le mélange d'hydrogène et d'oxygène brûle avec une flamme bleuâtre, peu visible, le peu de visibilité de ces flammes les rend d'autant plus dangereuses; car en plein jour elles risquent de passer inaperçus et de provoquer des accidents.
- Inflammabilité dans l'air :
 - La température minimale d'auto-inflammation à 1 atm est de 570 °C.
 - Limites d'inflammabilité à 20°C et 1 atm :
 - Inferieure 4%.
 - Supérieure 74.5%.
- Inflammabilité dans l'oxygène :
 - La température minimale d'auto-inflammation à 1 atm est de 560 °C.
 - Limites d'inflammabilité à 20 °C et 1 atm :
 - Inferieure..... 4%.
 - Supérieure 94%.
- L'élévation de température due à la combustion, transforme rapidement celle-ci en déflagration ou en explosion selon les proportions.
- Les mélanges de 18 à 59 % d'hydrogène avec l'air et de 15 à 90 % avec l'oxygène sont détonants; ils sont déflagrants au-dessous et au-dessus de ces teneurs. La flamme oxygène –hydrogène est très chaude, dans les proportions idéales de deux volumes d'hydrogène

pour un volume d'oxygène, la température de la flamme est de 3000°C. En pratique on utilise dans les chalumeaux oxyhydriques un mélange à quatre volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène fournissant une flamme de 2300 à 2400 °C, cette flamme a une action réductrice. L'énergie d'inflammation est 0.02 mJ.

III.2 Production de l'hydrogène :

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- La matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois.
- L'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.).
- Le procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique pour l'électrolyse ou à l'énergie thermique telle procédé thermochimique. Pour la plupart des procédés, il existe plusieurs types et le nombre est relativement important.

III.2.1 Production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau :

L'électrolyse de l'eau est un procédé électrolytique qui décompose l'eau en oxygène et hydrogène gazeux avec l'aide d'un courant électrique.

La cellule électrolytique est constituée de deux électrodes habituellement en métal inerte (dans la zone de potentiel et de pH considérée) comme le platine-immersées dans un électrolyte et connectées aux pôles opposés de la source de courant continu.

Désormais, l'électrolyse est associée à une future utilisation des énergies renouvelables. Cela pourrait être intéressant au vu de la non-simultanéité de la production par ces procédés avec les besoins des industriels et des individus. Une autre possibilité réside dans l'utilisation de l'électricité produite par des centrales nucléaires, et plus particulièrement lors des heures creuses. L'hydrogène permettrait ainsi le stockage de l'électricité sous forme chimique, et une réutilisation ultérieure lorsque les besoins se font sentir. En outre, le rendement de l'électrolyse est en pratique de l'ordre de 65%, bien que, théoriquement, il est possible d'atteindre 80 ou 85%. Enfin, étant donné le prix élevé de l'électricité, le coût de l'électrolyse est bien supérieur à celui du reformage. Ainsi, afin d'augmenter la rentabilité du processus, il faudrait une électricité à plus faible coût [11].

III.2.1.1 Historique :

Nicholson et Carlisle sont les premiers à produire de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau en 1800. En 1832, Faraday établit les lois quantitatives de l'électrolyse. Cependant, le premier électrolyseur n'est commercialisé qu'un siècle plus tard, en 1902 par la société Oerlikon Engineering Company. En 1939, le premier électrolyseur dédié à la production d'oxygène à grande échelle (production des gaz > 104 m³/h) est installé au Canada. Il est de technologie alcaline à plaques mono polaires. Il sera ensuite reconverti pour produire de l'hydrogène pour la fabrication d'engrais.

En 1948, le fabricant Lurgi apporte une innovation majeure en développant le procédé d'électrolyse sous pression, ce qui permettait de s'affranchir d'une unité de compression pour le stockage des gaz produits et de fonctionner à plus haute température. La première installation de ce type est mise en place au Pérou à Cuzco en 1958 [11].

Le Tableau III.2.1 ci-dessous résume les caractéristiques de ces différents électrolyseurs.

Implantation	Fabricant	Année d'installation	Production d'hydrogène (Nm ³ /h)
Colombie Britannique, Canada	Cominco	1939	17000
Nangal, Inde	De Nora	1958	26000
Assouan, Egypte	Demag	1960 / 1977	41000 / 21600
Rjukan, Norvège	Norsk Hydro	1927 / 1965	90000
Cuzco, Pérou	Lurgi	1958	5000

Tableau III.2.1 : principales installations d'hydrogène à forte capacité en service en 1975.

Depuis les années 60, le champ d'application de l'électrolyse s'est élargi, incitant les industriels et la recherche à développer des technologies innovantes.

III.2.1.2 Matières premières

L'électrolyse est réalisée généralement à partir d'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 solutions de soude, car :

- pour une température donnée, leur conductivité est supérieure à celle des solutions de soude.
- elles ont en général une teneur plus faible en impureté chlorure liée à la fabrication de l'hydroxyde.
- leur pression de vapeur saturante est inférieure pour une même température, ce qui permet de réduire le débit d'eau de réfrigération destinée à condenser la vapeur entraînée par l'hydrogène [12].

III.2.1.2.1 Qualité de l'eau d'alimentation

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

- formation de boues.
- action des chlorures (les halogénures en général) 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. On souhaite obtenir une résistivité électrique supérieure à $2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (soit $2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$) [12].

III.2.1.2.2 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 (§ 3.4).

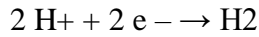
Il est souhaitable d'éviter les renouvellements trop fréquents de la solution d'hydroxyde.

III.2.1.3 Aspects théoriques de l'électrolyse de l'eau

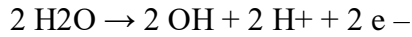
III.2.1.3.1 Thermodynamique

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

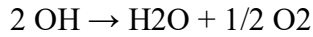
- à la cathode :



- à l'anode :

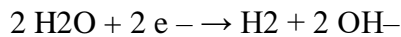


Puis :

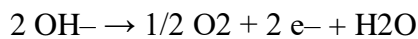


■ En solution alcaline, par contre, les ions OH⁻ prédominent et le phénomène est habituellement exprimé par :

- à la cathode :



- à l'anode :



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



Avec ΔH = 285 kJ/mol H₂O enthalpie de dissociation de l'eau.

■ Par ailleurs, l'équation de Nernst exprime la tension de décomposition réversible sous la forme :

$$E_{\text{rev}} = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{1/2}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \dots\dots\dots \text{(III.1)}$$

Avec :

R constante molaire des gaz (= 8,314 4 J · mol⁻¹ · K⁻¹),

T (K) température thermodynamique,

F constante de Faraday (= 96 487 C · mol⁻¹),

E₀ (V) tension de décomposition réversible dans les conditions normales (0°C, pression atmosphérique)

P_{H₂} = P_{O₂} = P (Pa) Pression de service de l'électrolyseur,

a_{H_2O} Activité de la solution.

D'où : $E = E_{rev} + \eta_a + \eta_c + RJ$ (III.2)

Cette tension de décomposition réversible s'établit à 1,229 V dans les conditions normales. À température ambiante (2°C), on a (1):

$$E_{rev} = 1,233 + 0,0435 \lg P$$

Un accroissement de pression augmente la tension de décomposition réversible, mais, en pratique, le fonctionnement irréversible des électrolyseurs industriels a pour effet de réduire la tension de cellule effective à densité de courant et température constantes lorsque la pression augmente.

■ La tension thermo-neutre correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle s'exprime par :

$$E_{rev} = E_0 + \frac{3RT}{4F} \ln P - \frac{RT}{2F} \ln a_{H_2O}$$
 (III.3)

Cette tension ne dépend que faiblement de la température. Un accroissement de température entraîne par contre une diminution de la tension de décomposition réversible. Cette diminution se répercute aux bornes de l'électrolyseur où l'on peut, en général, constater un gain de 2 à 5 mV/°C.

III.2.1.3.2 Cinétique

La tension de cellule réelle d'un électrolyseur s'exprime en fonction de quatre termes :

Avec : $E_{th} = \frac{\Delta H}{2F} = 1,48 \text{ V (à 298 K)}$ (III.4)

η_a (V) surtension anodique,

η_c (V) surtension cathodique,

R ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) résistance globale (chute ohmique du diaphragme, épaisseur des compartiments, effet d'écran des bulles),

J (A/cm²) densité de courant.

La figure 2 présente un exemple de répartition de la tension en fonction de la densité de courant.

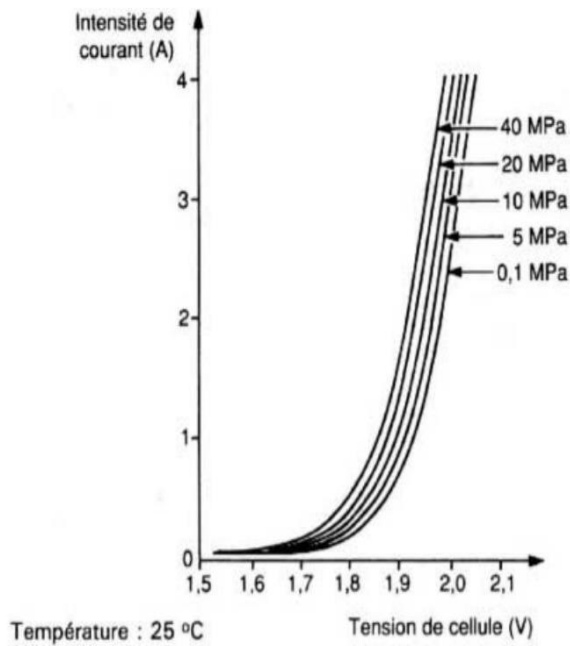


Figure III.2.1. Influence de la pression sur les caractéristiques de fonctionnement de l'électrolyseur

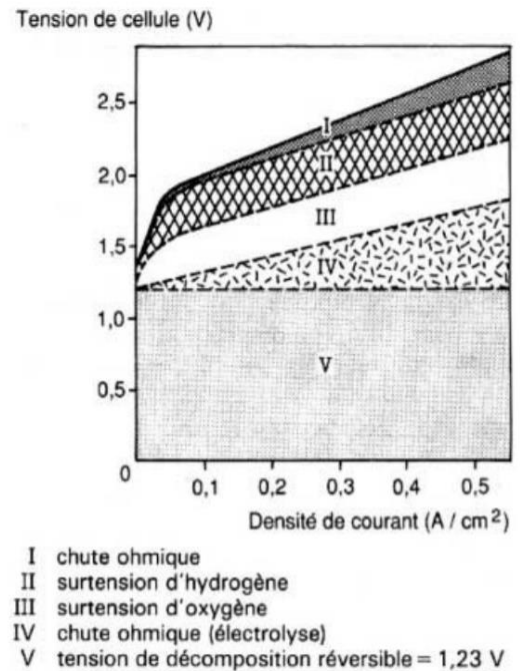
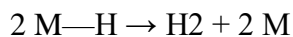
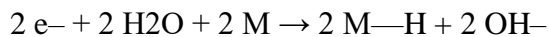


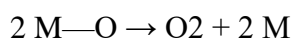
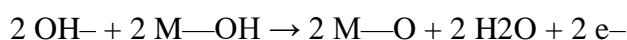
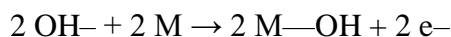
Figure III.2.2. Exemple de décomposition d'une courbe caractéristique tension-densité de courant pour une cellule d'électrolyse de l'eau

Les dégagements d'hydrogène et d'oxygène aux électrodes se trouvent plus ou moins facilités par l'action catalytique de la surface de l'électrode. Dans un électrolyseur comportant une solution alcaline, la réaction cathodique sur support métallique s'effectue suivant un processus à deux étapes de la forme :



Où M désigne un atome métallique de la surface.

Différentes hypothèses ont été émises concernant le processus de réaction anodique. La plus probable serait :



La turbulence engendrée par les bulles qui se dégagent et la concentration élevée de l'électrolyte évitent la polarisation de concentration. Les surtensions suivent la loi de Tafel et la tension de cellule s'exprime en fonction de la densité de courant par :

$$E = a + b \lg J + cJ$$

L'emploi de la méthode de l'interrupteur permet de déterminer les coefficients a, b et c pour une cellule d'électrolyse définie (géométrie, électrolyte, écoulements, matériaux, température, pression) par une régression linéaire portant sur la variable J.

Les surtensions anodique et cathodique d'électrodes activées (η_a et η_c) obéissent à une loi du type :

$$\eta = A + B \lg J$$

Par exemple : $\eta_a = 0,242 + 0,064 2 \lg J$

$$\eta_c = 0,080 + 0,061 3 \lg J$$

Avec η_a et η_c exprimés en V,

J exprimée en kA/m².

L'énergie Totale nécessaire pour effectuer cette réaction est égale à la variation d'enthalpie ΔH qui est équivalente à la somme de la variation d'énergie libre ΔG et le produit de la variation de l'entropie ΔS par la température de l'eau T:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \dots\dots\dots (III.5)$$

Avec : ΔH représente l'enthalpie de la réaction

ΔG représente l'enthalpie libre de la réaction

ΔS représente l'entropie de la réaction

Ou le terme $T \times \Delta S$ représente l'énergie thermique qui est dans ce cas la, assuré par la source géothermale, et ΔG représente l'apport en énergie électrique.

$$\Delta H_{TP} = \Delta G_{TP} + T \Delta S_{TP} \dots\dots\dots (III.6)$$

$T_{ref} = 298,15 \text{ K}$; $P_{ref} = 0.1 \text{ MPa}$;

Les variations d'enthalpie et d'entropie de l'équation et le potentiel de Nernst sont calculées par la relation suivant :

$$\begin{cases} \Delta H(T) = \Delta H_{298,15^\circ K}^\circ + \int_{298,15^\circ K}^T \Delta C_P dT \\ \Delta S(T) = S_{298,15^\circ K}^\circ + \int_{298,15^\circ K}^T \frac{\Delta C_P}{T} dT \dots\dots\dots (III.7) \\ E(T) = -\frac{\Delta G(T)}{nF} \end{cases}$$

Le Potentiel de Nernst a la température T, est considéré sous la pression standard pour les réactants et les produits. Le tableau suivant (n°3-4) donne les paramètres thermodynamique standard pour T=298,15 °K et P=101,325 Kpascale.

Composant	$\Delta G^\circ \left(\frac{KJ}{mo}\right)$	$\Delta H^\circ \left(\frac{kJ}{mol}\right)$	$S^\circ \left(\frac{kJ}{mol \cdot K}\right)$	$Lv^\circ \left(\frac{kJ}{mol}\right)$	Chaleur spécifique (Cp) (J /mol/k)
H2	0	0	0,131	-	27,28+0,00326T+5000/T ²
O2	0	0	0,205	-	29,96+0,00418T-16700/T ²
H2O	237,2	285,8	0,07	40,7	75,44
H2O	-	-	-	-	30,00+0,01071T+3300/T ²

Tableau III.2.2. Paramètres thermodynamique standard

Les paramètres thermodynamiques pour la plage de température de 298,15 °K au 373°K sont calculé selon les équations (voir **Tableau suivant (3-2)**, et sont représenté dans la figure **Fig (3-10)**.

Température °C	ΔH (KJ/Mole)	ΔS (J/mole, °K)	ΔG (KJ/Mole)	$T^* \Delta S$ (kJ/mole, °K)	Le rapport $\Delta G / \Delta H$ (%)	Le rapport $T^* \Delta S / \Delta H$ (%)
25	285,800	212,775	222,361	63,439	77,80%	22,20%
30	284,777	209,570	221,245	63,531	77,69%	22,31%
35	283,842	206,410	220,237	63,605	77,59%	22,41%
40	282,900	203,310	219,233	63,667	77,50%	22,50%
45	281,960	200,265	218,246	63,714	77,40%	22,60%
50	281,023	197,275	217,274	63,749	77,32%	22,68%
60	279,133	191,465	215,347	63,787	77,15%	22,85%
70	277,245	185,850	213,470	63,774	77,00%	23,00%
80	275,358	180,440	211,636	63,722	76,86%	23,14%
90	273,459	175,185	209,840	63,618	76,74%	23,26%
100	271,560	170,090	208,091	63,469	76,63%	23,37%

Tableau III.2.3. Valeurs de ΔH ; ΔS ; ΔG en fonction de la température

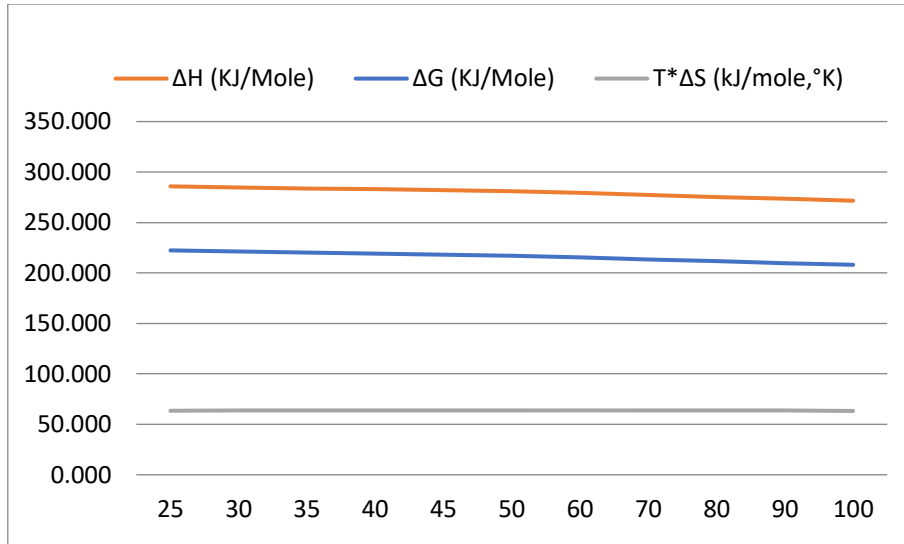


Figure III.2.3. Courbe de Δ H ; Δ S ; Δ G en fonction de la température

Dans les conditions réversibles, il existe une relation d'équivalence entre l'énergie électrique **W** absorbée par la cellule d'électrolyse et la variation d'énergie libre **ΔG**.

L'énergie électrique **W** est liée à la tension minimale réversible d'électrolyse **UR** par la relation : $W = n. F. UR$ (III.8)

n : nombre d'électrons mis en jeu (= 2)

F : constante de Faraday (= 96487 C/ mole = 26.8 Ah/mole).

L'équivalence avec l'enthalpie libre **ΔG** permet d'écrire : $\Delta G = n. F. UR$ (III.9)

Ce qui donne l'expression de la tension minimale réversible exprimée comme suit :

$$UR = - \Delta G / n * F$$

La tension thermomètre (**E_{th}**) correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur.

Cette tension ne dépend que faiblement de la température. Elle est donnée par la formule

$$E_{th} = \Delta H^\circ / n f$$
 (III.10)

Température °C	UR (v)	U _{th} (v)
25	-1,152	-1,481
30	-1,147	-1,476
35	-1,141	-1,471
40	-1,136	-1,466
45	-1,131	-1,461
50	-1,126	-1,456
60	-1,116	-1,446
70	-1,106	-1,437
80	-1,097	-1,427
90	-1,087	-1,417
100	-1,078	-1,407

Tableau III.2.4. Tension thermometre et tension réversible en fonction de la température.

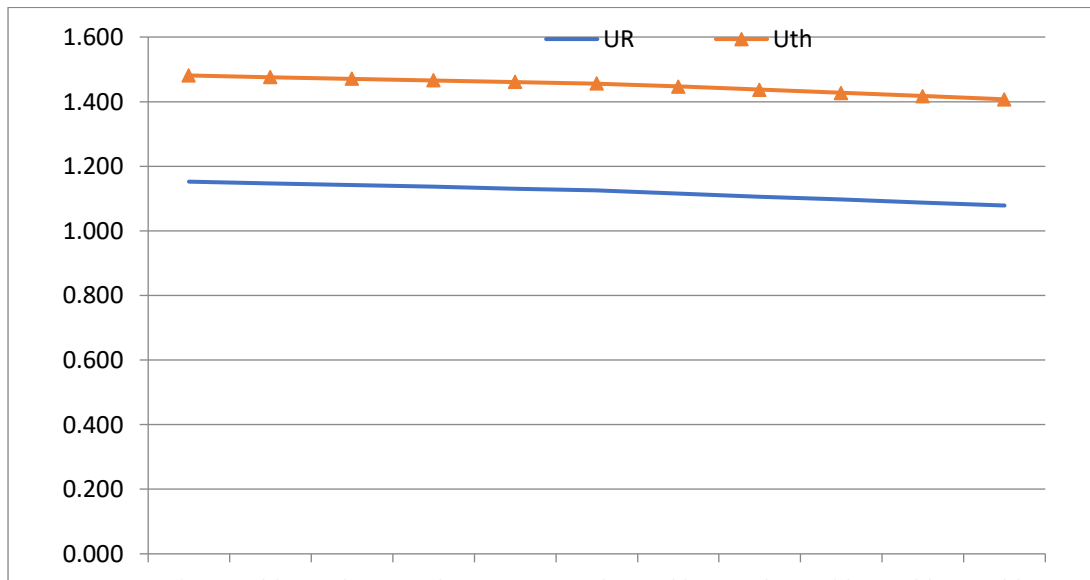


Figure III.2.4. Tension thermo neutre Uth et la tension minimale réversible UR en fonction la température

III.2.1.3.3 Conséquences pratiques

Sept facteurs doivent être optimisés afin d'obtenir la tension de cellule la plus basse possible pour une densité de courant donnée :

- le choix judicieux du matériau constituant les électrodes, permettant de réduire les pertes par surtension (activité électro-catalytique) tout en offrant une résistance suffisante à la corrosion ;
- la température maximale de fonctionnement résultant d'un compromis entre la réduction des surtensions et la tenue à la corrosion des matériaux employés ;
- la concentration de l'électrolyte, définie par l'optimum de conductivité à la température considérée ;
- la circulation rapide de l'électrolyte permettant d'éviter les écarts de concentration entre les compartiments anodique et cathodique, d'une part ; de favoriser l'évacuation de la chaleur

dégagée par effet Joule en réduisant l'écart de température entre l'entrée et la sortie de la cellule d'électrolyse, d'autre part ;

- certaines formes géométriques d'électrodes facilitant mieux que d'autres l'élimination rapide hors du champ électrique des bulles formées.
- l'emploi d'électrodes divisées (métaux frittés) réduisant les surtensions par un accroissement local de la surface active ;
- le diaphragme : il doit introduire le moins possible de chute ohmique, d'où le choix d'une faible épaisseur, d'une porosité élevée, d'un faible diamètre moyen des pores ($< 1 \mu\text{m}$).

III.2.1.4 Matériaux

III.2.1.4.1 Matériaux de structure

Les premiers appareils industriels travaillaient en milieu acide (acide sulfurique) et utilisaient le plomb comme matériau conducteur pour les électrodes et les tuyauteries. Or les problèmes de corrosion des électrodes ont rapidement conduit tous les constructeurs à employer des solutions alcalines.

Les aciers austénitiques à 18 % de chrome et 10 % de nickel conviennent pour des températures de fonctionnement inférieures à 90°C. Entre 90 et 120°C, l'emploi du Monel Alloy 400 ou d'aciers austénitiques à 25 % de chrome et 20 % de nickel devient nécessaire. Au-delà de 120°C, le Nickel 200 ou 201 demeure la seule alternative.

Les étanchéités et l'isolement des cellules les unes des autres nécessitent l'emploi de matériaux isolants compatibles avec le milieu basique. Les matériaux en usage sont le polysulfone jusqu'à 120° et les résines fluorées (PTFE, FEP, PFA) aux températures supérieures. Certains joints à base d'amiante et d'élastomères sont employés afin d'introduire un peu d'élasticité [12].

III.2.1.4.2 Cathodes

La protection cathodique et le milieu basique limitent les problèmes de corrosion de la cathode. Ainsi, le fer (acier doux) se trouve dans une de ses zones de passivité et peut être employé jusqu'à 100°C.

La recherche d'une surtension cathodique plus faible conduit à activer la cathode par formation d'un dépôt de surface à action catalytique :

- le nickel-soufre continue à être employé sur certains appareils industriels (Norsk-Hydro) (figure3) ; il s'obtient par dépôt électrolytique dans des bains comportant par exemple des sulfates de nickel et d'ammonium, du citrate de sodium [13], du citrate de sodium ou du sulfate de nickel et de la thio-urée (Norsk-Hydro) [14]. D'autres compositions de bains ont été proposées [15] [16] [17] (cette activation ne supporte pas une température de fonctionnement supérieure à 80-90°C).
- le nickel de Raney, obtenu par attaque d'une solution basique d'un alliage nickel-aluminium, n'est pas exploité actuellement [il semblerait que l'apport d'un additif (titane, molybdène) à l'état de traces augmenterait la durée de vie pour un usage de cathode].
- l'alliage nickel-zinc est employé par Bamag : il peut être obtenu par dépôt électrolytique dans un bain de sulfates de nickel et de zinc, de chlorure d'ammonium, d'acétate de sodium et d'acide borique [18] (d'autres compositions de bain ont été proposées [19]).
- les alliages binaires ou ternaires de nickel ;
- divers alliages à base de fer, de cobalt, de tungstène, de molybdène, de sélénium, de tellure, d'arsenic, d'antimoine et de vanadium sont cités comme un moyen d'activation des cathodes. L'emploi de sels insolubles de molybdates de nickel [20] a fait l'objet d'un développement récent par les Ateliers et Chantiers de Bretagne. Un revêtement d'alliage nickel-molybdène-vanadium a également été proposé [21].

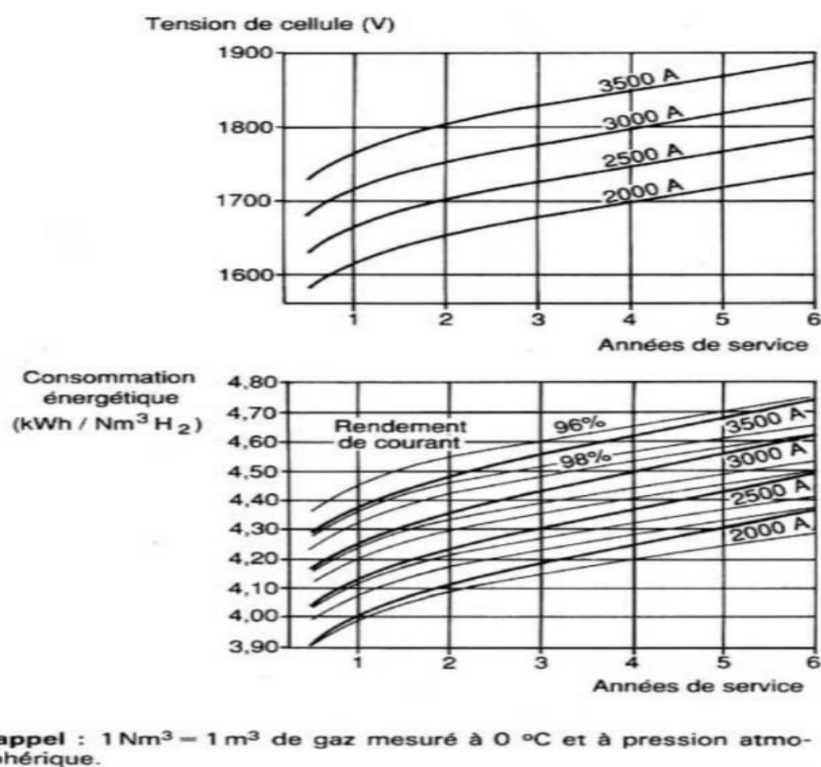


Figure III.2.5. Évolution des performances, en fonction du temps, d'un électrolyseur industriel avec activation nickel-soufre

III.2.1.4.3 Anodes

Les anodes sont constituées d'acier nickelé pour une température de fonctionnement inférieure à 90°C, et de nickel massif au-delà.

Le dépôt catalytique des anodes reste l'objet de nombreuses recherches et la stabilité dans le temps demeure encore aujourd'hui un point délicat :

- le dépôt galvanique de nickel-soufre en bain de sulfate de nickel et de thiosulfate de sodium est employé par Norsk-Hydro [22] jusqu'à 80°C.
- les oxydes mixtes semi-conducteurs font l'objet d'un développement récent pour les températures supérieures à 100°C ; une activation anodique à base de pérovskite $LaxSr_{1-x}CoO_3$ fixée à l'électrode par un liant à base de résine fluorée a été proposée [23].
- des revêtements de nickel ou de nickel-fer ont été étudiés [24].

III.2.1.4.4 Diaphragmes

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 inférieur à 1 µm. Il est nécessairement constitué d'un matériau hydrophile.

Un matériau conducteur (nickel fritté, toile métallique) peut être utilisé sous réserve que la chute ohmique inhérente au passage du courant entre ses deux faces demeure inférieure à 1,23 V de façon à éviter une électrolyse secondaire sur chaque face. On peut utiliser une feuille de nickel de faible épaisseur (0,1 mm) munie de trous carrés (2 000 trous/m²). Ces diaphragmes doivent être isolés des électrodes par des entretoises (grillages isolants par exemple) afin d'éviter les courts-circuits internes créés par des déformations sous l'effet de variations de pression instantanées.

Afin d'éviter ces problèmes d'isolation, on emploie de préférence des matériaux isolants. Le matériau le plus utilisé est l'amiante blanc (variété chrysotile) sous forme de carton (Lurgi) ou de toile (SRTI, Bamag) dont la température maximale d'emploi fut longtemps limitée à 90°C.

L'analyse des solutions de potasse permet de détecter des traces de silicate [25] [26] [27] [28].

Il se produit dans la solution de potasse un équilibre chimique entre les ions silicates et le chrysotile [29], ce qui a pour effet de limiter la corrosion de ce dernier.

Il est donc recommandé, pour les électrolyseurs opérant à température inférieure à 90°C, d'éviter le renouvellement de l'électrolyte et, pour un fonctionnement à température supérieure, d'introduire le silicate nécessaire à l'équilibre dès le remplissage. La concentration d'équilibre en fonction de la température est donnée sur la figure 4.

La structure des toiles d'amiante est variable ; on recherche un tissu très serré qui conserve une faible épaisseur, par exemple des toiles renforcées par des fils de nickel. Le diaphragme d'amiante convient aujourd'hui aux conditions opératoires d'exploitation. La recherche de meilleures performances par un accroissement de la température de fonctionnement d'une part, les problèmes posés par l'apparition de cancers liés à l'emploi de l'amiante d'autre part, laissent penser qu'un matériau de substitution devra être mis en œuvre dans le futur. La zircon, dont les tests de corrosion en autoclave ont donné satisfaction jusqu'à 200 °C, pourrait sans doute convenir si le coût des tissus baissait.

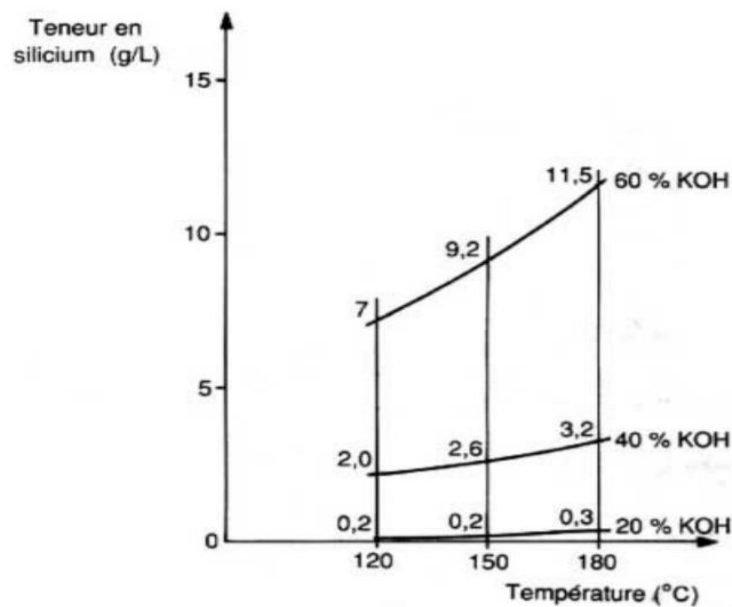


Figure III.2.6. Concentration d'équilibre du silicate dans la solution de potasse (en g de Si par litre) en fonction de la température d'après [30]

III.2.1.5 Conception des appareils industriels

III.2.1.5.1 Structures mono-polaire et bipolaire

Les premiers appareils d'électrolyse disposaient d'électrodes mono-polaires (figure 5) : chaque anode est connectée au pôle plus, chaque cathode au pôle moins. Cette disposition conduit à utiliser des transfo-redresseurs 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 6) : 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, à l'exception de ceux de Noranda (Canada) qui semble attaché à la structure mono polaire héritée de Cominco. 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.

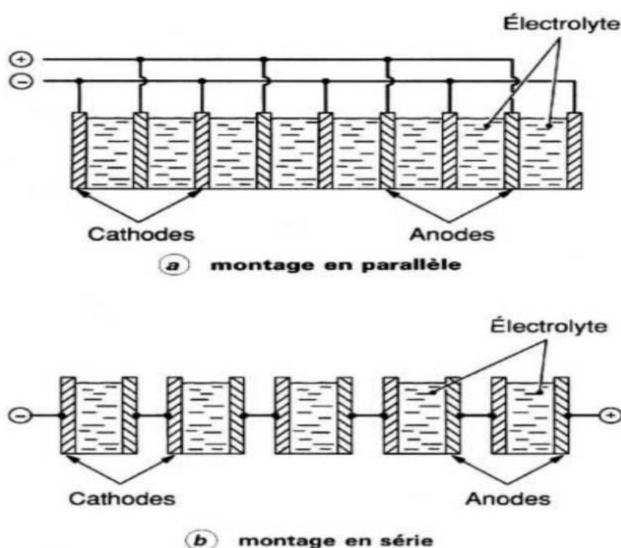


Figure III.2.8. Electrolyseur à électrodes bipolaires

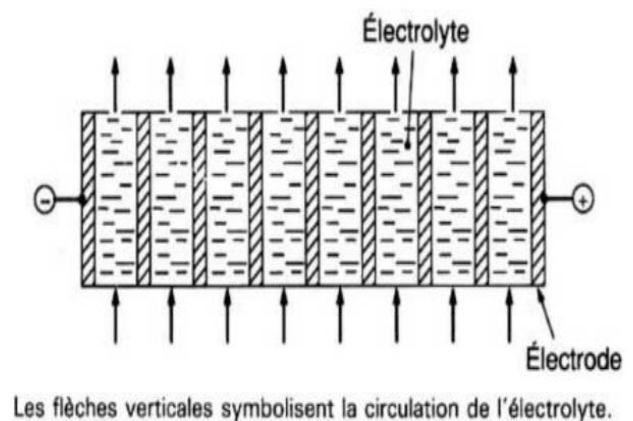


Figure III.2.7. Electrolyseur à électrodes mono-polaires

III.2.1.5.2 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/Nm³ 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.

III.2.1.5.3 Équilibrage des débits et courants dérivés

Afin de maintenir un écart de température constant entrée-sortie entre toutes les cellules, il est indispensable d'assurer une répartition équilibrée du débit d'électrolyte entre plusieurs dizaines de cellules. Le dispositif employé est un ajutage disposé à l'entrée des cellules sur l'écoulement monophasique d'électrolyte. Cette restriction imposée à l'écoulement introduit localement une perte de charge comprise entre 0,05 et 0,1 MPa, qui compense les fluctuations des pertes de charge en aval, liées à l'écoulement diphasique.

L'ajutage de sortie résulte d'un compromis défini par l'expérimentation. Il doit être de dimension plus importante que celui d'entrée : au débit d'électrolyte s'ajoute le débit de bulles d'hydrogène (ou d'oxygène). Cet écoulement diphasique est instable (tout particulièrement en électrolyse sous pression) : à débit volumique constant, la variation du taux de vide dans le capillaire de sortie de chaque cellule modifie instantanément et très sensiblement la perte de charge locale. À chaque instant, cette proportion gaz-liquide fluctue entre les différents canaux de sortie : des écarts de pression différentielle se manifestent entre tous les compartiments de l'empilement de cellules. S'ils ne sont pas maîtrisés, ils génèrent des mélanges anolyte-catholyte au travers du diaphragme aux conséquences parfois néfastes.

Lorsque le paquet de cellules est connecté en série, la différence de potentiel entre la première et la dernière cellule atteint parfois 600 V. Les canaux d'entrée et de sortie constituent des sources de courants dérivés entre les cellules. Le courant qui pénètre dans

l'électrolyseur diminue progressivement d'une cellule à la suivante du fait de ce shuntage externe jusqu'au milieu de l'empilement, puis se remet à croître jusqu'à sa valeur initiale en atteignant l'extrémité opposée. Ces courants dérivés sont une source de perte d'efficacité pour l'électrolyseur (rendement faradique) : les cellules ne produisent pas la même quantité d'hydrogène. On limite les courants dérivés en réduisant les diamètres des canaux d'entrée-sortie et en accroissant leur longueur. Cette condition est commune à l'équilibrage des débits pour le capillaire d'entrée. Au niveau du canal de sortie, par contre, elle s'oppose aux conditions d'un bon écoulement diphasique. Toutefois, la conductivité moyenne de l'électrolyte se trouve localement réduite par la présence des bulles. Le rendement faradique se situe entre 95 et 98 % grâce à un compromis optimal entre la section et la longueur des canaux.

III.2.1.5.4 Appareils fonctionnant à pression atmosphérique

La majorité des appareils industriels (Demag, Bamag, Oerlikon, CJB, Norsk-Hydro, Noranda, De Nora) opèrent sous une pression voisine de la pression atmosphérique.

Chaque cellule comporte plusieurs cadres empilés (figure 7). L'ensemble des cellules est maintenu par des tirants externes pourvus de rondelles élastiques destinées à compenser les écarts de dilatation entre les tirants à température fixe et l'empilement de cellules à température variable.

Après sortie de leurs dégazeurs respectifs, l'anolyte et le catholyte sont refroidis et remélangés avant réintroduction dans le collecteur d'entrée des cellules d'électrolyse (figure 8). À la sortie de son séparateur, l'hydrogène est refroidi afin d'atteindre le point de rosée souhaité, subit une dévésiculation et passe sur un catalyseur de type Déoxo qui élimine les traces d'oxygène présentes par combustion. Une très grande pureté (> 99,99 % en volume) est alors atteinte.

III.2.1.5.5 Appareils fonctionnant sous pression

Sur ces appareils, l'étanchéité de l'empilement vis-à-vis de l'atmosphère devient critique et plusieurs solutions sont envisageables.

- On utilise l'empilement réalisé dans les appareils précédents mais chaque cellule est constituée d'une couronne circulaire dimensionnée pour maintenir la pression retenue. Cette

conception a été développée dans le seul électrolyseur industriel commercialisé actuellement: l'appareil Lurgi (figure 9). Afin de conserver l'étanchéité de l'empilement de cellules d'électrolyse, une température constante est nécessaire : les serpents de refroidissement d'électrolyte disposés dans les séparateurs d'hydrogène et d'oxygène permettent de réchauffer l'électrolyte par de la vapeur lors de l'interruption de l'électrolyse, mais la circulation doit être permanente.

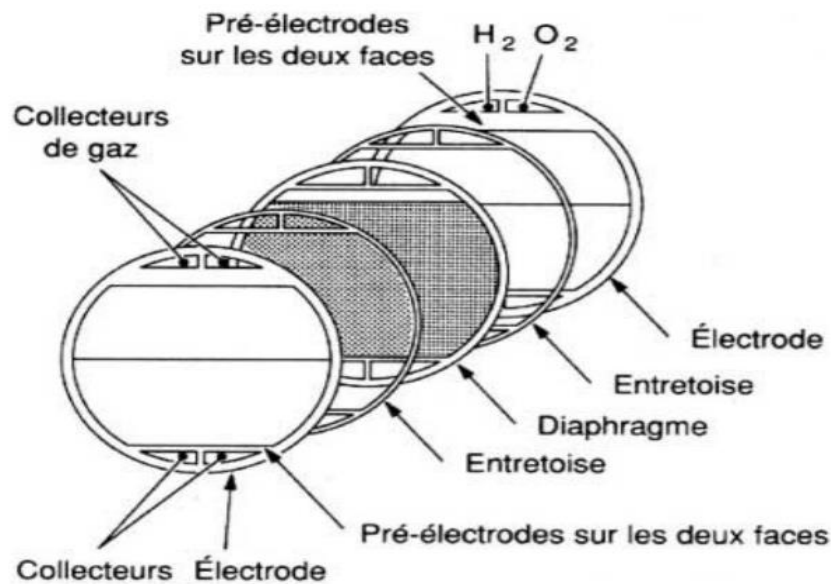


Figure III.2.9. Vue éclatée d'une cellule d'électrolyse

■ On sépare les fonctions de maintien de la pression et d'étanchéité interne des cellules. L'empilement est alors disposé dans une enceinte de pressurisation et trois pressions doivent être maintenues très voisines : anolyte, catholyte, fluide de confinement. Le choix de ce fluide de confinement influe sur le système d'asservissement : - un gaz inerte (l'azote en général) est compressible et nécessite un réglage fin de la pression ; -un liquide permet le contact direct avec l'hydrogène, l'oxygène ou l'électrolyte au moyen d'une colonne de liquide définissant précisément les pressions différentielles entre anolyte, catholyte et fluide de confinement. Ce peut être l'eau désionisée d'alimentation (appareil CJB) ou une huile isolante inerte compatible et non miscible avec l'électrolyte.

Lorsque l'empilement de cellules est constitué de couronnes circulaires maintenant la pression, les collecteurs d'entrée-sortie sont composés de manchons vissés sur les électrodes

ou les diaphragmes. Les circuits d'anolyte et de catholyte peuvent alors être totalement séparés, la compensation des écarts de concentration s'effectue partiellement par diffusion au travers du diaphragme (SRTI) au détriment de la tension de cellule.

L'électrolyseur Lurgi présente par contre un seul collecteur d'entrée et un trou percé en partie basse des cellules permet de répartir l'électrolyte en anolyte et catholyte, tout en permettant un rééquilibrage rapide des pressions différentielles à l'intérieur des cellules.

L'équilibrage des pressions d'anolyte et de catholyte dans les collecteurs de sortie s'effectue au moyen de tubes en U, situés le long d'une génératrice inférieure des séparateurs d'hydrogène et d'oxygène, qui assurent le transfert de liquide nécessaire.

III.2.1.5.6 Évolution de la technologie

- L'électrolyse de l'eau en milieu alcalin profite d'une longue expérience. Son développement futur s'appuiera essentiellement sur la mise au point et le développement de nouveaux matériaux permettant un fonctionnement à plus haute température autorisant une densité de courant plus importante sous une tension de cellule sensiblement constante.

- L'électrolyse en milieu acide connaît une nouvelle jeunesse avec les travaux de la General Electric Company [31] sur les piles à combustibles. La principale caractéristique réside dans l'emploi d'une membrane cationique de type Nafion (polymère per fluoré d'acide sulfonique) et de catalyseurs à base de métaux précieux en cathode (noir de platine) et en anode. Actuellement, l'application industrielle porte sur la production de faibles quantités d'hydrogène très pur pour les laboratoires.

- L'électrolyse de la vapeur d'eau pourrait modifier totalement la technique : la tension de décomposition réversible chute de 1,23 V (à 25 °C) à 0,95 V (à 1 000°C). Le support constituant le diaphragme serait alors constitué d'un oxyde électrolyte solide (zircone stabilisée à l'oxyde d'yttrium par exemple), la cathode d'un dépôt de nickel fixé sur ce support et l'anode d'un dépôt d'oxyde mixte (oxyde d'indium stabilisé par de l'oxyde d'étain) [32].

III.3 Station de production de l'hydrogène de la centrale de CAP DJINET

III.3.1 Introduction

La station de production de l'hydrogène de la centrale de CAP DJINET est fournie par **Hydrogenics**, c'est un système à hydrogène tout en un comprenant 2 lignes à 100 % composées chacune de :

- Un électrolyseur d'eau HySTAT 15 d'une capacité de maximale de 15 Nm³/h d'hydrogène, d'une pureté jusqu'à 99,998 % et d'une pression de 10-20 bar.
- Un petit réservoir tampon intermédiaire
- Un compresseur installé sur châssis mobile pour augmenter la pression jusqu'à 160 bar

L'hydrogène est alimenté au départ du compresseur dans une station de remplissage où jusqu'à trois racks de 16 bouteilles de 50 l de H₂ peuvent être remplies simultanément.

L'ensemble HySTAT/compresseur est configuré par défaut pour être démarré manuellement par l'opérateur chaque fois que le remplissage des bouteilles de H₂ est jugé nécessaire [12].

III.3.2 GÉNÉRATEUR D'HYDROGÈNE

Le HySTAT est un électrolyseur alcalin d'eau. L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique qui sépare l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen de l'électricité. Il s'agit d'un procédé absolument sans émissions de carbone ou autres et il ne nécessite pas de pièces mécaniques mobiles. Lorsque l'électrode est soumise à un courant continu, la réaction électrochimique suivante se produit :

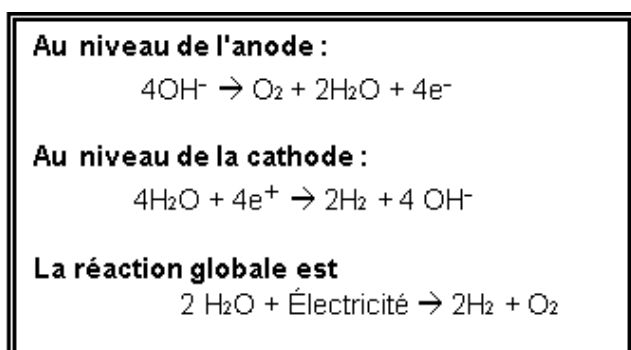
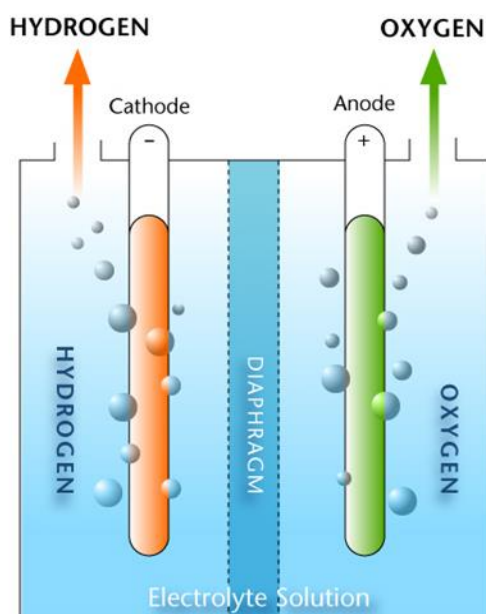


Figure III.3.1. Réaction électrochimique

III.3.2.1 Châssis mobile de procédé

Cet équipement est destiné à une installation à l'intérieur. La partie Procédé assurant la production d'H₂ est classée uniquement pour les zones II. La partie Procédé se présente sous forme de châssis entièrement assemblé prêt à être utilisé et facile à installer et comprend les équipements référencés ci-dessous :



Figure III.3.2. Châssis mobile de procédé HySTAT 15

• La pile de cellules

La pile de cellules par électrolyse sous pression est le composant principal du générateur d'hydrogène HySTAT. La pile de cellules se compose de cellules d'électrolyse circulaires, contenant chacune deux électrodes et une membrane d'échange ionique inorganique alcaline [12].

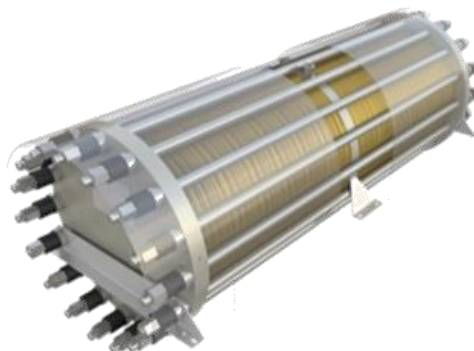


Figure III.3.3. La pile de cellules

- **Séparateurs gaz-liquide**

Les gaz produits dans la pile de cellules sont dirigés vers les séparateurs de gaz qui sont deux récipients sous pression en acier inoxydable conçus pour séparer l'H₂ et l'O₂ de la solution d'électrolyte [12].

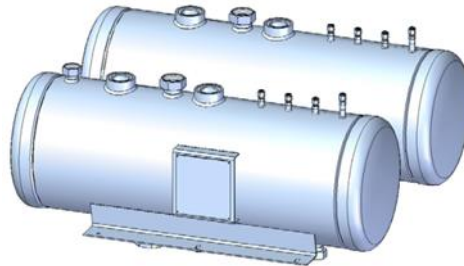


Figure III.3.4.
Séparateur gaz-liquide

- **Unité de rinçage des gaz : L'unité de rinçage lave les gaz restant dans le KOH.**



Figure III.3.5.
Rinceur

- **Filtre à coalescence avec échangeur thermique de refroidissement du gaz**

Afin de réduire la teneur en eau dans le gaz d'H₂ et d'O₂, le gaz passe dans un filtre à coalescence, où il est refroidi pour réduire le point de rosée par condensation. La condensation, sous forme d'eau, retournera dans le séparateur de gaz. En sortie du système, le gaz aura une pureté d'au moins 99,5 % [12].

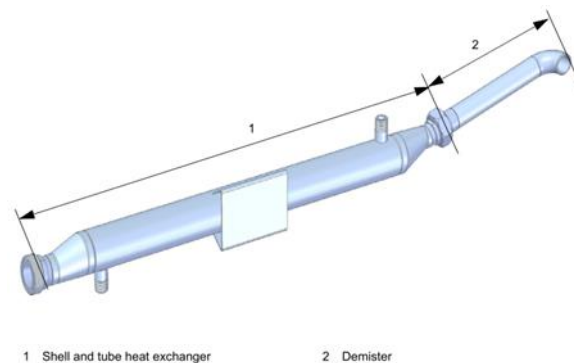


Figure III.3.6. Filtre à coalescence

- **Échangeurs thermiques pour électrolyte**

L'électrolyte est refroidi pour maintenir le procédé à une température optimale (environ 75 °C).



Figure III.3.7. Échangeur thermique de l'électrolyte

- **Panneau d'analyse d'hydrogène dans l'oxygène (HTO)**

Dans ce panneau, un capteur mesure le taux d'hydrogène dans l'oxygène. Une alarme est générée si la concentration maximale admissible d'hydrogène est détectée [12].

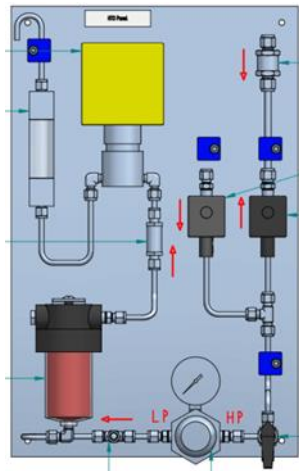


Figure III.3.8. Panneau HTO

- **Régulateur de contre-pression**

Le régulateur de contre-pression garantit les performances de l'unité en maintenant le générateur et le sécheur deoxo à une pression stable. Des variations dans la conduite utilisateur n'influencent pas sur la pression dans la partie Procédé [12].

- **Panneau de conductivité**

Ce panneau veille à ce que la pureté de l'eau entrant dans le système soit acceptable ($5,0 \mu\text{S}/\text{cm}$ (20°C) max). La qualité de l'eau est essentielle à la longévité du système [12].

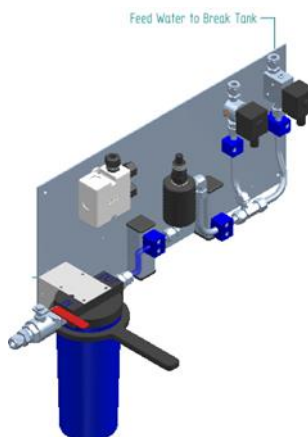


Figure III.3.9. Panneau de conductivité

- **Purge de N2 automatique**

Un système de conduites et d'électrovannes permet la purge d'azote à partir du tableau de commande sans intervention manuelle.

Ceci permet à la séquence de purge de N₂ dans le HySTAT et le sécheur DEOXO de s'effectuer automatiquement. La purge de l'azote est nécessaire avant de démarrer l'unité lorsque la pression interne est inférieure à 15kPa. L'API du système active dans l'ordre les différentes valves du système, assurant l'évacuation de tout l'air avant la production d'hydrogène.

- Instruments, détecteurs, capteurs, commutateurs, tuyauterie, valves et événements (H₂ et O₂).
- Réservoir tampon d'eau déminéralisée (25 l)

Le réservoir tampon d'eau déminéralisée est conçu pour fournir de l'eau déminéralisée pendant une heure et demie de fonctionnement à la capacité nominale de production conformément à la norme du fabricant.

Le réservoir tampon d'eau déminéralisée est raccordé à l'atmosphère.

Le volume est limité pour réduire la contamination atmosphérique en CO₂ dans l'eau déminéralisée.

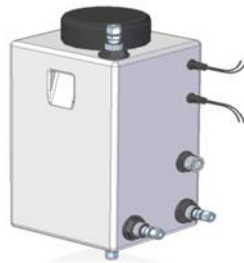


Figure III.3.10. Réservoir avec coupure d'air

- **Cuvette d'égouttage**

Cuvette d'égouttage permettant de récupérer la solution de KOH en cas de fuite du système, intégrant un détecteur de fuite déclenchant une alarme. La cuvette d'égouttage est placée sous le châssis mobile de procédé.

- **Dispositif de communication pour la commande et la surveillance à distance**

III.3.2.2 Sécheur Deoxo

Le sécheur Deoxo, intégré dans le châssis mobile de procédé HySTAT, est conçu pour améliorer la pureté de l'hydrogène à un niveau minimum de 99,998 % par absorption (tamis moléculaire) et régénération [12]. Cette pureté est atteinte en 2 étapes :

Étape 1 : Deoxo

La teneur en O₂ dans le flux d'H₂ gazeux est réduite par réaction catalytique. L'O₂ résiduel dans l'H₂ est inférieur à 2 ppm.

Étape 2 : séchage

Cette étape élimine l'humidité dans 2 tours de séchage. Une tour fonctionnera pendant que l'autre sera en mode veille/régénération. L'hydrogène produit aura un point de rosée atmosphérique inférieur à -75°C. Le point de rosée à la pression de remplissage (160 barg) sera inférieur à -36°C.

Le sécheur Deoxo est intégré dans le châssis mobile de procédé. Le sécheur Deoxo est contrôlé par l'API central dans le tableau de commande et comprend :

- Récipient Deoxo avec catalyseur pour éliminer l'H₂ dans l'O₂ (chauffé et isolé)
- Échangeur de chaleur
- Séparateurs d'humidité
- Système de pot de vidange pour l'évacuation de l'eau
- Instruments
- Deux tours de séchage remplies avec un tamis moléculaire (chauffé et isolé) (régénérées à intervalle, remplissage d'adsorption)
- Raccordements au circuit de refroidissement des gaz
- Raccordement aux événements de la partie Procédé (H₂ et O₂)



Figure III.3.11. Sécheur Deoxo

III.3.2.3 Mesure de pureté en ligne (OLP) avec logique de purge

L'H₂ produit est surveillé en continu et en temps réel sur le plan de la teneur en eau (point de rosée) et de la teneur en oxygène. La logique de purge évacuera automatiquement l'H₂ dans l'atmosphère si sa qualité n'est pas conforme aux spécifications tout en générant une alarme. Une fois que la qualité répond de nouveau aux spécifications, la valve à l'atmosphère se ferme et la valve de la conduite utilisateur s'ouvre [12].

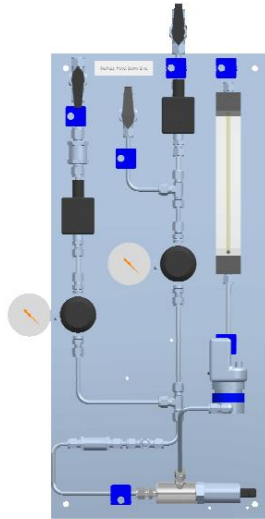


Figure III.3.12. Panneau Mesure de pureté en ligne

III.3.3 SYSTÈME DE REFROIDISSEMENT

Le système de refroidissement comprend deux parties. Ces deux boucles de refroidissement sont expliquées ci-dessous.

III.3.3.1 Refroidisseurs pour le refroidissement des gaz

Le refroidisseur fournit de l'eau de refroidissement basse température via un circuit fermé aux échangeurs de chaleur à une température de 15°C pour le refroidissement des gaz, indépendamment de la température ambiante.

L'hydrogène et l'oxygène gazeux produits par le HySTAT sont refroidis pour condenser la vapeur d'eau dégagée lors de l'électrolyse. Celle-ci est alors filtrée et éliminée du flux de gaz.

Les refroidisseurs sont refroidis par air, installés à l'extérieur sous abri et chaque refroidisseur comprend une pompe et un vase d'expansion [12].



Figure III.3.13. Refroidisseur de refroidissement des gaz

III.3.3.2 Refroidisseurs pour le refroidissement de l'électrolyte et du compresseur

Le refroidisseur fournit de l'eau de refroidissement via un circuit fermé aux échangeurs de chaleur à une température de 30°C pour le refroidissement de l'électrolyte et du compresseur, indépendamment de la température ambiante.

Les performances de la pile de cellules dépendent de la température de l'électrolyte. Cette dernière doit par conséquent être contrôlée et maintenue à environ 72 °C. Le compresseur a également besoin d'eau de refroidissement pour un fonctionnement normal.

Les refroidisseurs sont refroidis par air, installés à l'extérieur sous abri et chaque refroidisseur comprend une pompe et un vase d'expansion [12].



Figure III.3.14. Refroidisseur de refroidissement de l'électrolyte et du compresseur

III.3.4 RÉSERVOIR TAMPON

Un réservoir tampon d'un volume de 60 litres est installé entre le système d'hydrogène gazeux purifié et le compresseur. Selon les normes du fabricant du compresseur, le réservoir tampon a été dimensionné de manière à assurer entre 10 et 30 courses du compresseur. Il est fabriqué

en acier inoxydable et équipé d'un capteur de pression, d'une soupape de sécurité et de raccords de procédé. La pression de service est de 35 bar [12].



Figure III.3.15. Réservoir tampon

III.3.5 COMPRESSEUR

Pour atteindre une pression de stockage de 160 barg, un compresseur de type piston à deux étages est installé en aval du système d'électrolyse [12].

Le compresseur comprend :

- Valve retour mécanique pour le contrôle de la pression d'entrée
- Valves à double isolation pour les instruments, et collecteurs d'instrumentation de pression à 2 voies
- Un berceau permettant la manutention par chariot élévateur
- Instruments de la ligne principale de procédé : manomètre d'entrée/de sortie, interrupteur et transmetteur 4-20 mA.
- Soupape de sécurité entrée/sortie ; interrupteur de débit sur l'écoulement d'eau de refroidissement
- Tous les instruments nécessaires aux commandes internes (l'hydraulique en particulier)
- Filtration à l'entrée : filtre à particules x microns (le diamètre de pore sera déterminé par le fournisseur)
- Filtration à la sortie ; filtre à absorption d'huile et filtre à particules de 1 micron
- Échangeurs de chaleur pour refroidissement intermédiaire.
- Vanne ½" sur la conduite d'huile de fuite accessible sans obstacle
- Le point de sortie de la vanne/conduite d'huile de fuite doit permettre de placer une cuvette

- Orifice de remplissage d'huile libre de tout obstacle
- Vue dégagée de toutes les jauges visuelles et indicateurs de procédé
- Toutes les vannes manuelles, régulateurs et autres appareils concernés : positionnement et orientation ne présentant aucun obstacle à la vue ni à l'accès
- Boucle de circulation du gaz avec régulateur fermé
- Le châssis sera utilisé pour les opérations de levage
- Cuvette de collecte d'huile sous la totalité du circuit hydraulique, capable de recueillir le volume total d'huile.



Figure III.3.16. Compresseur à piston double effet

III.3.6 POSTE DE REMPLISSAGE DES BOUTEILLES

Afin de remplir les racks de bouteilles pour le transport de l'hydrogène produit vers le site requis, il existe un poste de remplissage des bouteilles/racks. Le système est composé de conduites, valves, raccords en acier inoxydable SS316L et est équipé de 3 points de remplissage adaptés au remplissage simultané [12].

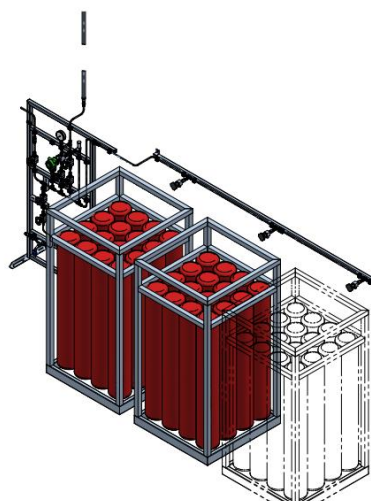


Figure III.3.17. Poste de remplissage des bouteilles

III.3.7 POMPE À VIDE

Deux pompes à vide sont fournies. La pompe à vide garantira que les nouvelles bouteilles sont propres de tout autre gaz en faisant le vide avant le remplissage des bouteilles avec de l'hydrogène.

La pompe est de type rotative lubrifiée par huile avec une capacité nominale de 40 m³/h et permettant d'atteindre un vide de 50 millibars dans les bouteilles [12].

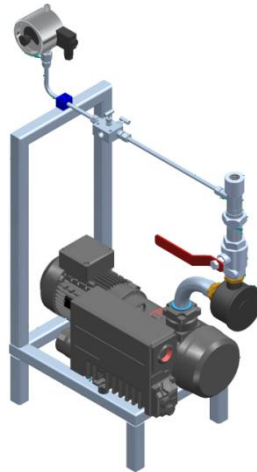


Figure III.3.18. Pompe à vide

III.3.8 POSTE D'AZOTE

La purge à l'aide d'un gaz inerte, généralement de l'azote, est nécessaire chaque fois que le système n'est pas sous pression, un poste de purge à l'azote complet comprenant toutes les vannes et la tuyauterie est raccordé à quatre bouteilles d'azote de 50 l et intègre un régulateur, des jauges, des tuyaux de 6 mm et des raccords [12].

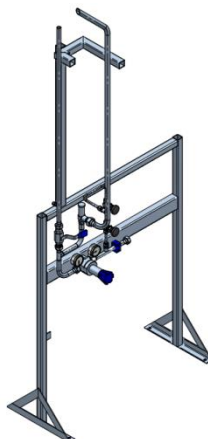


Figure III.3.19 Collecteur d'azote

III.3.9. TABLEAUX ÉLECTRIQUES ET DE COMMANDE

Les tableaux suivants sont inclus :

- Un coffret MCC

Ce tableau distribue l'électricité aux sous-systèmes.

- Un tableau de commande principal avec API redondant

Ce tableau de commande accueille les systèmes de commande globaux redondants des deux flux.

- Deux tableaux de commande avec API redondant

Ces tableaux de commande accueillent les systèmes de commande globaux redondants des électrolyseurs (un chacun).

- Deux racks d'alimentation pour électrolyseur

Ce tableau assure la conversion CA/CC pour l'alimentation électrique des électrolyseurs (un chacun).

- Deux tableaux de commande pour les compresseurs

Ces tableaux de commande accueillent les systèmes de commande et l'alimentation des compresseurs (un chacun) [12].

III.3.10 AUTRES ÉQUIPEMENTS

III.3.10.1 HTA (hydrogène vers atmosphère)

Capteur mesurant la teneur en hydrogène dans l'air. Une alarme est générée lorsque de l'hydrogène est détecté. Cet équipement revêt une importance critique quant à la philosophie de sécurité de l'installation [12].

III.4 Dimensionnement de capacité de la station H2 nécessaire pour le refroidissement des alternateurs de la centrale CAP DJINET

L'objet de ce calcul est de déterminer la production et la capacité de stockage d'hydrogène pour le refroidissement des 3 alternateurs de la centrale électrique de CAP DJINET.

Alternateur type sgen5-2000H

Les alternateurs de la centrale sont fournis par le constructeur SIEMENS AG de type Sgen5-2000H, les données nominales chaque alternateur sont :

- Système électrique : Triphasé
- Fonctionnement: Continu
- Puissance apparente: [431] MVA a [34] °C
- Tension nominale entre phases: [22] KV.
- Facteur de puissance a la puissance apparente : $\cos \phi = 0.9$
- Variation de tension pour la puissance apparente : ± 7.5
- Fréquence nominale : 50 HZ
- Rapport de court-circuit: 0.5
- Classe d'isolation selon recommandations CEI :
- * Stator: F
- * Rotor: F

Critères de conception pour la station d'hydrogène :

La capacité de l'installation de production d'hydrogène est calculée en fonction de la demande maximale entre deux conditions suivantes (donnés par le fournisseur):

1) Fonctionnement normal :

- Taux de fuite d'hydrogène des alternateurs par jour.

2) Durée de mise en service :

- Volume de remplissage de Trois (3) alternateurs jusqu'à la pression requise (en tenant compte de la durée de production d'hydrogène de 30 jours).
- Huit (8) heures maximums de fonctionnement journalier de la station de production d'hydrogène

La capacité calculée pour le stockage d'hydrogène sera le double des besoins en hydrogène pour l'élimination de gaz inerte du logement de l'alternateur, et pour le remplissage de l'alternateur à la pression d'exploitation et La pression de remplissage du cylindre d'hydrogène sera de 150 bar(g).

Calcul de capacité de la station h2 :

Donnée d'entrée :

- Nombre de générateurs (n) = 3
- Taux de fuite d'hydrogène par générateur (contrôlé) = 18 Nm³ / jour
- Taux de fuite d'hydrogène par générateur (non contrôlé) = 12 Nm³ / jour
- Pertes totales d'hydrogène par générateur (A) = 30 Nm³ / jour
- Volume générateur (V) = 90 m³
- Pression requise d'hydrogène (P) = 5 bar (g)

Equations utilisées :

Cas 1 : Fonctionnement normal : $n * A / 8$

Cas 2. Durée de mise en service : $(n * B / 30) / 8$

Avec : n = nombre de générateurs

A = Pertes totales d'hydrogène par générateur

B = Nécessité d'un remplissage d'un seul générateur

- Nécessité d'un remplissage d'un seul générateur (B) = $V_1 + V_2$
- Hydrogène requis pour l'élimination du gaz inerte (V_1) = $2,5 * V$
- Hydrogène nécessaire pour remplir le générateur à la pression requise (V_2) = $P * V$

Volume de gaz stocké par bouteille : $p_1 * v_1 = p_2 * v_2$

Avec : p_1 = Pression du gaz comprimé dans la bouteille en bar

v_1 = Volume d'eau interne du cylindre en m³

p_2 = Pression atmosphérique en bar

v_2 = Volume de gaz à la pression p_2 en m³

Besoin de stockage d'hydrogène = $2 * (V_1 + V_2)$

Résultats :

Hydrogène requis pour l'élimination du gaz inerte (V_1) = $2,5 * 90 \text{ m}^3 = 225 \text{ Nm}^3$

Hydrogène nécessaire pour remplir le générateur à la pression requise (V_2) = $5 \text{ bar} * 90 \text{ m}^3 = 450 \text{ Nm}^3$

Nécessité d'un remplissage d'un seul générateur (B) = $225 + 450 = 675 \text{ Nm}^3$

Capacité du générateur d'hydrogène : 1er Cas = $3 \cdot 30 / 8 = 11.25 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

2eme Cas = $(3 \cdot 675 / 30) / 8 = 8.43 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

Capacité de chaque système en considérant le cas le plus défavorable (cas 1) = $11.25 \text{ Nm}^3 / \text{h}$

Capacité sélectionnée = $11,25 \text{ Nm}^3 / \text{h} \times 2 \text{ système} (2 \times 100\%)$

Tableau de résultats pour différente heurs de fonctionnement :

Temps de fonctionnement de la station H2 (heurs/jour)	Capacité de la station selon les deux cas:	
	compensation des fuites journalières (Nm^3 / h)	remplissage & pressurisation à la pression 5 bar (Nm^3 / h)
8	11.25	8.4375
10	9	6.75
12	7.5	5.625
14	6.4	4.821
16	5.62	4.21875
18	5	3.75
24	3.75	2.8125

Tableau III.4.1 : Capacité de la station selon les deux cas pour différents heurs de fonctionnement

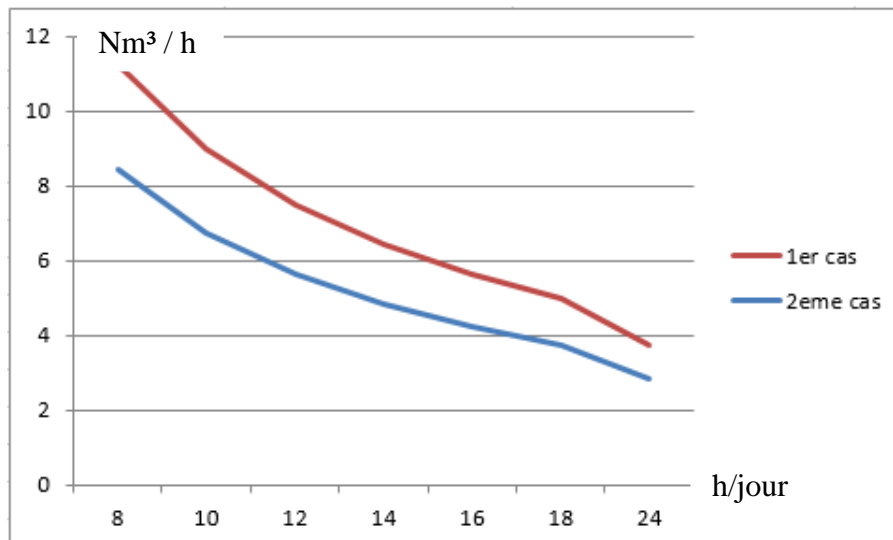


Figure III.4.1 courbe de capacité de la station selon les deux cas pour différents heurs de fonctionnement

On suppose qu'il existe un 3ème cas :

3) Cas 3 :

- C'est la somme des deux cas précédents pour couvrir les fuites journalières et être prêt en même temps pour la durée de mise en service.

Cas 3 = Fonctionnement normal + Durée de mise en service

$$\text{Cas 3} = n * A / 8 + (n * B / 30) / 8$$

Pour un temps de fonctionnement de 8 heures

$$\text{Cas 3} = 11.25 + 8.4375 = 19.6575 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

- Pour 8 heures de fonctionnement le 3ème Cas est impossible car la station est d'une capacité maximum de 15 Nm³, donc on essaie d'augmenter le temps de fonctionnement :

Tableau de résultats pour différents heurs de fonctionnement :

	Capacité de la station selon le 3eme cas :
Temps de fonctionnement de la station H2 (heurs/jour)	Fuite + stockage pour maintenance pour les 3 alternateurs (Nm ³ / h)
8	19.6875
10	15.75
12	13.125
14	11.25
16	9.84375
18	8.75
24	6.5625

Tableau III.4.2 : Capacité de la station selon le 3ème cas pour différents heurs de fonctionnement

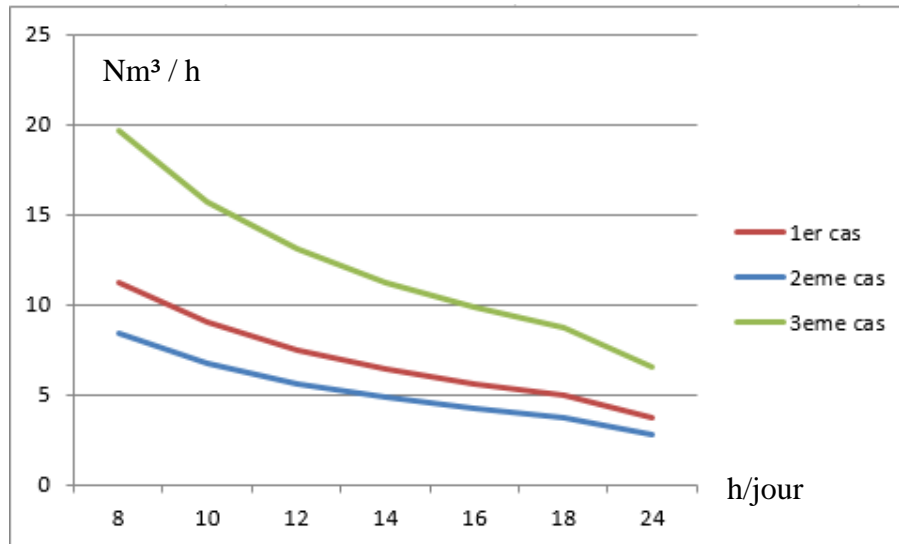


Figure III.4.2 courbe de capacité de la station selon les 3 cas pour différents heurs de fonctionnement

Discussion de résultats :

On remarque que le 3ème cas qu'on a supposé est plus défavorable que les autres cas.

Pour 11.25 Nm³ de production dans le 3eme cas, il faut qu'on augmente le temps de fonctionnement de la station jusqu'à 14 heures, c'est la même capacité qu'on est besoin dans le 1^{er} cas défavorable, donc c'est mieux d'augmenter le temps de fonctionnement à 14 heures pour couvrir les fuites journalières et être prêt en même temps pour la durée de mise en service.

La procédés de production d'hydrogène par électrolyseur de l'eau produit aussi de l'oxygène, dans le cas de la centrale de CAP DJINET, l'oxygène s'échappe vers l'air libre. On propose de le traiter et le stocker dans des bouteilles (c'est très important pour le domaine médical).

Nombre de bouteilles nécessaire pour le stockage d'hydrogène :

$$\text{Volume total d'hydrogène à stocker } 2*(V_1 + V_2) = 2*(225+450) = 1350 \text{ Nm}^3$$

$$\text{Volume du cylindre exprimer en litre d'eau} = 50 \text{ litres} = 0.05 \text{ m}^3$$

$$\text{Pression de remplissage du cylindre} = 150 \text{ bar (g)}$$

$$\text{Volume de gaz stocké par bouteille } (p_1 * v_1 = p_2 * v_2) = 150*0.05 \text{ m}^3 = 7.5 \text{ m}^3$$

$$\text{Besoin de stockage d'hydrogène} = 1350/7.5 = 180 \text{ bouteilles}$$

III.5 Calcul de débit d'eau pour le refroidissement de l'alternateur

La centrale électrique de CAP DJINET est composée de 3 tranche (TG, TV, Alternateur et des autres auxiliaires), chaque tranche a un système de refroidissement en boucle fermé CCW (closed cooled water)

Le système CCW alimente plusieurs refroidisseurs dans la tranche avec de l'eau déminéralisé tel que : refroidisseur d'huile de graissage des turbines TV et TG, refroidisseur auxiliaires de turbine à vapeur et turbine à gaz, refroidisseur d'huile de graissage de la pompe d'alimentation de la chaudière..... Ext).

L'objet de ce calcul est de déterminer le débit d'eau déminéralisé de refroidisseur d'hydrogène pour le refroidissement de l'alternateur pour chaque tranche.

Critères de conception :

Le débit d'eau pour le refroidisseur d'hydrogène est calculé en fonction de la chaleur maximale dégagée par l'alternateur, plus une marge de 10%.

Calcul de débit d'eau :

Equations utilisées :

$$Q = \dot{m} * C_p * 10^3 * (T_s - T_e).$$

Avec : Q = Charge de chaleur en kW.

\dot{m} = Débit de l'eau de refroidissement en m³/h.

T_s = température de sortie d'eau de refroidissement en °C.

T_e = température d'admission d'eau de refroidissement en °C.

C_p = capacité thermique massique en kJ/kg°C.

Donnée d'entrée :

Charge de chaleur pour chaque alternateur (Q) = 4251 kW

C_p d'eau déminéralisée = 4.1868 kJ/kg°C

$T_s = 36.4$ °C / $T_e = 26.72$ °C

Résultats :

Débit de l'eau requis pour alimenter le refroidisseur (\dot{m}) = $Q / C_p * 10^3 * (T_s - T_e)$

$$\dot{m} = 4251 / 4.1868 * 10^3 * (36.4 - 26.72) = 0.03496 \text{ m}^3/\text{s} * 3600 = 415.3 \text{ m}^3/\text{h}.$$

$$\dot{m} = 415.3 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Discussion de résultats :

Le système de refroidissement en boucle fermé aliment plusieurs refroidisseurs pas seulement le refroidisseur d'hydrogène pour l'alternateur

Le débit de l'eau d'alimentation de CCW c'est la somme des débits de tous les systèmes de refroidissements (Refroidisseur d'huile de graissage des turbines TV et TG, refroidisseur auxiliaires de turbine à vapeur et turbine à gaz, refroidisseur d'huile de graissage de la pompe d'alimentation de la chaudière..... Ext).

Le débit total de la pompe de CCW est de 549 m³/h (donnée sonalgaz) pour chaque tranche, en remarque que le refroidisseur d'hydrogène consomme un grand pourcentage de ce débit (415.3 m³/h) par rapport aux autres refroidisseurs.

On propose de fournir un système de refroidissement en boucle fermé séparer juste pour le refroidisseur d'hydrogène avec une pompe d'alimentation d'un débit de (415.3 m³/h) car ce système est critique due au cout très cher des alternateurs et les risque d'utilisation de l'hydrogène.

Conclusion

Dans ce chapitre, on parle de l'hydrogène et son procédé de production, dont des généralités sur l'hydrogène (caractéristique physique et chimique) ou on a bien appris sur ses avantages par rapport à l'air, mais aussi les risques et les difficultés d'utilisation de ce gaz.

Une description de la production de l'hydrogène par l'électrolyse d'eau est bien expliquée en prenant un exemple détaillé de la station de production de l'hydrogène utilisé dans la centrale CAP DJINET, avec des calculs de capacité de la station ainsi que le débit de l'eau de refroidissement en boucle fermé (CCW) pour le refroidissement de l'alternateur sur la base des données prises des documents du fournisseurs SIEMENS, ou on a proposé :

- Un 3ème cas plus défavorable que les cas donnés par le fournisseur ;
- De faire un système de refroidissement en boucle fermée séparé pour le refroidisseur de l'hydrogène ;
- De stocker l'oxygène produit par l'électrolyseur dans des bouteilles au lieu de le laisser se perdre à l'air libre inutilement.

Conclusion générale

Ce travail a été réalisé en collaboration et le soutien des ingénieurs et techniciens de haute compétence et serviabilité de SONALGAZ / CEEG et SPE, ce qui été bénéfique pour notre formation et notre cursus universitaire, en estimons que durant une courte période, nous avons avoir et appris beaucoup de choses concernant le déroulement de la phase d'engineering des centrales électriques notamment pour les cycles combinés.

Notre visite pour la centrale fonctionnant à Cycle Combiné de CAP DJINET «située au NORD EST de BOUMERDES » nous a été très enrichissante car elle nous a permis de découvrir en détail tous les composantes et équipements importantes et nécessaires pour la production de l'énergie électrique à savoir turbine à gaz, turbine à vapeur, alternateur, chaudière de récupérations, transformateurs, systèmes auxiliaires et la station de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau déminéralisé pour le refroidissement de l'alternateur ;

Dans le premier chapitre nous avons décrire une généralité sur les centraux électriques tel que : les centrales thermiques, les centrales électriques à bas des énergies renouvelables ;

Dans le deuxième chapitre nous avons expliqué en détail la centrale à cycle combiné, avec ses différentes configurations, la conception de la centrale et ses auxiliaires ;

Le troisième chapitre est consacré pour l'hydrogène, dont des généralités sur l'hydrogène ont été exprimées, avec la description de la production de l'hydrogène par l'électrolyse d'eau et l'explication en détail de la station de production de l'hydrogène utilisé dans la centrale CAP DJINET.

Ainsi que le dimensionnement du système de refroidissement de l'alternateur par gaz d'hydrogène dont deux fluides caloporteurs entre en jeu :

- l'hydrogène gazeux à l'intérieur de l'alternateur pour transférer la chaleur par convection forcé due au frottement du rotor sur les paliers du stator ainsi que l'énergie dissipée par effet de joule suite au passage des courant important dans le bobinage de l'alternateur
- L'eau déminéralisé circule dans un circuit de refroidissement en boucle fermé « CCW », absorbant l'énergie de l'hydrogène et la transféré pour évacuation a l'aides des AEROREFREGERANT (extracteurs+ échangeur de chaleurs)

Un calcul de capacité de la station de production d'hydrogène ainsi que le débit de l'eau de refroidissement en boucle fermé pour le refroidissement de l'alternateur, ce calcul a été développée sur la base des données prises des documents du fournisseurs SIEMENS (fuites journalières garanties et le volume de gaz d'hydrogène nécessaires pour l'opération de maintenance et mise en service) ainsi que la pression de fonctionnement recommandée de l'eau de refroidissement et de l'hydrogène afin de justifier la dimension des équipements entrant dans la production d'hydrogène de circuit de refroidissement en boucle fermé tel que l'électrolyseur , le nombre de bouteilles à être mise en place dans la centrale, débit de la pompe,...

A la fin de ce travail,

Ce mémoire de fin d'étude est le fruit d'un travail de un moins dans la centrale CAP DJIENT, cette étude nous a permis de voir le monde du travail au plus près.

Bibliographie

- [1] http://voltage.elec.free.fr/racinoux/alternat/alter_froid.htm
- [2] <https://www.encyclopedie-energie.org/lhydrogene/>
- [3] [https://www.electronics-cooling.com/1998/09/the-thermal-conductivity-of-gases/#:~:text=The%20value%20of%20thermal%20conductivity,%20and%20Hydrogen%20\(0.18\).](https://www.electronics-cooling.com/1998/09/the-thermal-conductivity-of-gases/#:~:text=The%20value%20of%20thermal%20conductivity,%20and%20Hydrogen%20(0.18).)
- [4] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-diesel-power-plant-39_fig2_282804308
- [5] <https://energie-nucleaire.net/fonctionnement-centrale-nucleaire/centrale-nucleaire>
- [6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_solaire
- [7] <https://les-smartgrids.fr/solaire-thermodynamique-filiere-stockage/>
- [8] <http://www.riviere-arve.org/usages/production-hydroelectricite.htm>
- [9] <http://blogpeda.ac-poitiers.fr/developpement-durable-5-6/2017/02/15/la-centrale-geothermique/>
- [10] Guide Technique (documents Sonalgaz).
- [11] Thèse fin d'étude magister M. M'chid Hedjala Ahmed.
- [12] Technique de l'ingénieur (documents Sonalgaz).
- [13] BRENNER. – Electrodeposition of alloys. Principles and practice. Academic Press Inc. (1963).
- [14] NORSK-HYDRO. – Procédé de préparation de cathodes actives pour des appareils électrochimiques. Brevet français, no 2381836, 22 sept. 1978.
- [15] BADGER (E.H.M.), GRIFFITH (R.H.) et NEWLING (W.B.S.). – The catalytic decomposition of simple heterocyclic compounds. Proc. Roy. Soc., 197, p. 184-191 (1949).
- [16] MOROZOV (V.N.) et ALESKOVSKII (V.B.). – Soviet Electrochem., 7, 9, p. 1220-1222 (1971).
- [17] FEDOTEV (N.P.), BEREZINA (N.V.) et KRUGLOVA (E.G.). – Zh. Prikl. Khim., 21, p. 317-328 (1948).
- [18] SASAKI (K.) et SUGYANO (K.). – Kogyo Kagaku Zasshi, p. 387-392, juin 1957 .

- [19] FEDOTEV (N.P.), VYACHESLAVOV (P.M.) et GNUSIN (N.P.). – Zh. Prikl. Khim, 25, p. 322- 324 (1952).
- [20] APPLEBY (A.J.) et CREPY (G.). – Improvements in electrolysis technology in alkaline solution. Second World Hydrogen Energy Conference. Zürich, vol. 1, p. 227-240, 21-24 août 1978.
- [21] GALA (J.), MALACHOWSKI (A.) et NAWRAT (G.). – Electrolytic-molybdenum-vanadium alloy coatings as a material with a decreased hydrogen overvoltage. J. of Applied Electrochem, vol. 14, p. 221-230 (1984).
- [22] NORISK-HYDRO. – Procédé pour préparer des anodes actives pour l'électrochimie, en particulier pour produire de l'hydrogène. Brevet français, no 2385817, 27 oct. 1978.
- [23] PRIGENT (M.), MAS (L.J.) et VERILLON (F.). – Electrochemical Society Meeting, Seattle, 5 mai 1978.
- [24] HALL (D.). – Electrodes for alkaline water electrolysis. J. Electrochem. Soc., vol. 128, no 4, p. 740-746, avril 1981.
- [25] CHAPMAN (E.A.). – Chem. Process Eng., vol. 46, no 8, p. 387-393 (1965) (o).
- [26] COSTA (R.L.) et GRIMES (P.G.). – Chem. Eng. Progr. Symp. Ser., 63, p. 45-58 (1967).
- [27] MROCHEK (J.E.) et KIBBEY (A.H.). – ORNL-TM 1716 Oak Ridge National Laboratory Te USA, 7 déc. 1966.
- [28] SINGH (J.) et NAYAR (M.G.). – Chem. Ind. Develop., vol. 6, no 2, p. 31-40 (1972) (+).
- [29] CRANDALL (W.B.) et HARADA (Y.). – US Nat. Tech. Inform., Serv. A.D. Rep., no 761512 (1973).
- [30] GRAS (J.M.) et LE COZ (J.J.). – Asbestos corrosion study in hot caustic potash solution. Silicate ions influence on electrode overvoltages (Étude de la corrosion de l'amiante dans une solution de potasse caustique. Influence des ions silicates sur les surtensions d'électrode). Second World Hydrogen Energy Conference Zurich, 21-24 août 1978.
- [31] NUTTAL (L.J.) et TITTERINGTON (W.A.). – General Electric's solid polymer electrolyte water electrolyses (L'électrolyse de l'eau sur électrolyte de polymère solide de General Electric). Conf. SEE, RGE tome 85, no 6, p. 542- 550, juin 1976.
- [32] BLUM (P.), DEPORTES (C.) et SCHOULER (E.). – Production d'hydrogène par réduction électrochimique de la vapeur d'eau à haute température. RGE tome 85, no 7/8, juil.-août 1976.

