

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département d'électronique**

**Mémoire**

Présentée par :

**KHARZI née BOUDJEMA Souhila**

Pour l'obtention du titre de

**MAGISTER EN ELECTRONIQUE**

Option : Electricité Solaire

Thème

**Etude d'un dispositif de protection cathodique alimenté par  
énergie solaire photovoltaïque**

Soutenu publiquement le :27/11/2005

Devant les membres du jury composé de :

<b>M. M. Mehenni</b>	Professeur – ENP	<b>Président</b>
<b>M. M. Haddadi</b>	Professeur – ENP	<b>Rapporteur</b>
<b>M. A. Malek</b>	Maître de Recherche – C.D.E.R	<b>Rapporteur</b>
<b>M. K. Abadli</b>	Chargé de cours – ENP	<b>Examineur</b>
<b>M. M S. Aït Cheikh</b>	Chargé de cours – ENP	<b>Examineur</b>
<b>M. C. Larbès</b>	Phd - Maître de conférence – ENP	<b>Examineur</b>

2005

## ملخص

الحماية الكاثودية بالطاقة الشمسية الكهروضوئية تمثل الحل الأفضل للبنية المعرضة للتآكل في الصناعات البترولية و الغاز. في هذا العمل تم قياس النظام الحماية الكاثودية الكهروضوئية و الذي تمكنا بفضله تشكيلة النظام الكهروضوئي في تركيبة نموذجية ذات أقصى تقدير اقتصادي و تكيفها لأي محطة للحماية الكاثودية. وقد تم أيضا تطوير نظام ضبط و مراقبة الحماية الكاثودية الذي يسمح بتسوية أليا و تلقائيا فرق الكمون البنية من أجل ابقاء تيار الوقاية ثابت. هذا الضبط الألي يتم انجازه بواسطة الميكرومراقب بفضل تعديل و تنسيب عرض النبض لتكوين النسبة الدورية المطلوبة لقيادة دارة المخفض-المعلي المستعمل كواجهة تكيف النظام الكهروضوئي للحماية الكاثودية المخصصة. هذا المنظم يمكن للمولد الكهروضوئي بالعمل في النقطة ذات القدرة الذروي. والدارة المكيفة المستعملة هي المخفض الذي يسمح بتخفيض فرق الكمون للمولد لتطبيقها مع فرق الكمون لتشحن البطارية. و قيادته مؤمنة من طرف نفس الميكرومراقب بمعية معدل عرض النبض الثاني. و بالتالي لدينا ثلاث دارات أساسية مكونة لهذا النظام و المتمثلة في

1. المخفض-المعلي.
2. الميكرومراقب.
3. والمخفض. و قد تم انجاز في إطار هذا العمل تقليد نظام الضبط و المراقبة للحماية الكاثودية.

**المفاتيح :** النظام الكهروضوئي، النقطة ذات القدرة الذروي، التآكل، الحماية الكاثودية، المخفض-المعلي.

## Résumé

La protection cathodique par voie photovoltaïque est l'une des solutions utilisées pour les structures exposées à la corrosion, principalement dans les industries de pétrole et de gaz. Dans ce travail, une configuration standard avec un buck-boost présentant une estimation économique optimale a été établie pour être adaptée aux différents cas de figures imposées par la station de protection cathodique. Il a été aussi développé un système de régulation et de contrôle permettant l'ajustement automatique de la tension de sortie du buck-boost vers la charge (déversoir-canalisation à protéger) afin de maintenir le courant de protection constant, ce qui est une condition nécessaire pour assurer l'immunité de la structure. Ce régulateur permet aussi au générateur photovoltaïque de fonctionner à sa plus haute performance par le biais de la poursuite du point de puissance maximum et utilise comme circuit d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la batterie un convertisseur qui abaisse la tension du GPV pour la faire coïncider à la tension de charge de la batterie. Ce dispositif de régulation et de contrôle développé et conçu autour trois circuits de base à savoir : un microcontrôleur 16F877, un buck et un buck-boost, a montré de bonnes performances pour un fonctionnement fiable du système de la protection cathodique photovoltaïque.

**Mots clé :** système photovoltaïque, point de puissance maximum, corrosion, protection cathodique, buck-boost.

## Abstract

Photovoltaic cathodic protection is the best solution for the structures subjected to corrosion, mainly in oil and gas industries. In this work an optimum design sizing and system description are presented. We have also given a standard configuration of the photovoltaic system which can be matched at all the cases of the figures imposed by the protection cathodic station. Usually, cathodic protection systems are working with constant current output which is the necessary condition to procure immunity voltage of the structures that strictly required to prevent corrosion from occurring. In our case, it is allowed by an automatically adjustment of the output voltage of the buck-boost converter to feed the load (sacrificial anode-protected structure) thanks to the microcontroller by generating the required duty cycle by way of its PWM output. The developed system allows the solar panel to operate at its maximum power point output (MPP) too. When the MPP changes, the Pic takes care of this and changes the conversion ratio (duty cycle) of the buck circuit to keep the solar panel at its MPP. the buck steps higher voltage panel down to the charging voltage of the battery. The proposed system with DC/DC converters and a microcontroller used in this case have shown a good performance for our application.

**keywords:** photovoltaic system, maximum power point, corrosion, cathodic protection, buck-boost.

# *Dédicaces*

*A ma très chère maman*

*A mon très cher papa*

*A mon mari, a mes enfants*

*A la mémoire de mon beau père*

*A ma belle mère*

*A mes frères et sœurs*

*A mes amies*

## **Avant propos**

Le présent travail, traitant de la problématique de la corrosion et de la lutte anticorrosion moyennant la protection cathodique par soutirage de courant alimentée par énergie solaire photovoltaïque. L'étude de ce dispositif a été effectuée à la division Energie Solaire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables (C.D.E.R). Cela, dans le cadre de la convention de coopération entre la division et le Département d'Electronique de l'Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P).

Que Messieurs M. Haddadi et A. Malek respectivement Professeur (E.N.P) et Maître de Recherche (C.D.E.R), qui ont défini et dirigé ce travail, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur disponibilité et leurs conseils.

Pour le soutien constant dont il a fait preuve, que Monsieur M. Belhamel Directeur de Recherche et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables, reçoive le témoignage de ma sincère reconnaissance.

Que Monsieur M. Mehenni, Professeur à l'école Nationale Polytechnique trouve ici, l'expression de mes remerciements de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs K. Abadli, M S. Aït Cheikh Chargés de cours et C. Larbes Maître de conférence à l'école Nationale Polytechnique, pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Mes remerciements aux enseignants de la Post Graduation de l'Option Electricité Solaire de l'Ecole Nationale Polytechnique, et à mes collègues du Centre de Développement des Energies Renouvelables pour leur aide et soutien et à tout ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

## Tables des matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>3</b>
<b><u>Chapitre 1</u> : Notions fondamentales sur la corrosion et sur la lutte anticorrosion</b>	
1.1 Généralités.....	9
1.2 La corrosion sèche.....	10
1.2.1 Introduction.....	10
1.2.2 Mécanisme.....	10
1.3 La corrosion aqueuse.....	11
1.3.1 Introduction.....	11
1.3.2 Thermodynamique électrochimique.....	11
1.3.2.1 Equation de Nernst d'une réaction d'électrode.....	11
1.3.2.2 Echelle des potentiels standard d'électrode.....	12
1.3.2.3 Diagrammes de Pourbaix.....	14
1.3.2.4 Exploitation du diagramme potentiel-pH.....	14
1.3.2.5 Limites du diagramme de potentiel-pH.....	16
1.3.2.6 Potentiel de dissolution.....	17
1.4 Aspect électrochimique de la corrosion.....	17
1.4.1 Corrosion idiomorphique.....	17
1.4.2 Corrosion galvanique.....	17
1.4.3 Corrosion par aération différentielle.....	18
1.5 Les différentes formes de corrosion aqueuse.....	19
1.5.1 Introduction.....	19
1.5.2 Corrosion généralisée.....	19
1.5.3 Corrosion localisée.....	19
1.5.4 Effets de courants vagabonds.....	22
1.5.5 Effets mécaniques.....	22
1.6 Protection et lutte contre la corrosion.....	23
1.6.1 Généralités.....	23
1.6.2 Emploi d'inhibiteurs de corrosion.....	23
1.6.2.1 Inhibiteurs anodiques ou passivant.....	24
1.6.2.2 Inhibiteurs cathodiques.....	24

1.6.2.3	Inhibiteurs organiques.....	25
1.6.3	Utilisation de revêtements.....	25
1.6.3.1	Les revêtements métalliques.....	25
1.6.4	Protection électrochimique.....	26
1.6.4.1	La protection cathodique.....	26
1.6.4.2	La protection anodique.....	29
1.6.4.3	Protection par drainage des courants vagabonds.....	30
1.7	Conclusion.....	31

## **Chapitre 2 : La protection cathodique par soutirage de courant**

2.1	Introduction.....	35
2.2	Potentiel d'injection.....	35
2.3	Courant de protection.....	35
2.4	Résistance transversale de l'isolement de la structure à protéger.....	35
2.5	Valeur d'isolement.....	35
2.6	Résistance d'isolement.....	35
2.7	Résistance longitudinale.....	36
2.8	Critère de la protection cathodique.....	36
2.9	Technique de protection cathodique par soutirage de courant.....	36
2.9.1	Principe.....	36
2.9.2	Choix de l'emplacement du poste de soutirage.....	37
2.9.3	Réalisation des Soutirages.....	38
2.9.3.1	La densité de courant de protection.....	38
2.9.3.2	Les caractéristiques du générateur.....	38
2.10	Constitution des systèmes de protection cathodique par soutirage de courant.....	38
2.10.1	La source d'énergie.....	39
2.10.2	Les déversoirs.....	43
2.10.2.1	Généralités.....	43
2.10.2.2	Choix des matériaux constituant les anodes.....	43
2.10.2.3	Différents types d'installations des anodes.....	44
2.10.3	Câbles de liaison et raccords isolants.....	47
2.10.3.1	Câbles de liaison.....	47
2.10.3.2	Les joints isolants.....	48
2.11	Coût de la protection cathodique.....	49
2.12	Conclusion.....	49

### **Chapitre 3 : Dimensionnement de la protection cathodique par soutirage de courant alimentée par énergie solaire photovoltaïque**

3.1	Introduction.....	53
3.2	Dimensionnement des systèmes de protection cathodique photovoltaïque.....	54
3.2.1	Elaboration du programme.....	55
3.2.1.2	Equations de base.....	55
3.3	Générateurs photovoltaïques.....	52
3.3.1	Méthodes de dimensionnement du système photovoltaïque pour la protection cathodique.....	61
3.3.1.1	Méthodes analytiques.....	61
3.3.1.2	Méthodes numériques.....	61
3.3.2	Méthode appliquée.....	62
3.3.2.1	Détermination du rayonnement global sur un plan incliné.....	62
3.3.2.2	Détermination de la taille du champ de modules photovoltaïques.....	64
3.3.2.3	Détermination de la capacité de la batterie de stockage.....	65
3.4	Résultats et interprétation.....	67
3.5	Evaluation du coût du Watt crête des deux configurations du système photovoltaïque appliqué à la protection cathodique.....	74
3.5.1	Coût de l'investissement et de l'amortissement du système de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque.....	74
3.5.2	Coût de l'entretien et de la maintenance du système de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque.....	75
3.5.3	Coût global actualisé du système de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque et le coût du Watt crête.....	76
3.6	Résultats et interprétation de l'évaluation économique.....	77
3.7	Conclusion.....	79

### **Chapitre 4 : La régulation dans les systèmes photovoltaïques appliquée à la protection cathodique**

4.1	Introduction.....	83
4.2	Le système de régulation dans la protection cathodique.....	84
4.3	Circuit de mesure de la tension du générateur photovoltaïque.....	85
4.4	Circuit de mesure de courant du générateur photovoltaïque.....	86
4.5	Circuits de mesure de la tension et de courant de la batterie.....	87
4.6	Circuit d'alimentation de la charge.....	87
4.7	Modélisation de la commande du hacheur buck-boost.....	89

4.7.1	Etablissement des équations d'états.....	89
4.7.2	Simulation de la variation de la tension de sortie du buck-boost en fonction de la variation du rapport cyclique.....	89
4.8	Commande du buck-boost.....	92
4.9	Application du microcontrôleur 16F877 à notre modèle.....	96
4.10	Algorithmes.....	96
4.11	Conclusion.....	103
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>107</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>113</b>
	<b>Annexe A.....</b>	<b>119</b>
	<b>Annexe B.....</b>	<b>129</b>
	<b>Annexe C.....</b>	<b>137</b>
	<b>Annexe D.....</b>	<b>141</b>



# Nomenclature

## Nomenclature

A	coefficient de réflexion albédo	
Aire	surface du champ de modules	(m <sup>2</sup> )
A <sub>Rég</sub>	amortissement annuel du régulateur	(DA)
A <sub>Bat</sub>	amortissement annuel de la batterie	(DA)
A <sub>Acc</sub>	amortissement annuel accessoires	(DA)
A <sub>GPV</sub>	amortissement annuel du générateur	(DA)
A <sub>Tot</sub>	amortissement annuel total de l'investissement	(DA)
$\alpha$	coefficient d'atténuation de la conduite	(m <sup>-1</sup> )
$\beta$	angle d'inclinaison des modules photovoltaïques	(°)
C	capacité du condensateur électrochimique	(F)
C <sub>Acc</sub>	coût des accessoires	(DA)
C <sub>ano</sub>	consommation du type d'anodes choisi	(kg/A.an)
C <sub>Bat</sub>	coût des batteries d'accumulateurs	(DA)
C <sub>GPV</sub>	coût du générateur photovoltaïque	(DA)
C <sub>jm</sub>	consommation journalière moyenne	(Wh/j)
C <sub>n</sub>	capacité batterie nominale	(Ah)
C <sub>Rég</sub>	coût du régulateur	(DA)
C <sub>u</sub>	capacité batterie utile maximale	(Ah)
d	diamètre du déversoir	(m)
dE <sub>X</sub>	abaissement du potentiel créé entre les points x et x+dx	(V)
dI <sub>X</sub>	intensité entrant dans la structure entre les points x et x+dx	(A)
D	diamètre de la canalisation	(m)
D <sub>jour</sub>	durée du jour	(h)
D <sub>r</sub>	diamètre équivalent d'un rail	(m)
$\delta$	déclinaison du soleil	(°)
$\Delta I_L$	la variation de courant dans la bobine	(A)
e	espacement entre deux anodes consécutives	(m)
E <sub>0</sub>	abaissement du potentiel qu'on doit assurer au point x = 0 (potentiel de soutirage au point d'injection)	(V)
E <sub>Acc</sub>	coût de l'entretien des accessoires	(DA)
E <sub>Bat</sub>	coût de l'entretien de la batterie d'accumulateurs	(DA)
E <sub>GPV</sub>	coût de l'entretien du générateur photovoltaïque	(DA)
E <sub>N</sub>	potentiel naturel d'une conduite enterrée dans le sol	(V)
E <sub>Rég</sub>	coût de l'entretien du régulateur	(DA)
E <sub>s</sub>	potentiel d'injection ou potentiel de soutirage	(V)
E <sub>Tot</sub>	coût de l'entretien total	(DA)
E <sub>X</sub>	abaissement du potentiel au point x	(V)

F	constante de Faraday	(96500 C)
f	la fréquence de commutation	(kHz)
G	variation du rendement du module en fonction de la température	(%/°C)
$\gamma$	résistance conduite - sol (résistance caractéristique de la conduite)	( $\Omega/m$ )
h	hauteur du soleil	(°)
$I_0$	intensité du courant au point $x = 0$	(A)
$I_{GPV}$	intensité de courant fournie par le générateur photovoltaïque	(A)
0	point de soutirage de courant et origine des abscisses	
$I_s$	Intensité du courant de protection	(A)
$I_{Tot}$	Investissement total des équipements	(DA)
$I_x$	intensité du courant circulant au point x	(A)
J	journée type du mois de l'année	
L	l'inductance de la bobine	(H)
Lat	latitude du lieu	(°)
$L_c$	longueur des câbles de liaison	(m)
$L_{cond}$	longueur de la conduite	(m)
$L_D$	longueur du déversoir à installer	(m)
$L_p$	portée du poste de soutirage	(m)
$M_{uano}$	masse unitaire des anodes	(kg).
$N_1$	durée de vie du module considéré	20 ans
$N_2$	durée de vie du régulateur	7 ans
$N_3$	durée de vie de la batterie électrochimique	5 ans
$N_4$	durée de vie des accessoires	20 ans
$N_{ano}$	nombre d'anodes	
NOCT	température nominale de la cellule sous STC	(° C)
$N_{mp}$	nombre de modules en parallèle	
$N_{ms}$	nombre de modules en série	
$N_{mt}$	nombre total de modules	
$N_p$	nombre de postes de soutirage	
$\eta_0$	rendement du module sous condition standard	(%)
$\eta_g$	rendement moyen du champ de modules photovoltaïques	(%)
$\eta_m$	rendement moyen du module	(%)
$\eta_r$	rendement du régulateur (90 à 95 %)	(%)
$\omega_s$	angle horaire du coucher du soleil	(°)
P	puissance du poste de soutirage	(W)
$P_{mod\ cr\ête}$	puissance crête du module	(W)
$P_{GPV}$	puissance crête du générateur photovoltaïque	(W)
$P_r$	profondeur de pose de l'anode	(m)
$P_{Bat}$	prix unitaire de la batterie électrochimique	(DA)
$P_k$	point kilométrique.	(m)
$P_{Mod}$	prix unitaire du module	(DA)

PWM (MLI)	modulation de largeur d'impulsion	
R	constante des gaz parfait	(83415J/mol.k)
r	résistance longitudinale d'un mètre de canalisation	( $\Omega$ )
R <sub>c</sub>	résistance des câbles de liaison	( $\Omega$ )
R <sub>D</sub>	résistance du déversoir	( $\Omega$ )
R <sub>dh</sub>	rayonnement solaire diffus sur plan horizontal	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>ha</sub>	rayonnement solaire extraterrestre	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>di</sub>	rayonnement solaire diffus sur plan incliné	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>drh</sub>	rayonnement solaire direct sur plan horizontal	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>dri</sub>	rayonnement solaire direct sur plan incliné	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>id</sub>	rayonnement solaire diffus sur plan incliné	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>gh</sub>	rayonnement solaire global sur plan horizontal	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>gi</sub>	rayonnement solaire global sur plan incliné	(Wh/m <sup>2</sup> )
$\overline{R}_{gi}$	rayonnement solaire global moyen sur plan incliné	(Wh/m <sup>2</sup> )
R <sub>t</sub>	résistance totale du circuit	( $\Omega$ )
R <sub>tr</sub>	résistance transversale de l'isolement de la canalisation	( $\Omega$ .m)
$\rho_{acier}$	résistivité de l'acier (15 à 25 10 <sup>-8</sup> $\Omega$ .m)	( $\Omega$ .m)
$\rho_c$	résistivité des câbles de liaison	( $\Omega$ .m)
$\rho_F$	résistivité de la fine de coke = backfill	( $\Omega$ .m)
$\rho_{sol}$	résistivité du sol à l'endroit de pose du déversoir	( $\Omega$ .m)
S	section de la conduite	(m <sup>2</sup> )
S <sub>c</sub>	section des câbles	(m <sup>2</sup> )
T	température	(K)
t	durée de vie prévue pour les anodes	(an)
t <sub>acc</sub>	taux d'actualisation	8%
$\overline{T}_{amb}$	température ambiante moyenne. Pour notre cas, on a utilisé la température ambiante journalière moyenne mensuelle	(°C)
$\overline{T}_c$	température moyenne de la cellule	(°C)
U <sub>p</sub>	tension du poste de soutirage	(V)
V <sub>e</sub>	tension d'entrée du convertisseur	(V)
V <sub>e_max</sub>	tension d'entrée maximale	(V)
V <sub>e_min</sub>	tension d'entrée minimale	(V)
V <sub>F</sub>	tension directe de la diode rapide égale à 0.7	(V)
V <sub>nm</sub>	tension nominale du module	(V)
V <sub>nC</sub>	tension nominale de la charge	(V)
V <sub>s</sub>	tension de sortie du convertisseur	(V)
V <sub>samp</sub>	tension de sortie de l'amplificateur	(V)
V <sub>sh</sub>	tension aux bornes du shunt	(V)
x	abscisse de la longueur de la canalisation à protéger	(m)
z	valence du métal	

# **Introduction générale**

## Introduction générale

A part quelques éléments nobles tels que l'or ou le platine, par exemple, la plupart des autres métaux se trouvent dans la nature sous forme de minerais (sels ou oxydes) qui constituent des formes plus stables. Pour obtenir les métaux, il faut faire subir aux minerais des transformations (décomposition et réductions) qui détruisent en fait un équilibre naturel. Il en résulte inversement que toute pièce métallique enterrée subit des modifications, plus ou moins rapide selon la nature du métal et son environnement, qui tendent à le ramener à son état premier (état stable).

Donc, on peut définir la corrosion comme étant la destruction d'un métal.

Les différents phénomènes englobés sous le vocable général de corrosion peuvent prendre différentes formes tels que la corrosion chimique, corrosion électrochimique, ...etc.

Les frais de construction des structures métalliques sont toujours élevés, il est donc important d'assurer la bonne gestion du capital ainsi investi. A cet effet, il convient d'accroître au maximum la durée de vie des ouvrages et d'éviter les arrêts imprévus susceptibles d'entraîner des manques à gagner importants.

Il a été estimé que 15 à 20% de la production mondiale en acier est détruite chaque année par la corrosion ; ceci correspond à une perte équivalente de 4 à 5% du produit interne brut de chaque pays industrialisé [1] [2].

Il est donc indispensable que tous les responsables des ouvrages métalliques connaissent les risques encourus par les canalisations enterrées en fonction de leur nature, de leur situation dans le sol et l'environnement pour prendre les mesures de protection adéquates.

La protection cathodique, après une bonne protection passive, constitue un moyen le plus sûr et le plus efficace pour arrêter le processus de corrosion. Ainsi les conduites métalliques enterrées sont, sauf rares exceptions, protégées par un revêtement externe qui a pour but d'isoler au maximum le métal du milieu corrosif. Cependant, un tel revêtement n'est jamais parfait et la protection cathodique permet de palier les défauts en abaissant le potentiel de la structure métallique à protéger à une valeur telle que la réaction de corrosion ne pourrait avoir lieu ; ce potentiel est dit "seuil d'immunité".

Les systèmes conventionnels de protection cathodique emploient deux techniques pour fournir un courant continu à partir de l'anode auxiliaire dite sacrificielle à la structure à protéger qui sera la cathode. La première technique n'a pas besoin d'une source d'énergie, parce que le métal de l'anode est choisi d'un potentiel suffisamment élevé comparé au métal de la cathode (concordance avec la série galvanique). Ces anodes sont le plus souvent des alliages de grande pureté (Magnésium, Zinc, Aluminium). Une telle technique est adéquate si le courant demandé est limité afin que la différence de potentiel soit suffisante pour soutirer le courant voulu.

Si la demande de courant ne peut pas être fournie par la différence de potentiel galvanique, nous devons utiliser une source d'énergie pour soutirer du courant. Habituellement, l'alimentation des systèmes de protection cathodique s'effectue à partir des réseaux de distribution d'énergie électrique par l'intermédiaire des transformateurs redresseurs. En cas d'absence de tels réseaux, notamment en zones désertiques, ou pour

d'autres raisons techniques ou économiques, les systèmes électriques utilisés sont alors des thermogénérateurs, des turbines à gaz, des aérogénérateurs, des générateurs solaires,...etc.

La protection cathodique par voie solaire est aujourd'hui très utilisée vu le grand nombre de ses avantages : longue durée de vie du système (environ 15 ans pour les modules), modularité du système, forme d'énergie non polluante, faible maintenance. Il y a aussi la possibilité d'un équilibrage de la protection par l'augmentation du nombre de points de soutirage d'où la diminution de puissance de chaque station et une intervention efficace là où la corrosion est la plus forte;...etc.

Le système photovoltaïque pour cette application comporte : un champ de modules photovoltaïques; un système de stockage électrochimique et un système de régulation et de conditionnement de puissance.

Or, pour que l'utilisation des générateurs solaires dans les systèmes de soutirage soit rentable et concurrentielle, ils doivent être optimisés. Pour cela, nous avons effectué un dimensionnement du système de protection cathodique alimenté par le système photovoltaïque afin de générer le courant de protection et la puissance demandée par la station de soutirage de courant avec une évaluation du coût du Watt crête comme critère important de ce dimensionnement.

La résistivité du sol varie suivant les conditions climatiques. Par exemple quand il pleut, la résistivité du sol diminue et vice versa. Si une tension continue appliquée est maintenue constante alors le courant soutiré variera avec les conditions climatiques. Une telle situation peut causer une sérieuse corrosion à la structure protégée car le courant imposé change continuellement alors que le courant demandé devrait être constant. Sous ces conditions la structure est soit sous protégée, soit surprotégée. Ces deux conditions sont toutes les deux nuisibles et doivent être évitées.

Pour résoudre ce problème, un système de régulation pour la protection cathodique a été développé. Ce système a pour fonction l'ajustement automatique de la tension de sortie continue de telle sorte que le courant appliqué soit maintenu constant à la valeur demandée sans tenir compte des variations de la résistivité du milieu environnant. Il permet aussi le contrôle de charge de la batterie et la poursuite du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif la présentation de quelques notions sur la corrosion et les moyens de lutte contre ce phénomène en se basant sur la technique de protection la plus utilisée qui est la protection cathodique par soutirage de courant utilisant comme source d'énergie, l'énergie solaire photovoltaïque. Il a aussi pour objectif l'établissement d'un dimensionnement du système photovoltaïque et la gestion optimale de l'énergie disponible à la sortie du générateur et ce quelque soit les variations de l'éclairement et de la température. Le but est:

- de réaliser une configuration standard de système photovoltaïque pour différentes stations de la protection cathodique ;
- de concevoir et de développer un système de régulation permettant la surveillance des critères de la protection cathodique, le contrôle de charge de la batterie et la poursuite du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque

Le mémoire est structuré sous forme de quatre chapitres :.

Dans le premier chapitre, les notions fondamentales sur la corrosion et la lutte anticorrosion sont présentées.

Le deuxième chapitre est consacré à la discussion des techniques de la protection cathodique par soutirage de courant, ses principes, les sources d'énergies les plus utilisées avant de focaliser notre attention sur le choix de la forme d'énergie qui est l'énergie solaire photovoltaïque (vue la simplicité de son utilisation car ne nécessitant pas de redresseurs et l'économie de son exploitation). Nous y présentons aussi les domaines d'applications de ce mode de protection, les déversoirs anodiques et leur dimensionnement suivant leurs géométrie, l'environnement et leurs emplacements,.....

Quant au troisième chapitre, un dimensionnement de la station de protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque est élaboré, en vue de l'estimation de la production d'électricité à partir des données de l'ensoleillement et du profil de la charge (la structure à protéger) avec une évaluation économique déterminant le critère de dimensionnement optimal.

Après avoir défini la taille de la paire du système photovoltaïque représenté dans la configuration standard de quatre modules et la capacité batterie de 240Ah (24V) destinée à alimenter la station de la protection cathodique. Nous avons procédé au développement du système de régulation et de contrôle qui lui est destiné.

Le dernier chapitre est consacré au système de régulation développé. Ce système considère le modèle des circuits électroniques utilisés dans le régulateur de la protection cathodique. Les circuits de base de ce régulateur sont les convertisseurs DC/DC et le microcontrôleur. Le microcontrôleur choisi pour cette application est le Pic 16F877 qui possède des entrées analogiques. Il assure la fonction de commande du hacheur dévolteur-survolteur par la génération du rapport cyclique via sa sortie PWM qui dépend de l'acquisition de la tension mesurée au niveau du pipeline. C'est ce signal qui commande la boucle de retour. Il est exploité dans la détermination de la nouvelle tension de sortie nécessaire pour maintenir le critère de protection. Ce signal indique si le pipeline est protégé avec sécurité contre la corrosion ou non. Nous avons étudié la conception du modèle de ce régulateur pour le système de la protection cathodique et la simulation de la commande du buck-boost. Du fait que la source d'énergie est un système photovoltaïque, nous avons prévu un convertisseur abaisseur permettant d'abaisser la tension élevée du générateur photovoltaïque à la tension de charge de la batterie grâce au microcontrôleur par la génération d'un deuxième rapport cyclique adéquat via la deuxième sortie PWM en permettant au générateur photovoltaïque de fonctionner au point de puissance maximum. Ce but est accompli par l'acquisition de la tension et du courant du générateur photovoltaïque et de la batterie par les ports du convertisseur A/N du microcontrôleur. Une autre information a été prise en compte vu la disponibilité des entrées de la conversion A/N du microcontrôleur se résumant dans l'acquisition du courant de protection mesuré à la sortie du buck-boost (dévolteur-survolteur).

Enfin, en conclusion générale, nous présentons une synthèse du travail effectué avec les principaux résultats obtenus, puis les perspectives et notamment les améliorations susceptibles d'être apportées.



# **Chapitre 1**

## **Notions fondamentales sur la corrosion et sur la lutte anticorrosion**

## Chapitre 1

### **Notions fondamentales sur la corrosion et sur la lutte anticorrosion**

#### **1.1 Généralités**

Un métal conservé dans le vide ou ayant une surface parfaitement isolée reste stable indéfiniment [1, 3]. Si l'isolation est imparfaite, la surface du métal en contact avec le milieu ambiant peut dans certains cas subir des modifications. Dans ces conditions, le métal n'est pas en général stable, et devient sensible à la corrosion qui se manifeste sous des aspects très variés.

La corrosion est définie comme étant l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs [1-3].

Peu de métaux se trouvent à l'état natif dans la nature. Quelques uns comme l'or ou le platine sont thermodynamiquement stables et se trouvent sous forme métallique, mais la plupart d'entre eux se rencontrent en général sous forme d'oxydes, de sulfates, de sulfures, de carbonates ou de chlorures qui constituent les principaux types de minerais. Réduits à l'état métallique, ils ont tendance, en présence de certains environnements, à revenir à la forme oxydée qui est leur forme thermodynamiquement stable. Ce phénomène, d'un caractère essentiellement chimique, a une très grande importance économique puisque actuellement, au niveau mondial, on estime que la corrosion détruit un quart de la production annuelle d'acier, soit 5 tonnes par seconde [1-7].

De plus, les pertes indirectes causées par la corrosion sont souvent supérieures aux pertes directes. Si l'on doit par exemple arrêter une centrale nucléaire pour intervenir sur un échangeur corrodé, le coût de l'intervention peut être faible comparé aux pertes de gains dues à l'interruption de la production. De même, pour remplacer un tuyau d'eau chaude noyé dans le mur en béton d'un immeuble, les frais de réparation dépassent largement le prix du composant.

La diversité des coûts rend toute estimation difficile et incertaine, mais les pertes par corrosion représentent sans aucun doute des montants très élevés. De plus, la corrosion des matériaux entraîne un gaspillage de matières premières et d'énergie [1-6, 12].

L'importance de la corrosion dépend de la nature du métal - les métaux les plus électro-négatifs (magnésium, zinc, aluminium,...) ne se corrodent pas. Ce fait, qui repose sur des considérations thermodynamiques (potentiel rédox), n'implique qu'une tendance - le comportement réel dépend aussi de facteurs cinétiques multiples.

Pour cette raison, la corrosion n'est pas une propriété intrinsèque du métal : car elle dépend plus de son environnement que de sa nature. L'environnement est, en effet, le facteur déterminant dans le développement de la corrosion. Ce terme "environnement" est pris au sens large et inclut naturellement le milieu dans lequel baigne le métal, mais aussi les contraintes mécaniques résiduelles ou celles auxquelles il est soumis pendant son utilisation [1-3].

Parmi les facteurs jouant un rôle important, on peut citer :

- Une atmosphère sèche ou humide;
- Une température normale ou élevée;
- Eau douce ou salée;
- La nature et degré d'humidité du sol;
- La présence de micro-organismes, etc.

La tension, la fatigue, la vibration, le frottement, l'érosion, la cavitation, le choc,...sont quelques unes des contraintes mécaniques possibles.

Selon l'environnement, on observe deux types principaux de corrosion :

- La corrosion sèche (en général l'attaque d'un métal par un gaz);
- La corrosion en milieu aqueux.

Dans la corrosion sèche, l'attaque oxydante se produit principalement à l'interface gaz/métal à température généralement élevée. Dans la corrosion humide, elle a lieu à l'interface métal/solution aqueuse pour une température ordinaire, mais jamais élevée (eau liquide) [1, 4, 6].

Cette classification est toutefois un peu simplificatrice car il existe des cas rares de corrosion en milieu liquide non aqueux (corrosion par les métaux liquides par exemple), ainsi que, pour la corrosion aqueuse, un cas particulier de corrosion faisant intervenir des organismes vivants (corrosion de type biochimique) [1].

## 1.2 La corrosion sèche

### 1.2.1 Introduction

Il s'agit le plus souvent de l'attaque d'un métal **M** par un gaz **G** selon une réaction du type:

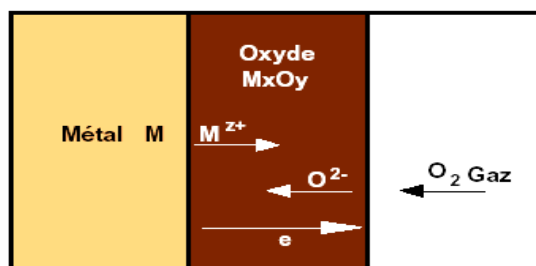


Où **X** est le produit de la corrosion, le plus souvent solide.

Le gaz considéré **G** est souvent l'oxygène, mais il faut aussi tenir compte d'autres gaz, tels que : SO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, Br<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>S.

### 1.2.2 Mécanisme

En présence d'un environnement sec contenant de l'oxygène et essentiellement à haute température, le métal, instable, tend à revenir sous sa forme oxydée stable. Il se recouvre alors d'un film d'oxyde qui croît progressivement avec une vitesse égale à la vitesse de corrosion. La figure 1.1 schématise la réaction d'un métal avec l'oxygène dans le cas des couches d'oxyde minces [1].



*Figure 1.1 : Mécanisme de l'oxydation d'un métal à haute température*

Le métal s'oxyde à l'interface métal-oxyde et les cations diffusent vers l'extérieur du film. A la surface extérieure, l'oxygène se réduit en anions  $O^{2-}$  qui diffusent vers l'interface métal-oxyde. Les électrons libérés à cette interface doivent traverser la couche d'oxyde avant de réagir avec l'oxygène externe. La surface extérieure du film joue donc le rôle de cathode et l'interface métal-oxyde celui d'anode. L'oxyde joue le rôle simultanément d'électrolyte et de conducteur électronique.

Il s'agit donc d'une réaction d'oxydo-réduction au cours de laquelle il y a transfert d'électrons. Le métal, réducteur, fournit les électrons à l'oxydant qui les accepte (ici l'oxygène) [1].

Il s'établit alors une liaison de type ionique au cours de laquelle les différents ions s'arrangent en un assemblage cristallographique bien défini avec grains et joints de grains [1].

Exemples :



Ces deux réactions se décomposent de la manière suivante :



## 1.3 La corrosion aqueuse

### 1.3.1 Introduction

La corrosion aqueuse est de nature électrochimique. Elle est caractérisée par l'apparition de courant électrique en dehors de toute source extérieure, c'est-à-dire par déplacement des électrons au sein de la masse métallique.

### 1.3.2 Thermodynamique électrochimique

#### 1.3.2.1 Equation de Nernst d'une réaction d'électrode

Soit **M** un métal en contact avec un solvant polaire tel que l'eau.



Cet équilibre correspond à un potentiel **E** représentant la différence de potentiel entre le métal **M** et la solution contenant les ions  $\text{M}^{z+}$ . **E** est le potentiel réversible de la réaction d'électrode.

Les échanges de courant électrique à l'interface métal-électrolyte sont régis par des différences de potentiel. A chaque réaction électrochimique correspond un potentiel dit d'électrode, qui peut être calculé par la loi de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{RT}{zF} \text{Ln} [M^{z+}] \quad (1.7)$$

R : constante des gaz parfait (83415J/mol.k)

T : température en degré kelvin

z : valence du métal

F : constante de Faraday (96500 C.mol<sup>-1</sup>)

$E_0$ , qui correspond à une concentration égale à 1, est dit *potentiel standard*, ou normal de l'électrode du métal **M** (potentiel du métal en équilibre avec une solution de ses ions de concentration égale à 1) de la réaction électrochimique.

### 1.3.2.2 Echelle des potentiels standard d'électrode

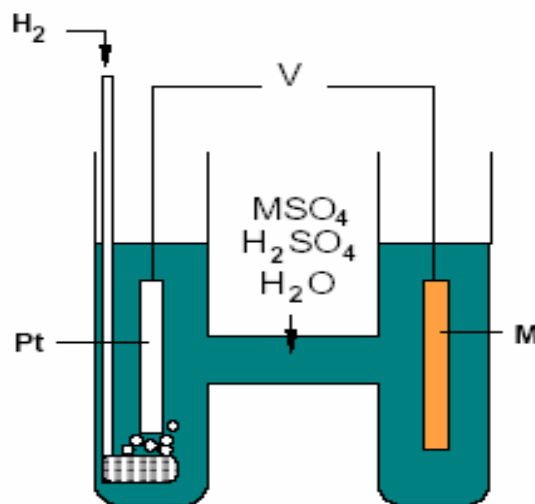
Une quantité telle que **E** n'est pas mesurable directement. Pourtant, la connaissance et la comparaison des potentiels d'équilibre de différentes réactions d'électrode s'avèrent nécessaires en électrochimie et en corrosion. Dans ce but, on mesure les potentiels d'équilibre **E** par rapport à une autre électrode à l'équilibre et en contact électrique avec la première par l'intermédiaire de la solution, et que l'on désigne sous le nom d'électrode de référence [1, 2, 8], [12-14].

L'électrode de référence arbitrairement choisie est l'électrode standard à hydrogène. Elle est constituée d'un métal inerte (platine) plongé dans une solution d'acide normale à 25 °C dans laquelle on effectue un barbotage d'hydrogène sous une pression de une atmosphère [1, 2, 5].

Le platine sert uniquement de donneur et d'accepteur d'électrons pour la réaction :



La cellule électrochimique utilisée est représentée à la figure 1.2 :



**Figure 1.2** : Cellule électrochimique  $H_2 / M$

La tension  $V$  mesurée correspond donc à la différence de potentiel entre le métal et l'électrode standard à hydrogène. Par convention, le potentiel  $E_H$  de cette électrode est arbitrairement pris comme égal à zéro [1-2].

Avec cette convention, on a donc en reprenant l'équation de Nernst [1]:

$$V = E = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln[M^{z+}] \quad (1.9)$$

Le potentiel standard  $E_0$  mesuré à l'aide du montage de la figure 1.2 devient égal au potentiel standard de l'électrode de métal  $M$  [1-2].

Les valeurs de  $E_0$  déterminées de cette manière pour différents matériaux constituent l'échelle de Nernst qui classe les métaux selon leur tendance à passer en solution à 25 °C  
Tableau 1.1.

**Tableau 1.1** : Potentiels standards d'électrodes par rapport à l'hydrogène

Métal	Equilibre	$E_0$ à 25 °C (volts)
Or	$Au^{3+} \rightleftharpoons Au^{3+} + 3e^-$	+1,42
Platine	$Pt \rightleftharpoons Pt^{2+} + 2e^-$	+1,20
Argent	$Ag \rightleftharpoons Ag^+ + e^-$	+0,80
Mercure	$Hg \rightleftharpoons Hg^{2+} + 2e^-$	+0,79
Oxygène	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightleftharpoons 4OH^-$	+0,40
Cuivre	$Cu \rightleftharpoons Cu^{2+} + 2e^-$	+0,34
Hydrogène	$2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons H_2$	0
Plomb	$Pb \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2e^-$	-0,13
Etain	$Sn \rightleftharpoons Sn^{2+} + 2e^-$	-0,14
Nickel	$Ni \rightleftharpoons Ni^{2+} + 2e^-$	-0,23
Cobalt	$Co \rightleftharpoons Co^{2+} + 2e^-$	-0,30
Cadmium	$Cd \rightleftharpoons Cd^{2+} + 2e^-$	-0,40
Fer	$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e^-$	-0,44
Chrome	$Cr \rightleftharpoons Cr^{3+} + 3e^-$	-0,60
Zinc	$Zn \rightleftharpoons Zn^{2+} + 2e^-$	-0,76
Aluminium	$Al \rightleftharpoons Al^{3+} + 3e^-$	-1,66
Magnésium	$Mg \rightleftharpoons Mg^{2+} + 2e^-$	-2,34

On peut constater de cette échelle, que les métaux comme l'or, l'argent ou le cuivre présentent des potentiels standard positifs, ne seront pas attaqués par l'eau, puisqu'ils s'oxydent moins facilement que l'hydrogène. Ce sont des métaux dits "nobles".

Une autre des applications pratiques de ce tableau est la protection d'un métal par un autre, par exemple celle du fer par le zinc qui s'effectue industriellement, soit par le procédé dit "galvanisation", soit au moyen d'anodes sacrificielles pour de très grandes surfaces (coque de navire).

Ce tableau constitue toutefois un guide imparfait, car dans certains cas de corrosion que nous aurons l'occasion d'étudier, le métal n'est pas en équilibre avec ses seuls ions, ce qui a pour effet de modifier son potentiel, ou encore de faire apparaître à sa surface un film passif, ce qui a également pour effet de modifier son potentiel, en rendant le métal plus noble.

### 1.3.2.3 Diagrammes de Pourbaix

Ainsi que nous l'avons vu lors de son établissement, l'équation de Nernst donnant le potentiel réversible d'une électrode dérive de la formulation plus générale du potentiel d'équilibre d'une réaction d'oxydo-réduction :

$$E = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{\prod_i [\text{espèces oxydées}]^{a_i}}{\prod_i [\text{espèces réduites}]^{b_i}} \quad (1.10)$$

où ( $a_i$ ) et ( $b_i$ ) représentent les coefficients stœchiométriques des espèces et  $z$  le nombre d'électrons mis en jeu par la réaction.

De nombreuses réactions d'électrode, et notamment celles conduisant à la formation d'oxydes en milieux aqueux, font intervenir les ions  $H^+$ . Le potentiel  $E$  d'une telle réaction va donc dépendre du pH de la solution, comme par exemple l'oxydation du chrome en milieux aqueux. [Annexe A]

Il est donc possible de représenter les différents équilibres en fonction du pH. Un tel diagramme est appelé diagramme Potentiel-pH ou diagramme de Pourbaix (Fig. 1.3). Par convention, ce diagramme de Pourbaix est établi pour une température de 25 °C et une concentration des espèces dissoutes de  $10^{-6} \text{ mol.l}^{-1}$  [1-3], [5, 6].

### 1.3.2.4 Exploitation du diagramme potentiel-pH

La superposition du diagramme potentiel-pH relatif au métal considéré avec le diagramme potentiel-pH du milieu agressif (en fait le diagramme de stabilité de l'eau pure pour différentes valeurs de pH) donne des indications, quant à la stabilité de ce métal dans ce milieu et, dans l'éventualité d'une possible corrosion, permet de prévoir la nature des produits obtenus [1-3], [5].

Dans cet exemple, le domaine de stabilité de l'eau et le domaine d'immunité du fer, n'ont encore pas d'intersection : la coexistence de ces deux éléments n'est thermodynamiquement pas possible. Il s'ensuit donc une évolution qui entraîne une oxydation du fer et une réduction de l'eau.

Selon la valeur du pH de l'eau, (il s'agit d'un pH local au voisinage immédiat de la surface du fer), le fer est oxydé soit en  $Fe^{2+}$ , soit en  $Fe(OH)_2$ , soit en  $HFeO_2^-$ . Dans le cas où l'eau est fortement aérée, cette oxydation peut conduire à la formation d'espèces plus oxydées comme  $Fe^{3+}$  et  $Fe(OH)_3$ . Lorsque le pH est compatible avec la formation d'un solide, soit

$\text{Fe(OH)}_2$ , soit  $\text{Fe(OH)}_3$ , la corrosion peut cesser rapidement par formation de couche passive à la surface du métal.

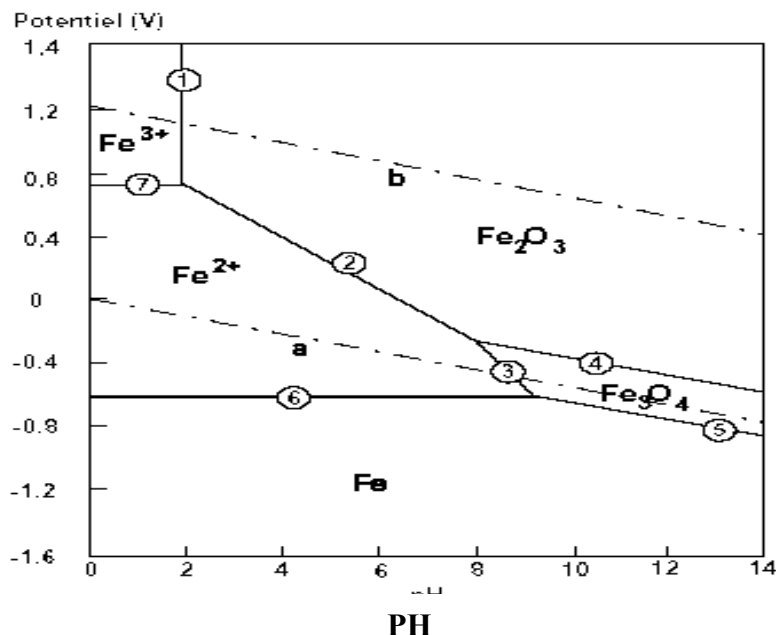


Figure 1.3 : Diagramme potentiel - pH simplifié du fer

Sur le diagramme de cette figure, sont aussi représentées deux droites (droite **a**) et (droite **b**). Le domaine compris entre ces deux droites correspond au domaine de stabilité de l'eau.

Dans le cas présenté en figure 1.4, on constate dans le cas d'un métal noble -par exemple l'or-, que quelque soit le pH et le degré d'aération de l'eau, les domaines de stabilité des deux éléments sont superposés, ceux-ci sont donc compatibles. Par conséquent, leur contact ne donne lieu à aucune réaction de corrosion. Le domaine de stabilité du métal est encore appelé "domaine d'immunité".

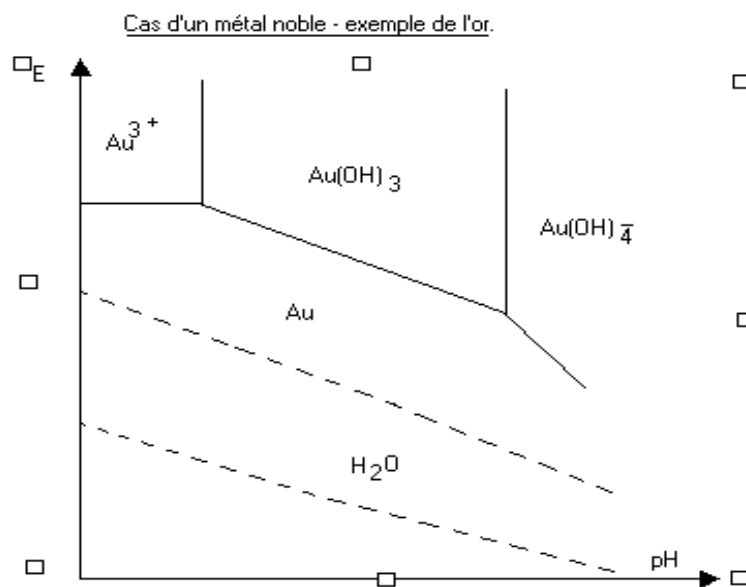
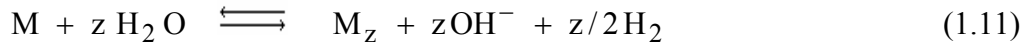


Figure 1.4 : Diagramme simplifié de l'or (échelle quelconque) superposé au diagramme de stabilité de l'eau

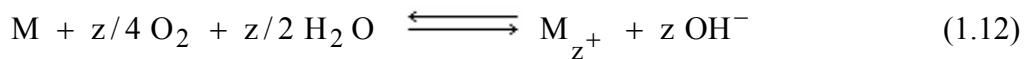


D'une manière générale, ces deux droites délimitent trois régions importantes :

- Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre, pour une concentration en ions de  $10^{-6}$  mol.l<sup>-1</sup>, est situé en dessous de la droite (a) sont attaqués par l'eau avec dégagement d'hydrogène selon la réaction :

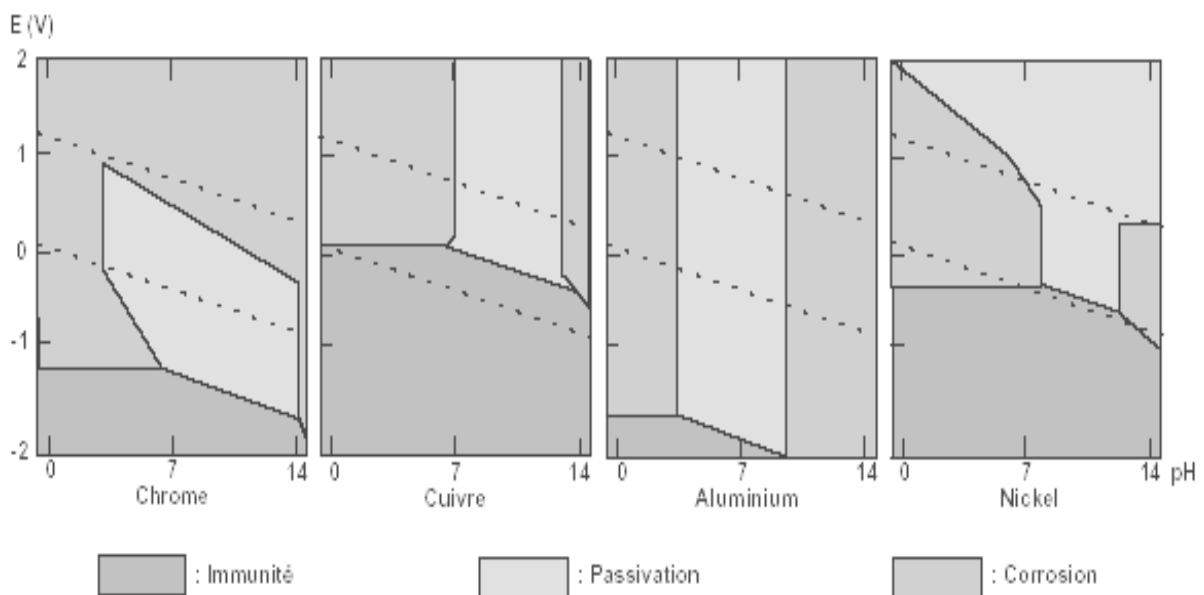


- Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre, pour une concentration en ions de  $10^{-6}$  mol.l<sup>-1</sup>, est situé entre les droites (a) et (b) ne sont attaqués qu'en présence d'oxygène selon la réaction :



- Tous les métaux dont le potentiel d'équilibre, pour une concentration en ions de  $10^{-6}$  mol.l<sup>-1</sup>, est situé au-dessus de la droite (b) sont thermodynamiquement stables.

Ainsi comme il a été déjà mentionné, les oxydes superficiels formés lors de l'attaque d'un métal peuvent avoir un pouvoir protecteur sur le métal sous jacent. On dit alors dans ce cas que le métal est passivable, le film superficiel prenant le nom de film passif. Dans le cas de l'attaque d'un métal par l'eau à 25 °C, les diagrammes de Pourbaix permettent donc de définir les domaines théoriques d'immunité, de passivation et de corrosion du métal considéré, comme illustré à la figure suivante (Fig. 1.5):



*Figure 1.5 : Domaines théoriques d'immunité, de passivation et de corrosion*

### 1.3.2.5 Limites du diagramme de potentiel-pH

Les diagrammes potentiel-pH sont à considérer comme des représentations qui indiquent, pour différentes valeurs de tension et de pH, les réactions qui sont théoriquement possibles. Ils permettent ainsi d'affirmer que, dans telles conditions de pH et d'aération (potentiel rédox) du milieu agressif, tel métal ne peut être corrodé –qu'il est donc immunisé–.

Ils peuvent aussi indiquer vers quel état peut évoluer un métal qui se corrode mais sans donner d'indication sur la vitesse d'une telle évolution [2].

Toutefois, les diagrammes de Pourbaix étant des diagrammes thermodynamiques, ne prédisent que des états d'équilibre et des possibilités théoriques de réaction, sans fournir aucune indication sur les vitesses, ils ne prennent pas en compte les phénomènes cinétiques. Ils n'indiquent pas, lorsque la corrosion est thermodynamiquement possible, si elle se produit avec une vitesse suffisante pour pouvoir être constatée effectivement dans un laps de temps compatible avec la durée prévue d'utilisation du matériau. La conclusion –corrosion possible– n'est pas déterminante puisqu'il peut y avoir passivation [2].

Seule la tendance à la corrosion est une propriété qui peut être déduite de ces diagrammes. Elle peut être positive, mais alors une étude cinétique s'impose. Dans le cas inverse où elle est négative, le métal est immunisé et ne peut donc se corroder.

Une seconde limitation de ces diagrammes résulte du fait qu'ils ne peuvent s'établir que pour des métaux purs et par conséquent aucune conclusion ne peut en être tirée en ce qui concerne les alliages (sauf, à la limite pour les métaux faiblement alliés) [2, 4].

Par ailleurs, ils peuvent être utilisés avec profit lors de l'analyse d'un cas de corrosion en permettant d'établir un diagnostic précis sur ses causes [1-7].

### **1.3.2.6 Potentiel de dissolution**

- **Définition**

Le potentiel de dissolution ou potentiel d'abandon est le potentiel auquel se place un métal en contact avec un milieu agressif. Il dépend de la nature du métal, de la composition et de la température du milieu. Etant un potentiel expérimental et non calculé, il prend en compte les facteurs thermodynamiques et cinétiques. Il permet ainsi de juger l'aptitude d'un métal à la corrosion : plus son potentiel de dissolution est bas, plus sa corrosion est aisée [3].

## **1.4 Aspect électrochimique de la corrosion**

### **1.4.1 Corrosion idiomorphe**

La corrosion idiomorphe ou par micropiles affecte un métal de pureté limitée lorsqu'il est en contact avec un milieu agressif. A l'échelle microscopique sur la surface de ce métal certains sites (impuretés) sont cathodiques, d'autres sont anodiques. Leur nature peut d'ailleurs changer très rapidement dans le temps, si bien que globalement on peut considérer que toute la surface est alternativement cathodique et anodique quand le site est cathodique, l'oxydant s'y réduit, lorsqu'il est anodique, le métal se corrode [1-2], [6].

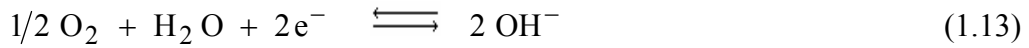
Ce type de corrosion se produit avec une vitesse plus ou moins grande chaque fois qu'un métal actif est en contact avec un milieu agressif. L'attaque n'est que superficielle et par conséquent n'a pas de conséquence importante sur les qualités mécaniques du métal. Si le milieu agressif n'est pas renouvelé, l'attaque peut cesser rapidement ; le métal prend alors un potentiel constant (potentiel de dissolution) [1-3].

### **1.4.2 Corrosion galvanique**

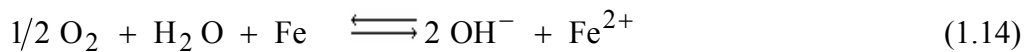
Deux métaux dissemblables, par exemple le cuivre (Figure 1.6) et le fer, sont plongés dans une solution d'électrolyte (eau de mer, par exemple) contenant de l'oxygène dissous en tant qu'oxydant. Si les deux métaux ne sont pas en contact électrique, ils se mettent chacun à un potentiel d'abandon différent : le cuivre, plus noble, prend un potentiel

supérieur à celui du fer – un état d'équilibre est atteint. Si on met les deux métaux en court-circuit, les électrons excédentaires accumulés dans le fer par rapport à ceux accumulés dans le cuivre, vont passer du fer au cuivre en produisant un courant électrique.

Le cuivre devient cathode, ce qui a pour effet de faire cesser sa corrosion idiomorphique (d'ailleurs négligeable) et d'amplifier la réduction de l'oxygène sur sa surface [1-3], [4-6]:

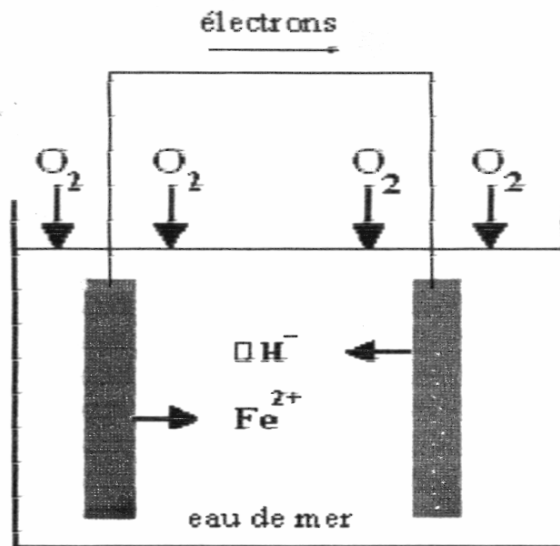


La réaction globale est :



Le processus ne s'arrête que lorsque l'oxydant est épuisé.

Ce processus est susceptible de se produire chaque fois, que sans précaution, dans un montage deux métaux de potentiels de dissolution différents, sont mis en contact électrique.



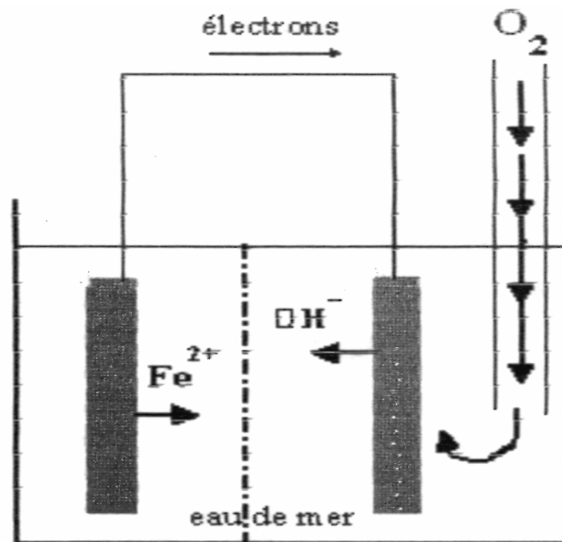
*Figure 1.6 : Montage mettant en relief les deux métaux en court-circuit*

### 1.4.3 Corrosion par aération différentielle

C'est le même montage que le précédent, mais avec deux électrodes identiques en fer et une solution d'électrolytes (eau de mer) séparée en deux parties par une membrane perméable aux ions mais pas à l'oxygène [1-2], [4-6].

Un barbotage d'air enrichit le compartiment de droite en oxygène. Après équilibrage des deux électrodes (celle de droite se fixe à un potentiel supérieur à celle de gauche car la demande électronique pour réduire l'oxygène sur sa surface y est supérieure), leur mise en court-circuit provoque le déplacement des électrons vers l'électrode de droite (Figure 1.7).

Ceci a pour effet, en la rendant cathodique de faire cesser sa corrosion idiomorphique et d'amplifier la réduction de l'oxygène dissous sur l'électrode de droite. L'électrode de gauche, pour satisfaire à une demande électronique supérieure, se corrodé de façon plus importante en devenant anode. La réaction globale est la même que dans le cas précédent.



**Figure 1.7 :** Montage mettant en relief la “corrosion différentielle”

Ce type de corrosion dit “corrosion différentielle” se produit lorsqu’un métal est mis en présence d’un milieu agressif contenant une concentration non homogène en oxydant.

## 1.5 Les différentes formes de corrosion aqueuse

### 1.5.1 Introduction

Le plus souvent, la première manifestation tangible de la corrosion est d’ordre visuel : On constate le phénomène par sa localisation ou par la modification de l’aspect extérieur de l’objet qu’il affecte.

Aussi, les diverses formes de corrosion que l’on rencontre ont souvent un nom évocateur de la manière dont elles se manifestent. C’est le cas de la **corrosion générale**, de la **corrosion par piqûres**, ou encore de la **corrosion intergranulaire**. D’autres formes de corrosion portent un nom associé au mécanisme mis en œuvre. C’est le cas de la **corrosion sous contrainte**, de la **corrosion par effet de crevasse** ou de la **corrosion-érosion**.

En réalité, il n’y a pas systématiquement de relation biunivoque entre le type de corrosion et la morphologie du dommage. Cette dernière permet tout au plus de privilégier certaines formes de corrosion possibles [1, 2].

### 1.5.2 Corrosion généralisée

Elle affecte toute la surface du métal exposé au milieu corrosif par suite d’une délocalisation des zones anodiques et cathodiques. Elle peut être uniforme ou non. C’est le cas de l’enrouillement de l’acier dans les environnements naturels. [1, 2, 4, 6]

### 1.5.3 Corrosion localisée

Elles proviennent de la localisation des zones anodiques en certains endroits de l’interface, pour des raisons d’hétérogénéité dans le métal ou dans l’électrolyte. La pénétration de la corrosion est d’autant plus rapide que le rapport de la surface anodique sur la surface cathodique est faible [1-3].

Citons, pour les hétérogénéités provenant de la phase métallique :

- La corrosion par piqûres, qui touche, par exemple, l'acier recouvert de calamine, ou les aciers inoxydables en milieux chlorurés;
- La corrosion intergranulaire des aciers inoxydables austénitiques sensibilisés à chaud par précipitation du carbure de chrome aux joints des grains;
- La corrosion sélective, touchant la phase la moins noble de la structure métallurgique (graphitisation des fontes grises, dézincification des laitons, désaluminisation des cupro-aluminiums, etc.);
- La corrosion galvanique ou bi-métallique, qui se traduit par l'accélération de la corrosion du métal le moins noble quand celui-ci est en continuité électrique avec un métal plus noble, exposé au même électrolyte. Ainsi, si on considère la série galvanique en eau de mer, on voit que si le fer est couplé avec un métal plus noble, comme le cuivre, il verra sa corrosion augmenter. Par contre, s'il est couplé avec un métal moins noble, comme le zinc, c'est ce dernier qui se corrodera plus rapidement en protégeant de ce fait, le fer. On effectue ainsi une protection cathodique par anode sacrificielle.

Pour les hétérogénéités dans la phase aqueuse, on peut citer :

- La corrosion par aération différentielle qui se traduit par un accroissement de la corrosion dans les zones les moins aérées, qui fonctionnent comme les anodes
- La corrosion par piles géologiques en est un exemple : une structure métallique, comme un pipeline ou un puits, qui rencontre plusieurs qualités de terrains, peut voir sa corrosion plutôt localisée dans les zones les moins aérées, telles que les argiles. De façon plus générale, des différences de nature des terrains peuvent conduire à une localisation préférentielle de la corrosion dans les zones où le milieu est le moins renouvelé (sous les dépôts, dans les recoins, sous les joints, etc.) [2, 5].

Cette forme de corrosion nous conduit à parler de piles électriques :

### ➤ Pile électrique

Deux métaux de nature différente sont plongés dans un même électrolyte constituent une pile électrique.

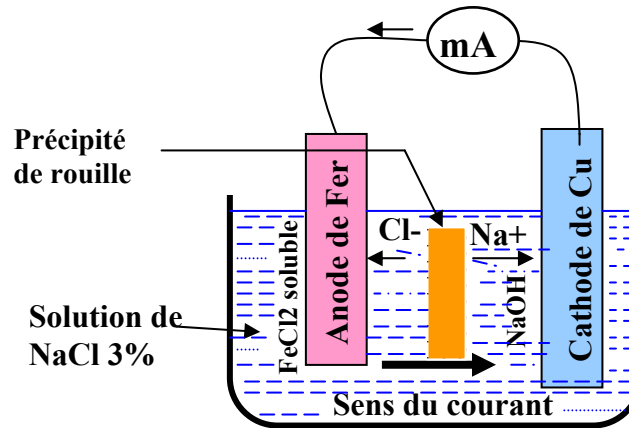
On mesurera une différence de potentiel entre ces deux métaux, proportionnelle à la différence de leur potentiel respectif. Si ces métaux sont réunis par un conducteur, un courant pourra circuler dans le circuit (Figure 1.8).

- Sur le métal le plus électronégatif (l'anode), les ions métal passent en solution et il y aura corrosion du métal.
- Sur le métal le plus électropositif (cathode) il y a un excès d'électrons qui empêche la mise en solution des ions métal. Il n'y aura donc pas de corrosion. (d'après ce qui a été déjà cité ci-dessus.

Une pile pourra aussi être constituée en immergeant deux électrodes d'un même métal dans un électrolyte présentant des différences de concentration: par suite de la nature différente des sols, de l'aération différentielle entre deux zones (ou évidemment s'il est constitué de métaux différents) [5].

Supposons que nous couplons du Fer et du Zinc comme nous avons déjà cité : L'anode de la pile sera le Zinc et la fem de la pile ainsi constituée vaudra : [5]

$$E_{(Zn-Fe)} = -0,77 - (-0,34) = -0,43 \text{ V}$$



*Figure 1.8 : Système de pile électrique*

Nous avons vu que pour un milieu donné, chaque métal peut être caractérisé par son potentiel de corrosion. Il est alors possible d'établir ce que l'on nomme des "séries galvaniques" qui donnent, pour un milieu considéré, le classement des différents métaux selon leur potentiel de corrosion mesuré expérimentalement. A partir de ces indications, il devient possible de prévoir le sens de la pile qui sera créée suite au couplage électrique de deux métaux différents. On observe alors un accroissement de la vitesse de corrosion du métal le moins noble (potentiel de corrosion le moins élevé) et une diminution de la vitesse de corrosion du métal le plus noble (potentiel de corrosion le plus élevé).

Cet effet peut être mis à profit pour lutter contre la corrosion en réalisant volontairement un couplage galvanique (protection cathodique) : le matériau sur lequel la réaction anodique est prépondérante (l'anode sacrificielle) protège le reste de la structure qui est le siège de la réaction cathodique. Ce phénomène est à l'origine du procédé bien connu de "galvanisation" visant à protéger l'acier par du zinc. Il faut toutefois bien distinguer la protection cathodique où le revêtement joue le rôle d'anode sacrificielle des cas où le revêtement est plus noble que le matériau à protéger. Dans le premier cas, c'est surtout la quantité d'anode sacrificielle (épaisseur du revêtement) qui est le facteur principal de la protection, alors que dans le second cas c'est la qualité du revêtement qui est primordiale (absence de défauts pouvant entraîner une attaque localisée du matériau sous-jacent). La corrosion due au couplage galvanique de deux matériaux va dépendre de nombreux paramètres que l'on peut regrouper dans les quatre (04) catégories suivantes [1-12] :

### 1) Paramètres liés aux matériaux

- Nature et composition des alliages;
- Impuretés;
- Présence de produits de corrosion ou de film superficiel.

### 2) Paramètres liés au milieu

- Composition, pH et impuretés;

- Résistivité, température et volume;
- Débit et agitation (phénomènes diffusionnels).

### 3) Paramètres liés à l'interface matériau-milieu

- Potentiels d'électrode;
- Cinétiques de réaction.

### 4) Paramètres liés à la géométrie

- du couple : rapport de surfaces anode / cathode et distribution spatiale;
- de la jonction : écartement, résistance de contact.

Les principaux effets d'interactions de phénomènes, autres que la corrosion, sont les suivants :

#### 1.5.4 Effets de courants vagabonds

Les courants vagabonds créant toujours des phénomènes de corrosion électrochimiques très violents et très rapides parce que le courant continu vient d'une source extérieure (tramways, trains électrifiés, etc.) et qu'il est généralement très important.

En tous points de la conduite où il y a sortie de courant vers le sol, il y a "départ de métal" toujours suivant les lois de Faraday, mais les ordres de grandeur des courants mis en jeu sont tout à fait différents des phénomènes précédemment cités.

Dans ce cas, il y a lieu de courants dont l'intensité est de l'ordre des ampères et même de dizaines d'ampères correspondant à des pertes de métal qui se chiffrent en grammes par heure [1, 2], [3-10], [12].

#### 1.5.5 Effets mécaniques

Dans la phase aqueuse, l'hydrodynamique joue un rôle important sur la vitesse de corrosion, en particulier dans les zones de forte turbulence, où l'on parle alors de corrosion-érosion. La présence de particules solides en suspension peut conduire à la corrosion abrasion. Enfin, on trouve les effets de la corrosion cavitation dans les pompes, les hélices de navires, etc. Dans la phase métallique, la présence de contraintes peut conduire à des corrosions fissurantes très graves : il s'agit de la corrosion sous tension quand les contraintes sont statiques [1, 2], [5, 6].

Les exemples les plus connus de ce type de corrosion concernant les aciers inoxydables austénitiques en milieux chlorés chaud (température > 60 °C). Des cas ont été rencontrés où l'acier au carbone de pipelines enterrés a été fissuré sous l'effet d'un milieu alcalin chaud, riche en carbonate, sous des revêtements décollés constituant un écran à la protection cathodique, et conduisant à un potentiel situé dans une zone critique. La fragilisation hydrogène est un cas particulier lié à la pénétration d'hydrogène atomique dans l'acier. Celle-ci peut être par la présence d'H<sub>2</sub>S en quantité suffisante dans le milieu corrosif. Les contraintes cycliques conduisent aux endommagements par fatigue corrosion; le niveau de polarisation cathodique a une influence complexe sur ce phénomène [1, 2], [4-6].

### 1.5.6 Effets biologiques

Certains milieux faiblement aérés (argiles, vases...) peuvent conduire à des corrosions dites "bactériennes". Ce type rassemble tous les phénomènes de corrosion dans lesquels les bactéries agissent directement ou par l'intermédiaire de leur métabolisme en jouant un rôle primordial, soit en accélérant un processus déjà établi, soit en créant les conditions favorables à son établissement. Lorsque les colonies de micro-organismes se fixent à la surface du matériau, elles créent ce que l'on appelle alors un bio film. Elles se présentent sous la forme de cratères. Les bactéries "désulfovibrio-désulfuricans" (ou réductrices de sulfates) dépolarisent la réaction cathodique en réduisant les ions sulfates en ions sulfures [1] :



Globalement, du sulfure de fer est formé :



En conclusion, les métaux dans le sol sont soumis à des attaques de tous types et très souvent plusieurs des causes précédemment citées agissent en même temps. Il est donc nécessaire de penser que, tout métal enterré ou immergé, le problème de la corrosion doit être examiné dans tous les cas. Il est notamment important de ne pas remplacer un tuyau corrodé par un tuyau de même nature ou de nature différente sans avoir cherché à expliquer la cause de la corrosion initiale [1-14].

Pour y remédier à ce phénomène, il y a différents types de protection.

## 1.6 Protection et lutte contre la corrosion

### 1.6.1 Généralités

La prévention de la corrosion doit être envisagée dès la phase de conception d'une installation. En effet, des mesures préventives prises au bon moment permettent d'éviter de nombreux problèmes lorsqu'il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet, notamment pour des industries telles que le nucléaire, l'industrie chimique ou l'aéronautique, où les risques d'accident peuvent avoir des conséquences particulièrement graves pour les personnes et l'environnement [1-7], [9-12].

La protection contre la corrosion comprend les méthodes suivantes :

- Choix judicieux des matériaux; (Annexe B)
- Forme adaptée des pièces; (Annexe B)
- Ajout d'inhibiteurs aux circuits;
- Utilisation de revêtements;
- Protection électrochimique.

### 1.6.2 Emploi d'inhibiteurs de corrosion

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement. [1, 2], [3, 6], [12].



En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action. On distinguera ainsi :

- Les inhibiteurs anodiques;
- Les inhibiteurs cathodiques;
- Les inhibiteurs induisant une précipitation;
- Les inhibiteurs organiques.

### 1.6.2.1 Inhibiteurs anodiques ou passivant

Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a formation d'un film passif protecteur. La concentration en inhibiteur doit être suffisante pour atteindre l'intensité critique de passivation.

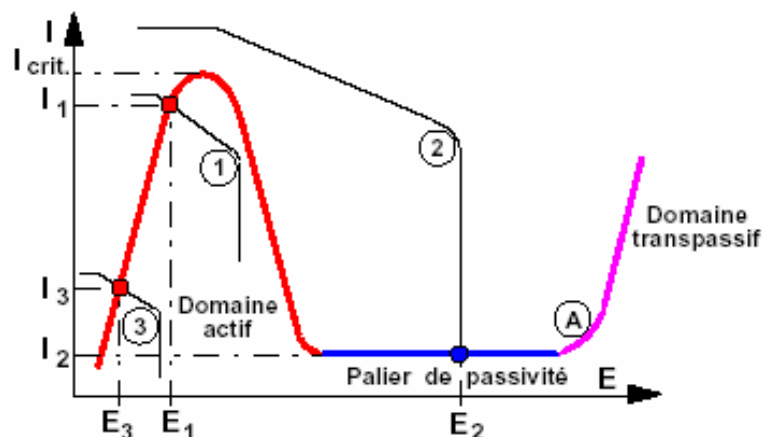
Il existe deux catégories d'inhibiteurs passivant :

- Les ions oxydants comme  $\text{CrO}_4^{2-}$  qui peuvent passiver l'acier en l'absence d'oxygène;
- Les ions non oxydants ( $\text{M}_2\text{O}_4^{2-}$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{B}_4\text{O}_7\text{Na}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{COONa}$ ) qui nécessitent la présence d'oxygène et déplacent la réaction cathodique de réduction de ce dernier en favorisant son adsorption à la surface du métal.

Tous ces ions se consomment lentement et il est donc nécessaire de contrôler périodiquement la concentration du circuit lors de l'utilisation de tels inhibiteurs. En effet, une concentration insuffisante déplacera la réaction cathodique vers la gauche et provoquera une accélération de la corrosion. [1]

### 1.6.2.2 Inhibiteurs cathodiques

Au contraire des précédents, l'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles (Figure 1.9). Suivant leur mode d'action, on peut les classer en trois catégories : [1]



**Figure 1.9 :** Courbe anodique A d'un métal passivable avec trois réactions cathodiques

- 1: courbe cathodique sans inhibiteur (potentiel et courant de corrosion  $E_1$  et  $I_1$ );
- 2: courbe cathodique avec inhibiteur passivant (potentiel et courant de corrosion  $E_2$  et  $I_2$ );
- 3: courbe cathodique avec inhibiteur cathodique (potentiel et courant de corrosion  $E_3$  et  $I_3$ ).

Les poisons cathodiques : ils rendent plus difficile la réduction des ions  $H^+$ . Ce sont par exemple les composés à base d'arsenic, d'antimoine ou de bismuth. Toutefois, ces composés inhibant la recombinaison moléculaire de l'hydrogène, favorisent sa pénétration dans le matériau et peuvent donner lieu à la formation de cloques ou à une fragilisation par l'hydrogène.

Les précipités cathodiques : les carbonates de calcium et de magnésium ont tendance à précipiter sur les sites cathodiques qui présentent un pH plus élevé. De même, les sels de zinc peuvent précipiter sous forme d'hydroxydes. Dans le cas de l'utilisation de ce type d'inhibiteur, le pH du milieu doit être ajusté afin de ne pas précipiter les sels sous la forme d'une suspension non protectrice.

Les désoxygénants : au dessus d'un pH de 6, la corrosion de l'acier est liée à la présence d'oxygène dissous. L'addition de composés tels que les sulfites ( $Na_2SO_3$ ) ou l'hydrazine ( $N_2H_4$ ) permet d'en diminuer la concentration. Toutefois, l'ajout de catalyseurs est souvent nécessaire.

### 1.6.2.3 Inhibiteurs organiques

Ils constituent un groupe important qu'il est difficile de classer dans les catégories précédentes car ils modifient à la fois les réactions anodique et cathodique en affectant l'ensemble de la surface. Quant à leur efficacité, elle est fonction de leur concentration [1, 2].

## 1.6.3 Utilisation de revêtements

### 1.6.3.1 Les revêtements métalliques

On les emploie couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets. D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques [1], [2-3], [6, 9], [10, 12].

**Les revêtements *anodiques*** - le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc) que nous avons déjà évoqué. En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. Plus que l'absence de défaut, c'est donc l'épaisseur qui est un élément important de ce type de revêtement. En général, elle est comprise entre 100 et 200  $\mu m$  [1].

**Les revêtements *cathodiques*** - le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial [1, 2], [9, 10].

Concernant les techniques de revêtement métallique, les revêtements organiques et ses techniques et revêtements étranger aux substrats. (Annexe B).

### 1.6.4 Protection électrochimique

Parmi les moyens employés pour lutter contre la corrosion, la protection électrochimique doit son originalité au fait qu'elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet, cette méthode consiste à imposer au métal à protéger une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse d'attaque devient très faible, voire nulle.

On distingue la protection *cathodique* qui consiste à abaisser le potentiel d'électrode du métal, et dont le principe est connu depuis longtemps puisque les premières observations de ce phénomène sont dues à Sir H. Davy qui remarqua en 1824 que lorsque deux métaux différents (Cu et Zn) plongés dans un milieu corrosif sont reliés électriquement, la vitesse de corrosion de l'un augmente alors que celle de l'autre diminue. Peu après, H. Becquerel préconisa l'utilisation de lames de zinc pour la protection des conduites en fonte.

La protection *anodique*, d'origine plus récente, repose sur l'aptitude à la passivation du matériau dans le milieu considéré, ainsi que nous l'avons vu au paragraphe consacré aux inhibiteurs [1-3], [5-7], [9, 10], [12, 13].

#### 1.6.4.1 La protection cathodique

Comme il a été vu précédemment, elle consiste à abaisser le potentiel du métal à protéger à une valeur inférieure à  $E_p$ , potentiel de protection en dessous duquel la réaction d'oxydation du métal devient négligeable. Cet abaissement du potentiel est obtenu par passage d'un courant entre la surface à protéger (cathode) et une électrode auxiliaire (anode) [1, 2], [3-14], [19].

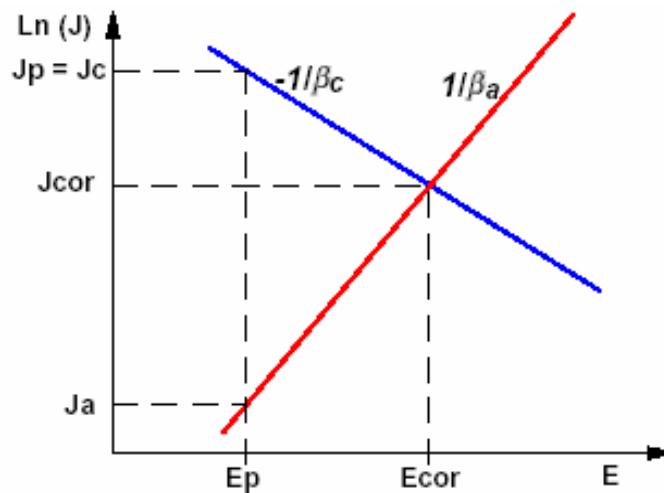
La mesure du potentiel en chaque point permettra de vérifier si la condition  $E < E_p$  est bien vérifiée, c'est-à-dire que le courant anodique passant de la structure à protéger vers le milieu corrosif est négligeable. En théorie, on peut définir  $E_p$  à partir de la loi de Nernst par l'équation suivante [1] :

$$E_p = E_0 + \frac{RT}{zF} \ln 10^{-6} \quad (1.19)$$

$E_p$  correspond donc dans ce cas à la valeur du potentiel pour laquelle l'équilibre électrochimique s'établit à  $10^{-6}$  mol.l<sup>-1</sup> de métal en solution (valeur utilisée dans les diagrammes de Pourbaix pour définir la frontière du domaine d'immunité) [1-6], [9-13].

Dans la pratique, on utilise souvent des valeurs déterminées empiriquement. Pour l'acier dans l'eau de mer par exemple, on admet une valeur de  $E_p$  de -0,85 V par rapport à l'électrode au sulfate de cuivre. Dans certains cas, la valeur peut être moins négative suite à une précipitation de carbonates qui, ainsi que nous l'avons vu, peut créer une couche freinant la diffusion du fer. Lorsque l'acier est enterré, on admet que pour le protéger dans des conditions aérobies son potentiel naturel doit être abaissé de 300 mV. En milieu anaérobie par contre, cette diminution doit être de 400 mV [1].

La densité de courant cathodique  $J_p$  nécessaire pour obtenir le potentiel de protection peut être déduite des courbes de polarisation anodique et cathodique telles que représentées à la figure 1.10.



**Figure 1.10 :** Principe de la protection cathodique : courant et potentiel de protection

Au potentiel de protection, la densité de courant partiel anodique  $J_a$  due à l'oxydation du métal étant négligeable (but recherché), la densité de courant de protection  $J_p$  nécessaire équivaut donc pratiquement à compenser la valeur de la densité de courant cathodique  $J_c$  due à la réduction de l'oxydant à ce potentiel ( $J_p = J_c - J_a = J_c$ ) [1, 9].

#### a) Réalisation pratique de la protection cathodique

- **Emplacement des anodes**

L'emplacement des anodes est souvent imposé par des considérations géométriques ou techniques. Toutefois, lorsque le choix est possible et dans le cas d'une corrosion uniforme, les anodes seront plus efficaces en étant réparties de façon régulière. Par contre, dans le cas d'une corrosion localisée, les anodes seront plus efficaces si elles sont positionnées près d'une zone cathodique. De même, lorsqu'il y a circulation de liquide, on placera les anodes dans les régions les plus aérées [1].

- **Mode d'imposition du courant**

La protection cathodique consistant à abaisser le potentiel par imposition d'un courant extérieur à partir d'une anode auxiliaire, on peut utiliser un courant d'origine galvanique par couplage avec un métal moins noble en créant ainsi une pile de corrosion à grande échelle dans laquelle le métal à protéger constitue la cathode, l'anode seule étant le siège d'une réaction de corrosion : c'est la protection par **anode sacrificielle** que nous avons déjà évoquée lors de l'étude de la corrosion galvanique.

Il est aussi possible d'utiliser un générateur de courant continu relié à la structure à protéger et à une anode qui sera dans ce cas non attaquable : c'est la protection par **courant imposé**.

Dans la protection par anode sacrificielle, le métal à protéger est à un potentiel supérieur ou égal à celui de l'anode, la différence possible étant due à la chute de potentiel introduite par la résistance de la liaison entre anode et cathode.

Dans le cas d'un courant imposé au contraire, il s'agit d'une véritable cellule d'électrolyse et le potentiel du métal à protéger sera inférieur à celui de l'anode. Ce paradoxe apparent résulte du fait que dans le premier cas le système se comporte comme une pile (générateur de courant), alors que dans le second cas il est au contraire relié à un générateur de courant extérieur [1, 2], [3-6].

- **Choix des anodes sacrificielles**

Les anodes sacrificielles doivent satisfaire aux conditions suivantes [1, 2] :

- Avoir un potentiel d'électrode suffisamment négatif pour pouvoir polariser rapidement le matériau à une valeur suffisante;
- Elles ne doivent pas se polariser lors du passage du courant. En particulier, les produits de corrosion ne doivent pas former de film adhérent susceptible de modifier la valeur du potentiel;
- Elles doivent se corroder de manière uniforme dans le milieu considéré, et ne pas être fortement attaquées en l'absence de courant;
- Elles doivent avoir une bonne conductibilité, une bonne résistance mécanique, et pouvoir être obtenues facilement dans des formes et des dimensions variées;
- Elles doivent enfin avoir un coût économiquement supportable.

Dans la pratique, seuls trois matériaux satisfont ces critères : ce sont le zinc, l'aluminium, et le magnésium.

- **Choix des anodes à courant imposé**

Les critères de choix pour ces anodes sont les suivants [1, 2] :

- Ne pas être attaquées par le milieu corrosif;
- Avoir une bonne conductibilité, ainsi qu'une bonne résistance mécanique;
- Ne pas être trop onéreuses.

On utilise dans la pratique des alliages fer-silicium avec faible addition de chrome, dont l'inconvénient majeur est la fragilité mécanique. Les graphites, eux aussi fragiles, sont utilisés pour la protection des structures enterrées. On emploie aussi parfois des alliages de plomb contenant de l'argent, de l'antimoine ou de l'étain que l'on polarise au préalable afin de favoriser la formation d'une couche protectrice de  $PbO_2$ . Enfin, l'utilisation des métaux précieux comme le platine, ou les alliages platine-iridium et platine-palladium est aussi pratiquée. Le platine-palladium est notamment de plus en plus utilisé car il permet des densités de courant élevées de l'ordre de  $30 \text{ A.dm}^{-2}$ .

Le tableau suivant (Tableau 1.2) rassemble les avantages et les inconvénients des deux types d'anodes présentés. [1]

### **b) Principaux domaines d'application**

La protection cathodique est généralement utilisée en association avec un autre mode de protection conventionnel par revêtement ou par peinture, ceci afin de limiter la densité de courant fournie par les anodes ou le générateur. Parmi les principaux domaines d'application on peut citer [1-16] :

- Les structures enterrées : il s'agit des canalisations, des réservoirs de stockage, etc. La disposition des anodes est fonction de la taille des installations.
- Les structures immergées : carènes ou installations fixes (jetées, appontements, plates-formes de forage offshore) en eau de mer ou en eau douce.

- Les structures contenant l'agent corrosif : réservoirs, citernes, cales de navires, conduites, condenseurs...

**Tableau 1.2** : Comparaison entre anodes sacrificielles et anodes à courant imposé

<b>Anodes sacrificielles</b>	
<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
La f.e.m est fournie par l'électrode	Source de courant onéreuse
Peu de surveillance	Débit dépendant du bon contact avec le métal à protéger
Installation facile	Systèmes lourd et encombrant.
Pas d'isolement.	
<b>Anodes à courant imposé</b>	
<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Le courant est ajusté à la valeur voulue	Difficulté d'installation
Système léger, peu d'anodes	Coût élevé d'installation (isolation, écrans diélectriques)
Énergie électrique peu coûteuse	Système fragile et vulnérable.

La protection cathodique peut aussi contribuer à limiter certains phénomènes particuliers de corrosion localisée comme la corrosion sous contrainte ou la fatigue corrosion pour les aciers inoxydables, les alliages d'aluminium, ou le bronze. Ainsi que nous l'avons déjà signalé, elle est toutefois déconseillée lorsqu'il y a risque de production d'hydrogène cathodique pouvant fragiliser le métal.

#### 1.6.4.2 La protection anodique

Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Nous rappellerons rapidement les conditions devant être remplies pour qu'un métal puisse être passif :

- La courbe courant-potentiel présente un palier de passivité;
- Le film passif est conducteur électronique et son épaisseur est de l'ordre de 10 nm;
- Sa formation ne doit pas nécessiter une quantité d'électricité supérieure à  $10^{-2} \text{ C.cm}^{-2}$ ;
- Il doit être relativement insoluble dans les acides.

La technique de protection anodique peut être envisagée dans des milieux tels que les acides oxygénés (nitrique, sulfurique, ou phosphorique), les nitrates alcalins, pour des métaux tels que l'acier ordinaire ou inoxydable, le titane, le zirconium, le hafnium, ou le niobium. Les alliages à base de cuivre ne sont pas passivés.

Parmi les exemples industriels d'utilisation, on peut citer la protection d'une cuve de camion citerne en acier inoxydable destinée au transport d'acide sulfurique.

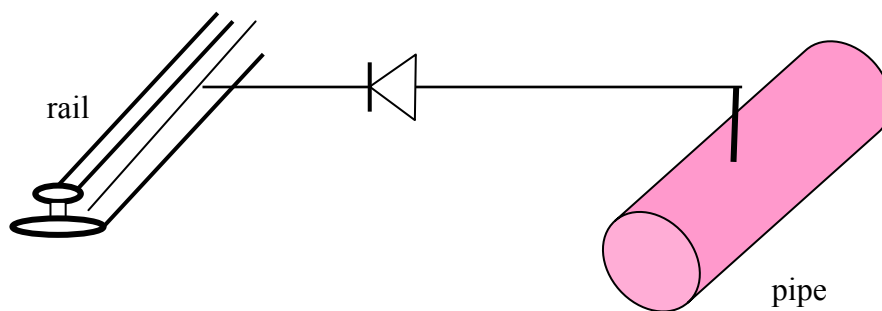
Avant d'employer cette méthode, il est nécessaire d'avoir recours à des essais préliminaires permettant de déterminer la densité de courant correspondant à l'établissement de la

passivité ainsi que le domaine de potentiel pour lequel le matériau reste passif, c'est-à-dire l'étendue du palier de passivité.

Le tracé des courbes courant-potential permet de déterminer ces valeurs en fonction de divers paramètres (concentration du milieu, température,...). Il faut d'autre part, dans une installation complexe, s'assurer qu'en tout point le potentiel est bien situé sur le palier de passivité [1-2, 5-8].

### 1.6.4.3 Protection par drainage des courants vagabonds

La protection par drainage consiste à diriger les courants vagabonds, et à les ramener à leur source par un chemin préférentiel, de la plus faible résistance possible, en créant une liaison unidirectionnelle entre les deux structures qui empêchera l'entrée des courants venant de la voie positive (Fig. 1.11) [1, 2], [5, 6].

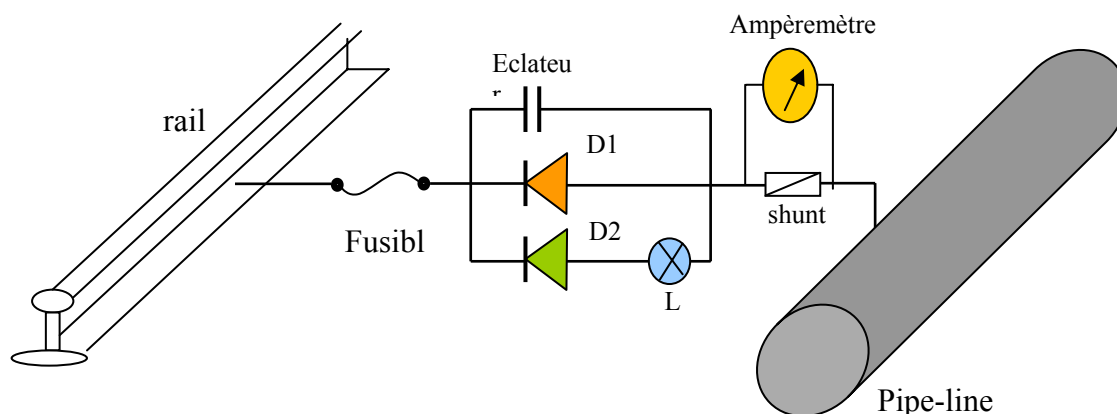


*Figure 1.11 : Principe du drainage*

Bien que basés sur ce principe, les appareils de drainage sont évidemment un peu plus élaborés car ils comprennent des dispositifs de sécurité (contre les surintensités et les surtensions), des dispositifs de limitation des courants ainsi que des appareils indicateurs.

Notez aussi que ce type d'appareil devra être homologué par le propriétaire des rails [2, 5].

La figure 1.12 montre à titre d'illustration le principe d'un drainage à cellule silicium (brevet GDF) qui ne permet le passage du courant que dans le sens conduite-rail [2] [5].



*Figure 1.12 : Principe de l'appareil GDF*

La tension de seuil des diodes au Silicium (D1) étant de l'ordre de 0,7 V, on utilise une diode au Germanium D2 (seuil 0,1-0,2 V) pour drainer lorsque la tension conduite-rail est plus faible. Cette diode, plus fragile, est protégée par une résistance ou une lampe fusible L. Un éclateur protège les diodes contre les tensions de voies ferrées trop positives. Le shunt permet de mesurer le courant du drainage.

### **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales notions sur le phénomène de corrosion et sur les différents moyens de lutte contre la corrosion. Parmi ces moyens, la protection cathodique par soutirage de courant est une technique bien connue et déjà éprouvée. L'alimentation en énergie de ce système de protection cathodique des structures métalliques enterrées s'effectue à partir du secteur monophasé ou triphasé selon la puissance nécessaire. D'autres types d'alimentations énergétiques sont généralement employés, notamment en zones désertiques du fait de l'inexistence de sources électriques conventionnelles. La description des principes de base de la technique de protection cathodique avec ses caractéristiques et ses critères, la réalisation de la protection cathodique à courant imposé (par soutirage de courant) et les différents systèmes électriques qui lui sont appliqués seront présentés dans le chapitre suivant.



# **Chapitre 2**

## **La protection cathodique par soutirage de courant**

## **Chapitre 2**

### **La protection cathodique par soutirage de courant**

#### **2.1 Introduction**

Dans le chapitre précédent, il a été vu que cette technique peut être réalisée selon deux modes. La protection cathodique par courant imposé ou appelée encore par ‘soutirage de courant’ est le mode de protection le plus utilisé [1-6]. C’est ce qui est étudié dans le cadre de ce travail.

La technique de la protection cathodique par soutirage de courant est caractérisée par les paramètres suivants : - le potentiel pris par la structure métallique protégée, - l’intensité du courant de protection, - la résistance électrique des éléments du système de protection.

#### **2.2 Potentiel d’injection**

Dans le cas des structures longilignes (pipelines), le potentiel d’injection est défini comme étant l’abaissement du potentiel qu’on doit assurer au point de soutirage, afin d’avoir aux extrémités de la conduite des valeurs conformes au critère de protection (c’est-à-dire inférieure à -850mV par rapport à une électrode de référence Cu/CuSO<sub>4</sub>) [1, 2], [3-6], [9-16].

#### **2.3 Courant de protection**

Le courant de protection est défini comme étant l’intensité de courant totale nécessaire, à injecter dans la structure afin d’assurer un abaissement de potentiel conforme au critère de protection [1, 2], [3-14].

#### **2.4 Résistance transversale de l’isolement de la structure à protéger**

La résistance transversale de l’isolement de la structure est donnée par le revêtement de la conduite pour un mètre de la conduite (exprimée en Ohm par mètre de longueur).

#### **2.5 Valeur d’isolement**

La valeur d’isolement, qui est introduite dans les calculs, correspond à la résistance transversale. Cette valeur ne permet pas la comparaison de deux conduites de diamètres différents. C’est pourquoi on utilise fréquemment la résistance d’isolement.

#### **2.6 Résistance d’isolement**

La résistance d’isolement, exprimée en  $\Omega.m^2$ , est la résistance électrique par rapport au sol d’un mètre carré de canalisation revêtue. En fait, cette résistance ne dépend pas de la nature du produit de revêtement utilisé (bitume, polyéthylène, etc.) dont les résistivités sont toujours très élevées, mais elle dépend surtout des défauts de ces revêtements. En effet, c’est à l’endroit des trous dans le revêtement que le métal est en contact avec le sol et ce sont par ces seuls points que le courant de protection puisse pénétrer dans la canalisation. La notion de résistance d’isolement d’une canalisation est donc très importante en

protection cathodique, et elle doit être utilisée avec beaucoup de précaution, car elle influe directement sur l'intensité du courant de protection [2], [3, 4], [11, 12], [16].

## 2.7 Résistance longitudinale

Les ouvrages métalliques traversés par le courant de protection sont considérés comme des conducteurs, présentant donc une résistance au passage d'un courant électrique. Dans le cas des canalisations, cette résistance est appelée résistance longitudinale et dépend de la nature du matériau et des dimensions des conduites [2, 3], [4], [9], [11, 12], [16].

## 2.8 Critère de la protection cathodique

Si le principe est simple, l'application est plus difficile. C'est pourquoi les praticiens ont adopté plusieurs critères de protection cathodique souvent basés sur l'expérience. Le critère le plus utilisé est le critère de potentiel, car c'est le plus aisé à appréhender.

D'après Pourbaix, le seuil théorique d'immunité d'un métal plongeant dans une solution est en équilibre avec ses ions. Ce seuil est déterminé à l'aide des diagrammes construits par ce dernier. Ce sont des diagrammes théoriques dont la construction a été basée sur les équilibres chimiques et électrochimiques.

Le National Bureau of Standard (NBS) aux Etats-Unis a fait de nombreux essais tant en laboratoire que dans des sols naturels très divers et a admis que pour l'acier dans le sol, la valeur de seuil d'immunité de  $-0.850$  Volt ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ). Cette valeur est retenue dans le document standard de NACE (National Association of Corrosion Engineers) [1, 2], [3-13].

## 2.9 Technique de protection cathodique par soutirage de courant

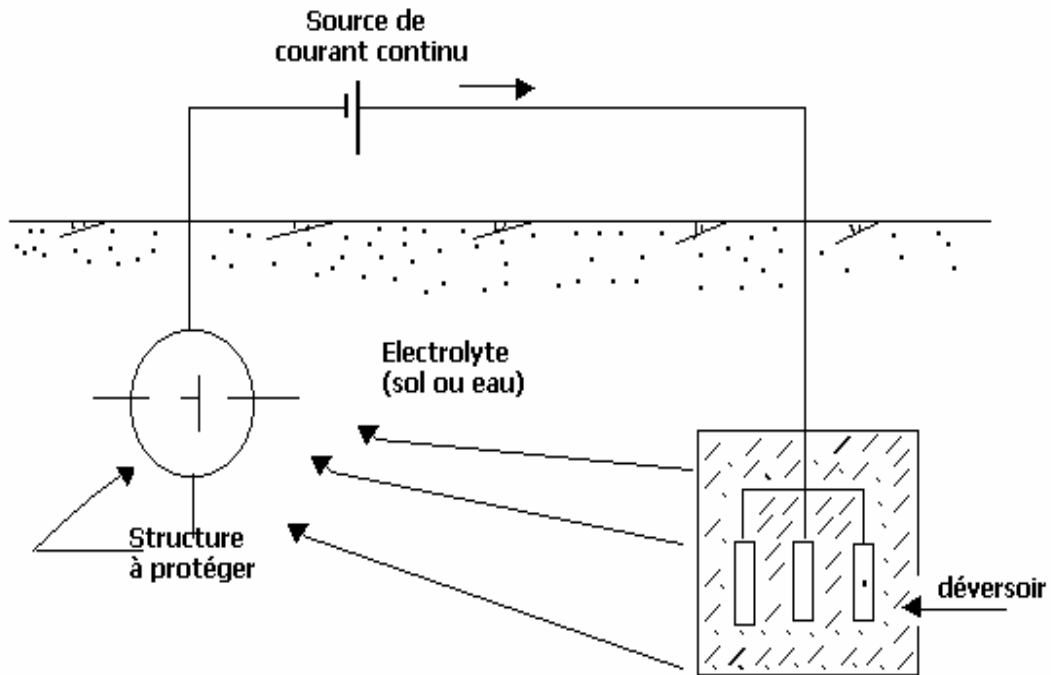
### 2.9.1 Principe

Cette technique consiste à soutirer la quantité de courant nécessaire à la protection par l'intermédiaire d'une source électrique. Cette source débite dans un circuit comprenant :

- Un déversoir (ou masse anodique);
- L'électrolyte (sol ou eau);
- La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir, alors que le pôle négatif est relié à la structure à protéger.

Les entrées de courants diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du poste de soutirage, donc par conséquent il faudrait qu'aux points extrêmes (par rapport au poste de soutirage), on obtienne le potentiel minimal de protection du métal considéré [2, 3], [4-6], [9-13].



**Figure 2.1** : Principe de la protection cathodique par soutirage de courant

Le courant venant du déversoir traverse le sol, puis entre dans la structure créant ainsi l'abaissement de potentiel recherché.

Dans le cas de structures en acier enterrées dans le sol ou immergées dans l'eau de mer, l'immunité est obtenue lorsque le potentiel, mesuré avec une électrode de référence au cuivre/sulfate de cuivre saturé (Cu/CuSO<sub>4</sub>) est inférieur à  $-0.850$  Volt en tous points de la structure. Généralement, et pour tenir compte de phénomènes annexes (présence de bactéries, par exemple), la valeur limite que l'on cherche à atteindre est d'environ  $-1$  Volt [6].

### 2.9.2 Choix de l'emplacement du poste de soutirage

Le meilleur emplacement du poste est celui qui permet d'assurer la protection la plus efficace sur la plus grande portée pour une puissance minimale, en tenant compte des paramètres suivants [1, 2], [3-6], [12, 16] :

1. la forme générale de la structure et sa longueur;
2. l'ensoleillement (dans le cas où la source serait un générateur photovoltaïque);
3. le degré d'agressivité des sols où les conduites sont posées;
4. la faible résistivité des terrains;
5. le ou les points les plus favorables à l'installation de la prise de terre;
6. l'encombrement du sol en structures diverses;
7. la facilité d'accès

### 2.9.3 Réalisation des soutirages

La technique de protection cathodique par courant imposé se définit par les deux paramètres suivants [2, 6] :

- la densité de courant de protection;
- les caractéristiques du générateur.

#### 2.9.3.1 La densité de courant de protection

L'abaissement de potentiel d'un métal à une valeur donnée est obtenu en injectant dans ce métal une densité de courant nécessaire à cet abaissement. La densité de courant qui est l'intensité par unité de surface, dépend essentiellement [2, 3, 5, 12, 16] :

- de la qualité d'isolement du revêtement;
- de l'agressivité du milieu environnant.

Cette densité est définie par une valeur moyenne égale à la totalité du courant de protection divisée par la surface totale de l'ouvrage à protéger.

#### 2.9.3.2 Les caractéristiques du générateur

Le débit de l'appareil est défini par la loi d'ohm [2, 4, 5] :

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.1)$$

Où U : est la tension de la source de courant continu, et R : est la résistance du circuit.

La tension U se situe habituellement dans la catégorie très basse tension (TBT) inférieure à 50 Volt. Néanmoins, il peut arriver que la tension délivrée par le générateur soit supérieure à la limite de la TBT [2].

La résistance du circuit est en général conditionnée par la résistance de la masse anodique. Il y a donc intérêt à obtenir pour cette masse anodique, une résistance aussi faible que possible. Cependant, dans certains cas particuliers (revêtement à forte valeur d'isolement), la résistance de contact avec le sol de la structure n'est pas négligeable et doit être prise en compte dans la valeur de la résistance du circuit.

Il est très important de noter que si, par exemple, un poste débitant 10 A protège 10 km de conduite, ce même poste débitant 20 A ne protégera pas 20 km, mais une longueur inférieure du fait de l'atténuation exponentielle.

### 2.10 Constitution des systèmes de protection cathodique par soutirage de courant

Pratiquement, un poste de protection cathodique à courant imposé comprend [2], [4-6], [9-13], [16] :

1. la source d'énergie;
2. le déversoir;
3. les câbles de liaison;

#### 4. l'appareillage électrique auxiliaire. (Annexe C)

##### 2.10.1 La source d'énergie

La source d'énergie peut être constituée par :

###### a) des transformateurs ~ redresseurs :

Lorsqu'on dispose de l'énergie électrique, on utilise comme générateur, un transformateur redresseur relié au réseau électrique et se composant :

- d'un transformateur abaisseur de tension;
- d'un dispositif de redressement constitué par un pont de diode en silicium;
- d'un ampèremètre et d'un voltmètre permettant de contrôler la tension et l'intensité du courant continu de sortie.

Il existe des transformateurs redresseurs à régulation automatique où l'intensité et la tension de sortie sont contrôlées automatiquement.

Ces générateurs à transformateurs redresseurs peuvent protéger des sections de conduites pouvant atteindre 100 km de longueur dans certains cas, mais il faut qu'on ait un abaissement du potentiel conduite/sol au point d'injection suffisamment fort. Ce fort abaissement peut avoir des effets nuisibles tel que le décollement de l'enrobage.

L'utilisation des transformateurs redresseurs est liée à la disponibilité d'un réseau local de distribution de l'énergie électrique [2].

En cas d'absence de tels réseaux, ou pour d'autres raisons techniques ou économiques, il est intéressant de disposer de sources autonomes, dont le lieu d'installation n'est plus tributaire d'un réseau.

Un autre avantage de ces sources est de permettre un "lissage" de la courbe des potentiels de protection, par une meilleure répartition des postes de soutirage [2, 6].

###### b) des groupes électrogènes

Le générateur électrique (alternateur ou dynamo) est entraîné par un moteur thermique.

###### c) des turbogénérateur ou groupe thermodynamique électrique

Ils fournissent du courant continu redressé, pour des installations qui demandent une source d'énergie permanente sans trop de maintenance. Ils sont couramment utilisés et économiquement intéressants.

Le système thermodynamique est placé dans une enceinte scellée, en acier inoxydable, qui le protège dans les plus mauvaises conditions atmosphériques. Il est fourni complet, dans son propre habitacle, prêt pour être installé sur le site, et fonctionner immédiatement. Une excellente fiabilité, ainsi qu'un fonctionnement qui n'exige que très peu de maintenance, font de ce dispositif une source particulièrement intéressante dans les sites désertiques.

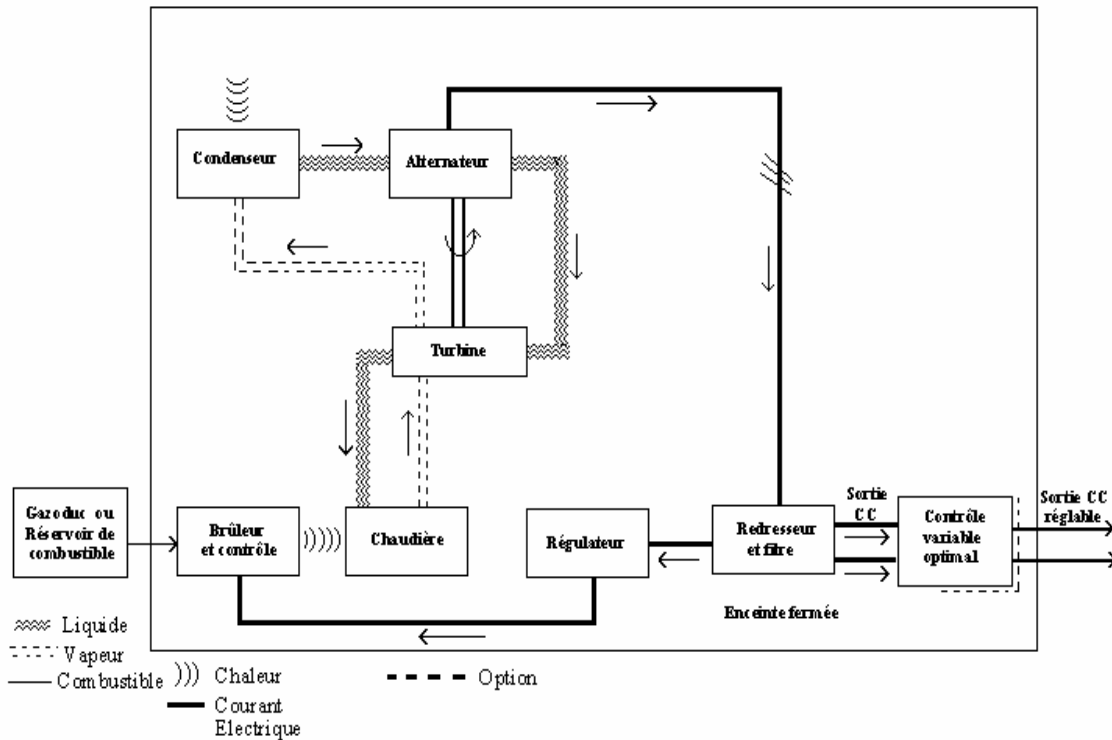
Le fonctionnement du groupe est similaire à une petite centrale à vapeur (Figure 2.1).

###### Principe de fonctionnement

Un liquide organique contenu dans une chaudière est chauffé par un brûleur à combustible liquide ou, de préférence, gazeux. Une partie du liquide organique se transforme en vapeur, qui se détend dans une turbine, entraînant un alternateur dont le rotor est supporté par deux

paliers fluides lubrifiés par le même liquide. La puissance électrique produite par la rotation de l'alternateur est régulée par la quantité de chaleur fournie au liquide organique qui, à son tour, augmente ou diminue la vitesse de rotation de la turbine. La vapeur détendue dans la turbine, passe par un condenseur, où elle est refroidie par l'air et se liquéfie, le liquide retournant à la chaudière de manière à fermer le cycle.

Ce système est parfois appelé Turbogénérateur à Vapeur à Cycle Fermé (CCVT). [2]



**Figure 2.2 :** Schéma de principe d'un thermo-générateur dynamique électrique

#### d) des générateurs thermoélectriques

Le générateur thermoélectrique produit de l'énergie par la conversion directe de la chaleur en électricité dont le courant est continu. Un combustible alimente un brûleur qui chauffe la soudure d'un couple thermoélectrique; la soudure froide est à la température ambiante. Le combustible peut être un fluide véhiculé ou provenir d'une source extérieure, propane, butane ou du gaz naturel peut être utilisé comme du fuel dans le brûleur.

Les pipelines de gaz naturel sont souvent protégés par le courant fourni par les thermogénérateurs ravitaillés par le gaz naturel pris au niveau du pipeline via une réduction de pression adaptable et de vannes de réglages.

Un convertisseur DC-DC est utilisé pour contrôler la sortie du générateur pour avoir un courant constant, une tension constante ou un potentiel pipe/sol constant, en utilisant une électrode permanente de référence pour avoir un signal de retour.

Les générateurs thermoélectriques sont très économiquement utilisés quand la puissance demandée est située dans un intervalle de 10 – 100 Watts. Pour une demande à forte puissance les générateurs peuvent être placés en parallèles dans un local commun [15].

Les divers modèles de ce type de générateur thermoélectrique sont présentés sur le tableau suivant :

**Tableau 2.1** : Modèles de générateurs thermoélectrique avec rendement

Modèle	Puissance	Consommation de fuel
<b>5015</b>	15W – 12V 15W – 24V	Gaz naturel* : 1.5 m <sup>3</sup> /jour Propane : 2.1 l/jour 1.1 kg/jour Pression max : 1720 kPa (250 psi) Pression min : 100 kPa (15 psi)
<b>5030</b>	21W – 12V 21W – 24V	Gaz naturel* : 2.1m <sup>3</sup> /jour Propane : 3.0 l/jour 1.5 kg/jour Pression max : 1720 kPa (250 psi) Pression min : 140 kPa (20 psi)
<b>5060</b>	54W – 12V 54W – 24V 54W – 48V	Gaz naturel* : 4.4 m <sup>3</sup> /jour Propane : 5.7 l/jour 2.9 kg/jour Pression max : 1720 kPa (250 psi) Pression min : 100 kPa (15 psi)
<b>5120</b>	108W – 12V 108W – 24V 108W – 48V	Gaz naturel* : 8.8 m <sup>3</sup> /jour Propane : 11.4 l/jour 5.8 kg/jour Pression max : 1720 kPa (250 psi) Pression min : 100 kPa (15 psi)
<b>5220</b>	220W – 12V 176W – 24V	Gaz naturel* : 19.7 m <sup>3</sup> /jour Propane : 28.0 l/jour 14.2 kg/jour Pression max : 1720 kPa (250 psi) Pression min : 207 kPa (35 psi)
<b>8550</b>	480W – 12V 550W – 24V 480W – 48V	Gaz naturel* : 48.0 m <sup>3</sup> /jour Propane : 76.0 l/jour 38.0 kg/jour Pression max : 1720kPa (250psi) Pression min : 210 kPas (30 psi)

\* Gaz naturel est Std. 1000 BTU/SCF 37.7 MJ/Sm<sup>3</sup> gaz

#### e) des éoliennes

L'aérogénérateur produit la puissance électrique nécessaire pour alimenter le poste de soutirage. Cet appareil se compose généralement d'un alternateur entraîné par un rotor à trois pales qui tourne sous l'action du vent. Le tout est installé au sommet d'un pylône support. La tension alternative obtenue est redressée pour charger une batterie tampon. Comme réalisateur de ce genre, nous pouvons citer la Société "Houston Pipe Line Cie" (USA) qui a utilisé ce procédé.

Dans cette application, le générateur est installé sur une tour de 12 m de hauteur, actionné par une hélice à 3 pales de 5 m de diamètre. Sa puissance maximale est de 2 kW. La batterie destinée à stocker l'énergie électrique est munie d'un système de régulation de charge; de même le courant de soutirage est régulé, et peut être réglé par l'utilisateur [2].

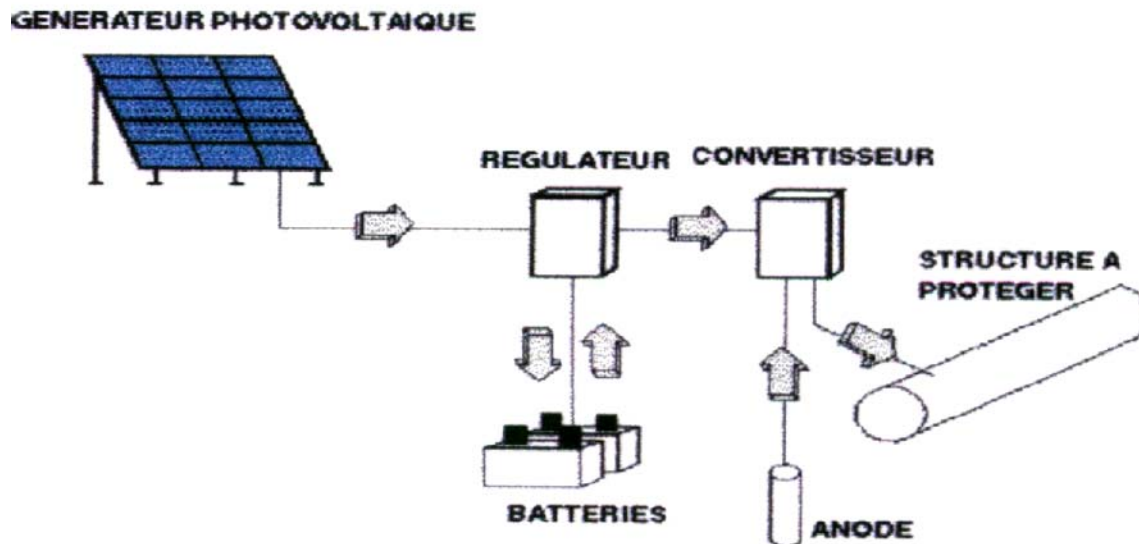
#### f) des générateurs photovoltaïques

Le soutirage de l'énergie électro-solaire est réalisé à l'aide des modules de cellules photovoltaïques. Ces modules captent l'énergie solaire, qui est transformée en courant continu. Ce courant électrique, par l'intermédiaire d'un régulateur, charge une batterie, qui a pour mission de stocker l'énergie, qu'elle restitue aux périodes de moindre éclaircissement.



Cette énergie est disponible en permanence pour l'alimentation du dispositif de soutirage [2] (figure 2.3).

Ces systèmes se prêtent parfaitement à l'installation en grand nombre de faible puissance, pour obtenir la courbe idéale du potentiel des structures linéaires.



**Figure 2.3 :** Schéma synoptique de la protection cathodique photovoltaïque

Leur souplesse d'utilisation est remarquable. Il est en effet facile et peu onéreux d'installer de petits générateurs d'appoint, à l'endroit précis où pour des causes diverses, un renforcement de la protection cathodique est nécessaire.

Les principaux avantages des soutirages électro - solaires sont [2, 4] :

- la simplicité : les modules photovoltaïques délivrent un courant continu (élimination du redresseur);
- l'économie d'exploitation : puisqu'il n'y a aucun besoin d'énergie externe;
- la fiabilité : accrue, notamment vis-à-vis des dégâts occasionnés par les surtensions propagées par les lignes électriques. En outre, le matériel est entièrement statique, donc d'usure réduite;
- la sécurité : le courant électrique est à basse tension, donc pas de risque d'électrocution;
- la modularité : l'investissement est ajusté aux besoins et peut être étalé dans le temps, le système pouvant être étendu à tout moment.

Ajoutons que les générateurs photovoltaïques ne sont pas polluants et ne possèdent pas de pièces mécaniques. [2, 4].

Comme inconvénients, on peut citer :

- le risque de vol des modules;
- le risque de dégradation due à la malveillance;
- la limitation pratique de la puissance à quelques centaines de watts.

## 2.10.2 Les déversoirs

### 2.10.2.1 Généralités

Les déversoirs anodiques de courant sont constitués de masses métalliques branchées à la borne positive du générateur de courant. Ils doivent être conçus de manière, à ne présenter qu'une faible résistance de contact avec le sol de manière à ne nécessiter qu'une faible force électromotrice et à limiter donc la puissance du générateur de courant ainsi que la consommation de l'énergie électrique.

Le premier objectif est atteint en faisant un choix approprié des matériaux constituant les anodes. Ce choix doit être fait de manière à diminuer la consommation par unité de courant.

Le second objectif est atteint :

1. en installant les déversoirs dans des zones à faible résistivité électrique
2. en utilisant des formes de déversoirs présentant de grandes surfaces de contact avec le sol
3. en posant les anodes dans des milieux appropriés à faible résistivité électrique tels que la bentonite et la poussière de coke ( $\rho < 100 \Omega.cm$ ).

Dans certains cas, pour limiter la résistance de terre du déversoir, on est amené à réaliser des puits atteignant la centaine de mètres de profondeur [2, 3], [5], [11, 12].

### 2.10.2.2 Choix des matériaux constituant les anodes

Plusieurs types d'anodes sont d'usage dans les déversoirs anodiques et le choix sur l'anode à utiliser se fait à partir d'un certain nombre de critères, à savoir :

- le milieu de pose des anodes
- la consommation des anodes
- la densité de courant admissible
- le coût.

Les anodes sont classées en trois grandes familles [2, 3, 5, 12] :

1. Les anodes à forte consommation : ce sont généralement des ferrailles telles que les rails en fer, les tubes en acier, etc.

- Milieu : conviennent à tous les milieux
- Densité de courant admissible : pas de limite
- Masse volumique :  $7.8 \text{ g / cm}^3$

L'inconvénient de ces anodes réside dans leur taux de consommation très élevé (9 kg/A.an). Leur utilisation peut être intéressante, notamment lorsque des rebuts existent aux alentours de la structure à protéger, mais dans le cas contraire il est plus rentable d'utiliser d'autres types d'anodes à taux de consommation plus faible.

2. Les anodes à faible consommation : on trouve dans cette famille les anodes en graphique, ferro – silicium, argent ou en magnétite. Les plus utilisées sont les anodes en ferro-silicium.

- *Anodes en ferro-silicium* : Ce type d'anodes est constitué par une fonte comprenant 14 à 15 % de silicium. Dans le cas de l'utilisation en milieu contenant du chlore, une addition de 4 à 5 % de chrome est nécessaire.

La consommation du ferro-silicium dépend de la densité de courant à laquelle il est soumis et de la nature du milieu où se trouvent ces anodes (Tableau 2.2).

**Tableau 2.2** : Consommation du ferro-silicium pour différentes densité de courant

Milieu	Densité de Courant (A/m <sup>2</sup> )	Consommation moyenne (kg/A.an)
Eau douce	10 à 30	0.2
Eau de mer	10 à 100	0.5
Terrain humide avec backfill à boue de coke	10 à 100	0.3
Terrain sec avec backfill à boue de coke	10 à 100	0.15

La durée de vie des anodes est fonction de la densité du courant imposée aux anodes. C'est ainsi, pour chaque intensité de courant, correspond une durée de vie déterminée pour les anodes (Tableau 2.3).

**Tableau 2.3** : Intensité de courant pour une durée de vie de 10 ans, de certaines anodes en ferro-silicium de différentes géométries.

Types d'anodes		Masse (kg)	Intensité de courant pour une durée de vie de 10 ans ( A )
Longueur (m)	Diamètre (cm)		
1.525	3.8	12.5	1
1.525	5.1	22.7	2
1.525	7.62	50.1	6

- *Anodes en magnétite* : Les anodes en magnétite sont utilisées dans tous les milieux et elles présentent un taux de consommation acceptable mais leurs inconvénients résident dans leurs fragilités lors de leurs manutentions.
3. Les anodes à très faible consommation : Ce type d'anode est constitué par un mélange d'un métal qui sert de support tel que le tantale ou le titane et du platine dont la consommation est très faible. Mais l'inconvénient majeur de ces anodes réside dans leur prix très élevé [2].

### 2.10.2.3 Différents types d'installation des anodes

Suivant l'évolution de la résistivité électrique du sol, on prévoit différents montages des anodes afin de diminuer le maximum possible la résistance de terre et limiter la tension de sortie du générateur [2, 3, 5, 9, 11, 12].

- **Déversoir de surface**

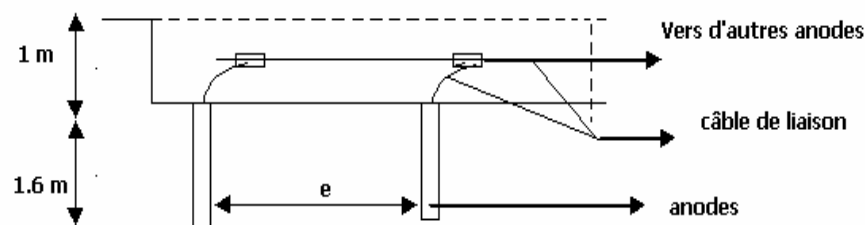
Les déversoirs de surface sont réalisés lorsque la résistivité électrique du sol est faible en surface et lorsqu'on dispose suffisamment de terrain.

- Anodes placées verticalement : Le procédé de ce mode de dépose consiste à enterrer les anodes verticalement dans un trou creusé au fond d'une tranchée à une profondeur comprise entre un et deux mètres selon la nature du terrain.

Dans ce cas, la résistance de terre des anodes est calculée à partir de la formule de Dwight [2] qui donne la résistance de terre d'une anode posée verticalement près de la surface.

$$R_D = \frac{\rho_{\text{sol}}}{2\pi L_D} \left( \ln \frac{8 L_D}{d} - 1 \right) \quad (2.2)$$

La connexion de plusieurs anodes en parallèle est parfois nécessaire pour abaisser la résistance de terre du déversoir (Figure 2.3).



*Figure 2.3 : Schéma de pose de N anodes verticales*

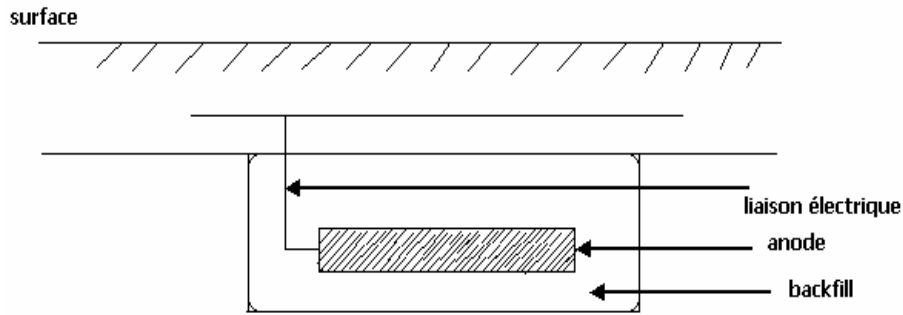
Pour N anodes posées verticalement, la résistance de terre du déversoir devient [6] :

$$R_D = \frac{\rho_{\text{sol}}}{\pi N_{\text{ano}}} \left( \frac{1}{2 L_D} \left( \ln \frac{8 L_D}{d} - 1 \right) + \frac{1}{e} \left( \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{N_{\text{ano}}} \right) \right) \quad (2.3)$$

Ou bien

$$R_D = \frac{\rho_{\text{sol}}}{2\pi L_D N_{\text{ano}}} \left( \ln \frac{8 L_D}{d} - 1 + \frac{2 L_D}{e} \ln (0.656 N_{\text{ano}}) \right) \quad (2.4)$$

- Anodes placées horizontalement : Au cours des dernières années, parallèlement aux déversoirs verticaux, les déversoirs horizontaux sont fréquemment utilisés. La pose horizontale des anodes est plus simple et demande beaucoup moins de moyens. La résistance de terre des déversoirs horizontaux est légèrement plus élevée, mais elle est largement compensée par les avantages que cette solution procure du point de vue de la construction, car on peut adapter très facilement la résistance de terre, en prolongeant la longueur du lit d'anodes (Figure 2.5).



**Figure 2.5** : Schéma de pose d'une anode horizontale

Dans ce cas, la résistance de terre est donnée par la formule suivante [2] :

$$R_D = \frac{\rho_{\text{sol}}}{4\pi L_D} \left( \ln \frac{L_D + \sqrt{d^2 + L_D^2}}{-L_D + \sqrt{d^2 + L_D^2}} + \ln \frac{L_D + \sqrt{(4 * Pr - d)^2 + L_D^2}}{-L_D + \sqrt{(4 * Pr - d)^2 + L_D^2}} \right) \quad (2.5)$$

- **Déversoirs de profondeur**

On a recours à ce genre de déversoirs lorsque :

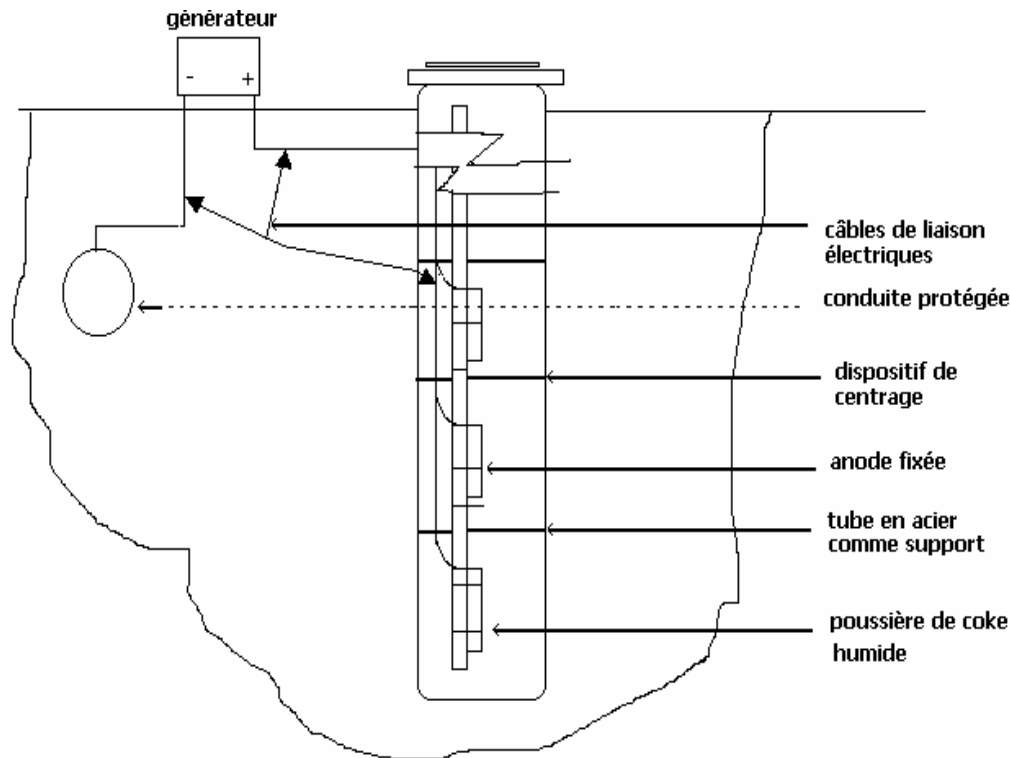
- Il est impossible, par un déversoir de surface d'obtenir une répartition convenable du courant sur la structure à protéger.
- Il y a risque important d'interférences sur les structures voisines
- La résistivité du sol en surface ne permet pas d'obtenir une valeur acceptable de la tension à la sortie du générateur.
- On doit travailler dans des zones habitées.

Le procédé consiste à forer un trou profond de manière à atteindre un sol présentant une faible résistivité et réaliser ensuite une colonne de longueur suffisante à recevoir le nombre d'anodes prévu (Figure 2.6).

Dans ce cas, la résistance du déversoir est donnée par la formule :

$$R_D = \frac{\rho_{\text{sol}}}{2\pi L_D} \left( \frac{8L_D}{d} - 1 \right) \quad (2.6)$$

Il existe des cas où il est difficile d'avoir une résistance de terre faible quelque soit le type installation du déversoir. C'est dans ces cas-là, que l'utilisation d'un mélange dit régulateur à faible résistivité est apprécié. La résistivité devrait être inférieure à une valeur de 100  $\Omega \cdot \text{cm}$  ( $\rho < 100 \Omega \cdot \text{cm}$ ).



*Figure 2.6 : Schéma représentatif d'un déversoir de profondeur*

L'avantage de l'utilisation du "backfill" (mélange régulateur composé de poudre de graphite qui a aussi pour rôle de répartir la consommation sur toute la surface de l'anode), en plus de l'homogénéisation de la corrosion des anodes et l'augmentation de la durée de vie de ces dernières, est la diminution de la résistance de terre des déversoirs [2].

### 2.10.3 Câbles de liaison et raccords isolants

#### 2.10.3.1 Câbles de liaison

Les liaisons électriques entre le générateur, le déversoir, et la structure à protéger doivent être particulièrement soignées en vérifiant deux critères [2, 12] :

- une faible résistance électrique
- un très bon isolement par rapport au sol, particulièrement les liaisons allant vers les déversoirs.

Le câble doit avoir une distance minimale entre le déversoir et la conduite de 100 mètres afin d'éviter l'influence anodique du premier sur la deuxième, qui se traduit par une dépolarisation de cette dernière. D'un autre côté, la distance du câble générateur-conduite est de 110 mètres. Notons que le générateur est installé généralement le plus près possible du déversoir de courant. Dans le cas d'un déversoir de surface, qui est généralement le plus utilisé, la distance du câble est égale à la longueur du lit d'anode plus l'espace entre deux anodes consécutives.

De nos jours, les câbles électriques les plus utilisés, pour connecter les différents éléments du système, sont ceux à double isolement type unipolaire avec isolation en polyéthylène, gaine de bourrage et enveloppe extérieure en PVC [2].

**Tableau 2.4 :** Section des câbles électriques en fonction de l'intensité de courant circulant

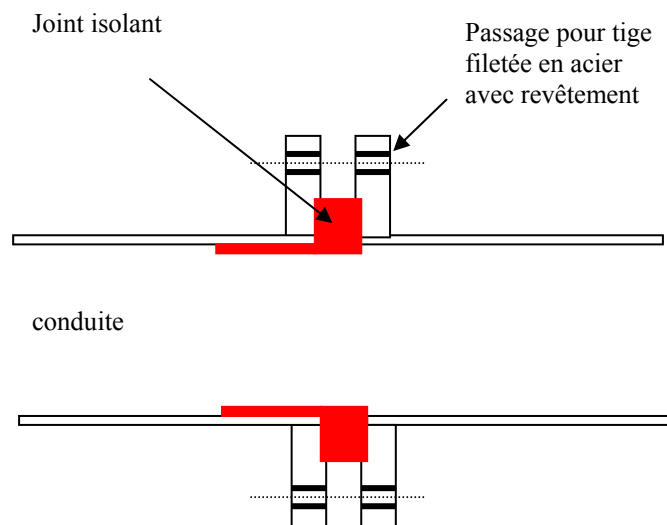
Intensité de courant (A)	5	10	15	20	35	45	60
Section de câble (mm <sup>2</sup> )	10	16	25	35	50	70	95
Résistance pour 100 m (m Ω)	174	112	71	51	36	26	19

### 2.10.3.2 Les joints isolants

Ce sont des accessoires de pipelines insérés sur la conduite et destiné à créer une discontinuité électrique. Le revêtement des conduites sert à isoler celles-ci du milieu ambiant. Ceci permet d'assurer la protection cathodique avec de faibles densités de courant. Il est donc indispensable d'isoler les conduites de toutes les installations auxquelles elles sont reliées.

Ainsi, chaque extrémité d'un pipeline devra être munie d'un joint isolant afin de limiter la protection cathodique à la partie enterrée. Ceci est une règle générale pour toute conduite enterrée [2, 4].

Les joints isolants sont généralement fabriqués en matériaux plastiques et ils devront évidemment être adaptés du point de vue inertie au fluide transporté et possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques (Figure 2.7).



**Figure 2.7 :** Joint isolant

Le travail sur les joints isolants doit s'effectuer avec certaines précautions:

- Enterrés, il faut qu'ils soient enrobés entièrement (brai, bandes de plastiques,...) et il faudra prévoir en surface des prises pour les mesures et le contrôle
- Il faut les shunter par une tresse métallique lors du montage ou du démontage, des étincelles pouvant se produire au cours de la manipulation et enflammer le produit transporté.

### 2.11 Coût de la protection cathodique

Il semble admis que le coût d'une protection cathodique est faible. Evidemment, cela dépend beaucoup de conditions particulières telles que le site et la nature des installations, la nature des revêtements, la disponibilité de l'énergie, etc... mais de manière générale, cette conclusion est vérifiée [5].

En règle générale, on estime à 0,5 % des investissements totaux, les frais d'investissement d'une protection cathodique. (Pour des ouvrages immergés, le coût est un peu plus élevé compte tenu du nombre d'anodes sacrificielles mises en œuvre) [5]. Pour ce qui est des frais d'exploitation (personnel, déplacements, réparations, énergie), on les a estimés à près de 1,5 % du budget d'exploitation de l'ouvrage (soit aussi quelque chose comme 0,054 % du capital investi).

En conclusion, on peut dire qu'une protection cathodique bien conçue et bien exploitée permet d'éviter la corrosion des structures métalliques et que son coût comparatif est insignifiant [1-2, 5].

### 2.12 Conclusion

La protection cathodique à courant imposé fonctionne en utilisant des anodes constituées d'alliages de métaux nobles, assurant ainsi une longévité du système et nécessite une source d'énergie continue (DC).

Après avoir énuméré les différentes sources d'énergies utilisées dans la protection cathodique et vu les avantages que présente la source photovoltaïque entre autre la conservation de l'environnement, absence de pollution, ajoutant à cela la longue durée de vie du système et l'équilibrage de la protection par augmentation du nombre de points de soutirage d'où la diminution de puissance de chaque station. La protection cathodique par voie solaire est aujourd'hui la plus utilisée et la plus reconnue.

Dans ce sens, dans le chapitre suivant, un dimensionnement de la station de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque est établi. Afin de pouvoir développer au chapitre quatre un dispositif de régulation et de contrôle destiné à la protection cathodique par voie photovoltaïque.



# **Chapitre 3**

## **Dimensionnement de la protection cathodique par soutirage de courant alimentée par énergie solaire photovoltaïque**

## **Chapitre 3**

### **Dimensionnement de la protection cathodique par soutirage de courant alimentée par énergie solaire photovoltaïque**

#### **3.1 Introduction**

Dans le cas de zones éloignées du réseau, il est possible d'obtenir une source de courant électrique continu autonome, avec un générateur photovoltaïque. Les générateurs photovoltaïques donnent une nouvelle sécurité et une solution économique pour l'énergie nécessaire à la protection cathodique [2, 4-6]. Actuellement, ils sont largement utilisés pour fournir aux systèmes de protection cathodique en ces zones de l'énergie continue (DC). Nous avons vu que les systèmes solaires (PV) sont modulaires, peuvent fonctionner facilement à des tensions et courants ajustés aux besoins.

En général, un système photovoltaïque consiste en un champ de modules, des moyens de stockage d'énergie (batteries), un dispositif électronique de régulation et la charge ou l'utilisation [4, 12, 15, 18, 28].

1. Générateurs PV : Le générateur photovoltaïque est composé par un assemblage de cellules élémentaires associées en module, lui même associé en série/parallèle à plusieurs autres modules pour divers besoins en énergie électrique.
2. Stockage électrique : L'utilisation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque est très délicate car cette énergie varie précisément comme le rayonnement. C'est pourquoi il fallait penser à stocker cette énergie pour la restituer ultérieurement. Le stockage se prête comme une condition nécessaire dans le but de palier au caractère intermittent de l'énergie solaire reçue et à l'irrégularité de la puissance requise. Parmi les procédés de stockage d'énergie les plus adaptés aux installations photovoltaïques, le stockage électrochimique qui est effectué par l'intermédiaire d'éléments de batteries d'accumulateurs.

#### **▪ Les batteries**

**Définition** Les batteries sont des éléments essentiels des alimentations de secours. Il en existe plusieurs types, en fonction de leur utilisation, de leur durée de vie et de la technique de fabrication. L'unité de mesure utilisée est l'ampère-heure (Ah).

#### **Batteries stationnaires**

Généralement utilisées dans les alimentations de secours, ces batteries sont destinées à délivrer une énergie constante pendant un temps variant entre quelques minutes et plusieurs heures. Le choix se fera entre la durée de vie et les performances souhaitées.

#### **Batteries plomb ouvert**

C'est la plus ancienne technologie encore utilisée. Leur durée de vie est supérieure à 8 ans en stationnaire. Elles supportent des conditions de fonctionnement moins restrictives que les batteries à plomb étanches.

L'utilisation de ces batteries nécessite généralement un local adapté (dégagement d'hydrogène) et un entretien régulier avec contrôle des niveaux d'eau.

- **Choix des accumulateurs**

Les batteries destinées à notre utilisation doivent être caractérisées par :

- un grand nombre de cycles, (charge-décharge)
- un faible autodécharge
- un entretien restreint.

Quatre principaux types d'accumulateurs sont disponibles sur le marché :

- batterie au cadmium-nickel (CdNi)
- batterie au plomb étanches (électrolyte gélifié)
- batterie au plomb ouvert sans entretien (électrolyte liquide ne nécessitant pas d'apport régulier)
- batteries au plomb ouvertes (électrolyte liquide devant être complété régulièrement).

Ceci nous permet donc de choisir les batteries au plomb ouvertes à grande réserve d'électrolyte qui se caractérisent par :

1. une durée de vie importante
2. un prix par Wh moyen
3. la nécessité de vérifier périodiquement l'électrolyte (1 à 2 fois par an)

3. Le régulateur : Il constitue le système de conditionnement de puissance Le régulateur de charge est un élément de base de la chaîne photovoltaïque. C'est de lui que dépendent la fiabilité et le rendement de la centrale. Il permet une gestion correcte de l'utilisation de la batterie, afin de lui assurer une durée de vie maximale dans les limites des conditions requises, et cela en contrôlant le seuil de charge et de décharge. Dans le cas où on doit obtenir pour des raisons économiques et de dimensionnement, le maximum de l'énergie solaire converti pour satisfaire la demande de la charge, il est d'un grand intérêt que le régulateur doit accomplir la fonction de poursuite du point de puissance max. Pour les systèmes photovoltaïques appliqués à la protection cathodique, le régulateur doit aussi avoir une sortie variable afin de pouvoir s'adapter à tout les cas de figures imposés par la canalisation. Avant d'entamer la conception de ce dispositif, en vue d'assurer une protection cathodique totale d'une structure durant un temps d'exploitation  $t$  (en année), un dimensionnement doit être établi.

### 3.2 Dimensionnement des systèmes de protection cathodique photovoltaïque

Il s'agit tout d'abord de mesurer, quand cela est possible, mais le plus souvent d'estimer par le calcul, le besoin en courant de protection cathodique de la structure, c'est-à-dire le courant qu'elle doit recevoir pour que le seuil de protection soit atteint. Il s'agit d'utiliser des hypothèses déduites de l'expérience [2].

Le besoin en courant de protection sert aussi à la détermination de la masse et du nombre d'anodes, ainsi qu'au dimensionnement électrique de la source de courant éventuelle. Le courant délivré doit être estimé au mieux, non seulement pour des risques économiques, mais aussi à cause de certains effets néfastes des intensités trop élevées : décollement cathodique des revêtements, fragilisation par l'hydrogène de certains alliages, problèmes d'interférences avec les autres structures voisines [2].

Enfin, le dimensionnement des systèmes de protection cathodique doit tenir compte de la résistance électrique des éléments du circuit. Pour cela, la résistance opposée au courant par l'électrolyte doit être évaluée. Les lignes de courant étant généralement très concentrées autour des anodes, on parle souvent de "résistances d'anodes". Celle-ci est calculée à partir de la résistivité de l'électrolyte l'environnant, et de la géométrie de l'anode [2-5, 11, 12, 15].

Dans le cas où la structure est longiligne, et que les points de connexion avec les anodes ou les soutirages de courant sont espacés, il faut tenir compte de la résistance électrique de la structure elle-même, qui provoque un effet d'atténuation du courant. Les calculs se font alors en utilisant la notion de résistance d'isolement de la structure. [2-4,15]

### 3.2.1 Elaboration du programme

Dans le but de pouvoir dimensionner un système de protection cathodique photovoltaïque, il faut d'abord effectuer un dimensionnement de la protection cathodique seule, afin de définir le besoin énergétique de la charge. Ensuite, avec les résultats obtenus plus les données météorologiques du site d'installation seront les paramètres d'entrée pour le programme de dimensionnement de l'installation photovoltaïque.

#### Etape 1

##### 3.2.1.1 Equations utilisées pour l'évaluation des besoins en courant et potentiels aux points de soutirage

Les hypothèses à prendre en compte dans les calculs sont les suivants [2, 3, 4, 15] :

- on néglige l'influence de la résistance du sol;
- on admet que cette résistance est constante le long du tracé de la structure;
- la résistance d'isolement de la conduite est constante le long du tronçon;
- pas de polarisation de la conduite;
- pas de gradient de potentiel dans le sol;
- on ne tient pas compte de la position du déversoir.

##### 3.2.1.2 Equations de base

Le calcul des paramètres de la protection cathodique est basé sur le courant de protection. Dans le cas de cette étude, nous ne considérons que des structures métalliques longilignes.

#### A- Cas d'une structure longiligne

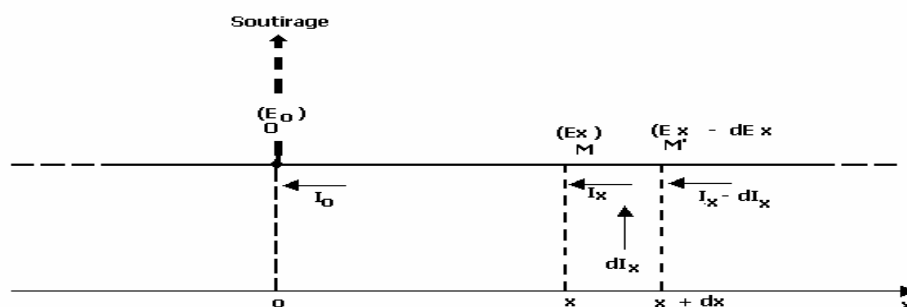


Figure 3.1 : Situation électrique sur une structure longiligne

$I_0$  : point de soutirage de courant et origine des abscisses

$I_x$  : intensité circulant au point  $x$  (en ampères)

$E_x$  : abaissement de potentiel par rapport au potentiel naturel de la structure créé au point  $x$  (en volts)

$dI_x$ : intensité entrant dans la structure entre les points  $x$  et  $x+dx$  (en ampères)

$dE_x$ : abaissement du potentiel créé entre les points  $x$  et  $x+dx$  (en volts)

Les formules mathématiques dites "lois des télégraphistes" donnent l'intensité et le potentiel d'injection en tenant compte des résistances linéaire et transversale de la structure [2-4, 11].

$$I_x = \frac{E_0}{\gamma} \operatorname{sh}(\alpha x) + I_0 \operatorname{ch}(\alpha x) \quad (3.1)$$

$$E_x = E_0 \operatorname{ch}(\alpha x) + \gamma I_0 \operatorname{sh}(\alpha x) \quad (3.2)$$

Où:

$x$  : longueur de la canalisation à protéger (m)

$E_x$  : abaissement du potentiel au point  $x$  (V)

$E_0$  : abaissement du potentiel qu'on doit assurer au point  $x = 0$  (V)

$I_x$  : intensité du courant à injecter au point  $x$  (A)

$I_0$  : intensité du courant au point  $x = 0$  (A)

$\alpha$  : coefficient d'atténuation de la conduite ( $\text{m}^{-2}$ )

$\gamma$  : résistance caractéristique de la conduite ( $\Omega$ )

La formulation du coefficient d'atténuation et de la résistance caractéristique de la canalisation est donnée ci-après :

$$\alpha = \sqrt{\frac{r}{R_{tr}}} \quad (3.3)$$

$$\gamma = \sqrt{r R_{tr}} \quad (3.4)$$

Remarque

- La résistance transversale de l'isolement de la canalisation  $R$  est supposée homogène tout le long de la structure.
- L'abaissement du potentiel est la différence entre le potentiel initial du métal dans le sol au point de mesure et le potentiel pris sous l'effet du courant de protection.
- $r$ , résistance ohmique (longitudinale) d'un mètre de canalisation est calculée par la formule classique. [2, 3, 4, 9, 11, 12, 15]

$$r = \rho_{\text{acier}} \left( \frac{L_{\text{cond}}}{S} \right) \quad (3.5)$$

Où  $L$ : longueur de la conduite (m)

$\rho_{\text{acier}}$ : résistivité de l'acier (15 à  $25 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ )

$s$ : section de la conduite

- L'intensité de courant à l'extrémité de la conduite, opposée au soutirage (à la limite de la protection) sera nulle.

#### A1- Résistance transversale de l'isolement de la canalisation ( $\Omega.m$ )

La relation qui donne la résistance transversale d'isolement de la canalisation est la suivante [2, 3, 4, 9, 11, 12, 16] :

$$R_{tr} = \left( \frac{R_{is}}{\pi D} \right) \quad (3.6)$$

#### A2- Potentiel au point de soutirage (V)

Le potentiel au point du soutirage est donné ci après [2,11] :

$$E_S = E_L \times \text{ch}(\alpha L_p) \quad (3.7)$$

#### A3- Intensité du courant de soutirage (A)

La relation donnant l'intensité du courant de soutirage est la suivante [2, 3, 11] :

$$I_s = \frac{|E_s|}{\gamma} \times \text{th}(\alpha L_p) \quad (3.8)$$

$$I_x = \left( \frac{|E_s|}{\gamma} \right) \times \frac{\text{sh}(\alpha \times (L_p - x))}{\text{ch}(\alpha L_p)} \quad (3.9)$$

#### A4- Nombre de postes à installer sur une ligne de longueur L

Le nombre de poste de soutirage à prévoir et à installer sur une conduite de longueur L est donné par la relation (3.10) [15] :

$$N_p = \left( \frac{L_{cond}}{L_p + 1} \right) \quad (3.10)$$

### Etape 2

#### B- Equations utilisées pour le dimensionnement des déversoirs

##### B1- Calcul du nombre d'anodes nécessaires

Plusieurs méthodes de calcul ont été élaborés pour déterminer le nombre d'anodes nécessaire pour assurer la durée de vie prévue pour l'installation, utilisant l'intensité de courant que ces anodes doivent débiter, et leur consommation en ampères par an.

- Méthode basée sur la consommation des anodes

Le nombre d'anodes nécessaire est donné par la relation suivante [2] [11]:

$$N_{ano} = \frac{I_s \times C_{ano} \times t}{M_{uano}} \quad (3.11)$$

## B2- Résistance d'un déversoir horizontal en rails à lit continu avec utilisation du backfill ( $\Omega$ )

La résistance d'un déversoir horizontal en rails à lit continu avec utilisation du "backfill" est donnée par l'expression suivante [11] [15] :

$$R_D = \rho_{sol} \left( \frac{\left( \text{Ln} \left( \frac{L_D}{P_r d} \right) + \left( \frac{\rho_F}{\rho_{sol}} \right) \text{Ln} \left( \frac{d}{D_r} \right) \right)}{2\pi L_D} \right) \quad (3.12)$$

$$L_D = N_{ano} \times e \quad (3.13)$$

## C- Dimensionnement de la source d'énergie

### C1- Résistance totale du circuit du poste de protection cathodique ( $\Omega$ )

La résistance totale du circuit du poste de protection cathodique est fonction de la résistance du déversoir, de la résistance totale des câbles de liaison et de la résistance caractéristique [1-4, 16, 18] :

$$R_t = R_D + R_c + \gamma \quad (3.14)$$

$$R_c = \frac{\rho_c L_c}{S_c} \quad (3.15)$$

### C2- Tension d'un poste de soutirage (V)

La tension du poste de soutirage du système de protection est donnée par la relation (3.16) [4, 16] [19] :

$$U_p = R_t I_s + E_s \quad (3.16)$$

### C3- Puissance d'un poste de soutirage (W)

L'expression ci-dessous nous permet d'avoir la puissance demandée par une station de la protection cathodique et qui doit être assurée par notre source d'énergie solaire photovoltaïque [4,9, 12, 16, 19].

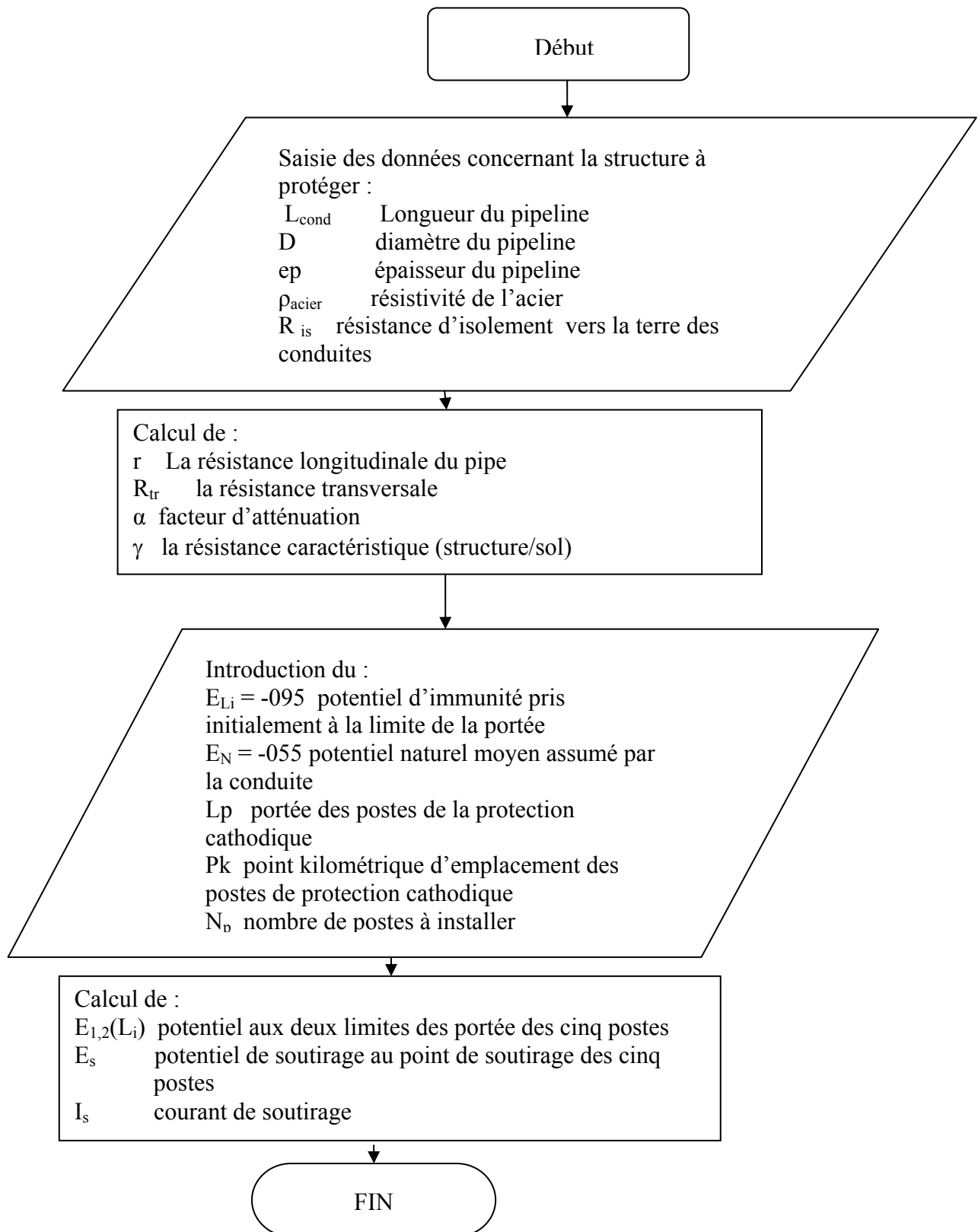
$$P = U_p I_s \quad (3.17)$$

### C4- Consommation journalière moyenne (Wh)

La consommation journalière moyenne de la station de la protection cathodique est exprimée par la relation :

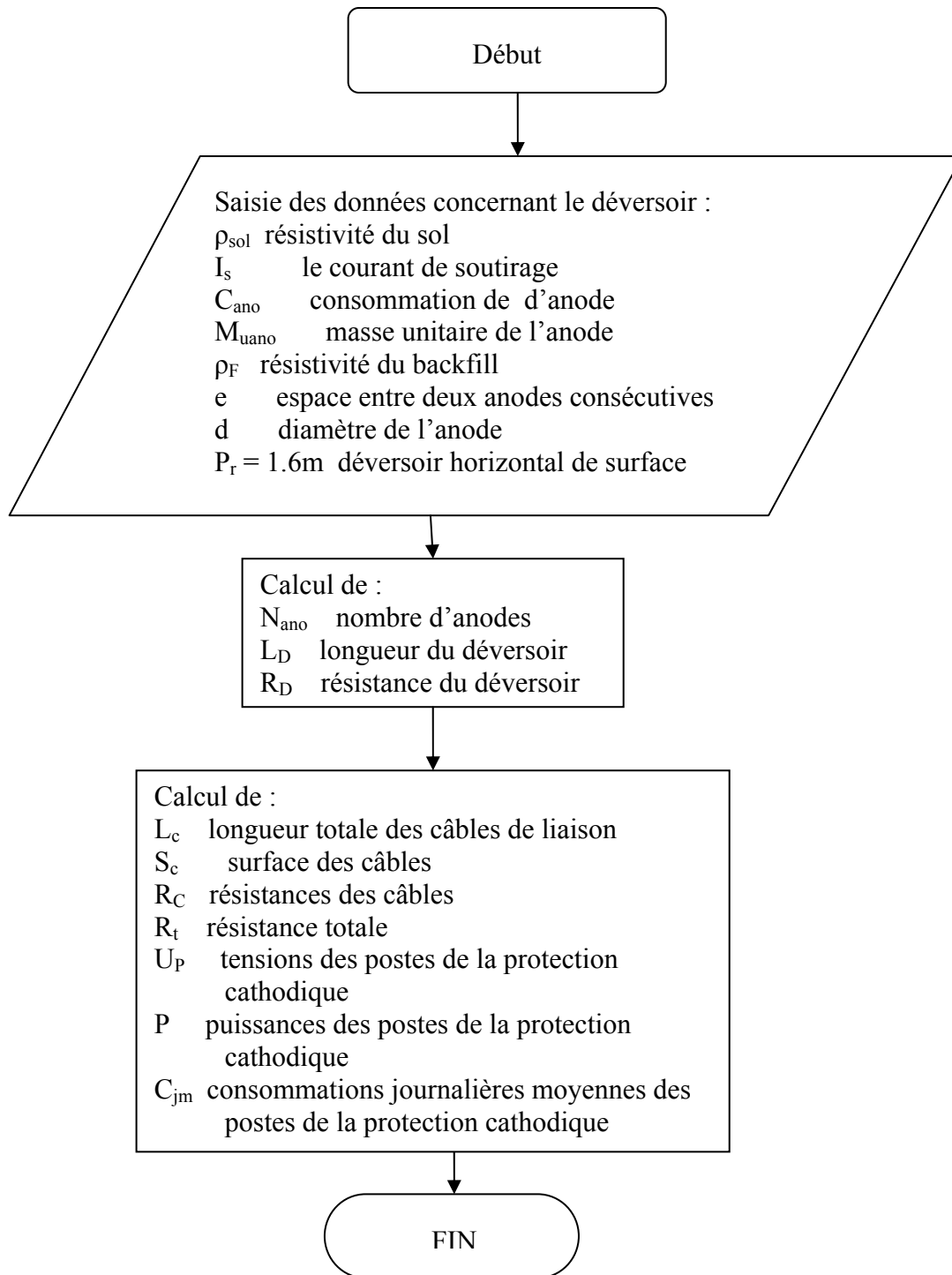
$$C_{jm} = P \times 24 \quad (3.18)$$

Les organigrammes relatifs au dimensionnement des caractéristiques de la station de la protection cathodique, du dimensionnement du déversoir et de l'évaluation du besoin énergétique de la station de protection cathodique sont décrits par les figures suivantes:



**Figure 3.2 :** Algorithme de calcul des caractéristiques de la station de la protection cathodique





**Figure 3.3 :** Organigramme de dimensionnement du déversoir et de la consommation de la station de protection cathodique

### 3.3 Générateurs photovoltaïques

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque consiste en premier lieu à calculer le nombre de modules qu'on doit utiliser dans un panneau, ainsi que le nombre de batteries nécessaire afin d'assurer une autonomie au système pour un nombre estimé de jours non ensoleillés [4, 12, 15, 17, 18, 19].

Pour pouvoir réaliser ces calculs, on doit connaître les données météorologiques sur l'ensoleillement à l'emplacement prévu pour les générateurs solaires, ainsi que l'intensité et la tension désirées à la sortie (le profil de charge). Il est bien entendu que la fiabilité et l'efficacité du système solaire dépendent étroitement du dimensionnement effectué [17].

De nombreuses méthodes ont été établies par divers auteurs pour un dimensionnement adéquat des systèmes photovoltaïques. Nous présentons dans ce chapitre les méthodes les plus utilisées [17, 18, 19].

### 3.3.1 Méthodes de dimensionnement du système photovoltaïque pour la protection cathodique

Les méthodes de dimensionnement peuvent être classées en deux groupes. Il s'agit respectivement des méthodes analytiques et numériques [17,18].

#### 3.3.1.1 Méthodes analytiques

Ces méthodes utilisent principalement des expressions analytiques ou des formules simplifiées. Ces derniers peuvent être très simples et sont la plupart du temps utilisés de manière manuelle [17].

$$\text{Aire} = \frac{\text{consommation}}{\text{rayonnement} \times \eta_g} \quad (3.19)$$

Et

$$\text{Capacité} = \text{consommation} \times \text{autonomie} \quad (3.20)$$

Ces deux expressions déterminent respectivement la surface du champ de modules photovoltaïques (mètres carrés - m<sup>2</sup>) et la capacité du stockage électrochimique (ampères-heure - Ah ou Wh). Elles sont souvent utilisées lorsque les éléments du système (modules choisis) sont connus.

D'autres méthodes analytiques avec des expressions plus complexes sont établies, en considérant des données météorologiques acquises sur plusieurs années.

#### 3.3.1.2 Méthodes numériques

Il existe de nombreuses autres méthodes numériques, où des calculs directs sont effectués en considérant seulement le couple optimal (puissance du champ de modules - capacité de la batterie) et/ou des méthodes nécessitant en général des simulations plus longues moyennant de données météorologiques de plusieurs années pour obtenir des courbes d'iso-fiabilité (c'est-à-dire des courbes avec probabilité de perte de charge "LLP"). Ces courbes sont obtenues en introduisant deux paramètres adimensionnels représentatifs du système, à savoir : C<sub>A</sub> (puissance du champ PV) et C<sub>s</sub> (capacité du stockage) [17, 18].

Le paramètre C<sub>A</sub> représente le rapport entre la production énergétique moyenne du champ et la demande énergétique moyenne de la charge.

$$C_A = \frac{\eta_g \times \text{Aire} \times R_{ig}}{C_{jm}} \quad (3.21)$$

Le rapport entre l'énergie maximale qui peut être prise de la batterie et la demande énergétique moyenne de la charge est représenté par le second paramètre C<sub>s</sub>.

$$C_s = \frac{C}{C_{jm}} \quad (3.22)$$

Généralement, les méthodes dites analytiques ne sont pas souvent utilisées à cause d'un manque flagrant de précision, et il faudrait faire en plus de nombreuses approximations qui défavorisent la généralisation de leur utilisation [17, 18, 19].

Les méthodes numériques sont adéquates pour l'estimation des probabilités de pertes de charge LLP. C'est-à-dire la connaissance de la fraction de la demande non satisfaite sur une période donnée. Par ailleurs, leur utilisation pour un dimensionnement adéquat est assez complexe et dépasse souvent les capacités des installateurs de systèmes photovoltaïques. En plus du fait qu'elles nécessitent des séquences de données météorologiques (simulées ou réelles) sur de nombreuses années qui sont la plupart du temps souvent inexistantes [17].

### 3.3.2 Méthode appliquée

Elle se base sur la simulation de l'irradiation globale sur plan incliné à partir de l'irradiation sur plan horizontal en plus de la durée d'ensoleillement qui est spécifique au site considéré. Elle consiste à [19] :

1. Déterminer, dans un premier lieu, le rayonnement global sur un plan incliné ( $R_{gi}$ ) à partir des données du rayonnement global sur plan horizontal ( $R_{gh}$ ) et de la température ambiante relatifs au site considéré pour l'installation du poste de protection cathodique.
2. Dans une seconde étape, déterminer la taille du champ de modules photovoltaïques (la surface du champ, le nombre de modules en série et en parallèle ainsi que la puissance crête requise) et de la capacité de la batterie à installer, et cela à partir du rayonnement incliné global calculé et des caractéristiques de la charge et de la batterie choisie

#### 3.3.2.1 Détermination du rayonnement global sur un plan incliné

Le rayonnement solaire global incliné est la somme des rayonnements respectivement diffus ( $R_{di}$ ) et direct ( $R_{dri}$ ) sur plan incliné. Son expression est donnée ci-après [19-21]:

$$R_{gi} = R_{di} + R_{dri} \quad (3.23)$$

Pour calculer et déterminer ce paramètre, il est important de connaître la formulation précise du rayonnement solaire extraterrestre et des rayonnements diffus et direct sur plan incliné.

##### ▪ Rayonnement solaire extraterrestre

$$R_{ha} = 1350 \times \frac{24}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2 \times \pi \times J}{365}\right) \right] \left[ (\cos \text{Lat} \times \cos \delta \times \sin \omega_s) + \omega_s \sin \text{Lat} \times \sin \delta \right] \quad (3.24)$$

La déclinaison, la hauteur du soleil et l'angle horaire du coucher du soleil sont donnés par les expressions suivantes :

- Déclinaison du soleil

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{2\pi(J - 81)}{365}\right) \quad (3.25)$$

- Hauteur du soleil

$$h = \frac{\pi}{2} + \delta - \text{Lat} \quad (3.26)$$

- Durée du jour

$$D_{\text{jour}} = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (3.27)$$

avec

$$\omega_s = \arccos(-\text{tg Lat} \times \text{tg } \delta) \quad (3.28)$$

- Rayonnement horizontal diffus

$$R_{\text{dh}} = R_{\text{gh}} \times \left(1 - \frac{1.13 \times R_{\text{gh}}}{R_{\text{ha}}}\right) \quad (3.29)$$

- Rayonnement horizontal direct

$$R_{\text{drh}} = R_{\text{gh}} - R_{\text{dh}} \quad (3.30)$$

- Rayonnement incliné diffus

$$R_{\text{di}} = \frac{R_{\text{dh}}}{2} [(1 + \cos\beta) + A(1 - \cos\beta)] \quad (3.31)$$

- Rayonnement incliné direct

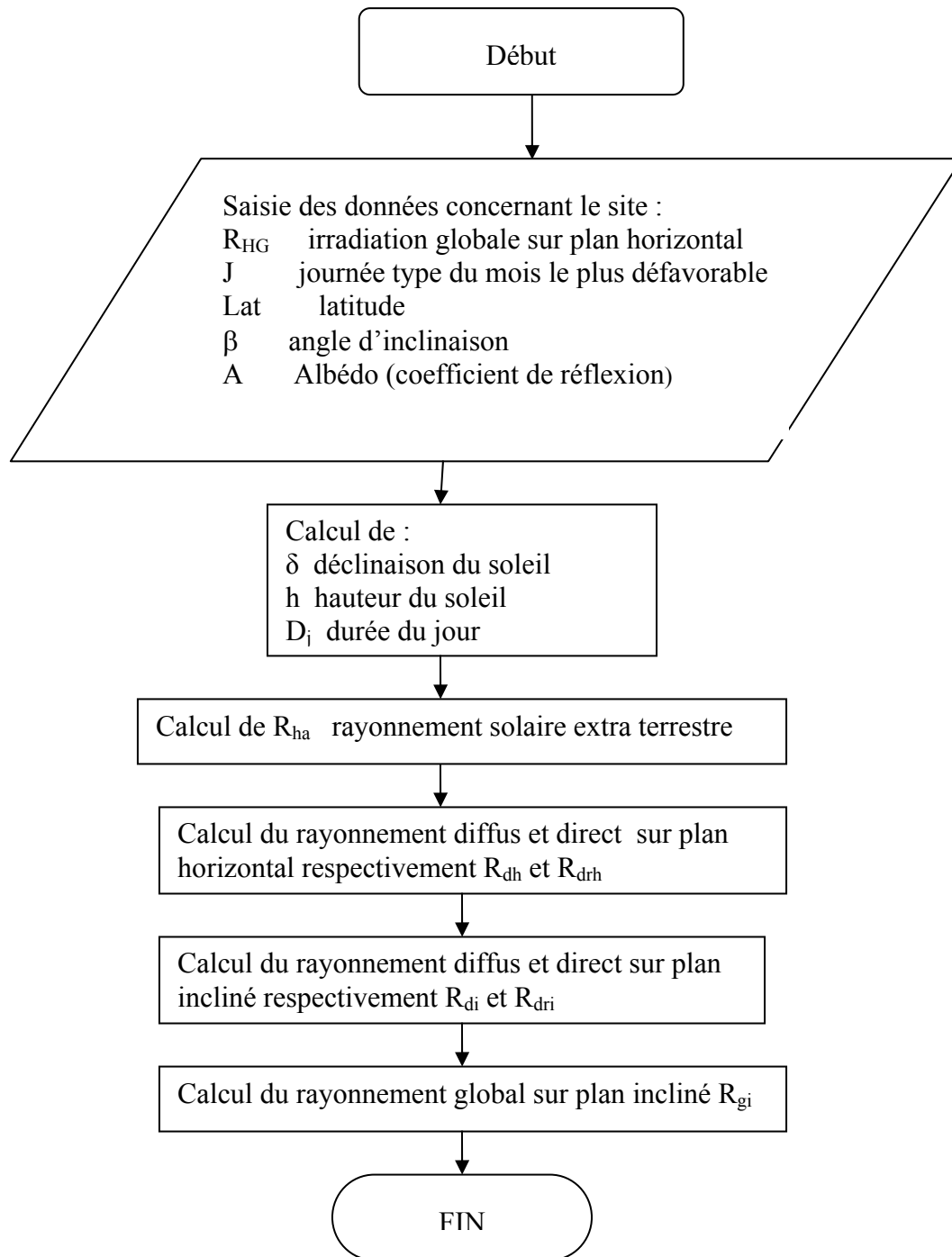
$$R_{\text{dri}} = R_{\text{drh}} \frac{\sin(h + \beta)}{\sin h} \quad (3.32)$$

Généralement, l'angle d'inclinaison  $\beta$  est pris égal à la latitude du lieu [19-24].

- Rayonnement incliné global

$$R_{\text{gi}} = R_{\text{di}} + R_{\text{dri}} \quad (3.33)$$

L'algorithme suivant illustre le passage à partir du rayonnement solaire global mesuré sur plan horizontal au rayonnement solaire global sur plan incliné.



**Figure 3.4 :** Organigramme de passage du rayonnement global sur plan horizontal au rayonnement global sur plan incliné

### 3.3.2.2 Détermination de la taille du champ de modules photovoltaïques

L'expression suivante représente la surface du champ de modules photovoltaïques à installer, qui tient compte de la consommation énergétique journalière de la charge, du rayonnement global incliné et des divers rendements des éléments constituant le système (régulateur, batterie, module,...) [18, 19, 20].

$$Aire = \frac{C_{jm}}{R_{ig} \times \eta_m \times \eta_r \times \eta_b} \quad (3.34)$$

$$P_{GPV} = Aire \times 1000 (W / m^2) \times \eta_m \quad (3.35)$$

▪ Rendement moyen du module

Ce rendement a été établi, en considérant le rendement du module photovoltaïque obtenu dans les conditions standard et de la température la température moyenne de la cellule. Son expression est la suivante [18-19] :

$$\eta_m = \eta_0 \left[ 1 - G \left( \bar{T}_c - 25 \right) \right] \quad (3.36)$$

▪ Température moyenne de la cellule

L'expression de la température moyenne de la cellule est fonction du rayonnement solaire moyen, de la température ambiante et la température de fonctionnement (NOCT). Elle est donnée ci-après [18-19] :

$$\bar{T}_c = \bar{T}_{amb} + \overline{R_{gi}} \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (3.37)$$

Avec :

$$\overline{R_{gi}} = \frac{R_{gi}}{D_{jour}} \quad (3.38)$$

Nous passons maintenant au calcul de nombre total de branches, c'est à dire le nombre de branches en série et en parallèle [18-21].

$$N_{mt} = \frac{P_{GPV}}{P_{mod\ crête}} \quad (3.39)$$

$$N_{ms} = \frac{V_{nC}}{V_{n\ mod}} \quad (3.40)$$

$$N_{mp} = \frac{N_{mt}}{N_{ms}} \quad (3.41)$$

### 3.3.2.3 Détermination de la capacité de la batterie de stockage

Le calcul de la capacité nominale de la batterie nécessite :

- Le calcul de la capacité utile de la batterie, en déterminant l'autonomie de la batterie, c'est-à-dire le nombre de jours successifs sans ensoleillement susceptibles d'être rencontré dans le site l'installation, soit **N** ce nombre. Cette autonomie correspond à une capacité utile **C<sub>u</sub>** en ampères-heures (Ah) qui a pour expression [18] :

$$C_u = \frac{P}{U_n} \times 24 \times N_{\text{auto}} \quad (3.42)$$

avec :

P : puissance du poste de la protection cathodique fournie à la charge calculée précédemment et exprimée en watts (W),

U<sub>n</sub> : tension nominale de la batterie, exprimée en volts (V).

▪ Le calcul de la capacité nominale C<sub>n</sub>, correspondant à une décharge en 10 heures de la batterie. Elle est égale à sa capacité utile affectée de divers coefficients correcteurs tenant compte :

- du régime de décharge à faible débit, soit  $\underline{k1 = 1,8}$
- de la profondeur de décharge à ne pas dépasser (70 %), soit  $\underline{k2 = 0,7}$
- du fait que la batterie est chargée à une tension produite par les modules photovoltaïques, inférieure à la tension habituelle (2,3 V au lieu de 2,6 V par élément), pour ne pas consommer de l'électrolyte, soit  $\underline{k3 = 0,8}$
- d'un vieillissement moyen de la batterie pendant sa durée de vie, soit  $\underline{k4 = 0,8}$

La capacité nominale aura donc pour expression suivante :

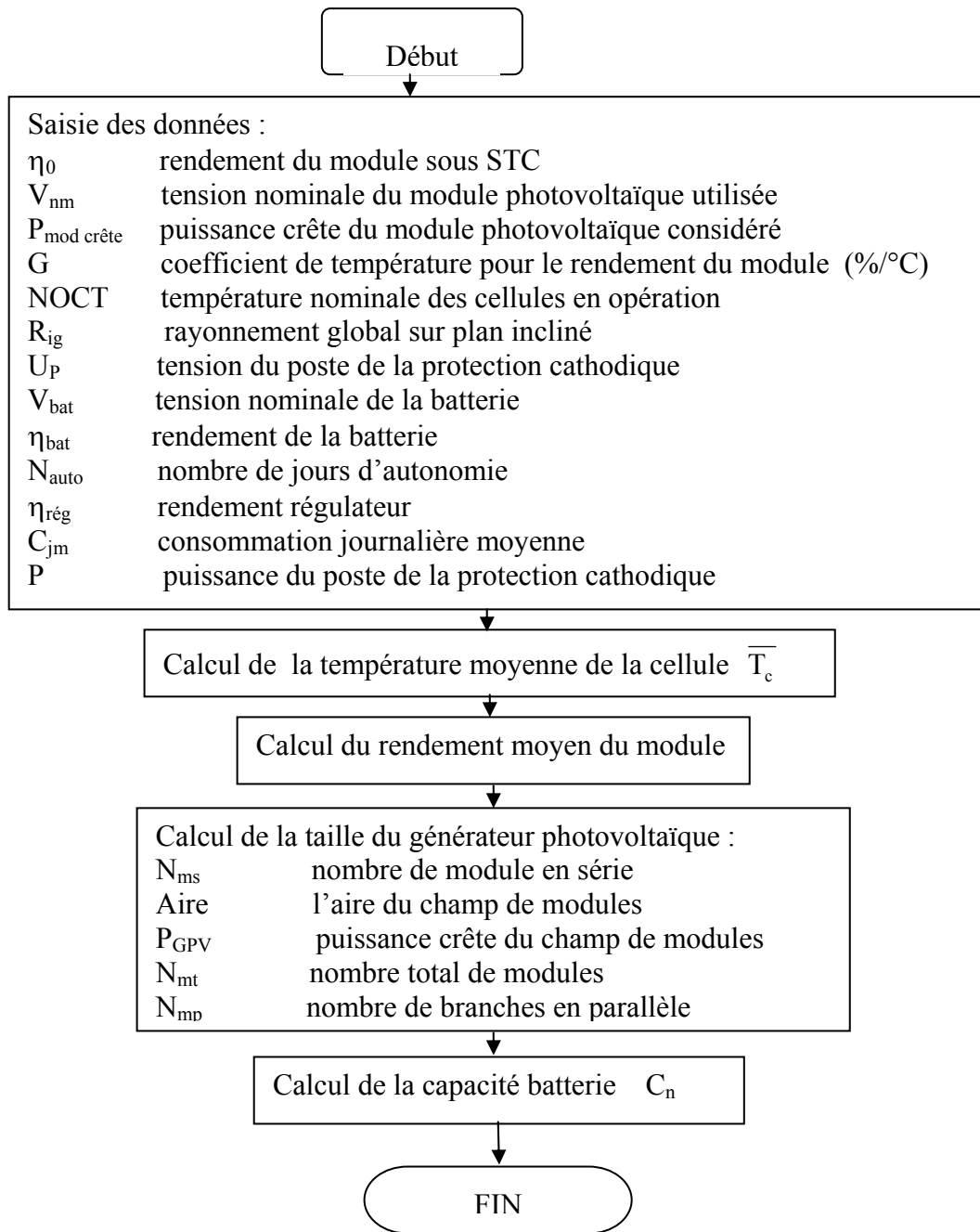
$$C_n = \frac{C_u}{1,8 \times 0,8 \times 0,8 \times 0,7} \quad (3.43)$$

C'est-à-dire :

$$C_n = \frac{C_u}{0,806} \quad (3.44)$$

L'autonomie du système de protection cathodique doit assurer la non interruption en alimentation énergétique de notre système car toute arrêt peut conduire à une accélération du phénomène de la corrosion [2-6,9-15].

L'organigramme ci-dessous illustre le dimensionnement de la paire générateur photovoltaïque - batterie du système photovoltaïque appliqué à la protection cathodique.



**Figure 3.5 :** Algorithme de dimensionnement de la paire générateur (photovoltaïque-batterie) du système photovoltaïque appliqué à la protection cathodique

### 3.4 Résultats et Interprétation

Nous avons considéré ici un tronçon de gazoduc situé entre Haoud El Hamra et Gaci Touil dont les caractéristiques sont :

Diamètre : 48 pouces = 1219 mm

Longueur : 178.8 km

Épaisseur : 13.2 mm

Acier de type X.60 dont la résistivité est :  $18 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , revêtu de coltar, (ép. = 2.4 mm)

La résistivité moyenne du sol sur la longueur à protéger est égale à  $7740 \Omega \cdot m$ .



La résistance d'isolement est comprise entre  $15000 \Omega.m^2$  et  $60000 \Omega.m^2$ . Pour notre choix on doit tenir compte du vieillissement du revêtement, nous prendrons donc comme valeur d'isolement vers la terre des conduites :  $R = 20000 \Omega.m^2$  [10].

Les installations réalisées assureront un état satisfaisant de la protection des conduites en tous points avec une ddp référé à l'électrode de sulfate de cuivre négative et supérieure en valeur absolue à 0.85 V. Nous la fixons à  $-0.95$  V pour avoir une certaine marge de sécurité.

Les résultats du calcul porté dans le tableau suivant afin de compléter les caractéristiques de la canalisation considérée :

**Tableau 3.1** : Caractéristiques de la structure enterrée

Résistance longitudinale de la structure ( $\Omega$ )	Résistance transversale de la structure ( $\Omega.m$ )	Facteur d'atténuation ( $m^{-1}$ )	Résistance caractéristique de la structure par rapport au sol ( $\Omega$ )
$3.56 \times 10^{-6}$	5222.48	$2.61 \times 10^{-5}$	0.1363

Le résultat des calculs du courant de protection au point de soutirage et de la tension en ce point et aux différents points donnés effectués par le programme suivant les expressions citées plus haut se résument dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2** : Les valeurs des potentiels de soutirage et aux limites des portées des postes de protection ainsi que le courant de soutirage

Pk des postes à installer (Km)	N° Poste	X (km)	E (V)	$E_x$ (V)	$I_s$ (A)
Pk0 – 38,5	<b>1</b>	27.5	-0.40	-0.95	3.47
<b>Poste à 27.5</b>		0	-0.61	-1.17	
		11	-0.51	-1.06	
Pk38,5 – 58	<b>2</b>	7.5	-0.51	-1.06	1.98
<b>Poste à 46</b>		0	-0.57	-1.12	
		12	-0.52	-1.07	
Pk 58 – 95	<b>3</b>	18.5	-0.52	-1.07	4.26
<b>Poste à 76.5</b>		0	-0.78	-1.33	
		18.5	-0.58	-1.13	
Pk 95 – 135	<b>4</b>	20	-0.58	-1.13	5.29
<b>Poste à 115</b>		0	-0.92	-1.47	
		20	-0.62	-1.2	
Pk 135 – 178,8	<b>5</b>	23	-0.62	-1.2	6.82
<b>Poste à 158</b>		0	-1.14	-1.69	
		20.8	-0.78	-1.33	

Les potentiels (canalisation – sol) seront égaux aux différences calculées augmentés de  $-0,55$  V (potentiel naturel moyen vers la terre assumés par les conduites), c'est-à-dire : [2, 3, 4, 9, 11, 12, 15].

$$E_0 = E_N + E_S. \quad (3.45)$$

Donc le plus bas potentiel d'une conduite se trouve au point d'injection.

*Remarque* : E est le potentiel calculé par les expressions données plus haut.

Après avoir déterminé le courant de protection, nous déduisons le nombre d'anodes et par conséquent la longueur et la résistance du déversoir à installer. Ainsi, nous calculons la tension du poste de soutirage et sa puissance. Ce qui nous conduit à déterminer la consommation journalière de notre charge afin de dimensionner la taille de la paire (générateur photovoltaïque - batterie) de notre système photovoltaïque en considérant aussi les spécificités du site.

Les résultats concernant les caractéristiques du poste de la protection cathodique sont portés sur le tableau 3.3 :

**Tableau 3.3** : Caractéristiques des postes

N° de poste	1	2	3	4	5
Résistivité du sol à l'endroit de pose $\rho$ ( $\Omega.m$ )	700	850	950	400	950
Nombre d'anodes Nan	15	9	19	23	30
Longueur du Déversoir (m)	75	45	95	115	150
Résistance du déversoir RD ( $\Omega$ )	6,75	12,12	7,60	2,75	5,25
Longueur totale des câbles de liaison (m)	230	200	250	270	305
Résistance des câbles de liaison ( $\Omega$ )	1,58	1,38	1,72	1,85	2,09
Résistance totale RT ( $\Omega$ )	8,32	13,49	9,32	4,60	7,35
Tension du poste (V)	27,73	25,56	38,41	22,88	48,50

Nous remarquons que le nombre d'anodes augmente en fonction de la résistivité du sol et du courant de protection. Nous avons vu précédemment que dans les cas où la résistivité du sol est élevée, nous devons choisir des anodes verticales, mais celles ci sont très coûteuses

et nécessitent des forages importants, ce qui explique qu'elles sont rarement utilisées. C'est donc une question purement économique qui oriente le choix vers les anodes horizontales.

Pour le choix du module, nous avons pris un module de 50 W de puissance crête.

Les caractéristiques de ce module sont les suivantes :

Type BPSX50, au Si multicristallin	
Fabricant	BPSolar
Puissance crête	50 W <sub>c</sub>
Tension de circuit ouvert	21 V
Tension optimale	16.8 V
Courant de court circuit	3.23 A
Courant optimal	2.97A
NOCT	47 °C
Coefficient de température du courant de court circuit	0.0065 mA/°C
Coefficient de température de la tension du circuit ouvert	-0.008 V/°C
Coefficient de température du rendement	-0.5 % /°C
Rendement sous STC	12 %
Prix estimé en DA	33.000

Pour le calcul de la capacité nominale, nous avons considéré une tension de batterie de 24 V avec une autonomie de 4 jours. Si nous considérons le 5<sup>ème</sup> poste une batterie d'environ 2500Ah et de 24 éléments suffira.

Le tableau 3.4 illustre le résultat de dimensionnement des postes de protection cathodique alimentées par énergie solaire photovoltaïque. (Le site est Ouargla)

**Tableau 3.4** : Dimensionnement des postes de la protection cathodique alimentés par énergie solaire photovoltaïque

N° de poste	1	2	3	4	5
Puissance du poste (W)	96.29	50.58	163.784	120.955	330.77
Consommation Journalière de notre charge (Wh)	2310.85	1213.99	3930.81	2902.92	7938.51
Puissance crête du générateur demandée (W <sub>c</sub> )	726.89	381.498	1235.29	912.238	2494.83
Nombre total de modules (BPSX50)	14	8	22	17	45
Nombre de modules en série	2	2	2	1	3
Nombre de modules en parallèle	7	4	11	17	15
Capacité nominale de batterie (Ah)	668.648	351.269	1137.39	839.964	2297.

Une fois effectuée le dimensionnement de notre système photovoltaïque alimentant la station de la protection cathodique suivant le choix adéquat de la paire (champs de modules photovoltaïques - batteries d'accumulateurs). Nous remarquons, concernant la taille du générateur côté modules l'encombrement que va causer leur nombre élevé. A cet effet, nous allons exploiter l'un des avantages de l'utilisation de la source photovoltaïque qu'est la modularité du système.

Dans ce qui suit, nous envisageons une combinaison de quatre (04) modules de 50 W de puissance crête, associés deux (02) en série et (02) en parallèle. La puissance crête du générateur photovoltaïque sera de 200 Wc. L'aire du module d'après l'expression de l'équation (3.35) est égale à 1.68 m<sup>2</sup>. De l'équation (3.34), on tire la consommation journalière moyenne qui est de 641.43 Wh/j. Par conséquent, la puissance du poste est de 26.73 W. Afin de déterminer le courant de protection (le courant de soutirage), nous avons fixé la tension du poste à 24V d'où  $I_s = P / U_p \Rightarrow I_s = 1.11 \text{ A}$ .

Plus haut, nous avons vu que  $I_s$  est une fonction tangente hyperbolique de la portée du poste de la protection cathodique; équation (3.9). Pour évaluer celle ci nous devons passer à la fonction inverse de cette fonction [57] :

$$y = \text{th } x \Leftrightarrow x = \text{Argth } y \quad (3.46)$$

D'où

$$\frac{I_s \times \gamma}{E_s} = \text{tgh}(\alpha \times L_p) \quad (3.47)$$

$E_s$  est pris égal à -1 V. C'est le potentiel d'injection au point de soutirage. Pour déterminer la portée nous considérons sa valeur absolue.

Donc :

$$\frac{1.11 \times 0.137}{1} = 0.4107 \Rightarrow \text{Argth}(0.4107) = (26 \times 10^{-06} \times L_p) = 0.43645296112 \quad (3.48)$$

$$L_p = \frac{0.43645296112}{26 \times 10^{-06}} = 16786.65 \text{ m}$$

$$L_p \approx 16.78 \text{ Km} \approx 17 \text{ km} \quad (3.49)$$

En conclusion, sur un tronçon de 170 km nous avons dix postes de protection cathodique d'une portée de 17 km avec une combinaison de quatre modules photovoltaïques de puissance crête de 50 Wc.

Les résultats relatifs à ce cas sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau 3.5** : Potentiel et courant de soutirage

PK des postes à installer (km)	N° P	X (km)	E (V)	E <sub>x</sub> (V)	I <sub>s</sub> (A)
0	1	8.5	-0.40	-0.95	1.11
8.5		0	-0.44	-0.99	
17		8.5	-0.41	0.96	
17	2	8.5	-0.41	-0.96	1.11
25.5		0	-0.45	-1	
34		8.5	-0.42	-0.97	
34	3	8.5	-0.42	-0.97	1.11
42.5		0	-0.46	-1.01	
51		8.5	-0.43	-0.98	
51	4	8.5	-0.43	-0.98	1.11
59.5		0	-0.47	-1.02	
68		8.5	-0.44	-0.99	
68	5	8.5	-0.44	-0.99	1.11
76.5		0	-0.48	-1.03	
85		8.5	-0.45	-1	
85	6	8.5	-0.45	-1	1.11
93.5		0	-0.5	-1.05	
102		8.5	-0.46	-1.01	
102	7	8.5	-0.46	-1.01	1.11
110.5		0	-0.51	-1.06	
119		8.5	-0.47	-1.02	
119	8	8.5	-0.47	-1.02	1.11
127.5		0	-0.52	-1.07	
136		8.5	-0.49	-1.04	
136	9	8.5	-0.49	-1.04	1.11
144.5		0	-0.53	-1.08	
153		8.5	-0.5	-1.05	
153	10	8.5	-0.5	-1.05	1.11
161.5		0	-0.55	-1.1	
170		8.5	-0.51	-1.06	

**Tableau 3.6** : Caractéristiques des postes dans le cas standard

N° de poste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Résistivité du sol à l'endroit de pose $\rho$ ( $\Omega.m$ )	700	700	850	850	950	950	400	400	950	950
Nombre d'anodes $N_{AN}$	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Longueur du déversoir (m)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Résistance du déversoir RD ( $\Omega$ )	15.3	15.3	18.6	18.6	20.8	20.8	8.76	8.76	20.8	20.8
Longueur totale des câbles de liaison (m)	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Résistance des câbles de liaison ( $\Omega$ )	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
Résistance totale RT ( $\Omega$ )	16.5	16.5	19.8	19.8	22	22	10	10	22	22

• **Dimensionnement des postes de la protection cathodique alimentés par énergie solaire photovoltaïque utilisant la combinaison de quatre modules**

Après avoir déroulé le programme en ayant pris le courant de soutirage pour les différents postes égal à :  $I_S = 1.11 \text{ A}$ , la tension des postes de soutirage de :  $U_p = 24 \text{ V}$ . Et suite aux calculs déterminant les résistances totales des postes de soutirage, nous avons obtenu :

La puissance de chaque poste de soutirage :  $P = 27 \text{ W}$

La consommation journalière de chaque poste :  $C_{jm} = 639 \text{ Wh}$

La puissance crête du générateur PV :  $P_{GPV} = 200 \text{ W}_c$

D'où, nous avons effectivement :

Le nombre de branches connectées en série pour chaque poste :  $N_{ms}[1] = 2$

Le nombre de module retenu pour chaque poste :  $N_{mt} [1] = 4$

Le nombre de branches connectées en parallèle pour chaque poste :  $N_{mp}[1] = 2$

La capacité nominale de la batterie :

$$C_{\text{nombat}} = 185 \text{ Ah}$$

La valeur normalisée de la capacité batterie est

$$C = 240 \text{ (Ah)}$$

Concernant la partie stockage, nous choisissons une batterie à plomb ouverte de 2 V et de capacité de 240 Ah. Avec la combinaison suivante : 12 batteries en série de 240 Ah

Etant donné que nous avons deux configurations possibles pour ce système photovoltaïque destiné à alimenter la station de la protection cathodique, nous passons à l'évaluation économique afin d'établir une comparaison.

### 3.5 Evaluation du coût du Watt crête des deux configurations du système photovoltaïque appliqué à la protection cathodique

Cette étude économique est effectuée afin de choisir parmi les deux combinaisons du système photovoltaïque trouvées pour alimenter les stations de protections cathodiques celle qui est économiquement optimale. Pour cela, nous avons tout d'abord calculé le coût d'investissement, le coût de l'amortissement et celui de l'entretien et de la maintenance du système pour ensuite déterminer le coût global actualisé d'où nous déduirons le coût du watt crête.

#### 3.5.1 Coût de l'investissement et de l'amortissement du système de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque

Nous essayons d'établir le coût total d'investissement. Le coût de l'amortissement annuel est calculé connaissant la durée de vie effective de chaque constituant et le taux d'actualisation  $t$  constant que nous pouvons approximer par le taux d'intérêt (nous avons pris par hypothèse  $t = 8\%$ ) [22].

##### 1. Coût du générateur photovoltaïque

Le coût d'investissement du générateur photovoltaïque est :

$$C_{\text{GPV}} = P_{\text{Mod}} \times N_{\text{Mod}} \quad (3.50)$$

##### 2. Coût du régulateur

Le coût d'investissement du régulateur est exprimé par :

$$C_{\text{Rég}} = P_{\text{Rég}} \times N_{\text{Rég}} \quad (3.51)$$

##### 3. Coût de la batterie d'accumulateurs

Le coût d'investissement de la batterie d'accumulateurs est le produit du nombre de batteries par le prix unitaire d'une batterie, son expression est :

$$C_{\text{Bat}} = P_{\text{Bat}} \times N_{\text{Bat}} \quad (3.52)$$

##### 4. Coût des accessoires

$C_{\text{Acc}}$  est considérée égale à 3 % de la somme des coûts des différents équipements

$$C_{\text{Acc}} = (C_{\text{GPV}} + C_{\text{Rég}} + C_{\text{Bat}}) \times 30\% \quad (3.53)$$

### 5. Investissement total des équipements

La relation suivante exprime le coût d'investissement total des équipements :

$$I_{\text{Tot}} = C_{\text{GPV}} + C_{\text{Rég}} + C_{\text{Bat}} + C_{\text{Acc}} \quad (3.54)$$

En négligeant le coût de l'installation et la mise en service des équipements de la protection cathodique.

### 6. Amortissement annuel du générateur PV

En considérant une durée de vie  $N_1$ , un coût initial  $C_{\text{GPV}}$  et un taux d'annuité (ou taux d'actualisation)  $t_{\text{acc}}$  constant, l'amortissement annuel du générateur photovoltaïque est [22] :

$$A_{\text{GPV}} = C_{\text{GPV}} \times \frac{t_{\text{acc}}}{1 - (1 + t_{\text{acc}})^{-N_1}} \quad (3.55)$$

### 7. Amortissement annuel du régulateur

La relation suivante donne l'amortissement annuel du régulateur.

$$A_{\text{Rég}} = C_{\text{Rég}} \times \frac{t_{\text{acc}}}{1 - (1 + t_{\text{acc}})^{-N_2}} \quad (3.56)$$

### 8. Amortissement annuel de la batterie électrochimique

Les moyens de stockage sont presque toujours réalisés grâce à des batteries d'accumulateurs. Leur coût d'amortissement est :

$$A_{\text{Bat}} = C_{\text{Bat}} \times \frac{t_{\text{acc}}}{1 - (1 + t_{\text{acc}})^{-N_3}} \quad (3.57)$$

### 9. Amortissement annuel des accessoires

Les accessoires divers (structures, anodes, électrode de référence, câbles, les joints isolants, la fine de coke (le backfill),...). Leur amortissement est :

$$A_{\text{Acc}} = C_{\text{Acc}} \times \frac{t_{\text{acc}}}{1 - (1 + t_{\text{acc}})^{-N_4}} \quad (3.58)$$

### 10. Amortissement annuel total de l'investissement

L'amortissement annuel total est :

$$A_{\text{Tot}} = A_{\text{GPV}} + A_{\text{Rég}} + A_{\text{Bat}} + A_{\text{Acc}} \quad (3.59)$$

### 3.5.2 Coût de l'entretien et de la maintenance du système de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque

Le coût de l'entretien et de la maintenance est très difficile à prévoir. Il dépend beaucoup plus de la qualité des équipements et de leur utilisation en fonction de l'environnement où le système est installé et les moyens de l'utilisateur. Son estimation est fixée par rapport au coût de l'investissement de l'équipement [22].



### 1. Coût de l'entretien du générateur PV

$$E_{\text{GPV}} = C_{\text{GPV}} \times Rt_1 \quad (3.60)$$

### 2. Coût de l'entretien du régulateur

$$E_{\text{Rég}} = C_{\text{Rég}} \times Rt_2 \quad (3.61)$$

### 3. Coût de l'entretien de la batterie

$$E_{\text{Bat}} = C_{\text{Bat}} \times Rt_3 \quad (3.62)$$

### 4. Coût de l'entretien des accessoires

$$E_{\text{Acc}} = C_{\text{Acc}} \times Rt_5 \quad (3.63)$$

### 5. Coût total annuel de l'entretien

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{GPV}} + E_{\text{Rég}} + E_{\text{Bat}} + E_{\text{Acc}} \quad (3.64)$$

- $Rt_1=3\%$ ,  $Rt_2=5\%$ ,  $Rt_3=1\%$  et  $Rt_4=2\%$  représentent respectivement les estimations par rapport à l'investissement du générateur photovoltaïque, du régulateur, de la batterie électrochimique et des accessoires divers.
- $C_{\text{GPV}}$ ,  $C_{\text{Rég}}$ ,  $C_{\text{Bat}}$ , et  $C_{\text{Acc}}$  représentent respectivement les coûts des investissements du générateur photovoltaïque, du régulateur, des batteries électrochimiques et des accessoires divers.

### 3.5.3 Coût global actualisé du système de la protection cathodique alimentée par énergie solaire photovoltaïque et le coût du Watt crête

Une fois que les coûts de l'amortissement annuel total et de l'entretien total annuel sont déterminés, nous pouvons évaluer le coût du watt crête fourni par Le système de l'énergie solaire photovoltaïque.

#### 1. Coût global actualisé

Le coût global actualisé est défini par la somme des amortissements annuels actualisés (en prenant en considération le taux d'actualisation) tels que défini précédemment et le coût de l'entretien et la maintenance annuel de tout le système. Il est exprimé par la relation (3.64) [22]:

$$CGA = A_{\text{Tot}} + E_{\text{Tot}} \quad (3.65)$$

#### 2. Coût global actualisé du watt crête

C'est le rapport entre le coût global actualisé et la puissance crête du générateur photovoltaïque. Son expression est comme suit [22] :

$$CGA / W_c = \frac{CGA}{PWPV} \quad (3.66)$$

### 3.6 Résultats et interprétation de l'évaluation économique

Pour la première configuration, c'est-à-dire un nombre de modules quelconque avec des portées différentes et par conséquent l'installation de 05 stations de protection cathodique sur une distance d'environ 170 km, nous avons pour chaque poste une capacité de batterie différente suivant la consommation : 395 Ah, 735 Ah, 1220 Ah, 900 Ah, 2500 Ah.

Ce sont les capacités respectives pour la 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> station. Pour cela nous avons un prix unitaire différent pour chaque batterie qui est respectivement: 18000 DA, 27000 DA, 43000 DA, 32000 DA et 80000 DA.

La deuxième configuration standard du système concerne la combinaison des quatre modules sur une portée de 170 km et aboutissant à l'installation de 10 postes de protection cathodique sur la même distance citée ci-dessus.

Les batteries ont des capacités de 240 Ah dont le prix unitaire est d'environ 7000 Ah, le nombre d'éléments à installer par produit, leurs coûts d'investissements, coût d'amortissement, coût de l'entretien et de la maintenance, coût global actualisé et le coût global actualisé du watt crête sont rapportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 3.7) [45].

**Tableau 3.7 : Coûts calculés pour les deux configurations d'installation de système de protection cathodique**

Désignation	Configuration pour 10 postes					Configuration pour 05 postes				
	Nb	Investissement (DA)	D. Vie an	t <sub>acc</sub> (%)	Amortissement (DA)	Nb	Investissement (DA)	D. Vie an	t <sub>acc</sub> (%)	Amortissement (DA)
<b><u>Equipements</u></b>										
- Modules	40	1 320 000	20	8	134 000	106	3 498 000	20	8	356 000
- Batteries	120	840 000	5	8	210 000	60	2 400 000	5	8	601 000
- Régulateurs	10	50 000	7	8	9 600	5	25 000	7	8	4 800
<b>Total équipements (DA)</b>		<b>2 210 000</b>					<b>5 923 000</b>			
<b><u>Accessoires</u></b>										
Anodes; backfill; câbles.....		66 300	20	8	6 750		177 690	20	8	18 000
<b>Total investissement (DA)</b>		<b>2 276 300</b>					<b>6 100 690</b>			
<b>Total amortissement (DA)</b>					<b>360 350</b>					<b>979 800</b>
<b><u>Entretien (DA/an)</u></b>										
- Modules		39 600					104 940			
- Batteries		8 400					24 000			
- Régulateurs		2 500					1 250			
- Accessoires		1 326					3 554			
<b>Coût total de l'entretien (DA/an)</b>		<b>51 826</b>					<b>133 744</b>			
<b>Coût Global Actualisé (DA)</b>		<b>412 176</b>					<b>1 113 544</b>			
<b><u>Puissance crête (Wc)</u></b>		<b>2000</b>					<b>5 300</b>			
<b>Coût Global Actualisé du Wc (DA/Wc)</b>		<b><u>206,00</u></b>					<b><u>210,00</u></b>			

Le coût du watt crête de la configuration utilisant un système photovoltaïque standard (combinaison de quatre modules avec une répartition de dix postes le long du tronçon) est moins élevé que celui de la configuration du système photovoltaïque spécifique à la charge (différentes combinaisons de modules répartis en cinq postes le long du même tronçon).

Ce qui nous conduit à choisir la configuration standard du système et son adaptation aux différents cas de figures imposées par notre charge en intercalant le régulateur de charge adéquat.

### **3.7 Conclusion**

Un système photovoltaïque destiné à la protection cathodique se compose principalement d'un champ de modules photovoltaïques, d'un système de stockage électrochimique constitué d'un parc de batteries d'accumulateurs et d'un système de conditionnement de puissance qui est le régulateur. Le dimensionnement effectué est primordial afin d'évaluer le courant de protection qui conduit à la détermination de la masse et du nombre d'anodes et la puissance demandée par la source électrique à appliquer. D'où, la taille de chaque élément de la chaîne photovoltaïque ainsi que les caractéristiques du système de régulation et de contrôle. Nous avons ici appliqué l'avantage de la modularité du système photovoltaïque dont l'évaluation économique conduit à un coût optimal donc un dimensionnement optimal. Pour protéger au mieux notre structure, il est conseillé de placer le générateur photovoltaïque au niveau des points chauds des zones critiques (où la corrosion est plus importante).

# **Chapitre 4**

## **La régulation dans les systèmes photovoltaïques pour la protection cathodique**

## **Chapitre 4**

### **La régulation dans les systèmes photovoltaïques pour la protection cathodique**

#### **4.1 Introduction**

Pour annihiler complètement la corrosion, la structure à protéger devra être alimentée par un courant constant déterminé par la nature du métal de la structure, sa surface et le milieu environnant. La principale difficulté pour atteindre ce but réside dans la variation de la résistivité du milieu environnant due aux changements des conditions climatiques.

Par exemple quand il pleut, la résistivité du sol diminue et vice versa. Si une tension continue appliquée est maintenue constante, alors le courant soutiré variera avec les conditions climatiques. Une telle situation peut causer une sérieuse corrosion à la structure métallique protégée car le courant imposé varie constamment, tandis que le courant demandé doit être constant. Sous ces conditions, la structure métallique est soit surprotégé, ou soit sous protégé. Ces deux conditions sont toutes les deux nuisibles et elles doivent être évitées.

Pour les systèmes de protection cathodique conventionnels, un ajustement manuel de la tension continue pour maintenir un courant constant est employé. Un simple technicien bien entraîné pour travailler à l'aide des équipements de mesures spécifiques est appelé à examiner les points de test le long du pipeline sous protection afin d'ajuster la tension à différents emplacements. Ce processus est répété régulièrement et à chaque fois que c'est nécessaire. Un tel ajustement manuel est plein d'inconvénients : perte de temps, processus coûteux et compliqué puisqu'il dépend de l'expérience du technicien et de la précision des instruments de mesures. Pire encore une sérieuse corrosion peut prendre place durant la période entre deux ajustements successifs qui a pour raison la non concordance de la tension appliquée au système [28].

Pour surmonter cette difficulté, un système de protection cathodique automatiquement régulé est proposé. Ce système détecte les variations de la résistivité du milieu environnant et ajuste automatiquement la tension continue de telle sorte que le courant continu soit maintenu presque constant à la valeur demandée sans tenir compte des variations de la résistivité du sol.

Dans ce chapitre, une étude sur la conception du modèle du circuit électronique de contrôle et de régulation du système photovoltaïque pour la protection cathodique est présentée.

La figure 4.1 présente le schéma synoptique du système de régulation entrant dans l'architecture du système photovoltaïque pour la protection cathodique. Ce système de régulation a été développé autour du microcontrôleur 16F877, gérant ainsi la tension de sortie générée par le hacheur buck-boost, la tension de charge de la batterie, la poursuite du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque et grâce à un circuit d'adaptation représenté par un hacheur buck permet d'abaisser la tension élevée du générateur photovoltaïque pour la rendre en concordance à la tension de charge de la batterie par l'intermédiaire de la deuxième sortie de la PWM du microcontrôleur générant ainsi le deuxième rapport cyclique adéquat.

### 4.2 Le système de régulation dans la protection cathodique

Concernant la spécificité de ce système de régulation, l'ajustement de la tension continue se fait continuellement et automatiquement. Ainsi le courant est maintenu toujours constant indépendamment aux variations climatiques et du sol. Ce travail considère le modèle des circuits électroniques utilisés dans les régulateurs des systèmes de protection cathodiques. Le circuit de base est un hacheur survolteur – dévolteur commandé par un microcontrôleur via la fonction de PWM de ce dernier qui sert à ajuster le rapport cyclique afin d'ajuster la tension de sortie appliquée à la structure à protéger pour atteindre les valeurs de protection qui se résument en la différence de potentiel entre la structure à protéger (pipe) et l'électrode de référence ( $C_u/C_uSO_4$ ).

La figure 4.2 montre le diagramme bloc du système de régulation développé.

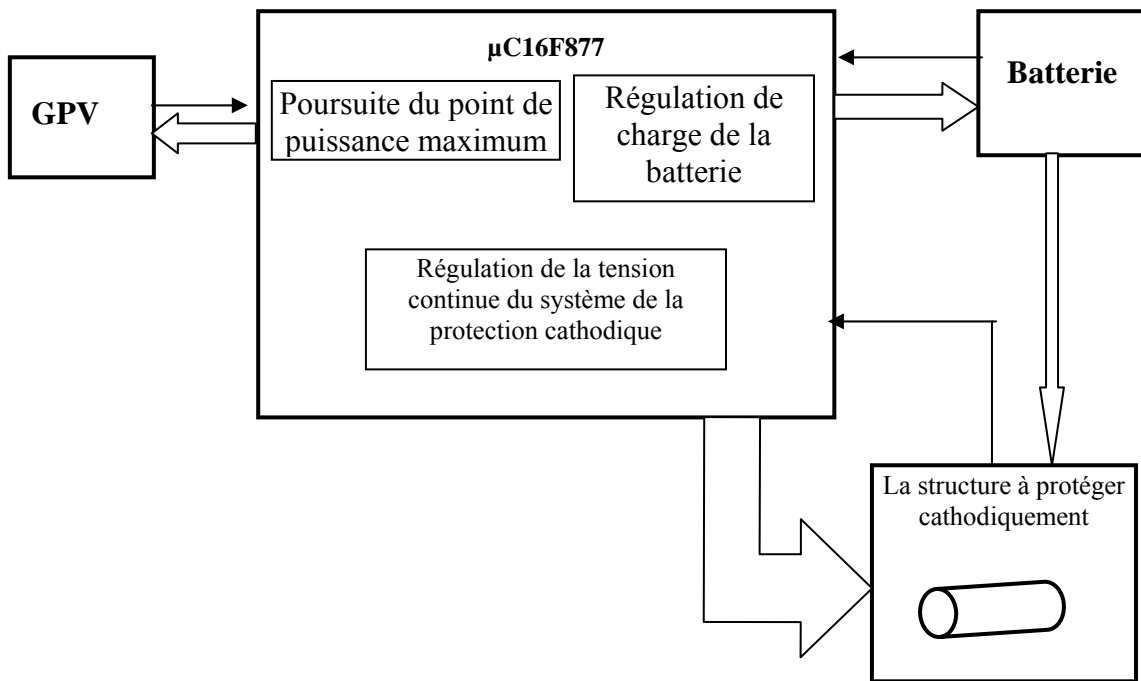


Figure 4.1 : Schéma synoptique du système de la protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque à base du nouveau régulateur

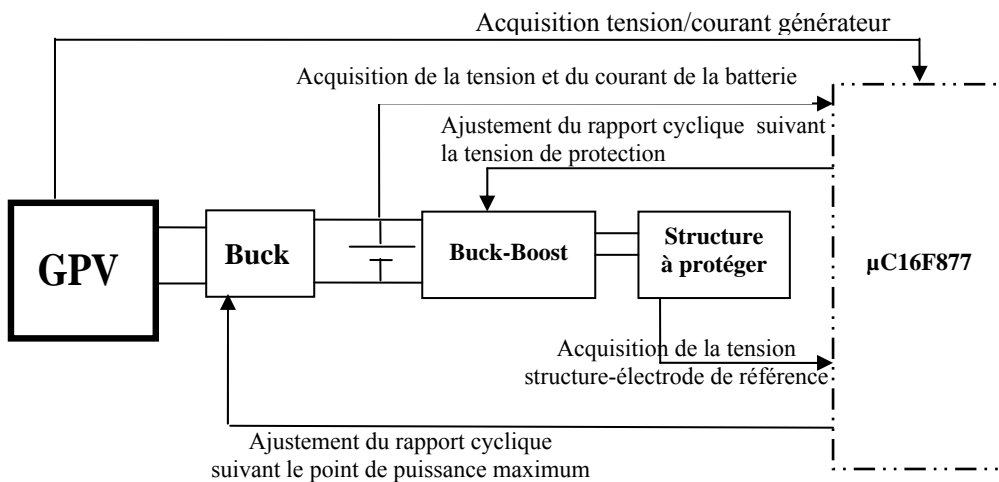


Figure 4.2 : Diagramme bloc du système de régulation développé

Les tensions autorisées sont comprises entre  $-0.85V$  à  $-1.5V$ . Si cette condition n'est pas remplie, le  $\mu C$  fait varier le rapport cyclique du hacheur via le signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion) pour ajuster la tension continue au niveau de la charge (pipeline). Il permet aussi : de mesurer la tension et le courant du générateur photovoltaïque GPV pour le calcul de la puissance afin d'effectuer la poursuite du point de puissance maximum et de mesurer le courant de la batterie et de sa tension.

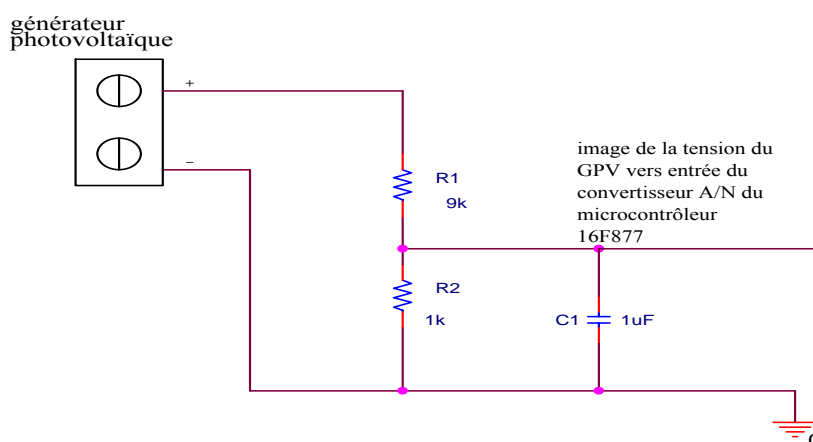
Donc, les tâches assurées par le microcontrôleur sont :

- La mesure de la tension du générateur photovoltaïque;
- La mesure du courant du générateur photovoltaïque;
- La mesure de la tension batterie;
- La mesure du courant de la batterie;
- La mesure de la tension au point de test du pipeline (par rapport à l'électrode de référence);
- La variation du rapport cyclique de l'abaisseur;
- La variation du rapport cyclique du hacheur survolteur-dévolteur ;
- L'ajustement de la tension continue au niveau de l'utilisation conformément aux valeurs mesurées au niveau du point de test de telle sorte que la tension en ce point de test soit ajuster aux limites autorisées pour garantir la protection contre la corrosion;

Nous allons commencer par présenter les divers circuits électroniques établis dans le cadre de ce travail de recherche, faisant partie intégrante du régulateur proposé, avant de passer à la simulation et à la programmation du microcontrôleur.

### 4.3 Circuit de mesure de la tension du générateur photovoltaïque

C'est un circuit qui permet la mesure de la tension du générateur photovoltaïque. Les valeurs sont acquises aux entrées du convertisseur analogique/numérique du  $\mu C$  via le pont diviseur de tension. Sachant que la tension du GPV varie jusqu'à 42 volts avec une tension optimale de 33.6 volts (au point de puissance maximale). Ce circuit est illustré sur la figure 4.3.



*Figure 4.3 : Circuit de mesure de la tension du générateur*



Le calcul de ce circuit s'effectue comme suit :

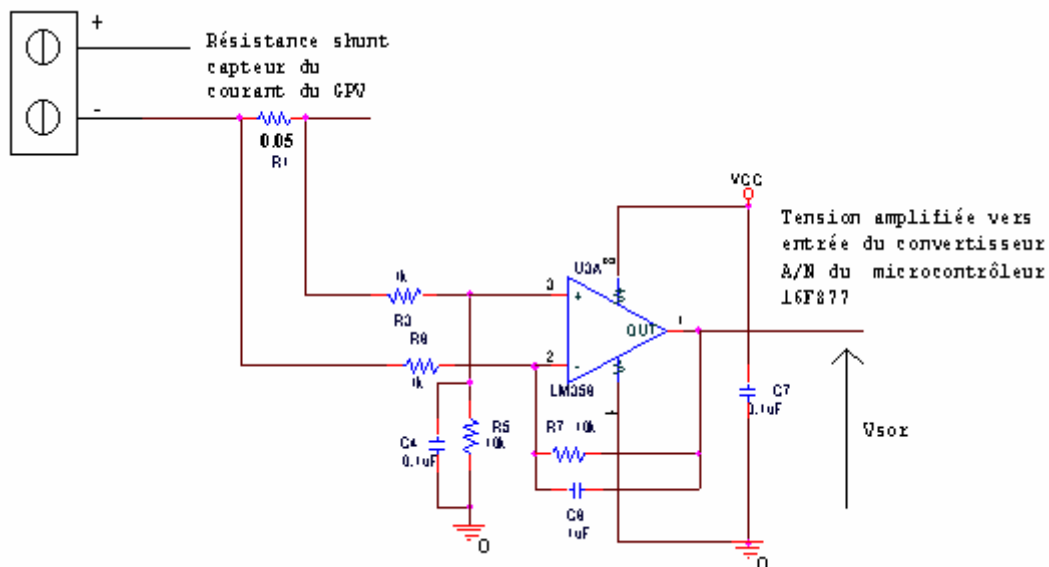
$$V_s = V_{gpv} \times \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (4.1)$$

Les valeurs des résistances sont fixées de telle manière de réduire l'ordre de grandeur de la tension du générateur photovoltaïque pour qu'elle soit compatible aux valeurs de référence du microcontrôleur.

#### 4.4 Circuit de mesure du courant du générateur photovoltaïque

La mesure de l'intensité du courant du générateur photovoltaïque est effectuée indirectement par l'intermédiaire d'un shunt intercalé en série avec le générateur photovoltaïque. En effet, la chute de tension aux bornes du shunt est directement proportionnelle au courant qui la traverse, donc du courant débité par le GPV (équation (4.1)).

Dans ce cas, il a été utilisé un shunt 0.05 V-1 A, donc un courant de 1A développera une d.d.p de 50mV aux bornes du shunt. Le fait que la tension est faible (quelques mV) d'où la nécessité de procéder à son amplification avant son traitement, la cellule d'amplification est l'amplificateur opérationnel LM358 configuré en amplificateur de différence avec un gain de 10 fixé par les résistances équation (4.3). La figure (4.4) illustre ce circuit.



**Figure 4.4** : circuit de mesure du courant du générateur photovoltaïque

$$V_{sh} = R_{sh} \times I_{GPV} \quad (4.2)$$

$$V_{samp} = kV_{sh} \quad (4.3)$$

$$k = \frac{R_5}{R_3} = \frac{R_7}{R_8} = 10 \quad \text{Si } R_5 = R_7 = 10k\Omega \quad \text{et} \quad R_3 = R_8 = 1k\Omega \quad (4.4)$$

#### 4.4 Circuits de mesure de la tension et du courant batterie

C'est un circuit qui permet de mesurer la tension de la batterie d'accumulateurs et d'adapter les valeurs *relevées* aux entrées du convertisseur analogique/numérique du  $\mu\text{C}$  suivant l'intervalle de la tension de référence de celui-ci. Sachant que la tension de la batterie varie entre 22.4 à 28.8 volts. Vu ces valeurs, c'est leurs images qui seront converties. C'est le même circuit que celui de mesure de la tension du générateur photovoltaïque. La figure 4.3 illustre ce circuit, où l'entrée est substituée par la batterie d'accumulateurs. De même pour le circuit de mesure du courant de la batterie similaire à celui de la mesure du courant du générateur photovoltaïque (figure 4.4)

#### 4.5 Circuit d'alimentation de la charge

La tension appliquée à la structure à protéger varie de 10 à 50 volts. Suivant la résistance totale du circuit calculée au chapitre précédent ( $10\Omega \leq R_T \leq 22\Omega$ ), avec un courant de sortie maximum assurant la protection de 2 ampères.

La tension d'entrée de ce circuit est la tension batterie (égale à 24 volts) et la tension de sortie en fonctionnement normal de la charge est également de 24 volts, (ces valeurs sont déterminées suivant le dimensionnement effectué au chapitre précédent).

Le circuit électronique choisi selon les caractéristiques de notre charge est un hacheur buck-boost. Car, nous remarquons que pour la même tension d'entrée la tension de sortie lui est soit inférieure, supérieure ou égale.

Le schéma de ce circuit est présenté sur la figure 4.5. L'interrupteur est commandé par la source d'impulsion simulant le rôle du microcontrôleur 16F877.

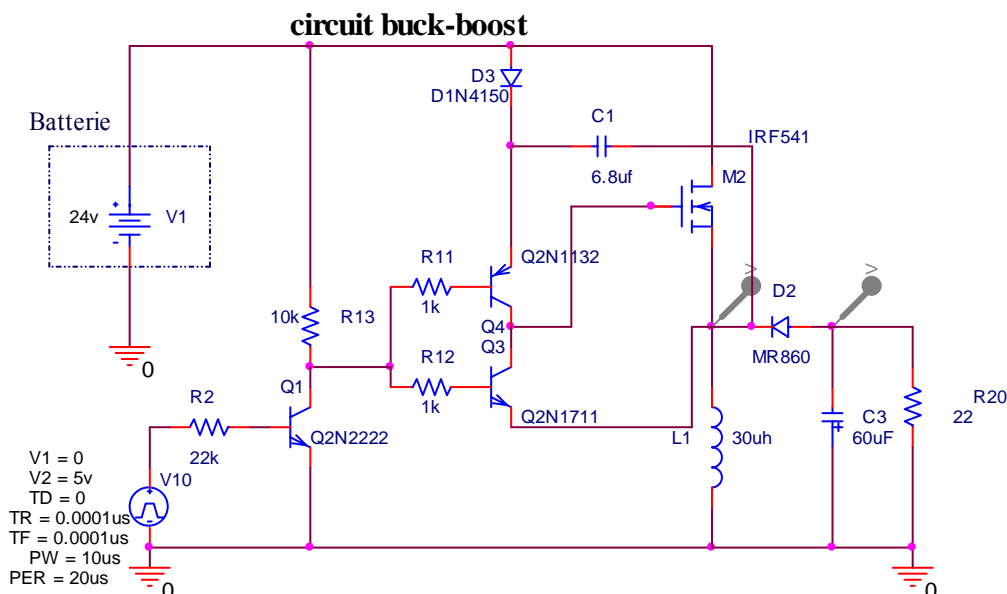


Figure 4.5 : Circuit d'adaptation de la tension de la charge

C'est un hacheur inverseur de tension, buck-boost ou hacheur inductif, la fréquence de travail a été fixée à :  $f = 50 \text{ kHz}$ .

Le régime stationnaire conduit à [29] :

$$V_s = \frac{\alpha \times V_e}{(1 - \alpha)} \quad (4.5)$$

$$\alpha = \frac{V_s}{(V_s + V_e)} \quad (4.6)$$

$$L = \left(\frac{1}{f}\right) \times \left(\frac{1}{\Delta I_L}\right) \times (V_s + V_F) \times \left(\frac{V_{e\_min}}{V_s + V_F + V_{e\_min}}\right) \quad (4.7)$$

Où  $V_F = 0.7$  (tension directe de la diode) et  $\Delta I_L$  est choisi égale à 40 % du courant moyen dans la bobine  $L$ , il suit que :

$$\Delta I_L = (0.4 \times I_L) = 0.4 \times I_s \times \left(\frac{V_{e\_min} + V_s + V_F}{V_{e\_min}}\right) \quad (4.8)$$

$$I_{sor} = (1 - \alpha) \times I_L \quad (4.9)$$

L'amplitude d'ondulation de la tension de sortie est :

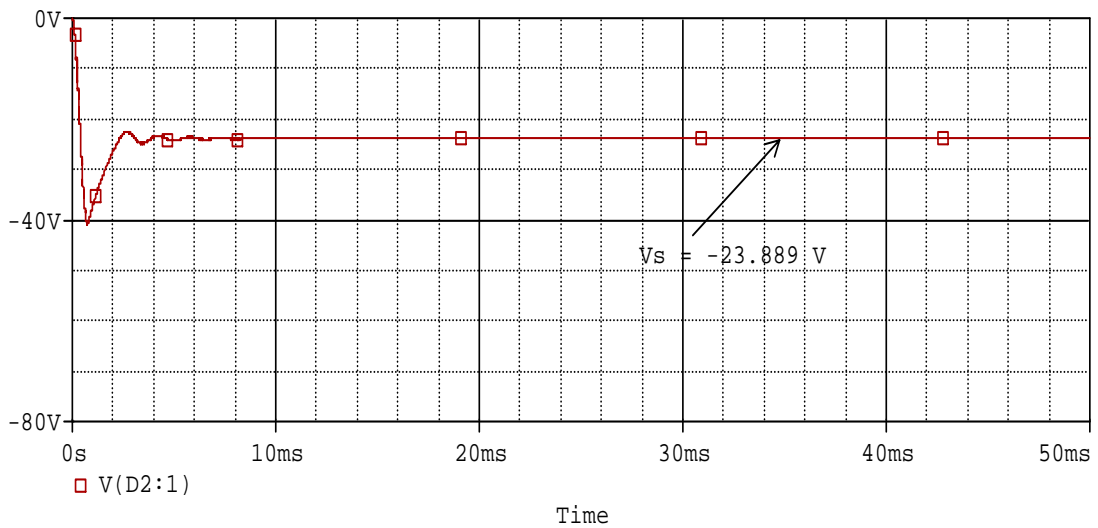
$$\Delta V_s = \frac{\alpha \times I_s}{f \times C} \quad (4.10)$$

Si on considère  $\Delta V_s = 10\%$ , nous tirons la valeur de la capacité de l'expression (4.10), nous aurons :

$$C = \frac{\alpha \times I_s}{0.1 \times f} \quad (4.11)$$

Pour :  $V_s = V_e = 24$  V, c'est-à-dire pour  $\alpha = 0.5$ .

Les valeurs de l'inductance et de la capacité étant déterminées. La simulation nous donne :



**Figure 4.6 :** Tension de sortie appliquée au pipeline pour  $\alpha = 0.5$ , pour  $V_s = V_e$

La figure 4.6 montre bien que la tension de sortie souhaitée est atteinte suivant l'équation (4.5).

Dans notre cas, la commande de l'interrupteur se fait par le microcontrôleur. L'ajustement de la tension de sortie à la valeur demandée se fait grâce à la variation du rapport cyclique via le microcontrôleur 16F877 d'après les valeurs des tensions soutirées mesurées par rapport à de l'électrode de référence  $C_u/C_uSO_4$  acquises au niveau de ses ports du convertisseur A/N. Ainsi la valeur de la tension appliquée à la charge va augmenter ou diminuer suivant les conditions d'immunité de notre structure pour garantir la protection contre la corrosion en maintenant le courant de protection constant.

Le rapport cyclique de notre hacheur est généré par le signal de la sortie PWM du microcontrôleur conformément au programme développé en essayant d'atteindre les critères de la protection cathodique dont les valeurs sont comprises entre 1,5 V et 0.85 V.

Avant de passer à la programmation du microcontrôleur et afin de s'assurer de la fiabilité de notre circuit, nous avons effectué une modélisation et une simulation du même circuit en utilisant l'outil Simulink de l'environnement "MATLAB".

#### **4.7 Modélisation de la commande du hacheur buck-boost**

##### **4.7.1 Etablissement des équations d'états**

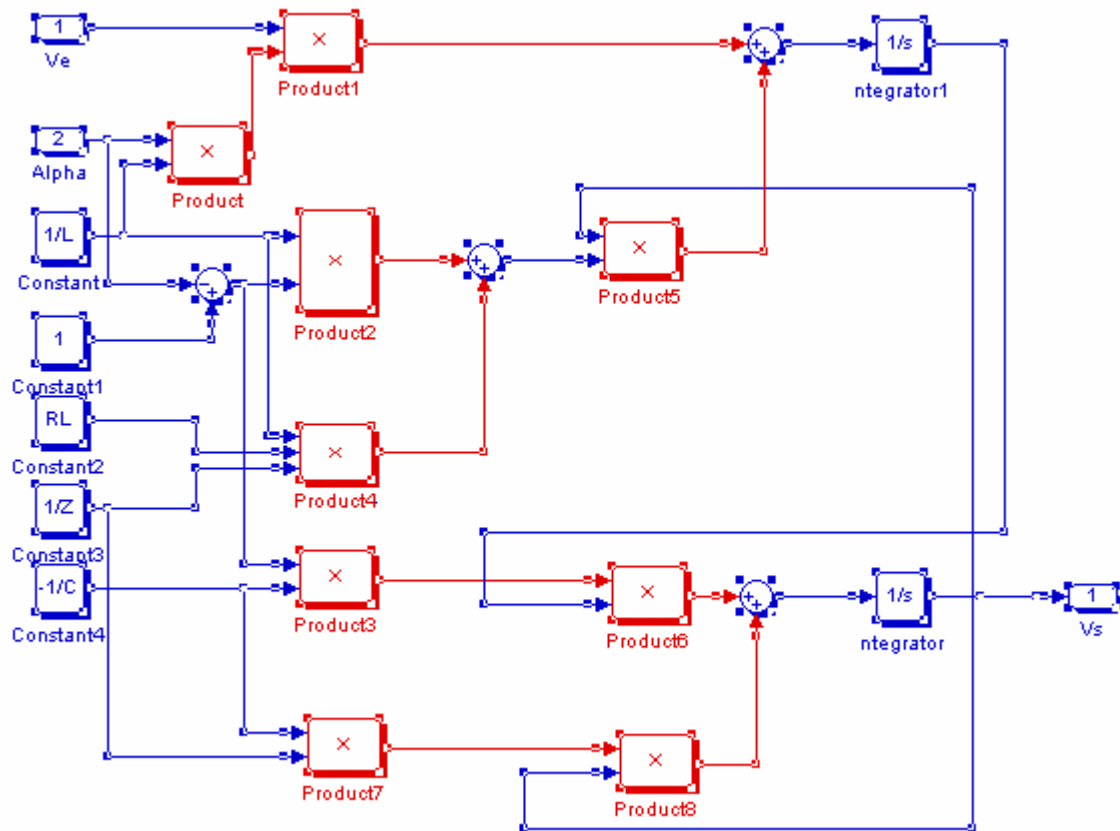
La simulation est effectuée à l'aide du modèle d'état du système.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} \times (\alpha \times V_{bat} - r_{self} \times I_L + (1 - \alpha) V_s) \quad (4.12)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_s}{RC} - \frac{i_L}{C} (1 - \alpha) \quad (4.13)$$

##### **4.7.2 Simulation de la variation de la tension de sortie du buck-boost en fonction de la variation du rapport cyclique**

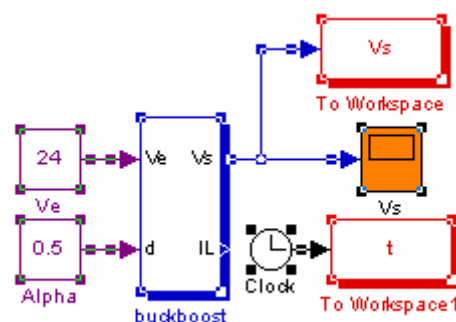
Le modèle du circuit buck-boost est réalisé suivant les équations d'états établies pour déterminer  $V_s$  et  $I_L$ . C'est la tension  $V_s$  qui sera simulé suivant les variations du rapport cyclique. La figure 4.7 illustre le modèle de ce hacheur.



**Figure 4.7 :** Modèle du circuit du buck-boost

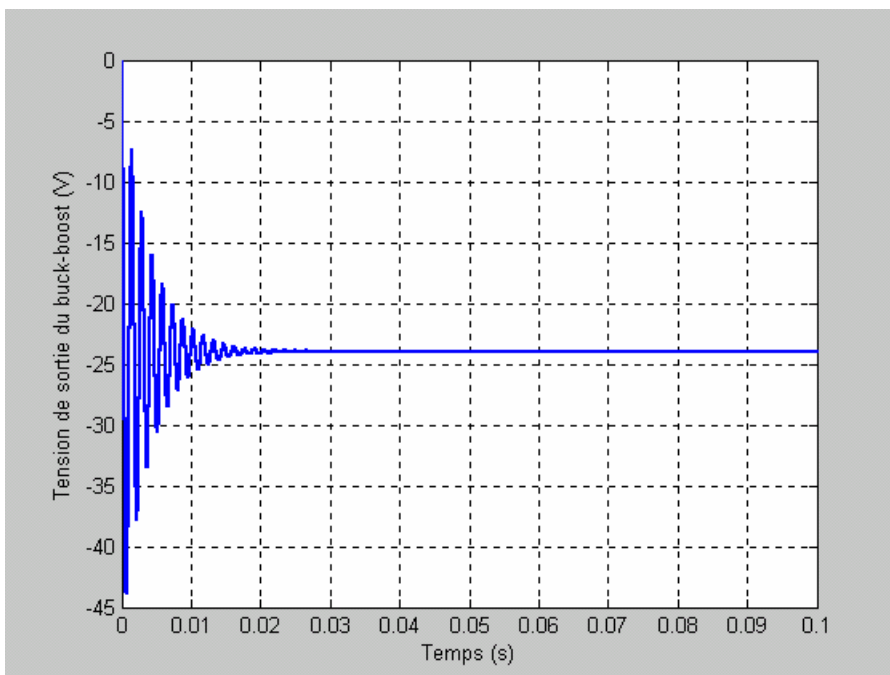
Les valeurs des composants de ce circuit sont introduites dans le fichier programme de Matlab. Avant de simuler le comportement de la tension de sortie en faisant varier le rapport cyclique  $\alpha$ , il faut affecter les valeurs aux composants :

- C=60  $\mu$ F;
- L=30  $\mu$ H;
- RL=0.01  $\Omega$ ;
- Z=10  $\Omega$ ;



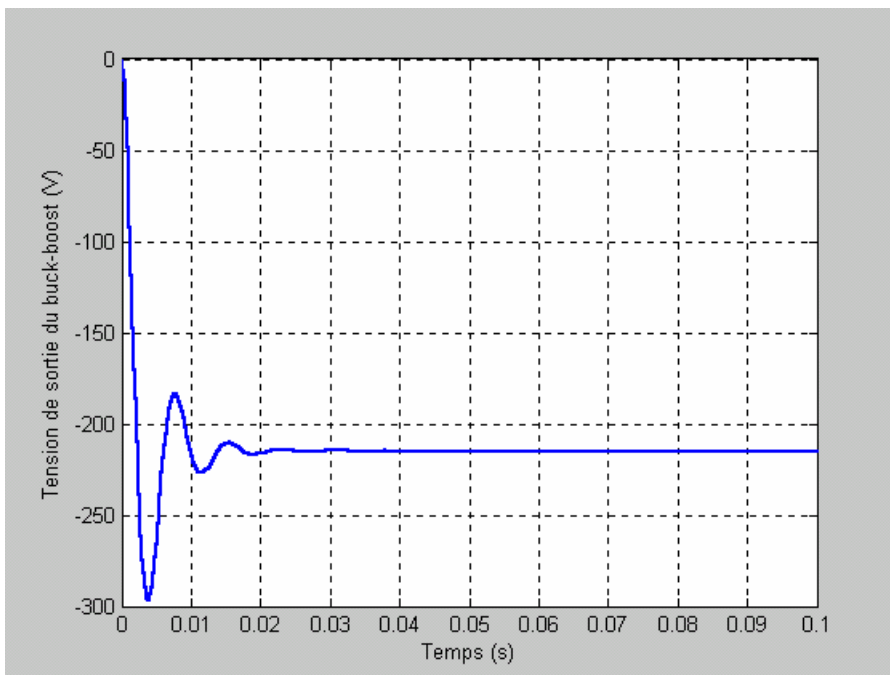
**Figure 4.8 :** Modèle simulant la variation de  $V_s$  du buck-boost en fonction de la variation du rapport cyclique

Nous démarrons toujours à partir de  $\alpha = 0.5$  donc :  $V_s = V_e$ , la figure 4.9 suivante illustre la simulation de ce cas.

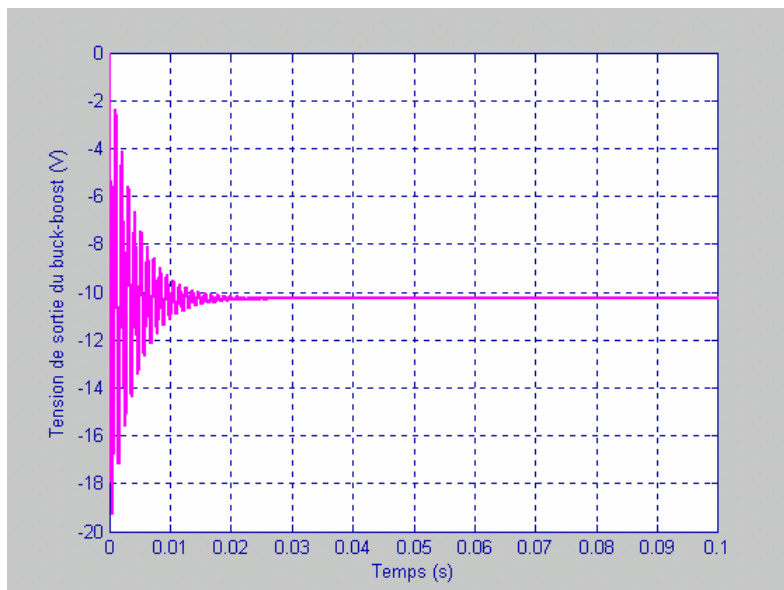


**Figure 4.9 :** Tension de sortie du buck-boost pour  $\alpha = 0.5$

La simulation donne (avec des rapports cycliques différents) les résultats suivants  $V_e=24V$  et pour les valeurs de  $\alpha$ : supérieures et inférieures à 0.5. Les figures 4.10 et 4.11 illustrent ces deux cas.

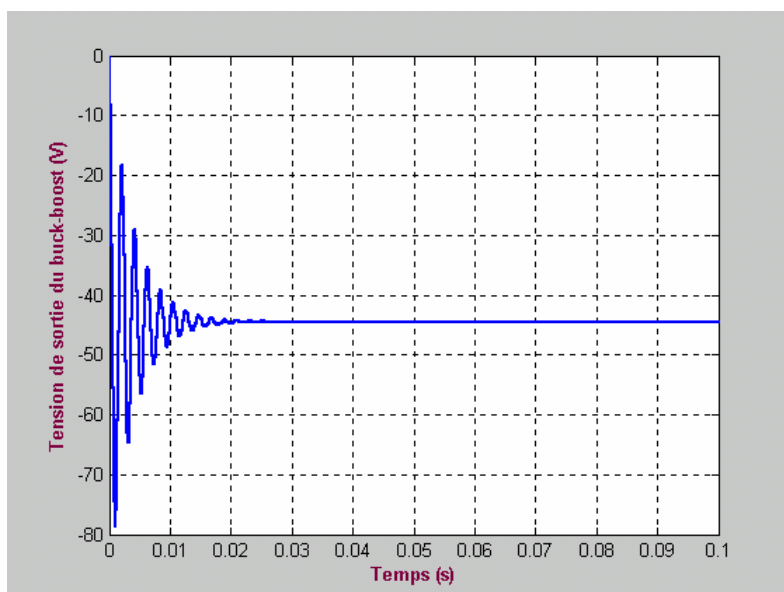


**Figure 4.10 :** Tension de sortie du buck-boost pour  $\alpha = 0.9$



**Figure 4.11** : Tension de sortie du buck-boost pour  $\alpha = 0.3$

Pour par exemple  $\alpha = 0.65$  donc  $V_s = \frac{24 \times 0.65}{(1 - 0.65)} \Rightarrow V_s = 44.57$ , la figure 4.12 illustre la simulation de ce cas :



**Figure 4.12** : Simulation de  $V_s$  (tension de sortie du buck-boost) pour  $\alpha = 0.65$

De là, on remarque bien que le Buck-Boost simulé donne les tensions souhaitées à la sortie. Ces tensions obéissent à l'expression (4.4) Si  $\alpha < 0.5$  la tension à la sortie est inférieure à la tension d'entrée et si  $\alpha > 0.5$  la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

#### 4.8 Commande du buck-boost

Les modèles des convertisseurs en électronique de puissance sont complexes de même que leurs commandes. Dans notre cas la tension de sortie du buck-boost doit générer la

tension d'immunité de la structure à protéger cathodiquement. Pour obtenir cette valeur nous mesurons le potentiel de la structure par rapport à l'électrode de référence et nous agissons sur le rapport cyclique  $\alpha$  pour la commande adéquate du buck-boost. La figure 4.13 illustre le circuit de l'asservissement de la commande

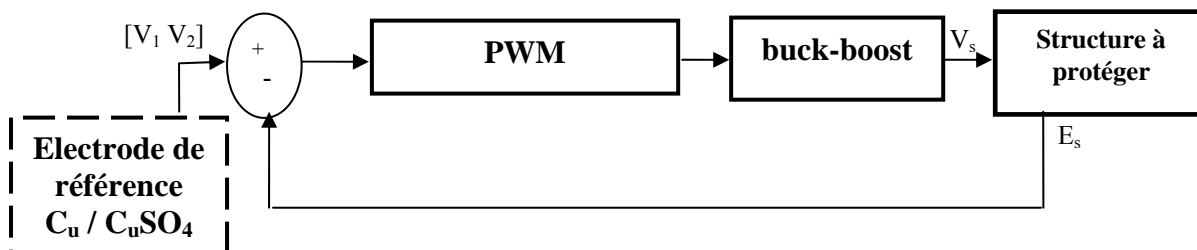


Figure 4.13 : Illustration de la commande du buck-boost

On admet que la protection d'une structure est assurée si la ddp par rapport à l'électrode de référence est comprise entre :  $V_1 = 1.5 \text{ V}$  et  $V_2=0.850\text{V}$ .

La commande est établie suivant que [28] :

Si :  $E_s - V_1 > 0$  la tension de sortie devra être égale à :

$$V_s(k + 1) = V_s(k) + (E_s - V_1) \tag{4.14}$$

$V_s(k)$  étant la tension mesurée précédemment

Alors d'après l'équation (4.5), le rapport cyclique devient :

$$\alpha = \frac{V_s(k + 1)}{V_s(k + 1) + V_e} \tag{4.15}$$

Ce qui engendre une augmentation de  $V_s$ .

Si

$$E_s - V_2 < 0 \Rightarrow V_s(k + 1) = V_s(k) + (E_s - V_2) \tag{4.16}$$

Donc génération de  $\alpha$  suivant la même expression (4.15), ce qui entraîne la diminution de  $V_s$ .

Ce type de commande fait intervenir la tension d'entrée et la tension de sortie à atteindre suivant les valeurs limites imposées par la protection cathodique. Puisqu'on cherche que la tension de sortie atteigne la tension adéquate de protection de notre structure, on remplacera alors la valeur de  $V_s(k)$  (valeur précédente) par celle de  $V_s(k+1)$  (nouvelle valeur de la tension de sortie) équation (4.14).



Le modèle du circuit simulant la commande, est illustré par la figure 4.14.

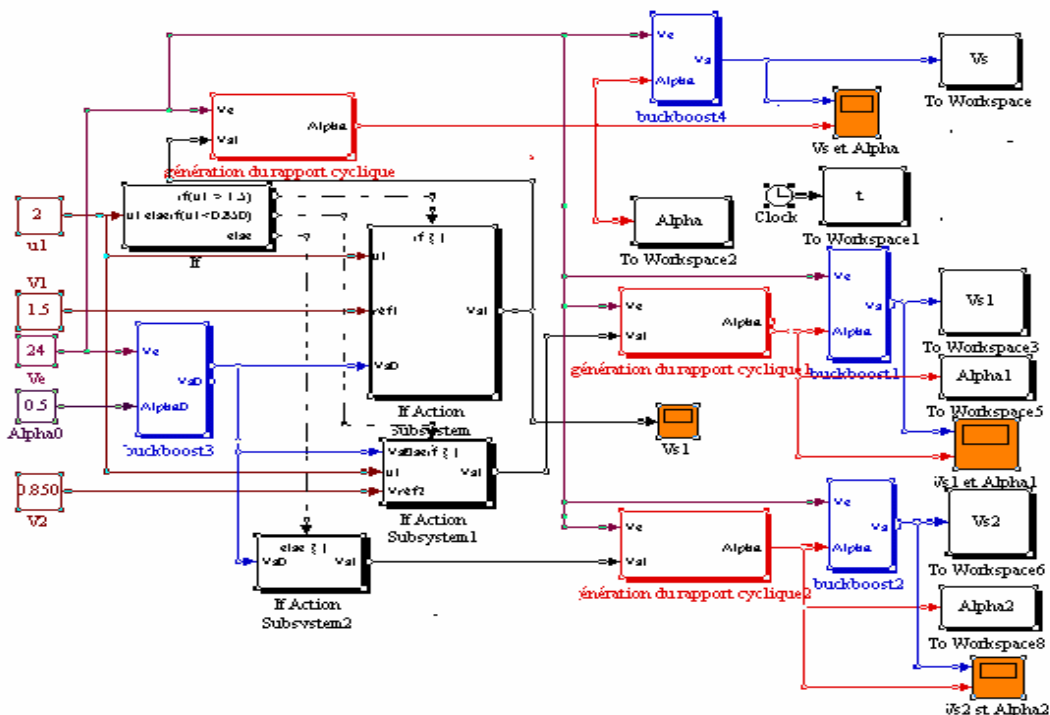


Figure 4.14 : Modèle de la simulation du rapport cyclique et tension de sortie générés

Dans l'exemple qui suit, nous avons considéré  $V_s=24V$  donc le rapport correspondant  $\alpha=0.5$

1<sup>er</sup> cas :  $E_s - V_1 > 0$  Sachant que  $V_1=1.5V$ ,  $E_s = 2V$ . La simulation de la tension de sortie générée dans ce cas et celle du rapport cyclique sont illustrées par la figure 4.15.

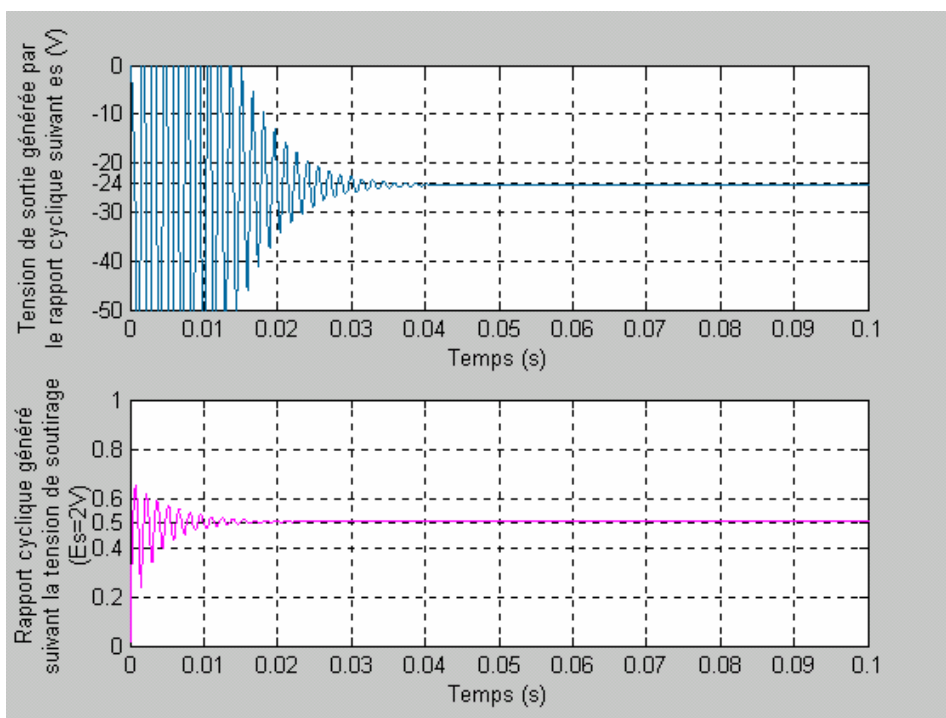
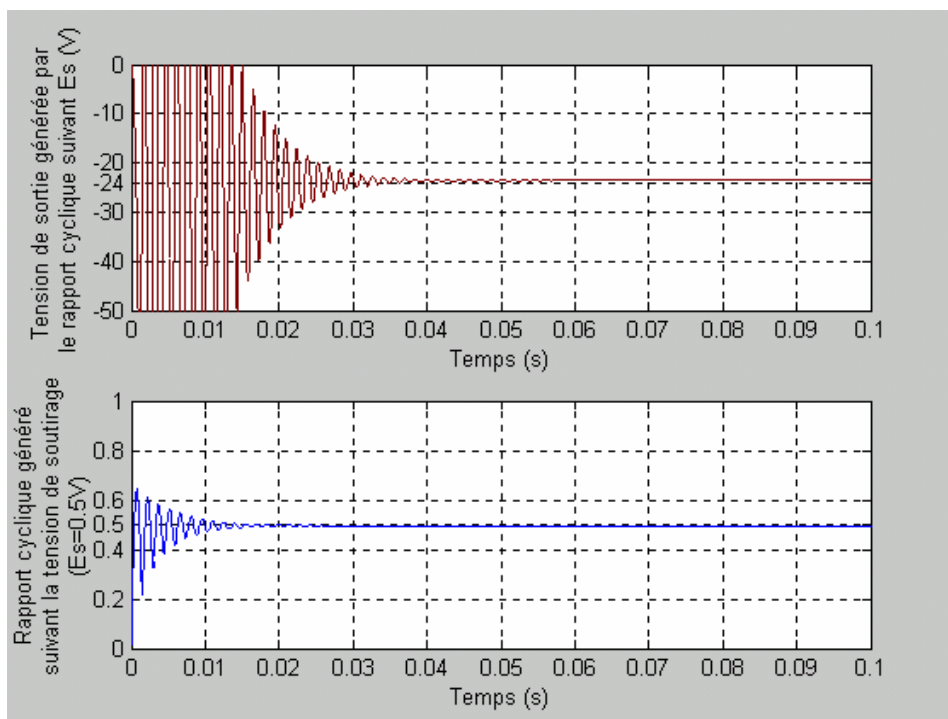


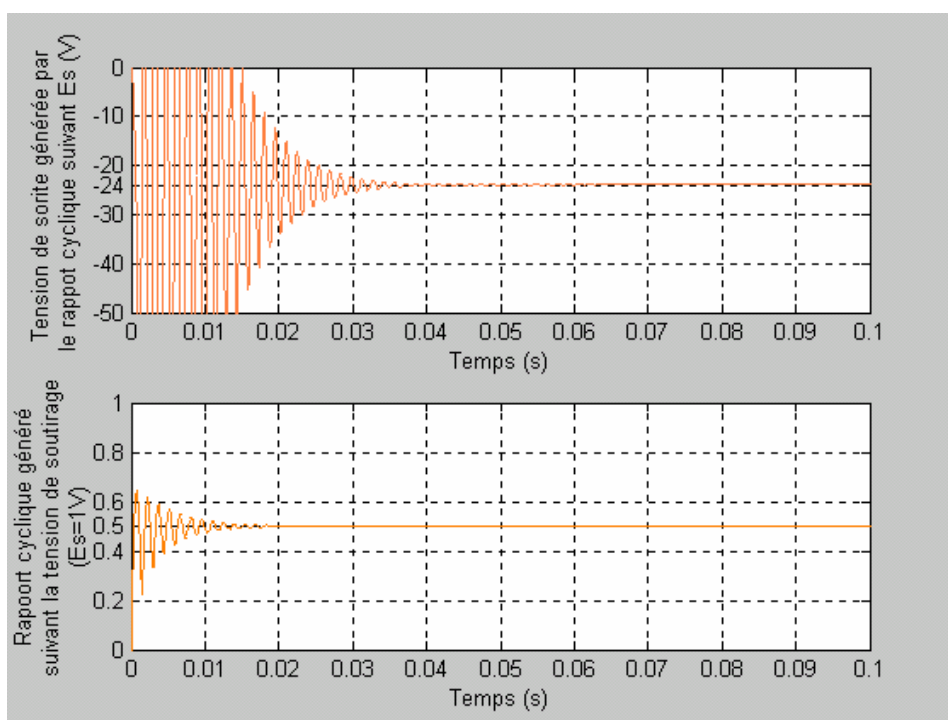
Figure 4.15 : Tension de sortie et rapport cyclique générés

2<sup>e</sup> cas :  $E_s - V_2 < 0$  Sachant que  $V_2=0.850V$ ,  $E_s =0.5V$ . La simulation de la tension de sortie générée et celle du rapport cyclique dans ce cas sont illustrées par la figure 4.16.



**Figure 4.16 :** Tension de sortie et rapport cyclique générés

3<sup>e</sup> cas :  $E_s - V_1 < 0$  et  $E_s - V_2 > 0$ . Sachant que  $V_1 = 1.5 V$  et  $V_2 = 0.850 V$ ,  $E_s=1 V$ . La simulation de la tension de sortie générée et celle du rapport cyclique dans ce cas sont illustrées par la figure 4.17.



**Figure 4.17 :** Tension de sortie et rapport cyclique générés

De là, on remarque bien que la commande simulé suivant les cas présentés délivre les tensions souhaitées à la sortie suivant les rapports cyclique générés en concordance avec la variation de la tension de soutirage. Le rapport cyclique obéit à l'expression (4.15). Il est stable, augmente dans le premier cas, diminue au deuxième cas et reste invariable dans le dernier cas. Par proportionnalité la tension de sortie varie dans le même sens en tendant à atteindre les critères d'immunité de la structure protégée.

#### **4.9 Application du microcontrôleur 16F877 à notre modèle**

Le microcontrôleur est utilisé pour le développement de notre application multitâches temps réel. Nous devons affecter des ordres de priorité aux tâches citées auparavant que devra accomplir notre microprocesseur, synchroniser et effectuer un programme de gestion d'interruption en incluant les notions propres permettant la communication entre les différentes tâches.

Le classement des tâches est le suivant : acquisitions des valeurs de tension et du courant du GPV pour le calcul de la puissance afin que le microcontrôleur puisse accomplir la poursuite du point de puissance maximum du GPV ; de la tension et du courant de la batterie d'accumulateurs pour le contrôle de la charge de la batterie [30] et la régulation de la protection cathodique qui doit fonctionner en permanence et sans interruption. Cette dernière doit avoir l'ordre supérieur de priorité (tâche de 1<sup>er</sup> degré de priorité).

L'organigramme spécifique à la tâche de contrôle et de régulation du système de la protection cathodique est donné ci après.

#### **4.10 Algorithmes**

L'organigramme du programme assurant la surveillance et le contrôle de l'atteinte des critères de la protection cathodique afin de garantir son efficacité est illustré à la figure 4.18.

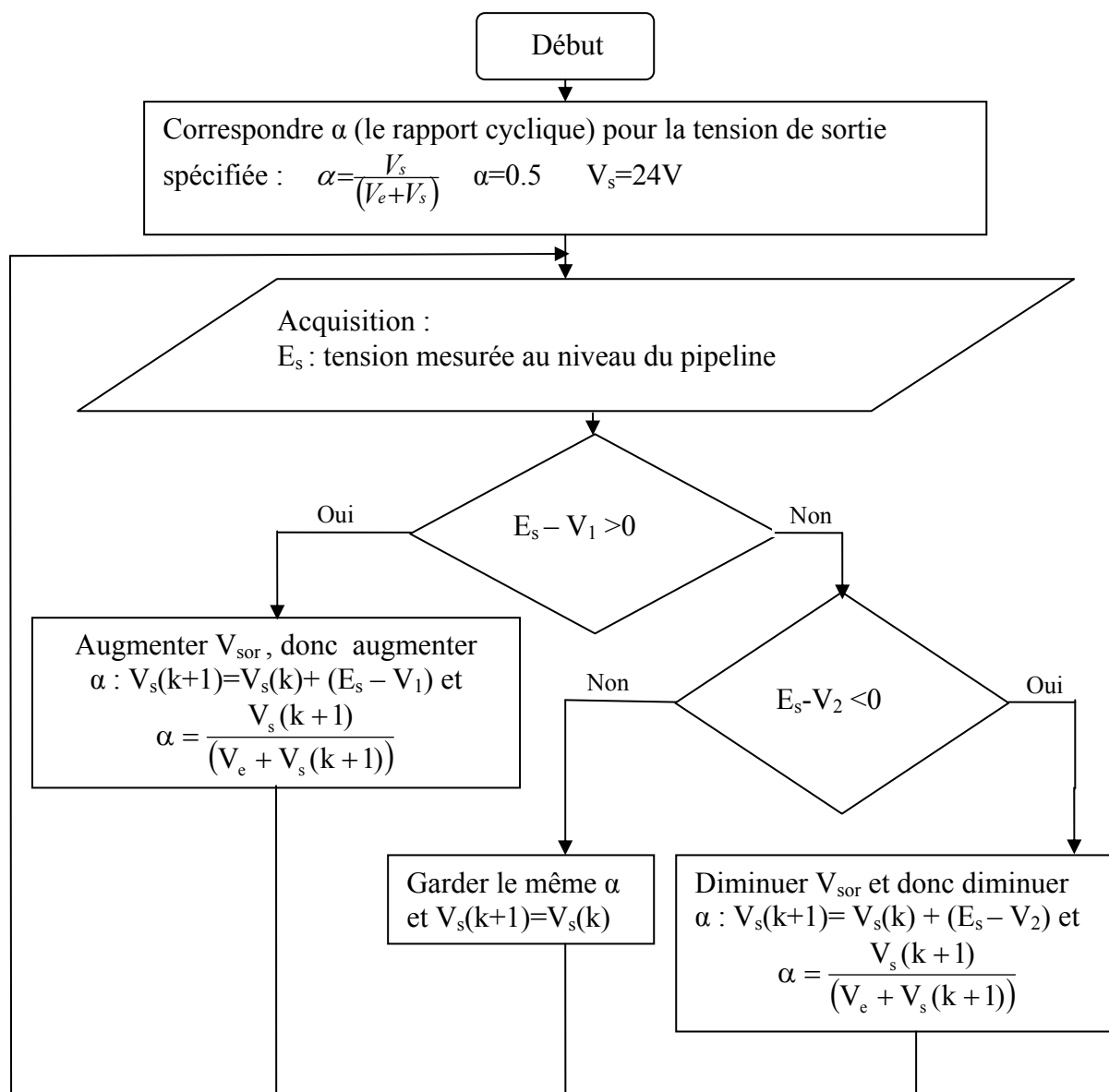


Figure 4.18 : Organigramme illustrant la surveillance et le contrôle de la protection cathodique

Le tableau suivant résume le fonctionnement du circuit de commande illustré par l'organigramme.

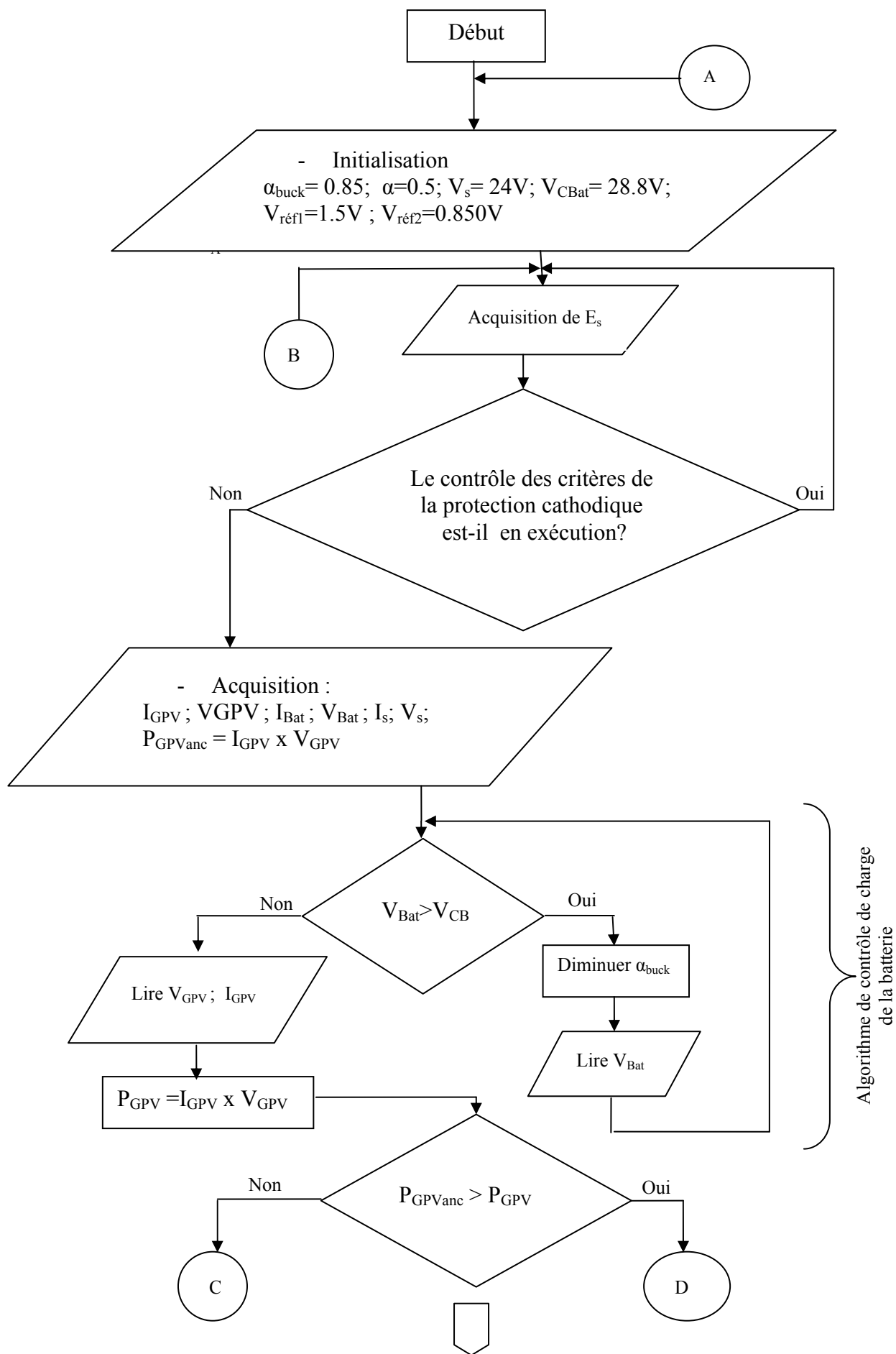
Tableau 4.1 : Valeurs illustrant le contrôle et la régulation des conditions de protection

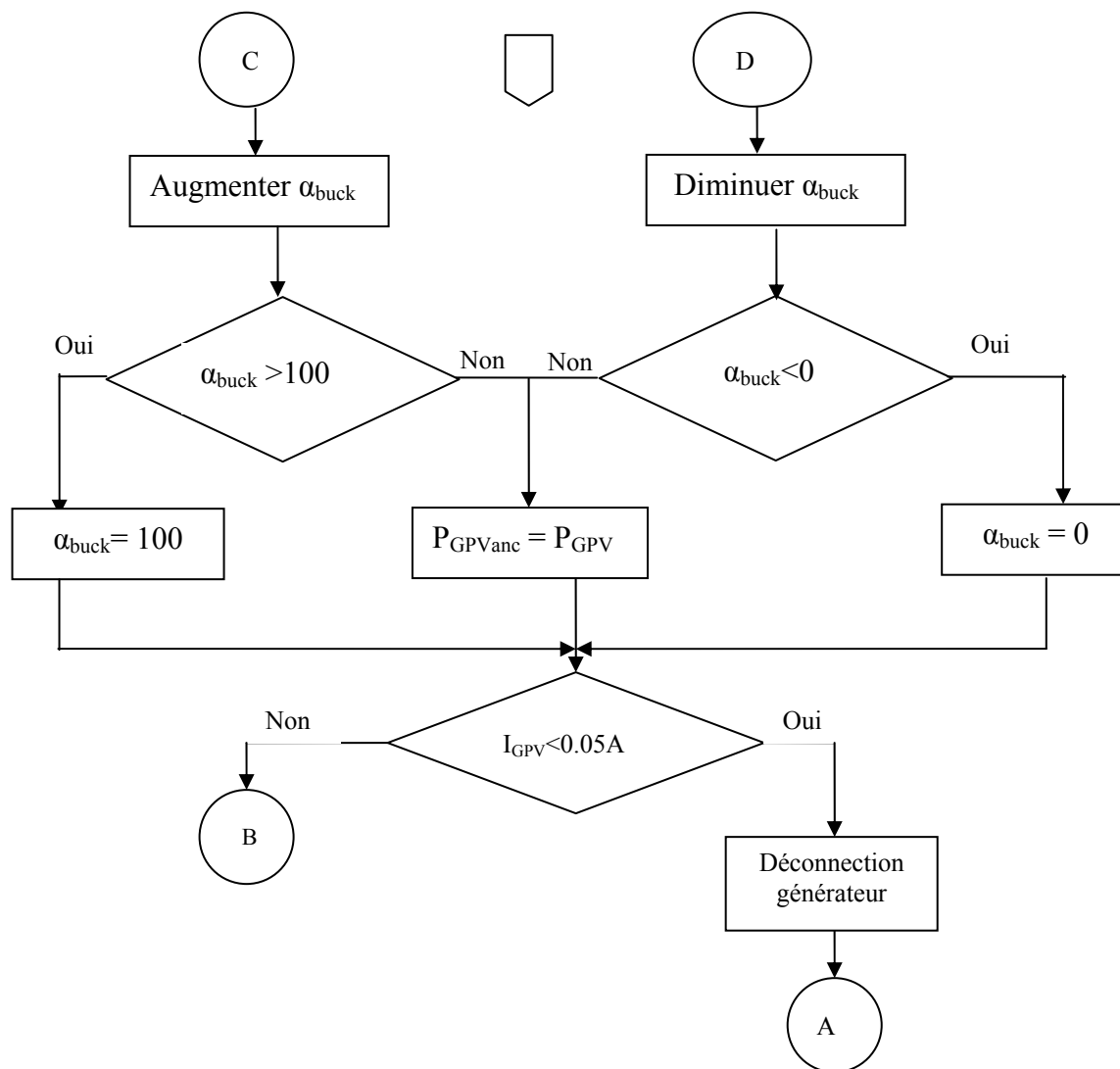
<b><math>E_s</math> (mV)</b>	<b>action</b>
$\leq V_1$ et $\geq V_2$	Maintenir $\alpha$
$> V_1$	Augmenter $\alpha$
$< V_2$	Diminuer $\alpha$

Nous avons montré par les simulations effectuées qu'à l'aide de cette commande les critères de protection sont maintenus, que ce soit la sous protection ou bien la surprotection qui sont toutes les deux éliminées. La structure reçoit exactement la tension qu'il faut pour générer le courant nécessaire à la protection permettant de situer les tensions soutirées dans la marge d'immunité.

Pour ce système de protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque, le microcontrôleur doit contrôler aussi la charge de la tension batterie et il permet aussi la poursuite du point de puissance maximum comme il a été déjà cité plus haut. Notons que le circuit de conditionnement de puissance intercalé entre le générateur photovoltaïque et la batterie est un convertisseur DC/DC abaisseur (buck) le fait que le point de puissance maximum est de 33.6 volts, tandis que la tension batterie n'excèdera jamais 28.8 volts (adaptation par la commande du rapport cyclique du buck généré par la deuxième sortie PWM du microcontrôleur considéré 16F877).

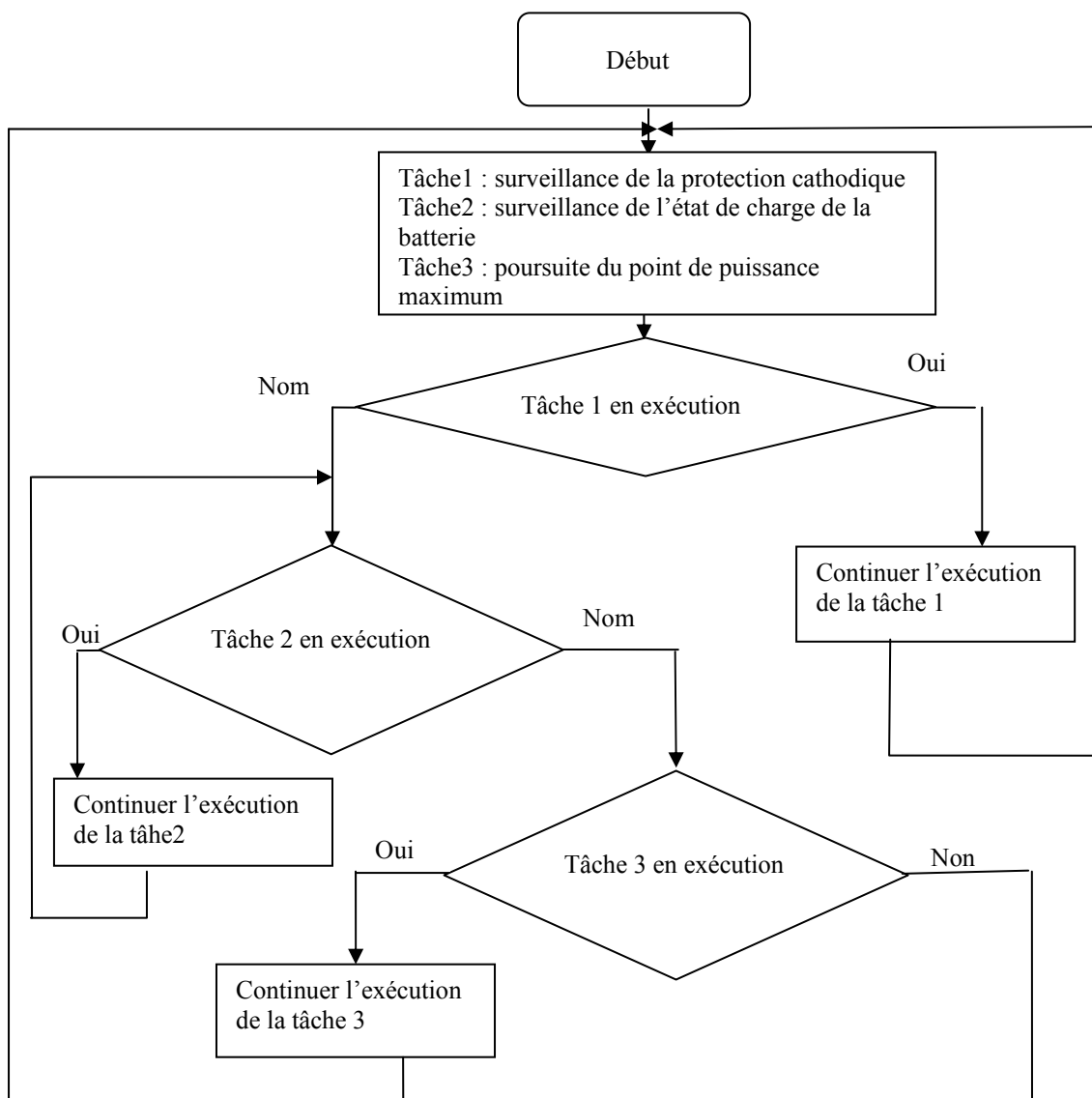
L'algorithme du programme permettant le contrôle de la charge de la batterie, la poursuite du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque et son adaptation à la tension de charge de la batterie en générant le rapport cyclique du buck adéquat par le microcontrôleur via sa deuxième sortie PWM est illustré par la figure 4.19. Il est à noter que le fait que le microcontrôleur génère la commande de deux circuits différents, ces deux circuits ont la même fréquence de commutation (50khz) car les deux sorties PWM n'utilisent que le timer 2.





**Figure 4.19 :** Organigramme illustrant le programme de la poursuite du point de puissance maximum, le contrôle de charge de la batterie et la surveillance des critères de la protection cathodique

L’organigramme permettant la gestion des tâches par ordre de priorité que doit accomplir le microcontrôleur est illustré par la (figure 4.20):



*Figure 4.20 : Organigramme illustrant la gestion des tâches*

Le schéma du circuit électrique global du régulateur de charge et de contrôle et de la surveillance des critères de la protection cathodique est donné par la figure 4.21.



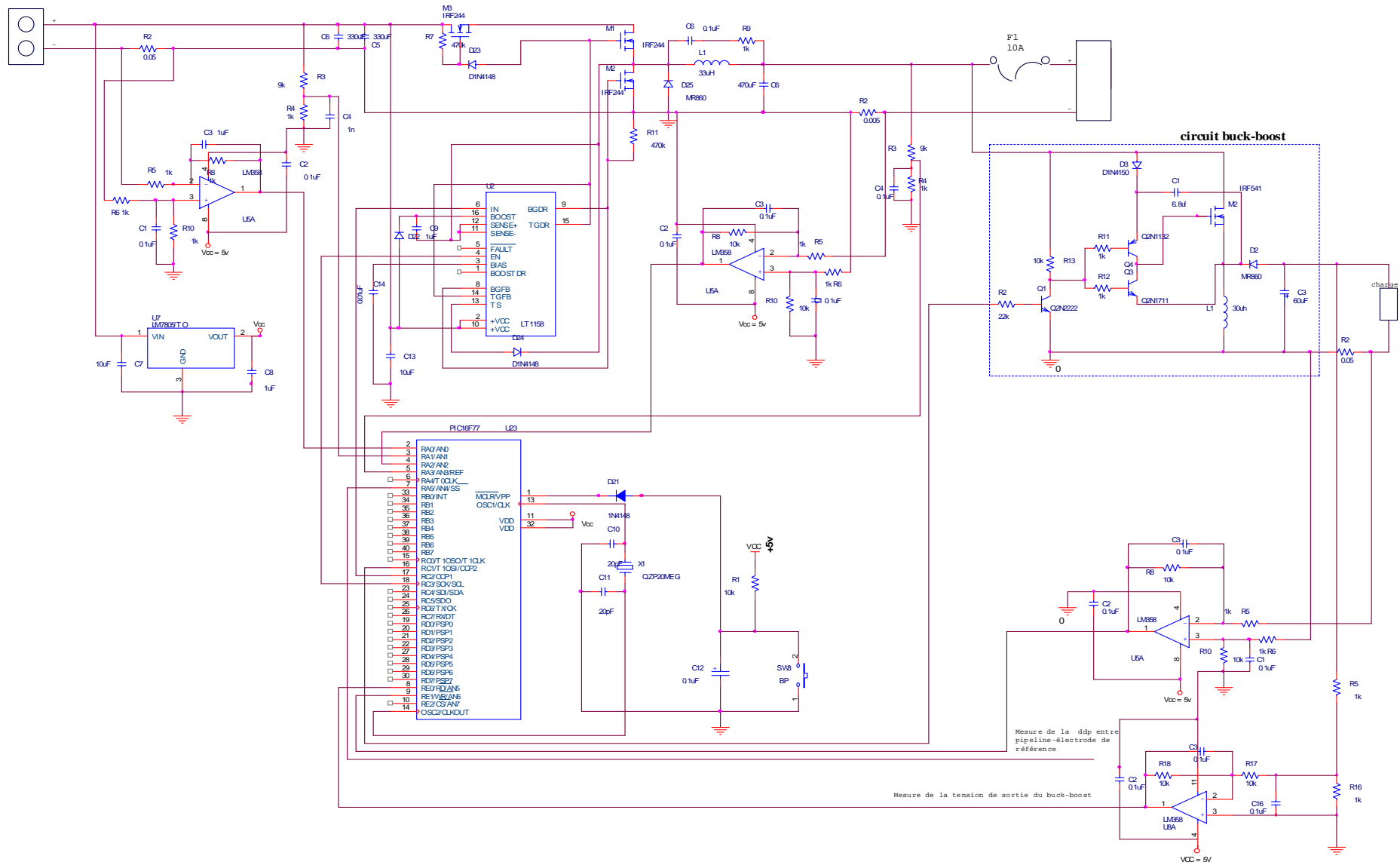


Figure 4.21 : Schéma du circuit de la régulation destiné pour un système photovoltaïque appliqué à la protection cathodique

#### 4.11 Conclusion

Le régulateur développé pour un système de protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque assure les tâches suivantes :

1. La poursuite du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque afin de permettre au générateur de fonctionner à sa plus haute performance
2. Le contrôle de charge de la batterie d'accumulateurs
3. La surveillance du bon fonctionnement de la protection cathodique

Les circuits de base de ce régulateur sont :

1. Le Pic16F877 permettant l'ajustement des deux rapports cycliques, l'un pour l'adaptation de la tension batterie au point de puissance maximum du générateur photovoltaïque et l'autre pour assurer les critères de la protection.
2. Le convertisseur buck permettant d'abaisser la tension du générateur pour charger la batterie
3. le convertisseur buck-boost permettant d'adapter la tension batterie à la tension de sortie demandé par la station de la protection cathodique

Notons que ce régulateur permet l'acquisition via les ports du convertisseur A/N du microcontrôleur de la tension et du courant du générateur, de la batterie et du buck-boost.

Les simulations de ce circuit ont données de bons résultats.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

La lutte contre la corrosion est un besoin aussi bien économique que sécuritaire. Elle doit être menée afin de réduire les pertes de matériels dus à la détérioration et de conserver les ressources en métal dont les réserves mondiales sont limitées.

Par exemple les frais de construction des ouvrages pétroliers étant très importants, il convient de les préserver :

- En augmentant leur durée de vie
- En évitant des arrêts imprévus
- En réduisant les frais d'entretien.

On admet maintenant, dans toutes les grandes industries, et sans aucune discussion, la nécessité de la protection cathodique. Cette protection qui s'applique tant à des structures métalliques neuves qu'à des structures déjà en place permet dans tous les cas de prolonger nettement leur durée de vie et d'effectuer par là de substantielles économies.

La protection cathodique par soutirage de courant est l'une des techniques les plus efficaces de lutte contre la corrosion des ouvrages métalliques.

Ce mode de protection nécessite une source d'énergie. Lorsqu'on dispose, à proximité, d'un réseau de distribution électrique, le transformateur redresseur est d'usage. Le problème se pose en cas d'éloignement de tels réseaux, pour la protection d'ouvrages qui traversent des zones désertiques (pipelines, réseaux d'aqueducs,...). L'utilisation des générateurs solaires comme source d'énergie électrique s'impose alors vu les nombreux avantages qui lui sont associés : longue durée de vie des systèmes photovoltaïques, la préservation de l'environnement. De plus ils sont modulaires et peuvent fonctionner facilement à des tensions et courants ajustés aux besoins,...

L'utilisation rentable et rationnelle des générateurs solaires dans les systèmes de soutirage doit faire l'objet d'une étude en tenant compte de deux aspects : un aspect technique permettant la conception et le dimensionnement du système, et un aspect économique. Dans ce sens nous avons développé un programme de dimensionnement qui permet de préciser le besoin réel en courant assurant la protection cathodique des ouvrages longilignes, d'où le nombre de stations de protection cathodique nécessaires sur un tronçon de la canalisation bien spécifié suivant la résistivité du sol environnant. Comme il permet aussi de:

- Calculer les portées de chaque poste
- Déterminer les tensions de soutirages aux points d'injection et à la limite des portées
- Déterminer les caractéristiques des ouvrages à protéger
- Dimensionner les déversoirs, leurs résistances, leur nombre, la longueur de leurs lits
- Générer les tensions des postes à installer
- Prévoir les puissances de ces postes

- Prévoir le nombre total de modules à installer
- Prévoir la capacité nominale des batteries d'accumulateurs

Nous avons trouvé suite à ce dimensionnement et la considération de l'avantage de modularité des systèmes photovoltaïques deux configurations possibles du système. L'estimation économique pour ces deux configurations a été considérée comme un critère important pour le choix de la configuration.

Pour arrêter complètement la corrosion, la structure à protéger doit être alimentée par un courant constant déterminé par la nature du métal de la structure, sa surface et le milieu environnant. La majeure difficulté pour accomplir ce but est la variation de la résistivité du milieu environnant due aux changements des conditions climatiques.

Dans ce travail, un système de régulation de la protection cathodique est conçu pour éviter les difficultés associées aux systèmes de la protection cathodique conventionnels. Ce régulateur est spécifique au contrôle des systèmes de protection cathodique. Ce système ajuste automatiquement la tension continue appliquée de telle sorte que le courant de protection est maintenu constant. Le circuit de base de ce régulateur est un microcontrôleur qui commande le circuit d'alimentation de notre charge le buck-boost par l'intermédiaire de la variation du rapport cyclique en concordance des valeurs des critères de la protection cathodique qui sont compris entre  $[-1.5V -0.850V]$  en utilisant la technique de la poursuite de ces points.

Le régulateur développé pour un système de protection cathodique alimenté par énergie solaire photovoltaïque assure les tâches suivantes :

1. La poursuite du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque afin de permettre au générateur de fonctionner à sa plus haute performance
2. Le contrôle de la charge de la batterie d'accumulateurs
3. La surveillance du bon fonctionnement de la protection cathodique

Les circuits de base de ce régulateur sont :

1. Le Pic16F877 permettant l'ajustement des deux rapports cycliques, l'un pour l'adaptation de la tension batterie au point de puissance maximum du générateur photovoltaïque et l'autre pour maintenir les critères de protection.
2. Le convertisseur buck permettant d'abaisser la tension du générateur pour charger la batterie
3. le convertisseur buck-boost permettant d'adapter la tension batterie à la tension de sortie demandé par la station de la protection cathodique

Notons que ce régulateur permet l'acquisition via les ports de la conversions A/N du microcontrôleur de la tension et du courant du générateur, de la batterie et de la sortie du buck-boost.

Les simulations de ce circuit ont données de bons résultats.

Le nouveau système a les avantages suivants :

- Il préserve l'effort et le temps du technicien ;
- Il économise de l'énergie parce que la tension est automatiquement et continuellement ajustée de telle sorte que la tension continue n'excède jamais la tension requise et donc une dissipation minimale est atteinte ;

- Il arrête définitivement la corrosion puisque la structure métallique peut recevoir ou reçoit toujours exactement le courant continu demandé ;
- La destruction du revêtement est entièrement stoppée une fois que la surprotection est éliminée.
- Il permet au générateur photovoltaïque de travailler à sa plus haute performance

La vérification de l'atteinte des critères de protection cathodique donne l'assurance de la fonctionnalité du système installé. Cette vérification se fait immédiatement suite à l'installation du système. Par ailleurs, il est nécessaire d'effectuer un suivi périodique de la fonctionnalité du système afin de s'assurer qu'il continue à protéger adéquatement.

Il reste évidemment à le tester sur site pour évaluer ses performances et sa fiabilité. Si les tests réels sont probants, une perspective intéressante serait de généraliser l'idée de modularité des systèmes PV pour la protection cathodique en étudiant des configurations de 6, 8 ou 10 modules. Il faudrait aussi penser à une télésurveillance pour assurer une protection jusqu'aux limites de la portée des postes.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] <http://www.cefracor.org/html/publications.htm>
- [2] Document, "La protection cathodique : Guide pratique", Chambre syndicale de la recherche et production du pétrole et du gaz, Comité Scientifique, Technip, France 1986.
- [3] Curty, "La protection cathodique des ouvrages métalliques enterrées", Association technique de l'industrie du gaz en France, Ecole Nationale Supérieure de Pétrole et des Moteurs, novembre 1991.
- [4] S. Kharzi, "Recueil de rapports scientifiques et techniques", LPV, CDER, octobre 2001.
- [5] M. Haddadi, "Technique de la protection cathodique", Cours PGS, ENP, 2001
- [6] [www.epicorrosion.com](http://www.epicorrosion.com)
- [7] CeFraCor, "Canevas de l'enseignement de corrosion et de l'anticorrosion", 12/02/2001.
- [8] S.T.G.XD, D45, "Manuel pour la protection des réseaux de distribution en acier", Septembre 1996
- [9] Document Indarco, "Principes et étude sur la protection des ouvrages", Document interne, 1991.
- [10] A. Benouhiba et T. Ramdani, "Protection cathodique par énergie solaire", Mémoire de PFE, Dpt Electronique, ENP, 1982.
- [11] M. Khalfi et S. Kaci, "Utilisation de l'énergie solaire dans la protection cathodique de canalisations enterrées", Mémoire de Fin d'Etudes, Génie Chimique, ENP, 95/96.
- [12] D. Petrocokino, "Protection anodique - Protection cathodique", Techniques de l'Ingénieur, M156, 1-21, 1979.
- [13] G. K. Glass and al., "Cathodic protection of steel in concrete", Concrete structures section, Dpt of civil and environmental, Imperial college, Ed. February 2001, by Neil Tsang.
- [14] <http://sss-kt.de>
- [15] A. Bouzeraï, "Elaboration d'un logiciel pour la protection cathodique", J.S.T. 3, 1996.
- [16] M. Egido et al., "The sizing of stand alone PV-systems: a review and a proposed new method", Solar Energy Materials and Solar Cells, N°26, 51-69, 1992.
- [17] D. Mayer, "Dimensionnement des systèmes PV sur batteries", Cours 'Electricité Solaire pour les Zones Rurales et Isolées, UNESCO, 1990.
- [18] S. Kharzi, D. Diaf and A. Malek, "Sizing of solar photovoltaic-powered cathodic protection system comparison between an analytical and a numerical method", World Renewable Energy Congress VIII (WREC 2004). Published by Elsevier Ltd. Editor AAM Sayigh.
- [19] M. Buresch, "Photovoltaïque Energy Systems", McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [20] M. Capderou, "Atlas Solaire de l'Algérie", Tomes 1&2, Office des Publications Universitaires, Algérie. 1985



- [21] L. Hontoria y J. Aguilera, "Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos", Curso de energia solar fotovoltaica, CIEMAT, 2005.
- [22] B. Bouzidi, "Analyse de la faisabilité et de la rentabilité économique de systèmes de pompage d'eau par énergie solaire photovoltaïque", Mémoire de Magister, ENP, 2004.
- [23] W. Palz, "Electricité solaire", Ed, Dunod-Unesco, 1983.
- [24] F. Labrique et G. Séguier, "Les convertisseurs de l'Electronique de Puissance", Tomes 3 & 4, Conversion Continu – Continu, Tech. & Doc., Lavoisier, 1989.
- [25] J.P. Ferrieux et F. Forest, "Alimentation à Découpage Convertisseurs à Résonance", Principes - Modélisation – Composants-, Ed. Masson., 1987.
- [26] I. Glasner and J.Appelbaum, "Advantage of boost Vs buck topology for maximum power point tracker in photovoltaic systems", IEEE Transaction on Energy Conversion, pp. 355-358, 1996
- [27] E. Lorenzo, "Sistemas de generación y acondicionamiento de potencia", Curso de energia solar fotovoltaica, CIEMAT, 2005.
- [28] R.A. Wagdy, "Design of control circuit of solar photovoltaic powered regulated cathodic protection system", Solar Energy, Vol. 55, N°5, pp. 363-365, 1995.
- [29] <http://www.fbe.fh-darmstadt.de>
- [30] [www.timnolan.com](http://www.timnolan.com)
- [31] R.W. Erickson, "DC-DC Power Converters", Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering Journal, pp. 229-236, October 1998.
- [32] A. Meillier, "A review of galvanic anode cathodic protection design procedure", Corrosion Control Service Limited, 6 Hollinswood Court, Stafford Park 1 Telford TF3 DE.
- [33] F. Sherif, D. Turcotte and M.Ross, "PV Toolbox : A Comprehensive Set of PV System Components for the Matlab/Simulink Environment", SESCO 2003 Conference. Queen's University. Kingston, Ontario, Canada. August 18 to 20, 2003
- [34] H. Mashenlini and X.F. Carlese, "Microcontroller-Based Charge Controller Stand Alone Photovoltaic systems", Solar Energy, Vol. 4, pp. 225-230, 1997.
- [35] R.L. Hammond et al., "PV Batteries and charge controllers: technical issues, costs, and market trends", 26<sup>th</sup> IEEE, California, September29-october3, 1997.
- [36] V. Pommier, M. Budinger et G. Pérusot, "Les Energies Renouvelables : Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque", CETSIS 2003, P313, II, C14
- [37] R. Oltra, "Corrosion monitoring : from laboratory advances to industrial control", Corrosion Science in the 21<sup>st</sup> century, Umist, July 2003
- [38] L.M. Calle, "Electrochemical corrosion behavior of tubing alloys in simulated space shuttle launch pad conditions", Corrosion Science in the 21<sup>st</sup> century, Umist, July 2003.
- [39] <http://www.nace.org>
- [40] <http://www.corrosionsource.com>
- [41] [www.emts-quorum.com](http://www.emts-quorum.com)
- [42] [www.ccta.fr](http://www.ccta.fr)
- [43] <http://www.umist.ac.uk/corrosion/jcse>

## Références bibliographiques

- [44] [www.epsrc.ac.uk/research/cathodic-protection](http://www.epsrc.ac.uk/research/cathodic-protection)
- [45] <http://perso.wanadoo.fr/energies-nouvelles-entreprises>
- [46] <http://www.nrel.gov/homer/>
- [47] <http://www.orcad.com>
- [48] [www.Corexco.com](http://www.Corexco.com)
- [49] <http://www.technipipe.com>
- [50] [www.protectioncathodique.com](http://www.protectioncathodique.com)
- [51] <http://www.technicuve.com>
- [52] <http://www.Corrosion-doctors.org>
- [53] <http://homeomath.immingo.net/>

# **Annexes**

## ANNEXE A

### A1 Lois de comportement

Suivant les matériaux considérés, la loi donnant le taux de corrosion en fonction du temps ou *équation d'oxydation* pourra être différente.

Si l'on représente par  $e$  l'épaisseur de métal corrodé et le temps par  $t$  :

Evolution linéaire (Ba, Mg)	$\frac{de}{dt} = k$	$e = k t$
Evolution parabolique (Fe, Ni, Cu)	$\frac{de}{dt} = \frac{k}{e}$	$e^2 = 2 k t$
Evolution logarithmique (Zn)	$\frac{de}{dt} = \frac{k}{t}$	$e = e_0 + \ln(t)$

Ces lois vont en fait le plus souvent, par leur forme, rendre compte de l'étape limitante qui régit le phénomène. Ainsi, une loi linéaire sera caractéristique d'une cinétique contrôlée par la réaction d'interface tandis qu'une loi parabolique traduira un phénomène limité par la diffusion.

Il est important de remarquer ici que la simple détermination expérimentale de la loi de comportement à la corrosion peut fournir des indications sur le mécanisme qui la contrôle.

### A2 Aspect cinétique de la corrosion

#### **A2.1 Différentes expressions de la vitesse de corrosion**

Il y a trois principales façons pour exprimer la vitesse de corrosion : - soit en perte de masse ( $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ ), - soit en perte d'épaisseur ( $\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$ ), - soit en densité de courant ( $\mu \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ).

#### **A2.2 Amplitude des vitesses de corrosion**

##### **Exemple d'observations de la corrosion uniforme en milieu marin**

<b>Vitesse</b> ( $\text{mm} \cdot \text{an}^{-1}$ )	<b>Résistance</b>
Inférieur à 0,05	Très résistant
Inférieur à 0,5	Résistant
de 0,5 à 1,0	Peu résistant
supérieur à 1,0	Non résistant

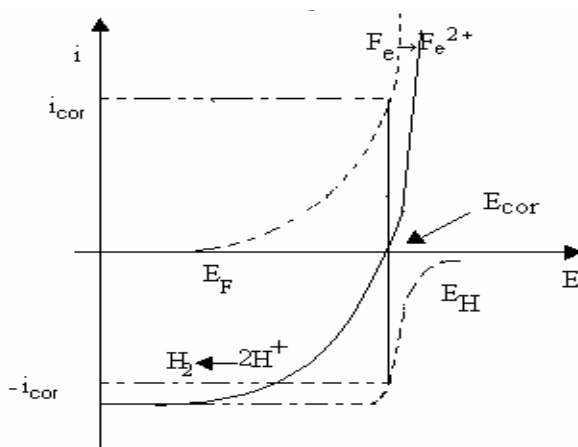
### A3 Diagrammes d'Evans

#### **A3.1 Diagramme $i = f(E)$**

Exemple de l'attaque corrosive du fer en milieu acide chlorhydrique. Morceau de fer plongé dans une solution de HCl (corrosion idiomorphe).

La mesure de l'intensité du courant en fonction du potentiel appliqué à l'électrode de travail (électrode de fer), donne la courbe  $i = f(E)$  en trait plein (Figure A1), les composantes anodique et cathodique en traits discontinus (----) ne peuvent pas être mesurées séparément. Elles ne sont représentées ici que pour montrer la vitesse de

corrosion du fer ( $i_{an}$ ) et celle du dégagement de l'hydrogène sur ce métal ( $i_{cat}$ ). On peut noter que la composante cathodique présente un palier de diffusion, conséquence du fait que la concentration des protons est limitée dans la solution. [9]



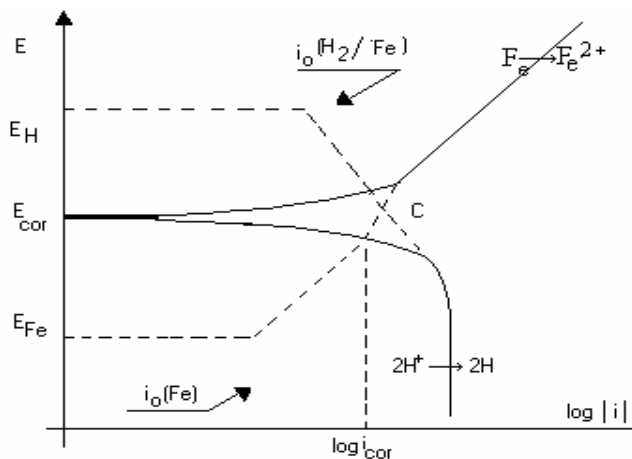
**Figure A1** : Courbe de polarisation

Cette représentation graphique ne permet pas la mesure du courant de corrosion qui est précisément le courant anodique pour  $E = E_{cor}$  (potentiel mixte) car le courant global mesuré est nul dans le cas d'une corrosion idomorphe. (C'est pour cette valeur que :  $i_{cor} = -i_{cat}$ )

### A3.2 Diagramme $E = f(\log |i|)$

La courbe de polarisation précédente, en coordonnées  $E = f(\log |i|)$  (Diagramme d'Evans) présentée sur la figure suivante (Figure A2), linéarise la courbe de polarisation et permet, dans les cas favorables (domaine de Tafel bien défini et assez large) de connaître  $i_{cor}$ .

Les composantes anodiques et cathodiques sont portées en traits discontinus (---), seule la courbe en trait plein (courbe de polarisation) est obtenue par la mesure. Le point de concours C, qui est précisément le point pour lequel la demande électronique nécessaire à la réduction de l'oxydant est exactement satisfaite par la corrosion du métal, est obtenu par extrapolation des parties linéaires de la courbe de polarisation. Ce point de concours, dans les cas où il est bien net, permet d'accéder aux caractéristiques de la corrosion (potentiel et vitesse).



**Figure A2** : Diagramme d'Evans

On voit bien sur ce diagramme le domaine de Tafel dans lequel le potentiel varie linéairement avec le logarithme de l'intensité conformément aux équations de Tafel [3, 9]:

- pour le processus anodique

$$E = E_{Fe} + b_a \log \frac{i}{i_0 (Fe)} \quad (A1)$$

- pour le processus cathodique

$$E = E_H + b_c \log \frac{i}{i_0 (H_2/Fe)} \quad (A2)$$

$E_{Fe}$ ,  $i_0 (Fe)$ ,  $E_H$ ,  $i_0 (H_2/He)$  sont respectivement les potentiels d'équilibre et courants d'échange des couples  $Fe^{2+}/Fe$  et  $H^+/H_2$  ;  $b_a$  et  $b_c$  sont les constantes de Tafel de l'oxydation et de la réduction.

### A3.3 Mesure $E_{cor}$ et de $i_{cor}$

Comme on peut le voir dans le diagramme d'Evans ci-dessus, en extrapolant la partie linéaire de la courbe de polarisation, aussi bien dans sa partie anodique que cathodique, on constate que les droites obtenues (droites de Tafel) se coupent en un point C dont les coordonnées sont  $E_{cor}$  et  $\log_{cor}$ . Cette construction graphique permet donc d'accéder à ces deux importantes données de la corrosion.

Le calcul tiré des équations de Tafel, basé sur l'égalité : conduit aux mêmes données.

On peut noter aussi, que les pentes des droites de Tafel donnent le coefficient de transfert  $\alpha$  qui est inclus dans les valeurs de  $b_a$  et de  $b_c$  [9].

### A3.4 Facteurs influençant la vitesse de corrosion

#### • Pouvoir oxydant du milieu agressif

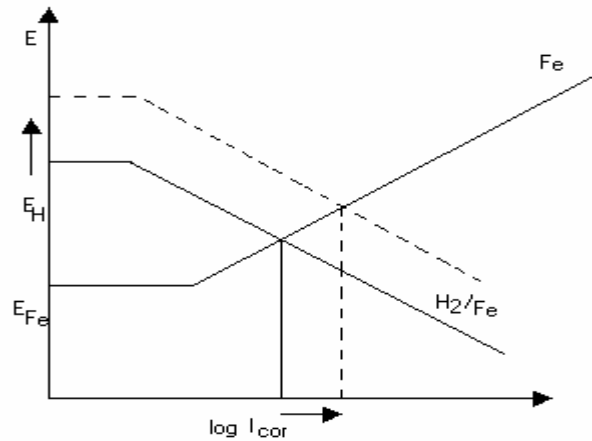
Le moteur de la corrosion est le pouvoir oxydant du couple rédox présent dans le milieu agressif. Plus ce pouvoir, qui est quantifié par le potentiel rédox du couple concerné, est élevé, plus le métal est susceptible de se corroder rapidement. Cela est illustré par l'exemple suivant où l'on considère un morceau de fer dont le potentiel d'équilibre  $E_{Fe}$  est donné par la relation:

$$E_{Fe} = -0,44 + 10^{-6} = -0,62 \text{ V / ENH}$$

Plongé dans une solution dont l'agressivité, due à la présence de protons, s'accroît par addition d'acide.

Le potentiel d'équilibre du couple  $H^+/H_2$  désigné par le symbole  $E_H$  est donné par la relation de Nernst :  $E_H = -0,06 \text{ pH}$  concernés.

La point de concours des droites de Tafel a pour abscisse le logarithme décimal du courant (vitesse) de corrosion. On observe que, avec l'augmentation du pouvoir oxydant de la solution ( $E_H$  croissant), la vitesse de corrosion du fer croît.



**Figure A3 :** Diagramme d'Evans de la corrosion idiomorphe du fer dans une solution aqueuse acide

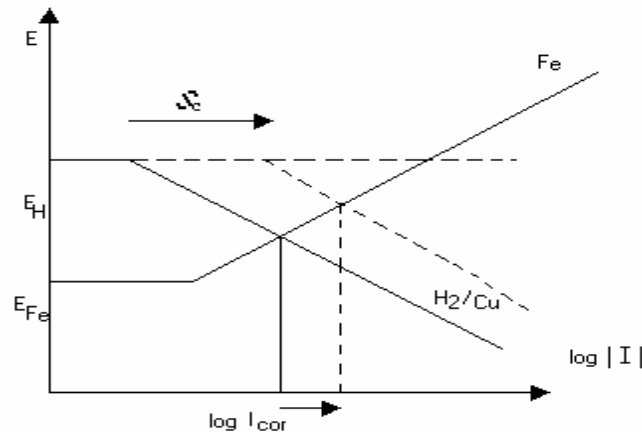
Il est aisé de constater que ce potentiel s'accroît par acidification et que la différence  $E_{+H} - E_{Fe}$  augmente. En observant le diagramme d'Evans relatif à ce cas, ci-dessus, on voit que l'acidification qui augmente le pouvoir oxydant du proton, entraîne un accroissement de la vitesse de corrosion, chiffrée par l'abscisse  $i_{cor}$  du point de concours des droites de Tafel des deux systèmes.

#### • Influence de la surface du site cathodique

Pour illustrer cette influence, on considère le cas du fer associé électriquement à un autre métal, que l'on suppose plus noble, comme le cuivre, ces deux métaux étant en contact avec une solution agressive acide. Il s'agit dans cet exemple d'une corrosion galvanique. La cathode sur laquelle se réduisent les protons est en cuivre, l'anode qui se corrode est en fer. La demande électronique de la cathode est d'autant plus importante que sa surface est plus grande par rapport à la surface de l'anode. Cette dernière fournit, en s'oxydant les électrons nécessaires. Il en résulte que la vitesse de corrosion varie dans le même sens que le rapport des surfaces cathode/anode.

Ce phénomène est mis en évidence sur le diagramme d'Evans ci-dessous.

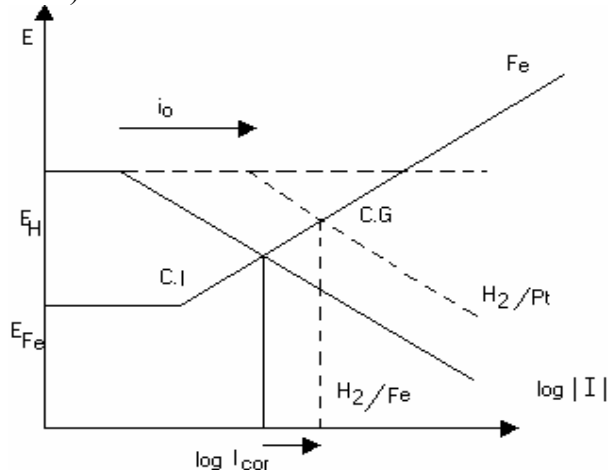
Lorsque le rapport des surfaces cathode/anode augmente, le courant d'échange correspondant au dégagement de  $H_2$  sur le cuivre  $i_0(H_2/Cu)$ , qui est égal au produit  $i_0.S_c$  augment, ce qui déplace vers des valeurs plus élevées le point de concours des droites de Tafel relatives aux deux couples concernés et donc accroît la vitesse de corrosion.



**Figure A4 :** Diagramme d'Evans de la corrosion galvanique du fer associé à du cuivre en milieu acide

- **Influence de la nature de la cathode**

Considérons le cas du fer plongé dans une solution acide de pH donné. Il subit une corrosion idiomorphique (point de concours C.I sur la figure ci-dessous). Si ce métal est associé électriquement à un métal sur lequel la vitesse de réduction de l'oxydant s'effectue plus rapidement que sur le métal lui-même, comme, par exemple, le platine (que l'on suppose de même surface), sa corrosion s'amplifie et devient une corrosion galvanique (point de concours C.G.).

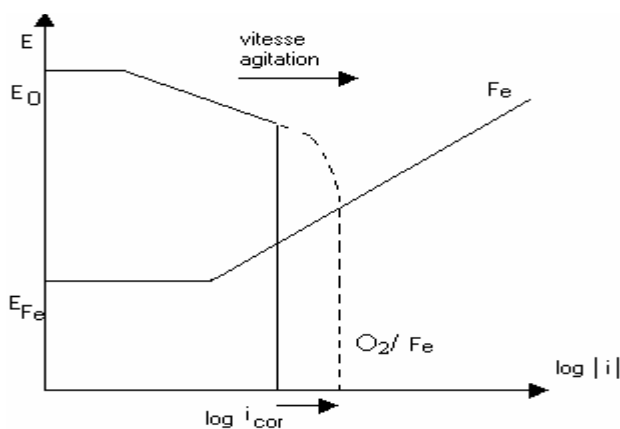


**Figure A5 :** Diagramme d'Evans du fer associé à un métal plus noble dans une solution acide

Le pouvoir oxydant de la solution ne varie pas ( $\bar{E}_H = \text{constante}$ ) mais la corrosion du fer augmente par association avec un métal sur lequel la vitesse de réduction du proton est plus rapide sur le fer lui-même.

- **Influence de l'agitation du milieu agressif**

Dans le cas où la vitesse de corrosion est sous la dépendance de la vitesse de diffusion de l'oxydant dans la solution agressive - phénomène souvent rencontré avec l'oxygène dissous, l'agitation de la solution influe sur la vitesse de corrosion. Le diagramme d'Evans ci-dessous est relatif à la corrosion du fer dans une solution contenant de l'oxygène dissous.



**Figure A6 :** Diagramme d'Evans de la corrosion idiomorphique du fer sous l'action de l'oxygène dissous-influence de la vitesse d'agitation

Deux vitesses d'agitation différentes étant prises en compte, on observe que le courant limite de diffusion qui impose la vitesse corrosion  $i_{cor}$  est d'autant plus important que l'agitation est plus rapide (pointillés).

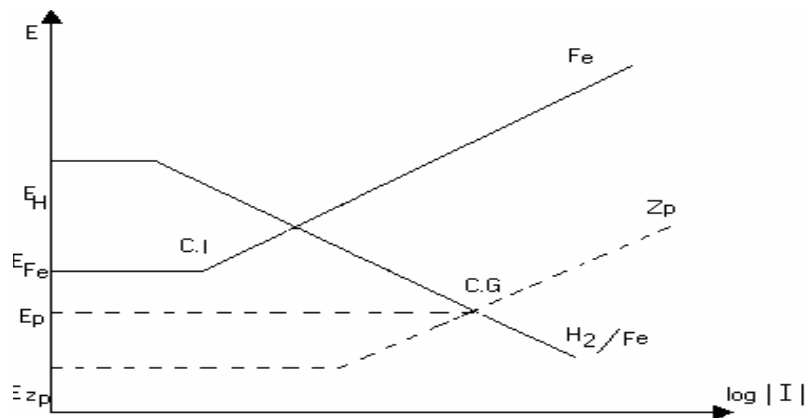


La vitesse de corrosion étant égale au courant limite de diffusion de l'oxygène :  $i_L = NfD_0C_0/\delta$ , celle-ci s'accélère sous l'influence d'une augmentation de la vitesse d'agitation qui réduit l'épaisseur  $\delta$  de la couche de diffusion.

- **Influence de l'association avec un métal plus corrodable**

La vitesse de corrosion d'un métal peut être diminuée, voire annulée en l'associant électriquement avec un métal plus réactif qui se corrode à sa place. C'est le principe de la protection cathodique par anode sacrificielle.

La figure ci-dessous représente le cas du fer plongé dans une solution acide.



**Figure A7 : Diagramme d'Evans du fer associé à un métal plus corrodable**

La corrosion idiomorphe de ce métal y est représentée en traits pleins –  
Les caractéristiques de cette corrosion sont les coordonnées du point de concours C.I. entre la droite de Tafel relative à la réduction du proton sur le fer et l'oxydation du fer

Lorsque le fer est associé électriquement avec du zinc (par exemple) dans ce même milieu (même droite de Tafel relative à la réduction du proton sur le fer, mais droite de Tafel plus anodique - pointillés - pour l'oxydation du zinc), ce dernier métal, plus corrodable ( $E_{Zn} < E_{Fe}$ ), s'oxyde en fournissant les électrons nécessaires à la réduction des protons sur le fer qui devient cathode. Le système combiné fer-zinc se place au potentiel de corrosion du zinc, qui, s'il est inférieur au potentiel d'équilibre du fer  $E_{Fe}$  immunise ce dernier. Le potentiel de corrosion du zinc est alors appelé "potentiel de protection" du fer  $E_p$ . La réduction des protons sur le zinc n'est pas considérée sur cette figure dans un souci de simplification car elle est moins rapide que la réduction des protons sur le fer.

- **Autres facteurs intervenant sur la vitesse de corrosion**

En dehors du phénomène de passivation qui modifie la surface du métal et dont nous traiterons dans le paragraphe suivant, certains produits (inhibiteurs) additionnés au milieu agressif, sont susceptibles de ralentir la corrosion. En effet, en influant sur l'état de surface du métal et sur les coefficients de transfert des processus cathodiques ou anodiques (ou les deux), ces produits modifient les pentes de Tafel (augmentation en valeur absolue).

De même la température influe sur la vitesse de corrosion : celle-ci est d'autant plus rapide que la température est plus élevée.

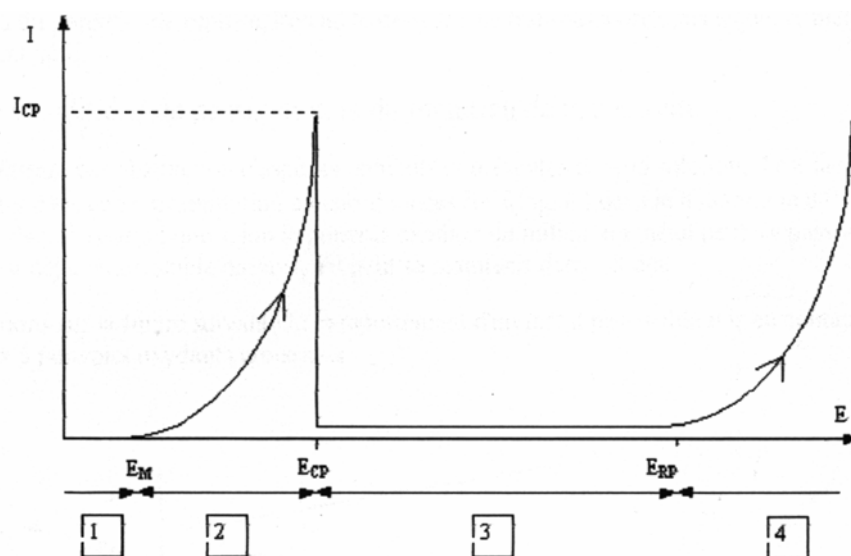
#### **A4 Passivation**

Certains métaux et alliages ont la propriété de se passiver. En contact avec milieu agressif, ils subissent une première attaque corrosive qui forme des produits de corrosion

suffisamment insolubles, adhérents et compacts (oxydes) pour isoler le métal comme par un revêtement – c'est la couche de passivation. La corrosion se ralentit considérablement après cette première attaque et seul un courant très se manifeste – c'est le courant de passivation.

#### A4.1 Courbe intensité - potentiel d'un métal passivable

Le phénomène de passivation peut être observé en traçant la courbe intensité - potentiel d'un métal passivable. Ainsi, la figure ci-dessous illustre le comportement d'un métal M plongé dans une solution conductrice dans laquelle toutes les espèces susceptibles de s'oxyder ou de se réduire dans le domaine de potentiel exploré sont supposées absentes afin de n'obtenir que la composante anodique relative à la seule oxydation du métal.



*Figure A8 : Courbe intensité - potentiel réduite à sa composante anodique d'un métal passivable*

On distingue sur la courbe plusieurs domaines séparés par trois potentiels remarquables :

- le potentiel d'équilibre du métal  $E_M$ ,
- le potentiel critique de passivation  $E_{cp}$ , est le potentiel au dessus duquel, la vitesse de corrosion devient très faible, le courant diminuant brutalement à partir d'une valeur appelée "courant critique de passivation",
- le potentiel de rupture  $E_{rp}$ , est le potentiel à partir duquel, la couche de passivation se désagrège et perd ses qualités de recouvrement – le métal se corrode à nouveau.

Ces domaines sont :

- 1 - domaine d'immunité
- 2 - domaine d'activité
- 3 - domaine de passivité
- 4 - domaine de transpassivité.

Dans le domaine d'immunité correspondant au cas où le potentiel appliqué est inférieur au potentiel d'équilibre du métal  $E < E_M$  le métal est cathodique, il est donc immunisé. Dans le cas où la solution contiendrait une espèce réductible dans ce domaine de potentiel, le métal jouerait le rôle de cathode sur laquelle cette espèce se réduirait.

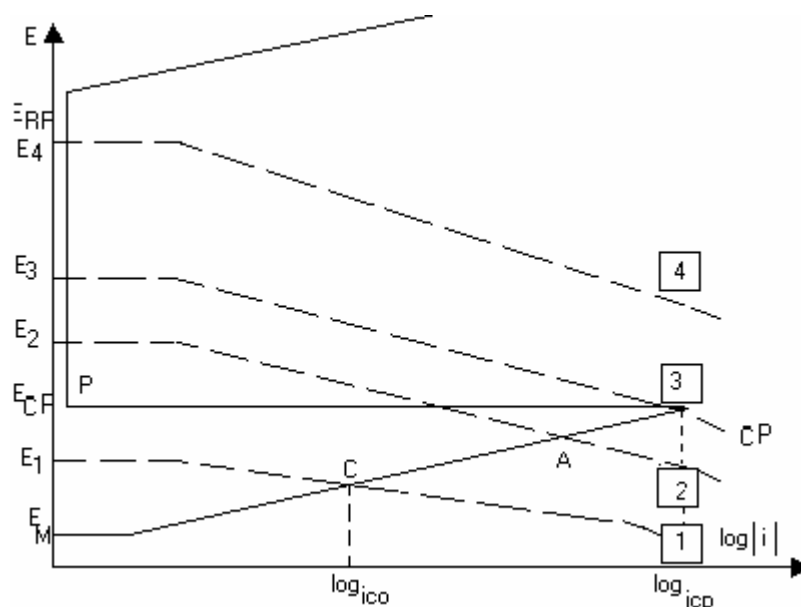
Dans le domaine d'activité, pour  $E_M < E_{CP}$ , le métal se corrodé d'autant plus rapidement que le potentiel augmente et cela jusqu'à la valeur limite du courant critique de passivation.

Entre le potentiel critique de passivation et le potentiel de rupture,  $E_{CP} < E < E_{RP}$ , dans le domaine de passivité la corrosion est insignifiante. Le faible courant qui se manifeste correspond à la régénération continue et lente de la mince couche de passivation (quelques manomètres).

Au delà du potentiel de rupture, s'étend le domaine de transpassivité dans lequel le métal redevient actif.

#### A4.2 Conditions de passivation et du maintien de la passivité

En ne faisant pas abstraction d'espèces réductibles présentes dans la solution, il est facile de constater dans une représentation en coordonnées  $\bar{E} = f(\log |i|)$  dans le diagramme d'Evans de sa courbe de polarisation que selon le pouvoir oxydant du milieu, un métal peut s'y passiver ou non et s'il est déjà, au préalable passiver, s'il peut se maintenir dans cet état. Examinons sur la figure suivante le comportement d'un métal passivable mis en contact avec des milieux à pouvoirs oxydants croissants.



**Figure A9 :** Comportement d'un métal passivable avec des milieux oxydants

- Le milieu **1** dont le pouvoir oxydant est le plus faible est en fait celui dans lequel le métal est **actif**. La passivation du métal ne peut pas être obtenue dans ce milieu il se corrodé avec la vitesse correspondant à l'abscisse du point C. Si ce métal avait été passivé avant d'entrer en contact avec cette solution, sa passivation ne pourrait se maintenir.

- Le milieu **2** est relatif à un comportement différent selon que le métal n'est pas au préalable passivé, il se corrodé alors avec la vitesse correspondant au point A, où s'il est passivé avant d'être mis en contact avec le milieu agressif, il est maintenu dans son état passif (point P). Cependant si, fortuitement, son état de surface vient à être modifié (rayure, abrasion,...) il passe à l'état actif (point A) – ce cas de figure correspond à l'état **actif-passif** du métal.

- Le milieu **3** présente le cas particulier pour lequel l'oxydant, pour une valeur du potentiel égale au potentiel critique de passivation, se réduit avec une vitesse égale au courant

critique de passivation. Ce cas est le cas limite qui définit les conditions nécessaires de la passivation qui sont :

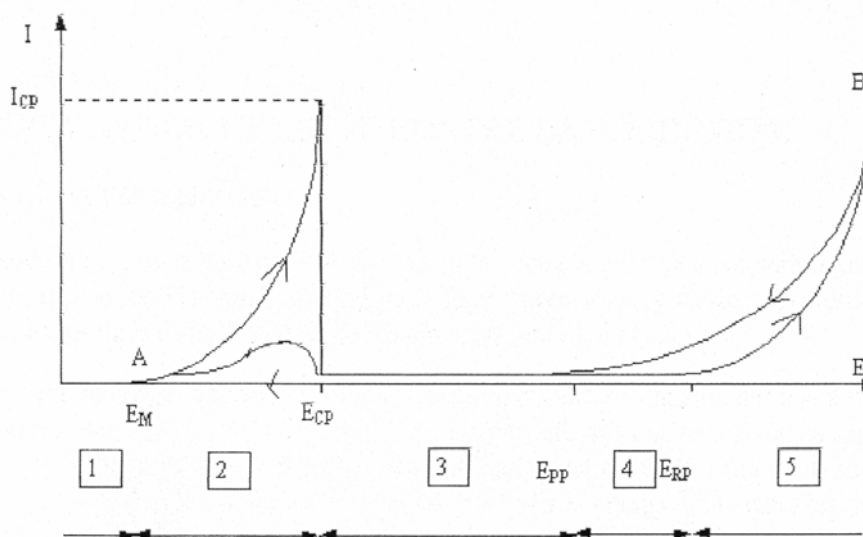
- potentiel d'équilibre de l'oxydant supérieur au potentiel critique de passivation du métal, et
- courant de dépolarisation de l'oxydant supérieur au courant critique de passivation du métal
- Le milieu 4 est celui pour lequel le métal peut se passiver ou maintenir sa passivation.

#### A4.3 Influence de la nature du métal ou de la composition de l'alliage

La passivité dépend beaucoup de la nature et de la composition du métal. En effet, le courant et le potentiel critiques de passivation dépendent de la composition du milieu corrosif mais surtout de la nature et de la quantité des éléments alliés au métal considéré. Ainsi le courant critique de passivation du fer dans une solution normale d'acide sulfurique est de l'ordre de  $0,2 \text{ A.cm}^{-2}$ , son potentiel d'équilibre positif par rapport à l'électrode normale à l'hydrogène, le courant critique de passivation d'un acier inoxydable austénitique (18 Cr-8 Ni) dans ce milieu valant environ  $20 \mu\text{A.cm}^{-2}$ , et son potentiel critique de passivation  $-38 \text{ V/ENH}$ , on en déduit que cet alliage conserve sa passivité dans ce milieu. Au cas où sous un effet mécanique (frottements), la couche de passivation viendrait à être détruite, elle se reformerait aussitôt en maintenant donc la passivité de cet alliage.

#### A4.4 Quelques renseignements tirés d'une courbe de polarisation

La figure ci-dessous représente la courbe anodique caractéristique d'un métal passivable obtenue par analyse potentio cinétique dans un milieu débarrassé de toute espèce réductible ou oxydable dans le domaine de potentiel exploré.



**Figure A10** : Courbe anodique d'un métal passivable obtenue par analyse potentio cinétique

Un balayage de potentiel aller-retour est à partir des potentiels les plus bas (point A). Comme déjà observé plus haut, la courbe présente le profil caractéristique du métal passivable jusqu'au point le plus haut du balayage (point B). En inversant le sens de la variation du potentiel, on constate que l'intensité du courant reste supérieure à sa valeur

mesurée dans la phase balayage direct jusqu'à un potentiel  $E_{pp}$  que l'on désigne par "potentiel de protection contre les piqûres", puis le courant prend une valeur proche de celle de l'aller mais en présentant pour le potentiel critique de passivation un courant critique moindre lié à une faible réactivation.

Le potentiel de protection contre les piqûres est un potentiel au dessous duquel aucune piqûre ne peut se former sur la surface d'un métal passive : dans le domaine de potentiel compris entre  $E_{cp}$  et  $E_{pp}$ , la couche de passivation en s'autorégénérant, protège le métal d'une corrosion trop importante. En dessus de ce domaine, et jusqu'au potentiel de rupture, le métal passive persiste dans cet état si sa couche de passivation ne présente pas de piqûre. Si, par contre, cette couche n'est pas intègre, les piqûres existantes (formées préalablement par, par exemple, une exploration de potentiel en dessus du potentiel de rupture), continuent de se développer – et donc courant d'oxydation supérieur. Il ne se forme cependant pas dans ce domaine de nouvelles piqûres. Il résulte de cette constatation que le potentiel  $E_{pp}$  est le potentiel maximum compatible avec l'absence de piqûre ou le non développement des piqûres résiduelles.

Pour récapituler, nous noterons que :

- pour  $E_{CP} < E < E_{PP}$ , le métal est protégé contre le développement des piqûres existantes et contre la formation de nouvelles piqûres,
- Pour  $E_{PP} < E < E_{RP}$ , le métal est protégé contre la formation de nouvelles piqûres mais les piqûres existantes se développent,
- Pour  $E > E_{RP}$ , la corrosion se généralise.

## ANNEXE B

### B1 Catégories d'alliages et domaines d'emploi

#### **B1.1 Les aciers inoxydables**

Ce sont des alliages fer-chrome contenant au moins 12 % de chrome dont la structure dépend des éléments d'addition : ainsi, le nickel (élément gamma gène) stabilise la structure austénitique, alors que le chrome et le molybdène favorisent la structure ferritique (éléments alpha gènes). Il en existe de nombreuses nuances et leur domaine d'utilisation est étroitement lié à leur composition et à leur structure. Le Tableau 3.1 regroupe quelques nuances classiques d'aciers inoxydables avec leur composition en éléments majeurs.

**Tableau B.1** : Nuances d'aciers inoxydables couramment employées

Nuance	Dénomination AFNOR / AISI	Composition
Austénitique	Z 2 CN 18.10* / 304 L	Cr 18%, Ni 10%, Fe
	Z 2 CND 17.12 / 316 L	Cr 17%, Ni 12%, Mo 1,5%, Fe
	Z 2 CNNb 25.20	Cr 25%, Ni 20%, Nb 0,25%, Fe
Ferritique	Z 6 C 13	Cr 13%, Fe
	Z 8 CD 17.01	Cr 17%, Mo 1%, Fe
	Z 1 CD 26.01	Cr 26%, Mo 1%, Fe
Austénoferritique	Z 5 CNDU 21.08	Cr 21%, Ni 8%, Mo 2,5%, Fe

\* : Signification de la norme AFNOR :

Z : aciers spéciaux, 2 : teneur en carbone (10<sup>-2</sup> %), C : chrome, N : nickel, D : molybdène, U : cuivre.

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables est essentiellement due à la formation en surface d'une couche passive qui apparaît naturellement à l'air et qui est constituée d'un oxyde riche en chrome, de faible épaisseur (environ 10 nm), et résistant. Ces matériaux doivent donc être employés dans des conditions où ils conservent cette passivité car des destructions locales de cette couche protectrice conduisent inévitablement à des phénomènes de corrosion localisée.

Sous réserve d'avoir une structure homogène, les aciers inoxydables sont d'un emploi courant dans les milieux aérés ou dans des conditions oxydantes telles que l'acide nitrique, les acides organiques (sauf formique et oxalique), et les solutions aqueuses diverses à toutes températures. Par contre, leur utilisation est à proscrire en présence d'hydracides (HCl, HBr, HF) mêmes dilués, de chlorures oxydants (FeCl<sub>3</sub>, CuCl<sub>2</sub>), d'eau de mer, et de thiosulfates ou chlorures plus oxygène en présence d'une contrainte.

#### **B1.2 Les alliages de cuivre**

Le cuivre résiste bien à la corrosion dans l'eau de mer, l'eau douce froide ou chaude, et les acides non oxydants désaérés et dilués. Son utilisation doit être évitée en présence d'acides oxydants, d'ammoniacque et d'amines, d'eau à grande vitesse de circulation (érosion corrosion), d'acide sulfhydrique, de soufre et de sulfures.

Les laitons (alliages de cuivre et de zinc) sont utilisés pour les tubes de condenseurs et les cupronickels (alliages de cuivre et de nickel) sont parfois utilisés dans des circuits de pompage car ils sont moins sensibles à l'érosion corrosion. Les autres alliages de cuivre d'utilisation courante sont les bronzes (alliages de cuivre et d'étain) et les cupro-aluminiums.

### B1.3 Les alliages d'aluminium

L'aluminium est un métal très actif qui doit sa résistance à la corrosion à la formation d'une couche d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) protectrice. Il est couramment utilisé en présence d'ammoniac, d'eau distillée, d'atmosphère industrielle ou urbaine, de soufre, de sulfures, et de fréons. Il faut éviter de l'employer dans les acides forts et les milieux caustiques, le mercure et ses sels, l'eau de mer ou l'eau contenant des métaux lourds comme le fer ou le cuivre. Très utilisé en aéronautique pour sa faible densité (2,7), sa résistance mécanique peut être améliorée par l'addition d'éléments d'alliage, tels que le cuivre (duralumins), le silicium, le magnésium, le zinc, le manganèse ou le lithium.

### B1.4 Les alliages de nickel

Le nickel résiste bien aux milieux caustiques (soude, potasse...) et aux acides non oxydants dilués. Son utilisation est à éviter en présence d'acides et sels oxydants, d'hypochlorites, d'eau de mer, et d'environnements soufrés ou sulfureux. Certains éléments d'alliage, notamment le chrome et le molybdène, permettent d'obtenir d'intéressantes propriétés de résistance à la corrosion :

Le *monel* (Cu 30 %, Ni) résiste à l'eau de mer circulant à grande vitesse (pompes, vannes) et à l'acide fluorhydrique anhydre, mais ne résiste pas aux solutions de soude concentrées et chaudes.

L'*Inconel 600* (Ni 75 %, Cr 16 %, Fe 7%) est surtout utilisé pour sa résistance à l'oxydation à chaud. Il est aussi le constituant des tubes d'échange des générateurs de vapeur des centrales nucléaires mais tend à être remplacé dans ce cas par l'*Inconel 690* (Ni 60 %, Cr 30 %, Fe 9 %) pour des raisons de sensibilité à la corrosion sous contrainte en eau à haute température.

Les *Hastelloys* (Ni 60 %, Mo 16 à 30 %, Cr 0 à 15 %) sont très résistants à de nombreux milieux oxydants, tels que les acides, les chlorures, ou le chlore gazeux.

### B1.5 Le titane

Comme l'aluminium, il doit sa résistance à la formation d'un oxyde protecteur ( $\text{TiO}_2$ ). Il est très utilisé en aéronautique et dans l'industrie en présence d'eau de mer, d'acide nitrique, de solutions oxydantes ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{CuSO}_4$ ), et d'hypochlorites. Il faut par contre éviter de l'employer dans des milieux comme HF,  $\text{F}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , les acides organiques, les solutions alcalines chaudes, les halogénures fondus, et, à haute température, dans l'air, l'azote ou l'hydrogène. Très sensible à l'endommagement par ce dernier, la formation d'hydrures de titane apparaît rapidement au dessus de 250 °C (ou moins dans le cas d'un chargement cathodique) et fragilise le métal.

### B1.6 Les alliages de zirconium

Le zirconium est un métal très oxydable qui se recouvre, comme l'aluminium et le titane, d'un oxyde protecteur de formule  $\text{ZrO}_2$  (zircone). Il est utilisé dans l'industrie chimique (milieux oxydants, milieux caustiques, acide chlorhydrique) et dans l'industrie nucléaire soit directement (usines de retraitement des déchets) soit sous forme d'alliage, le *zircaloy* (Sn 1,5 %, Fe 0,2 %, Cr 0,1 %) pour le gainage des éléments combustibles. Comme pour le

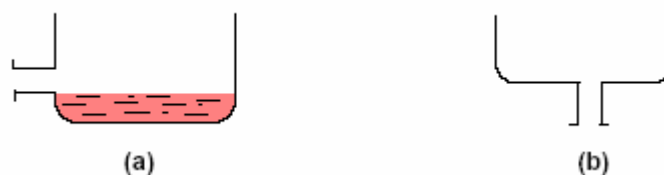
titane, par oxydation par l'eau ou la vapeur, le zirconium forme simultanément de la zircone et des hydrures, ces derniers pouvant fragiliser le matériau. Le zirconium et ses alliages ne doivent pas être employés en présence de chlorures oxydants, d'acide fluorhydrique et de fluorures, d'eau régale, d'acides organiques, et, à haute température, d'oxygène, d'azote ou d'hydrogène.

## **B2 Protection par la géométrie des pièces**

Il est possible de diminuer les risques de corrosion en donnant aux objets une forme adaptée aux conditions d'utilisation, et ainsi d'influencer notablement leur durée de vie. Nous aborderons ici quelques solutions types couramment employées pour limiter les risques en fonction du type de corrosion à redouter.

### **B2.1 Corrosion en zone humide**

La corrosion atmosphérique, forme de corrosion la plus fréquente, ne se produit qu'en présence d'humidité. La géométrie des composants employés devra donc viser dans ce cas à éviter les zones de rétention d'eau, soit en prévoyant un bon drainage, soit en assurant, par leur géométrie, la vidange complète des récipients (Figure B1).



*Figure B1 : Prévention par la forme du récipient. (a) : mauvais. (b) : correct*

Cet aspect est particulièrement important en génie civil et en architecture, où des éléments métalliques sont périodiquement exposés aux eaux de pluie. Dans certains cas, une bonne aération suffit à éviter les phénomènes de condensation. Par exemple, la corrosion des carrosseries d'automobiles commence souvent aux portières en se développant de l'intérieur, où l'humidité s'accumule, vers l'extérieur. Des trous d'aération évitent alors cette accumulation et diminuent ainsi le risque de corrosion.

### **B2.2 Corrosion galvanique**

Ainsi que nous l'avons vu, un contact électrique et électrolytique entre des matériaux différents peut donner lieu à la formation d'une pile galvanique pouvant entraîner une corrosion accélérée du métal le moins noble. Lorsque des impératifs autres que la résistance à la corrosion empêchent l'utilisation de matériaux adaptés, on peut se prémunir contre ce risque en incluant dans le circuit une "pièce sacrificielle" aisément remplaçable ou en supprimant le contact entre les matériaux au moyen d'un isolant (Figure B2). Cette dernière solution est adoptée par exemple pour la protection de certains composants électroniques que l'on noie dans un polymère isolant.

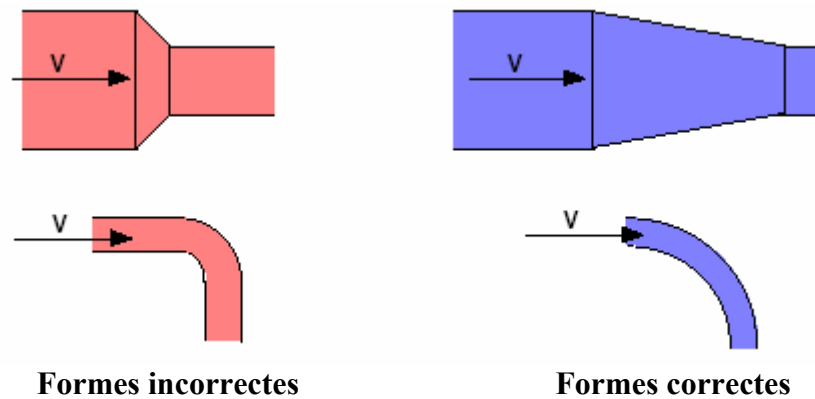


*Figure B2 : Protection contre la corrosion galvanique  
(a) isolation électrique, (b) pièce sacrificielle*



### B2.3 Corrosion - érosion et corrosion - cavitation

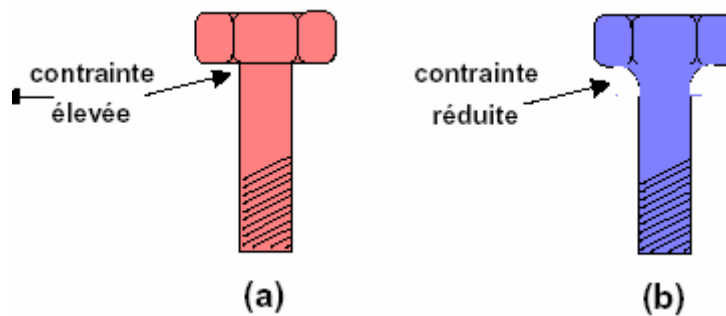
Le risque d'apparition de ces phénomènes peut être diminué par une conception appropriée des canalisations véhiculant des fluides à vitesse élevée. On évitera en particulier les variations brutales de section créant des zones de turbulence ou les changements brusques de direction (Figure B3).



*Figure B3 : Diminution des risques de corrosion - érosion et de corrosion - cavitation*

### B2.4 Corrosion sous contrainte

Une action préventive peut être entreprise sur la géométrie des structures. En effet, pour une même sollicitation globale appliquée, la distribution des contraintes dans une pièce peut dépendre de sa géométrie. On adoptera donc dans la mesure du possible des formes permettant de supprimer ou au moins de réduire les zones de concentration de contraintes. La figure B4 montre un exemple d'une telle application à une tête de vis.



*Figure B4 : Réduction des contraintes locales dans une tête de vis*

## B3 Techniques de revêtement métallique

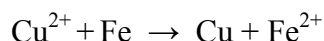
Suivant le type de matériau à protéger et le matériau de revêtement envisagé, différentes techniques de mise en place peuvent être utilisées. Dans ce paragraphe, nous décrirons brièvement les méthodes les plus couramment employées.

**Les dépôts électrolytiques:** Ce sont des dépôts métalliques réalisés à partir d'une solution contenant les ions du métal à déposer ainsi que des agents complexants, des agents tampons ou des additifs organiques visant à améliorer les qualités (brillance, dureté, adhérence...) du revêtement réalisé. La vitesse de dépôt est directement liée à la densité de courant circulant dans la cellule d'électrolyse dont la pièce à revêtir constitue la cathode,

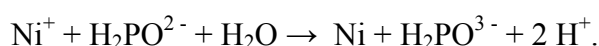
l'anode pouvant être un barreau du métal à déposer (anode soluble), ou un matériau inerte. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de régénérer périodiquement la solution.

C'est une méthode couramment utilisée car un grand nombre de matériaux se prêtent bien à l'électrodéposition (Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Sn, Au, Ag, Pd, Pt,...). De plus, cette méthode convient aussi bien au revêtement de petites pièces en vrac qu'au dépôt en continu et à grande vitesse sur des tôles. Par exemple, lors de la galvanisation de l'acier, on atteint des vitesses de dépôt de l'ordre de  $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sur des tôles se déplaçant dans l'électrolyte à une vitesse supérieure à  $1 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Les inconvénients majeurs de cette méthode sont l'importance de l'état de surface des pièces à revêtir et la nécessité d'avoir parfois recours à des sous-couches.

**Les dépôts chimiques (ou autocatalytiques):** La réalisation d'un dépôt chimique consiste à réduire les ions en solution du métal à déposer soit par réaction avec la surface du matériau à recouvrir, soit par réaction avec un autre corps présent dans la solution. Dans le premier cas par exemple on déposera du cuivre sur un substrat d'acier selon la réaction :

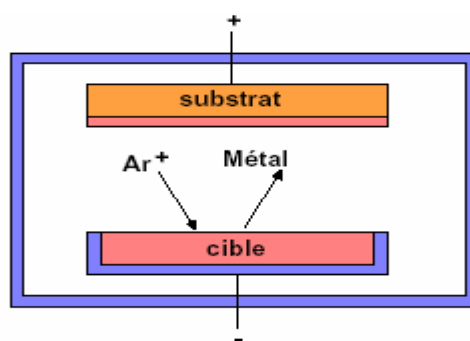


Le deuxième procédé sert surtout à effectuer un revêtement de nickel (nickel Kanigen) à l'aide d'une solution contenant un sel de nickel et de l'hypophosphite de sodium comme agent réducteur selon la réaction :



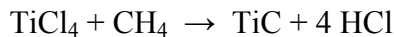
Dans le cas d'une argenture, on utilise comme agent réducteur le glucose ou le formol. L'avantage de cette méthode de dépôt est que, contrairement à la méthode électrolytique, elle peut s'appliquer à des matériaux non conducteurs comme les polymères.

**Les dépôts en phase vapeur:** Le dépôt en phase gazeuse d'un métal ou d'un composé réfractaire du type carbure, nitrure, ou borure, peut se faire soit par voie physique (dépôt PVD -Physical Vapour Deposit), soit par voie chimique (dépôt CVD -Chemical Vapour Deposit). Parmi les dépôts PVD, la pulvérisation cathodique est le plus important : les atomes du matériau à déposer sont expulsés d'une cible par un bombardement de particules (par exemple des ions argon). La vitesse de dépôt est lente ( $3 \text{ à } 30 \text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) mais on obtient une bonne adhérence et un bon recouvrement. Le principe de ce mode de dépôt est représenté à la figure B5. Dans une enceinte à vide, contenant une faible pression d'un gaz (argon), on applique une tension de l'ordre de 2000 V entre la cible (cathode) et le substrat à revêtir (anode). Il en résulte un plasma et le champ électrique accélère les ions  $\text{Ar}^+$  du plasma vers la cible qu'ils vont heurter. Ces collisions éjectent des atomes de la cible qui vont se déposer sur le substrat.



*Figure B5 : Schéma de principe d'une enceinte pour dépôts par pulvérisation cathodique*

Dans les procédés CVD, on utilise un mélange de gaz contenant un composé volatil du matériau à déposer et un réducteur comme par exemple l'hydrogène ou le méthane. Quand on introduit ce mélange dans l'enceinte de réaction, le composé volatil se réduit à la surface du substrat pour former le dépôt. Ce type de réaction s'effectue en général à température élevée qui favorise la diffusion du dépôt. Par exemple, on réalise un dépôt de carbure de titane à des températures comprises entre 800 et 1100 °C selon la réaction :



**Les dépôts par immersion:** C'est une des méthodes de protection la plus ancienne qui consiste à plonger le métal à recouvrir dans un bain fondu du métal de revêtement. C'est un procédé classique permettant de recouvrir l'acier de zinc (galvanisation). D'autres métaux à bas point de fusion peuvent aussi être déposés par ce procédé tels que l'étain, le plomb, ou l'aluminium. L'épaisseur du dépôt obtenu est en général fonction de la durée d'immersion et la température favorise la création d'une zone d'interdiffusion à l'interface revêtement-substrat assurant ainsi une bonne adhérence.

**Les dépôts par projection à chaud (shoopage):** La matière, sous forme de poudre, fil, ou cordon, est fondue au chalumeau ou à l'arc et projetée sur le substrat au moyen d'un pistolet. Les épaisseurs déposées vont de quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres avec une porosité résiduelle de 1 à 10%.

On peut enfin citer d'autres techniques de revêtement comme le placage par explosion ou le colaminage, et le beurrage (dépôt par soudage).

#### **B4 Les couches de conversion**

On différencie les couches de conversion selon leur procédé de fabrication, à savoir :

##### **L'anodisation**

Surtout pratiqué sur l'aluminium, ce procédé consiste à renforcer la couche naturelle protectrice par une oxydation anodique. Cette dernière est réalisée en immergeant la pièce en aluminium dans un bain approprié (par exemple de l'acide sulfurique) et en appliquant une tension de 15 à 25 V pendant 30 à 60 min. Il se forme alors une couche d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  anhydre d'une épaisseur de plusieurs micromètres. Cette couche étant poreuse, on termine le traitement par un colmatage en immergeant la pièce pendant quelques minutes dans de l'eau bouillante afin de former un oxyde hydraté compact, la boehmite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Outre les propriétés de résistance à la corrosion, l'anodisation peut servir à des fins décoratives grâce aux colorations obtenues, notamment dans le cas du titane.

##### **La phosphatation**

Ce procédé est surtout appliqué aux aciers ordinaires (parkérisation). Par immersion ou brossage avec une solution acide de phosphate de zinc ou de manganèse comportant des accélérateurs tels que  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{ClO}_3^-$ , ou  $\text{NO}_3^-$ , on obtient un réseau poreux de phosphates métalliques en couche mince (1 à 2  $\mu\text{m}$ ) servant de base d'accrochage aux peintures. En couches plus épaisses, ce traitement seul permet d'obtenir une bonne protection contre la corrosion par l'incorporation d'inhibiteurs.

##### **La chromatation**

Elle s'applique principalement au zinc, à l'aluminium et au cadmium. On l'obtient en immergeant la pièce pendant quelques secondes dans une solution acidifiée de bichromate

de sodium à température ambiante. Sur le zinc, la couche de chromates ainsi obtenue, d'une légère couleur jaune, protège le matériau contre les attaques superficielles dues à des condensations.

## **B5 Les revêtements organiques**

Les revêtements organiques forment une barrière plus ou moins imperméable entre le matériau et le milieu. Ils se divisent en trois familles :

- Les peintures et vernis;
- les bitumes;
- Les revêtements polymériques.

### **B5.1 Les peintures et vernis**

Une peinture est un mélange composé de particules insolubles (les pigments) en suspension dans un milieu aqueux ou organique constitué par un liant et un solvant. Les pigments assurent l'inhibition de la corrosion et peuvent également avoir une fonction décorative. Le liant assure la cohésion du film et son adhérence au substrat, tandis que le solvant permet d'appliquer la peinture à l'état liquide. En général, l'application d'une peinture consiste en un traitement multicouches d'une épaisseur totale de 100 à 200  $\mu\text{m}$  comprenant :

Une couche *primaire* adhérente au métal qui contient les pigments destinés à retarder l'oxydation du matériau (épaisseur 10 à 40  $\mu\text{m}$ ). On distingue les peintures primaires réactives 'PPR' (*wash primer*) et les peintures primaires d'atelier (*shops primer*). Les premières sont des solutions phosphatantes ou chromatantes qui, comme déjà mentionné, favorisent l'accrochage des couches ultérieures. Les secondes, plus épaisses, ont un rôle protecteur plus marqué. D'autres peintures primaires ont un rôle protecteur contre la corrosion par alcalinisation (minium) ou par effet galvanique (peinture au zinc).

Des couches *intermédiaires* qui renforcent la protection, augmentent l'étanchéité et diminuent les irrégularités.

Une couche de  *finition* pour l'étanchéité et l'esthétique.

### **B5.2 Les bitumes**

On les utilise principalement pour protéger des structures enterrées en acier ou en fonte. Ils se présentent en général sous la forme d'un revêtement épais (5 mm environ), dont la plasticité réduit considérablement les risques de dégradation mécanique.

### **B5.3 Les revêtements polymériques**

Il existe une grande variété de ce type de revêtement comme les *thermoplastes* (polyéthylène, polypropylène, PVC, PTFE,...), les *caoutchoucs* (naturel ou synthétique), et les *thermodurcissables* (polyuréthane, époxydes, polyesters,...).

Leur épaisseur est normalement de 100 à 500  $\mu\text{m}$ . On les applique par divers procédés : par poudre, au pistolet, par laminage, par immersion. L'application par poudre est particulièrement répandue pour les thermoplastes, soit par immersion dans un lit de poudre agité, soit par projection au pistolet. L'objet ainsi recouvert subit ensuite un recuit entraînant la transformation de la poudre en un revêtement polymérique compact.

Les produits thermodurcissables sont, quant à eux, souvent employés à l'état liquide, la solution contenant un mélange de résine et de durcisseur. Ils se distinguent des peintures et vernis par le fait qu'ils produisent en général des couches plus épaisses.

Il faut souligner que, comme pour les peintures, l'absence de défauts joue un rôle primordial pour ces types de revêtements. Leur résistance mécanique peut donc jouer un rôle important dans le cas de pièces travaillant dans des conditions sévères. Par exemple, des tuyaux métalliques flexibles recouverts de Rilsan sont utilisés dans l'industrie pétrolière offshore pour l'acheminement du brut. Dans de telles conditions, un déchirement local du revêtement peut entraîner une corrosion rapide du métal sous jacent par infiltration d'eau de mer.

### **B6 Revêtements étrangers au substrat**

On regroupe dans cette catégorie les revêtements à base de ciment utilisés en génie civil et que l'on applique aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de canalisations enterrées en acier ou en fonte. D'autres matériaux sont aussi utilisés comme l'émail que l'on applique sous forme de pâte (barbotine) et qui offre une bonne protection contre les gaz à haute température (tuyères d'échappement). Les céramiques déposées par procédé PVD ou CVD que nous avons déjà mentionné font aussi partie de cette catégorie.

## ANNEXE C

### **1. Appareillage de mesure**

Il est constitué des éléments suivants :

- Electrodes de référence;
- Voltmètres;
- Ampèremètres;
- Voltmètre-ampèremètre enregistreurs.

#### **a- Electrodes de référence**

Ces électrodes servent de référence à toute mesure de potentiel dans un électrolyte. Ce sont des demi-piles de valeurs constantes, basées sur le principe qu'un métal prend un potentiel bien défini dans une solution d'électrolyte, elle aussi bien définie.

L'électrode à hydrogène sert de référence à toutes les autres électrodes. Les électrodes impolarisables les plus utilisées sont précisées ci-après [2, 4, 6].

##### Electrode au cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO<sub>4</sub>)

Elle est constituée par un réservoir généralement cylindrique en matière plastique, obturé à sa base par un bouchon en bois poreux (pin dérésiné, balsa...) et rempli de solution saturée de sulfate de cuivre, dans laquelle plonge une tige de cuivre.

##### Electrode à l'argent-chlorure d'argent (Ag/Ag Cl)

Constituée comme la précédente, elle est remplie d'une solution saturée de chlorure d'argent dans laquelle plonge une tige d'argent.

Pour les mesures en eau de mer, l'électrode est constituée par un simple fil d'argent chloruré. Cette électrode doit être, au préalable, calibrée par rapport à une électrode au calomel.

##### Electrode au calomel saturé (Hg/Hg Cl/KCl)

Electrode en zinc: c'est un barreau zinc, monté sur un support isolant. Lors des mesures effectuées avec ces électrodes, il est impératif de vérifier et, si nécessaire, de compléter la solution saturée. Pour effectuer des mesures en continu, qui permettent un contrôle permanent, il existe des électrodes où le liquide est remplacé par un gel de la solution saturée (GDF, SECCO,.); elles peuvent alors être enterrées ou immergées.

Quel que soit le type de l'électrode, il importe de s'assurer du bon état de propreté de la tige de métal, au niveau de la solution, de la connexion,..., avant d'effectuer la mesure.

#### **b- Voltmètres**

Ils sont utilisés pour effectuer les mesures instantanées de potentiel. Leur impédance d'entrée doit être importante ( $> 50 \text{ k}\Omega / \text{V}$ ). Leur affichage peut être à aiguille ou digital. Un appareil autonome en énergie, robuste et facilement transportable est recommandé.

#### **c- Ampèremètres**

Ces appareils doivent avoir une faible résistance interne, pour mesurer les faibles courants circulant dans les liaisons ou les circuits d'anodes sacrificielles; ils doivent posséder les mêmes qualités de construction que les voltmètres.

### d- Voltmètre-ampèremètre enregistreurs

Ces appareils sont indispensables lorsque le potentiel ou le courant ne sont pas stables. L'élément de mesure doit posséder les mêmes qualités que celles citées précédemment. L'enregistreur associé. . Peut posséder une ou plusieurs voies. L'ensemble doit avoir une autonomie suffisante (une semaine par exemple) en ce qui concerne l'encre, le déroulement du papier et l'alimentation des circuits de mesure. Cet appareil doit être robuste, facilement transportable, et présenté dans un coffret étanche. Le fonctionnement de l'enregistreur sur une plage de température extérieure allant de  $-10$  à  $+50$  °C doit être éprouvé.

## 2. Contrôle et surveillance de la protection cathodique

Il est impératif que le propriétaire des structures s'intéresse au contrôle de leur protection cathodique. Ce contrôle consiste essentiellement à vérifier le fonctionnement correct des sources délivrant les potentiels et à s'assurer que le potentiel de la structure, par rapport à l'électrode Cu-CuSO<sub>4</sub>, est plus négatif que [2, 6, 7] :

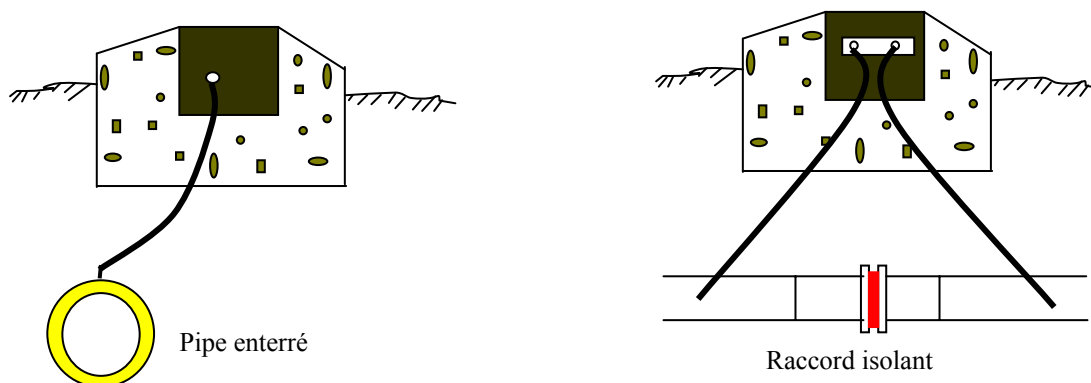
- 0,850 V pour l'Acier
- 0,700 V pour le Plomb
- 0,600 pour le Cuivre

Les mesures de potentiel devront être systématiques et périodiques (au moins deux contrôles annuels). Quant à l'entretien des appareils de soutirage ou de drainage, une visite trimestrielle semble suffisante.

### 2.1 Les prises de potentiel

Les prises de potentiel vont permettre de contrôler le comportement de la structure. Elles sont placées à des distances comprises entre quelques centaines de mètres à quelques km. On préconise tous les km, mais l'intervalle dépend d'autres paramètres tels que l'accessibilité, la proximité d'énergie électrique, la résistivité du sol,...

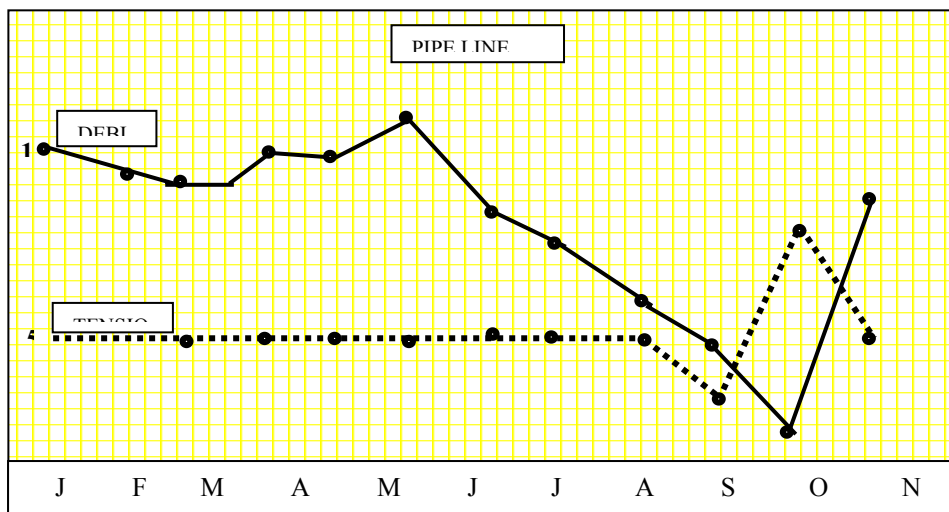
La prise de potentiel s'effectue à l'aide d'une pièce métallique (rondin d'acier de 20 mm de diamètre, câble électrique 10,16 ou 25 mm<sup>2</sup> revêtu,...) soudée sur le tube et accessible par une boîte extérieure (bouche à clé en fonte, calot en béton couvert...) [2, 6].



*Figure C1 : Exemples de prises de potentiel*

Les appareils de contrôles placés sur ces installations (ampèremètres, voltmètres, indicateurs de défaut,...) devront être lus une fois par semaine et l'évolution de ces paramètres donnera une idée précise de la qualité de la protection.

Pour illustrer cet intérêt, observons le diagramme de fonctionnement d'un appareil de soutirage pour un pipeline d'une raffinerie (Figure C2). On voit qu'à partir du mois de Juin, il y a une baisse constante du débit, la tension restant constante. Ceci provient d'une augmentation de la résistance du circuit, c'est-à-dire celle des anodes déversoirs.



*Figure C2 : Diagramme de fonctionnement d'un poste de soutirage*

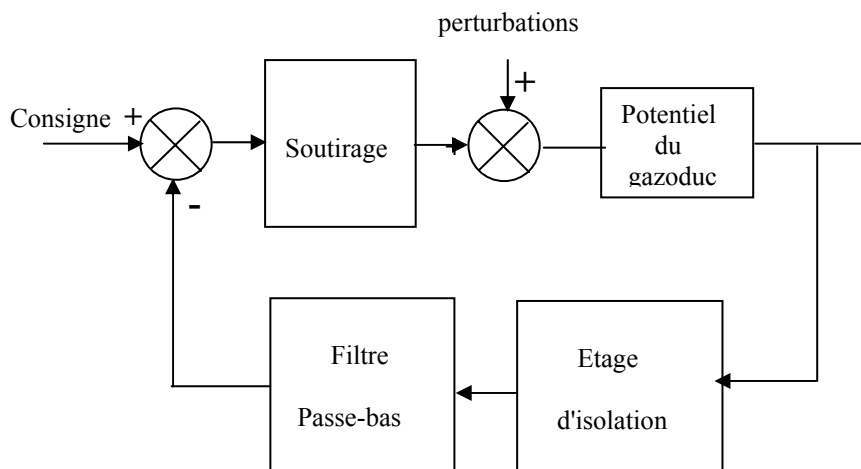
Effectivement, un contrôle a permis de constater la rupture de la connexion du câble au niveau de la soudure d'anode. (corrosion de la soudure). Le défaut ayant été corrigé, le débit est devenu normal [6].

De façon générale, les interventions manuelles sont complexes, longues et coûteuses et la tendance générale est de les automatiser au maximum.

## 2.2 Soutirage

Sur l'appareil classique tel que nous avons décrit, il faut agir manuellement pour corriger d'éventuelles variations du potentiel de la structure à protéger. [2, 6]

Des régulations électroniques ont été mises en œuvre depuis longtemps. Elles servent à asservir le débit du soutirage au potentiel structure/sol (Figure C3).



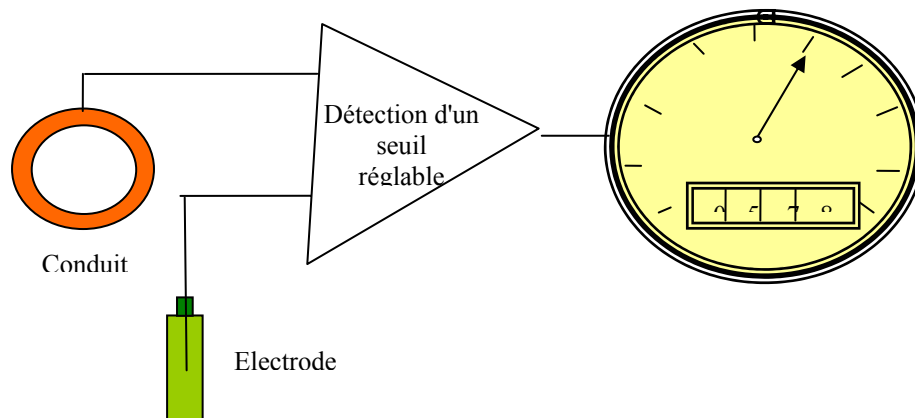
*Figure A3 : Régulation de soutirage*



La régulation compare le potentiel de la structure à une valeur de consigne. S'il est inférieur, le débit s'annule et s'il est supérieur, le débit augmente. Le résultat sera que le potentiel structure/sol reste égal à la consigne.

### 2.3 Contrôle par compteur autonome

Il arrive que certains points d'une conduite (en général les points éloignés des soutirages ou des zones de mauvais revêtement, etc...) devront être surveillés plus particulièrement. On y place alors un compteur connu sous le nom de "horodéfaut" qui comptabilise le temps pendant lequel le potentiel du point est supérieur à une certaine valeur (-0,85 V par exemple). L'autonomie de fonctionnement de ce compteur est d'une année. [2]



*Figure C4 : Compteur horaire*

### 2.4 Télésurveillance

Une surveillance rigoureuse de la protection cathodique est impérative mais elle implique des déplacements de personnel et les frais correspondants. C'est pourquoi différents dispositifs ont été mis en œuvre pour la transmission à distance des mesures: [2, 6]

- Téléransmission par lignes téléphoniques
- Téléransmission par liaison radio (parfois l'émetteur à une portée réduite et le récepteur est installé dans un avion, qui par un passage, recueille les données)
- Téléransmission sonar (dans les milieux aquatiques)
- Téléransmission en utilisant la conduite comme support de transmission.

## ANNEXE D

### Multicrystalline Photovoltaic Modules 50-Watt & 40-Watt

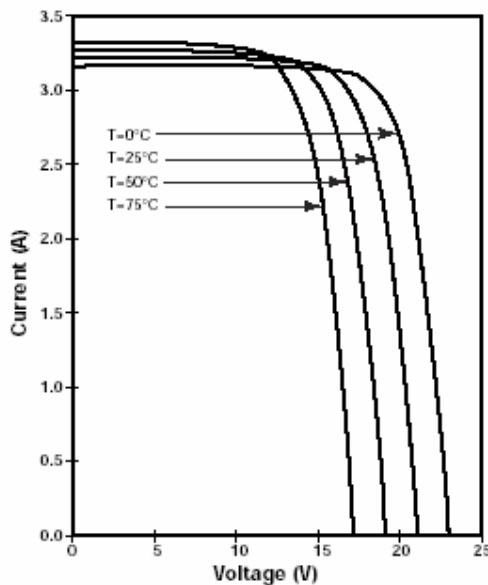
#### Electrical Characteristics<sup>1</sup>

	SX 50	SX 40
Maximum power ( $P_{max}$ ) <sup>2</sup>	50W	40W
Voltage at $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	16.8V	16.8V
Current at $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	2.97A	2.37A
Warranted minimum $P_{max}$	45W	36W
Short-circuit current ( $I_{sc}$ )	3.23A	2.58A
Open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	21.0V	21.0V
Maximum series fuse	20A	5A
Temperature coefficient of $I_{sc}$	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of $V_{oc}$	-(80±10)mV/°C	
Temperature coefficient of power	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT <sup>3</sup>	47±2°C	
Maximum system voltage	600V (U.S. NEC rating) 1000V (TÜV Rheinland rating)	

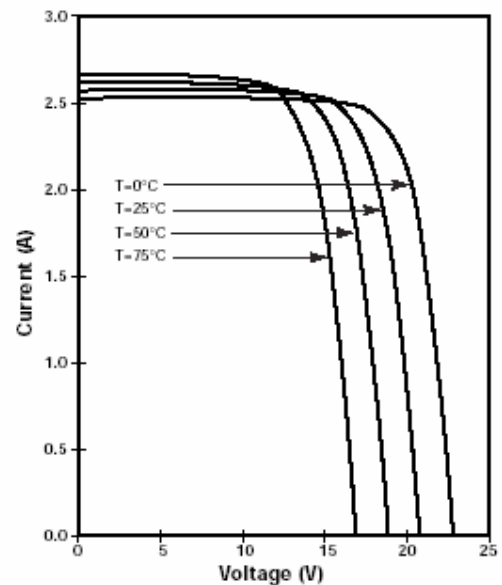
#### Notes

- These data represent the performance of typical modules in 12V configuration as measured at their output, and do not include the effect of such additional equipment as diodes. The data are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (Standard Reporting Conditions, also known as STC or Standard Test Conditions), which are:
  - illumination of 1 kW/m<sup>2</sup> (1 sun) at spectral distribution of AM 1.5 (ASTM E892 global spectral irradiance);
  - cell temperature of 25°C.
- During the stabilization process which occurs during the first few months of deployment, module power may decrease approximately 3% from typical  $P_{max}$ .
- The cells in an illuminated module operate hotter than the ambient temperature. NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) is an indicator of this temperature differential, and is the cell temperature under Standard Operating Conditions: ambient temperature of 20°C, solar irradiation of 0.8 kW/m<sup>2</sup>, and wind speed of 1m/s.

SX 50 I-V Curves



SX 40 I-V Curves



## Quality and Safety

All SX 50 and 40 modules are certified by PowerMark Corporation, certified by TÜV Rheinland as Class II equipment, listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating), and compliant with the requirements of IEC 61215, including:

- repetitive cycling between -40°C and 85°C at 85% relative humidity;
- simulated impact of 25mm (one-inch) hail at terminal velocity;
- a "damp heat" test, consisting of 1000 hours of exposure to 85°C and 85% relative humidity;

- a "hot-spot" test, which determines a module's ability to tolerate localized shadowing (which can cause reverse-biased operation and localized heating);
- static loading, front and back, of 2400 pascals (50 psf); front loading (e.g. snow) of 5400 pascals (113 psf, U only).

The SX 50U and 40U are also approved by Factory Mutual Research for application in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

## Mechanical Characteristics

### Weight

SX 50M	5.7 kg (12.5 pounds)
SX 50U	6.3 kg (13.9 pounds)
SX 40M	4.9 kg (10.6 pounds)
SX 40U	5.4 kg (11.8 pounds)

### Dimensions

Unbracketed dimensions are in millimeters.  
Bracketed dimensions are in inches.  
Overall tolerances  $\pm 3\text{mm}$  (1/8")

